

2016

Évaluation de l'efficacité d'un filtre N95 contre des particules ultrafines, dont les nanoparticules, en mode de débits d'air constant et cyclique simulant la respiration des travailleurs

Ali Bahloul
IRSST, ali.bahloul@irsst.qc.ca

Fariborz Haghighat
Concordia University

Reza Mostofi
Concordia University

Alireza Mahdavi
Concordia University

Claude Ostiguy
IRSST

Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Bahloul, A., Haghighat, F., Mostofi, R., Mahdavi, A. et Ostiguy, C. (2016). *Évaluation de l'efficacité d'un filtre N95 contre des particules ultrafines, dont les nanoparticules, en mode de débits d'air constant et cyclique simulant la respiration des travailleurs* (Rapport n° R-932). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-932



Évaluation de l'efficacité d'un filtre N95 contre des particules ultrafines, dont les nanoparticules, en mode de débits d'air constant et cyclique simulant la respiration des travailleurs

*Ali Bahloul
Fariborz Haghghat
Reza Mostofi
Alireza Mahdavi
Claude Ostiguy*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST. Abonnement : preventionautravail.com

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2016
ISBN : 978-2-89631-885-8 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Mai 2016

Prévention des risques chimiques et biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-932

Évaluation de l'efficacité d'un filtre N95 contre des particules ultrafines, dont les nanoparticules, en mode de débits d'air constant et cyclique simulant la respiration des travailleurs

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Ali Bahloul¹,
Fariborz Haghighat², Reza Mostof², Alireza Mahdavi²,
Claude Ostiguy¹*

¹IRSST
²Université Concordia

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leur gratitude à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Ils souhaitent également remercier Simon Demers, Pierre Drouin, Gilles Paradis et Yves Cloutier de l'IRSST pour leur précieuse contribution au maintien des installations expérimentales.

SOMMAIRE

On trouve des particules ultrafines (PUF), soit des particules dont le diamètre (D_p) est inférieur à 100 nm, dans de nombreux milieux de travail industriels, où leur inhalation peut, à long terme, causer de graves problèmes de santé. Dans certains contextes, les mesures d'ingénierie et les contrôles administratifs sont insuffisants pour protéger adéquatement les travailleurs contre l'exposition aux PUF. Un dispositif de protection personnel est alors requis, et les appareils de protection respiratoire à pièce faciale filtrante (APR) de type N95 sont ceux qu'utilisent le plus couramment les travailleurs de l'industrie et de la santé.

Une étude antérieure sur l'efficacité des filtres N95 à capter un aérosol polydispersé dans des conditions de débit d'air constant a révélé qu'avec ces filtres, le taux de pénétration maximale était dû à des particules dont la taille était inférieure à 100 nm, et que ce taux dépassait le seuil de pénétration de 5 % lorsque le débit d'air était supérieur à 85 l/min. La présente étude porte sur l'évaluation de l'efficacité des APR de type N95 dans des conditions de débit d'air cyclique plus représentatives de la respiration humaine.

La méthodologie expérimentale précédemment utilisée pour évaluer l'efficacité des APR de type N95 dans des conditions de débit d'air constant a été adaptée à des conditions de débit d'air cyclique. Un premier objectif était d'étudier l'impact de la fréquence respiratoire et du débit d'inhalation sur l'efficacité des APR de type N95. Des essais ont ainsi été effectués pour deux débits d'inhalation de pointe (DIP), soit 135 et 360 l/min, et deux fréquences respiratoires, soit 24 et 42 respirations par minute (RPM), pour un total de quatre débits d'air cycliques. Un second objectif était de comparer l'efficacité des APR de type N95 dans des conditions de débit d'air cyclique avec les résultats obtenus dans des conditions de débit d'air constant égal au volume minute, au débit d'inhalation moyen (DIM) et au DIP du débit d'air cyclique. Le volume minute se définit comme le volume moyen d'air inhalé pendant une minute de respiration, alors que le DIM correspond au volume moyen d'air inhalé par cycle inhalatoire, et que le DIP correspond au débit maximal enregistré durant un quelconque cycle inhalatoire. Les débits d'air cycliques et constants retenus (et les DIM équivalents) allaient de 42 à 360 l/min. Enfin, l'impact du temps de colmatage sur l'efficacité des APR de type N95 a été étudié dans des conditions de débit d'air cyclique et constant sur des périodes allant jusqu'à six heures. Un débit d'air cyclique (avec un DIM équivalent de 170 l/min) et deux débits d'air constants, respectivement de 85 et 170 l/min, ont été retenus à cette fin. Dans tous les essais, les filtres ont été exposés à des particules de NaCl polydispersées dont la taille variait de 10 à 205,4 nm.

Les résultats obtenus indiquent qu'une augmentation du DIP et de la fréquence respiratoire est susceptible de rehausser le taux de pénétration des particules à travers les APR de type N95. Cela dit, l'effet du DIP s'est avéré beaucoup plus important que l'effet de la fréquence respiratoire. Il a par ailleurs été démontré que parmi trois conditions de débit d'air constant égal au volume minute, au DIM et au DIP du débit d'air cyclique, celle où le débit d'air constant était égal au DIM constituait le meilleur prédicteur du taux de pénétration initiale observé avec des APR de type N95 dans des conditions d'air cyclique.

Enfin, on a constaté que le colmatage du filtre avait un impact significatif sur la pénétration des particules à travers les APR de type N95, et que la variation du taux de pénétration, selon le temps de colmatage, dépendait grandement du degré d'humidité relative (HR). À un faible degré d'HR, le niveau de protection augmentait avec le colmatage du filtre par des particules. Le taux de pénétration des plus petites particules (généralement < 100 nm) diminuait sensiblement à la suite d'une exposition prolongée du filtre, et on observait parallèlement une nette augmentation de la taille des particules les plus pénétrantes (TPPP). À un degré élevé d'HR, par contre, la tendance était inversée, et le taux de pénétration des particules augmentait généralement avec le temps de colmatage. Cette étude a en outre révélé que, sous l'angle du temps de colmatage, un débit d'air constant (égal au DIM du débit d'air cyclique) ne permettait pas nécessairement de prédire le taux de pénétration des particules dans des conditions de débit d'air cyclique en cas d'exposition prolongée des filtres.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	I
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	XIII
LISTE DES SYMBOLES.....	XIV
1 CONTEXTE	1
1.1 Tour d'horizon	1
1.2 La filtration des particules : approche théorique	3
1.2.1 Les mécanismes de filtration	3
1.3 La filtration des particules : approche expérimentale.....	6
1.3.1 Effets liés à la charge	6
1.3.2 Effets liés au débit d'air.....	6
1.3.2.1 Impact d'un débit d'air constant	7
1.3.2.2 Impact d'un débit d'air cyclique	7
1.3.3 Effet du colmatage du filtre par des particules	10
1.4 Objectifs.....	12
2 MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIES	15
2.1 Dispositif expérimental.....	15
2.1.1 Configuration de l'installation.....	15
2.1.2 Système de génération de particules	17
2.1.3 Instruments de mesure	17
2.2 Mesure du taux de pénétration.....	18
2.3 Défis relatifs aux mesures dans des conditions de débit d'air cyclique.....	18
2.4 Tests de vérification de l'installation.....	22
2.5 Choix de l'appareil respiratoire.....	25
2.6 Protocoles expérimentaux	25
2.6.1 Influence de la fréquence respiratoire et du DIP	25
2.6.1.1 Taux d'augmentation incrémentielle	25
2.6.1.2 Conditions expérimentales.....	26
2.6.1.3 Analyse des données	28

2.6.2	Comparaison des débits d'air cycliques et constants	29
2.6.2.1	Conditions expérimentales.....	29
2.6.2.2	Analyse des données.....	30
2.6.3	Temps de colmatage	30
2.6.3.1	Conditions expérimentales.....	30
2.6.3.2	Analyse des données.....	31
3	RÉSULTATS ET ANALYSE.....	33
3.1	Impact de la fréquence respiratoire et du DIP sur l'efficacité des APR de type N95	33
3.1.1	Résultats obtenus avec la configuration « inhalation et exhalation »	33
3.1.1.1	Effet du DIP et de la fréquence respiratoire sur la pénétration des particules ..	33
3.1.1.2	Taux d'augmentation incrémentielle.....	35
3.1.2	Résultats obtenus avec la configuration « inhalation seulement »	36
3.1.2.1	Effet du DIP et de la fréquence respiratoire sur la pénétration des particules.	36
3.1.2.2	Taux d'augmentation incrémentielle.....	38
3.1.3	Impact de la méthodologie expérimentale	38
3.2	Efficacité des APR de type N95 contre les PUF dans des conditions de débit d'air cyclique et constant.....	40
3.2.1	Distributions granulométriques de la concentration	40
3.2.2	Taux de pénétration des particules dans des conditions de débit d'air cyclique et constant	40
3.2.3	Taux de pénétration des particules de la TPPP selon l'amplitude du débit d'air et le schéma d'écoulement de l'air.....	45
3.3	Effet du temps de colmatage sur l'efficacité des APR de type N95 selon le degré d'HR dans des conditions de débit d'air cyclique et constant.....	47
3.3.1	Taux de pénétration des particules en fonction du temps de colmatage à 10 % d'HR.....	47
3.3.2	Taux de pénétration des particules en fonction du temps de colmatage à 50 et 80 % d'HR.....	49
3.3.3	Comparaison des taux de pénétration à débits d'air cycliques et constants aux stades initial et final du temps de colmatage	51
3.4	Limites de l'étude et futurs travaux	53
4	CONCLUSION.....	57
5	BIBLIOGRAPHIE.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 – Débits d'air cycliques retenus	27
Tableau 2.2 – Débits d'air cycliques et constants retenus	29
Tableau 3.1 – Caractéristiques granulométriques de la concentration en nombre des particules de NaCl avec la configuration « inhalation et exhalation ».....	34
Tableau 3.2 – Caractéristiques granulométriques de la concentration en nombre des particules de NaCl avec la configuration « inhalation seulement ».....	36
Tableau 3.3 – Résumé des taux de pénétration des particules de la TPPP pour différents débits d'air cyclique et constants.....	44

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Mécanisme de filtration des particules (adapté de Haghghat et al [36])	4
Figure 1.2 – Taille des particules les plus pénétrantes (TPPP) pour les filtres mécaniques et électrostatiques	5
Figure 1.3 – Interrelation du débit d'air cyclique et des débits d'air constants égaux au volume minute, au débit d'inhalation moyen (DIM) et au débit d'inhalation de pointe (DIP) du débit d'air cyclique; T/2 correspond ici à la durée du cycle inhalatoire seulement, soit la moitié de la durée du cycle respiratoire	8
Figure 2.1 – Représentation de l'installation utilisée pour évaluer l'efficacité des APR de type N95 dans des conditions de débit d'air cyclique et constant [81]	15
Figure 2.2 – Schéma du dispositif expérimental : a) débit d'air cyclique (configuration « inhalation et exhalation »; b) débit d'air cyclique (configuration « inhalation seulement »; c) débit d'air constant	16
Figure 2.3 – Système de génération de particules : a) nébuliseur Collison à six jets; b) système de séchage (lit de gel de silice); c) neutralisateur électrostatique Kr-85	17
Figure 2.4 – Classificateur électrostatique (à gauche) et compteur de particules de condensation (à droite)	18
Figure 2.5 – Taux de pénétration mesuré par SMPS et par comptage pour un débit d'air cyclique avant un DIP de 135 l/min. (configuration « inhalation et exhalation »	20
Figure 2.6 – Taux de pénétration mesuré par SMPS et par comptage pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 360 l/min. (configuration « inhalation et exhalation »	20
Figure 2.7 – Taux de pénétration mesuré par SMPS et par comptage pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 135 l/min. (configuration « inhalation seulement »	21
Figure 2.8 – Taux de pénétration mesuré par SMPS et par comptage pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 360 l/min. (configuration « inhalation seulement »	21
Figure 2.9 – Essai « sans filtre » à débit d'air constant de 85 l/min.	22
Figure 2.10 – Essai « sans filtre » à débit d'air cyclique de 85 l/min. (volume minute)	23
Figure 2.11 – Test de stabilité de la concentration à débit d'air constant de 85 l/min.	24
Figure 2.12 – Test de stabilité de la concentration à débit d'air cyclique de 85 l/min. (volume minute)	24
Figure 2.13 – Variation du taux de pénétration en termes de fréquence respiratoire ou de DIP	26
Figure 2.14 – Schémas d'écoulement d'air cyclique retenus	27

Figure 3.1 – Distribution granulométrique type de la concentration en amont de l'APR de type N95 pour les quatre débits d'air testés avec la configuration « inhalation et exhalation ».....	33
Figure 3.2 – Taux de pénétration des particules selon la taille des particules dans les quatre conditions de débit d'air cyclique à l'essai avec la configuration « inhalation et exhalation ». Le trait pointillé correspond au critère limite de 5 % du NIOSH pour les APR DE TYPE N-95 (42 CFR, 84)	35
Figure 3.3 – Distribution granulométrique type de la concentration en amont de l'APR de type N95 pour les quatre débits d'air testés avec la configuration « inhalation seulement »	36
Figure 3.4 – Taux de pénétration des particules selon la taille des particules dans les quatre conditions de débit d'air cyclique à l'essai avec la configuration « inhalation seulement ». Le trait pointillé correspond au critère limite de 5 % du NIOSH pour les APR de type N-95 (42 CRF, 84)	37
Figure 3.5 – Comparaison des taux de pénétration des particules de la TPPP pour les débits d'air cyclique A, B, C et D avec les deux configurations expérimentales.....	39
Figure 3.6 – Distribution granulométrique type de la concentration en amont de l'APR de type N95 pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 270 l/min.....	40
Figure 3.7 – Taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique (volume minute : 42 l/min., DIM : 85 l/min., DIP : 135 l/min.) et trois débits d'air constant de 42, 85 et 135 l/min.	41
Figure 3.8 – Taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique (volume minute : 68 l/min., DIM : 135 l/min., DIP : 210 l/min.) et trois débits d'air constants de 68, 135 et 210 l/min.....	41
Figure 3.9 – Taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique (volume minute : 85 l/min., DIM : 170 l/min., DIP : 270 l/min.) et trois débits d'air constants de 85, 170 et 270 l/min.....	42
Figure 3.10 – Taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique (volume minute : 115 l/min., DIM : 230 l/min., DIP : 360 l/min.) et trois débits d'air constant de 115, 230 et 360 l/min.	42
Figure 3.11 – Taux de pénétration des particules de la TPPP avec des débits d'air constants et cycliques (exprimés sous forme de volume minute, de DIM et de DIP)	46
Figure 3.12 – Taux de concentration types en amont pour différents degrés d'HR.....	47
Figure 3.13 – Taux de pénétration des particules selon différents temps de colmatage à 10 % d'HR pour : a) un débit d'air constant de 85 l/min.; b) un débit d'air constant de 170 l/min.; c) un débit d'air cyclique avec un DIM de 170 l/min.....	48
Figure 3.14 – Taux de pénétration des particules selon différents temps de colmatage à 50 % d'HR pour : a) un débit d'air constant de 85 l/min.; b) un débit d'air constant de 170 l/min.; c) un débit d'air cyclique avec un DIM de 170 l/min.....	50

Figure 3.15 – Taux de pénétration des particules selon différents temps de colmatage à 80 % d'HR pour : a) un débit d'air constant de 85 l/min.; b) un débit d'air constant de 170 l/min.; c) un débit d'air cyclique avec un DIM de 170 l/min.50

LISTE DES ABRÉVIATIONS

<u>Abréviation</u>	<u>Description</u>
AIP	Alcool isopropylique (isopropanol)
ANOVA	Analyse de variance
APR	Appareil de protection respiratoire à pièce faciale filtrante
CE	Classificateur électrostatique
CRF	Code de la réglementation fédérale
CTD	Compteur de particules de condensation
DIM	Débit d'inhalation moyen
DIP	Débit d'inhalation de pointe
DMA	Analyseur différentiel de mobilité électrique
DMM	Diamètre massique médian
DNM	Diamètre numérique médian
ÉTG	Écart-type géométrique
HEPA	Filtre à particules à haute efficacité
HR	Humidité relative
ISO/ST	Organisation internationale de normalisation / Spécification technique
Kr	Krypton
LPS	Latex de polystyrène
NaCl	Chlorure de sodium
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NP	Nanoparticule
NT	Nanotechnologie

PB	Poussière-brouillard
PDO	Phtalate de dioctyle
PFB	Poussière-fumée-brouillard
PUF	Particule ultrafine
RPM	Respirations par minute
SMPS	Granulomètre à balayage de mesure par mobilité
TPPP	Taille des particules les plus pénétrantes

LISTE DES SYMBOLES

<u>Symbole</u>	<u>Description</u>
C	Concentration numérique
D_p	Taille (diamètre) des particules
P	Taux de pénétration
Fr	Fréquence respiratoire
X_{DIP}	Taux d'augmentation incrémentielle du débit d'inhalation de pointe
X_{Fr}	Taux d'augmentation incrémentielle de la fréquence respiratoire

1 CONTEXTE

1.1 Tour d'horizon

Les particules ultrafines (PUF) se définissent comme des particules dont au moins une dimension aérodynamique est inférieure à 100 nm. On compte deux principales sources d'émission de PUF, l'une d'origine naturelle et l'autre d'origine humaine. Les embruns marins et les fumées produites par les incendies de forêt ou l'activité volcanique sont des exemples courants de sources naturelles de PUF [1,2]. Les fumées de soudage, les vapeurs de diesel et les gaz d'échappement des avions sont quant à eux des sources de PUF d'origine humaine [3–5]. Outre les PUF (qui sont généralement des contaminants indésirables), il existe d'autres particules nanométriques (< 100 nm) dont la production est voulue. Par exemple, un champ de recherche et d'application émergent, la nanotechnologie (NT), a donné lieu à une révolution industrielle en permettant la création, la production et la fabrication d'un large éventail de matériaux de nouvelle génération pourvus de caractéristiques particulières. Cette remarquable percée permet la création de nouveaux produits et de nouveaux marchés, mais elle suscite parallèlement la manipulation d'un volume rapidement croissant de nanoparticules (NP), et risque d'exposer un nombre exponentiellement croissant de travailleurs à ces NP. Une NP se définit comme « un nano-objet dont la taille des trois dimensions se situe entre 1 et 100 nm » [6,7]. Les purificateurs d'air en aérosol, l'ablation par laser et les revêtements de surface en vaporisateur sont des sources courantes de NP [8].

La principale préoccupation que soulève l'exposition aux particules de taille nanométrique tient à leur toxicité potentielle, susceptible de causer de graves problèmes de santé. Une fois inhalées, les NP peuvent se déposer en profondeur dans la région alvéolaire des poumons et être partiellement transloquées vers d'autres organes cibles [9–12]. Certaines NP sont causes de stress oxydatif, d'inflammations, de fibroses et d'autres effets physiologiques susceptibles de favoriser le développement de diverses maladies [9–14]. Dans le cadre d'études ciblées, plusieurs mesures devraient être prises en compte en ce qui concerne la toxicité des NP, les plus importantes étant la concentration massique, la concentration en nombre et la surface totale des particules [15,16]. À titre d'exemple, certaines études portant sur la toxicité des PUF et des NP ont fait ressortir une bonne corrélation entre la surface totale des particules et leurs effets biologiques [1,17,18], alors que d'autres ont révélé une meilleure corrélation entre le nombre de particules et leurs effets biologiques [19]. Il a par ailleurs été démontré que la concentration massique n'offre pas une bonne corrélation avec les effets biologiques observés dans le cas des particules nanométriques. Oberdörster *et al.* et Donaldson *et al.* ont déterminé que, pour des échantillons de particules de 250 nm et de 20 nm ayant la même concentration massique ($10 \mu\text{g}/\text{cm}^3$), les concentrations en nombre étaient respectivement de 1 200 et 2 400 000 $\#/\text{cm}^3$ [20,21]. Oberdörster *et al.* ont aussi indiqué que des animaux exposés par inhalation à une même masse de particules de TiO_2 de 20 nm et de 250 nm dont la taille aérodynamique était de 250 nm dans les deux cas (agglomérat de NP de 20 nm) présentaient un degré d'irritation pulmonaire et de translocation plus élevé, de même qu'une plus faible clairance pulmonaire, dans le cas des NP de 20 nm que dans celui des NP de 250 nm [22]. Dans cette étude précise, la toxicité relative était bien corrélée à la surface totale des particules de chaque échantillon. Par conséquent, on

peut s'attendre à ce qu'à masse égale, un échantillon type de PUF ou de NP ait des effets potentiellement plus néfastes sur la santé qu'un échantillon de particules de plus grande taille.

Des études épidémiologiques ont révélé que l'exposition à des PUF d'une taille inférieure à 100 nm pouvait provoquer de graves problèmes respiratoires et cardiovasculaires [23,24]. Cela dit, nous ne disposons actuellement d'études épidémiologiques que pour les PUF ; l'exposition des travailleurs aux NP étant encore récente, aucune donnée sur les effets d'une exposition prolongée n'est pour l'instant disponible. Les données épidémiologiques relatives aux effets des NP sur la santé sont donc extrêmement limitées, si bien que des recherches plus poussées sont nécessaires [25].

Des travailleurs sont exposés à des PUF et des NP dans divers environnements de travail notamment liés à la production, à la fabrication, à l'utilisation et à l'élimination de produits variés [2,26]. Le cas échéant, les voies d'exposition possibles sont généralement l'inhalation, le contact avec les yeux, l'adsorption cutanée et la pénétration percutanée [1]. Parmi ces voies d'exposition, l'inhalation est considérée comme la plus importante dans la plupart des situations [27]. Les mesures disponibles, notamment techniques (enceinte, ventilation par aspiration à la source, hottes, etc.) et administratives (réduction du temps d'exposition, organisation du travail, etc.), sont normalement mises en œuvre pour contrôler l'exposition aux PUF et aux NP. Néanmoins, ces stratégies ne sont pas toujours suffisantes pour assurer les travailleurs d'un niveau d'exposition acceptable. Dans ces situations particulières, l'inhalation de PUF et de NP nuisibles peut être contrôlée au moyen d'appareils de protection respiratoire à pièce faciale filtrante (APR), généralement de concert avec d'autres mesures de contrôle. De tels appareils sont largement utilisés par les travailleurs de l'industrie et de la santé. Ils sont généralement peu coûteux, accessibles et confortables [8,28], mais ils ne doivent être utilisés qu'en dernier recours, lorsque les autres mesures de contrôle ne suffisent pas à protéger adéquatement le travailleur.

Le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) a présenté trois catégories de matériaux filtrants offrant chacune trois niveaux de protection différents. Ces catégories, dites N, R et P, désignent respectivement des filtres non résistants, partiellement résistants et fortement résistants à la dégradation par les aérosols huileux [29]. Les niveaux de protection sont quant à eux de 95, 99 et 100, correspondant à une efficacité de filtration des particules d'au moins 95 %, 99 % et 99,97 %, respectivement. Selon l'efficacité de la protection (95 %, 99 % ou 99,97 %), chacune des catégories N, R et P peut ainsi être suivie du suffixe 95, 99 ou 100. Les filtres homologués par le NIOSH (de types N, R et P) sont classés à l'appui des dispositions réglementaires sous le titre 42 du Code de la réglementation fédérale, partie 84 (42 CFR 84), qui a été remplacé pour modifier le titre 30 du Code de la réglementation fédérale, partie 11 (30 CFR 11), 1995 [30]. Conformément à la norme 42 CFR 84 (sous-partie 181) et les règlements du NIOSH, les filtres de catégorie N doivent être exposés à une concentration en nombre de particules de NaCl d'un diamètre numérique médian (DNM) de 75 nm avec un écart-type géométrique (ÉTG) maximal de 1,86. Les filtres de types P et R doivent également être exposés à des aérosols de phtalate de dioctyle (PDO) d'un DNM de 165 nm avec un ÉTG maximal de 1,6. Les particules doivent être électriquement neutralisées de manière à refléter le pire des scénarios. Pour satisfaire aux critères du NIOSH et de la norme 42 CFR 84, les filtres doivent être exposés à un débit d'air constant de 85 l/min (ou 42,5 l/min dans le cas d'un double-filtre). Le taux de pénétration des particules, soit le rapport de la concentration d'aérosol en aval à la concentration

d'aérosol en amont pour un diamètre massique de 300 nm, mesuré selon des techniques photométriques de diffusion de la lumière, doit être inférieur à 5 %, 1 % et 0,03 % pour les niveaux de protection 95, 99 et 100, respectivement. Les critères d'homologation ci-dessus s'appliquent au taux de pénétration des particules à travers le matériau filtrant comme tel, tandis que les essais d'ajustement visent à résoudre les problèmes de fuites.

Il existe deux limites possibles aux critères d'homologation du NIOSH et à la norme 42 CFR 84 en ce qui concerne l'utilisation des APR. Premièrement, le NIOSH teste l'efficacité de filtration à environ 300 nm, étant donné que cette valeur correspond à la taille des particules les plus pénétrantes (TPPP) pour les filtres mécaniques. Cependant, la plupart des APR sont électriquement chargés, et diverses études ont démontré l'effet de l'attraction électrostatique du matériau ainsi chargé des filtres homologués par le NIOSH, effet qui réduit considérablement la TPPP vers des dimensions nanométriques (< 100 nm) [31–34]. La seconde limite est liée à l'utilisation d'un débit d'air constant (85 l/min). Cette approche pourrait en effet ne pas être pleinement représentative du débit d'air respiratoire, puisque la respiration humaine est en réalité mieux représentée par un modèle cyclique. Il est donc nécessaire d'évaluer l'efficacité des filtres homologués par le NIOSH dans des conditions de débit d'air cyclique et de comparer les résultats avec ceux obtenus dans des conditions de débit d'air constant.

1.2 La filtration des particules : approche théorique

L'utilité des APR repose sur un procédé de filtration visant à éliminer les particules nocives de l'air inhalé. La capacité du matériau filtrant à capter efficacement les particules en cause dépend de plusieurs facteurs allant des propriétés physiques et chimiques du matériau comme tel (composition chimique du filtre, épaisseur du filtre, compacité des fibres, charge du matériau filtrant, etc.) aux conditions d'exposition externes (composition chimique des particules, granulométrie, vitesse de filtration, débit d'air, schéma d'écoulement stable ou instable de l'air, charge des particules, température, humidité relative (HR), temps de colmatage, etc.). Ces conditions extérieures peuvent avoir des répercussions tantôt mineures, tantôt importantes sur l'efficacité d'un mécanisme de filtration donné de même que sur l'efficacité globale d'un filtre. On évalue l'efficacité globale d'un filtre en mesurant l'efficacité conjointe des différents mécanismes de filtration. Il est donc utile, dans un premier temps, de résumer le rôle des divers mécanismes de filtration des particules.

1.2.1 Les mécanismes de filtration

La filtration des particules s'effectue selon quatre mécanismes [35]. La figure 1.1 offre une représentation schématique de chacun des mécanismes de filtration. Ces mécanismes sont :

- 1- l'impaction inertielle ;
- 2- l'interception ;
- 3- la diffusion ;
- 4- l'attraction électrostatique.

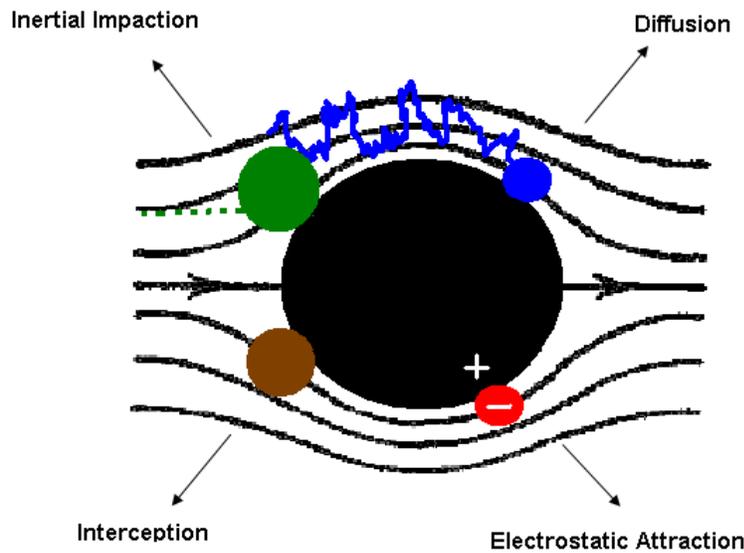


Figure 1.1 – Mécanisme de filtration des particules (adapté de Haghghat et al [36])

L'*impaction inertielle* se produit lorsque l'inertie de la particule est trop élevée pour suivre la trajectoire changeante du flux d'air. La particule se heurte alors à la membrane du filtre [35]. De façon générale, les particules dont la taille est d'environ $1\ \mu\text{m}$ ou plus sont efficacement captées par ce mécanisme, qui devient cependant négligeable dans le cas de particules nanométriques [37].

L'*interception* se produit lorsqu'une particule suivant un flux d'air vient à se trouver à moins d'un rayon de particule de la surface de la fibre [35], pour ensuite entrer en contact avec le matériau filtrant. L'interception n'est pas particulièrement influencée par la vitesse des particules, mais elle devient plus marquée lorsque la taille des particules augmente [37]. La principale différence entre l'interception et l'impaction inertielle tient à ce que la particule ne s'écarte pas de la trajectoire du flux d'air dans le cas de l'interception, alors qu'il y a déviation dans le cas de l'impaction inertielle.

La *diffusion*, le mécanisme prédominant dans la captation des particules dont la taille est inférieure à $0,2\ \mu\text{m}$, se produit lorsque le mouvement aléatoire des particules à l'intérieur d'un flux d'air sous l'effet du mouvement brownien les amène à toucher le support filtrant [37]. Le mouvement irrégulier des particules augmente de fait la probabilité de collision entre les particules et la fibre dans le cas d'un flux d'air réfractaire à l'interception [35], de sorte que la diffusion a plus d'importance que l'interception dans la captation des particules de très petite taille, comme les PUF et les NP. Plus la taille des particules est réduite, plus la diffusion devient marquée en raison de l'incidence accrue du mouvement brownien. Lorsque la vitesse de filtration est réduite, les particules passent à travers le filtre et le flux d'air se déplace plus lentement. Par conséquent, le temps de rétention augmente, ce qui entraîne une augmentation du taux de captation des NP sous l'effet du mécanisme de diffusion.

Les dispositifs de filtration qui éliminent des particules en combinant les effets de l'impaction inertielle, de l'interception et de la diffusion sont appelés « filtres mécaniques » dans la littérature [27]. Afin d'accroître l'efficacité globale d'un filtre, un mécanisme supplémentaire, dit

d'attraction électrostatique, peut être ajouté. Pour ce faire, on applique une charge électrique au support filtrant, aux particules, ou aux deux. L'attraction électrostatique se voit réduite lorsque la vitesse de filtration augmente. Les filtres chargés qui mettent à profit l'attraction électrostatique en plus des autres mécanismes de captation (diffusion, interception et impaction inertielle) sont appelés « filtres électrostatiques » [38–40]. La plupart des filtres N95 approuvés par le NIOSH offerts dans le commerce sont des filtres électrostatiques.

L'efficacité de filtration globale s'obtient en combinant les effets de tous les mécanismes de captation (impaction, interception, diffusion et attraction électrostatique). Dans le cas des particules submicroniques captées par les filtres mécaniques, l'interception et la diffusion sont les mécanismes prédominants, l'impaction inertielle étant alors négligeable. Une combinaison des mécanismes de diffusion et d'interception offre une efficacité minimale (et donc un taux de pénétration maximal) pour une certaine taille de particules. Cette taille est généralement désignée du nom de « taille des particules les plus pénétrantes (TPPP) », et reflète le pire des scénarios, soit celui où le taux de pénétration atteint sa valeur la plus élevée (figure 1.2). Selon la théorie de la filtration par fibre unique, la TPPP s'établit normalement à 300 nm dans le cas des filtres mécaniques. Dans le cas des filtres électrostatiques, par contre, l'adjonction d'un mécanisme supplémentaire, l'attraction électrostatique, à la diffusion et à l'interception augmente sensiblement l'efficacité de filtration, ce qui réduit la TPPP par rapport aux filtres mécaniques.

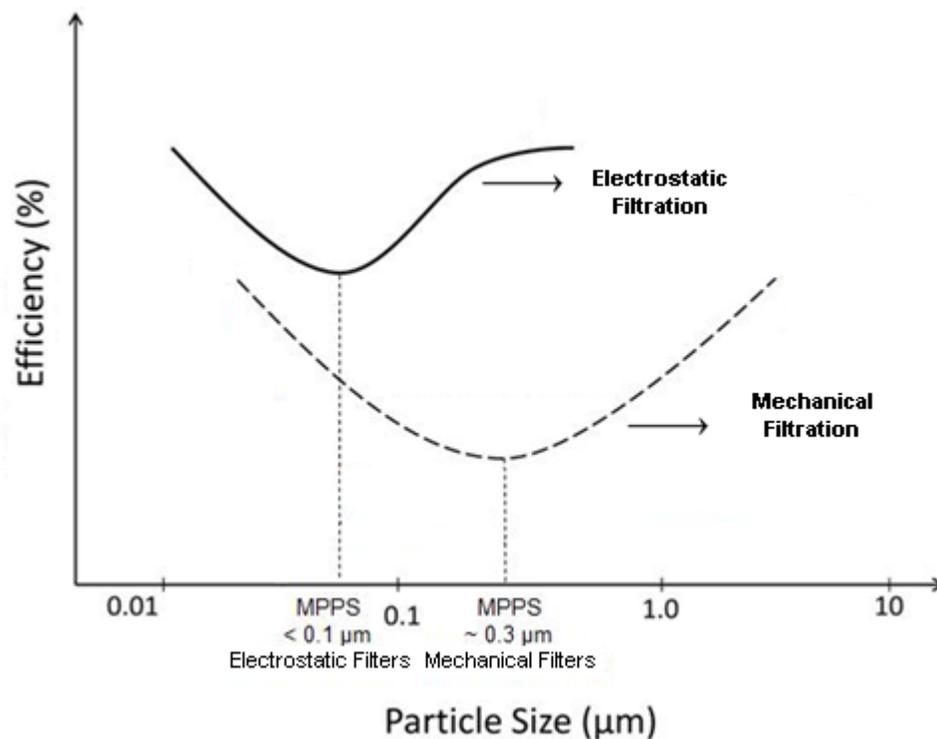


Figure 1.2 – Taille des particules les plus pénétrantes (TPPP) pour les filtres mécaniques et électrostatiques

1.3 La filtration des particules : approche expérimentale

Partant de notre revue de la littérature, nous présentons dans les paragraphes qui suivent les différents facteurs qui contribuent à l'efficacité de filtration sur la base de résultats expérimentaux.

1.3.1 Effets liés à la charge

L'impact du mécanisme d'attraction électrostatique dans les filtres approuvés par le NIOSH a été évalué dans le cadre d'études antérieures [31,40,41]. Les auteurs ont constaté que l'efficacité des filtres approuvés par le NIOSH se trouve considérablement réduite lorsque les filtres sont plongés dans de l'alcool isopropylique (AIP) afin d'en retirer les charges électrostatiques. Dans le cas d'un modèle de filtre N95, par exemple, le taux de pénétration des particules passait de 5 % dans le cas « comme reçu » à 45 % dans le cas « plongé dans de l'AIP » [31]. On a aussi observé que dans le cas des filtres traités à l'AIP, la TPPP se trouvait grandement accrue, passant de 50-100 nm à 250-350 nm. Ces derniers résultats sont conformes à la théorie de la filtration des particules sous l'effet d'une modification de la contribution relative de chaque mécanisme de filtration. Des études portant sur d'autres matériaux filtrants font en outre état d'une augmentation de l'efficacité de filtration avec les filtres électrostatiques par rapport aux filtres conventionnels [38,42-45].

Au-delà de la charge du support filtrant, l'impact du mécanisme d'attraction électrostatique peut aussi être influencé par les charges propres aux particules, lesquelles peuvent contribuer à réduire le taux de pénétration des particules, et donc augmenter l'efficacité de filtration [28,32,39,46-48]. Balazy *et al.*, par exemple, ont mesuré le taux de pénétration de particules de NaCl polydispersées (10-200 nm), chargées ou neutralisées, à travers un APR de type N95 avec un débit d'air de 85 l/min [32]. Dans cette étude, les particules chargées donnaient lieu à un taux de captation plus élevé (taux de pénétration moindre) que les particules neutralisées. Ces résultats et ceux d'autres études comparables suggèrent qu'il convient de neutraliser les charges électrostatiques des particules pour obtenir une mesure d'efficacité correspondant au pire des scénarios.

1.3.2 Effets liés au débit d'air

L'impact du débit d'air a été largement étudié [32-34,60,64] du fait qu'un débit d'air plus élevé est associé à une charge de travail plus élevée, ce qui pourrait réduire l'efficacité de filtration. Les études pertinentes portent aussi bien sur des débits d'air cycliques que constants, bien que des débits d'air constants sont le plus souvent retenus afin d'adapter les critères d'essai aux normes et règlements américains (85 l/min conformément à 42 CFR 84, 1995). Cela dit, les débits d'air cycliques reflètent mieux le débit d'air respiratoire des humains, qui suit un schéma cyclique plutôt que constant. Ces deux cas seront examinés séparément.

1.3.2.1 Impact d'un débit d'air constant

Une augmentation du débit d'air (ou de la vitesse de filtration) peut considérablement augmenter le taux de pénétration des particules à travers les matériaux filtrants. Cette augmentation du taux de pénétration est principalement due à la réduction de l'efficacité des mécanismes électrostatiques et de diffusion [35,37]. Plusieurs études ont d'ailleurs révélé qu'une augmentation du débit d'air entraînait une augmentation du taux de pénétration (ou une réduction de l'efficacité de filtration) [8,28,32–34,41,43,44,47–56].

Par exemple, Qian *et al.* ont mesuré l'efficacité d'un APR de type N95 et de trois masques conventionnels de types chirurgical, poussière-brouillard (PB) et poussière-fumée-brouillard (PFB) à débits d'air constants de 32 et 85 l/min [44]. Les essais ont été effectués avec des aérosols de NaCl monodispersés dont la taille variait entre 0,1 et 0,6 µm et des aérosols de latex de polystyrène (LPS) dont la taille variait entre 0,6 à 5,1 µm. Les chercheurs ont obtenu des taux d'efficacité plus faibles avec un débit d'air constant de 85 l/min qu'avec un débit de 32 l/min, et ce, pour tous les filtres. Balazy *et al.* ont testé deux modèles d'APR de type N95 exposés à des particules de NaCl polydispersées dont la taille variait entre 0,01 et 0,6 µm avec des débits d'air de 30 et 85 l/min. Ils ont constaté que le taux de pénétration des particules augmentait sensiblement à débit d'air plus élevé. Certaines reprises d'essais à débit d'air plus élevé ont même révélé des taux de pénétration dépassant le seuil limite de 5 % du NIOSH pour les APR de type N95 [32]. Les auteurs ont par ailleurs observé une tendance similaire avec des bioaérosols tels que les virus MS2 (dont la taille variait entre 10 et 80 nm) dans les mêmes conditions de débit d'air (30 et 85 l/min) pour un APR de type N95 et un masque chirurgical [43]. Huang *et al.* ont mesuré l'effet du débit d'air sur un filtre à matière fibreuse FFP1 (EN149:2001) traité à l'AIP en utilisant des aérosols de NaCl de 4,5 nm à 10 µm avec des débits d'air de 30, 60 et 85 l/min, et ils ont obtenu des résultats comparables [41]. Par exemple, à 300 nm, le taux de pénétration des particules aux débits d'air de 30, 60 et 85 l/min s'établissait à 47 %, 66 % et 79 %, respectivement. Eninger *et al.* ont mesuré le taux de pénétration de particules de NaCl, de virus MS2 et de bioaérosols bactériophages de *Bacillus subtilis* et de T4 (polydispersés) à travers un modèle de filtre N95 et deux modèles de filtre N99, pour une granulométrie allant de 0,02 à 0,5 µm et avec des débits d'air de 30, 85 et 150 l/min [33]. Le taux de pénétration maximal des particules de NaCl était de 8,1 %, 4,8 % et 1,4 % à 150, 85 et 30 l/min, respectivement, dans le cas du filtre N95. Dans le cas du premier modèle de filtre N99, le taux de pénétration maximal s'établissait à 10,2 %, 5,9 % et 1,3 % aux mêmes débits d'air, respectivement ; et dans le cas du second modèle de filtre N99, les taux mesurés étaient respectivement de 6,6 %, 4,3 % et 1 % [33]. À tous les débits d'air, la TPPP variait entre 30 et 70 nm, avec une légère tendance vers la limite inférieure lorsque le débit d'air augmentait [33]. Mostofi *et al.* ont étudié l'impact de l'augmentation du débit d'air (85, 135, 270 et 360 l/min) en exposant un modèle d'APR de type N95 à des particules de NaCl polydispersées de 15-200 nm [34]. Le taux de pénétration maximal (avec les particules de la TPPP) atteignait respectivement 2,7 %, 6,6 %, 11,7 % et 15,3 % aux débits d'air testés. La TPPP passait en outre de 46 à 36 nm en augmentant le débit d'air de 85 à 360 l/min) [34].

1.3.2.2 Impact d'un débit d'air cyclique

L'impact des débits d'air cycliques sur le taux de pénétration des particules a également été étudié [7,29,57–69]. Les taux de pénétration dans des conditions de débit d'air cyclique et constant ont

été comparés dans quelques études visant à établir une corrélation appropriée entre le protocole d'homologation et les conditions de travail réelles. Les taux de pénétration initiale dans des conditions de débit d'air cyclique ont généralement été comparés aux taux de pénétration mesurés à débit d'air constant égal au volume minute, au débit d'inhalation moyen (DIM) et au débit d'inhalation de pointe (DIP) du débit d'air cyclique (figure 1.3). Le volume minute se définit comme la quantité moyenne d'air inhalée par minute de respiration ; le DIM correspond au volume total d'air inhalé durant un cycle inhalatoire divisé par la durée du cycle inhalatoire ; et le DIP correspond au débit maximal enregistré durant un cycle inhalatoire. Dans le cas d'un écoulement d'air sinusoïdal (soit celui qui a été retenu pour tous les débits d'air cycliques dans la présente étude), quelle que soit la fréquence respiratoire, le DIP est de π fois le volume minute et de $\pi/2$ fois le DIM (qui s'établit donc à deux fois le volume minute).

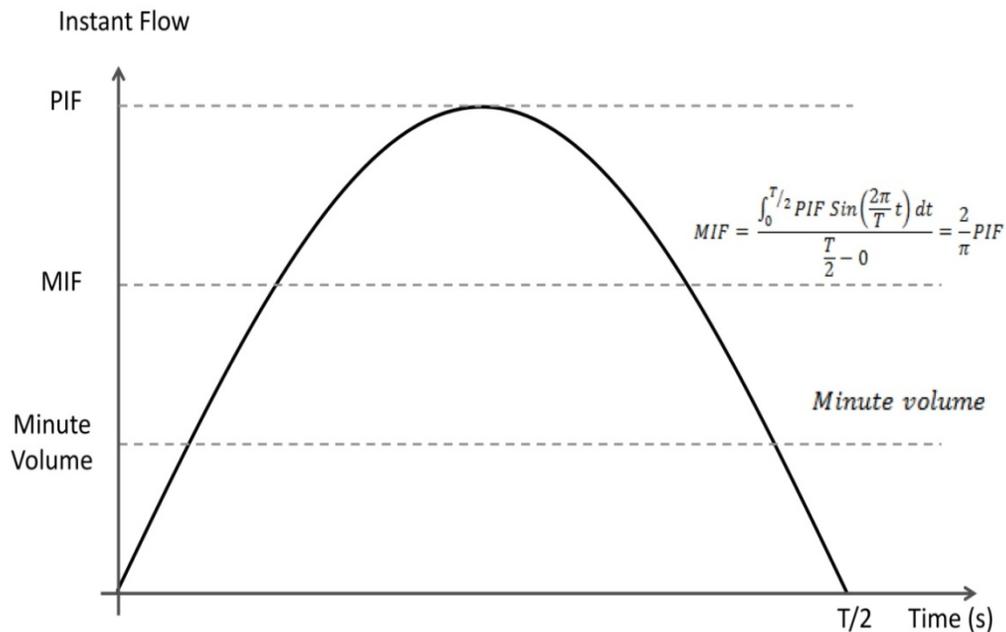


Figure 1.3 – Interrelation du débit d'air cyclique et des débits d'air constants égaux au volume minute, au débit d'inhalation moyen (DIM) et au débit d'inhalation de pointe (DIP) du débit d'air cyclique; T/2 correspond ici à la durée du cycle inhalatoire seulement, soit la moitié de la durée du cycle respiratoire

Stafford *et al.* ont testé l'efficacité de trois modèles de cartouches filtrantes pour appareil de protection respiratoire en comparant l'impact de trois débits d'air cycliques dont le DIM était de 30, 35 et 53 l/min et l'impact d'un débit d'air constant de 32 l/min sur le taux de pénétration de particules monodispersées de LPS et de PDO [58]. La taille choisie des particules de LPS et de PDO était de 0,176-2,02 μm et de 0,3 μm , respectivement. Brosseau *et al.* ont par ailleurs étudié la pénétration de particules de silice (0,46 μm) et d'amiante (4,5 μm de longueur et 0,2 μm de largeur) à travers les filtres DM dans des conditions de débit d'air cyclique avec un DIP équivalent de 100 l/min et un DIM de 76 l/min, comparativement à un débit d'air constant de 32 l/min [59]. Les résultats des deux études indiquent que le taux de pénétration mesuré avec un débit d'air cyclique est généralement plus élevé que le taux de pénétration obtenu avec un débit d'air constant équivalent [58,59].

Plus récemment, d'autres études ont tenté d'établir un rapport entre les débits d'air cycliques et les débits d'air constants relativement aux filtres approuvés par le NIOSH. Richardson *et al.* et Eshbaugh *et al.* [60,64] ont évalué l'efficacité des APR et des cartouches filtrantes de types N95 et P100 exposés à des particules de 0,02 à 2,7 μm . Les filtres de catégorie N ont été testés contre des particules de NaCl (0,02-0,3 μm) et de LPS (0,7 à 2,9 μm), tandis que les filtres de catégorie P ont été testés contre des particules de PDO (0,02 et 0,3 μm) et d'huile à base de poly(alpha-oléfine) (0,7-2,9 μm). Les filtres ont été testés à débits d'air constants de 85, 270 et 360 l/min et à débits d'air cycliques de 40, 85, 115 et 135 l/min équivalents au volume minute (ou de 135, 270, 360 et 430 l/min équivalent au DIP, respectivement). Les auteurs ont conclu qu'un débit d'air constant égal au DIM ou au DIP du débit d'air cyclique était un meilleur prédicteur du taux de pénétration des particules dans des conditions de débit d'air cyclique [60,64]. Leurs résultats indiquent que le taux de pénétration avec un débit d'air cyclique d'un volume minute de 85 l/min (équivalent à un DIP de 270 l/min) était plus élevé qu'avec un débit d'air constant de 85 l/min. Ils révèlent en outre qu'à DIM égal, les débits d'air cycliques ont tendance à provoquer une légère augmentation du taux de pénétration par rapport aux débits d'air constants de 85 et 270 l/min. À DIP égal, cependant, contrairement aux résultats obtenus avec le volume minute et le DIM, le taux de pénétration à débit d'air constant de 270 ou 360 l/min était plus élevé qu'avec un débit d'air cyclique [60,64].

Haruta *et al.* ont évalué l'effet de débits d'air constants de 15, 30, 85 et 135 l/min et de débits d'air cycliques aux DIM équivalents. Les essais ont été effectués avec des PUF de LPS d'une taille effective de 25, 65 et 99 nm (ÉT_G < 1,1 ; monodispersées) [61]. Conformément aux résultats de Richardson *et al.* [60], l'amplitude du taux de pénétration s'est avérée plus élevée à débit d'air cyclique qu'à débit d'air constant dans le cas des deux premiers couples constant-cyclique (15 et 30 l/min). Cependant, des valeurs presque identiques ont été enregistrées en ce qui a trait au taux de pénétration mesuré à débits d'air cyclique et constant de 85 l/min. Et dans le cas du débit le plus élevé (135 l/min), le taux de pénétration à débit d'air constant était supérieur au taux de pénétration mesuré à débit d'air cyclique [61].

Wang *et al.* ont comparé le taux de pénétration obtenu avec des doubles cartouches filtrantes de types N95 et P95 exposées à des particules de LPS (0,3 μm) à débits d'air constants de 32 à 320 l/min et à débits d'air cycliques de volume minute équivalent variant entre 16 et 130 l/min [66]. Conformément aux résultats de Richardson *et al.* et d'Eshbaugh *et al.* [60,64], le taux de pénétration obtenu avec un débit d'air cyclique était plus élevé qu'avec un débit d'air constant équivalent au volume minute et au DIM du débit d'air cyclique, mais moins élevé que le taux de pénétration mesuré avec un débit d'air constant équivalent au DIP du débit d'air cyclique. Outre la comparaison entre débits d'air cycliques et constants, ils ont aussi mesuré le taux de pénétration de particules de LPS de 0,3 μm à travers des cartouches de types N95 et P95 sur des demi-masques respiratoires en élastomère à double filtre dans diverses conditions de débit d'air cyclique et constant sous ventilation minute équivalente (volume minute du débit d'air cyclique) de 50 l/min, mais avec des schémas d'écoulement d'air différents, dont deux sinusoïdaux, un trapézoïdal et un exponentiel. Ils ont observé des valeurs plus élevées du taux de pénétration avec le débit d'air cyclique exponentiel (dont le DIP était plus élevé), des valeurs presque identiques avec les deux schémas d'écoulement d'air sinusoïdaux (qui présentaient le même DIP mais des fréquences et des volumes respiratoires différents), et des valeurs moins élevées avec le schéma d'écoulement d'air trapézoïdal (dont le DIP était le plus faible). Par ailleurs, le débit d'air

constant correspondant au volume minute a donné lieu à un taux de pénétration moindre que tous les débits d'air cycliques à l'essai.

Dans une étude récente, Gardner *et al.* ont étudié l'effet de débits d'air cycliques et constants sur le taux de pénétration d'un aérosol inerte (NaCl, 50 nm) et de virus MS2 d'un diamètre massique médian (DMM) de 500 nm avec des APR et des cartouches filtrantes de types N95 et P100, soit à deux débits d'air constants (85 et 270 l/min) et deux débits d'air cycliques (85 et 135 l/min comme volume minute) [69]. Ils ont constaté que l'efficacité de tous les filtres N95 et P100 égalait ou dépassait l'efficacité de captation des virus MS2 à débit aussi bien faible qu'élevé. La comparaison des taux de pénétration à débits d'air cycliques et constants indiquait par ailleurs qu'un débit d'air constant égal au DIM ou au DIP du débit d'air cyclique donne lieu à un taux de pénétration plus représentatif de celui qu'on observe avec un débit d'air cyclique.

D'autres études récentes ont en outre évalué l'impact de la fréquence respiratoire sur l'efficacité de divers appareils de protection respiratoire dans des conditions de débit d'air cyclique [70-72]. Dans l'ensemble, l'effet de la fréquence respiratoire s'est avéré plus complexe à évaluer que celui d'autres paramètres comme le débit d'air. À titre d'exemple, He *et al.* [70] ont mesuré l'impact de la fréquence respiratoire sur le taux de pénétration des particules à travers les filtres de masques chirurgicaux et d'APR de type N95, en fonction de la taille des particules (20 à 500 nm) et à différents débits d'air (de 15 à 85 l/min comme DIM). Cinq valeurs de fréquence ont été retenues dans une fourchette de 10 à 30 respirations par minute (RPM). Les observations effectuées ont démontré que l'effet de la fréquence respiratoire sur la pénétration des particules était moins important, surtout à faible débit d'air, que l'impact de la taille des particules et du débit d'air en soi. En général, à DIM élevé, le taux de pénétration des particules était élevé à faible fréquence respiratoire (près de 10 RPM). Dans une autre étude, He *et al.* [71] ont évalué l'impact de la fréquence respiratoire (10 à 30 RPM) sur le taux de pénétration des particules à travers les filtres indépendamment de la taille des particules (20 à 500 nm), à des débits d'air cycliques de 15 à 85 l/min (DIM). Leurs résultats indiquent que le débit d'air et la fréquence respiratoire ont tous deux un impact significatif sur la pénétration des particules à travers les filtres, et ce, malgré la complexité de l'effet de la fréquence respiratoire.

1.3.3 Effet du colmatage du filtre par des particules

Dans le cas des filtres mécaniques, le colmatage a généralement pour effet de rehausser l'efficacité de filtration et de provoquer une chute de pression plus importante [77,78]. Leung et Hung [78] ont en outre observé une réduction de la TPPP, ce qui, selon eux, s'expliquerait par le fait qu'une agglomération de particules améliore l'efficacité de captation sous l'effet des mécanismes de diffusion et d'interception, plus particulièrement de ce dernier. Dans le cas des filtres électrostatiques, par contre, le taux de pénétration des particules augmente initialement (l'efficacité de captation se trouve réduite) étant donné que les forces d'attraction électrostatique sont atténuées par les particules qui se déposent sur le filtre. Cette augmentation initiale du taux de pénétration est suivie d'une réduction du taux de pénétration (réaction inverse) sous l'effet d'une certaine accumulation de particules, car le filtre agit alors comme un filtre mécanique [38,45,79].

Cela dit, les études relatives à l'effet du temps de colmatage sur les filtres approuvés par le NIOSH ont été très limitées [34,79,80]. Barrett et Rousseau ont testé des matériaux filtrants

évolués (destinés à des filtres électrostatiques de types N, R et P approuvés par le NIOSH) soumis à un colmatage de particules de NaCl (DNM de 0,08 µm et DMM de 0,2 µm) et de PDO (DNM de 0,18 µm et DMM de 0,3 µm) avec un débit d'air constant de 85 l/min et jusqu'à 200 mg d'accumulation des particules d'aérosol à l'essai [79]. Ils ont découvert que le taux de pénétration et la chute de pression augmentaient initialement sous l'effet du colmatage par les particules d'aérosol à l'essai. Cependant, le taux de pénétration sous colmatage s'est avéré être 10 fois moindre dans le cas des filtres électrostatiques évolués que dans celui des matériaux soufflés conventionnels en microfibrilles chargées électrostatiquement (à chute de pression égale pour les deux matériaux filtrants). Moyer et Bergman ont étudié l'effet du temps de colmatage par de faibles masses de particules de NaCl (DNM de 75 nm avec un ÉTG inférieur à 1,86) avec des filtres de type N95, compte tenu d'une concentration en nombre type de 5 ± 1 mg/jour et d'un débit d'air constant de 85 l/min [80]. Les tests de colmatage ont été effectués selon une durée d'un jour et répétés une fois par semaine pendant plusieurs semaines. Entre deux périodes de test consécutives, les filtres N95 étaient laissés à découvert à l'extérieur du laboratoire d'essai, sans être exposés à des particules de NaCl. Les résultats ont révélé qu'en l'espace d'une journée, et ce, chaque semaine, le taux de pénétration des particules diminuait avec le temps de colmatage. Cependant, entre deux périodes d'essai consécutives (d'une semaine à l'autre), on constatait une augmentation du taux de pénétration moyen. Mostofi *et al.* ont étudié l'effet du temps de colmatage par des particules de NaCl polydispersées (dont la taille variait de 15 à 200 nm) sur des APR de type N95 pour une durée de 5 heures à débit d'air constant de 85 l/min [34]. Les résultats indiquent qu'une importante réduction du taux de pénétration survient lorsque les particules sont d'une taille inférieure à 100 nm. À titre d'exemple, le taux de pénétration moyen des particules de taille nanométrique se voyait réduit de 1,76 à 0,87 % entre les stades initial et final du temps de colmatage, respectivement. Par contre, dans le cas des particules de plus grande taille, le taux de pénétration augmentait légèrement avec le temps d'exposition. Ainsi, pour des particules de 100-200 nm, le taux de pénétration finale moyen était de 1,07 % alors que le taux de pénétration initiale était de 0,71 %. La TPPP augmentait quant à elle de façon significative entre les stades initial et final, passant de 41 à 66 nm, respectivement.

Comme indiqué ci-dessus, les résultats d'études antérieures fournissent des renseignements utiles en ce qui concerne l'efficacité des filtres N95 dans des conditions de débit d'air cyclique comparativement à des conditions de débit d'air constant. Néanmoins, les données disponibles dans la littérature demeurent limitées. À la différence d'un débit d'air constant, caractérisé par un seul paramètre (l'amplitude du débit d'air), un débit d'air cyclique est caractérisé par au moins deux paramètres, à savoir la fréquence respiratoire et le DIP. On ne sait donc pas lequel de ces paramètres est le plus influent. Il convient de considérer que la fréquence respiratoire et le débit d'inhalation augmentent simultanément lors du passage d'un travail sédentaire à une charge de travail élevée en contexte réel [73–76]. Le cas échéant, la variation du taux de pénétration des particules à travers les filtres d'appareils de protection respiratoire peut être attribuée à l'augmentation aussi bien du débit d'inhalation que de la fréquence respiratoire. Par conséquent, il s'avère nécessaire d'étudier l'influence de chaque paramètre dans des conditions de débit d'air cyclique. La prudence est en outre de mise au moment de comparer les résultats d'études antérieures, puisque la méthodologie expérimentale peut varier d'une étude à l'autre. Par exemple, certaines de ces études excluaient le cycle d'exhalation, ne retenant que la portion inhalation du processus respiratoire [61,63,64,66] (dispositif d'essai submicronique dans [64]), alors que d'autres prenaient en compte et l'inhalation et l'exhalation [7,62,65,67,69].

Et les différences ne sont pas limitées à la méthodologie expérimentale ; on constate en effet que les comparaisons d'efficacité de filtration dans des conditions de débit d'air cyclique et constant ne font l'objet d'aucun consensus dans la littérature. Cela peut en partie s'expliquer par la diversité des méthodologies expérimentales, mais aussi par les matériaux filtrants utilisés et la nature des particules à l'essai. Par ailleurs, les expériences visant à comparer l'efficacité des filtres d'appareils de protection respiratoire contre des particules inertes dans des conditions de débit d'air cyclique et constant ont essentiellement été effectuées à l'aide de particules monodispersées. Aucune étude antérieure ne visait à établir une telle comparaison en présence de particules polydispersées. Or, les particules polydispersées sont plus représentatives de la réalité.

L'effet du temps de colmatage par des particules polydispersées sur l'efficacité des filtres N95 a en outre été moins étudié. De fait, l'impact des particules polydispersées sous l'angle du temps de colmatage n'a été abordé que dans un rapport d'étude évalué par des pairs [34]. Et l'étude en question se limitait à un seul débit d'air constant et à un taux d'HR unique. L'effet du temps de colmatage dans des conditions de débit d'air cyclique demeure inconnu, de même que toute comparaison de cet effet avec celui obtenu dans des conditions de débit d'air constant. On ne sait toujours pas non plus ce que seraient les résultats si les conditions d'essai (l'HR, par exemple) variaient pendant le colmatage du filtre par des particules.

1.4 Objectifs

Cette étude vise à évaluer l'efficacité de filtration d'un modèle d'APR de type N95 dans des conditions simulant la respiration des travailleurs et à comparer l'effet de débits d'air cycliques et constants sur l'efficacité de filtration de ce type d'appareil. Les objectifs spécifiques de l'étude s'énoncent comme suit :

- adapter le dispositif expérimental utilisé pour les tests à débit d'air constant de manière à pouvoir l'utiliser dans le cadre de tests à débit d'air cyclique ;
- mettre au point une procédure permettant d'étudier l'impact respectif de la fréquence respiratoire et du débit d'air sur l'efficacité d'un modèle d'APR de type N95. L'étude est réalisée au moyen de deux méthodologies expérimentales distinctes (« inhalation seulement » et « inhalation et exhalation ») afin d'évaluer l'impact de l'une par rapport à l'autre ;
- mesurer le taux de pénétration de particules polydispersées (essentiellement ultrafines, < 100 nm) dans des conditions de débit d'air cyclique, et comparer les résultats obtenus avec le taux de pénétration mesuré dans des conditions de débit d'air constant équivalent au volume minute, au DIM et au DIP du débit d'air cyclique ;
- évaluer l'efficacité des filtres N95 dans des conditions de débit d'air cyclique et constant (avec un volume minute de 85 l/min) en tenant compte du taux de pénétration initiale et de la variation du taux de pénétration en fonction du temps de colmatage dans diverses conditions d'humidité.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIES

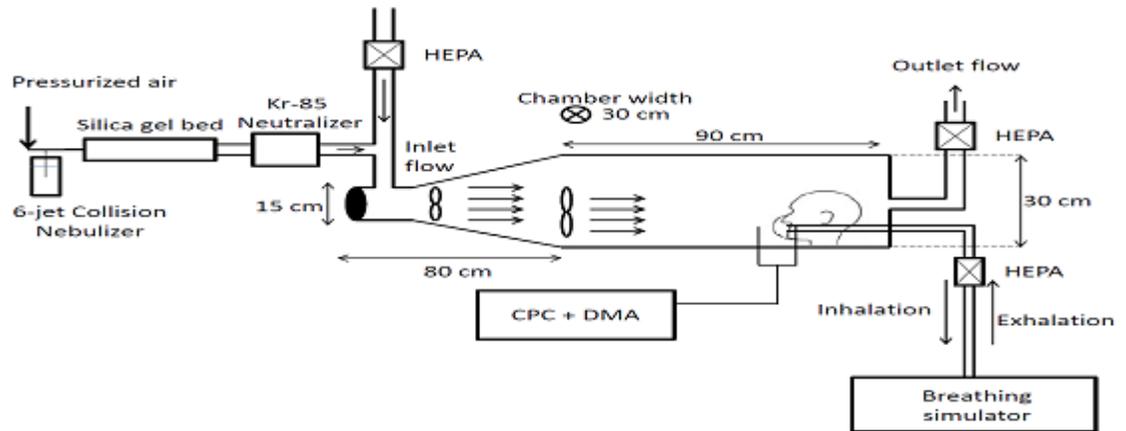
2.1 Dispositif expérimental

2.1.1 Configuration de l'installation

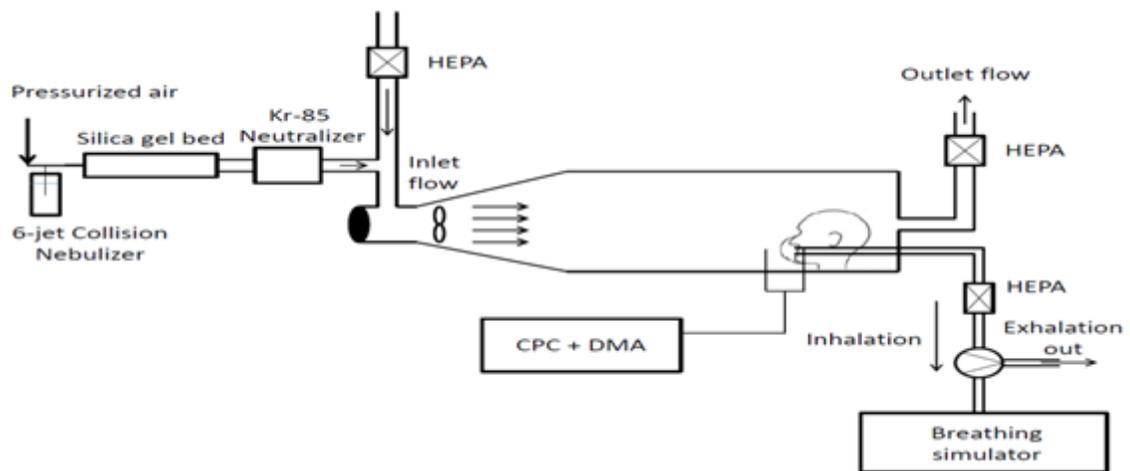
Le dispositif expérimental utilisé dans le cadre d'une étude précédente [36] pour effectuer des tests à débit d'air constant a été adapté à une configuration d'essai à débit d'air cyclique pour mesurer l'efficacité des APR contre les PUF (figures 2.1 et 2.2). L'installation comprend une chambre expérimentale, une tête de mannequin, un système de génération de particules, un simulateur de débit d'air respiratoire et des appareils de mesure. Un tel dispositif faisant appel à un mannequin a été utilisé dans plusieurs études antérieures [7,32–34,65,82]. Les figures 2.2a et 2.2b présentent deux configurations d'essai à débit d'air cyclique. Dans l'une comme dans l'autre, la tête du mannequin était reliée à un simulateur de débit/volume d'air (Série 1120 ; Hans Rudolph Inc., Shawnee, KS, É.-U.) pour générer des flux d'air cycliques. La figure 2.2a présente la configuration dans laquelle l'air exhalé était renvoyé à la chambre pour simuler la respiration en situation réelle (configuration « inhalation et exhalation »). La figure 2.2b présente la configuration dans laquelle l'air exhalé était expulsé à l'extérieur de la chambre à l'aide d'une soupape à trois voies (configuration « inhalation seulement »). Un ventilateur supplémentaire a été ajouté à la première configuration (figure 2.2a) pour stabiliser les variations de taux de concentration provoquées par le flux d'air exhalé renvoyé à la chambre. La figure 2.2c présente la configuration d'essai à débit d'air constant. Dans cette configuration, une pompe à débit de sortie a été utilisée pour assurer un débit d'air constant à travers la tête du mannequin. Une soupape régulatrice a été utilisée pour équilibrer la pression à l'intérieur de la chambre.



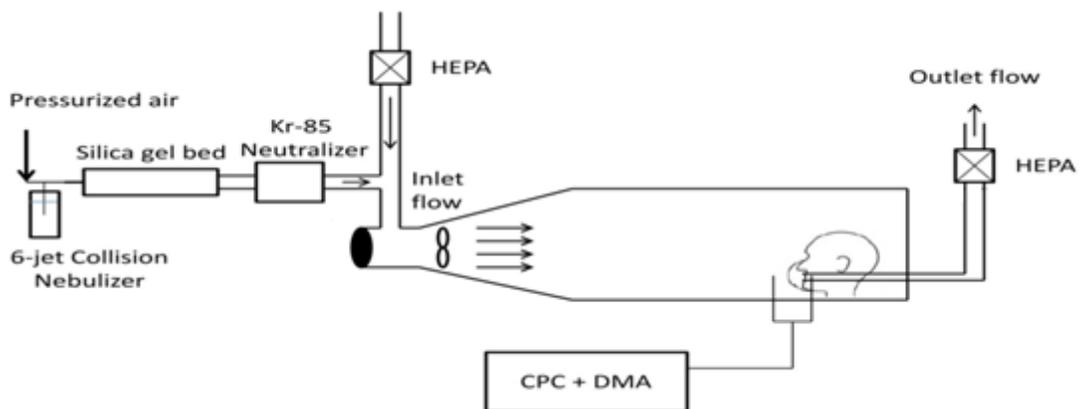
Figure 2.1 – Représentation de l'installation utilisée pour évaluer l'efficacité des APR de type N95 dans des conditions de débit d'air cyclique et constant [81]



(a)



(b)



(c)

Figure 2.2 – Schéma du dispositif expérimental : a) débit d'air cyclique (configuration « inhalation et exhalation »; b) débit d'air cyclique (configuration « inhalation seulement »; c) débit d'air constant

2.1.2 Système de génération de particules

À l'aide d'un nébuliseur Collison à six-jet (CN 2425, BGI Inc., Waltham, MA, É.-U.) contenant une solution de NaCl à 0,1 % v/v et d'un dispositif d'alimentation en air filtré (modèle 3074B, TSI Inc., Shoreview, MN, É.-U.), un flux d'aérosol à 30 lb/pi de pression a été utilisé pour générer des particules de NaCl polydispersées de 10 à 205,4 nm (figure 2.3a). Le flux était ensuite acheminé à travers le système de séchage (sachets de gel de silice) afin de contrôler l'humidité de la chambre (figure 2.3b). Un neutraliseur électrostatique Kr-85 (modèle 3012/3012A, TSI Inc., Shoreview, MN, É.-U.) a été utilisé de sorte à neutraliser la charge électrostatique des particules générées (figure 2.3c). Comme l'indique la littérature, des particules chargées peuvent sensiblement augmenter l'efficacité de filtration, et donc fausser le pire des scénarios de pénétration des particules [32,46,47]. Le flux d'aérosol a ensuite été dilué dans de l'air pur et diffusé dans la chambre. Une pompe à débit de sortie équipée d'une soupape régulatrice a été utilisée pour équilibrer la pression dans la chambre.

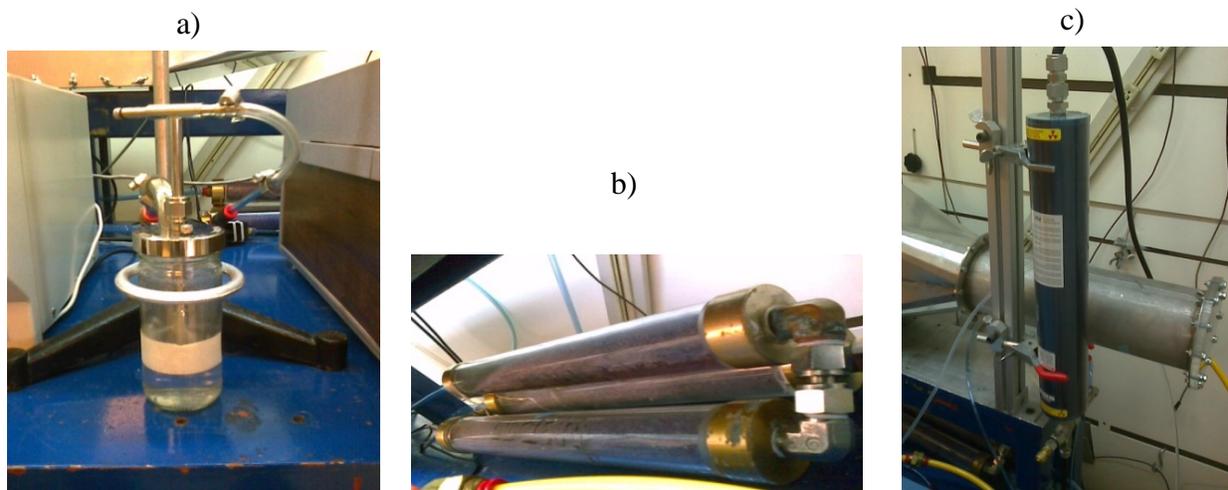


Figure 2.3 – Système de génération de particules : a) nébuliseur Collison à six jets; b) système de séchage (lit de gel de silice); c) neutralisateur électrostatique Kr-85

2.1.3 Instruments de mesure

Un ensemble composé d'un « classificateur électrostatique » (modèle 3080, TSI Inc., Shoreview, MN, É.-U.) renfermant un analyseur différentiel de mobilité électrique (DMA) et d'un compteur de particules de condensation (CPC) (modèle 3775, TSI Inc., Shoreview, MN, É.-U.) a été utilisé pour mesurer la distribution granulométrique de la concentration en amont et en aval dans le cadre des essais à débit d'air constant ou cyclique (figure 2.4). Pour un échantillon donné, le DMA classifiait les particules à l'intérieur d'un intervalle granulométrique selon leur diamètre de mobilité électrique. Les particules classifiées étaient ensuite comptées, et leur nombre était enregistré par le CPC. Cette technique de mesure de la concentration par classification (par DMA) et par comptage (par CPC) est aussi connue sous le nom de spectrométrie par analyseur de mobilité électrique à balayage (SMPS). Dans chaque échantillon, les données du SMPS relatives à l'intervalle granulométrique retenu aux fins des essais (10 à 205,4 nm) étaient divisées

en 21 tranches granulométriques. Lors de chaque essai, l'échantillon en aval était d'abord traité, après quoi la sonde à échantillons était orientée vers l'amont. Les échantillons étaient prélevés au cours de deux balayages en aval et de deux balayages en amont, chaque balayage ayant une durée de 180 secondes. Après chaque balayage, un temps de retour de 15 secondes était accordé par le dispositif pour permettre le réglage de la tension du DMA, la libération de l'échantillon d'air précédent et la préparation du balayage suivant. Par conséquent, le temps d'échantillonnage total de la concentration de particules en aval ou en amont (exclusion faite des temps de retour) était de 360 secondes (deux fois 180 secondes), ce qui, dans le cas des débits d'air cycliques, allouait un intervalle d'au moins 17 secondes pour enregistrer le taux de concentration dans chaque tranche granulométrique (360 secondes pour 21 tranches).

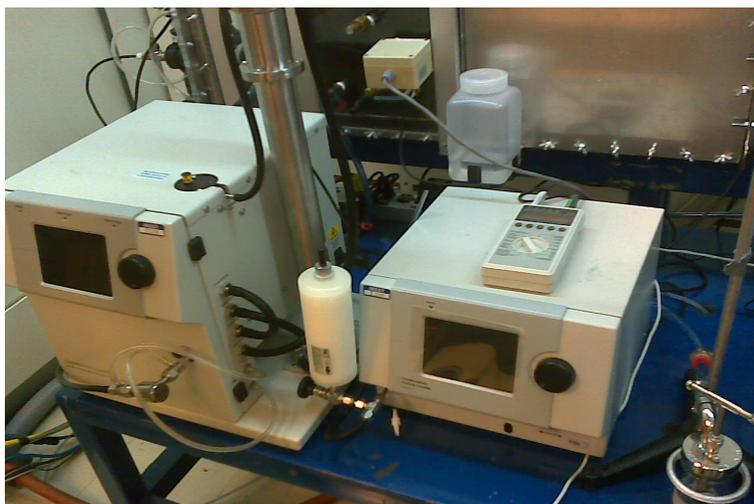


Figure 2.4 – Classificateur électrostatique (à gauche) et compteur de particules de condensation (à droite)

2.2 Mesure du taux de pénétration

Le taux de pénétration des particules (P) se définit comme le rapport entre deux distributions granulométriques de la concentration :

$$P(\%) = \frac{\left(\frac{dC}{d\log D_p}\right)_d}{\left(\frac{dC}{d\log D_p}\right)_u} * 100 \% \quad (1)$$

où C et D_p représentent la concentration en nombre et le diamètre des particules, respectivement ; ainsi le terme $(dC/d\log D_p)$ représente-t-il la distribution granulométrique de la concentration en nombre selon la taille des particules ($\#/cm^3$). Les indices d et u indiquent la direction en aval ou en amont du filtre, respectivement.

2.3 Défis relatifs aux mesures dans des conditions de débit d'air cyclique

Comme indiqué précédemment, le taux de pénétration des particules est grandement influencé par le débit d'air, de sorte qu'on s'attend à ce que le taux de pénétration instantanée soit sujet à

variation pendant la durée d'un flux d'air cyclique (où le débit instantané varie constamment dans le temps). Par exemple, on peut supposer que le taux de pénétration instantanée augmente de zéro à sa valeur maximale pour ensuite retomber au point nul au cours de chaque cycle inhalatoire (périodiquement).

Comme indiqué précédemment, la méthode utilisée pour mesurer le taux de pénétration est la spectrométrie par SMPS, étant donné qu'elle permet de dénombrer des particules polydispersées (dont la concentration est exprimée en fonction d'une distribution granulométrique). Néanmoins, le SMPS ne peut enregistrer des taux de concentration instantanée en fonction de la taille des particules. De fait, le SMPS enregistre le taux de concentration de chaque tranche granulométrique sous forme de moyenne sur une période donnée (à l'intérieur d'un temps d'échantillonnage complet par le SMPS). Afin de s'assurer que le temps imparti au SMPS (360 s) permettait de couvrir un nombre suffisant de cycles respiratoires par tranche granulométrique, le taux de pénétration mesuré par le SMPS a été comparé à celui obtenu par un autre mode de mesure, dit « par comptage », dans la présente étude. Dans le cas du mode de mesure par comptage, la tension du DMA est réglée selon une valeur constante de manière à ne classifier qu'une seule taille de particules (contrairement au mode de mesure par SMPS, où la tension du DMA varie de sorte à enregistrer la distribution granulométrique de la concentration). L'avantage de ce mode de mesure tient à ce que le temps d'échantillonnage peut être ajusté à volonté (bien que le nombre de particules ne soit enregistré que pour une taille unique). Les intervalles de temps peuvent être ajustés à 0,1 seconde près à l'intérieur du temps d'échantillonnage global afin d'estimer les dénombrements instantanés.

Des comparaisons entre les deux modes de mesure ont été effectuées pour deux débits d'air cycliques (avec des DIP de 135 et 360 l/min) dans les deux configurations expérimentales (« inhalation et exhalation » et « inhalation seulement »). Aux fins du mode de mesure par comptage, trois tailles de particules ont été retenues (22,1, 39,2 et 107,5 nm), et les taux de concentration ont été mesurés en amont comme en aval. Pour chaque taille de particules et chaque débit d'air, une période de 2 minutes a été allouée pour enregistrer un taux de concentration moyen (6 minutes au total pour les trois tailles de particules). Aux fins du mode de mesure par SMPS, comme nous l'avons déjà mentionné, une période totale de 360 s a été allouée pour les mesures en amont comme pour les mesures en aval (la taille des particules variant entre 10 et 205,4 nm). Pour chaque débit d'air, le taux de pénétration a été mesuré avec un même appareil de protection respiratoire selon le mode de mesure par comptage et selon le mode de mesure par SMPS. Les valeurs de taux de pénétration ont ensuite été comparées, et les écarts ont été calculés (figures 2.5 à 2.8).

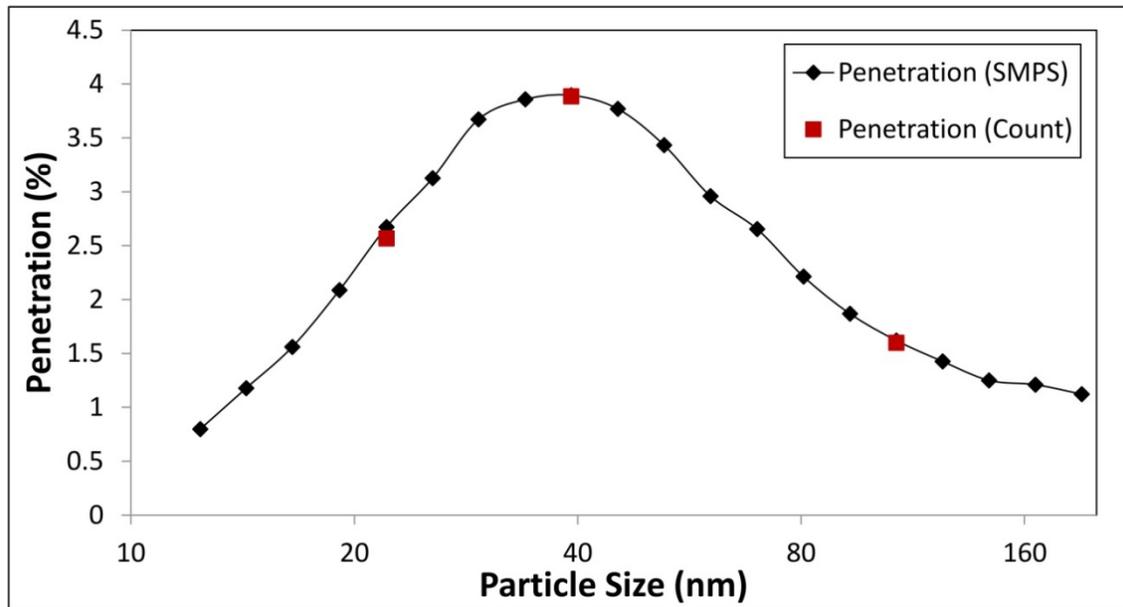


Figure 2.5 – Taux de pénétration mesuré par SMPS et par comptage pour un débit d'air cyclique avant un DIP de 135 l/min. (configuration « inhalation et exhalation »)

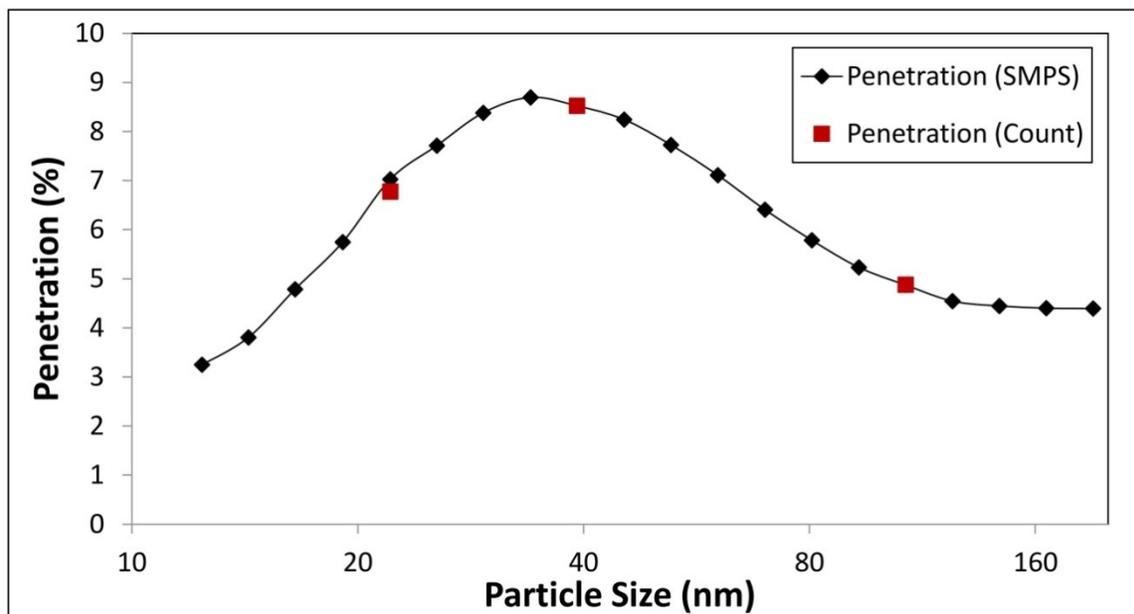


Figure 2.6 – Taux de pénétration mesuré par SMPS et par comptage pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 360 l/min. (configuration « inhalation et exhalation »)

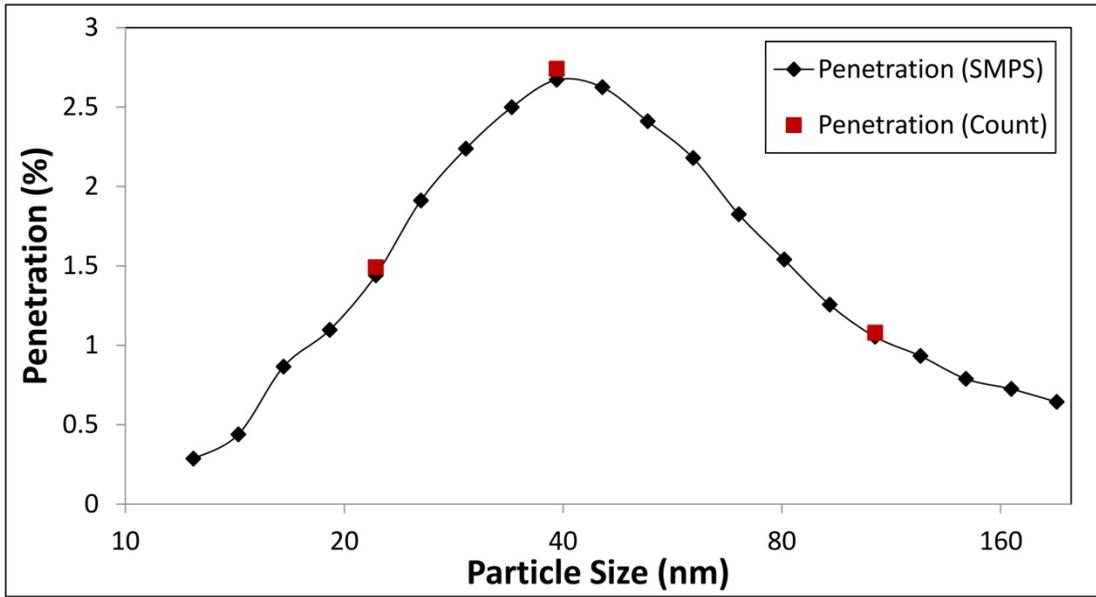


Figure 2.7 – Taux de pénétration mesuré par SMPS et par comptage pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 135 l/min. (configuration « inhalation seulement »)

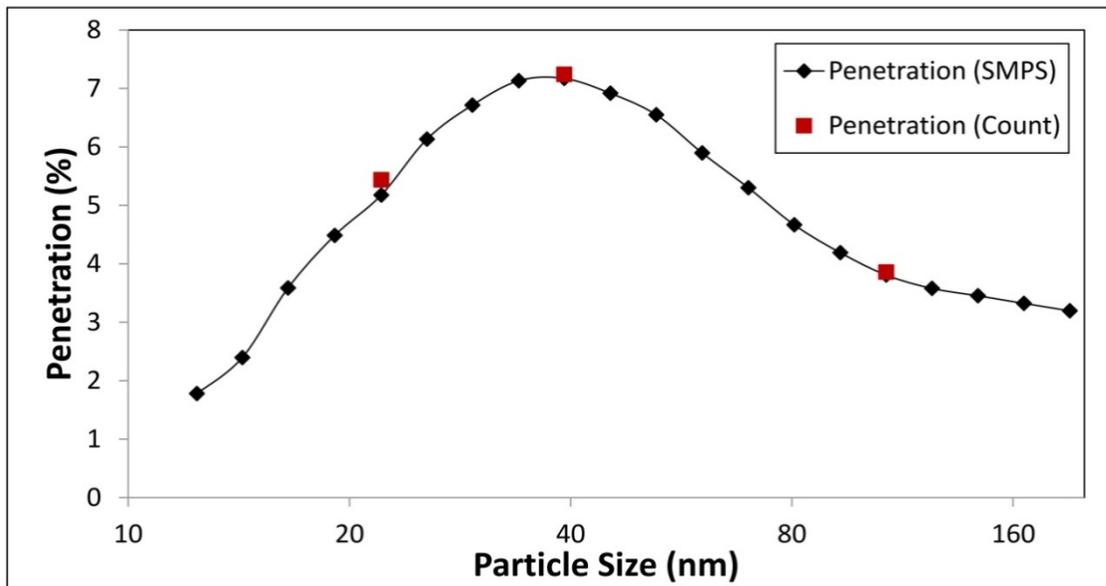


Figure 2.8 – Taux de pénétration mesuré par SMPS et par comptage pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 360 l/min. (configuration « inhalation seulement »)

Comme l'indiquent les figures 2.5 à 2.8, les valeurs de taux de pénétration obtenues par comptage et par SMPS étaient rapprochées. Avec un débit d'air cyclique de 135 l/min dans la configuration « inhalation et exhalation », par exemple, les marges d'erreur entre les taux de pénétration obtenus selon les deux modes de mesure étaient de 3,93 %, 0,26 % et 1,3 % pour les particules de 22,1, 39,2 et 107,5 nm, respectivement. Avec tous les autres débits d'air, les écarts entre les taux de pénétration obtenus selon les deux modes de mesure étaient également négligeables. Cela justifie le fait que, pour les débits d'air retenus, le temps d'échantillonnage de

360 s selon le mode de mesure par SMPS était adéquat pour obtenir des moyennes de taux de pénétration exactes.

2.4 Tests de vérification de l'installation

Afin d'assurer la précision des mesures de taux de pénétration, deux tests de vérification ont été effectués pour chacun des débits d'air retenus aux fins de cette étude : un test « sans filtre » et un test de « stabilité ».

Tout d'abord, pour s'assurer qu'il n'y avait aucun biais significatif entre les échantillons en aval et en amont, les mesures effectuées dans les deux cas l'ont été avec une tête de mannequin ne portant aucun appareil de protection respiratoire (test « sans filtre »). L'écart entre les deux échantillons pour l'ensemble des tranches granulométriques a ensuite été évalué. Le but du test « sans filtre » était de vérifier que les deux sondes à échantillons, en amont et en aval, enregistraient le même taux de concentration, afin de s'assurer que l'efficacité de filtration mesurée était entièrement imputable au filtre (et non en partie attribuable à un écart de captation entre les sondes d'échantillonnage en amont et en aval). À titre d'exemple, les figures 2.9 et 2.10 présentent les résultats du test « sans filtre » pour un débit d'air constant et un débit d'air cyclique (en volume minute) de 85 l/min (configuration « inhalation seulement »), respectivement. Des tests « sans filtre » comparables ont aussi été effectués dans le cadre d'études antérieures afin de vérifier la parité des échantillons en amont et en aval [34,60,61].

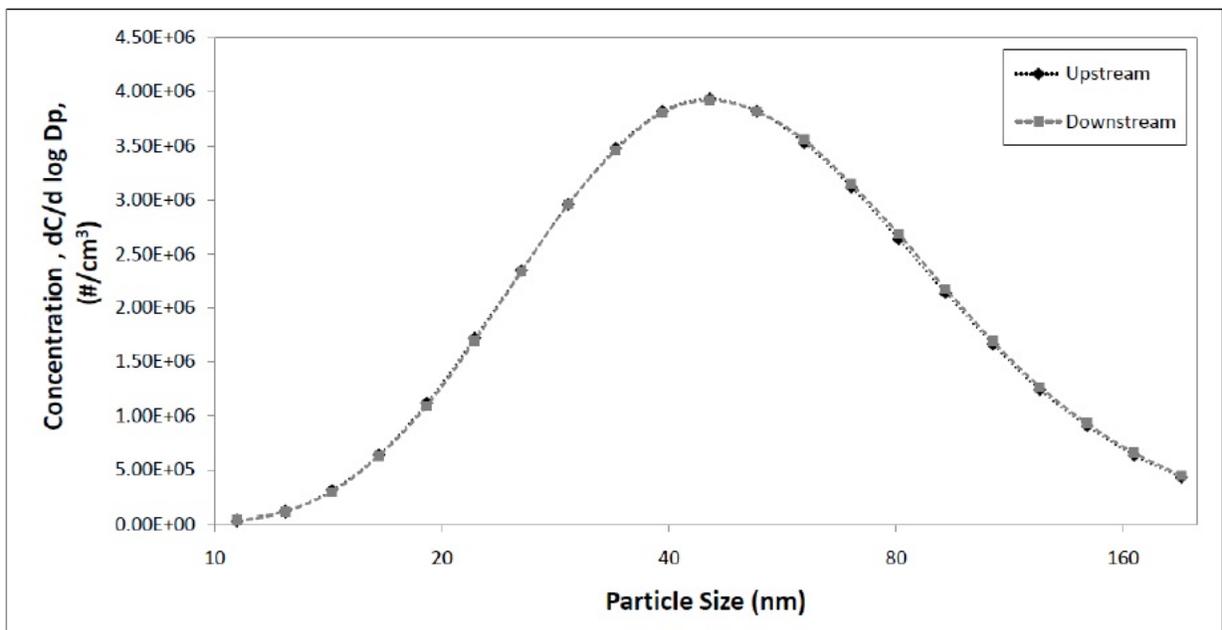


Figure 2.9 – Essai « sans filtre » à débit d'air constant de 85 l/min.

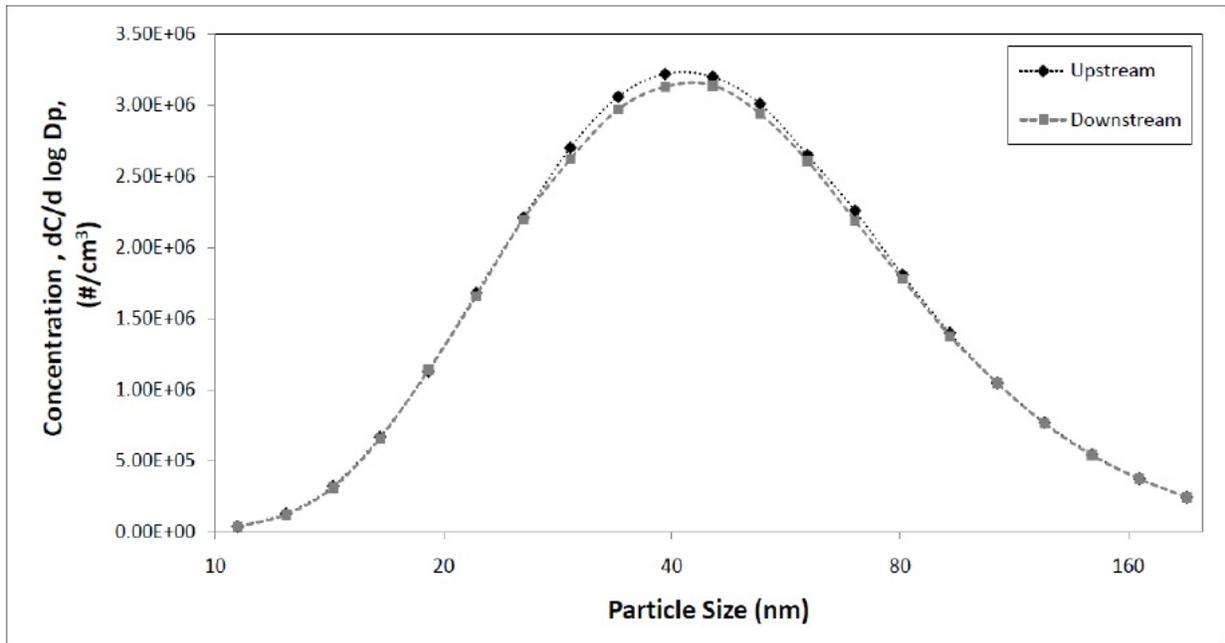


Figure 2.10 – Essai « sans filtre » à débit d'air cyclique de 85 l/min. (volume minute)

La stabilité de la concentration en amont à l'intérieur de la chambre a également été vérifiée. Le but de ce test était de s'assurer qu'avec le système de génération de particules utilisé, la concentration demeurait stable dans le temps après avoir atteint son point d'équilibre. Les taux de concentration en amont ont ainsi été mesurés à 0, 15, 30, 45 et 60 minutes (après être passés de zéro à leur valeur d'équilibre), et ce, pour tous les débits d'air retenus. Les écarts entre les échantillons de toutes les tranches granulométriques ont ensuite été calculés. À titre d'exemple, les figures 2.11 et 2.12 présentent les résultats du test de stabilité pour un débit d'air constant et un débit d'air cyclique (en volume minute) de 85 l/min (configuration « inhalation seulement »), respectivement.

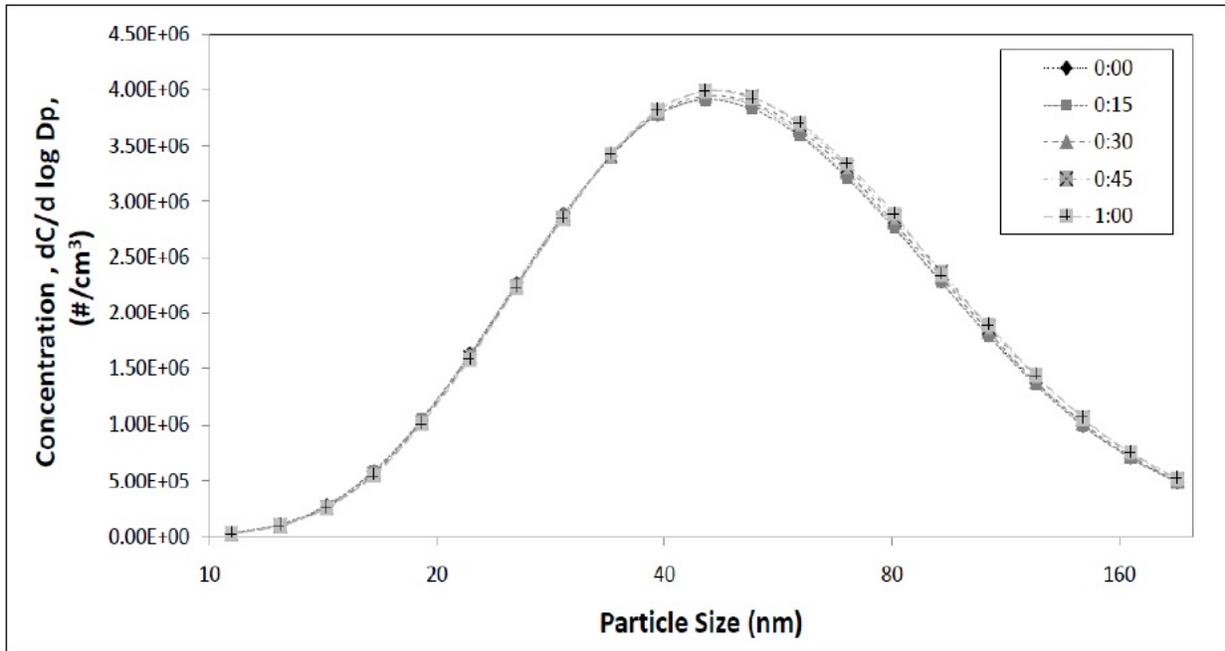


Figure 2.11 – Test de stabilité de la concentration à débit d'air constant de 85 l/min.

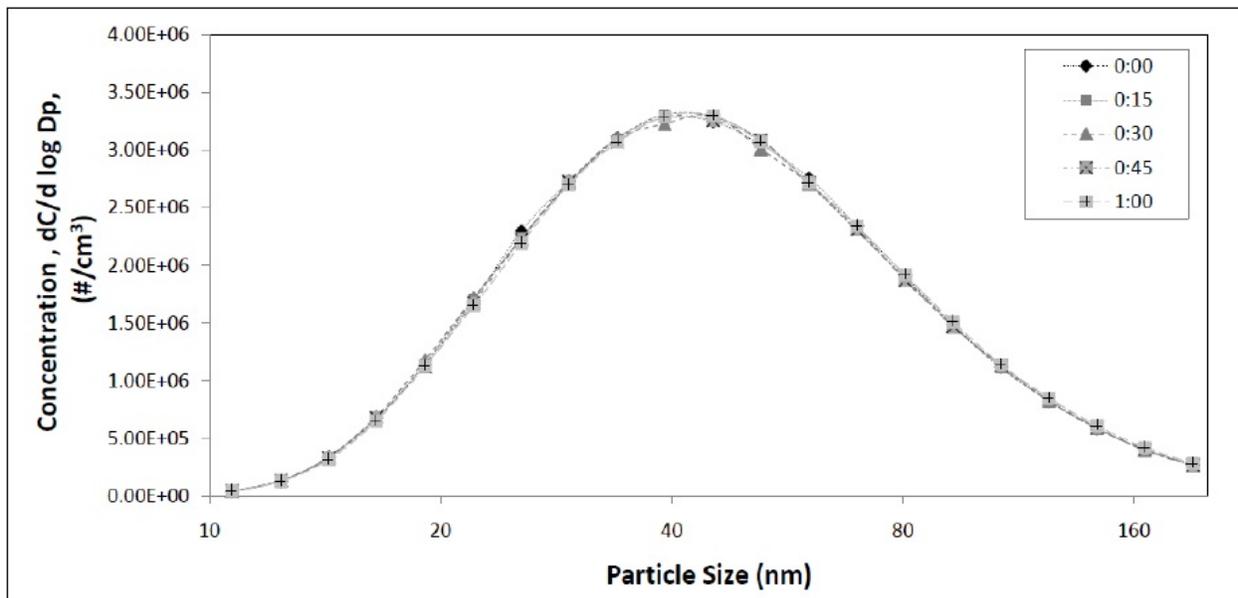


Figure 2.12 – Test de stabilité de la concentration à débit d'air cyclique de 85 l/min.
(volume minute)

Les deux tests de vérification n'ont révélé que de faibles écarts entre les échantillons à l'essai. En effet, l'écart maximal et l'écart moyen pour l'ensemble des tranches granulométriques ne dépassaient pas 13 % et 5 %, respectivement. En outre, la variation de la TPPP, soit la valeur la plus importante dans l'évaluation de l'efficacité de filtration, était inférieure à 5 %. L'écart maximal dans les deux tests de vérification survenait normalement dans la plus petite ou la plus

grande tranche granulométrique (près de 10 ou de 205,4 nm, les deux extrêmes), là où la distribution de la concentration (selon la taille des particules) était très faible par rapport aux autres tranches granulométriques. Cela dit, les écarts de concentration dans la plupart des tranches granulométriques (y compris celle des particules de la TPPP) étaient significativement plus faibles que l'écart maximal.

2.5 Choix de l'appareil respiratoire

Un modèle d'APR de type N95 en forme de coquille offert sur le marché a été retenu aux fins d'essais dans cette étude. Les appareils n'étaient pas préalablement conditionnés, et ils ont été testés comme ils avaient été reçus. Après chaque essai, l'appareil de protection respiratoire utilisé était retiré du mannequin et mis au rebut. Un nouvel appareil était ensuite mis en place pour l'essai suivant. Chaque appareil était soigneusement scellé sur le mannequin au moyen d'un agent à base de silicone afin d'éviter d'éventuelles fuites. Par conséquent, cette étude n'aborde pas les voies de fuite en ce qui concerne la pénétration des PUF.

2.6 Protocoles expérimentaux

2.6.1 Influence de la fréquence respiratoire et du DIP

2.6.1.1 Taux d'augmentation incrémentielle

Pour une granulométrie et un filtre donnés, l'amplitude du taux de pénétration des particules avec un écoulement d'air cyclique et sinusoïdal est fonction de la fréquence respiratoire (Fr) et du DIP, en supposant que tous les autres paramètres, tels que l'humidité, la température, le temps de colmatage et la masse colmatée, sont constants. On peut ainsi écrire :

$$P = f(DIP, Fr) \quad (2)$$

Dans un tel scénario, les variations du taux de pénétration sous l'effet de la Fr et du DIP peuvent être mathématiquement exprimées comme suit :

$$dP = \left(\frac{\partial P}{\partial DIP} \right)_{Fr} d(DIP) + \left(\frac{\partial P}{\partial Fr} \right)_{DIP} d(Fr) \quad (3)$$

Et la variation du taux de pénétration totale s'obtient par :

$$\int dP = \int \left(\frac{\partial P}{\partial DIP} \right)_{Fr} d(DIP) + \int \left(\frac{\partial P}{\partial Fr} \right)_{DIP} d(Fr) \quad (4)$$

ou

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{DIP} + \Delta P_{Fr} \quad (5)$$

Le terme ΔP_{tot} représente la variation du taux de pénétration totale, tandis que ΔP_{DIP} et ΔP_{Fr} correspondent aux variations du taux de pénétration dues aux valeurs changeantes du DIP et de la Fr , respectivement. La figure 2.13 illustre l'équation 5 de façon graphique. Elle montre que la variation du taux de pénétration totale peut être estimée en ajoutant l'impact du DIP et de la

fréquence respiratoire. Elle résulte de l'écart entre les taux de pénétration mesurés entre les points D et A (où la Fr et le DIP ont changé, comme cela se produit dans un cycle respiratoire réel). L'effet propre au DIP peut être estimé à partir de l'écart entre les taux de pénétration mesurés entre les points A et C, ou B et D. De même, l'effet propre à la Fr peut être estimé à partir de l'écart entre les taux de pénétration mesurés entre les points A et B, ou C et D.

Le rapport entre la variation du taux de pénétration due à chaque facteur et la variation du taux de pénétration totale se définit comme le taux d'augmentation incrémentielle (du taux de pénétration des particules) :

$$X_{DIP}(\%) = \frac{\Delta P_{DIP}}{\Delta P_{tot}} * 100 \% \quad (6)$$

$$X_{Fr}(\%) = \frac{\Delta P_{Fr}}{\Delta P_{tot}} * 100 \% \quad (7)$$

où X_{DIP} et X_{Fr} correspondent aux portions du taux d'augmentation incrémentielle dues au DIP et à la fréquence respiratoire, respectivement.

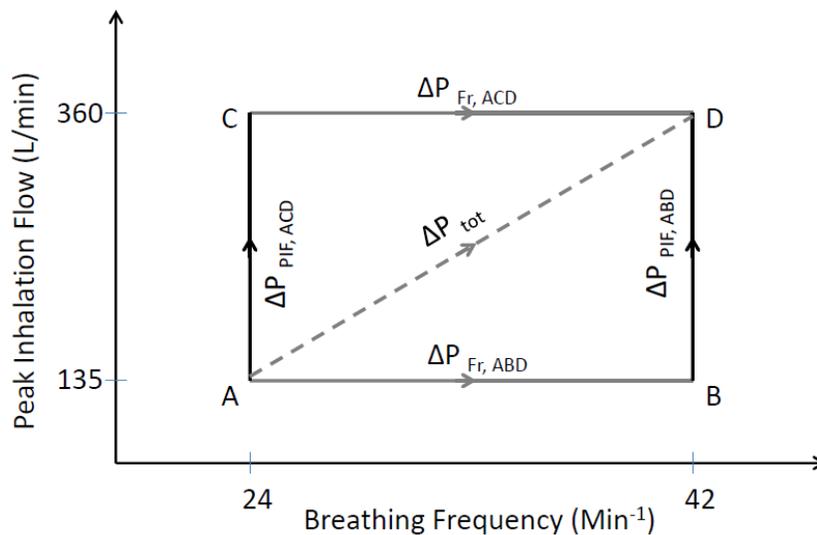


Figure 2.13 – Variation du taux de pénétration en termes de fréquence respiratoire ou de DIP

2.6.1.2 Conditions expérimentales

La figure 2.14 offre une représentation de quatre débits d'air cycliques (avec un schéma d'écoulement sinusoïdal) utilisés pour cette partie de l'étude, qui portait sur deux fréquences respiratoires (24 et 42 RPM) et deux DIP (135 l/min et 360 l/min). Les données relatives aux débits d'air cycliques retenus sont résumées dans le tableau 2.1 (débits d'air A, B, C et D). Les tests ont été effectués avec les deux configurations de débits d'air cycliques, à savoir « inhalation et exhalation » et « inhalation seulement » (voir les figures 2.2a,b).

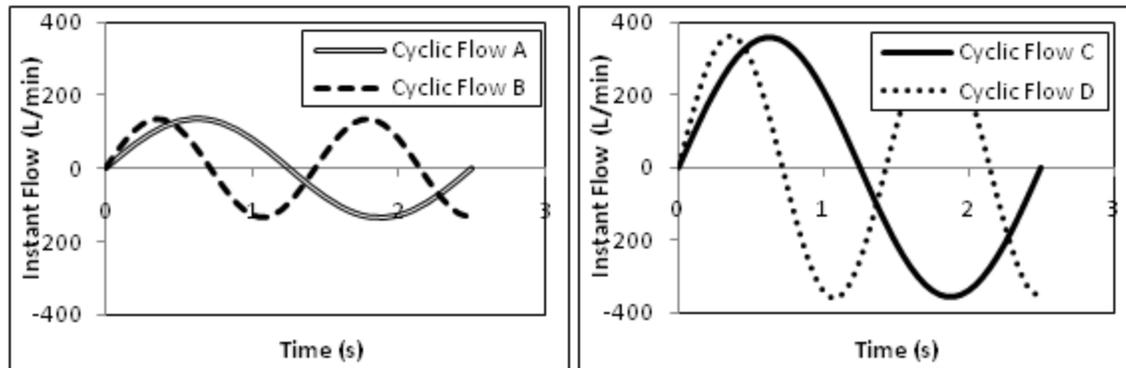


Figure 2.14 – Schémas d'écoulement d'air cyclique retenus

Tableau 2.1 – Débits d'air cycliques retenus

Débit d'air cyclique	Fréquence respiratoire (RPM)	Débit d'inhalation de pointe, DIP (l/min)	Volume respiratoire (l)
A	24	135	1,771
B	42	135	1,013
C	24	360	4,792
D	42	360	2,741

Les valeurs de DIP de 135 et 360 l/min ont été choisies afin de simuler adéquatement des conditions de respiration réelle en situation de charge de travail modérée ou élevée, respectivement. Par exemple, un DIP de 135 l/min (égal à un volume minute de 42 l/min) constitue une bonne approximation de ventilation modérée, compte tenu du fait que Caretti *et al.* et Anderson *et al.* suggèrent des valeurs de 38,5 et 47,4 l/min (volume minute), respectivement [74,76], et que ces suggestions découlent de données physiologiques recueillies auprès de sujets humains faisant de l'exercice à différents degrés d'intensité. Du fait de la représentativité d'un débit d'air cyclique avec un DIP de 135 l/min par rapport aux conditions respiratoires en milieu de travail, cette valeur a souvent été retenue par les chercheurs pour évaluer l'efficacité des filtres [60–62,67,74]. La fréquence respiratoire de 24 RPM retenue pour cette étude se situe également dans la fourchette des valeurs proposées par Anderson *et al.* ($26,5 \pm 6,7$ RPM) [73]. Bien que la valeur de 360 l/min ne soit pas aussi fréquemment utilisée que celle de 135 l/min, elle a été rapportée par des études physiologiques en contexte de respiration sous une charge de travail élevée. La valeur de 360 l/min (égale à un volume minute de 114 l/min) correspond au débit d'air maximal moyen mesuré à la fin d'un exercice sous une charge de travail maximale chez différents sujets humains [73]. La fréquence respiratoire correspondante de 42 RPM a été observée avec un tel débit d'air respiratoire. Une valeur presque identique (363,9 l/min comme DIP) a été suggérée par Berndtsson en utilisant des masques intégraux sur des sujets humains en bonne santé respirant en situation de charge de travail élevée [83]. Tout comme la valeur de

135 l/min, celle de 360 l/min a été utilisée pour évaluer l'efficacité des filtres dans d'autres études pertinentes [34,64]. Globalement, les DIP et les fréquences respiratoires retenus dans le cadre de cette étude correspondent aux conditions respiratoires sous une charge de travail modérée à élevée. Les valeurs négatives de débit d'air instantané (cycle d'exhalation) de la figure 2.14 sont tenues pour être égales à zéro dans le cas de la configuration « inhalation seulement », puisque l'exhalation a été exclue du débit d'air cyclique. Dans cette partie de l'étude, la température et l'HR dans la chambre étaient respectivement de 25 ± 3 °C et 15 ± 5 %.

2.6.1.3 Analyse des données

Chaque mesure du taux de pénétration (particules polydispersées de 10 à 205,4 nm) a été répétée avec quatre lots d'appareils de protection respiratoire différents, et exprimée sous forme de valeur moyenne et d'écart-type. Chaque test a été répété avec les configurations « inhalation et exhalation » et « inhalation seulement » (voir les figures 2.2a,b) en faisant varier les paramètres expérimentaux de façon aléatoire ($N = 4$ pour chaque condition expérimentale). Le choix des débits d'air A et D (voir le tableau 2.1) reflète le fait que, dans la pratique, la fréquence respiratoire et le DIP augmentent simultanément. Afin d'évaluer séparément l'effet de la fréquence respiratoire et du débit d'inhalation, un seul des deux paramètres a été modulé, l'autre demeurant constant. Les débits d'air B et C ont ensuite été ajoutés. Ainsi, conformément à la figure 2.9, les deux parcours suivants permettent d'évaluer séparément l'impact de la fréquence respiratoire et du DIP :

1. Parcours ABD : En premier lieu, augmentation de la fréquence respiratoire seulement (de 24 à 42 RPM, le DIP étant maintenu à 135 l/min), puis augmentation du DIP seulement (de 135 à 360 l/min, la fréquence respiratoire étant maintenue à 42 RPM). Les écarts de taux de pénétration correspondants sont désignés $\Delta P_{Fr,ABD}$ et $\Delta P_{DIP,ABD}$, respectivement.
2. Parcours ACD : En premier lieu, augmentation du DIP seulement (de 135 à 360 l/min, la fréquence respiratoire étant maintenue à 24 RPM), puis augmentation de la fréquence respiratoire seulement (de 24 à 42 RPM, le DIP étant maintenu à 360 l/min). Les écarts de taux de pénétration correspondants sont désignés $\Delta P_{DIP,ACD}$ et $\Delta P_{Fr,ACD}$, respectivement.

En plus des valeurs de taux de pénétration, la tranche des particules de la TPPP a été déterminée pour chaque débit d'air cyclique. Les taux d'augmentation incrémentielle (X_{DIP} et X_{Fr}) ont ensuite été calculés (en divisant ΔP_{DIP} et ΔP_{Fr} par la variation du taux de pénétration totale (ΔP_{tot})) pour la tranche des particules de la TPPP, selon les deux parcours décrits ci-dessus.

À l'aide du logiciel NCSS (LLC Inc., Kaysville, UT, É.-U.), de multiples tests comparatifs ont été effectués au moyen d'analyses de variance (ANOVA) de manière à déterminer la mesure dans laquelle l'impact de paramètres tels que la fréquence respiratoire, le DIP ou la méthodologie expérimentale pouvait être significatif, et à évaluer l'effet des interactions entre ces paramètres sur le taux de pénétration des particules dans la tranche des particules de la TPPP. Les taux de pénétration obtenus dans la tranche des particules de la TPPP ont été transformés en valeurs logarithmiques et utilisés comme variables dépendantes dans l'analyse de variance. Pour chaque configuration expérimentale, une analyse de variance à deux facteurs a séparément été effectuée pour le DIP et la fréquence respiratoire. Enfin, une analyse de variance à trois facteurs

regroupant les données des configurations « inhalation et exhalation » et « inhalation seulement » a été effectuée pour évaluer l'impact de la méthodologie expérimentale. À l'aide de statistiques descriptives pour chacune des analyses, la normalité des taux de pénétration transformés a été validée selon le test de normalité de Martinez-Iglewicz.

2.6.2 Comparaison des débits d'air cycliques et constants

2.6.2.1 Conditions expérimentales

Quatre débits d'air cycliques avec des DIP de 135, 210, 270 et 360 l/min (groupes G3 à G6 dans le tableau 2.2) ont d'abord été retenus. Les fréquences respiratoires correspondant à ces débits étaient de 24, 30, 36 et 42 RPM. Les essais relatifs à cette partie de l'étude ont été effectués avec la configuration « inhalation seulement ».

Tableau 2.2 – Débits d'air cycliques et constants retenus

Groupe	Débit d'air cyclique [Fr ^(a) (RPM), DIP ^(b) (l/min)]	Débit d'air constant		
		Égal au volume minute du débit d'air cyclique (l/min)	Égal au DIM ^(c) du débit d'air cyclique (l/min)	Égal au DIP du débit d'air cyclique (l/min)
G1	Fr = 16, DIP = 68	S.O.	42	68
G2	Fr = 20, DIP = 105	S.O.	68	S.O.
G3	Fr = 24, DIP = 135	42	85	135
G4	Fr = 30, DIP = 210	68	135	210
G5	Fr = 36, DIP = 270	85	170	270
G6	Fr = 42, DIP = 360	115	230	360
G7	Fr = 45, DIP = 430	135	270	S.O.
G8	Fr = 48, DIP = 570	S.O.	360	S.O.

a) Fr : Fréquence respiratoire (respirations par minute)

b) DIP : Débit d'inhalation de pointe

c) DIM : Débit d'inhalation moyen

Les raisons du choix des débits d'air cycliques avec un DIP de 135 et 360 l/min ont déjà été expliquées à la section 2.6.1.2. Le débit d'air cyclique avec un DIP de 270 l/min a été retenu pour introduire un débit d'air cyclique correspondant à un volume minute de 85 l/min (conformément au critère d'homologation du NIOSH). Quant au débit d'air cyclique avec un DIP de 210 l/min, il a été retenu du fait qu'il simule le débit d'air respiratoire moyen mesuré sous une charge de travail élevée, comme indiqué par Anderson *et al.* (DIP moyen de $218,4 \pm 53,7$ l/min avec une fréquence respiratoire équivalente de $31,9 \pm 7,4$ RPM) [73].

Aux valeurs de taux de pénétration obtenues pour chacun des débits d'air cycliques susmentionnés s'ajoutaient les mesures de taux de pénétration effectuées avec trois débits d'air constants respectivement équivalents au volume minute, au DIM et au DIP du débit d'air cyclique correspondant (valeurs d'une même ligne dans le tableau 2.2). De manière à obtenir un vaste ensemble de données aux fins de comparaison des débits d'air cycliques et des débits d'air constants égaux aux DIM des débits d'air cycliques, quatre autres débits d'air cycliques avec des DIM équivalents de 42, 68, 270 et 360 l/min ont été retenus. Ils correspondent aux groupes G1, G2, G7 et G8 du tableau 2.2, respectivement. Les DIP correspondant à ces débits étaient de 68, 105, 430 et 570 l/min. Les deux premiers débits reflètent une respiration normale sous une charge de travail sédentaire ou modérée. Le débit d'air cyclique avec un DIP de 430 l/min correspond à la partie supérieure de l'écart-type de la respiration sous la charge de travail la plus élevée ($363,9 \pm 66,3$ l/min), comme indiqué par Berndtsson [83]. Une valeur comparable a également été rapportée par Blackie *et al.* [73]. Le débit d'air cyclique de 570 l/min peut aussi correspondre à la partie supérieure du 95^e centile de la respiration sous une charge de travail élevée lorsque les sujets parlent au cours de l'exercice (donné comme étant de 573 l/min par Berndtsson [83]). L'HR et la température de la chambre ont été maintenues à 15 ± 5 % et 25 ± 3 °C, respectivement.

2.6.2.2 Analyse des données

Des mesures de taux de pénétration ont été effectuées pour les débits d'air cycliques et constants. Pour chaque débit d'air, cinq lots d'appareils de protection respiratoire différents ($N = 5$) ont fait l'objet d'essais aléatoires, et les taux de pénétration initiale correspondants ont été exprimés sous formes de valeurs moyennes et d'écart-types. La TPPP a ensuite été déterminée pour chaque débit d'air. Afin de comparer les taux de pénétration d'un débit d'air cyclique et d'un débit d'air constant équivalent au DIM du débit d'air cyclique, des analyses de variance à un facteur et à deux facteurs ont été réalisées. Tout d'abord, la comparaison des taux de pénétration maximale (variable-réponse) a été effectuée au moyen d'une analyse de variance à un facteur axée sur le schéma d'écoulement de l'air (cyclique ou constant) comme facteur variable. Une analyse de variance à deux facteurs a ensuite été réalisée en prenant pour facteurs variables l'amplitude du débit d'air et le schéma d'écoulement de l'air (cyclique ou constant) afin d'étudier leur impact et leur interaction sur le taux de pénétration maximale (réponse). Dans le cas de l'analyse de variance à deux facteurs, les données relatives aux débits d'air cycliques et constants avec un DIM équivalent de 42 et 68 l/min n'ont pas été prises en compte afin de conserver une distribution normale, puisque les taux de pénétration correspondants provoquaient une importante distorsion lorsqu'ils étaient inclus dans l'analyse.

2.6.3 Temps de colmatage

2.6.3.1 Conditions expérimentales

Deux débits d'air constants d'une amplitude de 85 et 170 l/min et un débit d'air cyclique avec un DIP de 270 l/min (volume minute de 85 l/min) ont été retenus. Tous les essais relatifs au débit d'air cyclique ont été effectués avec la configuration « inhalation seulement ». Le taux de pénétration a été mesuré au point initial (zéro) ainsi qu'à intervalles précis de 2, 4 et 6 heures par rapport au point zéro. Les tests de colmatage ont été effectués pour trois degrés d'HR, soit 10, 50

et 80 %. La distribution granulométrique de la concentration en amont était polydispersée (ÉTG $\approx 1,7$). Le DNM à 80 % d'HR s'est toutefois avéré plus grand ($\approx 65-70$ nm) que le DNM à 10 et 50 % d'HR (≈ 45 nm).

Pour s'assurer que la concentration en amont était demeurée stable pendant l'essai de 6 heures, les quatre distributions granulométriques de la concentration mesurées au point initial et après 2, 4 et 6 heures de colmatage ont été comparées entre elles, et les écarts entre les quatre échantillons ont été analysés. Ces vérifications ont indiqué que la concentration était demeurée relativement stable. Par exemple, à 10 et 50 % d'HR, l'écart maximal et l'écart moyen entre les échantillons ne dépassait pas 17 % et 8 %, respectivement, ce qui permet de supposer que la concentration en amont était relativement stable pendant toute la durée de l'essai.

L'écart maximal survenait normalement dans la plus petite ou la plus grande tranche granulométrique (près de 10 ou de 205,4 nm), là où la distribution de la concentration (selon la taille des particules) était très faible par rapport aux autres tranches granulométriques. Cela dit, les écarts entre les échantillons de la plus grande partie des tranches granulométriques intermédiaires (y compris celle des particules de la TPPP, la mesure de pénétration correspondant au pire des scénarios) étaient significativement plus faibles que l'écart maximal. Comme à 10 et 50 % d'HR, la concentration à 80 % d'HR s'est avérée essentiellement stable pour toutes les tranches granulométriques de plus de 15 nm.

2.6.3.2 Analyse des données

Pour chaque débit d'air retenu, cinq lots d'appareils de protection respiratoire différents ont été testés, et ce, avec un temps de colmatage de 6 heures dans chacun des cas. Chaque essai de 6 heures a été effectué avec trois degrés d'HR (10, 50 et 80 %). Les paramètres expérimentaux ont été modulés de façon aléatoire tout au long du protocole ($N = 5$ pour chaque condition expérimentale). Les valeurs de taux de pénétration pour chaque débit d'air et pour chaque temps de colmatage ont été exprimées sous forme de valeurs moyennes et d'écart-types. Des essais comparatifs ont été réalisés au moyen d'analyses de variance à un et deux facteurs afin d'évaluer l'impact et l'interaction des facteurs sur le taux de pénétration maximale des particules de la TPPP. L'effet du temps de colmatage (au point initial et après 2, 4 et 6 heures) a été évalué au moyen d'une analyse de variance à un facteur pour chaque débit d'air retenu et pour chaque degré d'HR. L'impact simultané du schéma d'écoulement de l'air (constant ou cyclique) et du temps de colmatage a également été évalué, cette fois au moyen d'une analyse de variance à deux facteurs (où le débit d'air constant était équivalent au DIM du débit d'air cyclique). Des transformations logarithmiques ont été effectuées de manière à normaliser les données regroupées lorsqu'elles ne satisfaisaient pas au critère de normalité des statistiques descriptives.

3 RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1 Impact de la fréquence respiratoire et du DIP sur l'efficacité des APR de type N95

Les données présentées dans cette section ont été publiées dans les *Annals of Occupational Hygiene* (Mahdavi et al. [81]).

3.1.1 Résultats obtenus avec la configuration « inhalation et exhalation »

3.1.1.1 Effet du DIP et de la fréquence respiratoire sur la pénétration des particules

La figure 3.1 illustre la distribution granulométrique de la concentration en nombre selon la taille des particules en amont de l'APR de type N95 pour les quatre débits d'air cycliques retenus (A, B, C et D). Les données statistiques relatives à chaque courbe de concentration sont résumées dans le tableau 3.1.

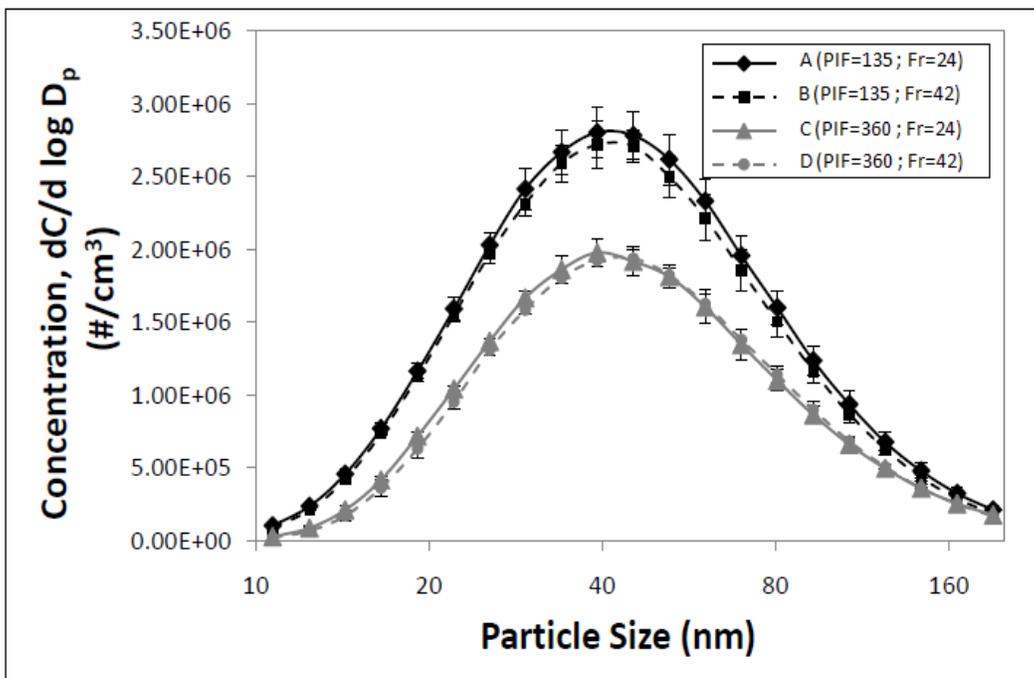


Figure 3.1 – Distribution granulométrique type de la concentration en amont de l'APR de type N95 pour les quatre débits d'air testés avec la configuration « inhalation et exhalation »

Tableau 3.1 – Caractéristiques granulométriques de la concentration en nombre des particules de NaCl avec la configuration « inhalation et exhalation »

Débit d'air cyclique	Diamètre numérique médian (nm)	Écart-type géométrique	Concentration de pointe ($\times 10^6 \text{ \#/cm}^3$) (@ taille maximale en nm) $dC/d\log D_p$	Concentration totale* ($\times 10^6 \text{ \#/cm}^3$)
A (DIP = 135, Fr = 24)	43,3	1,79	2,80 (@ 39,2)	1,84
B (DIP = 135, Fr = 42)	43,1	1,77	2,72 (@ 39,2)	1,76
C (DIP = 360, Fr = 24)	44,3	1,77	1,98 (@ 39,2)	1,25
D (DIP = 360, Fr = 42)	45,6	1,75	1,94 (@ 45,3)	1,23

* Normalisée par $\log D_p$

La figure 3.2 illustre la pénétration de particules de NaCl de 10 à 205,4 nm à travers les APR de type N95 à l'essai pour tous les débits d'air cycliques retenus. Les taux de pénétration maximaux survenaient normalement dans la tranche granulométrique de 29,4 à 39,3 nm (soit la tranche des particules de la TPPP). Comme l'indique cette figure, les taux de pénétration étaient plus élevés avec les débits d'air B, C et D qu'avec le débit d'air A (fréquence respiratoire et DIP plus faibles). Cela laisse supposer que la fréquence respiratoire et le DIP contribuent tous deux à accroître l'amplitude du taux de pénétration ; néanmoins, l'impact du DIP s'est avéré beaucoup plus marqué que celui de la fréquence respiratoire. Par exemple, dans le cas du parcours ABD (voir la figure 2.10), le taux de pénétration moyen des particules de la TPPP était de 3,31 %, 3,66 % et 9,22 % pour les débits d'inhalation cycliques A, B et D, respectivement. Cela correspond à une augmentation de seulement 11 % du taux de pénétration lorsque la fréquence respiratoire passait de 24 à 42 RPM (du point A au point B) tout en gardant le même DIP. Par contre, une augmentation de 152 % du taux de pénétration survenait lorsque le DIP passait de 135 à 360 l/min (du point B au point D) tout en maintenant la fréquence respiratoire à un niveau constant. De même, dans le cas du parcours ACD (où le taux de pénétration des particules de la TPPP atteignait 7,92 % avec le débit d'air C), une augmentation du taux de pénétration de 139 % a été observée lorsque le DIP est passé de 135 à 360 l/min (du point A au point C), alors que l'augmentation n'était que de 16 % lorsque la fréquence respiratoire passait de 24 à 42 RPM (du point C au point D). Ces pourcentages suggèrent que l'impact de la fréquence respiratoire sur l'augmentation du taux de pénétration est pratiquement négligeable par rapport à celui du DIP. L'analyse statistique, effectuée au moyen d'une analyse de variance à deux facteurs, a confirmé l'impact significatif du DIP sur le taux de pénétration ($p < 0,001$) et l'impact négligeable de la Fr ($p = 0,123$) sur ce même taux. Par ailleurs, l'analyse n'a suggéré aucune interaction significative entre ces deux paramètres ($p = 0,764$).

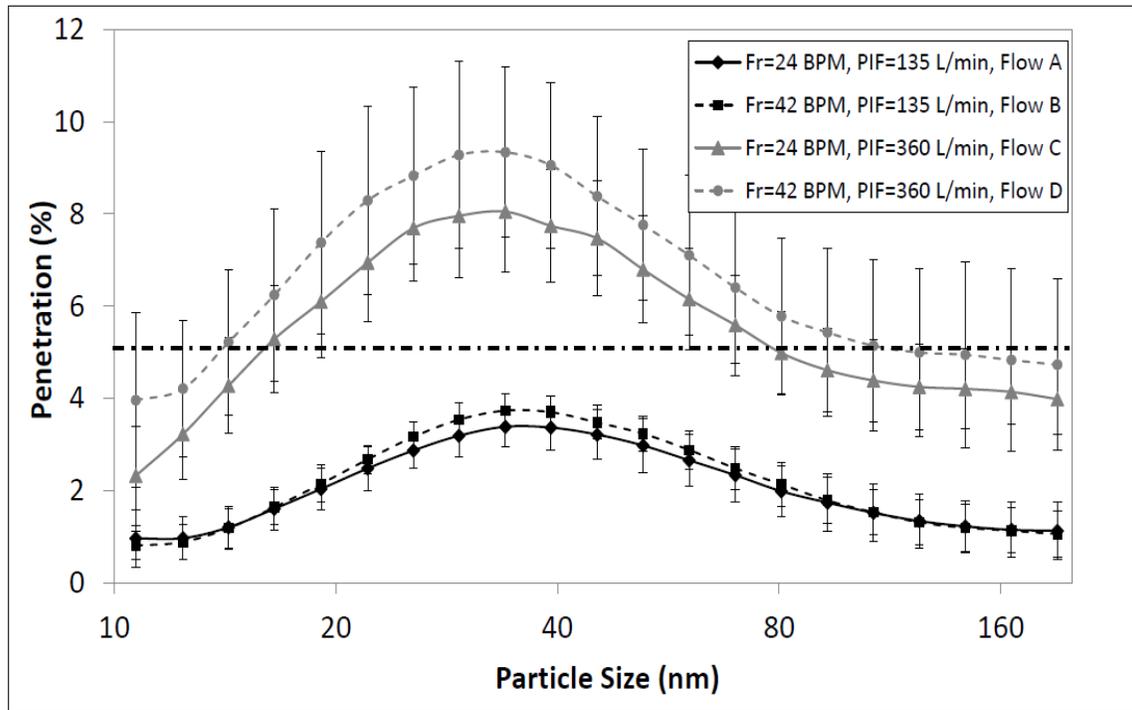


Figure 3.2 – Taux de pénétration des particules selon la taille des particules dans les quatre conditions de débit d'air cyclique à l'essai avec la configuration « inhalation et exhalation ». Le trait pointillé correspond au critère limite de 5 % du NIOSH pour les APR DE TYPE N-95 (42 CFR, 84)

3.1.1.2 Taux d'augmentation incrémentielle

Les taux d'augmentation incrémentielle (X_{DIP} et X_{Fr}) peuvent aider à interpréter l'influence relative du DIP et de la fréquence respiratoire en tant que propriétés caractéristiques du débit d'air respiratoire. Dans le cas du parcours ABD (voir la figure 2.10), le taux d'augmentation incrémentielle de la fréquence respiratoire ne dépassait pas 6 %, le reste de l'augmentation (94 %) étant dû à des variations du DIP. Les mêmes résultats qualitatifs (augmentations plus marquées dans le cas du DIP) ont été obtenus avec le parcours ACD, où les taux d'augmentation incrémentielle de la fréquence respiratoire et du DIP ont été calculés comme étant de 22 et 78 %, respectivement. Cela démontre que l'impact du DIP est plus prononcé que celui de la fréquence respiratoire. En contexte de respiration réelle, le débit d'inhalation et la fréquence respiratoire augmentent simultanément. Toute variation du taux de pénétration des particules pourrait dès lors être attribuée aux deux paramètres. Or, les taux d'augmentation incrémentielle contribuent à l'interprétation des résultats obtenus en ce qu'ils supposent qu'une augmentation du taux de pénétration est principalement attribuable à un des deux paramètres, à savoir le DIP, et que l'impact de l'autre paramètre, soit la fréquence respiratoire, demeure négligeable.

3.1.2 Résultats obtenus avec la configuration « inhalation seulement »

3.1.2.1 Effet du DIP et de la fréquence respiratoire sur la pénétration des particules

La même approche a été utilisée avec la configuration « inhalation seulement » qu'avec la configuration « inhalation et exhalation ». Les distributions granulométriques de la concentration en nombre et les données statistiques sont présentées dans la figure 3.3 et dans le tableau 3.2, respectivement.

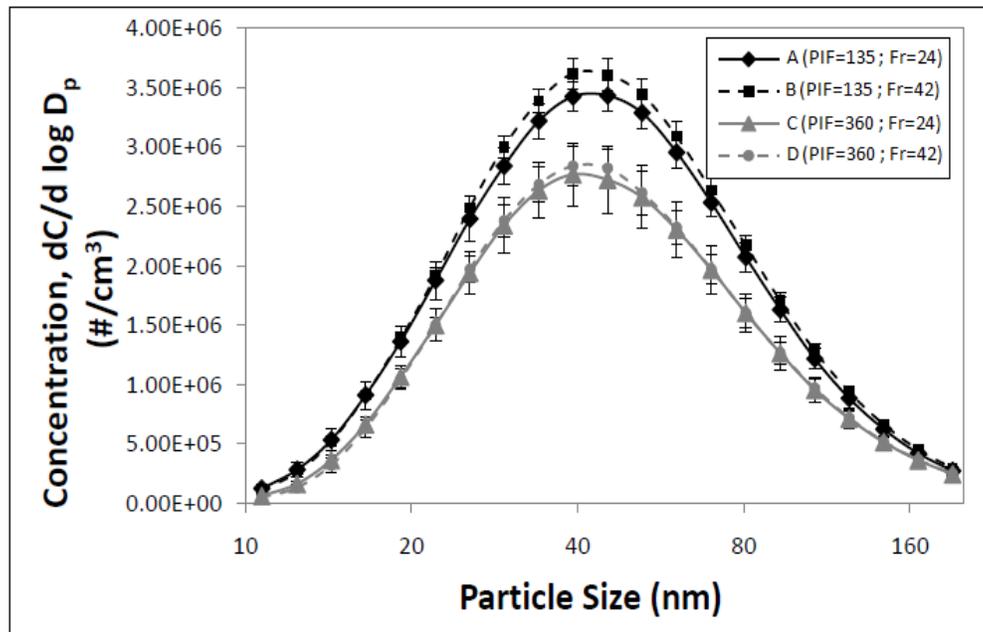


Figure 3.3 – Distribution granulométrique type de la concentration en amont de l'APR de type N95 pour les quatre débits d'air testés avec la configuration « inhalation seulement »

Tableau 3.2 – Caractéristiques granulométriques de la concentration en nombre des particules de NaCl avec la configuration « inhalation seulement »

Débit d'air cyclique	Diamètre numérique médian (nm)	Écart-type géométrique	Concentration de pointe ($\times 10^6$ #/cm ³) (@ taille maximale en nm) dC/dlogD _p	Concentration totale* ($\times 10^6$ #/cm ³)
A (DIP = 135, Fr = 24)	44,5	1,79	3,43 (@ 45,3)	2,27
B (DIP = 135, Fr = 42)	44,7	1,78	3,62 (@ 39,2)	2,37
C (DIP = 360, Fr = 24)	44,4	1,78	2,77 (@ 39,2)	1,80
D (DIP = 360, Fr = 42)	44,5	1,77	2,84 (@ 39,2)	1,81

* Normalisée par logD_p

La figure 3.4 illustre les taux de pénétration mesurés dans l'ensemble des tranches granulométriques à l'essai (de 10 à 205,4 nm) avec les quatre débits d'air cycliques retenus selon la configuration « inhalation seulement ». Les taux de pénétration maximaux survenaient normalement dans la tranche de 29,4 à 39,3 nm (soit la tranche des particules de la TPPP). Ils s'établissaient respectivement à 2,99 %, 3,28 %, 7,31 % et 8,02 % pour les quatre conditions à l'essai. Ces résultats sont indicatifs d'une augmentation de 10 % du taux de pénétration lorsque la fréquence respiratoire passait de 24 à 42 RPM (parcours ABD de la figure 2.10, du débit d'air A au débit d'air B). Par contre, une augmentation de 145 % a été observée en faisant passer le DIP de 135 à 360 l/min (du débit d'air B au débit d'air D). De même, dans le parcours ACD, une augmentation de 144 % du taux de pénétration a été observée lorsque le DIP passait de 135 à 360 l/min (du débit d'air A au débit d'air C). Et une augmentation de seulement 10 % a également été observée lorsque la fréquence respiratoire passait de 24 à 42 RPM (du débit d'air C au débit d'air D). Une analyse de variance à deux facteurs a révélé un changement statistiquement significatif du taux de pénétration des particules sous l'effet des variations du DIP ($p < 0,001$) alors que le changement attribuable à la fréquence respiratoire n'était pas significatif ($p = 0,332$). Comme pour la configuration « inhalation et exhalation », aucune interaction effective n'a été observée entre les deux paramètres ($p = 0,987$) avec la configuration « inhalation seulement ».

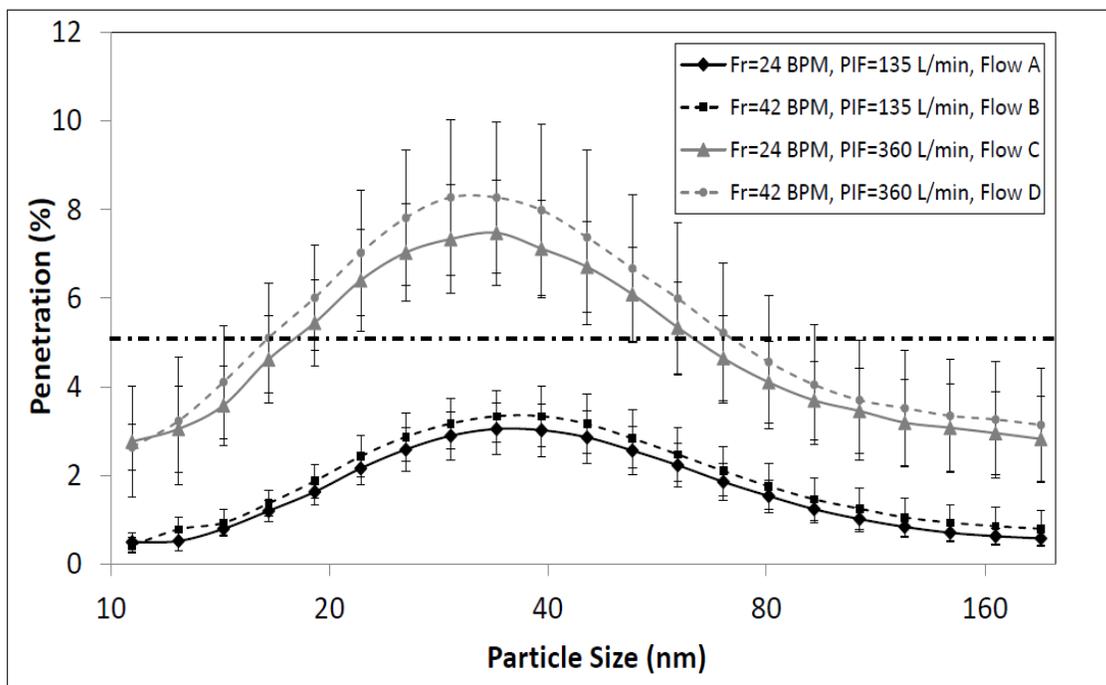


Figure 3.4 – Taux de pénétration des particules selon la taille des particules dans les quatre conditions de débit d'air cyclique à l'essai avec la configuration « inhalation seulement ». Le trait pointillé correspond au critère limite de 5 % du NIOSH pour les APR de type N-95 (42 CRF, 84)

3.1.2.2 Taux d'augmentation incrémentielle

La même méthodologie a été utilisée avec la configuration « inhalation seulement » qu'avec la configuration « inhalation et exhalation » pour calculer les taux d'augmentation incrémentielle (X_{DIP} et X_{Fr}) afin d'évaluer l'effet de la fréquence respiratoire et du DIP. Par exemple, dans le cas du parcours ABD (voir la figure 2.10), les taux d'augmentation incrémentielle de la fréquence respiratoire et du DIP étaient de 6 % et 94 %, respectivement. Et dans le cas du parcours ACD, les taux d'augmentation incrémentielle de la fréquence respiratoire et du DIP ont été calculés comme étant de 14 % et 86 %, respectivement.

Le trait pointillé des figures 3.2 et 3.4 correspond au critère limite de 5 % du NIOSH pour les APR de type N95 (42 CRF, 84). Il convient toutefois de noter que le protocole d'essai de cette étude diffère du protocole d'homologation du NIOSH. Premièrement, le NIOSH utilise un débit d'air constant de 85 l/min plutôt qu'un débit d'air cyclique. Deuxièmement, le NIOSH mesure le taux de pénétration des particules pour un DMM de 300 nm selon une technique photométrique de diffusion de la lumière afin d'établir la concentration en amont et en aval de particules dont la taille doit refléter le pire des scénarios. La présente étude portait sur l'analyse de particules polydispersées au moyen d'un SMPS. Comme l'indique la figure 3.2 pour la configuration « inhalation et exhalation », le taux de pénétration des particules s'est avéré supérieur à 5 % dans la tranche granulométrique de 16,5 à 80,6 nm dans le cas du débit d'air C (DIP = 360, Fr = 24), et dans la tranche granulométrique de 14,3 à 107,5 nm dans le cas du débit d'air D (DIP = 360, Fr = 42). Cela démontre qu'avec un DIP élevé (360 l/min), le taux de pénétration des PUF dépasse la valeur limite d'exposition du NIOSH dans le cas des particules de la TPPP. L'augmentation du taux de pénétration sous l'effet d'une augmentation du DIP s'explique par le fait qu'avec un débit d'inhalation plus élevé, l'effet des mécanismes de captation (électrostatique et de diffusion) se trouve considérablement réduit. Cette observation est conforme aux résultats d'études précédemment publiées en ce qui a trait aux débits d'air cycliques avec un DIP élevé [60,61,64,66]. Cela dit, avec un DIP de 135 l/min, le taux de pénétration des particules ne dépasse pas le seuil limite de 5 % à toutes les fréquences respiratoires. La faible variation du taux de pénétration observée à différentes fréquences respiratoires (dans la tranche nanométrique) est conforme aux résultats de Wang *et al.* [66] (avec des particules de 0,3 μm) et de He *et al.* [70]. Comme mentionné dans des publications antérieures [31-34,43,64] et comme le démontre notre étude, la TPPP était inférieure à 100 nm pour tous les débits d'air retenus, ce qui confirme la présence de charges électrostatiques dans les APR de type N95 à l'essai.

3.1.3 Impact de la méthodologie expérimentale

Comme indiqué précédemment, deux méthodologies expérimentales distinctes ont été utilisées dans cette étude, la première tenant compte de l'inhalation et de l'exhalation à travers le matériau filtrant, et la seconde, de l'inhalation seulement. Bien que des résultats presque identiques aient été obtenus avec les deux méthodologies expérimentales, nous avons constaté un écart de pénétration systématique entre les deux, les valeurs de taux de pénétration des particules étant légèrement plus élevées dans le premier cas (« inhalation et exhalation ») que dans le second (« inhalation seulement »). Il convient toutefois de noter que l'analyse statistique a révélé que cet écart n'était pas significatif. Les résultats de l'analyse de variance à un facteur en utilisant la méthodologie expérimentale comme variable factorielle indiquent que l'impact de cette dernière

n'est significatif pour aucun des débits d'air à l'essai ($0,306 \leq p \leq 0,535$). L'analyse de variance à trois facteurs a par ailleurs révélé un impact significatif du DIP ($p < 0,001$), alors que l'impact de la fréquence respiratoire ($p = 0,078$) et de la méthodologie expérimentale ($p = 0,071$) ne l'était pas. Aucune interaction effective n'a non plus été décelée entre ces facteurs ($0,778 \leq p \leq 0,968$). Entre autres explications possibles de ces résultats, il se peut que la légère augmentation du taux de pénétration avec la première configuration (« inhalation et exhalation ») soit attribuable au fait que l'air exhalé est susceptible d'évacuer certaines des particules déposées à la surface du filtre N95 au cours des cycles inhalatoires précédents, favorisant ainsi la diffusion et la pénétration d'un plus grand nombre de particules d'amont en aval lors du cycle inhalatoire suivant. Une autre explication possible tient à la nature même du débit d'air cyclique, où de faibles portions de particules inhalées (celles qui atteignent le filtre plus ou moins à la fin du cycle inhalatoire) sont renvoyées dans le flux d'air en aval au moment de l'exhalation avant d'avoir été éliminées par le filtre à particules à haute efficacité (HEPA) installé sur le mannequin. L'air exhalé a en outre pour effet de diluer les flux d'air aussi bien en aval qu'en amont. Cela dit, la dilution peut s'avérer plus importante en amont qu'en aval, puisque l'air exhalé est purifié par deux filtres (HEPA et N95), alors que le flux d'air en aval n'est dilué que par un seul filtre (HEPA), ce qui peut en fin de compte rehausser le taux de pénétration des particules avec la configuration « inhalation et exhalation ». Aucun de ces phénomènes n'est toutefois observable avec la configuration « inhalation seulement », étant donné la nature unidimensionnelle du flux d'air étudié. La figure 3.5 résume les taux de pénétration des particules de la TPPP pour tous les débits d'air cycliques à l'essai avec les deux configurations expérimentales.

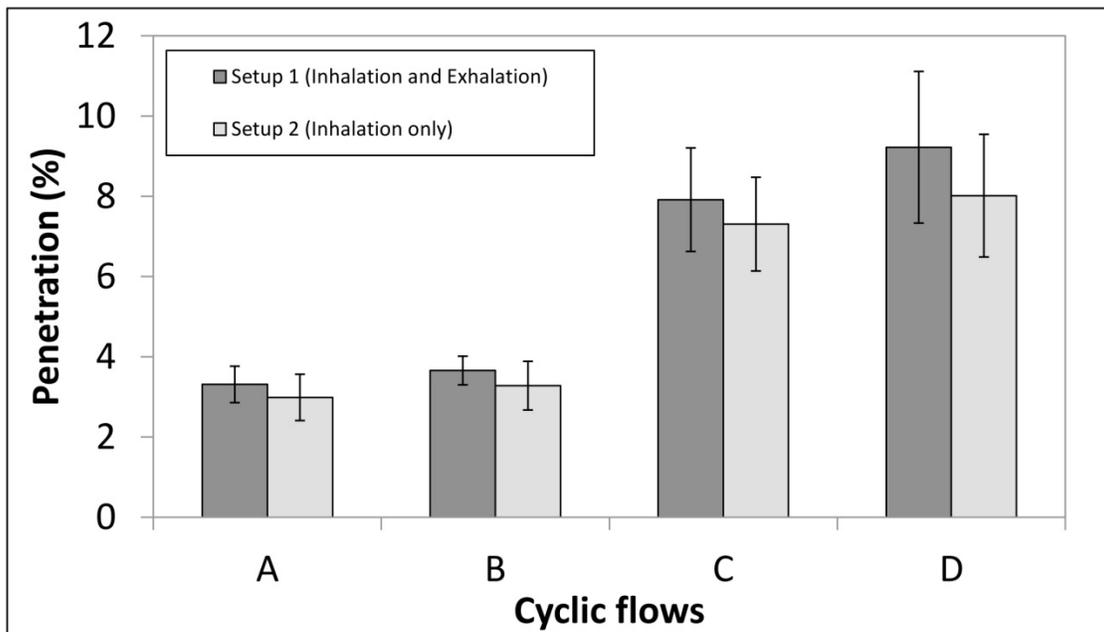


Figure 3.5 – Comparaison des taux de pénétration des particules de la TPPP pour les débits d'air cyclique A, B, C et D avec les deux configurations expérimentales

3.2 Efficacité des APR de type N95 contre les PUF dans des conditions de débit d'air cyclique et constant

Les données présentées dans cette section ont été publiées dans les *Annals of Occupational Hygiene* (Bahloul *et al.* [84]).

3.2.1 Distributions granulométriques de la concentration

Les concentrations en nombre ont été mesurées avec des aérosols de NaCl polydispersés générés par un nébuliseur Collison à six jets (solution de NaCl à 0,1 % v/v). La figure 3.6 illustre la distribution granulométrique type de la concentration en amont dans la tranche de 10 à 205,4 nm pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 270 l/min (ou 85 l/min de volume minute), et ce, à travers les cinq essais effectués avec ce débit d'air.

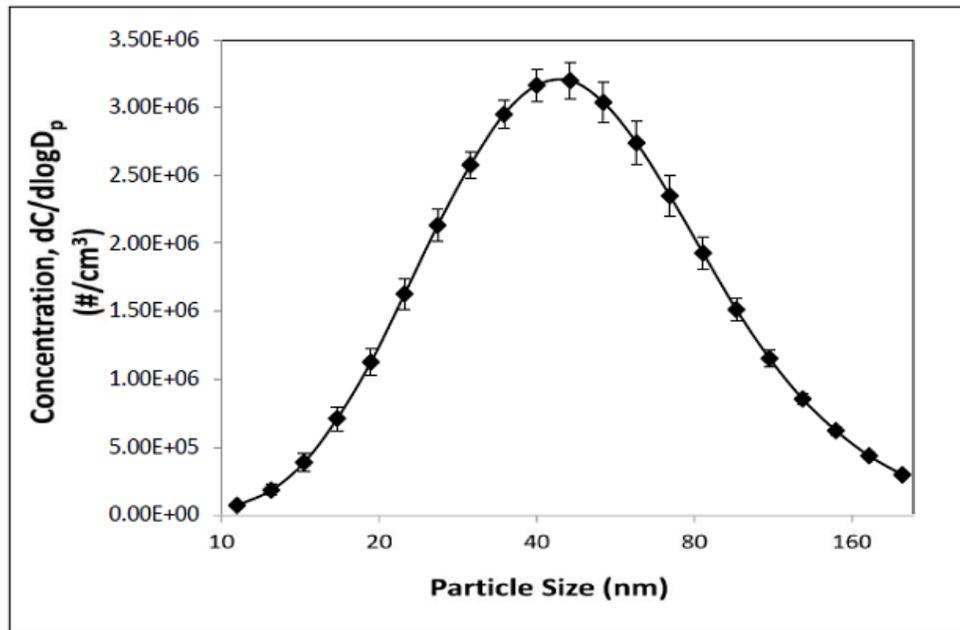


Figure 3.6 – Distribution granulométrique type de la concentration en amont de l'APR de type N95 pour un débit d'air cyclique avec un DIP de 270 l/min.

3.2.2 Taux de pénétration des particules dans des conditions de débit d'air cyclique et constant

Les courbes de pénétration pour des débits d'air cycliques avec des DIP de 135, 210, 270 et 360 l/min (groupes G3 à G6 dans le tableau 2.2) sont présentées dans les figures 3,7, 3,8, 3,9 et 3,10, respectivement (traits noirs pleins). Chaque courbe de débit d'air cyclique se superpose à trois autres courbes (traits gris pointillés) correspondant aux taux de pénétration des particules dans des conditions de débit d'air constant égal au volume minute, au DIM et au DIP du débit d'air cyclique.

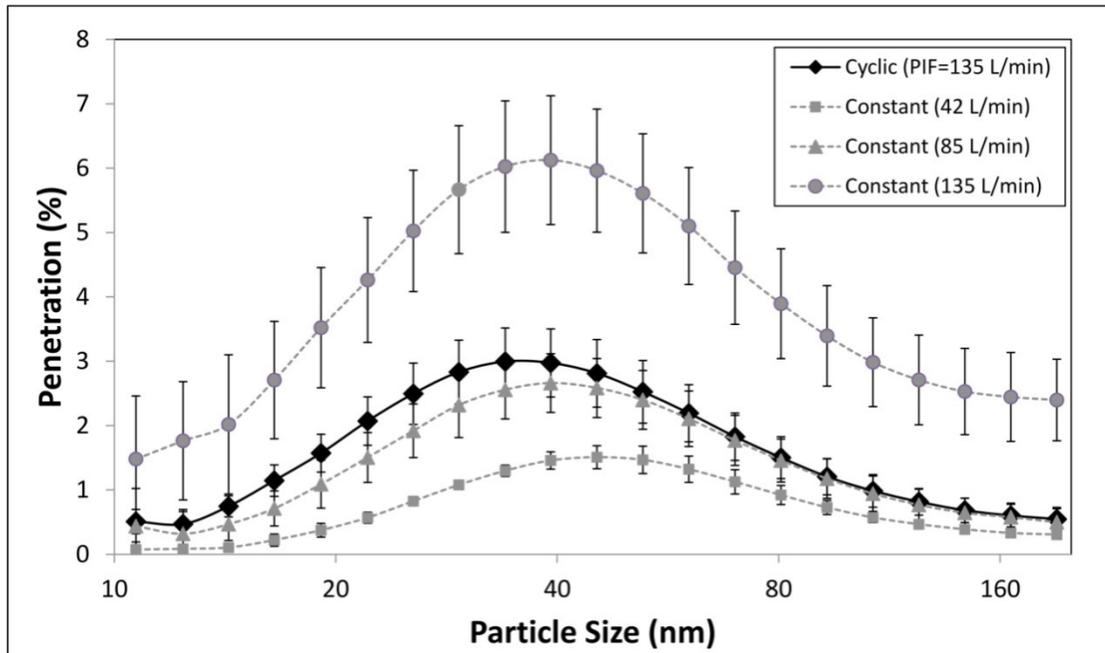


Figure 3.7 – Taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique (volume minute : 42 l/min., DIM : 85 l/min., DIP : 135 l/min.) et trois débits d'air constant de 42, 85 et 135 l/min.

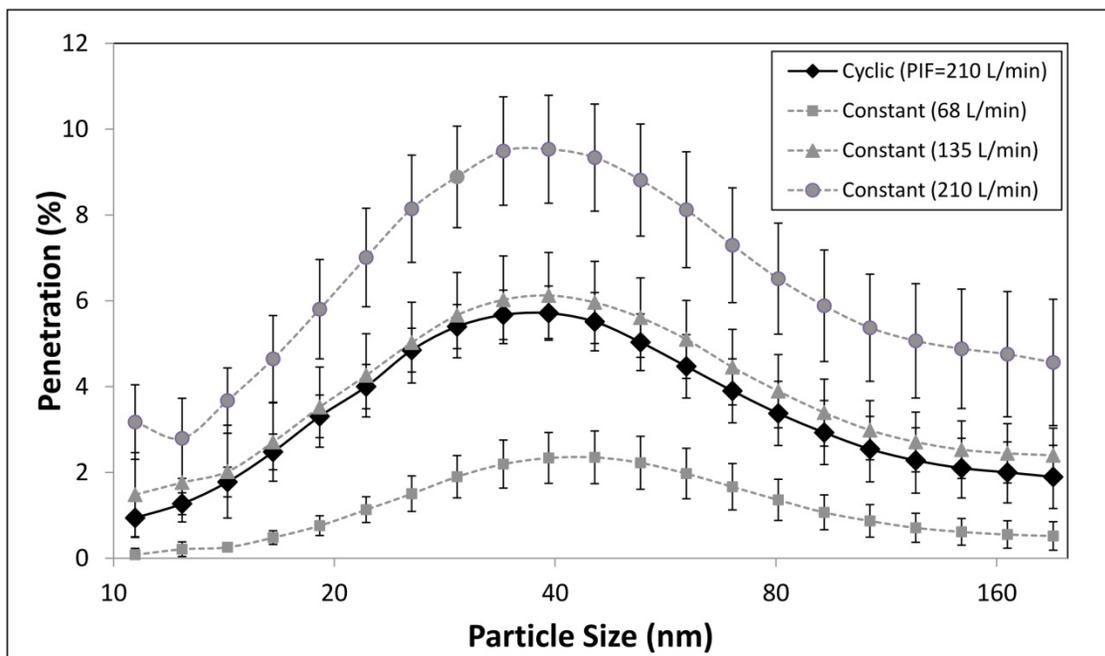


Figure 3.8 – Taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique (volume minute : 68 l/min., DIM : 135 l/min., DIP : 210 l/min.) et trois débits d'air constants de 68, 135 et 210 l/min.

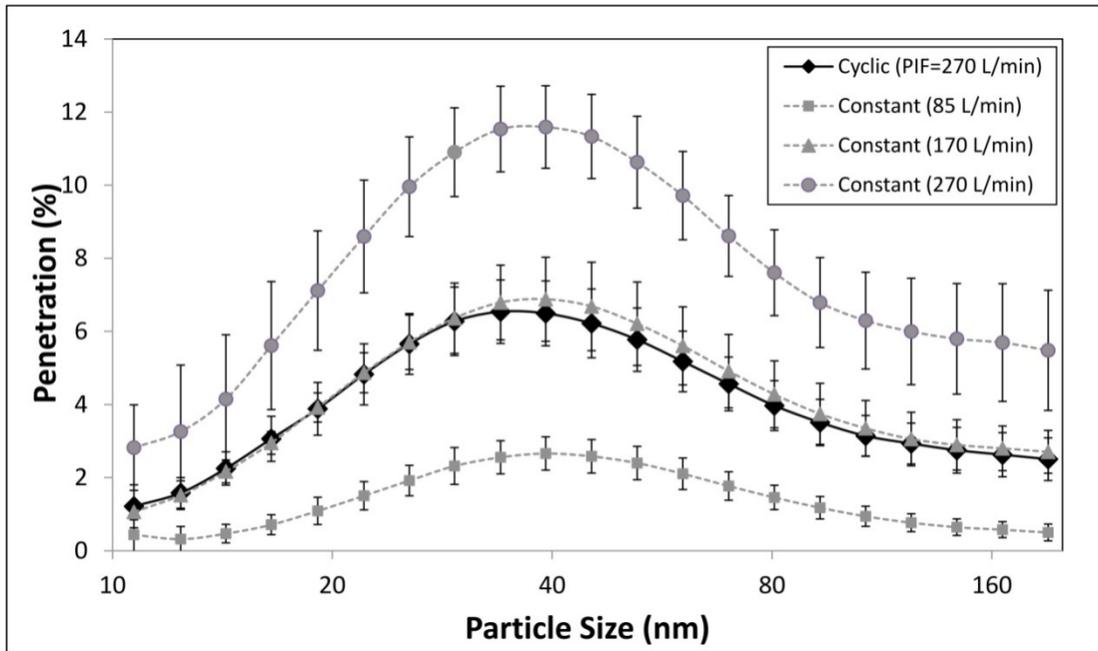


Figure 3.9 – Taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique (volume minute : 85 l/min., DIM : 170 l/min., DIP : 270 l/min.) et trois débits d'air constants de 85, 170 et 270 l/min.

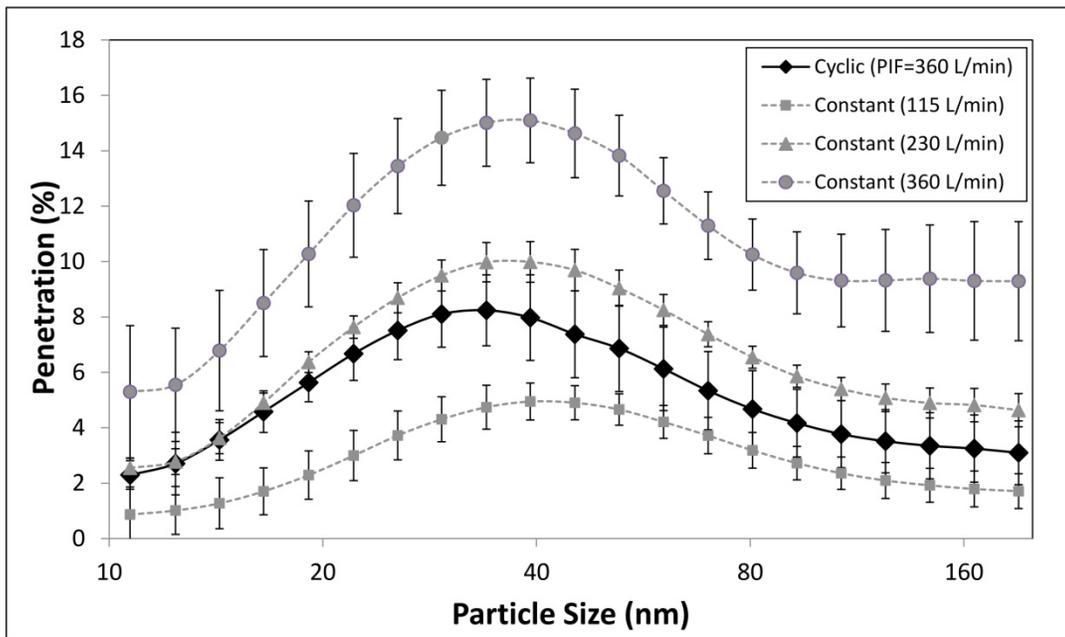


Figure 3.10 – Taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique (volume minute : 115 l/min., DIM : 230 l/min., DIP : 360 l/min.) et trois débits d'air constant de 115, 230 et 360 l/min.

Comme l'indiquent les figures 3.7 à 3.10, quelle que soit l'amplitude du débit d'air cyclique ou constant à l'essai, le taux de pénétration mesuré à débit d'air cyclique était toujours plus élevé qu'à débit d'air constant équivalent au volume minute du débit d'air cyclique. À titre d'exemple, le taux de pénétration des particules de la TPPP avec un débit d'air constant de 85 l/min s'établissait à $2,66 \pm 0,46$ %, alors qu'avec un débit d'air cyclique d'un volume minute équivalent (DIP de 270 l/min), il atteignait $6,54 \pm 0,87$ % (figure 3.9 et tableau 3.3). Il en découle qu'un débit d'air constant égal au volume minute d'un débit d'air cyclique donne lieu à une sous-estimation du taux de pénétration mesuré dans des conditions de débit d'air cyclique. En outre, compte tenu du choix du NIOSH d'un débit d'air constant de 85 l/min pour simuler le volume minute de la respiration sous une charge de travail élevée, il s'avère nécessaire de mesurer le taux de pénétration des particules avec un débit d'air cyclique également, du fait de l'importante augmentation du taux de pénétration des particules dans des conditions de débit d'air cyclique par rapport à un débit d'air constant (égal au volume minute du débit d'air cyclique). Le plus faible taux de pénétration des particules mesuré à débit d'air constant (correspondant au volume minute du débit d'air cyclique) par rapport au débit d'air cyclique effectif est conforme aux résultats précédemment obtenus [58,59,64,66]. Les similitudes observées entre les études pertinentes (malgré des conditions et des méthodologies expérimentales variables) suggèrent que le plus faible taux de pénétration des particules mesuré à débit d'air constant (correspondant au volume minute du débit d'air cyclique) est indépendant des conditions et des méthodologies expérimentales (p. ex. amplitude du débit d'air, type de filtre, nature, taille et distribution granulométrique de la concentration des particules).

Tableau 3.3 – Résumé des taux de pénétration des particules de la TPPP pour différents débits d'air cyclique et constants

Groupe	Taux de pénétration des particules de la TPPP (%)				TPPP (nm)			
	Débit d'air cyclique (DIP)	Débit d'air constant			Débit d'air cyclique (DIP)	Débit d'air constant		
		égal au volume minute du débit d'air cyclique	égal au DIM du débit d'air cyclique	égal au DIP du débit d'air cyclique		égal au volume minute du débit d'air cyclique	égal au DIM du débit d'air cyclique	égal au DIP du débit d'air cyclique
G1	1,55 ± 0,27 (68 l/min)	S.O.	1,51 ± 0,18 (42 l/min)	2,35 ± 0,61 (68 l/min)	39,2	S.O.	45,3	45,3
G2	2,53 ± 0,75 (105 l/min)	S.O.	2,35 ± 0,61 (68 l/min)	S.O.	39,2	S.O.	45,3	S.O.
G3 (fig. 3.7)	2,99 ± 0,52 (135 l/min)	1,51 ± 0,18 (42 l/min)	2,66 ± 0,46 (85 l/min)	6,12 ± 1,00 (135 l/min)	34,0	45,3	39,2	39,2
G4 (fig. 3.8)	5,71 ± 0,63 (210 l/min)	2,35 ± 0,61 (68 l/min)	6,12 ± 1,00 (135 l/min)	9,53 ± 1,26 (210 l/min)	39,2	45,3	39,2	39,2
G5 (fig. 3.9)	6,54 ± 0,87 (270 l/min)	2,66 ± 0,46 (85 l/min)	6,88 ± 1,15 (170 l/min)	11,59 ± 1,13 (270 l/min)	34,0	39,2	39,2	39,2
G6 (fig. 3.10)	8,24 ± 1,28 (360 l/min)	4,95 ± 0,67 (115 l/min)	9,99 ± 0,73 (230 l/min)	15,10 ± 1,53 (360 l/min)	34,0	39,2	39,2	39,2
G7	9,42 ± 1,62 (430 l/min)	6,12 ± 1,00 (135 l/min)	11,59 ± 1,13 (270 l/min)	S.O.	34,0	39,2	39,2	S.O.
G8	12,35 ± 1,14 (570 l/min)	S.O.	15,10 ± 1,53 (360 l/min)	S.O.	34,0	S.O.	39,2	S.O.

On obtient un résultat inverse à celui observé avec le volume minute lorsqu'on compare le taux de pénétration des particules à débit d'air cyclique à celui d'un débit d'air constant équivalent au DIP du débit d'air cyclique. À titre d'exemple, les valeurs de taux de pénétration des particules de la TPPP obtenues à débit d'air cyclique avec un DIP de 270 l/min et à débit d'air constant équivalent s'établissaient à $6,54 \pm 0,87 \%$ et à $11,59 \pm 1,13 \%$, respectivement (figure 3.9 et tableau 3.3). Il en découle qu'un débit d'air constant égal au DIP d'un débit d'air cyclique donne lieu à une surestimation du taux de pénétration mesuré dans des conditions de débit d'air cyclique. Ce résultat est conforme à ceux de Richardson *et al.*, d'Eshbaugh *et al.* et de Wang *et al.*, et ce, malgré l'utilisation de types de filtres, de matériaux filtrants et d'intervalles granulométriques différents [60,64,66].

Contrairement aux résultats obtenus avec le volume minute et le DIP, le choix d'un débit d'air constant égal au DIM d'un débit d'air cyclique fournit une estimation plus juste du taux de pénétration mesuré dans des conditions de débit d'air cyclique. À titre d'exemple, les valeurs de taux de pénétration des particules de la TPPP obtenues à débit d'air cyclique avec un DIM de 170 l/min et à débit d'air constant équivalent s'établissaient à $6,54 \pm 0,87 \%$ et à $6,88 \pm 1,15 \%$, respectivement (figure 3.9 et tableau 3.3). Ce débit d'air cyclique (avec un DIM de 170 l/min) correspond au débit d'air du protocole d'homologation DIP du NIOSH (puisque le volume minute

correspondant est de 85 l/min). Les valeurs de taux de pénétration obtenues avec les particules de la TPPP pour ces débits d'air démontrent qu'un débit d'air constant égal au DIM du débit d'air cyclique (soit deux fois le volume minute) fournit une meilleure estimation du taux de pénétration mesuré dans des conditions de débit d'air cyclique qu'un débit d'air constant égal au volume minute du débit d'air cyclique. Il va sans dire que cette conclusion ne cadre pas parfaitement avec le contexte d'homologation du NIOSH, qui choisit de mesurer le taux de pénétration des particules à travers les filtres selon un volume minute de 85 l/min. Mais cette étude n'en démontre pas moins qu'un débit d'air cyclique avec un volume minute équivalent produit des taux de pénétration significativement plus élevés que le débit d'air constant correspondant ($p < 0,001$). Autrement dit, l'utilisation d'une valeur de 85 l/min comme volume minute équivalent d'un débit d'air cyclique donne lieu à une sous-estimation du critère d'essai du NIOSH (taux de pénétration des particules avec un débit d'air constant de 85 l/min).

3.2.3 Taux de pénétration des particules de la TPPP selon l'amplitude du débit d'air et le schéma d'écoulement de l'air

Les valeurs de taux de pénétration maximale des particules et la TPPP pour toutes les conditions de débit d'air à l'essai (G1 à G8) sont résumées dans le tableau 3.3. Les valeurs de taux de pénétration des particules de la TPPP sont aussi présentées dans la figure 3.11. Dans le cas des débits d'air cycliques, trois courbes distinctes illustrent les résultats en termes de volume minute, de DIM et de DIP. Les courbes de débits d'air cycliques correspondant au DIP et au volume minute ne représentent que les données des groupes G3 à G6 ; cependant, la courbe de débit d'air cyclique correspondant au DIM couvre les données des huit groupes. Les courbes de débits d'air cycliques et constants révèlent toutes une hausse presque linéaire du taux de pénétration des particules avec l'augmentation du débit d'air.

La figure 3.11 montre clairement qu'un débit d'air constant égal au DIM du débit d'air cyclique fournit la meilleure estimation des valeurs de taux de pénétration des particules de la TPPP (pire des scénarios) mesuré dans des conditions de débit d'air cyclique. L'analyse statistique des comparaisons entre les débits d'air cycliques et constants au moyen d'analyses de variance à un facteur a révélé que les écarts entre les débits d'air des groupes G1 à G5 (42 à 170 l/min) n'étaient pas significatifs ($0,311 < p < 0,775$). Par contre, dans le cas des trois derniers groupes de débits d'air (G6, G7 et G8 ; 230 à 360 l/min), l'écart entre les taux de pénétration des particules de la TPPP mesurés avec les débits d'air cycliques et constants était statistiquement significatif ($0,012 < p < 0,039$).

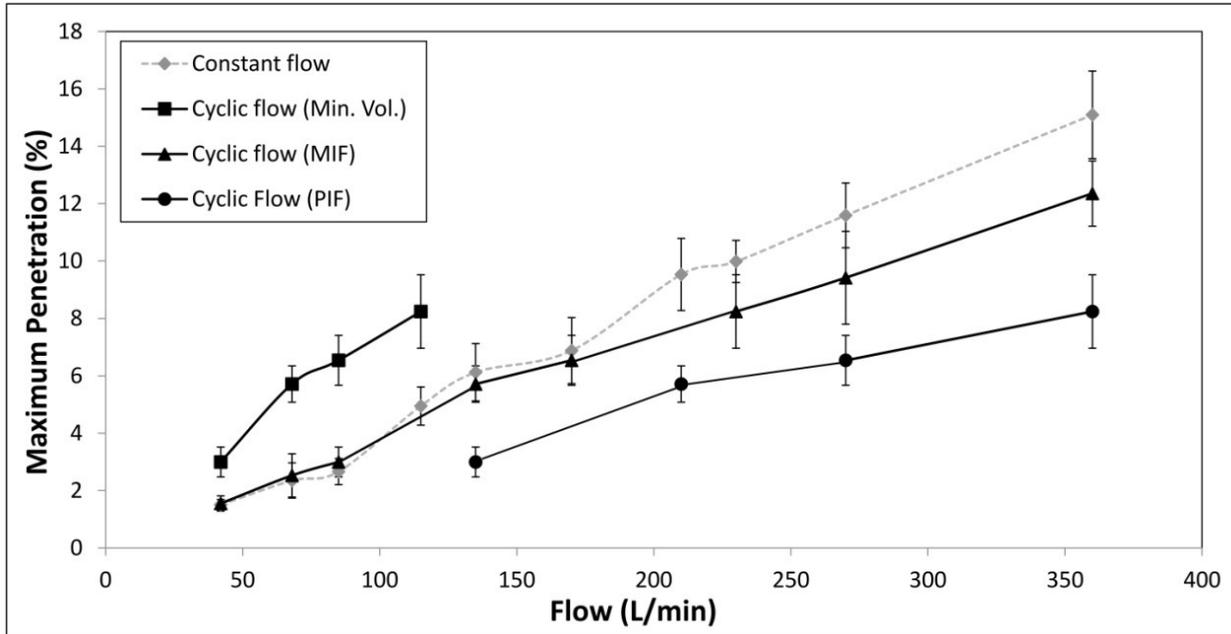


Figure 3.11 – Taux de pénétration des particules de la TPPP avec des débits d'air constants et cycliques (exprimés sous forme de volume minute, de DIM et de DIP)

Les résultats de l'analyse de variance à deux facteurs révèlent un écart statistiquement significatif entre les taux de pénétration des particules de la TPPP selon l'amplitude du débit d'air et le schéma d'écoulement de l'air ($p < 0,001$), de même que sous l'effet de leur interaction ($p = 0,014$). L'interaction effective entre ces deux facteurs – l'amplitude du débit d'air et le schéma d'écoulement de l'air – indique que selon l'amplitude du débit d'air, le taux de pénétration des particules de la TPPP entre les conditions de débit d'air cyclique et constant (égal au DIM du débit d'air cyclique) peut être égal ou significativement différent (plus élevé à débit constant).

Les conclusions de cette étude comparative de l'impact des débits d'air cycliques et constants sur le taux de pénétration des particules ne sont pas toujours conformes aux résultats de Richardson *et al.*, d'Eshbaugh *et al.* et de Wang *et al.* [60,64,66]. Dans la présente étude, un débit d'air constant équivalent au DIM d'un débit d'air cyclique semble donner un taux de pénétration égal ou supérieur au taux mesuré avec le débit d'air cyclique. Cela peut s'expliquer par la variation des paramètres d'essai, notamment le type et le modèle de filtre testé (un modèle d'APR de type N95), la nature des particules (NaCl) et la méthodologie expérimentale (utilisation d'un mannequin). Contrairement aux résultats présentés ici, ceux d'Eshbaugh *et al.* et de Richardson *et al.* sont généralisés pour divers types de filtres N95 et P100 (APR et cartouches) et des particules de natures variées (NaCl, PDO, LPS et émeri 3004) [60,64].

Cela dit, les conclusions de la présente étude s'accordent davantage avec les résultats de Haruta *et al.* [61], puisque le taux de pénétration des particules à débits d'air constants avait tendance à être plus élevé qu'à débit d'air cyclique lorsque l'amplitude du débit d'air augmentait. Il convient de noter que les deux études reposaient sur un protocole de mannequin, alors que Richardson *et al.* et Eshbaugh *et al.* n'ont pas évalué les filtres sur des mannequins [60,64]. D'autres études théoriques sont toutefois requises pour mieux comprendre le processus et l'influence des

différents paramètres d'essai sur l'efficacité des filtres. Par ailleurs, malgré une similitude globale entre les résultats de cette étude et ceux de Haruta *et al.* [61], l'écart entre les taux de pénétration des particules de la TPPP à débits d'air cycliques et constants était évident aux débits d'air les plus élevés, supérieurs à ceux retenus par Haruta *et al.* [61]. L'écart entre les valeurs obtenues peut être attribuable à la nature des particules à l'essai (NaCl plutôt que LPS) et au type de filtre utilisé.

Comme l'indiquent les résultats découlant du premier objectif, les tranches de TPPP pour les débits d'air cycliques et constants retenus se situaient autour de 34,0, 39,2 ou 45,3 nm, ce qui indique un effet de l'attraction électrostatique en plus de la diffusion et de l'interception. Ce constat est conforme aux conclusions de plusieurs études portant sur les APR de type N95 [31–33,64,80,82]. Les résultats de la présente étude indiquent que la TPPP tend à augmenter légèrement lorsque le débit d'air se trouve réduit. Par exemple, à débit d'air constant, la TPPP passait de 39,2 à 45,3 nm entre les débits d'air les plus élevés (115 l/min et plus) et les débits d'air les moins élevés (85 à 42 l/min). Cette tendance s'explique principalement par le fait qu'à débit moindre, les mécanismes de diffusion et d'attraction électrostatique se trouvent accrus, le mécanisme d'interception étant indépendant de la vélocité du flux d'air [35]. Cette conclusion est conforme à la théorie de la filtration de même qu'aux résultats expérimentaux [27,33,34].

3.3 Effet du temps de colmatage sur l'efficacité des APR de type N95 selon le degré d'HR dans des conditions de débit d'air cyclique et constant

3.3.1 Taux de pénétration des particules en fonction du temps de colmatage à 10 % d'HR

La figure 3.12 présente les taux de concentration types en amont pour différents degrés d'HR dans le cadre des essais sur le temps de colmatage.

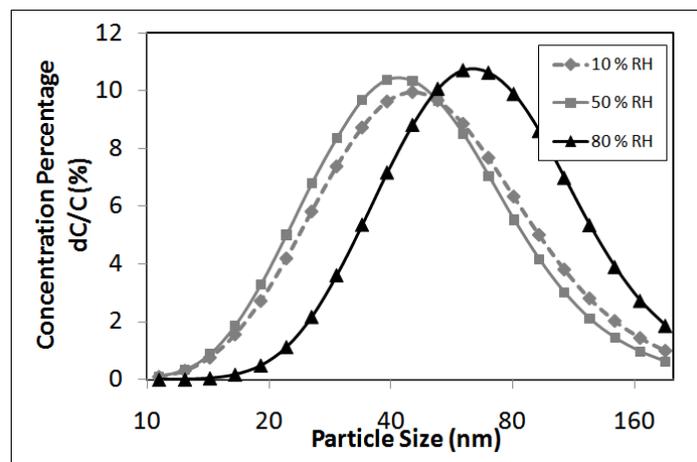


Figure 3.12 – Taux de concentration types en amont pour différents degrés d'HR

Le taux de pénétration et la TPPP varient en fonction du temps de colmatage. Les figures 3.13a, b et c illustrent les variations de la distribution granulométrique et de la TPPP pour des particules polydispersées de 10 à 205,4 nm soumises à différents débits d'air constants avec des temps de colmatage allant jusqu'à six heures à 10 % d'HR.

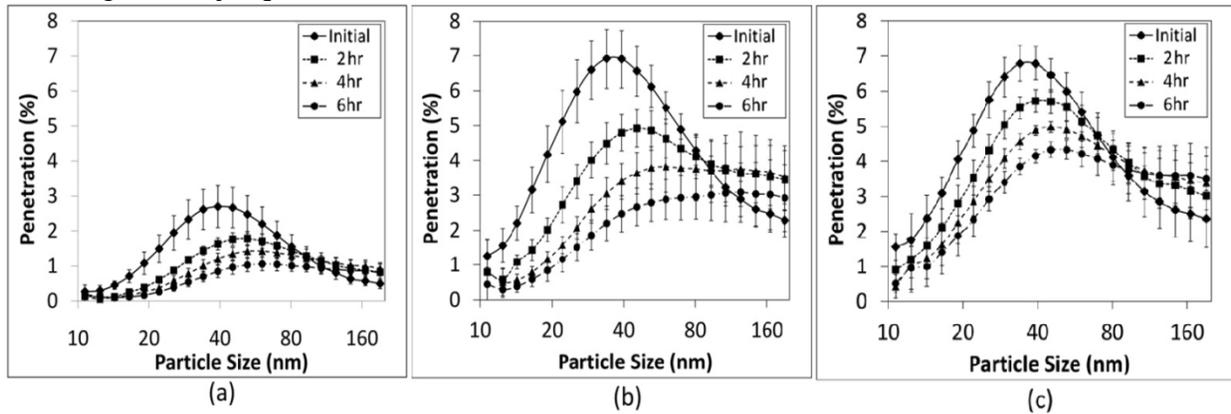


Figure 3.13 – Taux de pénétration des particules selon différents temps de colmatage à 10 % d'HR pour : a) un débit d'air constant de 85 l/min.; b) un débit d'air constant de 170 l/min.; c) un débit d'air cyclique avec un DIM de 170 l/min.

Ces tracés montrent que le taux de pénétration des particules de moins de 80 nm (y compris de la TPPP) diminuait avec l'augmentation du temps de colmatage à débit d'air cyclique (avec un DIM de 170 l/min) et à débits d'air constants (85 et 170 l/min) à 10 % d'HR. Par exemple, le taux de pénétration des particules de la TPPP avec un débit d'air constant de 85 l/min était de $2,70 \pm 0,60 \%$, $1,78 \pm 0,21 \%$, $1,42 \pm 0,17 \%$ et $1,06 \pm 0,19 \%$ au point initial et après 2, 4 et 6 heures de colmatage, respectivement. Dans le cas des particules de plus de 80 nm, cette tendance était partiellement inversée. La TPPP passait en outre de 39,2 à 60,4 nm entre le début et la fin du temps de colmatage (6 heures après le point initial). La variation du taux de pénétration des particules de la TPPP selon le temps de colmatage s'est avérée statistiquement significative ($p < 0,001$). Des résultats comparables ont été obtenus avec un débit d'air constant de 170 l/min, l'analyse de variance à un facteur ayant révélé une réduction significative du taux de pénétration ($p < 0,001$). Dans ce cas précis, le taux de pénétration des particules de la TPPP se voyait réduit de $6,92 \pm 0,85$ à $3,08 \pm 0,84 \%$ entre les stades initial et final du temps de colmatage (en 6 heures). La TPPP passait en outre de 34,0 nm à des tailles plus importantes, et en augmentant le débit d'air, la TPPP augmentait de façon beaucoup plus marquée. On a également constaté qu'au terme du test de colmatage (après 6 heures), la localisation de la TPPP n'était pas clairement définie, les taux de pénétration étant presque égaux pour différentes tailles de particules voisines de la TPPP (figure 3.13). Dans le cas du débit d'air cyclique, le taux de pénétration des plus petites particules (essentiellement < 80 nm) diminuait significativement en augmentant le temps de colmatage ($p < 0,001$). Avec ce même débit d'air, le taux de pénétration des particules de la TPPP mesuré au point initial et au terme du temps de colmatage (6 heures) était de $6,80 \pm 0,52$ et $4,33 \pm 0,28 \%$, respectivement. Entre ces deux points, la TPPP passait de 34,0 à 52,3 nm, une transition toutefois moins marquée qu'avec les débits d'air constants

La réduction du taux de pénétration dans la tranche nanométrique et l'augmentation de la taille des particules les plus pénétrantes pourraient s'expliquer par l'effet rehaussé du mécanisme de

diffusion, étant donné le colmatage accru du filtre. De nouvelles particules ont ainsi moins d'espace pour pénétrer à travers le matériau filtrant, et la probabilité de collision entre les particules et les fibres du filtre (sous l'effet du mouvement brownien) se trouve rehaussée. Il importe de noter que tous les résultats qui précèdent sont interprétés sur la base des données expérimentales et pour un seul modèle d'APR de type N95. La réduction du taux de pénétration des particules (dans la tranche nanométrique) avec l'augmentation du temps de colmatage est conforme aux résultats d'études antérieures [34,78].

Dans le cas des particules de plus grande taille (généralement de plus de 100 nm), une tendance inverse à celle des particules de taille nanométrique a été observée en ce qui a trait au taux de pénétration. Aux débits d'air constants de 85 l/min et 170 l/min, les taux de pénétration après 2 et 4 heures de colmatage étaient légèrement plus élevés qu'au point initial. Au terme de 6 heures, toutefois, une légère diminution du taux de pénétration a été observée par rapport au taux mesuré après 4 heures de colmatage. Cette réduction peut être due à la formation de dendrites, propre à inhiber une pénétration accrue des particules comme indiqué dans la littérature [45]. Dans le cas du débit d'air cyclique, par contre, le taux de pénétration des particules de plus grande taille (> 100 nm) augmentait continuellement avec le temps de colmatage. Cette augmentation du taux de pénétration des particules de plus grande taille suggère une réduction de l'attraction électrostatique avec l'augmentation du temps de colmatage [45,79].

3.3.2 Taux de pénétration des particules en fonction du temps de colmatage à 50 et 80 % d'HR

Une comparaison de la figure 3.13 aux figures 3.14 et 3.15 révèle que le filtre n'agit pas de la même façon lorsqu'on augmente le degré d'HR de 10 % à 50 % ou 80 %. Dans l'ensemble, à 50 % et à 80 % d'HR, le taux de pénétration des particules dans l'intervalle granulométrique retenu augmentait plutôt que de diminuer. À 50 % d'HR, le taux de pénétration des particules de la TPPP entre le point initial et le point final du temps de colmatage (après 6 heures) augmentait de $3,47 \pm 0,56$ % à $4,57 \pm 0,58$ % avec le débit d'air constant de 85 l/min, et de $7,79 \pm 0,88$ % à $9,44 \pm 0,82$ % avec le débit d'air constant de 170 l/min (voir les figures 3.14a,b). Cette augmentation du taux de pénétration des particules de la TPPP selon le temps de colmatage s'est avérée statistiquement significative ($p = 0,044$) à 170 l/min, et presque significative ($p = 0,069$) à 85 l/min. La TPPP augmentait également avec ces deux débits d'air, passant de 29,4 à 39,2 nm à 85 l/min, et de 25,5 à 34,0 nm à 170 l/min. Dans le cas du débit d'air cyclique (voir la figure 3.14c), le taux de pénétration des particules de la TPPP augmentait de $7,44 \pm 0,92$ à $7,89 \pm 0,86$ %, mais cette augmentation n'était pas statistiquement significative ($p = 0,87$). La TPPP augmentait par ailleurs légèrement, de 29,4 nm à 34,0 nm.

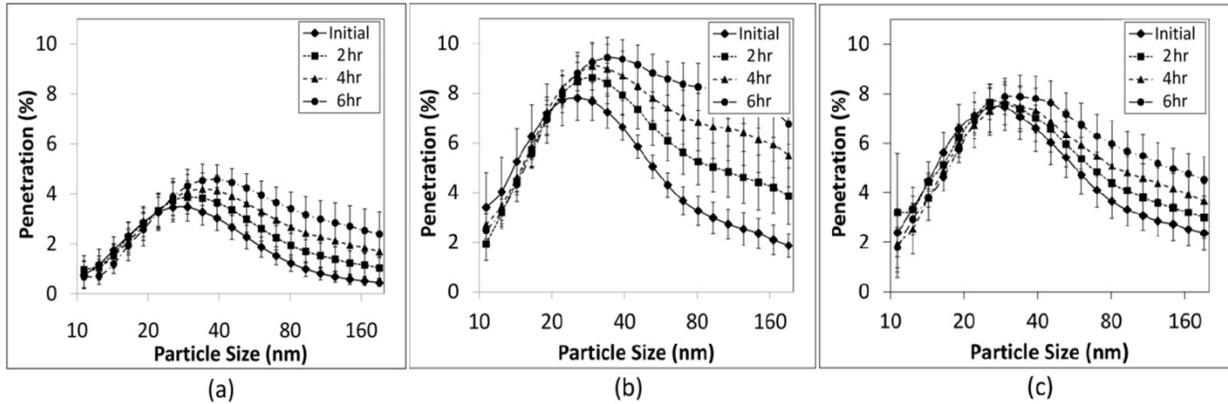


Figure 3.14 – Taux de pénétration des particules selon différents temps de colmatage à 50 % d'HR pour : a) un débit d'air constant de 85 l/min.; b) un débit d'air constant de 170 l/min.; c) un débit d'air cyclique avec un DIM de 170 l/min.

À un degré élevé d'HR (80 %), l'effet du temps de colmatage sur le taux de pénétration des particules se comparait à celui observé à 50 % d'HR. Par exemple, après 6 heures de colmatage à débit d'air constant de 85 l/min et de 170 l/min, le taux de pénétration des particules de la TPPP était passé de $3,63 \pm 0,65$ à $5,21 \pm 0,63$ % et de $8,49 \pm 1,18$ à $11,10 \pm 1,26$ %, respectivement (voir les figures 3.15a,b). Cette augmentation du taux de pénétration des particules de la TPPP selon le temps de colmatage s'est avérée statistiquement significative à 85 l/min ($p = 0,007$) de même qu'à 170 l/min ($p = 0,025$). La TPPP augmentait aussi légèrement avec ces deux débits d'air, passant de 39,2 à 45,3 nm à 85 l/min, et de 34,0 à 45,3 nm à 170 l/min. Dans le cas du débit d'air cyclique, le taux de pénétration des particules de la TPPP augmentait de $8,15 \pm 1,03$ à $9,05 \pm 1,12$ % (voir la figure 3.15c), mais cette augmentation n'était pas statistiquement significative ($p = 0,546$). En fait, avec le débit d'air cyclique, une augmentation substantielle du taux de pénétration à un degré élevé d'HR (50 et 80 %) n'a pu être observé qu'avec des particules d'une taille supérieure à la TPPP (voir les figures 3.15b,c).

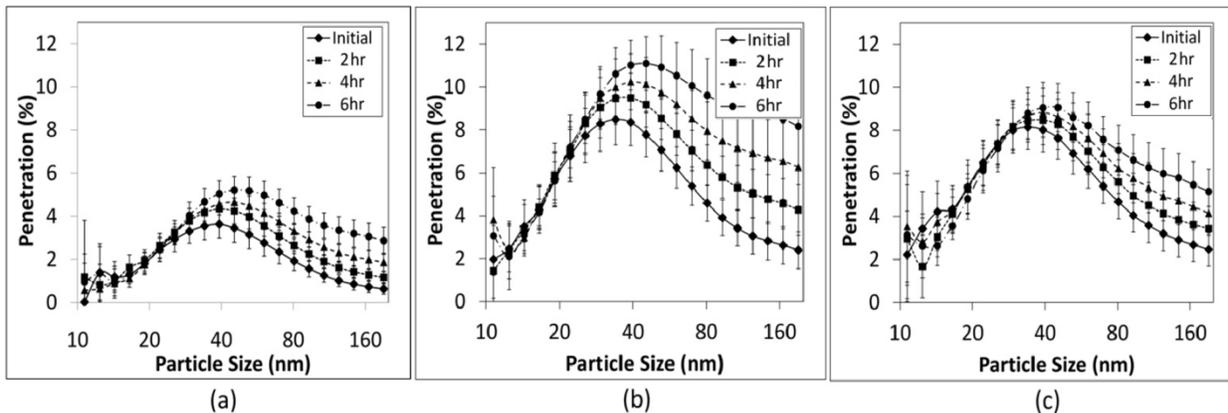


Figure 3.15 – Taux de pénétration des particules selon différents temps de colmatage à 80 % d'HR pour : a) un débit d'air constant de 85 l/min.; b) un débit d'air constant de 170 l/min.; c) un débit d'air cyclique avec un DIM de 170 l/min.

Comme l'ont indiqué Ikezaki *et al.* [85] et Lowkis et Motyl [86], l'augmentation du taux de pénétration dans le temps à un degré élevé d'HR pourrait être principalement due à la perte de

potentiel électrostatique en surface lorsque le filtre est exposé à l'air humide pendant une durée prolongée. Ce phénomène pourrait en effet s'accompagner d'une augmentation du taux de pénétration des particules de plus grande taille à travers le filtre. L'augmentation du taux de pénétration observée dans cette étude après que le filtre ait été exposé à l'air humide pendant de longues périodes (comparativement au cas « comme reçu ») est conforme aux résultats d'études antérieures [80,31,79]. Il se pourrait également qu'un taux élevé d'HR ait un effet sur les particules de NaCl, et que cet effet modifie le taux de pénétration des particules.

3.3.3 Comparaison des taux de pénétration à débits d'air cycliques et constants aux stades initial et final du temps de colmatage

Il ressort des figures 3.13a,c (10 % d'HR) que le taux de pénétration des particules avec un débit d'air constant de 85 l/min équivalent au volume minute du débit d'air cyclique est significativement moins élevé qu'avec le débit d'air cyclique ($p < 0,001$), et ce, aussi bien au stade initial qu'au stade final du temps de colmatage (après 6 heures). Cela signifie qu'indépendamment de la durée d'exposition d'un APR à un aérosol, un débit d'air constant équivalent au volume minute d'un débit d'air cyclique ne permet pas d'évaluer adéquatement l'efficacité des filtres dans des conditions de débit d'air cyclique (plus représentatives de la respiration humaine). Cette conclusion est d'ailleurs conforme à celle d'études antérieures citées dans la littérature [58,59,64,66].

Un débit d'air constant égal au DIM d'un débit d'air cyclique plutôt qu'à son volume minute permet toutefois d'évaluer adéquatement le taux de pénétration mesuré à débit d'air cyclique, comme en témoignent les courbes de pénétration presque identiques ($p = 0,793$) au stade initial du temps de colmatage (voir les figures 3.13b,c). Cette conclusion est conforme aux résultats de Haruta *et al.* [61] relativement à la comparaison d'un débit d'air constant et d'un débit d'air cyclique avec un DIM de 85 l/min. Par contre, au stade final du temps de colmatage (après 6 heures), les taux de pénétration d'une large gamme de particules (normalement de 20 à 80 nm) à débit d'air cyclique se sont avérés significativement plus élevés ($p < 0,038$) qu'à débit d'air constant (égal au DIM du débit d'air cyclique) (voir les figures 3.13b,c). Cet écart entre les taux de pénétration à débits d'air cyclique et constant au stade final du temps de colmatage suggère que le colmatage du filtre par des particules pourrait être moins rapide à débit d'air cyclique qu'à débit d'air constant. Une explication possible de ce phénomène tient à ce que l'exposition aux particules à débit d'air cyclique est limitée aux cycles inhalatoires (qui représentent la moitié des cycles respiratoires complets), alors qu'à débit d'air constant, le filtre est exposé aux particules pendant toute la durée du temps de colmatage. Par conséquent, le colmatage du filtre par les particules se fait plus rapidement à débit d'air constant. L'augmentation du taux de pénétration avec un débit d'air cyclique par rapport à un débit d'air constant égal au DIM du débit d'air cyclique est conforme aux résultats de Wang *et al.* et d'Eshbaugh *et al.* [64,66].

Le sommaire des résultats de l'analyse de variance à deux facteurs révèle que le temps de colmatage et le schéma d'écoulement de l'air (à débit d'air cyclique ou à débit d'air constant égal au DIM du débit d'air cyclique) sont deux paramètres significatifs en ce qui a trait aux variations du taux de pénétration des particules de la TPPP ($p < 0,001$). L'analyse révèle par ailleurs une interaction presque significative entre les deux variables factorielles ($p = 0,051$). L'interaction entre le temps de colmatage et le schéma d'écoulement de l'air indique qu'à différents stades du

temps de colmatage, des taux de pénétration des particules de la TPPP égaux ou différents peuvent être observés à débits d'air cycliques et constants.

À 50 et 80 % d'HR, le taux de pénétration des particules (généralement de la TPPP ou de plus grande taille) au stade final du temps de colmatage s'est avéré significativement plus élevé à débit d'air constant qu'à débit d'air cyclique ($0,003 < p < 0,026$), et ce, malgré des taux de pénétration presque égaux au stade initial. De fait, le rythme d'augmentation du taux de pénétration en fonction du temps de colmatage à 50 et 80 % d'HR était plus rapide à débit d'air constant qu'à débit d'air cyclique. Deux analyses de variance à deux facteurs ont été réalisées, l'une à 50 % d'HR et l'autre à 80 % d'HR, pour étudier l'effet du schéma d'écoulement de l'air (constant vs cyclique) et du temps de colmatage sur le taux de pénétration maximale. À 50 % d'HR, il s'est avéré que le schéma d'écoulement de l'air, cyclique ou constant, avait un impact significatif sur le taux de pénétration ($p < 0,001$). L'impact du temps de colmatage était quant à lui presque significatif ($p = 0,066$). Cependant, aucune interaction significative n'a été décelée entre le temps de colmatage et le schéma d'écoulement de l'air ($p = 0,38$). À 80 % d'HR, l'analyse de variance à deux facteurs a par ailleurs révélé que le taux de pénétration des particules de la TPPP était significativement influencé par le temps de colmatage ($p < 0,014$) et par le schéma d'écoulement de l'air ($p = 0,003$). L'interaction entre les deux facteurs n'était toutefois pas statistiquement significative ($p = 0,42$).

3.4 Limites de l'étude et futurs travaux

Malgré les résultats obtenus, il convient de noter que l'étude comportait plusieurs limites. Les limites en question sont de divers ordres, et elles ouvrent la voie à de futures recherches.

1. Les résultats présentés dans ce rapport de recherche s'appliquent à un seul modèle d'APR. Or, compte tenu des caractéristiques physiques et géométriques propres à différents types de filtres (APR, cartouches, etc.) et de matériaux filtrants (catégorie N, catégorie R, catégorie P, etc.), le taux de pénétration des particules à travers les filtres peut considérablement varier selon les types, les matériaux filtrants, les modèles et les fournisseurs. Par ailleurs, la présente étude reposait sur la génération d'un seul type d'aérosol (NaCl). Or, compte tenu de leurs propriétés physiques et chimiques, d'autres types d'aérosols (PDO, LPS, etc.) peuvent avoir un impact différent sur l'efficacité des filtres. Ainsi la mesure du taux de pénétration des particules avec divers types de filtres et d'aérosols pourrait-elle faire l'objet d'études ultérieures afin d'évaluer l'impact de diverses conditions sur l'efficacité de filtration des appareils.
2. Bien que la mesure du taux de pénétration des particules soit utile pour évaluer l'efficacité des filtres à capter les PUF, il convient de noter que les connaissances actuelles comportent encore d'importantes lacunes en ce qui concerne l'utilisation des filtres en situation réelle, où les dispositifs faciaux étanches sont susceptibles de présenter des fuites. De fait, dans le monde réel, les filtres ne sont pas fixés au visage de façon étanche. Par conséquent, l'utilisation de filtres scellés sur un mannequin correspond au scénario le plus efficace. De récentes études ont démontré que dans les faits, une fuite de dispositif facial étanche pouvait donner lieu à une importante augmentation du taux de pénétration des particules. À titre d'exemple, Grinshpun *et al.* [63] ont constaté que la quantité de particules de 40 nm pénétrant par une fuite de dispositif facial étanche était en moyenne sept fois plus importante que la quantité de particules pénétrant à travers le support filtrant. D'autres études visant à mesurer le taux de pénétration des particules par les fuites d'un dispositif facial étanche et à comparer les résultats à ceux obtenus avec des filtres scellés [7,65,62] ont révélé que la pénétration de particules par les fuites du filtre était globalement plus importante qu'à travers le filtre lui-même. Il est donc impératif, dans de futures recherches, d'étudier l'influence des fuites de dispositif facial étanche en plus de celle des autres paramètres expérimentaux.
3. Les résultats de la présente étude en ce qui concerne l'effet du temps de colmatage se limitent aux mesures de taux de pénétration des particules. Il s'agit là d'une approche plutôt sommaire à la mesure du taux de pénétration des particules à travers les filtres. Une approche quantitative consistant à mesurer le taux de pénétration en fonction de la masse des particules qui se déposent à la surface des filtres constituerait une façon appropriée de valider les résultats émanant des comparaisons entre débits d'air cycliques et constants. De telles mesures pourraient faire l'objet d'études ultérieures portant sur une évaluation plus approfondie de l'effet du temps de colmatage. Le nombre de débits d'air cycliques et constants retenus pour les tests de colmatage était également limité. Davantage de données pourraient donc être recueillies dans le cadre de futurs travaux de recherche.
4. Tous les débits d'air cycliques utilisés dans cette étude présentaient un schéma d'écoulement sinusoïdal, et tous les débits d'air constants reposaient sur des valeurs précises exprimées sous

forme de volume minute, de DIM et de DIP. En réalité, cependant, la respiration humaine n'épouse pas un schéma d'écoulement d'air parfaitement sinusoïdal. Différentes charges de travail et des états de santé variables chez les travailleurs peuvent donner lieu à différents schémas d'écoulement de l'air respiré, et donc à des mesures différentes du taux de pénétration des particules. À titre d'exemple, Wang *et al.* [66] ont constaté qu'à volume minute égal (50 l/min), le taux de pénétration de particules de 300 nm avec un écoulement d'air sinusoïdal était plus élevé qu'avec un écoulement d'air trapézoïdal, mais moins élevé qu'avec un écoulement d'air exponentiel. De futurs travaux pourraient donc porter sur l'évaluation de l'impact des schémas d'écoulement de l'air sur l'efficacité des filtres respiratoires avec différentes particules et différents débits d'air.

5. La présente étude était strictement expérimentale. Une étude théorique approfondie fondée sur la théorie de la filtration par fibre unique dans le cas des APR de type N95 compléterait avantageusement cette étude. Une approche théorique favoriserait en effet une meilleure compréhension des mécanismes de filtration et permettrait vraisemblablement de cerner l'apport de chacun dans le processus de filtration global. L'élaboration d'un modèle de prévision théorique pour évaluer l'efficacité des filtres pourrait également favoriser une meilleure compréhension de la façon dont les principaux paramètres influent sur l'efficacité de filtration et ainsi appuyer le développement d'appareils de protection respiratoire plus efficaces.

4 CONCLUSION

Cette étude visait à évaluer l'efficacité d'un modèle d'appareil de protection respiratoire à pièce faciale filtrante (APR) de type N95 à capter des particules de NaCl polydispersées dans des conditions de débit d'air cyclique et constant. Des schémas d'écoulement d'air cyclique et des aérosols polydispersés ont été retenus pour simuler des conditions de travail. Le but de l'exercice était de déterminer quel débit d'air constant offrait la meilleure corrélation avec les mesures d'efficacité d'un APR de type N95 dans des conditions de débit d'air cyclique simulant la respiration humaine en situation réelle.

L'influence de la fréquence respiratoire et du débit d'inhalation de pointe (DIP) a d'abord été étudiée à débit d'air constant avec deux installations expérimentales distinctes selon des configurations dites d'« inhalation et exhalation » et d'« inhalation seulement ». Les résultats ont révélé que le DIP avait un effet significatif important sur la pénétration des particules ultrafines (PUF) tandis que l'impact de la fréquence respiratoire était modeste. Le dispositif expérimental simulant « l'inhalation et l'exhalation » n'a donné lieu à aucun écart de pénétration significatif par rapport au dispositif simulant « l'inhalation seulement ». Par conséquent, la configuration « inhalation seulement » a été retenue pour le reste de l'étude.

Les taux de pénétration des particules mesurés à débits d'air cycliques et constants ont été comparés pour un large éventail de débits d'air. Il en est ressorti que l'utilisation d'un débit d'air constant égal au débit d'inhalation moyen (DIM) fournit une meilleure estimation du taux de pénétration des particules dans des conditions de débit d'air cyclique que l'utilisation d'un débit d'air constant égal au DIP ou au volume minute.

L'effet du colmatage des filtres par des particules a été étudié à débit d'air aussi bien cyclique que constant. Les résultats obtenus indiquent que le temps de colmatage a un impact significatif sur la pénétration des particules à travers les APR de type N95. À 10 % d'humidité relative (HR), le taux de pénétration des plus petites particules (normalement < 100 nm), y compris de la taille des particules les plus pénétrantes (TPPP), diminuait significativement avec l'augmentation de la durée d'exposition du filtre aux particules à l'essai. Une nette augmentation de la TPPP en fonction de la durée du temps de colmatage a également été observée. À 50 et 80 % d'HR, par contre, une tendance presque inverse a été observée quant à la variation des taux de pénétration du fait de l'augmentation globale du taux de pénétration des particules (généralement de la TPPP et de plus grande taille) avec le temps de colmatage. La comparaison entre les débits d'air cycliques et constants a révélé qu'en ce qui concerne le temps de colmatage, un débit d'air constant ne permet pas nécessairement de prédire le taux de pénétration des particules à débit d'air cyclique lorsque l'exposition est prolongée.

Enfin, cette étude permet de dégager divers axes de recherches ultérieures requises pour mieux évaluer l'efficacité des filtres d'APR contre les nanoparticules (NP) et les PUF. Premièrement, d'autres travaux sont nécessaires pour valider les résultats de cette étude avec d'autres APR, notamment les plus utilisés en milieu de travail au Québec. Deuxièmement, l'impact d'autres paramètres déterminants en lien avec l'utilisation des APR de type N95 et autres, tels que la masse d'aérosol colmatée, les schémas d'écoulement de l'air et les fuites de dispositif facial étanche, peut également faire l'objet d'études ultérieures pertinentes. Et puisque le débit

d'inhalation dépend à la fois du sujet humain et de la charge de travail, l'établissement de la courbe d'efficacité caractéristique des APR selon le débit d'air pourrait également faire l'objet de futures recherches dans le but de favoriser une utilisation optimale des APR en fonction des conditions propres à chaque débit d'air.

5 BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Oberdörster, E. Oberdörster, and J. Oberdörster, "Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles". *Environmental Health Perspectives*, vol. 113, no. 7, pp. 823–839, 2005.
- [2] R. J. Aitken, K. S. Creely, C. L. Tran, and G. Britain, "Nanoparticles: An occupational hygiene review". HSE Books, 2004.
- [3] M. J. Hull and J. L. Abraham, "Aluminum welding fume-induced pneumoconiosis" *Human Pathology*, vol. 33, no. 8, pp. 819–825, 2002.
- [4] J. H. Vincent and C. F. Clement, "Ultrafine particles in workplace atmospheres" *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 358, no. 1775, pp. 2673–2682, 2000.
- [5] E.C. Teague, "Responsible Development of Nanotechnology." National Nanotechnology Initiative Meeting, National Nanotechnology Initiative, 29 p., April 2, 2004.
- [6] ISO/TS, Nanotechnologies — Terminology and Definitions for Nano-Objects— Nanoparticle, Nanofibre and Nanoplate. Geneva, Switzerland: International Standards Organization."
- [7] S. Rengasamy and B. C. Eimer, "Nanoparticle penetration through filter media and leakage through face seal interface of N95 filtering facepiece respirators" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 56, no. 5, pp. 568–580, 2012.
- [8] S. Rengasamy, W. P. King, B. C. Eimer, and R. E. Shaffer, "Filtration performance of NIOSH-approved N95 and P100 filtering facepiece respirators against 4 to 30 nanometer-size nanoparticles" *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 5, no. 9, pp. 556–564, 2008.
- [9] C. Ostiguy, B. Soucy, G. Lapointe, C. Woods, and L. Ménard, "Health Effects of Nanoparticles-Second Edition." Studies and Research Projects / Report R-589, Montreal, IRSST, 2008. Available online at <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-589.pdf> [Accessed on March 12, 2015].
- [10] A. D. Maynard and E. D. Kuempel, "Airborne nanostructured particles and occupational health" *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 7, no. 6, pp. 587–614, 2005.
- [11] J. D. Byrne and J. A. Baugh, "The significance of nanoparticles in particle-induced pulmonary fibrosis" *McGill Journal of Medicine*, vol. 11, no. 1, p. 43, 2008.
- [12] G. Oberdörster, Z. Sharp, V. Atudorei, A. Elder, R. Gelein, A. Lunts, W. Kreyling, and C. Cox, "Extrapulmonary translocation of ultrafine carbon particles following whole-body inhalation exposure of rats" *Journal of Toxicology and Environmental Health A*, vol. 65, no. 20, pp. 1531–1543, 2002.
- [13] G. Oberdörster, Z. Sharp, V. Atudorei, A. Elder, R. Gelein, W. Kreyling, and C. Cox, "Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain" *Inhalation Toxicology*, vol. 16, no. 6–7, pp. 437–445, 2004.

-
- [14] M. Semmler, J. Seitz, F. Erbe, P. Mayer, J. Heyder, G. Oberdörster, and W. G. Kreyling, "Long-term clearance kinetics of inhaled ultrafine insoluble iridium particles from the rat lung, including transient translocation into secondary organs" *Inhalation Toxicology*, vol. 16, no. 6–7, pp. 453–459, 2004.
- [15] A. D. Maynard and R. J. Aitken, "Assessing exposure to airborne nanomaterials: Current abilities and future requirements" *Nanotoxicology*, vol. 1, no. 1, pp. 26–41, 2007.
- [16] A. Nel, T. Xia, L. Mädler, and N. Li, "Toxic potential of materials at the nanolevel." *Science*, vol. 311, no. 5761, pp. 622–627, 2006.
- [17] S. P. Faux, C. L. Tran, B. G. Miller, A. D. Jones, C. Monteiller, and K. Donaldson, "In vitro determinants of particulate toxicity: the dose-metric for poorly soluble dusts" Institute of Occupational Medicine, Research Report for the Health and Safety Executive, 2003. Available online at <http://www.hse.gov.uk/research/rpdf/rr154.pdf> [Accessed on March 12, 2015].
- [18] C. L. Tran, D. Buchanan, R. T. Cullen, A. Searl, A. D. Jones, and K. Donaldson, "Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance" *Inhalation Toxicology*, vol. 12, no. 12, pp. 1113–1126, 2000.
- [19] A. Churg, "Particle Uptake by Epithelial Cells. In Gehr, P., Heyder, J., Editors. Particle-Lung Interactions." New York: Marcel Dekker. pp. 401–435. ISBN 0-8247-9891-0.
- [20] G. Oberdörster, "Toxicology of ultrafine particles: in vivo studies" *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 358, no. 1775, pp. 2719–2740, 2000.
- [21] K. Donaldson, V. Stone, A. Clouter, L. Renwick, and W. MacNee, "Ultrafine particles" *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 58, no. 3, pp. 211–216, 2001.
- [22] G. Oberdörster, J. N. Finkelstein, C. Johnston, R. Gelein, C. Cox, R. Baggs, and A. C. Elder, "Acute pulmonary effects of ultrafine particles in rats and mice" *Research Report Health Effect Institute*, no. 96, pp. 5–74, 2000.
- [23] P. Penttinen, K. L. Timonen, P. Tiittanen, A. Mirme, J. Ruuskanen, and J. Pekkanen, "Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics" *European Respiratory Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 428–435, 2001.
- [24] H.-E. Wichmann, C. Spix, T. Tuch, G. Wölke, A. Peters, J. Heinrich, W. G. Kreyling, and J. Heyder, "Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany part I: role of particle number and particle mass" *Research Report Health Effect Institute*, no. 98, pp. 5–86, 2000.
- [25] C. Ostiguy, B. Roberge, C. Woods, and B. Soucy, "Engineered Nanoparticles: Current Knowledge about Occupational Health and Safety Risks and Prevention Measures - Second Edition." Studies and Research Projects / Report R-656, Montreal, IRSST, 2010. Available online at <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-656.pdf> [Accessed on March 12, 2015].

- [26] European Commission (2004). Nanotechnologies: A Preliminary Risk Analysis on the Basis of a Workshop Organised in Brussels on 1-2 March 2004 by the Health and Consumer Protection Directorate General of the European Commission". Available online at http://ec.europa.eu/health/ph_risk/documents/ev_20040301_en.pdf [Accessed on March 12, 2015].
- [27] R. Mostofi, B. Wang, F. Haghghat, A. Bahloul, and J. Lara, "Performance of Mechanical Filters and Respirators for Capturing Nanoparticles – Limitations and Future Direction" *Industrial Health*, vol. 48, no. 3, pp. 296–304, 2010.
- [28] C.-C. Chen and S.-H. Huang, "The effects of particle charge on the performance of a filtering facepiece" *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 59, no. 4, pp. 227–233, 1998.
- [29] S. Rengasamy, A. Miller, and B. C. Eimer, "Evaluation of the filtration performance of NIOSH-approved N95 filtering facepiece respirators by photometric and number-based test methods" *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 8, no. 1, pp. 23–30, 2011.
- [30] "NIOSH. (1995) Respiratory protection devices. Title 42, Code of Federal regulation, Part 84. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, Office of the Federal Register" pp. 30335–30398.
- [31] S. B. Martin Jr and E. S. Moyer, "Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects" *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 15, no. 8, pp. 609–617, 2000.
- [32] A. Balazy, M. Toivola, T. Reponen, A. Podgórski, A. Zimmer, and S. A. Grinshpun, "Manikin-based performance evaluation of N95 filtering-facepiece respirators challenged with nanoparticles" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 50, no. 3, pp. 259–269, 2006.
- [33] R. M. Eninger, T. Honda, A. Adhikari, H. Heinonen-Tanski, T. Reponen, and S. A. Grinshpun, "Filter performance of N99 and N95 facepiece respirators against viruses and ultrafine particles" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 52, no. 5, pp. 385–396, 2008.
- [34] R. Mostofi, A. Bahloul, J. Lara, B. Wang, Y. Cloutier, and F. Haghghat, "Investigation of potential affecting factors on performance of N95 respirator" *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, vol. 28, no. 1, pp. 26–39, 2011.
- [35] W. C. Hinds, "Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles" John Wiley & Sons, 2012.
- [36] F. Haghghat, A. Bahloul, J. Lara, R. Mostofi, and A. Mahdavi, "Development of a Procedure to Measure the Effectiveness of N95 Respirator Filters against Nanoparticles" Studies and Research Projects / Report R-754, Montreal, IRSST 2012. Available online at <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-754.pdf> [Accessed on March 12, 2015].
- [37] L. Janssen, "Principles of physiology and respirator performance" *Occupational Health and Safety*, vol. 72, no. 6, pp. 73–81, 2003.

-
- [38] R. C. Brown, D. Wake, R. Gray, D. B. Blackford, and G. J. Bostock, "Effect of industrial aerosols on the performance of electrically charged filter material" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 32, no. 3, pp. 271–294, 1988.
- [39] R. A. Fjeld and T. M. Owens, "The effect of particle charge on penetration in an electret filter" *Industry Application IEEE Transactions*, vol. 24, no. 4, pp. 725–731, 1988.
- [40] L. L. Janssen, J. O. Bidwell, H. E. Mullins, and T. J. Nelson, "Efficiency of degraded electret filters: Part I. Laboratory testing against NaCl and DOP before and after exposure to workplace aerosols" *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, vol. 20, pp. 71–80, 2003.
- [41] S.-H. Huang, C.-W. Chen, C.-P. Chang, C.-Y. Lai, and C.-C. Chen, "Penetration of 4.5 nm to aerosol particles through fibrous filters" *Journal of Aerosol Science*, vol. 38, no. 7, pp. 719–727, 2007.
- [42] Y.-W. Oh, K.-J. Jeon, A.-I. Jung, and Y.-W. Jung, "A simulation study on the collection of submicron particles in a unipolar charged fiber" *Aerosol Science and Technology*, vol. 36, no. 5, pp. 573–582, 2002.
- [43] A. Balazy, M. Toivola, A. Adhikari, S. K. Sivasubramani, T. Reponen, and S. A. Grinshpun, "Do N95 respirators provide 95% protection level against airborne viruses, and how adequate are surgical masks?" *American Journal of Infection Control.*, vol. 34, no. 2, pp. 51–57, 2006.
- [44] Y. Qian, K. Willeke, S. A. Grinshpun, J. Donnelly, and C. C. Coffey, "Performance of N95 respirators: Filtration efficiency for airborne microbial and inert particles" *American Industrial Hygiene Association journal.*, vol. 59, no. 2, pp. 128–132, 1998.
- [45] C.-S. Wang, "Electrostatic forces in fibrous filters—a review" *Powder Technology*, vol. 118, no. 1, pp. 166–170, 2001.
- [46] C. S. Kim, L. Bao, K. Okuyama, M. Shimada, and H. Niinuma, "Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles" *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 8, no. 2, pp. 215–221, 2006.
- [47] S. Yang and G. W. Lee, "Filtration characteristics of a fibrous filter pretreated with anionic surfactants for monodisperse solid aerosols" *Journal of Aerosol Science*, vol. 36, no. 4, pp. 419–437, 2005.
- [48] S. Yang, W.-M. G. Lee, H.-L. Huang, Y.-C. Huang, C.-H. Luo, C.-C. Wu, and K.-P. Yu, "Aerosol penetration properties of an electret filter with submicron aerosols with various operating factors" *Journal of Environmental Science and Health Part A*, vol. 42, no. 1, pp. 51–57, 2007.
- [49] S. C. Kim, M. S. Harrington, and D. Y. Pui, "Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media" *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 9, no. 1, pp. 117–125, 2007.
- [50] J. Steffens and J. R. Coury, "Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles: I—Homogeneous fibers" *Separation and Purification Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 99–105, 2007.

-
- [51] L. Boskovic, I. E. Agranovski, I. S. Altman, and R. D. Braddock, "Filter efficiency as a function of nanoparticle velocity and shape" *Journal of Aerosol Science*, vol. 39, no. 7, pp. 635–644, 2008.
- [52] H.-L. Huang, D.-M. Wang, S.-T. Kao, S. Yang, and Y.-C. Huang, "Removal of monodisperse liquid aerosols by using the polysulfone membrane filters" *Separation and Purification Technology*, vol. 54, no. 1, pp. 96–103, 2007.
- [53] G. A. Stevens and E. S. Moyer, "'Worst case' aerosol testing parameters: I. Sodium chloride and dioctyl phthalate aerosol filter efficiency as a function of particle size and flow rate" *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 50, no. 5, pp. 257–264, 1989.
- [54] B. Fardi and B. Y. Liu, "Performance of disposable respirators" *Particle and Particle Systems Characterization*, vol. 8, no. 1–4, pp. 308–314, 1991.
- [55] C. C. Chen, M. Lehtimäki, and K. Willeke, "Aerosol penetration through filtering facepieces and respirator cartridges" *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 53, no. 9, pp. 566–574, 1992.
- [56] J. T. Hanley and K. K. Foarde, "Validation of Respirator Filter Efficacy" DTIC Document, 2003.
- [57] H. S. Jordan and L. Silverman, "Effect of Pulsating Air Flow on Fiber Filter Efficiency" Harvard University, Boston. School of Public Health, 1961.
- [58] R. G. Stafford, H. J. Ettinger, and T. J. Rowland, "Respirator cartridge filter efficiency under cyclic-and steady-flow conditions" *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 34, no. 5, pp. 182–192, 1973.
- [59] L. M. Brosseau, M. J. Ellenbecker, and J. S. Evans, "Collection of silica and asbestos aerosols by respirators at steady and cyclic flow" *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 51, no. 8, pp. 420–426, 1990.
- [60] A. W. Richardson, J. P. Eshbaugh, K. C. Hofacre, and P. D. Gardner, "Respirator filter efficiency testing against particulate and biological aerosols under moderate to high flow rates" Battelle Memorial Institute Columbus Ohio, US, 2006.
- [61] H. Haruta, T. Honda, R. M. Eninger, T. Reponen, R. McKay, and S. A. Grinshpun, "Experimental and theoretical investigation of the performance of N95 respirator filters against ultrafine aerosol particles tested at constant and cyclic flows" *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, vol. 25, pp. 75–88, 2008.
- [62] K. J. Cho, T. Reponen, R. Mckay, R. Shukla, H. Haruta, P. Sekar, and S. A. Grinshpun, "Large particle penetration through N95 respirator filters and facepiece leaks with cyclic flow" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 54, no. 1, pp. 68–77, 2010.
- [63] S. A. Grinshpun, H. Haruta, R. M. Eninger, T. Reponen, R. T. McKay, and S.-A. Lee, "Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: Two pathways for particle penetration" *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 6, no. 10, pp. 593–603, 2009.

-
- [64] J. P. Eshbaugh, P. D. Gardner, A. W. Richardson, and K. C. Hofacre, "N95 and P100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow" *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 6, no. 1, pp. 52–61, 2009.
- [65] S. Rengasamy and B. C. Eimer, "Total inward leakage of nanoparticles through filtering facepiece respirators" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 55, no. 3, pp. 253–263, 2011.
- [66] A. Wang, A. W. Richardson, and K. C. Hofacre, "The Effect of Flow Pattern on Collection Efficiency of Respirator Filters" *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, vol. 29, no. 1, pp. 41–54, 2012.
- [67] X. He, M. Yermakov, T. Reponen, R. T. McKay, K. James, and S. A. Grinshpun, "Manikin-based performance evaluation of elastomeric respirators against combustion particles" *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 10, no. 4, pp. 203–212, 2013.
- [68] X. He, S. A. Grinshpun, T. Reponen, M. Yermakov, R. McKay, H. Haruta, and K. Kimura, "Laboratory Evaluation of the Particle Size Effect on the Performance of an Elastomeric Half-mask Respirator against Ultrafine Combustion Particles" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 57, no. 7, pp. 884-897, 2013.
- [69] P. D. Gardner, J. P. Eshbaugh, S. D. Harpest, A. W. Richardson, and K. C. Hofacre, "Viable Viral Efficiency of N95 and P100 Respirator Filters at Constant and Cyclic Flow" *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 10, no. 10, pp. 564–572, 2013.
- [70] X. He, T. Reponen, R. T. McKay, and S. A. Grinshpun, "Effect of Particle Size on the Performance of an N95 Filtering Facepiece Respirator and a Surgical Mask at Various Breathing Conditions" *Journal of Aerosol Science*, vol. 47, no. 11, pp. 1180-1187, 2013.
- [71] X. He, T. Reponen, R. T. McKay, and S. A. Grinshpun, "How Does Breathing Frequency Affect the Performance of an N95 Filtering Facepiece Respirator and a Surgical Mask Against Surrogates of Viral Particles?" *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 11, no. 3, pp. 178–185, 2013.
- [72] X. He, S. A. Grinshpun, T. Reponen, R. McKay, M. S. Bergman, and Z. Zhuang "Effects of Breathing Frequency and Flow Rate on the Total Inward Leakage of an Elastomeric Half-Mask Donned on an Advanced Manikin Headform" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 58, no. 2, pp. 182-194, 2013.
- [73] S. P. Blackie, M. S. Fairbairn, N. G. McElvaney, P. G. Wilcox, N. J. Morrison, and R. L. Parry, "Normal values and ranges for ventilation and breathing pattern at maximal exercise" *Chest Journal*, vol. 100, no. 1, pp. 136–142, 1991.
- [74] D. M. Caretti, P. D. Gardner, and K. M. Coyne, "Workplace breathing rates: defining anticipated values and ranges for respirator certification testing" Defense Technical Information Center, 2004.

- [75] L. L. Janssen, N. J. Anderson, P. E. Cassidy, R. A. Weber, and T. J. Nelson, "Interpretation of inhalation airflow measurements for respirator design and testing" *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, vol. 22, no. 3/4, p. 122, 2005.
- [76] N. J. Anderson, P. E. Cassidy, L. L. Janssen, and D. R. Dengel, "Peak Inspiratory Flows of Adults Exercising at Light, Moderate and Heavy Work Loads" *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, vol. 23, no. 1/2, p. 53, 2006.
- [77] W. W.-F. Leung and C.-H. Hung, "Investigation on pressure drop evolution of fibrous filter operating in aerodynamic slip regime under continuous loading of sub-micron aerosols" *Separation and Purification Technology*, vol. 63, no. 3, pp. 691–700, 2008.
- [78] W. W.-F. Leung and C.-H. Hung, "Skin effect in nanofiber filtration of submicron aerosols" *Separation and Purification Technology*, vol. 92, pp. 174–180, 2012.
- [79] L. W. Barrett and A. D. Rousseau, "Aerosol loading performance of electret filter media" *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 59, no. 8, pp. 532–539, 1998.
- [80] E. S. Moyer and M. S. Bergman, "Electrostatic N-95 respirator filter media efficiency degradation resulting from intermittent sodium chloride aerosol exposure" *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 15, no. 8, pp. 600–608, 2000.
- [81] A. Mahdavi, A. Bahloul, F. Haghigat, and C. Ostiguy, "Contribution of Breathing Frequency and Inhalation Flow Rate on Performance of N95 Filtering Facepiece Respirators" *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 58, no. 2, pp. 195–205, 2014.
- [82] R. Mostofi, A. Noël, F. Haghigat, A. Bahloul, J. Lara, and Y. Cloutier, "Impact of two particle measurement techniques on the determination of N95 class respirator filtration performance against ultrafine particles" *Journal of Hazardous Materials*, vol. 217, pp. 51–57, 2012.
- [83] G. Berndtsson, "Peak Inhalation Air Flow and Minute Volumes Measured in a Bicycle Ergometer Test" *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, vol. 21, no. 1–2, pp. 21–29, 2004.
- [84] A. Bahloul, A. Mahdavi, F. Haghigat, and C. Ostiguy, "Evaluation of N95 filtering facepiece respirator efficiency with cyclic and constant flows" *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 11, no. 8, pp. 499–508, 2014.
- [85] K. Ikezaki, K. Iritani, T. Nakamura, and T. Hori, "Effect of Charging State of Particles on Electrets" *Journal of Electrostatics*, vol. 35, pp. 41–46, 1995.
- [86] B. Lowkis and E. Motyl, "Electret properties of polypropylene fabrics" *Journal of electrostatics*, vol. 51–52, pp. 232–238, 2001.