

Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-776



Développement d'une procédure de mesure de l'efficacité des filtres d'appareils de protection respiratoire N95 contre les nanoparticules

*Fariborz Haghghat
Ali Bahloul
Jaime Lara
Reza Mostofi
Alireza Mahdavi*





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 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 CSST. Abonnement : www.csst.qc.ca/AbonnementPAT

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2013
ISBN : 978-2-89631-669-4 (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
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
avril 2013



Substances chimiques et agents biologiques

Études et recherches

RAPPORT R-776

Développement d'une procédure de mesure de l'efficacité des filtres d'appareils de protection respiratoire N95 contre les nanoparticules

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.

*Fariborz Haghghat¹, Ali Bahloul², Jaime Lara³,
Reza Mostofi¹, Alireza Mahdavi¹*

¹Université Concordia

²Prévention des risques chimiques et biologiques, IRSST

³IRSST



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

Cette étude a été financée dans le cadre d'une entente entre l'IRSST et NanoQuébec.
Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.
Cette publication a été traduite, seule la version originale (R-754) fait foi.

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

Ce travail de recherche a été subventionné par l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) du Québec et par NanoQuébec.

Les auteurs tiennent à remercier le Dr Bei Wang de sa collaboration au début du projet, ainsi que Mme Christine Harries pour sa lecture attentive de la première ébauche du présent document.

La rétroaction et les commentaires stimulants du Dr Claude Ostiguy et l'assistance technique de M. Yves Cloutier ont par ailleurs joué un rôle d'une grande importance dans la mise en œuvre de ce travail de recherche. Nous aimerions enfin remercier Messieurs Bernard Caron, Pierre Drouin et Simon Demers de leur aide précieuse sur le plan technique en ce qui a trait à la conception, à l'élaboration et au suivi des expériences.

Juillet 2012

RÉSUMÉ

Les risques pour la santé et la sécurité des travailleurs exposés à l'inhalation de nanoparticules (NP) soulèvent de plus en plus d'inquiétudes. Parmi les sources d'émission de nanoparticules en milieu de travail figurent les effluents et les émanations de divers procédés, tels l'ablation et le fraisage laser. Les nanoparticules ont des propriétés potentiellement toxiques, à savoir une surface totale, une concentration en nombre et une réactivité surfacique élevées. Il a été démontré que l'inhalation – la voie d'exposition la plus courante aux nanoparticules – a des effets nocifs sur les fonctions pulmonaires, et que les particules déposées dans les poumons peuvent atteindre le système sanguin en traversant les barrières de protection pulmonaire. La filtration est la méthode de contrôle des aérosols la plus simple et la plus répandue. Elle est largement utilisée dans la ventilation mécanique et la protection respiratoire. Des inquiétudes ont toutefois été formulées en ce qui concerne l'efficacité des filtres à capter les nanoparticules.

Pour obtenir un niveau satisfaisant de protection sanitaire contre les NP, les travailleurs font amplement usage d'appareils de protection respiratoire (APR) à pièce faciale filtrante (PFF). Les filtres de type N, R et P sont trois catégories de filtres respiratoires approuvés et homologués par le National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH). L'APR à pièce faciale filtrante N95 est l'un des plus couramment utilisés. Mis au service d'un large éventail d'industries, les masques de protection respiratoire N95 sont notamment reconnus pour la facilité avec laquelle on peut s'en débarrasser, leur faible coût et leur convenance à l'usage auquel ils sont destinés. Conformément aux normes du NIOSH (42 CFR 84, NIOSH, 1997), les filtres N95 sont approuvés pour leur capacité à filtrer au moins 95 % des particules de 300 nm à un débit d'air de 85 litres/min. Pour ses essais d'homologation, le NIOSH utilise des particules dont la taille moyenne est de 300 nm parce que ce sont celles qui pénètrent le plus facilement les filtres mécaniques. Cependant, des études antérieures ont démontré que, dans le cas des filtres chargés électrostatiquement (filtres électret), la taille des particules les plus pénétrantes (TPPP) appartient à des particules plus fines encore. Quoi qu'il en soit, il manque encore beaucoup de données pour caractériser l'efficacité des filtres respiratoires à capter les nanoparticules dans les multiples contextes de travail, notamment en ce qui concerne l'influence de la température, de l'humidité et du rythme respiratoire.

Dans le cadre de cette étude, la performance d'un modèle d'APR à pièce faciale filtrante N95 approuvé par le NIOSH a été caractérisée pour des NP poly-disperses et mono-disperses dans deux contextes d'expérimentation différents. Dans le cas des NP poly-disperses, une méthodologie a été élaborée pour mesurer l'efficacité des filtres N95 contre des aérosols de NaCl dont la taille variait entre 15 nm et 200 nm, et ce, selon trois scénarios. Premièrement, le taux de pénétration initiale des particules à travers une PFF N95 a été examiné sous quatre débits d'air constants (85, 135, 270 et 360 litres/min). Deuxièmement, l'effet de la durée d'exposition des filtres N95 sur leur performance a été analysé pour une durée d'exposition de 5 heures. Troisièmement, l'influence de l'humidité relative (HR) (10 %, 30 % et 70 %) sur la pénétration des particules a été évaluée à un débit constant de 85 litres/min.

La performance de la PFF a également été étudiée à 85 litres/min contre 12 aérosols de NaCl dont la taille variait entre 20 nm et 200 nm. Les résultats obtenus ont ensuite été comparés avec les taux de pénétration initiale des particules d'aérosols poly-disperses de 20 nm à 200 nm.

Les résultats des essais sur les aérosols poly-disperses ont démontré que le taux de pénétration initiale des particules augmentait considérablement lorsque le débit d'air augmentait, et parallèlement révéla une réduction de la taille des particules les plus pénétrantes. Le taux de pénétration des particules diminuait avec la durée d'exposition des filtres N95, alors qu'il augmentait progressivement dans le cas des particules de plus grande taille. De même, la taille des particules les plus pénétrantes augmentait de 41 nm à 66 nm. Quant aux particules de moins de 100 nm, leur taux de pénétration augmentait légèrement avec l'humidité relative. Dans le cas des particules de plus grande taille, le taux de pénétration était comparable pour des HR de 10 % et 30 %, mais elle augmentait lorsque l'HR était de 70 %.

Les essais sur les aérosols mono-disperses ont été effectués à un débit constant de 85 litres/min; le taux de pénétration initiale des nanoparticules était inférieur à 5 %, ce qui est conforme à la certification du NIOSH (norme 42 CFR 84). En outre, à taille égale, le taux de pénétration initiale mesuré pour des particules mono-disperses était légèrement plus élevé que pour des particules poly-disperses.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
RÉSUMÉ.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xi
LISTE DES SYMBOLES	xiii
CHAPITRE 1 – CONTEXTE.....	1
1.1. Introduction.....	1
1.2. Travaux antérieurs	3
1.3. Mécanismes et modèles de filtration.....	4
1.3.1. Mécanismes de filtration des particules	4
1.3.2. Taille des particules les plus pénétrantes (TPPP)	6
1.4. Facteurs influant sur l'efficacité de filtration.....	7
1.4.1. Vitesse de filtration et débit d'air.....	7
1.4.2. Humidité.....	9
1.4.3. Durée d'exposition des filtres N95	9
1.4.4. État de charge des particules.....	10
1.5. Normes d'essai.....	11
1.6. Objectifs de recherche.....	12
CHAPITRE 2 – MÉTHODE EXPÉRIMENTALE	13
2.1. Introduction.....	13
2.2. Vue d'ensemble du montage expérimental	13
2.2.1. Essais de filtration d'aérosols mono-disperses.....	13
2.2.2. Essais de filtration d'aérosols poly-disperses.....	14
2.3. Protocole d'essai.....	16
2.4. Mesure de l'efficacité de filtration	22
CHAPITRE 3 – RÉSULTATS ET CONSTATATIONS	25
3.1. PHASE 1 : Pénétration d'aérosols de NaCl poly-disperses de 15 nm à 200 nm à un débit d'air constant (méthodologie d'essai sur les aérosols poly-disperses)	25
3.1.1 Pénétration initiale en fonction du débit d'inhalation	25
3.1.2 Pénétration des particules en fonction de la durée d'exposition des filtres N95.....	27
3.1.3 Pénétration des particules en fonction de l'humidité relative.....	30

3.2. PHASE 2 : Pénétration d'aérosols de NaCl mono-disperses de 20 nm à 200 nm à un débit d'air constant (méthodologie d'essai sur les aérosols mono-disperses).....	31
3.2.1. Corrélation entre la pénétration des particules mono-disperses et poly-disperses	31
CHAPITRE 4 – CONCLUSIONS ET FUTURS TRAVAUX.....	35
4.1. Conclusions et résumé	35
4.2. Futurs travaux et recommandations	36
RÉFÉRENCES.....	38
ANNEXE A : ÉTALONNAGE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL.....	45
ANNEXE B : INSTRUMENTS DE MESURE DES NANOPARTICULES.....	55
ANNEXE C : NEUTRALISEUR DE PARTICULES	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Les quatre principaux mécanismes de collecte des particules.....	5
Figure 1-2 : Pénétration fractionnée selon le diamètre des particules dans le cas d'un filtre mécanique.....	6
Figure 2-1 : Schéma de montage expérimental : essais de filtration d'aérosols mono-disperses à un débit constant	14
Figure 2-2a : Schéma de montage expérimental : essais de filtration d'aérosols poly-disperses à des débits constants	15
Figure 2-2b : Concentration en nombre des particules pendant la mise en marche du dispositif expérimental à différents débits d'air, avec une solution de NaCl à 0,01 %.....	15
Figure 2-3 : Représentation du dispositif expérimental utilisé pour évaluer l'efficacité de filtration des PFF N95 contre les aérosols poly-disperses	16
Figure 2-4 : Photographie du masque de protection respiratoire N95 à l'essai	17
Figure 2-5 : Photographie du masque de protection respiratoire N95 scellé sur le mannequin	17
Figure 2-6 : Images par MET de particules d'aérosol de NaCl poly-disperses	18
Figure 2-7 : Images par MET de nanoparticules d'aérosol de NaCl denses (A) et poreuses (B)..	18
Figure 2-8 : Images par MET de nanoparticules d'aérosol de NaCl poreuses.....	19
Figure 2-9 : Photographie du dispositif d'alimentation en air filtré (modèle 3074, TSI Inc.) relié à un nébuliseur Collision à six jets.....	19
Figure 2-10 : Le système de séchage à gel de silice	20
Figure 2-11 : Concentration en nombre et distribution granulométrique des particules d'aérosol de NaCl à différents débits d'air constants (nébuliseur réglé sur une pression d'entrée de 25 lb/po ² , avec une solution de NaCl à 0,1 %)	21
Figure 3-1 : Influence de la taille des particules et du débit d'inhalation sur la pénétration initiale des particules à travers les filtres N95 (n = 3). Les barres d'erreur représentent les écarts-types.	25
Figure 3-2 : Influence de la taille des particules et du débit d'inhalation sur le facteur de qualité des filtres N95 (n = 3). Les barres d'erreur représentent les écarts-types.	27
Figure 3-3 : Influence de la durée d'exposition sur la pénétration des particules à travers les filtres N95 à un débit d'air constant de 85 litres/min (n = 3).....	28

Figure 3-4 : Influence de la taille des particules et de la durée d'exposition sur le facteur de qualité des filtres N95 à un débit d'air constant de 85 litres/min (n = 3)	29
Figure 3-5 : Influence de l'humidité relative sur la pénétration initiale des particules à travers les filtres N95 à un débit d'air constant de 85 litres/min (n = 4). Les barres d'erreur représentent l'écart-type à chaque point.....	30
Figure 3-6 : Comparaison des taux de pénétration des particules mono-disperses et poly-disperses (n = 4). Les barres d'erreur représentent l'écart-type à chaque point.	32
Figure 3-7 : Concentration en nombre des particules pour chaque taille de particules à l'essai (n = 4). Les barres d'erreur représentent l'écart-type à chaque point.	33
Figure A-1 : Pénétration sans filtre à un débit d'air de 85 litres/min.....	46
Figure A-2 : Pénétration sans filtre à un débit d'air de 135 litres/min.....	46
Figure A-3 : Pénétration sans filtre à un débit d'air de 270 litres/min.....	47
Figure A-4 : Pénétration sans filtre à un débit d'air de 360 litres/min.....	47
Figure A-5 : Points d'échantillonnage lors des essais d'uniformité.....	48
Figure A-6 : Distribution granulométrique des particules à cinq points d'échantillonnage en amont à un débit d'air de 85 litres/min.....	49
Figure A-7 : Distribution granulométrique des particules à cinq points d'échantillonnage en amont à un débit d'air de 135 litres/min	49
Figure A-8 : Distribution granulométrique des particules à cinq points d'échantillonnage en amont à un débit d'air de 270 litres/min	50
Figure A-9 : Distribution granulométrique des particules à cinq points d'échantillonnage en amont à un débit d'air de 360 litres/min	50
Figure A-10 : Concentration des particules en fonction de la taille des particules à différentes pressions d'entrée (débit d'air de 85 litres/min et solution de NaCl à 0,01 %)	51
Figure A-11 : Concentration des particules en fonction de la taille des particules à différentes pressions d'entrée (débit d'air de 85 litres/min et solution de NaCl à 0,1 %).....	52
Figure A-12 : Concentration des particules en fonction de la taille des particules à différentes pressions d'entrée (débit d'air de 85 litres/min et solution de NaCl à 1 %).....	52
Figure A-13 : Concentration en nombre des particules pendant la mise en marche du dispositif expérimental à différents débits d'air, avec une solution de NaCl à 0,01 %.....	53

Figure B-1 : Schéma du classificateur électrostatique équipé d'un long DMA, modèle 3081. Adapté de TSI Inc., 2005	55
Figure B-2 : Schéma d'un compteur de particules de condensation, modèle 3775. Adapté de TSI Inc., 2005	57
Figure C-1 : Neutraliseur d'aérosols, modèle 3012A. Adapté de TSI Inc., 2003.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Concentration en nombre et surface totale des particules par rapport au diamètre des particules. Adapté d'Oberdorster, 2005.....	1
Tableau 2-1 : Sommaire des mesures expérimentales.....	23
Tableau 3-1 : Sommaire des taux de pénétration des particules, des chutes de pression et des TPPP dans le cadre des essais sur les aérosols poly-disperses.....	26
Tableau 3-2 : Sommaire des taux de pénétration des particules, des chutes de pression et des TPPP aux phases initiales (A) et finales (B) de la durée d'exposition des filtres N95 (5 heures)	28
Tableau 3-3 : Sommaire des données de performance à un débit d'air de 85 litres/min.....	31
Tableau A-1 : Sommaire des coefficients de variation de l'uniformité de l'aérosol.....	51
Tableau A-2 : Sommaire des résultats des essais de stabilisation	53
Tableau C-1 : Distribution des charges d'aérosol selon les formules de Gunn (Wiedensohler, 1998)	59

LISTE DES ABRÉVIATIONS

<u>Abréviation</u>	<u>Description</u>
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
CPC	Compteur de particules de condensation
CRF	Code de la réglementation fédérale
CSRSEN	Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux
CV	Coefficient de variation
DHHS	Department of Health and Human Services
DMA	Analyseur différentiel de mobilité électrique
DMM	Diamètre massique médian
EAM	Essais sur les aérosols mono-disperses
EAP	Essais sur les aérosols poly-disperses
ETG	Écart-type géométrique
HEPA	Filtre à particules à haute efficacité
HR	Humidité relative
Kr	Krypton
NaCl	Chlorure de sodium
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NP	Nanoparticule
PDO	Phtalate de dioctyle

PPF	Pièce faciale filtrante
PUF	Particule ultrafine
SDO	Sébacate de dioctyle
SMPS	Granulomètre à balayage de mesure par mobilité
TPPP	Taille des particules les plus pénétrantes

LISTE DES SYMBOLES

Symboles français

	<u>Description</u>
C_{aval}	Concentration en aval
C_{amont}	Concentration en amont
D_p	Diamètre de particule
K_B	Constante de Boltzmann
M	Masse moléculaire
P	Taux de pénétration des particules
Q	Débit d'air
q_f	Facteur de qualité
R	Rapport de corrélation
T	Température absolue
Z	Mobilité électrique

Symboles grecs

	<u>Description</u>
η	Efficacité de collecte globale
Δp	Chute de pression

CHAPITRE 1

CONTEXTE

1.1. Introduction

Le terme « nanoparticules » (NP) désigne essentiellement les particules dont au moins une des dimensions se situe à l'échelle nanométrique (taille inférieure à environ 100 nm). Des NP peuvent être introduites dans l'environnement à partir de sources variées en lien avec des phénomènes naturels, des activités humaines et des produits ou appareils ménagers (Crooks, 2007). Il y a aussi de nouvelles sources d'émission de nanoparticules dans l'environnement, notamment l'ablation, le fraisage, le meulage et le polissage par laser, à l'origine de NP dites « de synthèse » (Dina, 2008a). Cependant, on ne sait pas trop encore dans quelle mesure ces nouvelles sources d'émission de NP contribuent aux émissions totales.

Malgré leur très faible concentration massique, le nombre de NP émises dans l'environnement peut être très élevé. En conséquence, l'exposition aux NP pourrait être beaucoup plus dangereuse pour la santé humaine que l'exposition à de plus grosses particules. Le Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (CSRSEN, 2006) a fait savoir qu'il pourrait y avoir de 10 000 à 20 000 NP dans l'air d'une pièce normale, et de 50 000 à 100 000 NP par centimètre cube en milieux boisé et urbain, respectivement. Oberdorster (2005) a par ailleurs fait état du lien entre la concentration en nombre, la surface totale et le diamètre des particules pour une même concentration massique de particules aéroportées de 10 µg/cm³ (Tableau 1-1). Comme l'indique ce tableau, à concentration massique égale, lorsque le diamètre des particules diminue, le nombre de particules augmente considérablement, de pair avec une croissance exponentielle de leur surface totale.

Tableau 1-1 : Concentration en nombre et surface totale des particules par rapport au diamètre des particules.

(Adapté d'Oberdorster, 2005)

Concentration massique des particules aéroportées	Taille des particules	Concentration en nombre des particules	Surface totale des particules
(µg/cm ³)	(nm)	(particules/cm ³)	(µm ² /cm ³)
10	5	153 000 000	12 000
10	20	2 400 000	3016
10	250	1200	240
10	5000	0,15	12

Au cours de la dernière décennie, d'importantes recherches ont été faites dans le but d'améliorer la qualité et les fonctionnalités des produits en modifiant les caractéristiques de leur structure matérielle à l'échelle nanométrique. La technologie qui en découle, et qu'on appelle la « nanotechnologie », a été appliquée à la fabrication d'une grande variété de produits.

On croit que les travailleurs pourraient être plus exposés aux NP dans le cadre de la fabrication de produits à l'aide de cette technologie, et que cela pourrait avoir des répercussions sur leur santé. Selon le Bureau of Labor Statistics et le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), environ deux millions de personnes travaillaient avec des nanomatériaux aux États-Unis en 2000 (NIOSH, 2003). Des évaluations épidémiologiques ont clairement révélé des effets aigus et chroniques liés à l'exposition aux particules ultrafines (PUF). Des études de toxicité aiguë sur les effets des NP sur des animaux ont également révélé des effets aigus sur différents organes; cependant, les études de toxicité chronique restent très limitées, de sorte que des recherches plus poussées s'avèrent essentielles (Ostiguy et coll., 2008).

Les résultats des études toxicologiques précitées ont démontré qu'à masse égale et dans des conditions comparables, les particules sont généralement plus toxiques à l'échelle nanométrique qu'à l'échelle micrométrique (Donaldson et coll., 2001; Oberdorster, 2000). On a constaté que la toxicité des NP augmentait de façon importante suivant une augmentation de la surface totale et de la concentration en nombre des particules (Tran et coll., 2000). Une augmentation de leur surface totale entraîne une plus grande réactivité surfacique des NP qui influe sur leur toxicité potentielle compte tenu de la présence d'un plus grand nombre de molécules en surface (Tran et coll., 2000; Warheit et coll., 2007a; Warheit et coll., 2007b).

Les travailleurs sont généralement exposés aux NP par différentes voies en milieu de travail, notamment par inhalation, par absorption cutanée, par contact oculaire et par ingestion. L'inhalation est considérée comme la voie la plus courante par laquelle les NP atteignent différentes parties d'un organisme vivant. Par rapport aux plus grosses particules, une plus grande proportion des NP inhalées peut pénétrer dans les poumons, où elles se déposent avant d'atteindre le système sanguin et d'autres parties du corps, y compris des organes comme le cœur et le cerveau (Nemmar et coll., 2001; Oberdorster et coll., 2002; Ostiguy et coll., 2008). Une partie des NP inhalées est en effet transportée jusqu'au cerveau par les nerfs olfactif et trijumeau, comme on a pu l'observer chez des rats et des souris (Oberdorster et coll., 2004; Oberdorster et coll., 2005). Ces NP peuvent en outre atteindre le système sanguin en traversant les barrières de protection pulmonaire (Takenaka et coll., 2001; Nemmar et coll., 2002; Oberdorster et coll., 2002). À cet égard, les études de toxicité menées sur des rats et des souris ont révélé que l'exposition aux NP provoquait des maladies pulmonaires, des problèmes cardiovasculaires et des déficiences du système immunitaire (Huang et coll., 2007; Dockery et coll., 1994; Hagdnagy et coll., 1998).

Un large éventail de mesures de gestion technique a été proposé pour réduire ou éliminer l'exposition aux NP, dont l'utilisation d'enceintes protectrices, de systèmes d'échappement localisés, de hottes et de systèmes de ventilation générale. Là où des mesures de gestion technique s'avèrent insuffisantes pour assurer la sécurité et la santé des travailleurs, des appareils

de protection respiratoire et des équipements de protection individuelle faisant appel à la filtration pourraient être utilisés pour capter les NP. La question est maintenant de savoir dans quelle mesure les filtres des APR protègent efficacement les travailleurs contre les NP. L'efficacité des filtres respiratoires est généralement caractérisée en fonction d'un débit d'air de 85 litres/min ou moins. Cependant, peu d'études ont été menées sur l'efficacité des filtres de protections respiratoires contre les NP à des débits d'air élevés (notamment dans le cas de pics respiratoires à des débits d'air allant de 300 à 400 litres/min sous une lourde charge de travail). Quoique limités, les résultats des premiers travaux en ce sens ont démontré qu'un débit d'air élevé accroît la pénétration des particules à travers les filtres des appareils de protection respiratoire (Richardson, 2006). L'influence d'autres paramètres, comme la taille des particules, l'humidité ambiante et la durée d'utilisation, sur la performance des filtres d'APR demeure en outre mal connue. Par conséquent, vu la croissance du secteur de la fabrication de nanoproducts, il est essentiel de mettre au point une procédure expérimentale permettant de mesurer l'efficacité des filtres de protections respiratoires et de comparer leurs performances. À notre connaissance, il n'existe actuellement aucune norme de quantification ou de classification en ce qui concerne l'efficacité des filtres d'appareils de protection respiratoire contre les NP.

1.2 Travaux antérieurs

Plusieurs facteurs importants influent sur l'efficacité des filtres à fibres à capter des particules, entre autres les caractéristiques des particules (état physique, composition chimique, diamètre, densité et distribution des charges), les caractéristiques du filtre (substrat, diamètre des fibres, épaisseur du filtre, compacité des fibres et propriétés électriques), les mécanismes de collecte, les conditions d'utilisation (température, viscosité et vitesse de filtration) (Davies, 1973; Dullien, 1989) et la réfraction thermique due au mouvement brownien.

L'élimination des particules par des filtres d'APR s'effectue principalement au moyen de deux mécanismes, l'un mécanique et l'autre, électrostatique. Le mécanisme mécanique repose sur l'impaction inertielle, l'interception gravitationnelle et la diffusion provoquée par le mouvement brownien. Cependant, les composantes inertielle et gravitationnelle sont généralement ignorées, et peu utilisées dans les calculs relatifs à la captation des particules fines, en ce qu'elles jouent surtout un rôle dans la collecte de particules de plus grande taille (essentiellement de plus de 500 nm). Le mouvement brownien revêt dès lors une importance particulière en ce qui concerne la collecte de particules dont la taille est inférieure à 100 nm, à plus forte raison lorsqu'elle est inférieure à 10 nm (Brown, 1993; Hinds, 1999). Quant au mécanisme de collecte électrostatique, il repose principalement sur l'action des forces coulombiennes et diélectrophorétiques entre les fibres du filtre et les particules (Davies, 1973). Les paramètres qui peuvent influencer sur l'efficacité de filtration par voie d'attraction électrostatique sont la densité de charge des particules, la densité de charge de surface des fibres et le champ électrique appliqué de l'extérieur (Wang, 2001).

De récentes études montrent qu'en jumelant les mécanismes mécanique et électrostatique, l'efficacité de filtration s'améliorerait considérablement lors la collecte de particules (Balazy et coll., 2006a; Huang et coll., 2007; Eninger et coll., 2008). Des filtres électret (faisant appel aux forces électrostatiques) ont d'abord été développés par Nicolaig Louis Hansen aux fins d'élimination de particules (Davies, 1973). Hansen a constaté que les filtres électret étaient plus efficaces que les filtres mécaniques à capter des particules. Plutôt que d'accroître la capacité de filtration, les supports filtrants électrostatiques présentent une moindre résistance au débit d'air que les filtres mécaniques du fait de leur faible compacité. Une revue exhaustive de la littérature sur l'efficacité de filtration des appareils de protection respiratoire et des filtres mécaniques contre les nanoparticules a été effectuée par Mostofi et coll. (2010).

1.3. Mécanismes et modèles de filtration

1.3.1 Mécanismes de filtration des particules

Comme mentionné précédemment et illustré à la Figure 1-1 (Hinds, 1999), l'élimination des particules s'effectue au moyen de quatre principaux mécanismes de collecte : 1) l'impaction inertielle, 2) l'interception, 3) la diffusion et 4) l'attraction électrostatique. Les trois premiers mécanismes de collecte s'appliquent généralement aux filtres mécaniques, et ils sont influencés par la taille des particules.

- L'impaction inertielle se produit lorsqu'une particule à proximité d'une fibre filtrante change de direction laminaire et se heurte à la fibre (DHHS, 2003). Ce mécanisme de collecte joue un rôle particulièrement important dans la captation des grosses particules, et il gagne en efficacité à vitesse de filtration élevée.
- L'interception se produit lorsqu'une particule suivant un flux gazeux vient à se trouver à l'intérieur du rayon de particule d'une fibre filtrante (DHHS, 2003); touchant la fibre peu de temps après, elle se voit éliminée du flux gazeux.
- La diffusion se produit lorsque le mouvement aléatoire d'une particule sous l'effet du mouvement brownien l'amène à toucher la fibre du filtre (DHHS, 2003). La diffusion dépend de la vitesse de filtration et de la taille de la particule. À moindre vitesse de filtration, la diffusion gagne en importance du fait que la particule a plus de temps pour zigzaguer, et donc plus de chances d'entrer en contact avec la fibre filtrante et d'être captée par elle. En outre, les particules de petite taille ont plus de chances d'être captées au moyen de ce mécanisme du fait qu'elles se comportent comme des molécules de gaz dont le mouvement est plus aléatoire.
- Le mécanisme électrostatique, qui joue un rôle important dans les filtres électret, repose sur l'attraction électrostatique entre les particules et les fibres filtrantes, principalement due aux forces coulombiennes et diélectrophorétiques.

Dans le cas des particules de taille nanométrique, l'impaction inertielle ne contribue pas de façon significative aux mécanismes de captation, de sorte qu'elle n'est pas prise en compte dans les calculs; elle contribue en effet davantage à la collecte des particules de plus grande taille. Il convient en outre de noter que l'influence du mouvement brownien devient plus marquée lorsque la taille des particules diminue, à plus forte raison dans le cas des particules de taille nanométrique.

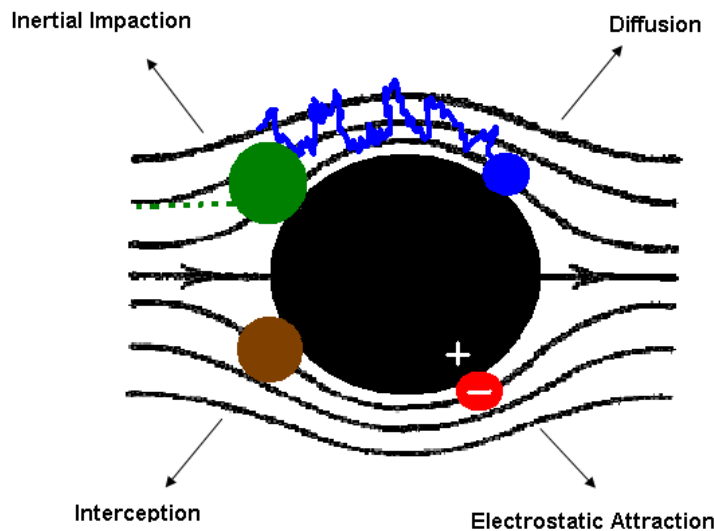


Figure 1-1 : Les quatre principaux mécanismes de collecte des particules (d'après Hinds, 1999).

La Figure 1-2 illustre l'effet combiné des trois premiers mécanismes (impaction inertielle, interception et diffusion) sur le taux de pénétration des particules selon le diamètre des particules. La diffusion est généralement considérée comme le principal mécanisme de collecte des particules nanométriques, tandis que l'interception et l'impaction inertielle priment dans le cas des particules micrométriques. Cette figure montre que, pour des particules de moins de 100 nm et en l'absence d'attraction électrostatique entre les particules et les fibres du filtre, le taux de pénétration diminue lorsque la taille des particules diminue. Cela est principalement dû au fait que le mécanisme de diffusion est prépondérant dans le cas des particules de cette taille. Dans le cas des particules dont le diamètre est de 100 nm à 400 nm, la diffusion et l'interception contribuent toutes deux à l'élimination des particules par filtration. Toutefois, dans cette plage de diamètres, les particules ne sont pas captées aussi efficacement que les particules plus fines captées par diffusion, ni que les plus grosses particules captées par interception et impaction. En conséquence, cette plage granulométrique est généralement tenue pour la plus problématique, et elle donne lieu aux taux de pénétration les plus élevés à travers les filtres. Enfin, dans le cas des

particules de plus de 400 nm, le taux de pénétration diminue encore davantage dans la mesure où les effets conjugués de l'interception et de l'impaction inertielle contribuent d'importante façon à la collecte des particules (Lee et coll., 1980).

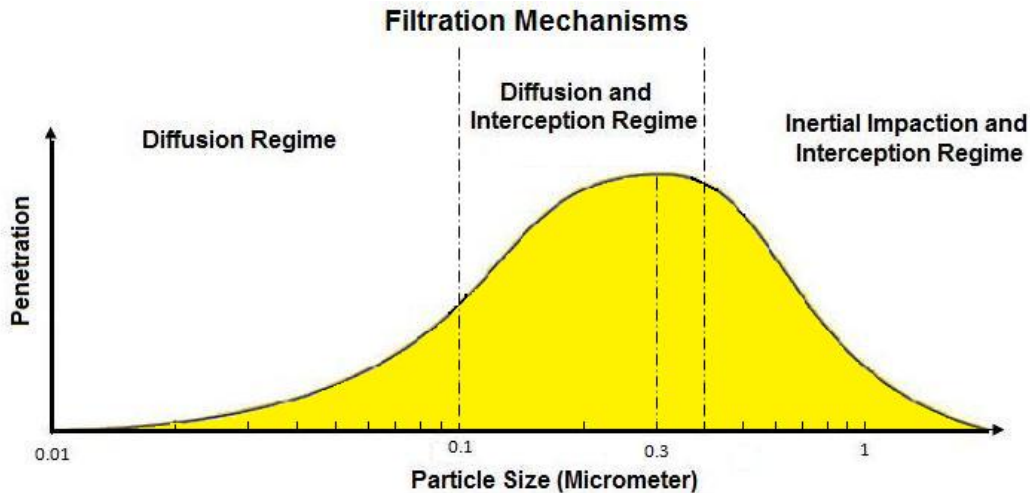


Figure 1-2 : Pénétration fractionnée selon le diamètre des particules dans le cas d'un filtre mécanique

Il convient cependant de mentionner que dans la courbe d'efficacité de collecte classique des filtres électrostatiques, la taille des particules les plus pénétrantes (TPPP) eu égard à l'efficacité de filtration minimale peut appartenir à des particules de plus petite taille, soit de moins de 100 nm (Han, 2000; Martin et Moyer, 2000; Huang et coll., 2007; Richard et coll., 2007; Eninger et coll., 2008).

1.3.2. Taille des particules les plus pénétrantes (TPPP)

Des études antérieures ont révélé que les filtres mécaniques et les filtres électrostatiques n'ont pas la même efficacité à capter les aérosols de taille nanométrique. Dans le cas des filtres mécaniques (non chargés), un diamètre de particule de 300 nm est généralement tenu pour correspondre à la TPPP à un débit de 85 litres/min, alors que dans le cas des filtres électrostatiques (chargés), l'efficacité de filtration la plus faible est liée à des particules dont la taille est de loin inférieure à 300 nm. À cet égard, Huang et coll. (2007) ont examiné le taux de pénétration de particules de 4,5 nm à 10 μm à travers des filtres mécaniques et électrostatiques. Ils ont observé que la pénétration maximale se voyait réduite de 18,9 % à 5,8 % avec la mise à contribution d'une force d'attraction électrostatique dans la collecte des particules. Ils ont par ailleurs démontré que la TPPP appartenait à des particules de plus petite taille dans le cas des filtres électret. La TPPP était de 50 nm en présence d'une charge électrostatique et de 200 nm lorsque la charge était retirée des fibres filtrantes.

Kanaoka et coll. (1987) ont constaté que la pénétration maximale à travers les filtres chargés électrostatiquement était due aux particules non chargées de 30 nm à 40 nm, alors que les particules à charge unique présentaient un pic à une taille beaucoup plus grande. Balazy et coll. (2006a) ont mesuré le taux de pénétration du virus MS2 (un stimulant inoffensif de plusieurs pathogènes) à travers des appareils de protection respiratoire à pièce faciale. L'étude a été réalisée avec des particules de 10 nm à 80 nm, et à des débits d'air de 30 et 85 litres/min. La TPPP était d'environ 50 nm pour les APR à l'essai. Les résultats ont également démontré que le taux de pénétration à travers les filtres électret N95 pouvait augmenter dans une mesure allant jusqu'à 5,6 % pour la TPPP à un débit de 85 litres/min. Néanmoins, les PFF N95 sont censées offrir une efficacité de filtration de 95 % contre les particules biologiques et non biologiques de la taille des particules les plus pénétrantes. Balazy et coll. (2006b) ont mesuré l'efficacité de filtration des PFF N95 avec des particules de NaCl de 10 nm à 600 nm selon un protocole de mannequin. Les appareils de protection respiratoire ont été testés à des débits d'air de 30 et 85 litres/min, et dans le cas des APR avec filtre préchargé, la TPPP se situait entre 30 nm et 70 nm. Martin et Moyer (2000) ont pour leur part évalué la taille des particules les plus pénétrantes à l'aide de filtres électret, et ils ont constaté qu'elle se situait entre 50 nm et 100 nm, mais qu'elle variait plutôt entre 250 nm à 350 nm lorsque les filtres étaient trempés dans l'alcool isopropylique (pour réduire la charge électrique des fibres filtrantes). Richardson et coll. (2006) ont testé des PFF N95 munies de filtres électret à l'aide d'aérosols neutralisés de NaCl, de phtalate de dioctyle (PDO) et de MS2, et la TPPP observée était inférieure à 100 nm. Eninger et coll. (2008) ont également constaté que dans le cas des filtres électret, la TPPP semblait être inférieure à 100 nm pour les aérosols non chargés ou chargés électrostatiquement. Rengasamy et coll. (2007) ont étudié la pénétration des filtres N95 à l'aide d'aérosols de NaCl chargés électrostatiquement dont la taille variait entre 20 nm et 400 nm, et ils ont observé que la TPPP était d'environ 40 nm.

Ces études ont révélé que la TPPP dépend fortement de facteurs tels que les propriétés du filtre, le mécanisme de filtration, le débit d'air, la densité de charge des fibres et la distribution des charges des particules d'aérosol. Dans le cas des fibres non chargées, la TPPP se situait généralement entre 100 nm et 400 nm, et elle augmentait avec l'augmentation du diamètre des fibres et la réduction du débit d'air (Grafe et coll., 2001; Howard, 2003). Dans le cas des supports filtrants chargés électrostatiquement, la TPPP dépendait fortement des conditions de charge des fibres (Martin et Moyer, 2000).

1.4. Facteurs influant sur l'efficacité de filtration

1.4.1. Vitesse de filtration et débit d'air

La vitesse de filtration et le débit d'air peuvent grandement influencer sur l'efficacité de filtration globale des filtres à fibres, car ils modifient l'apport des mécanismes de diffusion, d'interception et électrostatique (Kousaka et coll., 1990; Alonso et coll., 1997). À faible vitesse de filtration, les forces de diffusion et électrostatiques contribuent significativement à l'efficacité de captation du

fait d'un temps de séjour plus long. Lorsque la vitesse de filtration augmente, le mécanisme d'interception devient prépondérant, et l'influence de la diffusion sur l'efficacité de captation se voit considérablement réduite. On s'attend donc à ce que l'efficacité de filtration diminue de façon notable à vitesse de filtration élevée. Boskovic et coll. (2007, 2008) ont testé l'efficacité de filtration de différentes formes de particules (sphériques, semi-arrondies et cubiques) à des vitesses allant de 5 à 20 cm/s. La taille des particules mesurées variait de 50 nm à 300 nm. Les résultats ont montré qu'à moindre vitesse, l'efficacité de filtration des filtres à fibres augmentait pour toutes les formes de particules. Balazy et coll. (2004) ont étudié l'efficacité de filtration et la chute de pression à des débits d'air variant entre 10 et 30 cm/s pour des particules de 10 nm à 500 nm. Les résultats ont démontré que l'efficacité de filtration globale diminuait avec l'augmentation du débit d'air. Kim et coll. (2007) ont procédé à des essais de pénétration à des vitesses de filtration de 5,3, 10 et 15 cm/s avec des nanoparticules d'argent de 3 nm à 20 nm. Les résultats ont montré qu'une vitesse de filtration plus élevée engendrait une augmentation du taux de pénétration des particules en raison d'un temps de séjour plus court à travers les filtres.

Dans le cas des filtres respiratoires, le taux de pénétration des particules est déterminé en fonction du débit d'air plutôt que de la vitesse de filtration. Plusieurs études ont été menées afin d'évaluer l'efficacité des appareils de protection respiratoire à éliminer les nanoparticules à des débits d'air différents. Eninger et coll. (2008) ont évalué l'efficacité de deux modèles d'APR à pièce faciale N95 et d'un modèle N99 contre les particules de NaCl et de trois virus. Les essais ont été réalisés à des débits d'air de 30, 85 et 150 litres/min. Dans le cas des modèles N95, les taux de pénétration des particules de NaCl les plus élevés étaient respectivement de 1,3 %, 5,9 % et 10,2 % à des débits d'air de 30, 85 et 150 litres/min. Dans le cas du modèle N99, les taux de pénétration maximaux étaient respectivement de 1,0 %, 4,3 % et 6,6 % à des débits d'air de 30, 85 et 150 litres/min. En ce qui concerne les virus, une augmentation du débit d'air de 85 à 150 litres/min influait considérablement sur la performance de tous les APR à l'essai. Balazy et coll. (2006b) ont également mesuré le taux de pénétration de particules de NaCl de 10 nm à 600 nm à des débits d'air de 30 et 85 litres/min relativement à deux modèles d'APR à filtre N95. Les résultats ont démontré que le débit d'air a une influence considérable sur la pénétration des particules à travers les APR à pièce faciale filtrante. Le taux de pénétration des particules à travers les deux PFF N95 augmentait dans une mesure allant jusqu'à 5 % à un débit de 85 litres/min. Rengasamy et coll. (2008a) ont évalué l'efficacité de plusieurs modèles d'APR à filtre N95 et P100 contre des aérosols d'argent mono-dispersés. Les essais portaient sur des particules de 4 nm à 30 nm, à un débit d'air de 85 litres/min. Les résultats ont démontré que le taux de pénétration des particules diminuait pour tous les APR à l'essai lorsque la taille des particules était réduite à 4 nm. Dans le cas des APR à pièce faciale N95, le taux de pénétration des particules variait de 1,1 % à 4,0 %. Dans le cas des APR à filtre P100, un taux de pénétration de moins de 0,3 % a été observé.

La plupart des directives existantes suggèrent de tester les filtres à un débit d'air de 85 litres/min du fait que ce débit simule la respiration humaine sous une lourde charge de travail. Cependant, Janssen (2003) a proposé que les appareils de protection respiratoire soient testés à un débit d'air

de 350 litres/min, estimant qu'un rythme respiratoire beaucoup plus élevé peut être observé en milieu de travail.

1.4.2. Humidité

L'humidité est un des facteurs qui peuvent influencer sur l'efficacité de filtration. Les effets de l'humidité ne sont pas bien compris du fait qu'ils ont peu été étudiés. Kim et coll. (2006) n'ont observé aucun effet significatif de l'humidité sur l'efficacité de filtration des particules de moins de 100 nm, ayant obtenu des résultats pratiquement identiques à des taux d'humidité relative (HR) de 0,04 %, 1,22 % et 92 %. À l'encontre des conclusions de Kim et coll., Brown (1993) et Miguel (2003) ont démontré que l'efficacité de filtration augmentait lorsque l'humidité relative augmentait dans le cas des grosses particules. Kim et coll. (2006) ont expliqué qu'une augmentation de la force capillaire à HR élevée augmenterait l'adhérence entre les fibres filtrantes et les particules. Cependant, l'attraction entre filtres et particules sous l'effet de la force capillaire n'est vraiment forte que dans le cas des plus grosses particules.

À la différence des études sur les filtres mécaniques, les études sur les filtres électrostatiques (filtres chargés) ont démontré que l'efficacité de filtration diminue lorsque l'humidité augmente. La raison en est qu'un taux d'humidité élevé entraîne une réduction des charges sur les fibres filtrantes et les particules (Ackley, 1982; Moyer et coll., 1989). Ikezaki et coll. (1995) et Lowkis et coll. (2001) ont aussi confirmé que la capacité des filtres électret à capter des particules diminue lorsque la charge de surface diminue sous l'effet d'une augmentation de l'HR. Yang et Lee (2005) ont toutefois indiqué que l'HR n'avait aucun effet sur la pénétration des aérosols à travers les filtres électret dans le cas de particules de NaCl mono-disperses de 50 nm à 100 nm, ayant obtenu des résultats pratiquement identiques à des taux d'HR de 30 % et 70 %. Yang et Lee (2005) ont par ailleurs expliqué que dans le cadre d'autres études, on avait principalement eu recours à des techniques de charge à effet couronne ou triboélectrique pour charger les filtres électret. Or, ces méthodes font que les ions et les électrons des fibres peuvent facilement être éliminés par les molécules d'eau (d'où une réduction de la charge de surface à HR plus élevée). Dans leur étude, Yang et Lee (2005) ont plutôt chargé les filtres en les recouvrant d'ions négatifs de groupes à chaîne carbonée de manière à rendre la charge de surface moins vulnérable à l'humidité. Il se pourrait aussi que les particules de NaCl à un taux d'HR de 70 % prennent du volume par déliquescence, et que l'efficacité de filtration mesurée s'en trouve surestimée.

1.4.3. Durée d'exposition des filtres N95

La durée d'exposition des filtres N95 est un autre facteur important susceptible d'influer sur l'efficacité de filtration. L'effet rétroactif de la durée d'exposition des filtres N95 est toutefois moins bien compris. D'après la littérature, un prolongement de la durée d'exposition des filtres N95 a une incidence significative sur l'efficacité de collecte de même que sur l'évolution de la chute de pression à travers les filtres (Baumgartner et coll., 1986; Brown et coll., 1988; Chen et

coll., 1993; Martin et Moyer, 2000; Wang et coll., 2001). En l'absence d'effet électrostatique, une exposition continue des filtres N95 accroît généralement l'efficacité de collecte et la chute de pression en raison de l'accumulation des particules à la surface des fibres (Wang, 2001).

Contrairement aux résultats obtenus avec les filtres mécaniques, d'après les études expérimentales antérieures sur les filtres électrostatiques, le taux de pénétration des particules augmente généralement pendant la phase d'exposition initiale des filtres N95 (Baumgartner et coll., 1986; Brown et coll., 1988; Chen et coll., 1993; Martin et Moyer, 2000; Wang et coll., 2001). Cependant, l'efficacité de collecte peut varier selon les matériaux fibreux utilisés et la taille des particules. Chen et coll. (1993) ont évalué les performances de PFF anti-poussière et antibrouillard exposées en continu à des aérosols d'huile de maïs de 0,16 µm de diamètre. Ils ont rapporté que le taux de pénétration des particules augmentait initialement avec l'exposition des filtres N95 en raison d'une réduction de l'effet de la charge électrostatique, mais qu'il diminuait ensuite en raison de l'augmentation de la compacité des fibres filtrantes. Brown et coll. (1988) ont quant à eux rapporté que la durée d'exposition augmente de manière significative la pénétration à travers les filtres électret, puisque l'effet de la charge électrostatique sur les fibres filtrantes est amoindri par les aérosols qui s'y déposent. Leurs expériences portaient sur divers aérosols industriels de différentes classes granulométriques.

Par ailleurs, des études expérimentales sur les filtres électret ont révélé que l'efficacité de captation des particules dépend généralement de la méthode utilisée et de l'exposition à des particules solides ou liquides (Martin et Moyer, 2000; Ji et coll., 2003). Martin et Moyer (2000) ont utilisé des particules solides de NaCl et des particules liquides de PDO pour tester l'efficacité de filtration des PFF N95. Leurs résultats indiquent une pénétration accrue des particules lors des essais sur les APR à filtre N95 avec des aérosols liquides de PDO, soit environ dix fois plus élevée. Dans une autre étude de Ji et coll. (2003), les filtres électret ont été exposés à des particules poly-disperses de chlorure de sodium (NaCl) solide et de sébacate de dioctyle (SDO) liquide. Tout comme dans l'autre étude, l'efficacité de filtration s'est trouvée grandement réduite lors des essais avec le SDO liquide.

1.4.4. État de charge des particules

L'état de charge des particules est un autre facteur qui influe grandement sur l'efficacité de filtration des filtres mécaniques et électrostatiques (Fjeld et Owen, 1988; Chen et coll., 1998). L'augmentation de l'efficacité de filtration est liée à l'augmentation de l'attraction électrostatique résultant de la force coulombienne et de la force image (Brown, 1993). Kim et coll. (2006) ont fait état des écarts d'efficacité de collecte à travers un filtre en fibre de verre à différents états de charge de particules de 2 nm à 100 nm. Ils ont constaté que l'efficacité de filtration des particules non chargées était beaucoup plus faible que pour les particules chargées, et que cette différence d'efficacité diminuait avec la réduction de la taille des particules. Ils ont expliqué que ce phénomène était dû au fait que la diffusion constitue le principal mécanisme de dépôt des nanoparticules, et que le procédé en cause augmente l'effet de la diffusion dans le cas des particules de plus petite taille. La pénétration de particules neutralisées et non neutralisées de

10 nm à 600 nm à travers des filtres mécaniques et électrostatiques a été étudiée par Balazy et coll. (2006b). Une plus grande efficacité de filtration a été observée lors des essais de pénétration de particules neutralisées avec les filtres électrostatiques. Aucun changement significatif n'a toutefois été observé entre les particules neutralisées et non neutralisées dans le cas des filtres mécaniques. Yang et Lee (2005) ont mesuré l'efficacité de filtration d'aérosols de NaCl en état de charge neutre, unique ou équilibrée à la Boltzmann. Ils ont constaté que les aérosols à charge unique donnaient lieu à une plus grande efficacité de filtration que les aérosols neutres, et que la force de captation coulombienne était dominante dans le cas des nanoparticules.

1.5. Normes d'essai

En juin 1995, le NIOSH a actualisé les critères relatifs aux essais d'homologation des appareils de protection respiratoire à adduction d'air filtré et à pression négative avec l'adoption de la norme 42 CFR 84 (CFR, 1996). Le NIOSH certifie trois catégories de filtres – N, R et P – et trois niveaux d'efficacité de filtration – 95 %, 99 % et 99,97 % – pour chaque catégorie de filtres. Les lettres N, R et P désignent respectivement des filtres non résistants, partiellement résistants et fortement résistants aux aérosols huileux.

Les filtres de type N n'offrent une résistance qu'aux aérosols solides (ils ne sont pas efficaces contre les aérosols huileux), tandis que les filtres de types R et P sont de plus passablement ou hautement résistants, respectivement, aux aérosols huileux. Le NIOSH approuve les filtres d'APR de type N contre les particules de NaCl poly-disperses dont le diamètre massique médian (DMM) est de 75 ± 20 nm et dont l'écart-type géométrique (ETG) ne dépasse pas 1,86. Quant aux filtres d'APR de types R et P, ils sont testés contre les particules de PDO dont le DMM est de 165 ± 20 nm et dont l'ETG ne dépasse pas 1,60 (CFR, 1996).

Les critères actuels du NIOSH visent à certifier les APR à filtre de types N, R et P suivant des conditions d'essai très prudentes, étant donné que la performance des filtres peut énormément varier dans différentes situations. À titre d'exemple, afin de tester les filtres dans des conditions exigeantes, le NIOSH procède aux essais à un débit d'air constant de 85 litres/min, ce qui correspond au rythme respiratoire moyen d'une personne sous une lourde charge de travail.

Or, si les essais d'homologation permettent de classer les appareils de protection respiratoire, ils ne sont pas toujours représentatifs des pires conditions d'utilisation en termes d'efficacité de collecte (Eninger et coll., 2008). Balazy et coll. (2006b) ont notamment démontré qu'une force coulombienne émergente serait induite si le filtre et les particules étaient tous deux chargés, ce qui donnerait lieu à une importante surestimation de la performance de l'APR. Comme indiqué précédemment, la question de savoir si la TPPP propre à un système de filtration donné peut varier dépend principalement de la vitesse de filtration, du type de filtre, du mécanisme de filtration, de la densité de charge des fibres et de la distribution des charges des particules (Eninger et coll., 2008). La TPPP est beaucoup plus petite pour les filtres électrostatiques que pour les filtres mécaniques. Cependant, les essais d'homologation du NIOSH présument d'une

TPPP d'environ 300 nm pour tous les filtres et tous les types de filtres, ce qui n'est sans doute pas le cas pour les filtres électrostatiques.

En outre, le protocole d'essai du NIOSH fait appel à des photomètres à diffusion de lumière directe pour mesurer les concentrations d'aérosol avant et après le test respiratoire. Or, le signal photométrique ne permet en général de mesurer que des particules dont le diamètre est supérieur à 100 nm. Par conséquent, l'approche photométrique adoptée dans le cadre du protocole d'essai du NIOSH n'est pas adaptée à l'évaluation de l'efficacité de filtration des nanoparticules (Eninger et coll., 2008). Les résultats d'une étude réalisée par Eninger et coll. (2008) ont révélé que 68 % (en nombre) et 8 % (en masse) des particules de NaCl, et 10 % (en nombre) et 0,3 % (en masse) des particules de PDO font moins de 100 nm dans le cadre du protocole d'essai du NIOSH. Et comme indiqué ci-dessus, la méthode photométrique utilisée dans le cadre du protocole du NIOSH ne permet pas de mesurer efficacement les particules ultrafines (< 100 nm). Une autre des limites du protocole d'homologation du NIOSH tient à ce que l'efficacité de collecte des appareils de protection respiratoire filtrants n'est pas présentée en termes granulométriques, les essais visant uniquement à mesurer la concentration massique des particules d'aérosols poly-disperses devant et derrière le filtre. Or, comme indiqué précédemment, malgré une très faible concentration massique, le nombre de NP peut être très élevé dans l'environnement. En conséquence, l'exposition aux NP pourrait être encore plus dangereuse pour la santé humaine que l'exposition à de plus grosses particules.

1.6. Objectifs de recherche

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- développer une méthodologie permettant de caractériser l'efficacité d'un modèle d'appareil de protection respiratoire à filtre N95 approuvé par le NIOSH à un débit d'air constant contre des aérosols poly-disperses de 15 nm à 200 nm selon deux scénarios différents :
 1. étudier l'effet des conditions d'écoulement de l'air et de la taille des particules sur la pénétration initiale des particules à travers l'appareil de protection respiratoire;
 2. étudier l'effet de deux autres paramètres, notamment la durée d'utilisation et l'humidité relative, sur l'efficacité de filtration;
- développer et adapter le dispositif expérimental de manière à tester le même type d'appareil de protection respiratoire contre des particules mono-disperses de 20 nm à 200 nm.

CHAPITRE 2

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

2.1. Introduction

Un banc d'essai à petite échelle a été utilisé pour cette étude. Il a été conçu et construit pour être équipé d'un dispositif d'épuration d'air afin de simuler son application effective. Le conduit était constitué d'une chambre en acier inoxydable pourvue d'une ouverture en plexiglas à l'avant et à l'arrière. L'air amené au dispositif expérimental était filtré à travers un filtre à particules à haute efficacité (HEPA) et conditionné à température et humidité constantes. Un filtre HEPA était utilisé pour éliminer les particules avant de rejeter l'air. La pompe installée au bout de l'unité servait à équilibrer la pression à l'intérieur du dispositif, tandis qu'une soupape de sécurité contrôlée par ordinateur équilibrait la pression à l'intérieur de la chambre d'essai.

2.2. Vue d'ensemble du montage expérimental

Les Figures 2-1 et 2-2 présentent les schémas des montages expérimentaux utilisés pour tester les appareils de protection respiratoire contre les aérosols mono-disperses et poly-disperses, respectivement. Ces schémas indiquent également la procédure à suivre pour tester les appareils de protection respiratoire.

2.2.1. Essais de filtration d'aérosols mono-disperses

Le nébuliseur Collision à six jets (modèle CN25, BGI Inc., Waltham, MA) est utilisé comme générateur d'aérosols pour produire des particules d'une taille allant de 20 nm à 200 nm (Figure 2-1). Un analyseur différentiel de mobilité électrique (long DMA, modèle 3081, TSI Inc.) est ensuite utilisé pour extraire les particules selon leur taille de sorte à classer les particules chargées en fonction de leur mobilité électrique¹. En pénétrant dans le DMA, les particules sont soumises à un champ électrique externe, ce qui amène chaque particule d'un diamètre déterminé à suivre une trajectoire précise et à migrer à une certaine vitesse. Seules les particules de la taille choisie à l'intérieur d'une étroite plage de mobilité électrique (inversement proportionnelle à la taille des particules) empruntent la bonne trajectoire pour sortir du DMA (Annexe B). Les particules chargées de taille connue qui sortent ainsi du DMA sont ensuite acheminées à travers le neutraliseur (Kr-85) (modèle 3012a, TSI Inc.) pour obtenir l'équilibre de charge de Boltzmann (Annexe C). Puis, selon le débit d'essai, un flux d'air filtré très sec est ajouté au flux d'aérosols mono-disperses de la taille choisie. Le flux d'aérosols provenant du DMA et le flux d'air propre ajouté sont mélangés avant d'entrer dans le dispositif d'essai de filtration. Un petit ventilateur de

¹ La mobilité électrique est le rapport de la vitesse de migration provoquée par une force extérieure – un champ électrique – à l'amplitude de la force extérieure.

mélange est aussi utilisé à l'entrée de la chambre pour disperser les aérosols. Un compteur de particules de condensation (CPC) (modèle 3775, TSI Inc.) est ensuite utilisé pour contrôler la concentration des particules en aval et en amont du filtre, en alternance et en temps réel. Puis, l'efficacité de filtration des particules de la taille choisie est mesurée. En répétant l'essai pour différentes tailles de particules mono-disperses, l'efficacité de filtration des particules (ou le taux de pénétration des particules) peut être déterminée en fonction de la taille des particules.

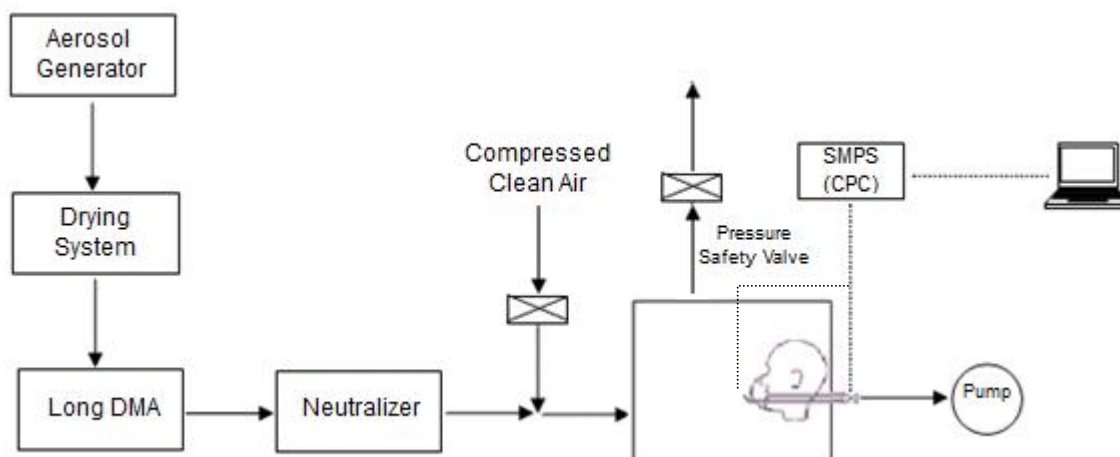


Figure 2-1 : Schéma de montage expérimental : essais de filtration d'aérosols mono-disperses à un débit constant. Mannequin adapté de Balazy et coll. (2006a).

2.2.2. Essais de filtration d'aérosols poly-disperses

Dans ce montage expérimental (Figure 2-2a), après avoir généré des aérosols poly-disperses et les avoir fait passer à travers le neutraliseur, le flux d'air pur et sec requis est ajouté au flux d'aérosols poly-disperses et neutralisés (particules de 15 nm à 200 nm). Les deux flux mélangés sont ensuite directement introduits dans la chambre d'essai. Après avoir laissé le temps au dispositif de se stabiliser et avoir réglé le débit d'échantillonnage à 1,5 litre/min, on mesure en alternance la concentration et la distribution granulométrique des particules, deux fois en aval et deux fois en amont du filtre à l'essai, à l'aide d'un analyseur de mobilité électrique à balayage (SMPS) (modèle 3936, TSI Inc.), principalement composé du DMA et du CPC. Le temps requis pour chaque mesure en aval ou en amont est de 135 secondes. Cela comprend deux périodes d'échantillonnage de 30 secondes en aval, puis deux autres en amont, auxquelles s'ajoutent 15 secondes pour commuter entre les échantillons en aval et en amont. Les taux de pénétration des particules sont ensuite déterminés en fonction du diamètre des particules. La concentration et la distribution granulométrique des particules à des débits d'air de 85, 135, 270 et 360 litres/min en amont du filtre (soit les débits utilisés pour tester l'APR à filtre N95 contre les aérosols poly-disperses) sont présentées à la Figure 2-2b.

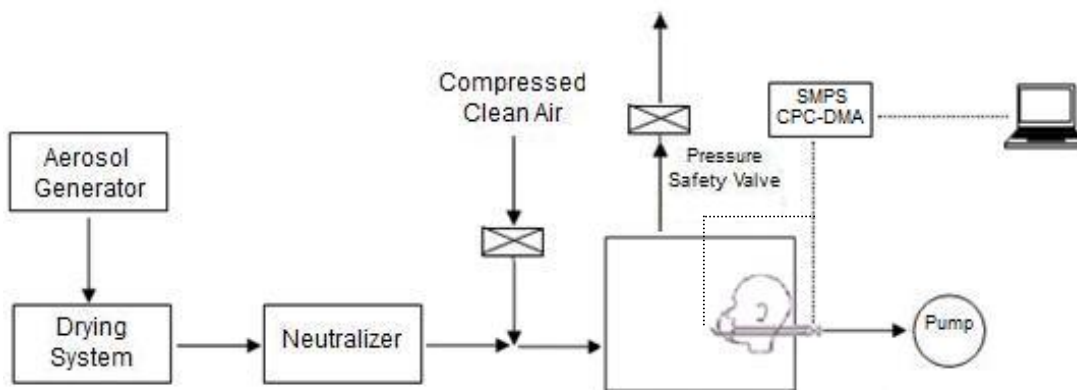


Figure 2-2a : Schéma de montage expérimental : essais de filtration d'aérosols poly-dispersés à des débits constants. Mannequin adapté de Balazy et coll. (2006a).

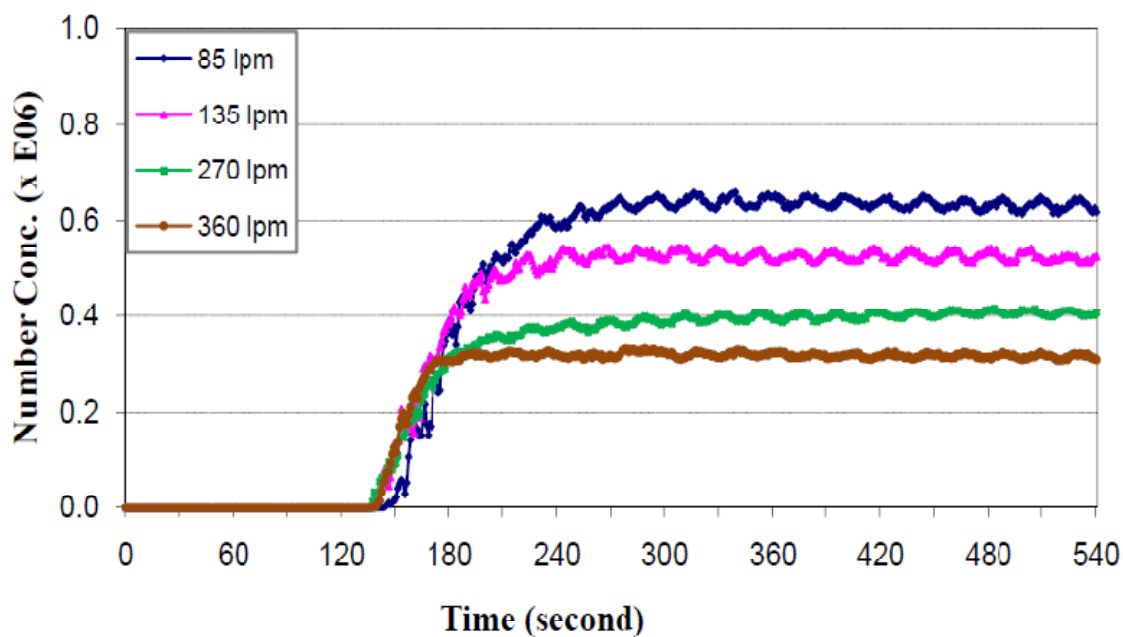


Figure 2-2b : Concentration en nombre des particules (particules/cm³) pendant la mise en marche du dispositif expérimental à différents débits d'air, avec une solution de NaCl à 0,01 % (lpm = litres/min).

2.3. Protocole d'essai

La Figure 2-3 présente l'installation complète du dispositif expérimental utilisé pour évaluer l'efficacité de filtration des appareils de protection respiratoire à l'essai contre les aérosols poly-disperses. Des expériences ont été réalisées afin de contrôler l'uniformité de la concentration en aérosol dans la chambre d'essai.

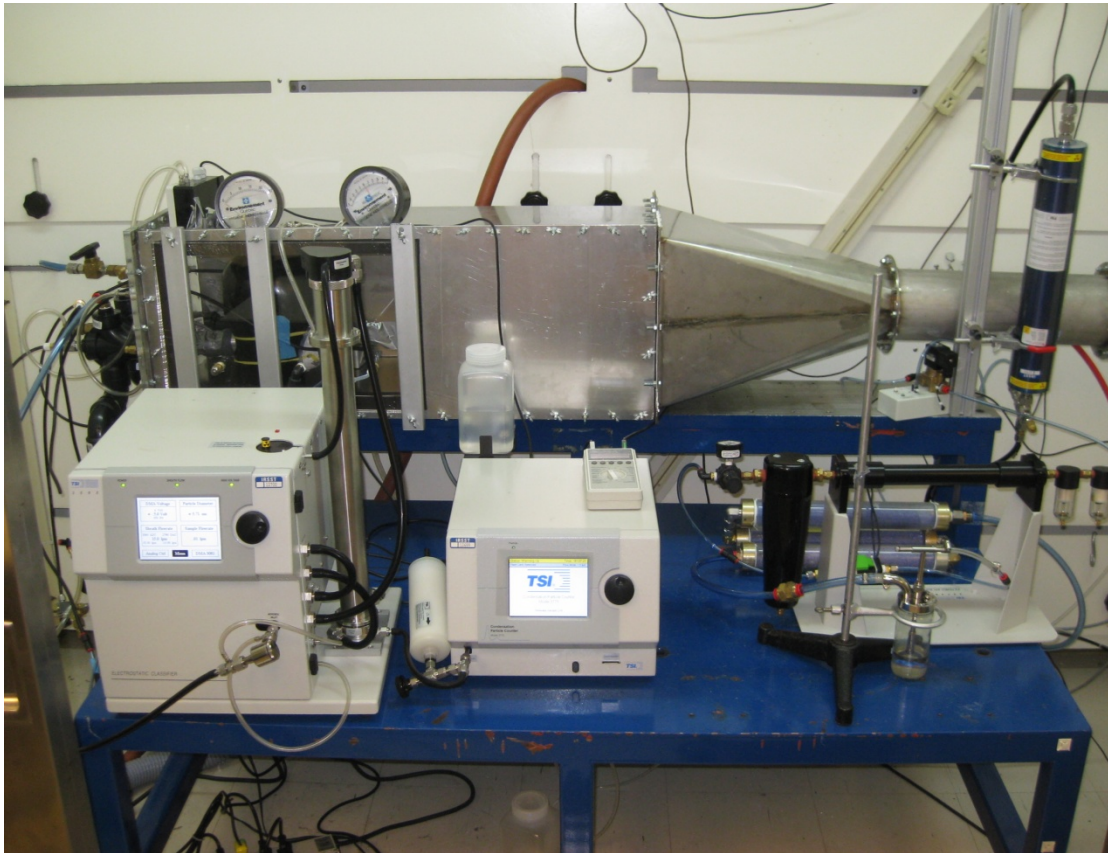


Figure 2-3 : Représentation du dispositif expérimental utilisé pour évaluer l'efficacité de filtration des PFF N95 contre les aérosols poly-disperses

Pour ce qui est des filtres respiratoires, un modèle de PFF N95 approuvé par le NIOSH a été choisi pour être testé contre des NP poly-disperses (Figure 2-4). La PFF N95 choisie a été scellée avec du silicone sur le visage du mannequin, et placée du côté gauche à l'intérieur de la chambre d'essai (Figure 2-5). Compte tenu de cette précaution, l'éventualité d'une fuite entre la PFF et le visage du mannequin a été écartée de l'analyse d'efficacité de filtration.



Figure 2-4 : Photographie du masque de protection respiratoire N95 à l'essai



Figure 2-5 : Photographie du masque de protection respiratoire N95 scellé sur le mannequin

Les images obtenues par microscopie électronique en transmission (MET) des particules polydisperses de NaCl en aérosol de taille nanométrique sont présentées aux Figures 2-6, 2-7 et 2-8. Comme on peut le constater, la taille optique des particules de NaCl semble varier, mais elle reste de dimension nanométrique (< 100 nm), quoique la taille des agglomérats aussi présents puisse dépasser l'échelle nanométrique. Nous avons également remarqué que les particules et les agglomérats de particules de NaCl étaient de forme et de structure différentes. Les particules primaires semblent sensiblement sphériques, mais la forme des agglomérats diverge considérablement. En ce qui concerne la structure, comme on peut le voir dans les Figures 2-7 et 2-8, les particules ou agglomérats de particules de NaCl peuvent être denses ou poreux, c'est-à-dire qu'il peut y avoir un certain vide entre les particules primaires constituant un agglomérat. En outre, comme le montre la Figure 2-8, la porosité des agglomérats de NaCl n'est pas nécessairement la même pour tous les agglomérats présents dans l'aérosol. Cela dit, il convient de traiter avec prudence les résultats obtenus par microscopie étant donné que nous avons échantillonné des particules de sel de taille nanométrique, lesquelles peuvent produire des artefacts en séchant sous forme de cristaux ou de pellicule sur le substrat, entraînant du coup des modifications de forme et de structure (Powers et coll., 2007).

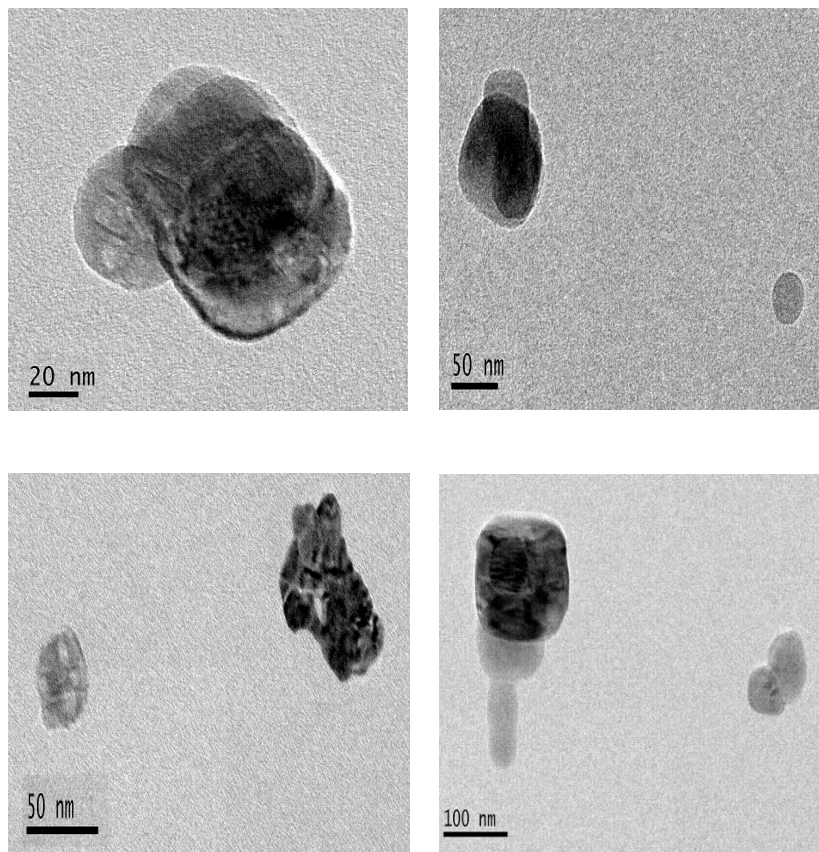


Figure 2-6 : Images par MET de particules d'aérosol de NaCl poly-disperses

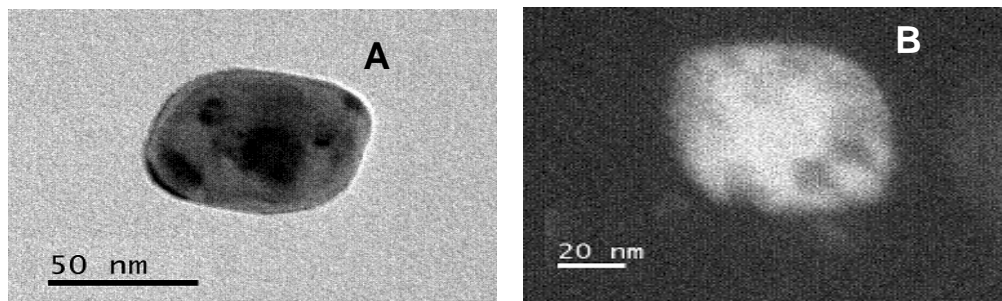


Figure 2-7 : Images par MET de nanoparticules d'aérosol de NaCl denses (A) et poreuses (B)

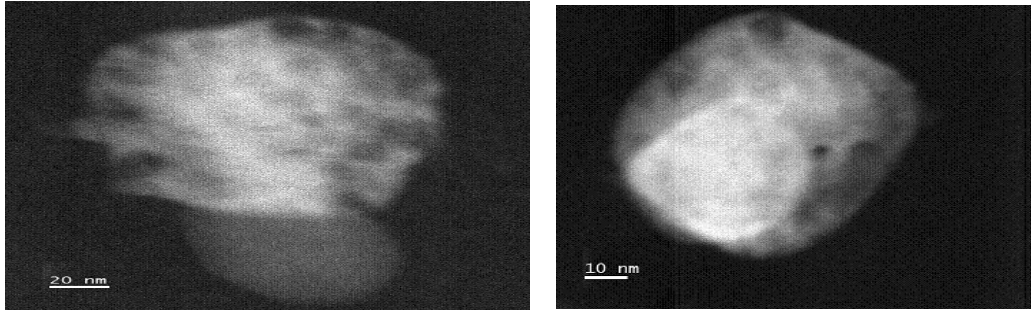


Figure 2-8 : Images par MET de nanoparticules d'aérosol de NaCl poreuses

Le nébuliseur Collision à six jets a été réglé sur une pression d'entrée de 25 lb/po² et alimenté en solution de NaCl à 0,1 % (V/V) de manière à générer des particules de NaCl poly-disperses de 15 nm à 200 nm (Figure 2-9). L'aérosol de NaCl utilisé dans le cadre de cette étude, d'une pureté de 99,9 % et d'une densité de 2165 kg/m³, a été dissous dans de l'eau distillée. Un dispositif d'alimentation en air filtré (modèle 3074, TSI Inc.) a été utilisé pour alimenter le générateur de particules en air propre et sec.



Figure 2-9 : Photographie du dispositif d'alimentation en air filtré (modèle 3074, TSI Inc.) relié à un nébuliseur Collision à six jets

Afin d'éliminer toute vapeur d'eau éventuelle du flux d'aérosol sortant du nébuliseur Collision, un séchoir à diffusion a été utilisé. Le système de séchage était constitué d'un tube grillagé enveloppé de gel de silice et recouvert d'un tube de plastique (Figure 2-10). Tandis que l'aérosol passait à travers le tube intérieur, la vapeur d'eau était absorbée par la paroi poreuse, puis éliminée par le gel de silice environnant. Avant de tester l'efficacité de filtration, de sorte à obtenir une concentration stable en amont de la chambre d'essai, on a laissé le générateur de particules fonctionner pendant au moins 5 minutes (pour plus de détails, voir l'Annexe A sur les résultats des essais de stabilisation aux fins d'étalonnage). Afin de réduire le risque d'exposition aux particules, la PFF N95 a été contournée durant la période de stabilisation. Une fois le dispositif stabilisé, la valve de commutation a été ajustée de manière à permettre au flux d'aérosol tout entier de passer directement à travers le filtre d'essai.



Figure 2-10 : Le système de séchage à gel de silice

Après avoir laissé le temps au dispositif de se stabiliser et avoir réglé le débit d'échantillonnage à 1,5 litre/min, la concentration et la distribution granulométrique des particules ont été mesurées en alternance à l'aide d'un SMPS, deux fois en aval et deux fois en amont du filtre à l'essai. Le temps requis pour chaque mesure en aval ou en amont était de 135 secondes. Les taux de pénétration des particules étaient ensuite déterminés en fonction du diamètre des particules. La concentration et la distribution granulométrique des particules à des débits d'air de 85, 135, 270 et 360 litres/min en amont du filtre (soit les débits utilisés pour tester la PFF N95 contre les aérosols poly-disperses) sont présentées à la Figure 2-11.

Le montage expérimental comprenait également un transducteur de pression afin de mesurer la chute de pression à travers la PFF à l'essai. Le facteur de qualité (q_f)², qui correspond au taux de pénétration des particules (P, en %) et à la résistance au flux d'air (Δp , en mm H₂O) à travers le

² Le facteur de qualité est utilisé pour caractériser la performance d'un filtre selon le taux de pénétration des particules et la résistance à l'air (Hinds, 1999).

filtre, a ainsi été déterminé en fonction de la taille des particules. Cet indicateur de performance d'un filtre est défini comme suit par Brown (1993) :

$$q_f = \frac{\ln(1/p)}{\Delta p}$$

Selon la norme 42 CFR 84, un prétraitement à une humidité relative de 85 % et à 38 °C pendant 25 heures est requis pour les APR à filtre de type N. Les essais effectués au début du projet n'ont pas produit des résultats significativement différents eu égard à la pénétration des NP entre les filtres prétraités et les filtres non prétraités. Par conséquent, les APR à filtre N95 sélectionnés n'ont pas été prétraités pour l'humidité relative avant les essais (les filtres ont été testés comme ils avaient été reçus du fabricant). Les conditions expérimentales dans la chambre d'essai (température, pression et humidité relative) ont été contrôlées durant les essais. La température a été maintenue au niveau de la température ambiante (23 ± 2 °C). Sauf pour l'essai d'humidité, l'humidité relative a été maintenue à 8 ± 2 % – de l'air sec comprimé a été utilisé. Un petit ventilateur de mélange a été installé à l'entrée de la chambre d'essai.

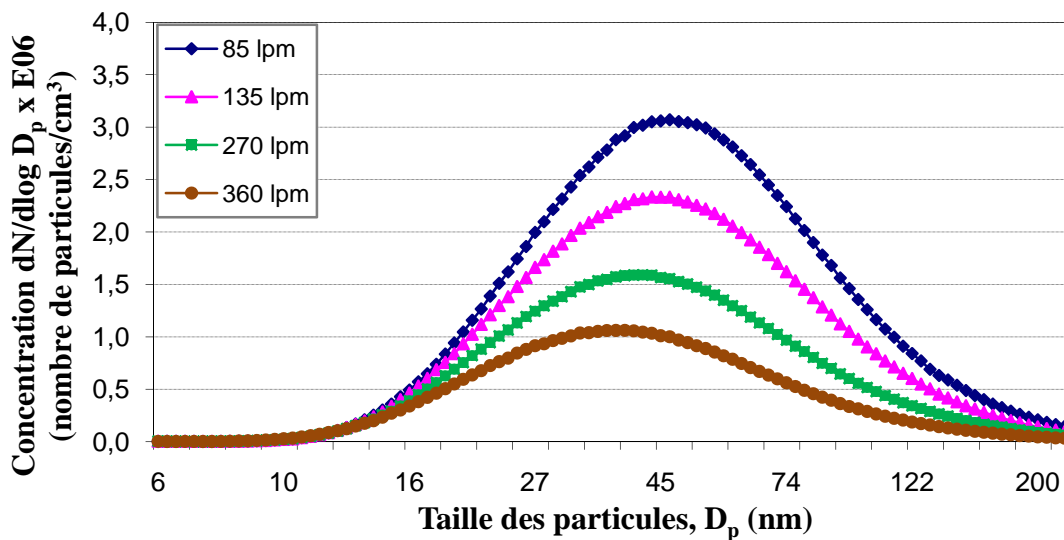


Figure 2-11 : Concentration en nombre et distribution granulométrique des particules de NaCl à différents débits d'air constants (nébuliseur réglé sur une pression d'entrée de 25 lb/po², avec une solution de NaCl à 0,1 %)

De plus, afin d'évaluer l'effet de l'humidité relative sur la performance du filtre, un système de contrôle de l'humidité (MNR, modèle HCS-301, Miller Nelson Research Inc.) a été utilisé pour conditionner l'humidité relative avant que le flux d'air entier pénètre dans la chambre d'essai.

Pour tester l'efficacité des appareils de protection respiratoire à filtre N95 contre les aérosols mono-disperses, le protocole d'essai décrit ci-dessus a été appliqué, si ce n'est que le dispositif

expérimental a été adapté de manière à pouvoir tester les filtres avec des particules mono-disperses (voir la Figure 2-1 à la page 15).

Après avoir généré des aérosols poly-disperses à l'aide du nébuliseur Collision à six jets (réglé sur une pression d'entrée de 25 lb/po², avec une solution de NaCl à 0,1 %) et les avoir fait passer par le système de séchage au gel de silice et par le neutraliseur (Kr-85), un long DMA a été utilisé pour extraire les particules d'une même taille avant l'entrée dans le dispositif d'essai de filtration.

Un CPC a été utilisé pour mesurer la concentration en particules de chacune des tailles choisies en aval et en amont du filtre. Les aérosols de NaCl de chaque taille ont été pompés pendant 2 minutes à l'aide du CPC à un débit d'échantillonnage de 1,5 litre/min, et ce, aussi bien en aval qu'en amont du filtre. Afin d'obtenir des conditions d'échantillonnage fiables, on a laissé le temps au compteur de particules de se stabiliser dans l'intervalle de commutation entre les deux points de prélèvement en aval et en amont. Enfin, le taux de pénétration a été mesuré pour chaque taille de particules à l'essai.

2.4. Mesure de l'efficacité de filtration

Le taux de pénétration des particules à travers un filtre correspond au rapport de la concentration en aval (C_{aval}) à la concentration en amont (C_{amont}) pour chaque taille de particules à l'essai, et il s'exprime comme suit :

$$P(\%) = \left(\frac{C_{aval}}{C_{amont}} \right) * 100$$

En conséquence, l'efficacité de collecte totale (η), en fonction de la taille des particules, se définit comme suit :

$$\eta(\%) = \left(\frac{C_{amont} - C_{aval}}{C_{amont}} \right) * 100 = 100 - P$$

La concentration (en amont ou en aval) utilisée dans les formules ci-dessus est la concentration en nombre, définie comme le nombre total de particules comptées par le SMPS conjointement au CPC. Il convient de noter que, selon la technique de mesure utilisée, l'efficacité de collecte totale peut être déterminée en fonction de la concentration massique ou de la concentration en nombre.

Aux fins de ce projet, la performance du filtre N95 a été évaluée au moyen d'essais sur les aérosols poly-disperses et d'essais sur les aérosols mono-disperses dans différentes conditions, notamment en ce qui a trait au débit d'air, à l'humidité relative (HR) et à la durée d'exposition du filtre. Chaque appareil de protection respiratoire a été testé trois fois à l'égard de la pénétration initiale des particules. Le Tableau 2-1 résume les mesures expérimentales effectuées dans le cadre de la présente étude.

Tableau 2-1 : Sommaire des mesures expérimentales

<i>Essais sur les aérosols poly-disperses (taille de particules de 15 nm à 200 nm)</i>		
Paramètres variables	Valeurs	Paramètres fixes
Débit d'air	85, 135, 270 et 360 litres/min (n = 3)	Durée d'exposition = 0 HR = 8 ± 2 %
Durée d'exposition	0, 1, 2, 3, 4 et 5 heures (n = 3)	Débit d'air = 85 litres/min HR = 8 ± 2 %
Humidité relative	10 ± 2 %, 30 ± 2 % et 70 ± 2 % (n = 4)	Durée d'exposition = 0 Débit d'air = 85 litres/min
<i>Essais sur les aérosols mono-disperses (taille de particules de 20 nm à 200 nm)</i>		
Aucun	Aucune	Durée d'exposition = 0 Débit d'air = 85 litres/min HR = 8 ± 2 %

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1. PHASE 1 : Pénétration d'aérosols de NaCl poly-disperses de 15 nm à 200 nm à un débit d'air constant (méthodologie d'essai sur les aérosols poly-disperses)

3.1.1. Pénétration initiale des particules en fonction du débit d'inhalation

Les appareils de protection respiratoire à filtre N95 ont été testés contre des aérosols de NaCl poly-disperses pendant une période de 5 minutes à chacun des quatre débits constants retenus – 85, 135, 270 et 360 litres/min – à l'aide du dispositif expérimental décrit ci-dessus (voir la Figure 2-2 à la page 16). La Figure 3-1 présente les valeurs de pénétration initiale d'aérosols de chlorure de sodium poly-disperses de 15 nm à 200 nm à quatre débits constants. Le test a été répété trois fois avec un nouvel appareil de protection respiratoire à chacun des débits. La valeur de crête et l'écart-type des valeurs de pénétration initiale ont été calculés pour chaque diamètre de particule par rapport au débit d'air.

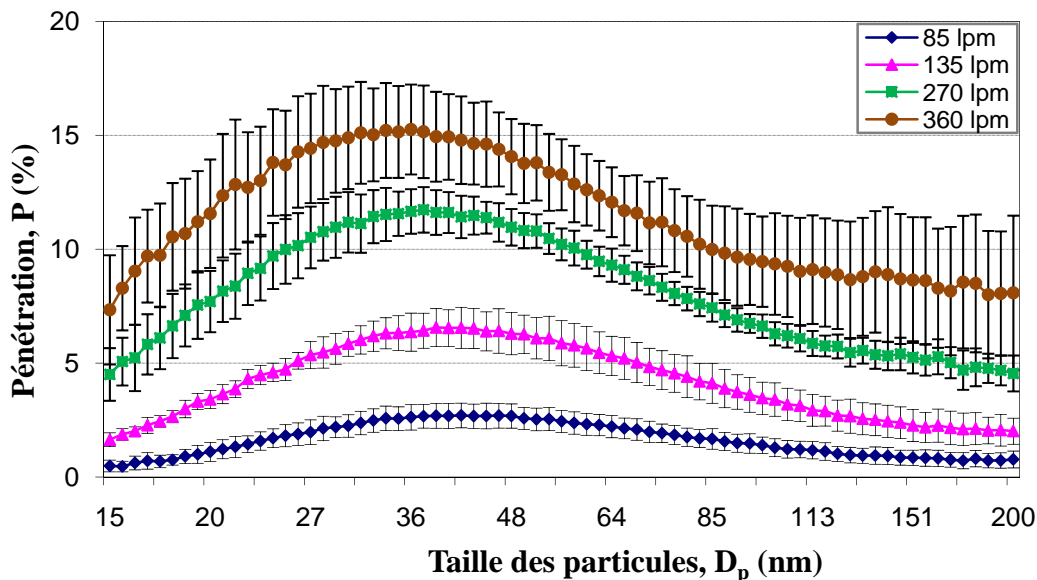


Figure 3-1 : Influence de la taille des particules et du débit d'inhalation sur la pénétration initiale des particules à travers les filtres N95 (n = 3). Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

Conformément aux résultats d'études antérieures, la pénétration initiale des particules augmentait considérablement lorsque le débit augmentait (Balazy et coll., 2006a, 2006b;

Richardson et coll., 2006; Huang et coll., 2007; Kim et coll., 2007; Eninger et coll., 2008). Le taux maximal de pénétration initiale à travers les PFF N95 dépassait de beaucoup – soit d'environ 1,30, 2,35 et 3,05 fois – les 5 % du critère d'homologation du NIOSH aux débits élevés de 135, 270 et 360 litres/min, respectivement. Pour la TPPP, à l'efficacité de filtration la plus faible, les taux de pénétration étaient de $2,7 \pm 0,54$ %, $6,6 \pm 0,90$ %, $11,7 \pm 1,00$ % et $15,3 \pm 1,97$ % à 85, 135, 270 et 360 litres/min, respectivement (Tableau 3-1).

Tableau 3-1 : Sommaire des taux de pénétration des particules, des chutes de pression et des TPPP dans le cadre des essais sur les aérosols poly-disperses (moyenne \pm écart-type)

Débit d'air (Q) (litres/min)	Chute de pression (mm H ₂ O)	P maximal (%)	TPPP (nm)
85	$7,79 \pm 0,27$	$2,7 \pm 0,54$	46
135	$13,32 \pm 1,03$	$6,6 \pm 0,90$	41
270	$23,79 \pm 0,77$	$11,7 \pm 1,00$	37
360	$32,7 \pm 0,91$	$15,3 \pm 1,97$	36

Le taux de pénétration initiale moyen des particules à 360 litres/min dépassait d'environ 6 fois le taux enregistré à 85 litres/min. Par ailleurs, selon les résultats obtenus, lorsque le débit d'air augmentait, la TPPP appartenait à des particules de plus petite taille, soit d'environ 46, 41, 37 et 36 nm à 85, 135, 270 et 360 litres/min, respectivement – résultats conformes à ceux d'études antérieures (Martin et Moyer, 2000; Balazy et coll., 2006a, 2006b; Richardson et coll., 2006; Huang et coll., 2007; Rengasamy et coll., 2008a; Rengasamy et Shaffer, 2008b). La réduction de la TPPP et l'augmentation du taux de pénétration des particules sont toutes deux dues au fait que lorsque le débit d'air augmente, les mécanismes de diffusion et électrostatique contribuent moins à l'élimination des particules plus fines compte tenu de la réduction du temps de séjour (Richardson et coll., 2006).

En outre, lorsque le débit d'air augmentait, la valeur du facteur de qualité diminuait (Figure 3-2). Les importantes chutes observées à l'égard des valeurs du facteur de qualité, surtout aux débits plus élevés, sont en grande partie attribuables à l'augmentation de la chute de pression et de la pénétration des particules, ce qui est en accord avec la littérature (Han, 2000; Eninger et coll., 2008).

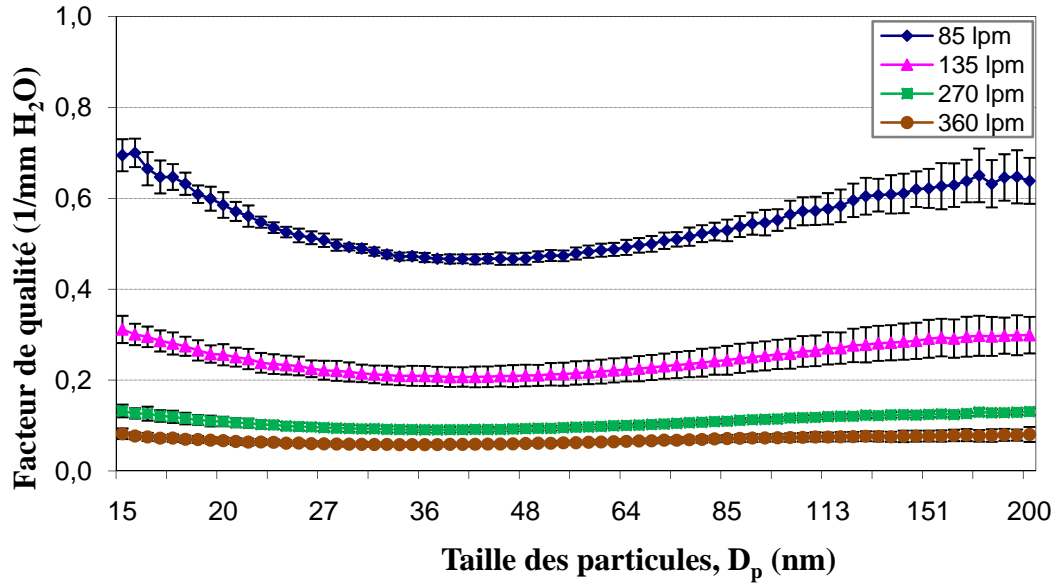


Figure 3-2 : Influence de la taille des particules et du débit d'inhalation sur le facteur de qualité des filtres N95 (n = 3). Les barres d'erreur représentent les écarts-types.

3.1.2. Pénétration des particules en fonction de la durée d'exposition des filtres N95

L'appareil de protection respiratoire à filtre N95 à l'essai a été exposé en continu à des particules de NaCl poly-disperses de 15 nm à 200 nm à un débit de 85 litres/minute pendant une période de 5 heures. La Figure 3-3 montre l'effet de la durée d'exposition sur le taux de pénétration des particules à travers l'APR à filtre N95. Le test a été répété trois fois, chaque fois avec un nouvel APR. Le taux de pénétration maximal des particules et le facteur de qualité ont été déterminés dans le temps (à chaque heure).

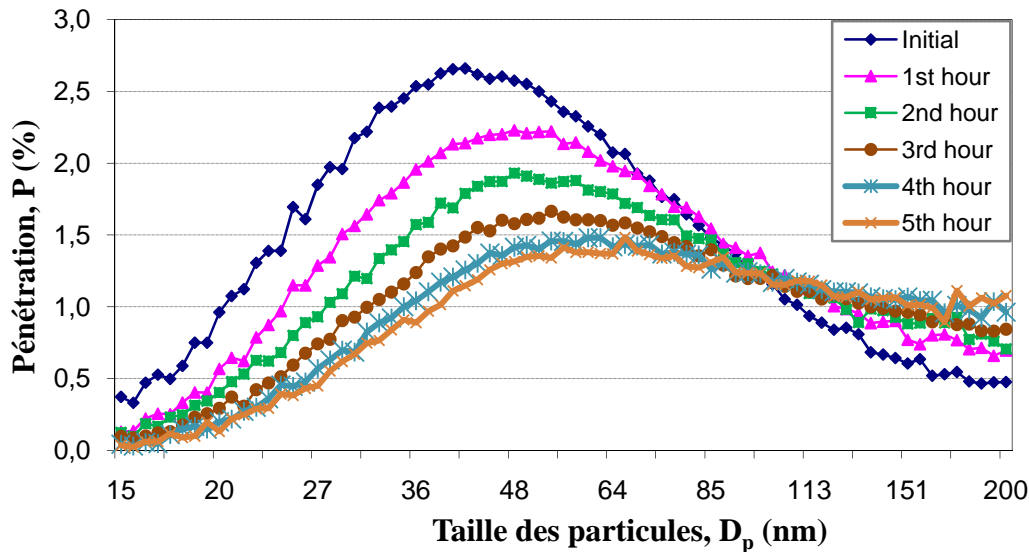


Figure 3-3 : Influence de la durée d'exposition sur la pénétration des particules à travers les filtres N95 à un débit d'air constant de 85 litres/min (n = 3)

Les résultats révèlent que, pour les particules de moins de 100 nm de diamètre, la pénétration diminuait avec la durée d'exposition, tandis qu'elle augmentait pour les particules de plus de 100 nm. Comme l'indique le Tableau 3-2, dans le cas des particules de moins de 100 nm, les taux de pénétration maximaux se sont vus réduits de $2,66 \pm 0,21$ % à $1,48 \pm 0,12$ %.

Tableau 3-2 : Sommaire des taux de pénétration des particules, des chutes de pression et des TPPP aux phases initiales (A) et finales (B) de la durée d'exposition des filtres N95 (5 heures)

Débit d'air (litres/min)	Phase d'exposition aux particules -----	Chute de pression (mm H ₂ O)	P maximal (< 100 nm)	TPPP (nm)
85	A	$7,95 \pm 0,57$	$2,66 \pm 0,21$	41
85	B	$10,86 \pm 1,27$	$1,48 \pm 0,12$	66

Comme l'indique la Figure 3-3, la TPPP augmentait de 41 nm à 66 nm dans le cas de l'APR à filtre N95 à l'essai. Cela est dû au fait que le rôle de la diffusion augmente alors que celui de la force d'attraction électrostatique diminue en ce qui concerne la captation des particules de grande taille (Martin et Moyer, 2000; Wang, 2001; Woon et coll., 2008). En outre, une moins grande variabilité du taux de pénétration en fonction du diamètre des particules a été observée lorsque la durée d'exposition des filtres N95 augmentait.

Comme mentionné précédemment, le taux de pénétration des particules de 15 nm à 100 nm diminuait considérablement avec la durée d'exposition, tandis qu'il augmentait progressivement avec la taille des particules. Ce phénomène semble pouvoir s'expliquer par la formation d'agrégats de particules à la surface du filtre (Wang, 2001; Woon et coll., 2008). Dans le cas des particules fines, outre la réduction de la force d'attraction électrostatique, une augmentation de la durée d'exposition des filtres N95 donne généralement lieu à une captation de particules plus importante par diffusion, étant donné que les particules déposées sont de taille comparable à celle des particules qui approchent (Wang, 2001). Les particules captées peuvent même empêcher la collecte de particules par attraction électrostatique, alors que ce mécanisme de collecte joue un rôle notable dans le cas des grosses particules, surtout de 150 nm à 500 nm (Wang, 2001). Des études expérimentales sur les filtres électret ont démontré que l'efficacité de collecte des particules dépend généralement du niveau de charge électrostatique sur la fibre filtrante (Brown et coll., 1988; Chen et coll., 1993; Martin et Moyer, 2000).

La Figure 3-4 présente la courbe de facteur de qualité des filtres N95 pour chaque diamètre de particules durant la période d'exposition. Les résultats obtenus révèlent de plus grands écarts de facteur de qualité dans le cas des plus grosses particules (les valeurs du facteur de qualité étaient comparables pour les particules de 15 nm à 30 nm, et ce, pour toutes les durées d'exposition aux aérosols).

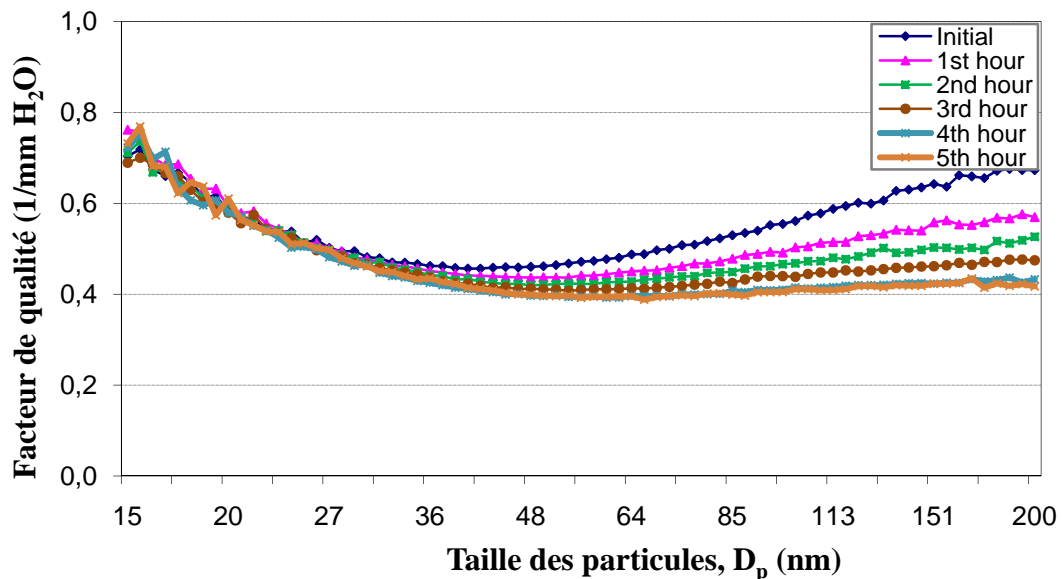


Figure 3-4 : Influence de la taille des particules et de la durée d'exposition sur le facteur de qualité des filtres N95 à un débit d'air constant de 85 litres/min (n = 3)

3.1.3. Pénétration des particules en fonction de l'humidité relative

L'appareil de protection respiratoire a été testé contre des particules de NaCl poly-disperses de 15 nm à 200 nm à un débit de 85 litres/min et à trois niveaux d'humidité relative, soit 10 %, 30 % et 70 %, pendant 5 minutes dans chacun des cas. Un système de contrôle de l'humidité (MNR, modèle HCS-301, Miller Nelson Research Inc.) a été utilisé pour conditionner l'humidité relative avant que le flux d'air entier pénètre dans la chambre d'essai. La Figure 3-5 illustre la pénétration initiale des particules de chlorure de sodium à travers le filtre N95 à trois niveaux d'humidité relative. Chaque essai a été répété quatre fois avec des particules de 15 nm à 200 nm, chaque fois avec un nouvel APR. Les valeurs de crête et l'écart-type des taux de pénétration initiale ont ainsi été déterminés. Conformément aux résultats obtenus dans le cadre des études antérieures sur les filtres électret, dans le cas des particules de moins de 100 nm, l'efficacité de filtration diminuait légèrement lorsque l'HR augmentait, ce qui peut s'expliquer par la réduction des charges sur les filtres à fibres et les particules (Ackley, 1982; Moyer et coll., 1989). Cependant, dans le cas des particules de plus grande taille, le taux de pénétration était semblable à 10 % et à 30 % d'HR, alors qu'il augmentait lorsque le niveau d'HR passait à 70 %.

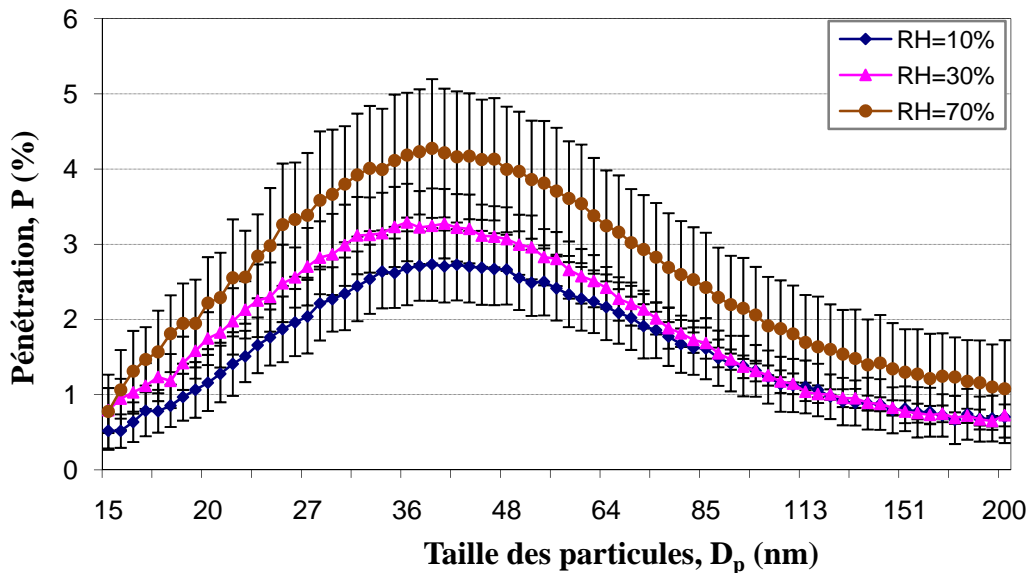


Figure 3-5 : Influence de l'humidité relative sur la pénétration initiale des particules à travers les filtres N95 à un débit d'air constant de 85 litres/min ($n = 4$). Les barres d'erreur représentent l'écart-type à chaque point.

Même si le taux de pénétration initiale maximal augmentait légèrement avec l'HR, il ne dépassait pas 5 %, ce qui est conforme au critère d'homologation du NIOSH. Au niveau de la TPPP, les taux de pénétration étaient respectivement de $2,73 \pm 0,47$ %, $3,30 \pm 0,50$ % et $4,27 \pm 0,90$ % à 10 %, 30 % et 70 % d'HR.

Aucune variation notable de la TPPP n'a été observée avec l'augmentation de l'HR. Néanmoins, la TPPP se situait toujours entre 30 nm et 50 nm, ce qui reflète la participation du mécanisme d'attraction électrostatique à la captation des particules par le filtre. Le Tableau 3-3 présente les données relatives aux taux de pénétration maximaux et aux TPPP aux différents niveaux d'HR (Mostofi et coll., 2011).

Tableau 3-3 : Sommaire des données de performance à un débit d'air de 85 litres/min

HR (%)	P maximal (%)	TPPP (nm)
10	2,73 ± 0,47	41
30	3,30 ± 0,50	36
70	4,27 ± 0,90	39

3.2. PHASE 2 : Pénétration d'aérosols de NaCl mono-disperses de 20 nm à 200 nm à un débit d'air constant (méthodologie d'essai sur les aérosols mono-disperses)

3.2.1. Corrélation entre la pénétration des particules mono-disperses et poly-disperses

L'efficacité de filtration des PFF N95 a été évaluée par rapport à des particules de NaCl de 12 tailles différentes (20, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 80, 100, 120, 160 et 200 nm) à un débit constant de 85 litres/min.

La Figure 3-6 présente les taux de pénétration de particules de chlorure de sodium mono-disperses à un débit constant de 85 litres/min à travers les filtres N95 selon la méthode d'essai sur les aérosols mono-disperses. Cette figure présente également les résultats de pénétration obtenus à un débit constant de 85 litres/min lors des essais sur les aérosols poly-disperses. Les essais ont été répétés quatre fois avec les aérosols de NaCl de chaque taille en utilisant chaque fois un nouvel appareil de protection respiratoire. Conformément aux résultats d'études antérieures sur les filtres électret, la TPPP se situait entre 40 nm et 100 nm. Un taux de pénétration initiale plus élevé a été observé pour chaque taille de particules testée selon la méthodologie d'essai sur les aérosols mono-disperses (Figure 3-6). Cependant, le taux de pénétration initiale n'a en aucun cas dépassé 5 %, ce qui est conforme au critère d'homologation du NIOSH à 85 litres/min. Les résultats ne montrent par ailleurs aucun lien entre les taux de

pénétration initiale des particules mesurés à l'aide de la méthodologie d'essai sur les aérosols mono-disperses et les taux de pénétration initiale des particules mesurés à l'aide de la méthodologie d'essai sur les aérosols poly-disperses pour les différentes tailles de particules à 85 litres/min.

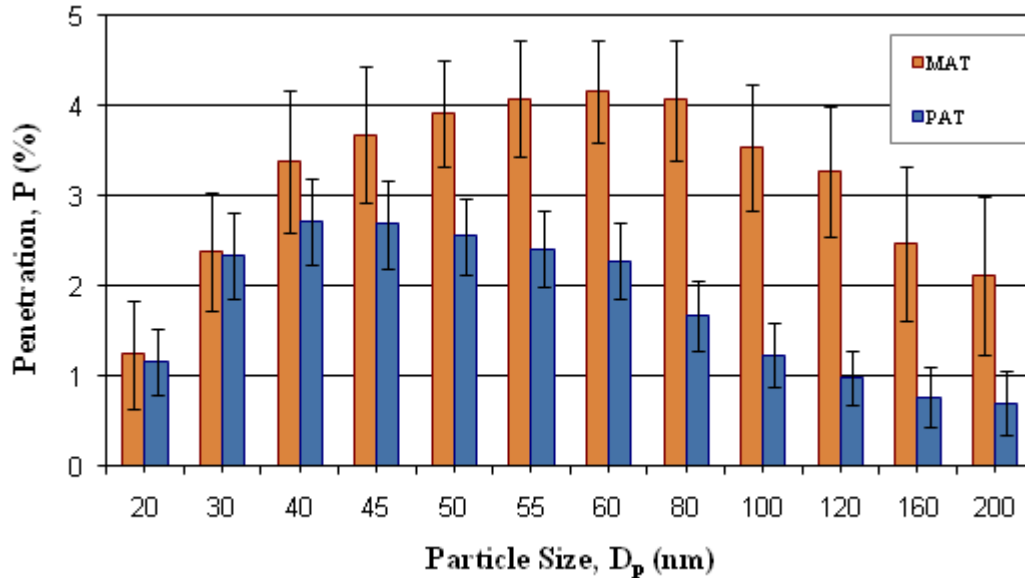


Figure 3-6 : Comparaison des taux de pénétration des particules mono-disperses et poly-disperses (n = 4). Les barres d'erreur représentent l'écart-type à chaque point.

En outre, comme l'indique la Figure 3-7, les résultats obtenus avec la méthodologie d'essai sur les aérosols mono-disperses révèlent une très faible concentration en nombre de nanoparticules en amont du filtre N95 par rapport aux concentrations en nombre mesurées avec la méthodologie d'essai sur les aérosols poly-disperses, et ce, pour chaque taille de particules à 85 litres/min (voir la Figure 2-11 à la page 22). Selon la taille des particules, les concentrations en nombre variaient plus ou moins de 80 à 1600 particules/cm³ avec la méthodologie d'essai sur les aérosols mono-disperses, contre environ 10⁶ particules/cm³ avec la méthodologie d'essai sur les aérosols poly-disperses. Cette faible concentration en nombre de nanoparticules est principalement due aux pertes par diffusion à travers l'instrument de mesure (SMPS), surtout au niveau de l'impacteur, du neutraliseur, du DMA, du CPC et des tubes de raccordement au DMA et au CPC (Mostofi et coll., 2012).

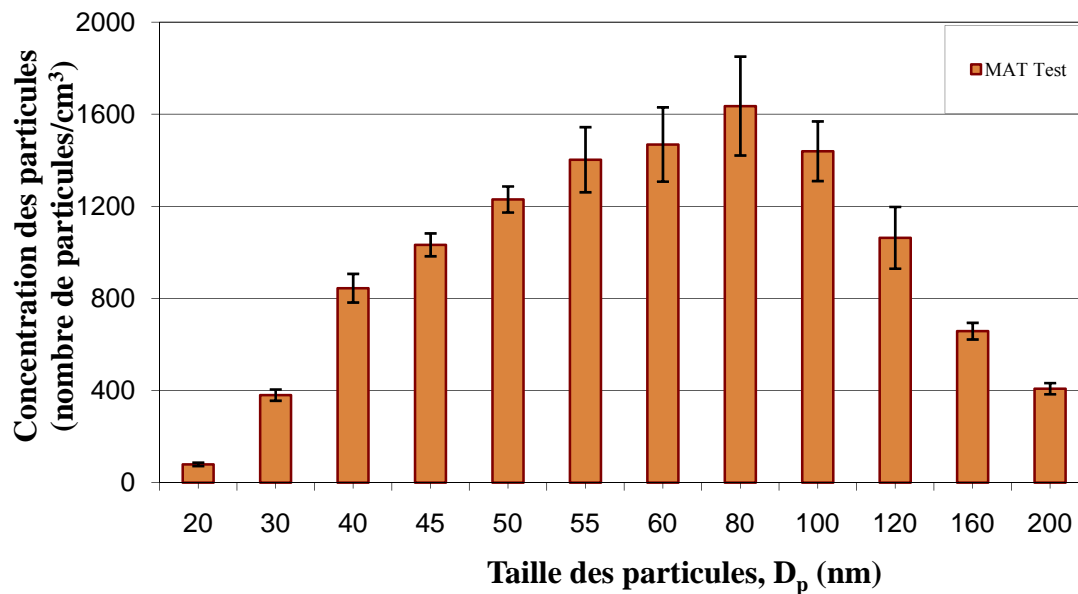


Figure 3-7 : Concentration en nombre des particules pour chaque taille de particules à l'essai (n = 4) Les barres d'erreur représentent l'écart-type à chaque point.

CHAPITRE 4

CONCLUSIONS ET FUTURS TRAVAUX

4.1. Conclusions et résumé

Une revue des travaux de recherche antérieurs sur l'efficacité de filtration des filtres et la performance des appareils de protection respiratoire contre les nanoparticules a été présentée. Il en ressort que les méthodologies et les protocoles en usage ne sont pas normalisés, les expériences étant menées dans différentes conditions (température, débit d'air, HR, techniques de mesure, etc.). Cela a limité la validation de la procédure, et il s'est avéré difficile de comparer les résultats des différentes études. Compte tenu de la croissance observée dans le secteur de la fabrication de nanoproducts, il importe d'étudier l'impact des paramètres précités sur l'efficacité des filtres dans des conditions telles qu'on en trouve normalement en milieu de travail. Cela est d'autant plus important qu'un des problèmes les plus épineux sur le plan de la santé et de la sécurité au travail tient actuellement au manque de connaissances sur l'influence du débit d'air, de l'humidité et de la durée d'utilisation sur l'efficacité des supports filtrants à capter les nanoparticules.

Les études antérieures se sont limitées à des essais de laboratoire sous haute concentration de contaminants et à des débits d'air relativement faibles. En raison des conditions mentionnées ci-dessus, les résultats de ces études ne peuvent être extrapolés à des applications réelles. La majorité des études antérieures ont démontré que les appareils de protection respiratoire filtrants étaient efficaces pour capter les particules à des débits constants de 30 à 85 litres/min. Cela dit, bien qu'un débit de 85 litres/min simule le rythme respiratoire relativement élevé sous une charge de travail exigeante utilisé par le NIOSH pour l'homologation des appareils de protection respiratoire, on estime que le débit d'inhalation peut dépasser 350 litres/min sous une lourde charge de travail.

Les résultats des essais sur les aérosols poly-disperses réalisés dans le cadre de la présente étude ont démontré que l'efficacité de filtration d'un appareil de protection respiratoire à pièce faciale filtrante N95 homologué par le NIOSH diminue avec l'augmentation du débit d'air, le taux maximal de pénétration initiale des particules ayant largement dépassé les 5 % du critère d'homologation, par un facteur d'environ 1,30, 2,35 et 3,05 à des débits de 135, 270 et 360 litres/min, respectivement. La TPPP a par ailleurs légèrement diminué avec l'augmentation du débit d'air, passant de 46 nm à 85 litres/min à 36 nm à 360 litres/min. On a constaté que la pénétration des particules à travers la PFF N95 diminuait lorsque la durée d'exposition augmentait dans le cas des particules de taille nanométrique, alors qu'elle augmentait légèrement dans le cas des particules de plus grande taille. Ce phénomène a été attribué au dépôt de particules à la surface des fibres filtrantes, ce qui bouche les pores du filtre et améliore par conséquent la collecte des particules plus fines sous l'effet de la diffusion. Les résultats expérimentaux ont également montré que la performance des filtres N95 diminuait légèrement

lorsque l'HR augmentait, sans doute en raison d'une réduction de la charge électrostatique sur les fibres filtrantes à HR élevée.

Les essais sur les aérosols mono-disperses ont été effectués à un débit constant de 85 litres/min; le taux de pénétration initiale des particules de la TPPP était inférieur au critère d'homologation de 5 % du NIOSH. En outre, le taux de pénétration initiale des particules mesuré selon la méthodologie d'essai sur les aérosols mono-disperses était plus élevé que le taux de pénétration initiale des particules mesuré selon la méthodologie d'essai sur les aérosols poly-disperses à taille de particules égale.

L'ensemble des résultats et des analyses peut être résumé comme suit :

1. Par rapport aux essais sur les aérosols poly-disperses (méthodologie d'essai sur les aérosols poly-disperses), les essais sur les aérosols mono-disperses (méthodologie d'essai sur les aérosols mono-disperses) ont donné lieu à une plus forte pénétration initiale à un débit d'air de 85 litres/min. Toutefois, dans un cas comme dans l'autre, le taux de pénétration n'a pas dépassé 5 %.
2. L'augmentation du débit d'air réduisait l'efficacité des filtres N95 au point de la rendre inférieure au seuil critique de 95 %. De fait, à des débits de 135, 270 et 360 litres/min, le taux de pénétration dépassait les 5 % du critère d'homologation.
3. L'augmentation du débit d'air réduisait le facteur de qualité. Cela s'explique par une chute de pression plus importante et une plus grande pénétration à des débits d'air élevés.
4. À un débit constant, l'augmentation de l'humidité relative réduisait l'efficacité des filtres N95, surtout contre les particules de plus petite taille.
5. L'efficacité des filtres N95 contre les NP augmentait lorsque la durée d'exposition augmentait.

4.2. Futurs travaux et recommandations

Suivent des recommandations de travaux de recherche ultérieurs sur l'évaluation de l'efficacité de filtration.

La méthodologie développée permet d'évaluer l'efficacité de captation d'une série d'appareils de protection respiratoire à pièce faciale filtrante. Il est donc recommandé de tester trois types de filtres respiratoires – N, R et P – selon trois niveaux d'efficacité de filtration, soit 95 %, 99 % et 99,97 %. Pour chaque type de filtres, les essais devraient porter sur des particules solides et des particules liquides. Dans le cadre de cette étude, la principale méthode utilisée pour générer des particules reposait sur la méthodologie d'essai sur les aérosols poly-disperses. Toutefois, des recherches plus fiables sont nécessaires pour étudier l'incidence de la génération de particules mono-disperses selon une méthode à même de fournir une importante quantité de NP afin

d'évaluer les performances effectives des PFF N95 ou de tous autres appareils de protection respiratoire à filtre de type N, R ou P.

La méthode en question devrait être applicable à l'étude de la performance des masques respiratoires filtrants selon un schéma d'écoulement d'air réaliste (débit d'air cyclique). La plupart des études antérieures se limitaient en effet à tester les filtres à un débit d'air constant. Or, les résultats de ces études ne peuvent être extrapolés à des applications réelles, car dans les faits, le débit d'air à travers un filtre de masque respiratoire n'est pas constant, il varie en fonction du rythme respiratoire. Et l'on peut estimer que la performance d'un filtre à un débit d'air périodique ne sera pas la même qu'à un débit d'air constant.

Un dernier point, et non le moindre, des lignes directrices plus précises en ce qui a trait au choix et à l'utilisation des appareils de protection respiratoire contre les NP devraient être élaborées pour assurer un niveau de protection respiratoire élevé aux travailleurs et aux autres personnes exposées.

RÉFÉRENCES

- Ackley, M.W. (1982). *Degradation of Electrostatic Filters at Elevated Temperature and Humidity*. 3rd World Filtration Congress, pp. 169–176.
- Alonso, M., Kousaka, Y., Hashimoto, T. & Hashimoto, N. (1997). *Penetration of Nanometer-Sized Aerosol Particles through Wire Screen and Laminar Flow Tube*. *Journal of Aerosol Science*, 27, 471–480.
- ASHRAE. Standard 52.2. (2007). *Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- Balazy, A., Podgorski, A. & Gradon, L. (2004). *Filtration of Nano-sized Aerosol Particles in Fibrous Filters. I- Experimental Results*. *Journal of Aerosol Science*, 35, 967–968.
- Balazy, A., Toivola, M., Adhikari, A., Sivasubramani, S.K., Reponen, T. & Grinshpun, S.A. (2006a). *Do N95 Respirators Provide 95% Protection Level against Airborne Viruses, and How Adequate Are Surgical Masks?* *American Journal of Infection Control*, 34, 51–57.
- Balazy, A., Toivola M., Repoen T., Podgorski A., Zimmer A., & Grinshpun S.A. (2006b). *Manikin-Based Performance Evaluation of N95 Filtering Face-Piece Respirators Challenged with Nano-particles*. *Annals of Occupational Hygiene*, 50, 259–269.
- Baumgartner, H., Loffler, F. & Umhauer, H. (1986). *Deep-Bed Electret Filters-The Determination of Single Fbre Charge and Collection Efficiency*. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 21, 477–486.
- BGI. (2002). *Collision Nebulizer-Instructions. MRE 1, 3, 6 and 24 Jet*. BGI Incorporated.
- Boskovic, L., Agranovski, I.E. & Braddock, R.D. (2007). *Filtration of Nanosized Particles with Different Shape on Oil Coated Fibres*. *Journal of Aerosol Science*, 38, 1220-1229.
- Boskovic, L., Agranovskia, I.E., Altmana, I.S. & Braddocka, R.D. (2008). *Filter Efficiency as a Function of Nano-Particle Velocity and Shape*. *Journal of Aerosol Science*, 39, 635–644.
- Brown, R.C., Wake, D., Gray, R., Blackford, D.B. & Bostock, G.J. (1988). *Effect of industrial aerosols on the performance of electrically charged filter material*. *Annals of Occupational Hygiene*, 32(3): 271-294.
- Brown, R.C. (1993). *Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters*. Oxford U.K.: Pergamon.

Chen, C.C., Lehtimäki, M. & Willeke, K. (1993). *Loading and filtration characteristics of filtering facepieces*. American Industrial Hygiene Association Journal, 54(2), 51–60e.

Chen, C.C. & Huang, S.H. (1998). *The Effect of Particle Charge on the Performance of a Filtering Face-Piece*. American Industrial Hygiene Association Journal, 59, 227–233.

Code of Federal Regulations (CFR). (1996). *Approval of Respiratory Protective Devices*. Title 42, Part 84, pp. 528–593.

Crooks, M. (2007). *Nano-Safety and Instrumentation*. NanoMicroClub Networking Event. Presented by Crooks (TSI Inc.), 22nd May in Oxford.

Davies, C.N. (1973). *Air Filtration*. Academic Press, London.

De la Mora, J. F., De Juan, L., Eichler, T. & Rosell, J. (1998). *Differential Mobility Analysis of Molecular Ions and nanometer Particles*. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 17, 328–339.

Department of Health and Human Services (DHHS). (2003). *Guidance for Filtration Air Cleaning System to Protect Building Environments from Airborne Chemical, Biological, and Radiological Attacks*. Publication 2003–136.

Donaldson, K., Stone, V., Clouter, A., Renwick, L. & MacNee, W. (2001). *Ultrafine Particles*. Journal of Occupational and Environmental Medicine, 58, 211–216.

Dockery, D.W. & Pope, A.C. (1994). *Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution*. Annual Review of Public Health, 15, 107–132.

Dullien, F.A.L. (1989). *Introduction to Industrial Gas Cleaning*, Academic Press, San Diego.

Eninger, R.M., Honda, T., Adhikari, A., Tanski, H., Reponen, T. & Grinshpun, S.A. (2008). *Filter Performance of N99 and N95 Face-Piece Respirators against Viruses and Ultrafine Particles*. Annals of Occupational Hygiene, 52, 385–396.

Fjeld, R. & Owens, T. (1988). *The Effect of Particle Charge on Penetration in an Electret Filter*. IEEE Transactions on Industry Applications, 24, 725–731.

Grafe, T., Gogins, M., Barris, M., Schaefer, J. & Canepa, R. (2001). *Nanofibers in Filtration Applications in Transportation*. Proceedings of the Filtration 2001 International Conference and Exposition of the INDA (Association of the Nowovens Fabric Industry), Chicago, IL; 1-15.

Han, D.H. (2000). *Performance of Respirator Filters Using Quality Factor in Korea*. Industrial Health Journal, 38, 380–384.

Hagdnagy, W., Stiller-Winkler, R., Kainka, R., Ranft, U. & Idel, H. (1998). *Influence of Urban Air Pollution on the Immune System of Children*. Journal of Aerosol Science, Supplement 2, S997–S998.

Hinds, W.C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. (2nd ed.), New York: Wiley.

Howard, J. (2003). *Guidance for filtration and air-cleaning systems to protect building environments from airborne chemical, biological, or radiological attacks*. <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-136/pdfs/2003-136.pdf>. Accessed February 15, 2009.

Huang, S.H., Chen, C.W., Chang, C.P., Lai, C. Y. & Chen, C.C. (2007). *Penetration of 4.5 nm to 10 µm Aerosol Particles through Fibrous Filters*. Journal of Aerosol Science, 38, 719–727.

Ikezaki, K., Iritani, K., Nakamura, T. & Hori, T. (1995). *Effect of Charging State of Particles on Electrets*. Journal of Electrostatics, 35, 41–46.

Janssen, L. (2003). *Principles of Physiology and Respirator Performance*. Occupational Health & Safety, 72, 73–81.

Ji, J.H., Bae, G.N., Kang, S.H. & Hwang, J. (2003). *Effect of Particle Loading on the Collection Performance of an Electret Cabin Air Filter for Submicron Aerosols*. Journal of Aerosol Science, 34, 1493–1504.

Kanaoka, C., Emi, H., Otani, Y. & Liyama, T. (1987). *Effect of Charging State of Particles on Electret Filtration*. Journal of Aerosol Science, 7, 1–13.

Kim, C.S., Bao, L., Okuyama, K., Shimada, M. & Niinuma, H. (2006). *Filtration Efficiency of a Fibrous Filter for Nano-Particles*. Journal of Nanoparticle Research, 8, 215–221.

Kim, S., Harrington, M. & Pui, D. (2007). *Experimental Study of Nano-Particles Penetration through Commercial Filter Media*. Journal of Nanoparticle Research, 9, 117–125.

Kousaka, Y., Okuyama, K., Shimada, M. & Takii, Y. (1990). *Development of a Method for Testing Very High-Efficiency Membrane Filters for Ultrafine Aerosol Particles*. Journal of Chemical Engineering of Japan, 23, 568–574.

Lee, K.W. & Liu, B. (1980). *On the Minimum Efficiency and the Most Penetrating Particle Size for Fibrous Filters*. Journal of the Air Pollution Control Association, 30, 377–381.

Lowkis, B., & Motyl, E. (2001). *Electret Properties of Polypropylene Fabrics*. Journal of Electrostatics, 51-52, 232–238.

Martin, S.B. & Moyer, E.S. (2000). *Electrostatic respirator filter media: filter efficiency and most penetrating particle size effects*. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 15, 609–617.

Miguel, A.F. (2003). *Effect of Air Humidity on the Evolution of Permeability and Performance of a Fibrous Filter during Loading with Hygroscopic and Non-Hygroscopic Particles*. Journal of Aerosol Science, 34, 783–799.

Mostofi, R., Noël, A., Haghghat, F., Bahloul, A., Lara, J. & Cloutier, Y. (2012). *Impact of Sampling Measuring Techniques on the Performance of N95 Respirator against Ultrafine Particles*, Int. Journal of Hazardous Materials, 217-218:51-57.

Mostofi, R., Bahloul, A. Lara, J., Wang, B., Cloutier, Y. and Haghghat, F. (2011). *Investigating of Potential Affecting Factors on Performance of N95 Respirator*, J. of the International Society for Respiratory Protection, 28: 26-39

Mostofi, R., Wang, B., Haghghat, F., Bahloul, A. & Lara, J. (2010) *Performance of Mechanical Filters and Respirators for Capturing Nanoparticles – Limitations and Future Directio*, Int. J. Industrial Hygiene, 48: 296-304.

Moyer, E.S. & Stevens, G.A. (1989). *“Worst Case” Aerosol Testing Parameters: II. Efficiency Dependence of Commercial Respirator Filters on Humidity Pre-treatment*. American Industrial Hygiene Association Journal, 50, 265–270.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) and the Bureau of Labor Statistics (BLS). (2003). *Respirator Usage in Private Sector Firms*. Department of Health and Human Services & Department of Labor.

Nemmar, A., Vanbilloen, H., Hoylaerts, M., Hoet, P., Verbruggen, A. & Nemery, B. (2001). *Passage of Intratracheally Instilled Ultrafine Particles from the Lung into the Systemic Circulation in Hamster*. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 164, 1665–1668.

Nemmar, A., Hoet, P., Vanquickenborne, B., Dinsdale, D., Thomeer, M., Hoylaerts, MF., Vanbilloen, H., Mortelmans, L. & Nemery, B. (2002). *Passage of Inhaled Particles into the Blood Circulation in Humans*. Circulation, 105, 411–414.

Oberdorster, G. (2000). *Toxicology of Ultrafine Particles: in Vivo Studies*. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 358, 2719–2740.

Oberdorster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Lunts, A., Kreyling, W. & Cox, C. (2002). *Extrapulmonary Translocation of Ultrafine Carbon Particles Following Whole-Body Inhalation Exposure of Rats*. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 65, 1531–1543.

Oberdorster, G., Sharp, Z., Atudorei, V., Elder, A., Gelein, R., Kreyling, W. & Cox, C. (2004). *Translocation of Inhaled Ultrafine Particles to the Brain*. *Inhalation Toxicology*, 16, 437–445.

Oberdorster, G. (2005). *Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles*. *Environmental Health Perspectives*, 113, 823–839.

Ostiguy, C., Soucy, B., Lapointe, G., Woods, C. & Ménard, L. (2008). *Les effets sur la santé reliés aux nano-particules*, Rapport IRSST R-558, 2^e édition.

Rengasamy, S., Verbofsky, R., King, W.P., Eimer, B.C. & Shaffer, R.E. (2007). *Nano-Particle Penetration through NIOSH-Approved N95 Filtering Face-Piece Respirators*. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 24, 49–59.

Rengasamy, S., King, W.P., Eimer, B.C. & Shaffer, R.E. (2008a). *Filtration Performance of NIOSH-Approved N95 and P100 Filtering Face-Piece Respirators against 4 to 30 Nanometer-Size Nano-Particles*. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5, 556–564.

Rengasamy, S., Eimer, B.C. & Shaffer, R.E. (2008b). *Nano-Particle Filtration Performance of Commercially Available Dust Masks*. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 25, 27–41.

Richardson, A.W., Eshbaugh, J.P., Hofacre, K.C. & Gardner, P.D. (2006). *Respirator Filter Efficiency against Particulate and Biological Aerosols under Moderate to High Flow Rates*. U.S. Army Edgewood Chemical Biological Center Report for Contract No. SP0700-00-D-3180. <http://www.cdc.gov/niosh/npptl/researchprojects/pdfs/CR-085Gardner.pdf>.

SCENIHR. (2006). *The Appropriateness of Existing Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious Products of Nanotechnologies*. Directorate C–Public Health and Risk Assessment. C7–Risk Assessment. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risk.

Takenaka, S., Karg, D., Roth, C., Schulz, H., Ziesenis, A., Heinzmann, U., Chramel, P. & Heyder, J. (2001). *Pulmonary and Systemic Distribution of Inhaled Ultrafine Silver Particles in Rats*. *Environmental Health Perspectives*, 109, 547–551.

Tran, C.L., Buchanan, D. & Cullen, R.T. (2000). *Inhalation of Poorly Soluble Particles. II. Influence of Particle Surface Area on Inflammation and Clearance*. *Inhalation Toxicology*, 12, 1113–1126.

TSI. (2003). *Model 3012A Aerosol Neutralizer Instructions*. TSI Incorporated.

TSI. (2005). *Model 3936 Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer Instructions*. TSI Incorporated.

Wang, C.S. (2001). *Electrostatic Forces in Fibrous Filters- A Review*. *Powder Technology*, 118, 166–170.

Warheit, D.B., Webb, T.R., Colvin, V.L., Reed, K.L. & Sayes, C.M. (2007a). *Pulmonary Bioassay Studies with Nanoscale and Fine-Quartz Particles in Rats: Toxicity Is Not Dependent Upon Particle Size But on Surface Characteristics*. *Toxicological Sciences*, 95, 270–280.

Warheit, D.B., Webb, T.R., Reed, K.L., Frerichs, S. & Sayes, C.M. (2007b). *Pulmonary Toxicity Study in Rats with Three Forms of Ultrafine-TiO₂ Particles: Differential Responses Related to Surface Properties*. *Toxicological Sciences*, 230, 90–104.

Wiedensohler, A. (1998). *An Approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Size Range*. *Journal of Aerosol Science*, 19, 387–389.

Woon, W., Leung, F. & Hunga, C.H. (2008). *Investigation on Pressure Drop Evolution of Fibrous Filter Operating in Aerodynamic Slip Regime under Continuous Loading of Sub-Micron Aerosols*. *Separation and Purification Technology*, 63, 691–700.

Yang, S. & Lee, G.W.M. (2005). *Filtration Characteristics of a Fibrous Filter Pretreated with Anionic Surfactants for Mono-dispersed Solid Aerosols*. *Journal of Aerosol Science*, 36, 419–437.

ANNEXE A : ÉTALONNAGE DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Avant de procéder aux essais d'efficacité de filtration, des essais d'étalonnage et de qualification sont effectués afin d'obtenir des conditions d'utilisation fiables du banc d'essai et des procédures d'échantillonnage. Les essais d'étalonnage consistent à :

- effectuer des « essais sans filtre » (essais de corrélation) pour quantifier la précision de la mesure de l'efficacité fractionnelle;
- mesurer la distribution granulométrique à différents points en amont pour vérifier l'uniformité de la dispersion de l'aérosol introduit dans la chambre d'essai;
- mesurer la concentration en nombre et la distribution granulométrique des particules à l'aide de solutions de NaCl de différentes concentrations;
- effectuer des essais de stabilisation au cours de la mise en marche du dispositif expérimental afin de déterminer l'intervalle de temps requis pour que la concentration des particules atteigne un état stable en amont.

« Essais sans filtre »

Le but de ces essais est de quantifier la précision de la mesure de l'efficacité fractionnelle. Une expérience comparable aux essais d'efficacité de filtration a été réalisée sans dispositif d'élimination des particules.

Pour évaluer le critère mentionné, le rapport de corrélation (R) a été calculé entre deux points d'échantillonnage en amont (au centre) et en aval, et ce, aux quatre débits d'air d'essai – 85, 135, 270 et 360 litres/min (Figures A-1 à A-4). Le rapport de corrélation (R) se définit comme suit :

$$R = \frac{\textit{Concentration numérique de particules en aval}}{\textit{Concentration numérique de particules en amont}}$$

L'analyse des données obtenues a révélé un écart relativement normal entre la concentration en amont et en aval, à débit aussi bien constant que cyclique, ce qui satisfait aux exigences à jour de la norme d'essai 52.2 de l'ASHRAE (2007). À un débit constant, les valeurs maximale et minimale de R étaient de 1,1 et 0,92, respectivement.

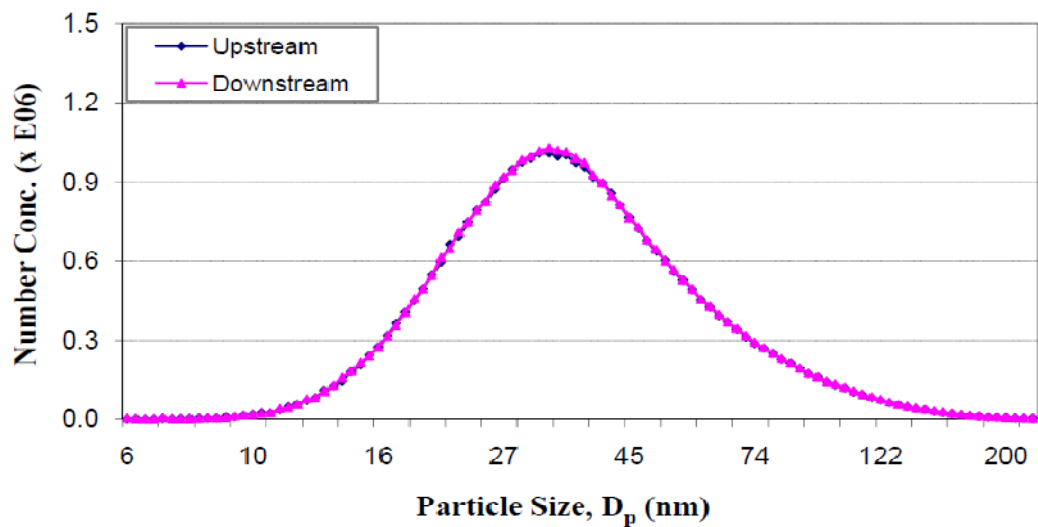


Figure A-1 : Pénétration sans filtre à un débit d'air de 85 litres/min.

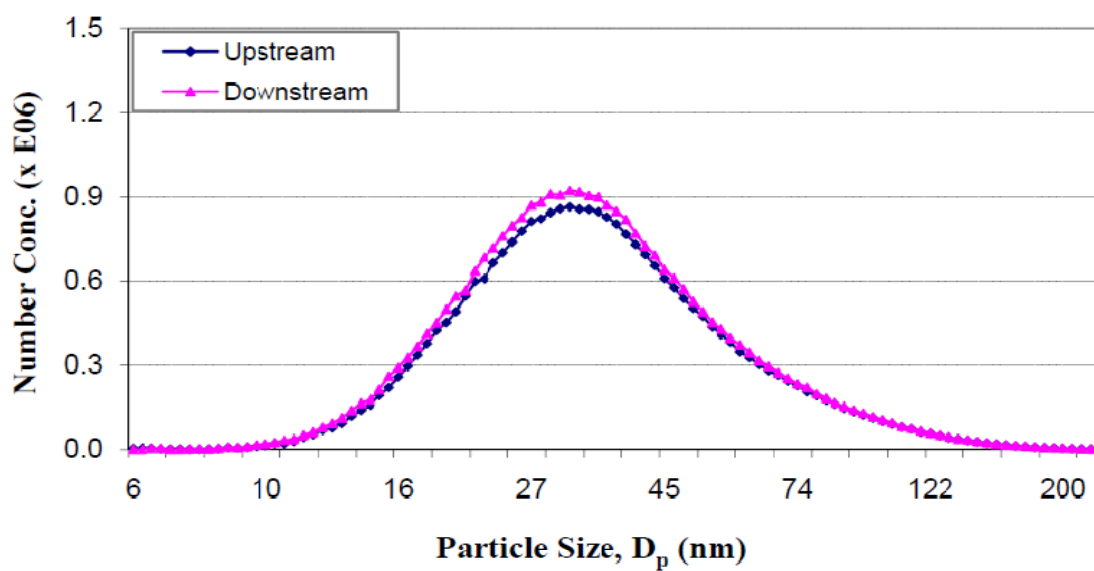


Figure A-2 : Pénétration sans filtre à un débit d'air de 135 litres/min.

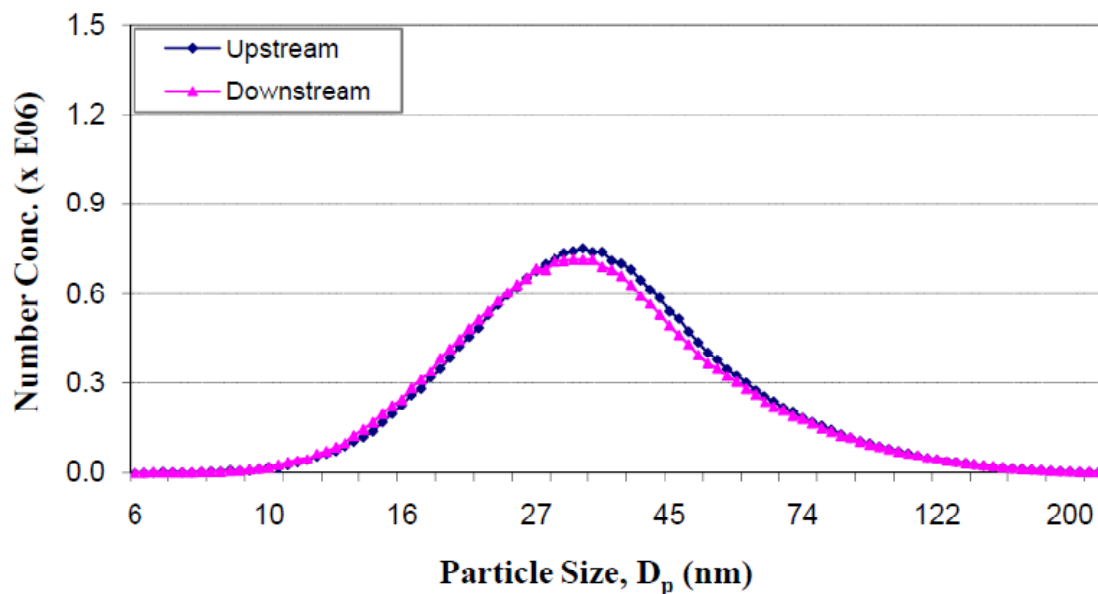


Figure A-3 : Pénétration sans filtre à un débit d'air de 270 litres/min.

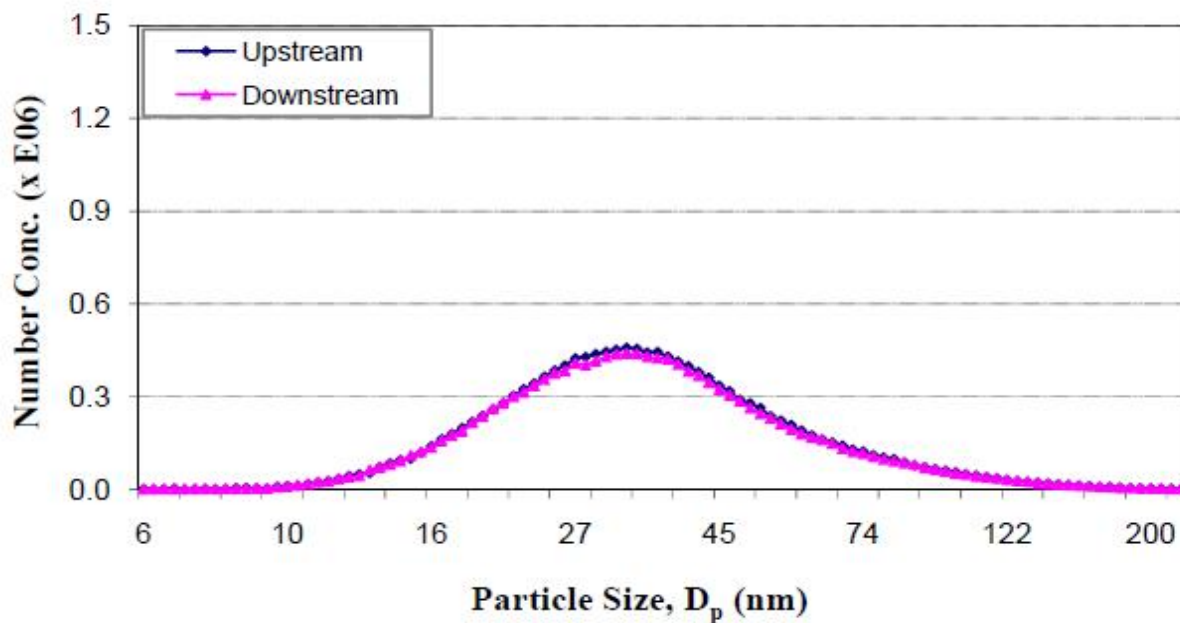


Figure A-4 : Pénétration sans filtre à un débit d'air de 360 litres/min.

Essais d'uniformité de la dispersion des particules en amont

Pour vérifier l'uniformité de la dispersion des particules, le coefficient de variation (CV) de l'uniformité de l'aérosol a été calculé à cinq points d'échantillonnage en amont (à droite en haut, à droite en bas, à gauche en haut, à gauche en bas et au centre (Figure A-5). Selon l'ASHRAE, le coefficient de variation doit satisfaire aux exigences énoncées dans la norme d'essai 52.2 (2007) – $CV < 15\%$ pour chaque débit d'air d'essai –, et indiquer une dispersion suffisante et uniforme dans la chambre d'essai.

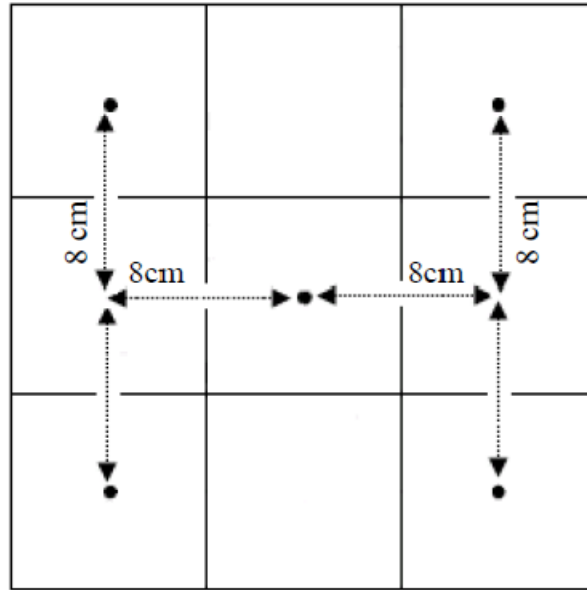


Figure A-5 : Points d'échantillonnage lors des essais d'uniformité

Selon l'analyse des données granulométriques pour des particules de 6 nm à 200 nm, les CV moyens étaient de 4,3 %, 4,8 %, 2,8 % et 5,2 % à des débits d'air de 85, 135, 270 et 360 litres/min, respectivement (Figures A-6 à A-9). Le Tableau A-1 résume en outre les coefficients de variation minimal, maximal et moyen observés pour chaque débit d'air.

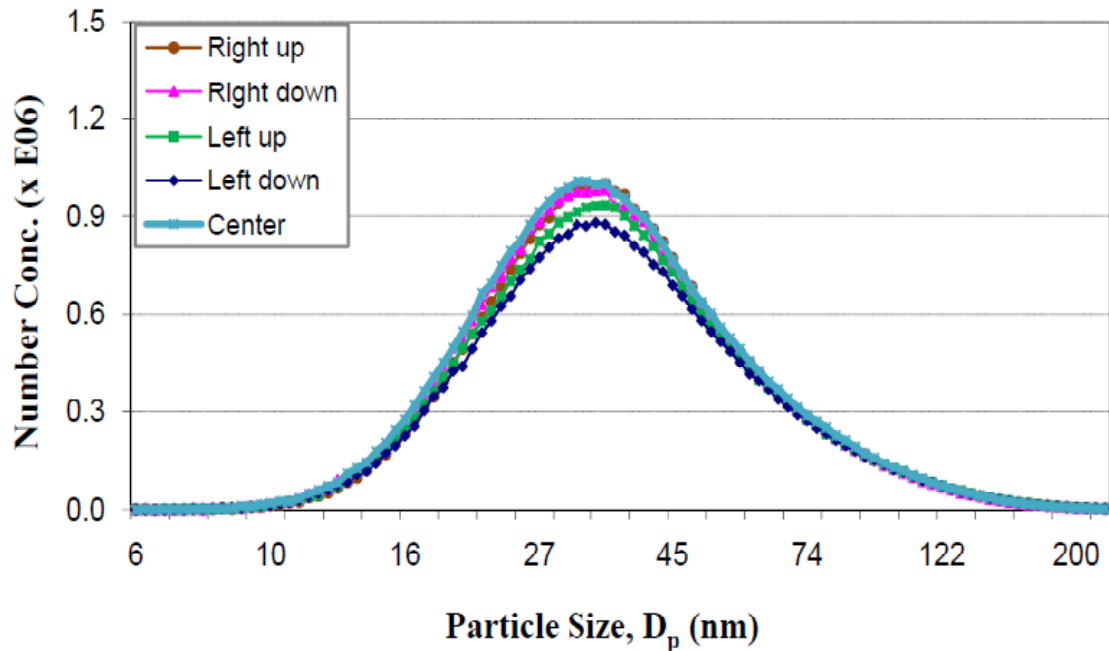


Figure A-6 : Distribution granulométrique des particules à cinq points d'échantillonnage en amont à un débit d'air de 85 litres/min

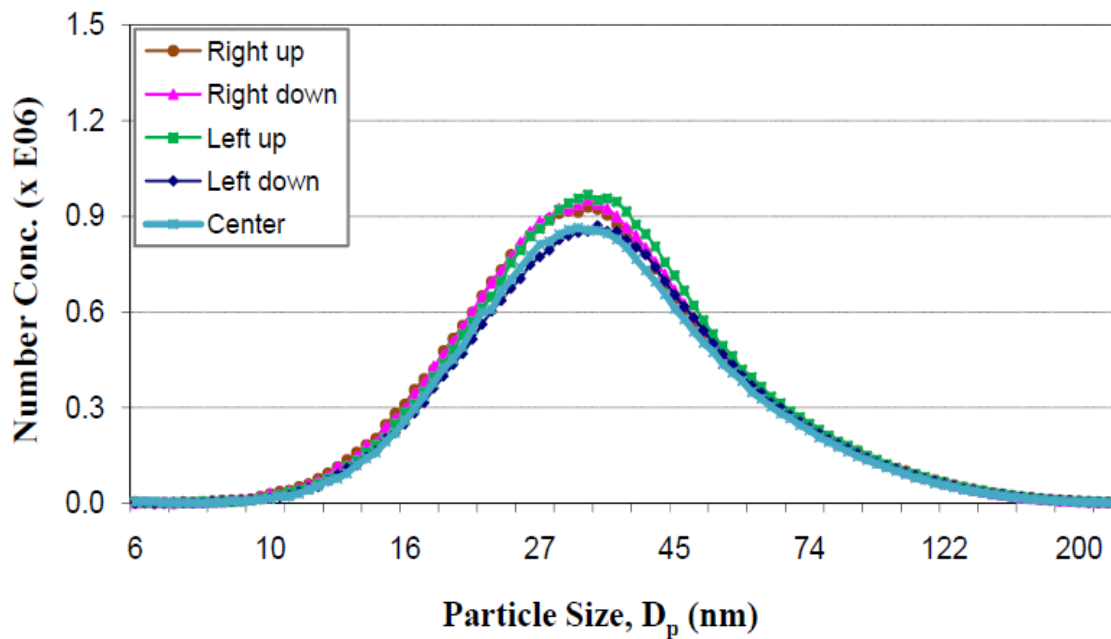


Figure A-7 : Distribution granulométrique des particules à cinq points d'échantillonnage en amont à un débit d'air de 135 litres/min

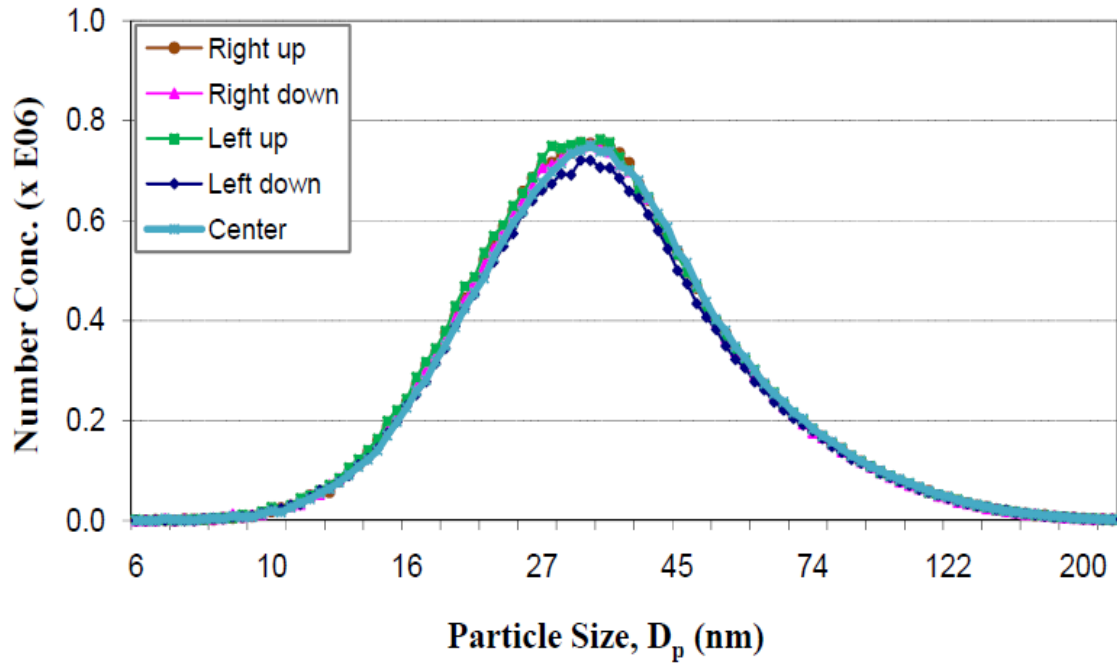


Figure A-8 : Distribution granulométrique des particules à cinq points d'échantillonnage en amont à un débit d'air de 270 litres/min

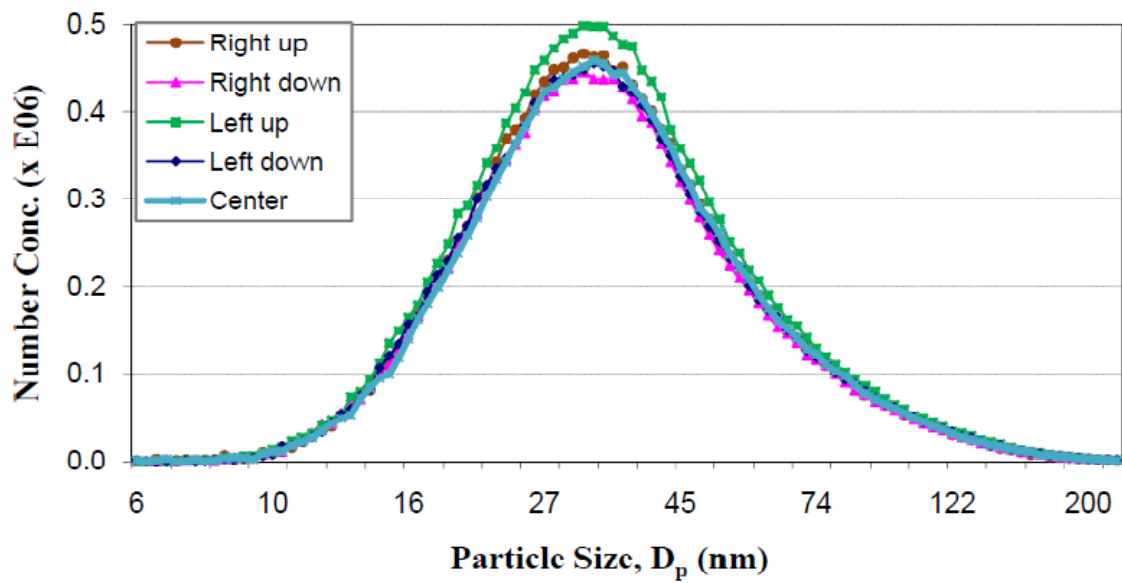


Figure A-9 : Distribution granulométrique des particules à cinq points d'échantillonnage en amont à un débit d'air de 360 litres/min

Tableau A-1 : Sommaire des coefficients de variation de l'uniformité de l'aérosol

Débit d'air (litres/min)	Coefficient de variation (%)		
	Minimal	Maximal	Moyen
85	1,9	7,9	4,3
135	2,7	9,8	4,8
270	0,6	5,5	2,8
360	3,3	8,8	5,2

Distribution granulométrique des particules en amont

La concentration et la distribution granulométrique des particules ont été mesurées en amont de la chambre d'essai à différents débits d'air (85, 135, 270 et 360 litres/min). Le nébuliseur Collision à six jets a été utilisé pour produire des particules de 6 nm à 200 nm – pression d'entrée réglée sur 15, 25, 30 et 35 lb/po², avec des solutions de NaCl à 0,01 %, 0,1 % et 1 % (Figures A-10 à A-12). Comme pour les essais de qualification initiaux, l'expérience a été menée sans appareil de protection respiratoire sur le mannequin. Selon les résultats obtenus, à pression d'entrée égale, la concentration en nombre des particules augmentait lorsque augmentait la concentration en sel de la solution utilisée pour générer des particules poly-disperses, et ce, pour toutes les tailles de particules. La distribution granulométrique a par ailleurs révélé un déplacement vers les particules de plus grande taille lorsque augmentait la concentration en NaCl de la solution utilisée.

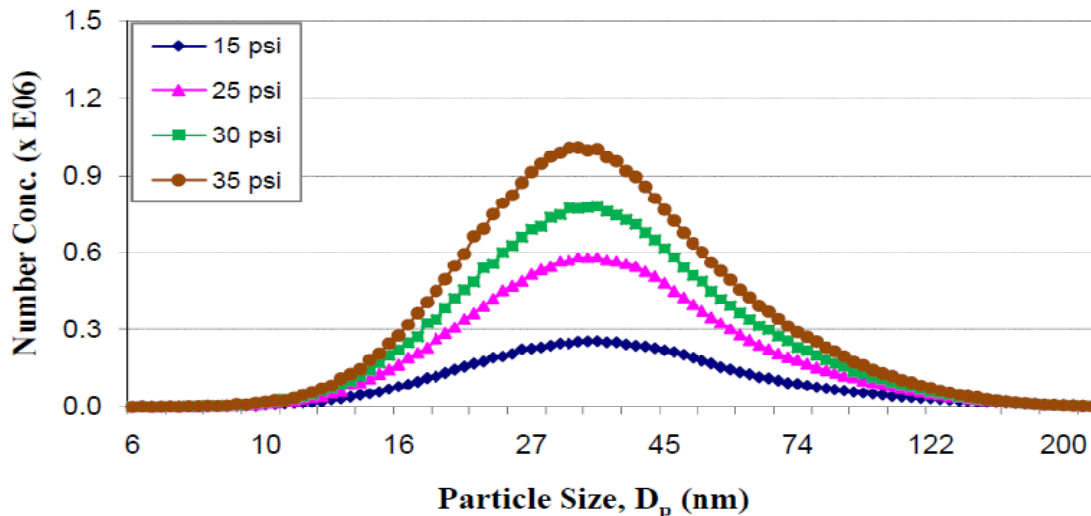


Figure A-10 : Concentration des particules en fonction de la taille des particules à différentes pressions d'entrée (débit d'air de 85 litres/min et solution de NaCl à 0,01 %)

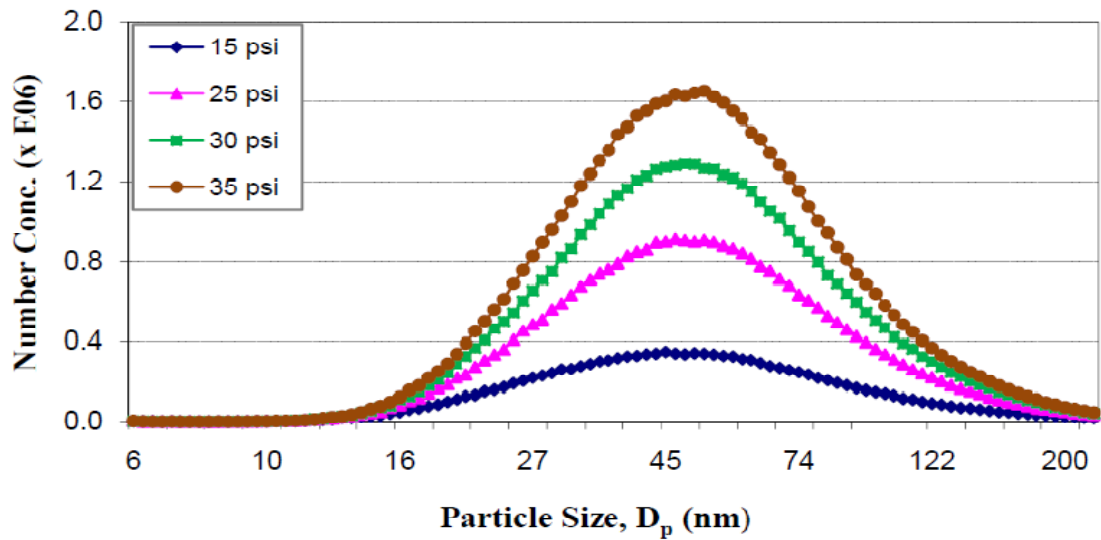


Figure A-11 : Concentration des particules en fonction de la taille des particules à différentes pressions d'entrée (débit d'air de 85 litres/min et solution de NaCl à 0,1 %)

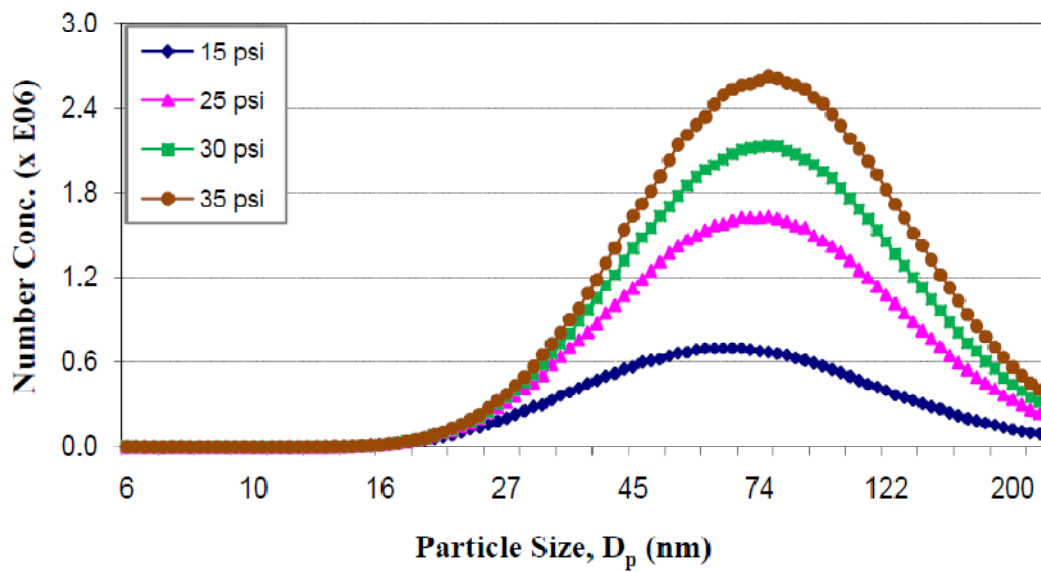


Figure A-12 : Concentration des particules en fonction de la taille des particules à différentes pressions d'entrée (débit d'air de 85 litres/min et solution de NaCl à 1 %)

Essais de stabilisation

Des essais de stabilisation ont été effectués à quatre débits d'air constants (85, 135, 270 et 360 litres/min) afin de déterminer l'intervalle de temps requis pour que la concentration des particules atteigne un état stable. Le nébuliseur Collision à six jets a été réglé sur une pression d'entrée de 35 lb/po² pour générer des particules poly-disperses avec une solution de NaCl à 0,01 %.

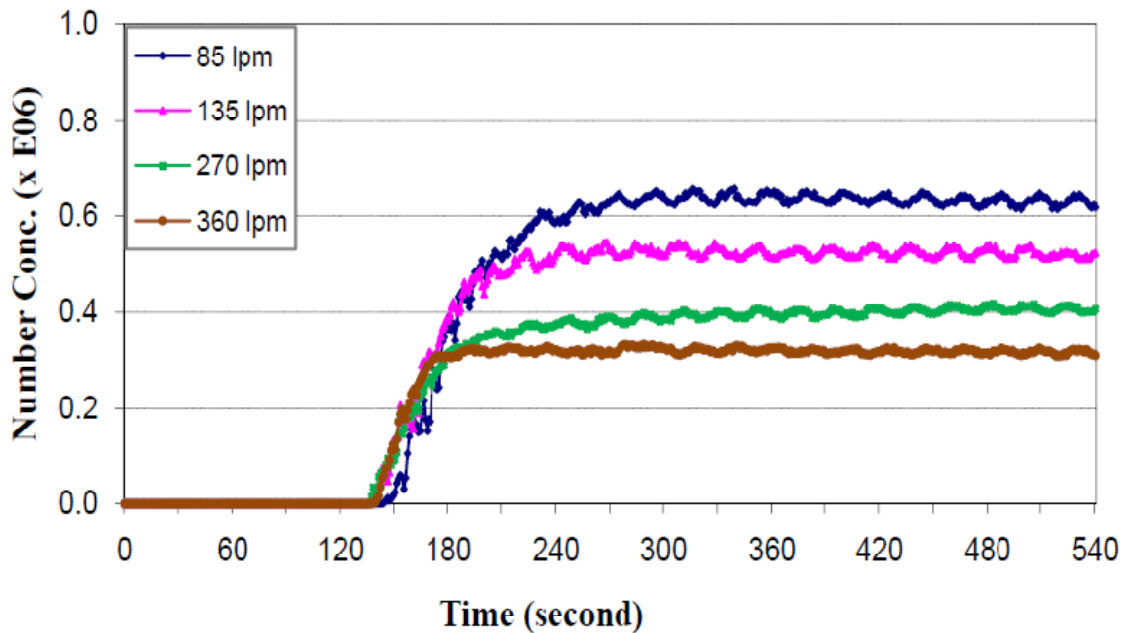


Figure A-13 : Concentration en nombre des particules (particules/cm³) pendant la mise en marche du dispositif expérimental à différents débits d'air, avec une solution de NaCl à 0,01 %.

En outre, comme l'indique la Figure A-13, de petites fluctuations de la concentration en nombre des particules ont été observées même après la période de stabilisation. Ces fluctuations sont survenues de façon cyclique à intervalles d'environ 20 secondes. Aucune explication n'a été trouvée à l'égard de ce phénomène. Le Tableau A-2 résume les résultats des essais de stabilisation à quatre débits d'air différents.

Tableau A-2 : Sommaire des résultats des essais de stabilisation

Débit d'air (litres/min)	Temps de stabilisation (min)	Concentration des particules (x E06 particules/cm ³)
85	1,95	0,63 ± 0,01
135	1,35	0,54 ± 0,01
270	0,82	0,40 ± 0,02
360	0,57	0,32 ± 0,06

ANNEXE B : INSTRUMENTS DE MESURE DES NANOPARTICULES

Diverses techniques de mesure ont été développées pour déterminer les caractéristiques des NP. Ces techniques de mesure portent notamment sur la concentration massique, la concentration en nombre et la distribution granulométrique. Comme mentionné précédemment, l'analyseur de mobilité électrique à balayage (SMPS) a été utilisé dans le cadre de cette étude pour mesurer la concentration et la distribution granulométrique des particules en fonction de leur mobilité électrique (laquelle est inversement proportionnelle au diamètre des particules). Cette technique de pointe permet de mesurer des particules de 4 nm à 10 000 nm. Le SMPS consiste essentiellement en un classificateur granulométrique (classificateur électrostatique équipé d'un analyseur différentiel de mobilité électrique [DMA]) jumelé à un détecteur de particules (compteur de particules de condensation [CPC]). Le classificateur granulométrique classe les particules chargées en fonction de leur mobilité électrique (ou de leur diamètre de mobilité électrique). Les particules à l'intérieur d'une étroite plage de mobilité électrique peuvent sortir du DMA pour ensuite être comptées par le CPC.

Classificateur granulométrique de particules

La Figure B-1 présente le schéma du classificateur électrostatique équipé d'un long DMA (modèle 3081, TSI Inc.). Dans cet appareil, le flux d'aérosol est d'abord acheminé à travers un chargeur bipolaire radioactif à l'intérieur du classificateur électrostatique avant d'entrer dans le DMA, de manière à doter les aérosols d'une charge bipolaire équilibrée. Les particules sont ensuite sélectionnées par le DMA en fonction de leur mobilité électrique.

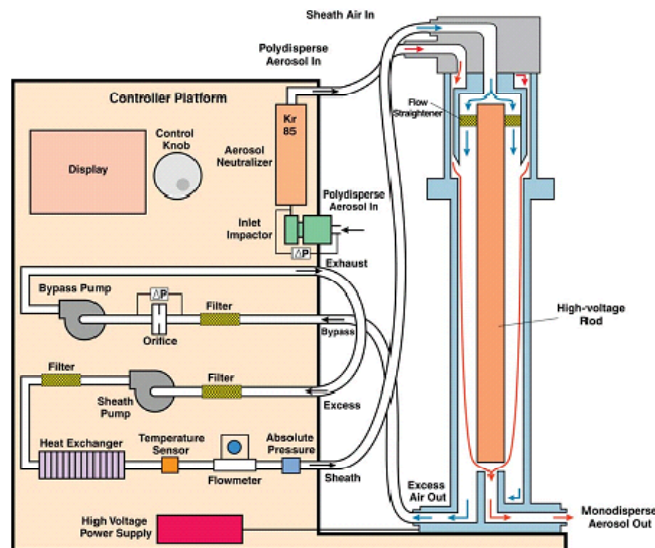


Figure B-1 : Schéma du classificateur électrostatique équipé d'un long DMA, modèle 3081. Adapté de TSI Inc., 2005.

Comme l'indique la Figure B-1, le DMA comporte un cylindre extérieur mis à la terre et une électrode interne cylindrique reliée à une alimentation négative (0 à 10 kV – CC). Le champ électrique entre les deux cylindres concentriques sépare les particules en fonction de leur mobilité électrique (laquelle est inversement proportionnelle à la taille des particules). Les particules ayant une charge négative se déposent sur la paroi externe, tandis que les particules ayant une charge positive se déplacent rapidement vers l'électrode centrale à charge négative. Seules les particules de la taille voulue à l'intérieur d'une étroite plage de mobilité électrique empruntent la bonne trajectoire pour sortir du DMA. La mobilité électrique de ces particules est influencée par divers facteurs, notamment le débit d'écoulement, les paramètres géométriques et la tension de l'électrode centrale. Les particules de la taille choisie qui sortent du DMA sont ensuite comptées par le CPC.

Les distributions granulométriques de particules sont mesurées en modifiant la tension entre les électrodes cylindriques intérieure et extérieure du DMA, ce qui a pour effet de modifier le champ électrique. La tension du DMA (V) est liée à la mobilité électrique (Z) et au diamètre de mobilité (d) selon l'équation suivante :

$$Z = \frac{Q \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi LV} = \frac{0,441 \left(\frac{k_B T}{M}\right)^{0,5}}{pd^2}$$

où R1 et R2 représentent le rayon des cylindres intérieur et extérieur du DMA; L, la longueur du DMA de la fente d'entrée à la fente de sortie; Q, le débit du gaz vecteur; k, la constante de Boltzmann; et T, p et M, la température, la pression et le poids moléculaire du gaz vecteur, respectivement (De la Mora et coll., 1998). Pour plus de précisions, consulter le manuel de TSI pour les classificateurs électrostatiques de série 3080.

Compteur de particules de condensation (CPC)

Le compteur de particules de condensation est normalement utilisé conjointement à un SMPS pour compter le nombre de particules dont le diamètre dépasse quelques nanomètres. La détection et le comptage des particules sont assurés par un simple capteur optique après qu'une vapeur sursaturée d'alcool butylique se soit condensée sur les particules, ce qui les fait grossir. La Figure B-2 présente le schéma d'un CPC et de ses diverses composantes en vue rapprochée.

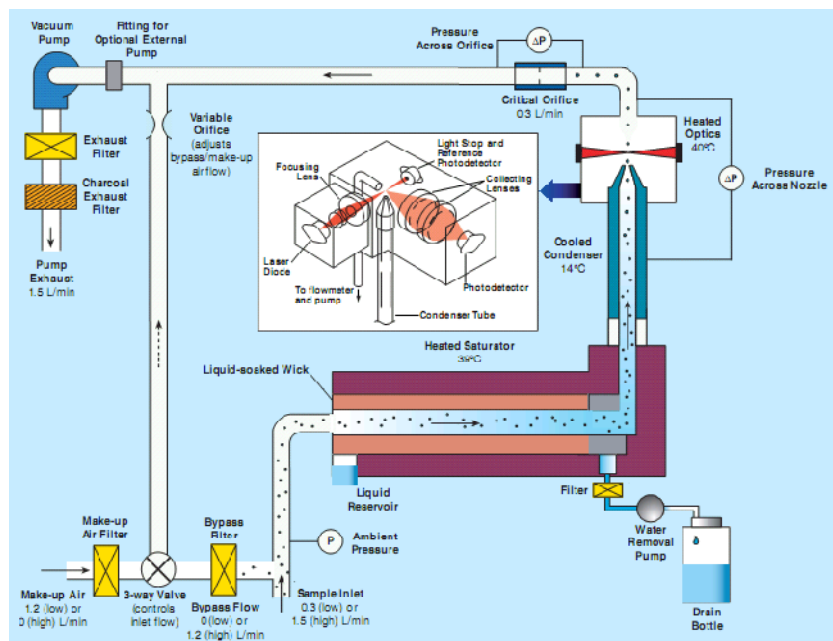


Figure B-2 : Schéma d'un compteur de particules de condensation, modèle 3775. Adapté de TSI Inc., 2005.

À l'intérieur du CPC, les particules isolées de plus de 2 nm sont grossies jusqu'à atteindre une taille micrométrique par condensation d'un fluide (eau ou alcool) amené à s'y déposer. Le CPC compte alors optiquement les particules en question. Pour plus de précisions, consulter le manuel de TSI pour le CPC, modèle 3775.

ANNEXE C : NEUTRALISEUR DE PARTICULES

La charge des particules doit être neutralisée avant qu'elles entrent dans la chambre d'essai. Cela est d'autant plus important que la charge des particules générées est considérable. De sorte à minimiser ce problème, un neutraliseur (modèle 3012A, TSI Inc.) est utilisé pour éliminer ou réduire l'éventuelle charge positive ou négative des particules (Figure C-1). En entrant dans le neutraliseur, les particules sont exposées à des ions aériens positifs et négatifs. Les ions en question sont attirés par les particules de charge opposée, ce qui a pour effet de réduire considérablement la charge éventuelle des particules.

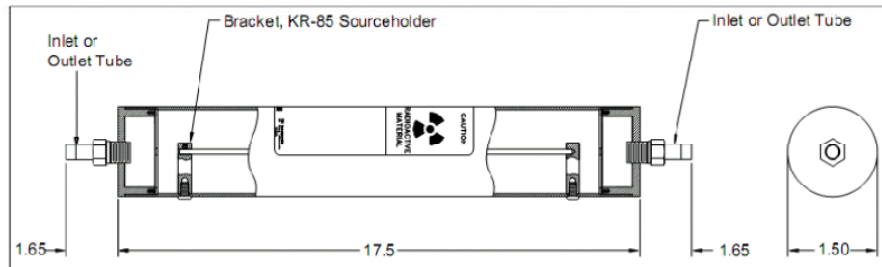


Figure C-1 : Neutraliseur d'aérosols, modèle 3012A. Adapté de TSI Inc., 2003.

En permettant un temps de séjour suffisant, l'équilibre de charge de Boltzmann sera atteint pour l'ensemble des particules. Le tableau suivant présente une approximation de la distribution des charges des particules de taille nanométrique, comme établie par Wiedensohler (1998) (Tableau C-1). En dépit de la neutralisation des particules, certaines d'entre elles ont toujours une charge, laquelle gagne en importance avec la taille des particules. Notez que le modèle de neutraliseur d'aérosols 3012A utilise une source radioactive (10 mg de Kr-85) pour produire des ions aériens positifs et négatifs.

Tableau C-1 : Distribution des charges d'aérosol selon les formules de Gunn (Wiedensohler, 1998)

$D_p(\mu\text{m})$	Pourcentage des particules portant N_p unités de charge élémentaire												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
0,01						5,14	90,75	4,11					
0,02					0,02	10,96	80,57	8,64	0,01				
0,04					0,54	19,50	64,79	14,86	0,31				
0,06				0,02	1,92	24,32	54,13	18,51	1,09	0,01			
0,08				0,11	3,72	26,81	46,73	20,46	2,10	0,05			
0,10				0,37	5,63	27,31	42,28	20,91	3,30	0,17			
0,20		0,05	0,53	3,40	12,38	25,49	29,66	19,51	7,26	1,53	0,18	0,01	
0,40	0,27	1,14	3,60	8,54	15,24	20,46	20,65	15,66	8,93	3,83	1,24	0,03	0,05
0,60	1,21	3,00	6,19	10,53	14,82	17,25	16,60	13,20	8,69	4,73	2,13	0,79	0,24
0,80	2,42	4,64	7,71	11,12	13,90	15,06	14,15	11,53	8,15	4,99	2,65	1,22	0,49
1,00	3,56	5,84	8,53	11,13	12,96	13,45	12,46	10,30	7,59	5,00	2,93	1,54	0,92