

**Développement d'une procédure
d'évaluation de la performance
de filtres de ventilation
pour des particules de taille
inférieure à 300 nm, incluant
les nanoparticules**

Clothilde Brochot
Pooya Abdolghader
Fariborz Haghigat
Ali Bahloul

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1107

NOS RECHERCHES travaillent pour vous

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.

Mission

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

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

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

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

Pour en savoir plus

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

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2020
ISBN : 978-2-89797-131-1
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail
Octobre 2020

Développement d'une procédure d'évaluation de la performance de filtres de ventilation pour des particules de taille inférieure à 300 nm, incluant les nanoparticules

Clothilde Brochot^{1,2}, Pooya Abdolghader²,
Fariborz Haghighat², Ali Bahloul^{1,2}

¹ IRSST

² Université Concordia

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1107



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.

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



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

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

REMERCIEMENTS

Ce projet constitue le premier jalon d'une entente de collaboration conclue entre l'Université Concordia et l'IRSST sur l'utilisation conjointe d'une plateforme de recherche sur la filtration des particules et des gaz. Les auteurs tiennent à remercier les différents services de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et de l'Université Concordia qui ont contribué à la mise en place du laboratoire sur la filtration des particules, où a été réalisée cette étude.

Nous aimerions aussi exprimer notre gratitude envers messieurs Christian Sirard et Pierre Drouin de l'IRSST, ainsi que Joseph Hrib et Luc Demers de l'Université Concordia, pour leur soutien technique au cours de la réalisation de ce projet.

SOMMAIRE

La filtration est un moyen simple et efficace pour capter des particules de différentes tailles. C'est un des outils utilisés dans le domaine de la santé et la sécurité au travail pour maîtriser l'exposition aux particules ultrafines et aux nanoparticules, tant dans des zones de travail restreintes ou ponctuelles, que dans les systèmes de ventilation générale ou spécifique. La norme actuelle, dans le cas de la ventilation générale, limite l'évaluation de l'efficacité de filtration à des particules dont la taille est comprise entre 0,3 et 10,0 μm . Même si la taille des particules les plus pénétrantes dans le cas de filtres (et *media*) purement mécaniques et à faible vitesse de filtration est communément admise à 300 nm, la littérature parle plutôt d'une gamme de tailles allant de 100 nm à 300 nm.

L'état des connaissances actuelles ayant montré que la performance des filtres dans leur ensemble en fonction de la taille des nanoparticules est encore très limitée, l'objectif principal de ce projet a donc été de développer une procédure de mesure pour évaluer la performance des filtres utilisés dans les systèmes de ventilation pour la filtration des particules de taille inférieure à 300 nm incluant les particules ultrafines (PUF). L'originalité du travail effectué repose sur l'obtention de mesures d'efficacité reproductibles en fonction de la taille pour des particules inférieures à 300 nm. Pour cela, un banc d'essai a été conçu et validé, puis une procédure de mesure a été développée afin de connaître la performance de filtres mécaniques.

La procédure de mesure a été validée par comparaison des mesures de pénétration sur deux bancs de tests et pour des particules nanométriques. Trois filtres différents ont été utilisés pour cette comparaison : un filtre classé MERV 8, un classé MERV 14 et un dernier classé HEPA. Ces trois filtres permettent d'illustrer la gamme de pénétration pouvant être mesurée sur les bancs de tests.

Les mesures de performance (pénétration et perte de charge) de cinq filtres ont ensuite été obtenues. Les résultats sont en adéquation avec la théorie classique de filtration pour les *media* mécaniques et avec les mesures expérimentales précédentes sur les *media* et les filtres. Les données présentées dans ce rapport montrent que la plage de 150 – 500 nm permet de donner une meilleure estimation de la taille des particules les plus pénétrantes, contrairement à la taille fixe de 300 nm.

Ce projet fait partie de l'entente entre l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail et l'Université Concordia pour la mise en place d'une plateforme de recherche sur la filtration des particules et des gaz. Il constitue donc la première étape dans la création du laboratoire sur la filtration des particules, situé à l'Université Concordia.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Les filtres	1
1.2 Efficacité de filtration.....	2
1.3 La perte de charge du filtre	4
1.4 Contexte normatif : ANSI/ASHRAE 52.2.....	5
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	9
2.1 Filtration expérimentale par les <i>media</i>	9
2.1.1 Filtration expérimentale – Efficacité initiale des media mécaniques.....	9
2.1.2 Filtration expérimentale – Efficacité initiale des media chargés électrostatiquement	15
2.1.3 Filtration expérimentale – Évolution temporelle de l'efficacité	19
2.2 Filtration expérimentale par les filtres dans leur ensemble.....	20
2.3 Conclusion.....	26
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	27
4. MÉTHODOLOGIE	29
4.1 Banc d'étude des paramètres – Banc <i>Small Filter</i>	29
4.1.1 Description du banc.....	29
4.1.2 Qualification du banc.....	31
4.1.3 Méthodologie de mesure	36
4.2 Banc d'inspiration ASHRAE – Banc <i>Big Loop</i>	37
4.2.1 Description du banc.....	37
4.2.2 Modification de l'installation pour une utilisation avec des aérosols nanométriques.....	38
4.2.3 Qualification du banc.....	39
4.2.4 Méthodologie de mesure	44
4.3 Filtres sélectionnés pour les tests	45
5. RÉSULTATS	47

5.1	Validation par comparaison des taux de pénétration mesurés sur les deux bancs de test	47
5.1.1	Pertinence de la comparaison	47
5.1.2	Données de pénétration en fonction de la taille des particules	49
5.1.3	Comparaison des taux de pénétration des cinq filtres sur les deux bancs de test.....	50
5.1.4	Discussion et analyse.....	53
5.2	Étude de la performance des filtres testés	54
5.2.1	Mesures des pertes de charge	54
5.2.2	Mesure de l'efficacité à la MPPS	57
5.3	Étude paramétrique – Effet de la vitesse.....	59
5.3.1	Effet de la vitesse à la MPPS	59
5.3.2	Effet de la vitesse à 50 nm	60
6.	CONCLUSION.....	63
	BIBLIOGRAPHIE	65
	ANNEXE A : Instrumentation pour la mesure granulométrique	69
	ANNEXE B : Spectres de pénétration Du filtre 1.....	73
B.I	Spectres de pénétration obtenus avec le banc <i>Small Filter</i>	73
B.II	Spectres de pénétration obtenus avec le banc <i>Big Loop</i>	75
	ANNEXE C : Spectres de pénétration Du filtre 2.....	77
C.I	Spectres de pénétration obtenus avec le banc <i>Small Filter</i>	77
C.II	Spectres de pénétration obtenus avec le banc <i>Big Loop</i>	79
	ANNEXE D : Spectres de pénétration Du filtre 3.....	81
D.I	Spectres de pénétration obtenus avec le banc <i>Small Filter</i>	81
D.II	Spectres de pénétration obtenus avec le banc <i>Big Loop</i>	83
	ANNEXE E : Spectres de pénétration Du filtre 4.....	85
E.I	Spectres de pénétration obtenus avec le banc <i>Small Filter</i>	85
E.II	Spectres de pénétration obtenus avec le banc <i>Big Loop</i>	86
	ANNEXE F : Spectres de pénétration Du filtre 5	87
F.I	Spectre de pénétration obtenu avec le banc <i>Small Filter</i>	87
F.II	Mesures globales du taux de pénétration en fonction de la vitesse de mesure	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Paramètres de classification (norme ASHRAE 52.2, 2017).....	6
Tableau 2.	Filtration des nanoparticules par les <i>media</i> mécaniques – Études expérimentales (études non exhaustives)	11
Tableau 3.	Filtration des nanoparticules par les <i>media</i> chargés électrostatiquement – Études expérimentales (études non exhaustives)	16
Tableau 4.	Filtration des nanoparticules par les filtres dans leur ensemble – Études expérimentales	21
Tableau 5.	Paramètre du contrôleur du ventilateur en fonction de la vitesse de test sélectionnée.....	33
Tableau 6.	Coefficient de variation (%) calculé pour les deux générations évaluées sur le banc de test <i>Small Filter</i>	36
Tableau 7.	Mesures du bruit de fond du banc de test <i>Big Loop</i>	39
Tableau 8.	Coefficient de variation (%) calculé pour les deux générations d'aérosols évaluées sur le banc de test <i>Big Loop</i>	44
Tableau 9.	Caractéristiques des filtres testés (informations du fabricant).....	46
Tableau 10.	Vitesses de filtration calculées en fonction des filtres évalués et pour les deux bancs de test.....	48
Tableau 11.	Coefficient de Pearson calculé pour chacun des quatre filtres testés.....	53
Tableau 12.	Gamme MPPS selon les filtres testés	58

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Exemple de représentation de l'efficacité de collecte d'un <i>medium</i> en fonction de la dimension des particules et des différents régimes de filtration.	4
Figure 2.	Efficacité de collecte mesurée pour neuf filtres (MERV 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16; d'après les données de Hecker et Hofacre, 2008).	24
Figure 3.	a) Photo et b) schéma du banc de test <i>Small Filter</i>	29
Figure 4.	Points de fonctionnement du ventilateur PANDA de TSI.	30
Figure 5.	Grille de positionnement des neuf points de mesure pour l'uniformité des vitesses de mesure et de la dispersion des aérosols (conformément à la norme ASHRAE 52.2) sur le banc de test <i>Small Filter</i>	31
Figure 6.	Moyenne des tests d'homogénéité des vitesses (en m/s) en fonction de la position dans la section (a) et selon les trois configurations (b, c et d) sur le banc de test <i>Small Filter</i>	32
Figure 7.	Mesure de la vitesse en fonction du débit PANDA pour le banc de test <i>Small Filter</i> , avec régression linéaire.	33
Figure 8.	Distribution des aérosols générés, concentration totale (au centre de la section) et distribution des aérosols aux neuf points de la section pour le ventilateur en position G (a et b), en position H (c et d) et en position I (e et f).	35
Figure 9.	Photo du banc de test ASHRAE.	38
Figure 10.	Schéma du banc de test <i>Big Loop</i>	39
Figure 11.	Grille de positionnement des neuf points de mesure pour l'uniformité des vitesses de mesure et la dispersion des aérosols (conformément à la norme ASHRAE 52.2), sur le banc de test <i>Big Loop</i>	40
Figure 12.	Moyenne des tests d'homogénéité des vitesses (en m/s) en fonction de la position dans la section (a) et selon les trois configurations (b, c et d), sur le banc <i>Big Loop</i>	41
Figure 13.	Mesure de la vitesse en fonction de la fréquence du moteur pour le banc de test <i>Big Loop</i> – régression linéaire.	42
Figure 14.	Distribution des aérosols générés et concentration totale au centre de la section de test, aux vitesses de mesure de a) 0,75 m/s (33 Hz) et b) 1,00 m/s (44 Hz) sur le banc <i>Big Loop</i>	43
Figure 15.	Distribution des aérosols générés aux neuf points de la section de test, aux vitesses de mesure de a) 0,75 m/s (33 Hz) et b) 1,00 m/s (44 Hz) sur le banc <i>Big Loop</i>	43
Figure 16.	Taux de pénétration pour les quatre premiers filtres d'épaisseur 4 po et à 1,00 m/s a) sur le banc <i>Small Filter</i> et b) sur le banc <i>Big Loop</i> , puis à 0,75 m/s c) sur le banc <i>Small Filter</i> et d) sur le banc <i>Big Loop</i>	49

Figure 17.	Comparaison des taux de pénétration mesurés sur les deux bancs de test pour le a) filtre 1, b) filtre 2, c) filtre 3 et d) filtre 4.	51
Figure 18.	Comparaison des taux de pénétration globaux mesurés sur les deux bancs de test pour le filtre 5.	52
Figure 19.	Comparaison des taux de pénétration sur les deux bancs de test, pour les filtres 1, 4 et 5.	54
Figure 20.	Comparaison des pertes de charge mesurées sur les deux bancs de test : a) pour les cinq filtres testés et b) zoom sur les filtres 1 à 3.	55
Figure 21.	Perte de charge moyenne pour a) le filtre 1, b) le filtre 2, c) le filtre 3 et d) les filtres 4 et 5, sur les deux bancs de test, en fonction de la vitesse de filtration.	57
Figure 22.	Comparaison du taux de pénétration maximal avec le taux de pénétration à un diamètre équivalent en mobilité électrique de 294,3 nm, selon la vitesse de mesure.	59
Figure 23.	Taux de pénétration maximal mesuré en fonction de la vitesse de filtration pour le a) filtre 1, b) filtre 2, c) filtre 3 et d) filtre 4.	60
Figure 24.	Effet de la vitesse de filtration sur le taux de pénétration des particules de 50 nm et pour le a) filtre 1, b) filtre 2, c) filtre 3 et d) filtre 4.	61
Figure 25.	Effet de la vitesse de filtration sur le taux de pénétration de la génération globale centrée à 50 nm, pour le filtre 5.	62
Figure 26.	Instrumentation pour la mesure granulométrique.	69
Figure 27	Schéma de fonctionnement de l'instrumentation pour la mesure de la granulométrie (documentation TSI).	70
Figure 28.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	73
Figure 29.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	74
Figure 30.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	74
Figure 31.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	75
Figure 32.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	75

Figure 33.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	76
Figure 34.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	77
Figure 35.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	78
Figure 36.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	78
Figure 37.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	79
Figure 38.	a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	79
Figure 39.	a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	80
Figure 40.	a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	81
Figure 41.	a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	82
Figure 42.	a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Small Filter</i>	82
Figure 43.	a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	83
Figure 44.	a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	83
Figure 45.	a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc <i>Big Loop</i>	84
Figure 46.	Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules et comparaison du taux de pénétration sur deux tests pour le filtre 4.....	85

Figure 47.	Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules (gauche) et comparaison du taux de pénétration sur deux tests pour le filtre 4 (droite).....	86
Figure 48.	Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 5, mesuré sur le banc <i>Small Filter</i>	87
Figure 49.	a) Taux de pénétration global en fonction de la vitesse de mesure et vérification de la stabilité de l'aérosol généré en fonction de la vitesse de mesure b) pour le banc <i>Small Filter</i> et c) pour le banc <i>Big Loop</i>	88

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Abréviations

Ag :	Argent
Al ₂ O ₃ :	Oxyde d'aluminium
²⁴¹ Am :	Américium 241
ANSI :	Institut national de normalisation américain (<i>American National Standards Institute</i>)
ASHRAE :	Organisation américaine sur le chauffage, la ventilation, l'air conditionné et la production de froid (<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>)
ASME :	Organisation américaine sur l'ingénierie mécanique (<i>American Society of Mechanical Engineers</i>)
C :	Carbone
Cu :	Cuivre
CEN :	Comité européen de normalisation
CNC :	Compteur à noyau de condensation (<i>Condensation Nucleus Counter</i>)
CPC :	Compteur de particules par condensation (<i>Condensation Particle Counter</i>)
CV :	Coefficient de variation
DEHS :	Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat
DOP :	Dioctyl Phthalate
DMA :	Analyseur différentiel de mobilité électrique (<i>Differential Mobility Analyzer</i>)
EN :	Norme européenne (<i>European Normalization</i>)
GSD :	Déviations géométriques standard (<i>Geometric Standard Deviation</i>)
HEPA :	Filtre à air à très haute efficacité (<i>High Efficiency Particulate Air</i>)
HVAC :	Chauffage, ventilation et climatisation (<i>Heating, Ventilation and Air-Conditioning</i>)
INRS :	Institut National de Recherche et de Sécurité (France)
ISO :	Organisation internationale de normalisation (<i>International Organization for Standardization</i>)
KCl :	Chlorure de potassium

^{85}Kr :	Krypton 85
MERV :	Valeur minimale d'efficacité reportée (<i>Minimum Efficiency Reporting Value</i>)
MPPS :	Taille des particules les plus pénétrantes (<i>Most Penetrating Particle Size</i>)
NaCl :	Chlorure de sodium
MgO :	Oxyde de magnésium
NP :	Nanoparticules
PF :	Particules fines
PFF :	Pièce faciale filtrante
PM1 :	Particules en suspension dans l'air (<i>Particulate Matter</i>) dont le diamètre est inférieur à 1 micromètre
PM2,5 :	Particules en suspension dans l'air (<i>Particulate Matter</i>) dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres
PM10 :	Particules en suspension dans l'air (<i>Particulate Matter</i>) dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres
^{210}Po :	Polonium 210
PSL :	Billes de polystyrène, ou particules de latex (<i>Polystyrene latex</i>)
PUF :	Particules ultrafines
SMPS :	Granulomètre par balayage de mobilité électrique des particules (<i>Scanning Mobility Particle Sizer</i>)
SST :	Santé et Sécurité au Travail
THE :	Très haute efficacité
UCPC :	Compteur de particules ultrafines par condensation (<i>Ultrafine Condensation Particle Counter</i>)
ULPA :	Filtres à air à très faible pénétration (<i>Ultra Low Particulate Air</i>)

Lettres latines

A :	Arrestance	%
B :	Paramètre de structure du filtre	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$
C :	Paramètre de structure du filtre	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
C_{amont} :	Concentration du contaminant en amont de l'élément considéré	$\text{part.}/\text{cm}^3$
C_{aval} :	Concentration du contaminant en aval de l'élément considéré	$\text{part.}/\text{cm}^3$
d_f :	Diamètre des fibres d'un <i>medium</i>	m
$d_{f \text{ effectif}}$:	Diamètre effectif des fibres d'un <i>medium</i> (diamètre aéraulique)	m
d_p :	Diamètre des particules	m
E :	Efficacité de l'élément considéré	
$E1$:	Efficacité dans la gamme 0,3-1,0 μm selon la norme ASHRAE 52.2 (2017)	%
$E2$:	Efficacité dans la gamme 1,0-3,0 μm selon la norme ASHRAE 52.2 (2017)	%
$E3$:	Efficacité dans la gamme 3,0-10,0 μm selon la norme ASHRAE 52.2 (2017)	%
g :	Grammage du <i>medium</i>	kg/m^3
P :	Pénétration de l'élément considéré	
p_{amont} :	Pression en amont de l'élément étudié	mbar
p_{aval} :	Pression en aval de l'élément étudié	mbar
Q :	Densité linéique de charge	C/m
v_f :	Vitesse de filtration	m/s
Z :	Épaisseur du <i>medium</i>	m

Lettres grecques

α :	Compacité du <i>medium</i>	
Δp :	Perte de charge	mbar
λ :	Densité surfacique de charge	C/m^2
η :	Efficacité de collecte totale d'une fibre	

1. INTRODUCTION

Des mesures de la qualité de l'air en milieu de travail ont permis d'observer une présence croissante dans l'air ambiant des particules ultrafines. Ces dernières sont dues à une utilisation croissante des nanoparticules dans l'industrie (nanotechnologies) et à des émissions de poussière lors des procédés de fabrication. Les milieux concernés prennent conscience que la toxicité de ces particules, dont le diamètre est inférieur à 100 nm, est plus importante que ce qui était anticipé antérieurement. Le marché mondial des particules nanométriques manufacturées représentait déjà plus de 200 milliards de dollars en 2009 (Ostiguy *et al.*, 2010). De plus, les particules ultrafines (PUF) générées par des procédés de fabrication ou différentes activités humaines se retrouvent dans l'air intérieur de multiples milieux de travail, incluant la majorité des milieux industriels. De plus en plus de travailleurs sont donc susceptibles d'être exposés aux particules nanométriques potentiellement dangereuses ou nuisibles pour leur santé.

Les particules ultrafines présentent une surface spécifique très élevée et de multiples études démontrent que certaines ont, à masse égale, une activité biologique accrue conduisant à une toxicité plus élevée que les particules de même composition chimique, mais de plus grande taille (Yah *et al.*, 2012; Shvedova *et al.*, 2012; Ostiguy *et al.*, 2008a, 2008b, 2010, 2014; Schulte *et al.*, 2012). Face à la problématique de l'exposition croissante aux particules nanométriques, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) (Ostiguy *et al.*, 2008a, 2008b, 2010, 2014), tout comme d'autres instituts de recherche en SST à travers le monde (Schulte *et al.*, 2012; INRS, 2012), privilégie une approche basée sur le principe de précaution à l'occasion d'une exposition aux nanoparticules en milieu de travail, lorsque l'évaluation du risque ne peut pas être quantifiée. Les émissions de ces particules nécessitent la mise en place de stratégies adaptées de maîtrise de l'exposition : le choix des moyens à implanter est basé sur une solide cueillette d'information (toxicité, niveau d'exposition, tâche, nombre de travailleurs exposés, méthodes de travail, etc.) suivie de l'évaluation du risque et du choix des mesures de prévention à mettre en place. Dans la plupart des situations, la réduction des contaminants par l'utilisation de systèmes de ventilation est la solution la plus pratique à mettre en œuvre. Elle est aussi la plus économique et surtout la plus efficace. La filtration sur *media* fibreux permet d'atteindre de très grandes efficacités en présence de particules ultrafines, ce qui en fait le procédé le plus utilisé en milieu industriel.

1.1 Les filtres

Les filtres sont largement utilisés dans un grand nombre d'industries. Dans les systèmes de ventilation, plusieurs filtres sont assemblés dans un caisson de filtration permettant une meilleure efficacité. Les *media* filtrants sont définis comme des structures poreuses composées d'un enchevêtrement de fibres (fibres de verre, de coton, de polyester, etc.) maintenues par un liant. La composition du *medium* filtrant d'un filtre à très haute efficacité (THE) est généralement à base de fibres de verre sur lesquelles des liants organiques sont ajoutés en faible concentration pour s'assurer de la rigidité de l'ensemble. En fonction de leur domaine d'application, les filtres industriels sont regroupés selon leur efficacité ou leur géométrie.

Dans ce rapport, une distinction sera faite entre les données provenant des *media* constituant le filtre et les données provenant de l'étude du filtre lui-même. Les termes de *medium* filtrant, ou *medium* plan, d'une part, et filtre, filtre entier, ou *medium* plissé, d'autre part, seront ainsi bien distincts.

La performance d'un filtre est caractérisée à l'aide de deux paramètres : son efficacité de filtration E (ou son taux de pénétration $P = 1 - E$) ainsi que sa perte de charge exprimée sous la forme d'une variation de pression statique, Δp . La valeur de ces deux paramètres est liée aux caractéristiques géométriques du *medium*, aux caractéristiques des aérosols filtrés ainsi qu'aux caractéristiques opératoires (vitesse de filtration, température, taux d'humidité).

1.2 Efficacité de filtration

L'efficacité de filtration E est donnée par l'équation (1) avec C_{aval} et C_{amont} , soit les concentrations respectives en aval et en amont du filtre, ou P le taux de pénétration du filtre.

$$E = 1 - P = 1 - \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \quad (1)$$

L'efficacité de filtration est directement liée aux quatre mécanismes physiques de capture suivants :

✓ La collecte par impaction inertielle :

L'impaction inertielle est un mécanisme entrant en jeu pour des particules de grande taille. En effet, en raison de son inertie, la particule de grande taille ne peut pas suivre la ligne de courant contournant la fibre et vient impacter la surface de cette dernière. Une particule est ainsi captée d'autant plus facilement qu'elle est lourde et que sa vitesse d'approche est grande.

✓ La collecte par interception directe :

Une particule de diamètre d_p suivant une ligne de courant est interceptée par une fibre lorsqu'elle s'approche de celle-ci à une distance inférieure à son rayon. L'efficacité de collecte est d'autant plus grande que le diamètre de la particule est grand et que le diamètre de la fibre est petit.

✓ La collecte par diffusion :

Ce type de capture est significatif pour des particules de faible diamètre. Elle représente la trajectoire aléatoire d'une particule sous l'effet de ses collisions avec les molécules du gaz environnant. Sous l'agitation brownienne, elles peuvent venir en contact avec les fibres et y adhérer.

✓ La collecte par attraction électrostatique :

Les particules ou les fibres du filtre peuvent porter des charges électriques et donc entraîner des interactions électrostatiques. Les forces électrostatiques entraînant ces interactions sont de nature différente selon le ou les porteurs de charge. Ces forces électrostatiques sont utilisées dans le cas de filtres dits électrets dont les fibres, généralement en polymère, possèdent une distribution de charges électrostatiques permettant d'améliorer l'efficacité du *medium* (du moins tant que les fibres sont chargées) sans influencer la perte de charge Δp du *medium*.

Dans le cas de la ventilation générale, les filtres sont certifiés en tant que filtres à fibres non électriquement chargées. Les mécanismes mis en jeu pour la filtration sont donc la diffusion brownienne, l'interception et l'inertie, mécanismes associés à la filtration dite « mécanique » (Figure 1).

De manière théorique et vue à l'échelle microscopique, l'efficacité d'un *medium* est définie comme l'accumulation de l'effet de collecte de chaque fibre prise indépendamment les unes des autres. L'efficacité du *medium* peut alors s'exprimer par l'équation (2), où α est la compacité du *medium*, Z son épaisseur, d_f le diamètre de ses fibres et η l'efficacité de collecte unitaire d'une fibre.

$$E = 1 - P = 1 - \exp\left(\frac{-4\alpha Z}{\pi(1-\alpha)d_f}\eta\right) \quad (2)$$

La majorité des auteurs approximent l'efficacité de collecte globale comme la somme des efficacités de collecte de chaque mécanisme, d'autres considèrent plutôt le produit des probabilités des efficacités de collecte afin de déterminer l'efficacité de collecte globale. Cependant, aucune de ses deux approches n'est validée de manière théorique : les mécanismes de collecte ainsi que les fibres ne sont pas indépendants les uns des autres.

La Figure 1 présente l'efficacité de collecte d'un *medium* à une vitesse de filtration de 5,3 cm/s, dont les caractéristiques sont une épaisseur de 336 μm , une compacité de 0,091 et un diamètre de fibres (diamètre de Davies) de 3,77 μm . Les équations des efficacités de collecte utilisées pour l'expression de l'efficacité de collecte globale sont tirées de Liu et Rubow (1990) (pour la collecte par diffusion et par interception) et de Gougeon *et al.* (1996) (pour la collecte par impaction). L'efficacité de collecte globale est définie ici par le produit des taux de pénétration de chacun des mécanismes.

La taille des particules les plus pénétrantes (taille des particules associée à la situation de pire scénario) est estimée à environ 300 nm, et c'est la taille des particules la plus petite mesurée dans la norme appliquée en Amérique du Nord (ASHRAE 52.2, 2017). La littérature fait plutôt état d'une gamme de tailles allant de 100 nm à 300 nm. Cependant, de nombreuses études ont montré que cette taille des particules peut varier de manière considérable d'un modèle de filtre à l'autre et qu'elle dépend fortement des conditions opératoires (Baron et Willeke, 2001).

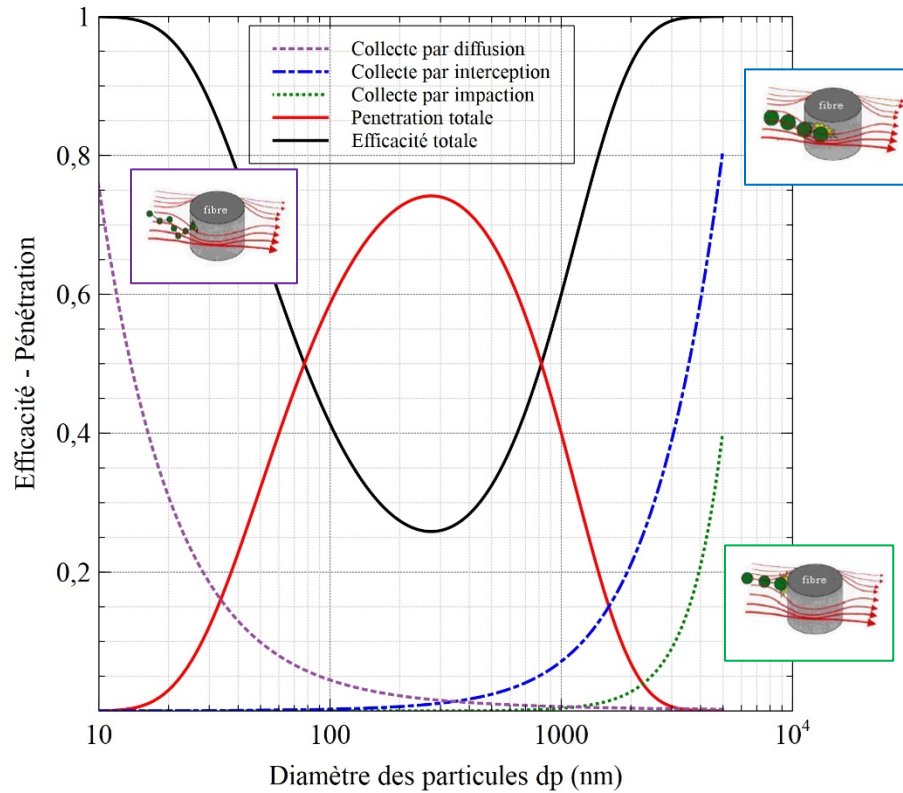


Figure 1. Exemple de représentation de l'efficacité de collecte d'un *medium* en fonction de la dimension des particules et des différents régimes de filtration.

1.3 La perte de charge du filtre

La perte de charge Δp se définit comme la différence entre les pressions statiques en amont et en aval du filtre; elle caractérise la résistance de l'élément filtrant à l'écoulement de l'air (équation (3)).

$$\Delta p = p_{\text{amont}} - p_{\text{aval}} \quad (3)$$

Lors de son utilisation, le filtre est chargé en particules et peut se colmater, augmentant alors la perte de charge du filtre et donc sa dépense énergétique. La perte de charge mesurée augmente linéairement avec la masse collectée. Des études (Bémer et Callé., 2000; Gripari, 2012) montrent que le pouvoir colmatant d'une particule est d'autant plus grand que sa surface spécifique est importante. Ce constat a amené les constructeurs à maximiser la surface de filtration pour travailler à faible vitesse de filtration et donc à diminuer la perte de charge.

1.4 Contexte normatif : ANSI/ASHRAE 52.2

Au Québec, le Règlement sur la santé et la sécurité au travail (Section XI)¹ prévoit que les bâtiments doivent suivre les recommandations de renouvellement de l'air, en fonction du nombre de pièces, du volume de chaque pièce, du taux d'occupation et de l'usage des pièces. Dans les bureaux et les laboratoires, le débit d'air total de ventilation par personne est de 7,1 L/s dans les espaces non réfrigérés et de 45 L/s dans les espaces réfrigérés. Les filtres utilisés dans les systèmes de renouvellement de l'air dans les bâtiments respectent les normes américaines (American National Standards Institute) telles que ANSI/ASHRAE 52.2.

Dans la norme ASHRAE 52.2 (2017), les filtres des systèmes de ventilation sont classifiés selon leur performance. Cette norme présente une méthode de l'évaluation de l'efficacité des filtres à air en fonction de la taille des particules de chlorure de potassium (KCl) (de 0,3 à 10,0 µm) et propose alors une classification des filtres en 16 niveaux de MERV (*Minimum Efficiency Reporting Value*). Plus le MERV est grand et meilleure est l'efficacité du filtre.

On peut distinguer trois types de filtration :

- ✓ La filtration primaire (MERV 8, par exemple) : Elle comprend les filtres de faible et moyenne efficacité, et correspond à une filtration suffisante dans les environnements sans besoins particuliers (bureaux) ou à une préfiltration (évite l'empoussièrement du système de ventilation).
- ✓ La filtration secondaire : Elle comprend les filtres de haute efficacité et est utilisée dans les services alimentaires, les laboratoires. Elle utilise des filtres classés de MERV 9 à MERV 16.
- ✓ La filtration très haute efficacité : Elle comprend des filtres absolus, filtres HEPA et filtres ULPA et est surtout utilisée dans les salles blanches, pour des environnements stériles de l'industrie pharmaceutique ou du milieu médical. Elle utilise des filtres classés de MERV 17 à MERV 20.

Ces filtres peuvent se représenter sous plusieurs formes : filtre à poches, filtre boîtier ou caisson de filtres, selon leur utilisation. Les différentes efficacités décrites dans cette norme sont présentées dans le Tableau 1.

¹ Règlement du Québec : S-2.1, r. 13 – Règlement sur la santé et la sécurité du travail;
<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013>

Tableau 1. Paramètres de classification (norme ASHRAE 52.2, 2017)

MERV	Efficacité (%)			Arrestance ² (%)
	E1	E2	E3	
	(de 0,3 à 1,0 µm)	(de 1,0 à 3,0 µm)	(de 3,0 à 10,0 µm)	
1	--	--	E3 < 20	A < 65
2	--	--	E3 < 20	65 ≤ A
3	--	--	E3 < 20	70 ≤ A
4	--	--	E3 < 20	75 ≤ A
5	--	--	20 ≤ E3	
6	--	--	35 ≤ E3	
7	--	--	50 ≤ E3	
8	--	20 ≤ E2	70 ≤ E3	
9	--	35 ≤ E2	75 ≤ E3	
10	--	50 ≤ E2	80 ≤ E3	
11	20 ≤ E1	65 ≤ E2	85 ≤ E3	
12	35 ≤ E1	80 ≤ E2	90 ≤ E3	
13	50 ≤ E1	85 ≤ E2	90 ≤ E3	
14	75 ≤ E1	90 ≤ E2	95 ≤ E3	
15	85 ≤ E1	90 ≤ E2	95 ≤ E3	
16	95 ≤ E1	95 ≤ E2	95 ≤ E3	

La certification ASHRAE ne couvre pas la performance de ces filtres à des tailles de particules inférieures à 300 nm. De plus, peu d'études ont été menées pour quantifier la performance des filtres mécaniques exposés à des particules de taille nanométrique dans différentes conditions opératoires. L'effet de la vitesse de filtration, du taux d'humidité et de la durée d'utilisation sur la performance des filtres reste encore à être estimé.

Récemment, une nouvelle norme internationale ISO 16890 (2016) a été introduite dans le but d'avoir une méthode uniforme et cohérente pour classer les filtres autour du monde. Cette

² Arrestance (A) : L'arrestance est une mesure de l'efficacité, obtenue par une méthode gravimétrique.

nouvelle norme combine différentes parties des normes européennes EN 779 (2012) et américaines ASHRAE 52.2 (2017) afin de définir quatre nouveaux groupes de filtres, basés sur la taille des particules de poussières. Dans cette norme internationale, l'efficacité d'un filtre est directement liée à des gammes de poussières : PM1, PM2,5 et PM10. Ces paramètres sont généralement utilisés dans la représentation d'un aérosol ambiant. Il est cependant à relever que la taille minimale des particules utilisées pour les tests est toujours de 0,3 µm. L'idée principale de cette norme est la simplification de la sélection des filtres en fonction du niveau de qualité de l'air intérieur souhaité. Cependant, le cas d'une exposition en particules inférieures à 0,3 µm n'est pas pris en compte dans cette nouvelle norme.

Il est donc important d'étudier la performance de filtres mécaniques, selon leurs caractéristiques et leurs utilisations dans le temps pour des particules polydispersées inférieures à 300 nm afin de simuler les conditions réelles de l'utilisation des filtres mécaniques.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Puisqu'il existe une grande quantité de revues de la littérature sur la filtration théorique des nanoparticules (Davies, 1973; Brown, 1993; Hinds, 1999, Abdolghader *et al.*, 2018), la présente section portera sur une revue non exhaustive des expérimentations de la filtration des *media* pour les nanoparticules.

2.1 Filtration expérimentale par les *media*

2.1.1 Filtration expérimentale – Efficacité initiale des *media* mécaniques

Beaucoup d'études se sont déjà penchées expérimentalement sur l'efficacité des *media* mécaniques pour la filtration de nanoparticules. Ces études ont principalement montré que :

- ✓ Pour des particules de diamètres inférieurs à 10 nm et supérieurs à 3 000 nm, le taux de pénétration tend vers zéro; en d'autres termes, ces particules sont presque toutes collectées par le *medium* (Lee et Liu, 1981).
- ✓ L'efficacité de la filtration diminue à mesure que l'on augmente la vitesse de filtration (Lee et Liu, 1981; VanOsdell *et al.*, 1990; Boskovic *et al.*, 2007, 2008).
- ✓ La taille des particules les plus pénétrantes (MPPS) est généralement mesurée entre 100 nm et 300 nm (toutes les études du Tableau 2).
- ✓ La MPPS peut varier considérablement d'un type de *medium* à l'autre et dépend largement des conditions opératoires (type de *medium*: Lee et Liu, 1981; VanOsdell *et al.*, 1990; Japuntich *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006; Brochot *et al.*, 2011; Buha *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2017; forme des particules: Boskovic *et al.*, 2005, 2007, 2008; Kim *et coll.*, 2009; Brochot *et al.*, 2011; Buha *et al.*, 2013; charge des particules: Kim *et al.*, 2006; humidité relative: Kim *et al.*, 2006).

Le Tableau 2 présente une liste (non exhaustive) des travaux mettant en évidence expérimentalement ces principales tendances.

Dans leurs études, les différents auteurs ont examiné le comportement des *media* mécaniques en fonction de différents paramètres tels que la structure du *medium*, les propriétés des particules et les conditions opératoires, sur l'efficacité initiale et pour des nanoparticules. Leurs mesures ont été obtenues à l'aide d'un porte-filtre dans lequel un échantillon de *medium* a été inséré. En amont du porte-filtre, les aérosols sont injectés et passent au travers du *medium* à tester. L'aérosol est généralement globalement neutre (à l'équilibre de Boltzmann). Les concentrations de particules en amont et en aval permettent ainsi de mesurer le taux de pénétration du *medium*. Dans toutes ces études, les mesures de concentration, exprimées en nombres, ont été obtenues en utilisant un compteur de particules à condensation (CPC). La vitesse de filtration varie d'une étude à l'autre, mais la plage de vitesse la plus fréquemment représentée est 5 - 20 cm/s. De plus, toutes les études énumérées dans le Tableau 2 ont évalué les caractéristiques du *medium* (épaisseur, compacité, perte de charge initiale et diamètre de fibre). Ces données ont permis aux auteurs de confronter les résultats avec différentes équations théoriques (Lee et Liu, 1981; VanOsdell *et al.*, 1990; Boskovic *et al.*, 2007,

2008; Kim *et al.*, 2009; Buha *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2017); ces données permettent aussi aux lecteurs de les comparer avec celles obtenues pour différents modèles (Boskovic *et al.*, 2005; Japuntich *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2006; Brochot *et al.*, 2011).

Notons qu'une seule étude citée dans le Tableau 2 fait référence au phénomène de rebond thermique, phénomène controversé qui fait polémique dans la théorie de la filtration des aérosols. En 1991, Wang et Kasper ont mené une étude théorique qui aboutit à la conclusion que le taux de pénétration pourrait augmenter pour des aérosols en dessous de 10 nm (Wang et Kasper, 1991). Selon les auteurs, le contact de la particule de cette gamme avec une fibre aurait une probabilité d'adhésion et non pas une capture automatique de la particule par la fibre. Cette probabilité d'adhésion de la particule sur la fibre dépend alors de la taille des particules et de l'énergie cinétique de celle-ci. En 2011, Mouret *et al.* ont démontré théoriquement, avec des hypothèses plus réalistes, que le phénomène de rebond thermique n'apparaîtrait qu'en dessous de 1 nm, même lors d'expériences à haute température (Mouret *et al.*, 2011).

Tableau 2. Filtration des nanoparticules par les *media* mécaniques – Études expérimentales (études non exhaustives)

Réf.	Paramètre			Mesure
	Medium	Particule	Condition opératoire	
Lee et Liu (1981)	<p>2 <i>media</i> testés : <i>Medium A</i> : $d_f = 11 \mu\text{m}$, $0,183 < Z < 2,223 \text{ cm}$, $0,0086 < \alpha < 0,2290$ <i>Medium B</i> : $d_f = 12,9 \mu\text{m}$ (GSD = 1,06), $0,0368 < Z < 0,1029 \text{ cm}$, $0,176 < \alpha < 0,963$ (en compressant le <i>medium</i>)</p>	DOP neutralisé par ^{85}Kr	<p>4-6 vitesses : <i>Medium A</i> : 1-30 cm/s, <i>Medium B</i>: 1-300 cm/s</p>	<p>Méthode de test: Différentes distributions d'aérosols monodispersés + CPC TSI 3010 Gamme de tailles des particules étudiées : $35 \text{ nm} < d_p < 1,3 \mu\text{m}$ Résultats : Le spectre de pénétration dépend de la vitesse de filtration, de la taille des particules et de la compacité. MPPS > 100 nm et MPPS se décale vers les petites particules quand la vitesse de filtration augmente Remarque: <i>Media</i> conçus spécialement pour cette étude; peut ne pas être applicable aux <i>media</i> offerts sur le marché.</p>
VanOsdell et coll. (1990)	<p>5 <i>media</i> testés : 5 <i>media</i> en fibre de verre ($2,33 \mu\text{m} < d_f < 2,40 \mu\text{m}$, $0,410 \text{ mm} < Z < 0,470 \text{ mm}$, $0,069 < \alpha < 0,078$), 3 <i>media</i> en composite ou membrane</p>	Particules d'argent neutralisées par ^{85}Kr	<p>6 vitesses : 0,5-20 cm/s</p>	<p>Méthode de test : Différentes distributions d'aérosols monodispersés + CPC TSI 3020 Gamme de tailles des particules étudiées : $4 \text{ nm} < d_p < 400 \text{ nm}$ Résultats : Perte de charge et taux de pénétration qui augmente avec la vitesse de filtration. Des MPPS mesurées < 100 nm (<i>media</i> très efficaces) et MPPS se décale vers les particules plus petites lorsque la vitesse de filtration augmente.</p>

Réf.	Paramètre			Mesure
	Medium	Particule	Condition opératoire	
Boskovic et al. (2005)	1 <i>medium</i> en polypropylène : $d_f = 19 \mu\text{m}$, $Z = 2 \text{ mm}$, $\alpha = 0,09$	3 types de particules : PSL, oxyde de fer (sphérique) et MgO (cubique)	1 vitesse : 2 cm/s	Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + CPC TSI 3010 Gamme de tailles des particules étudiées : $50 \text{ nm} < d_p < 300 \text{ nm}$ Résultats : Taux de pénétration plus grand pour des particules cubiques que pour des particules sphériques MPPS > 100 nm Remarque : La charge des particules n'est pas contrôlée avant la mesure de pénétration.
Kim et al. (2006)	2 media testés : <i>Medium A:</i> $d_f = 9,1 \mu\text{m}$, $Z = 0,4 \text{ mm}$, $g = 60 \text{ g/m}^3$ <i>Medium B:</i> $d_f = 11,8 \mu\text{m}$, $Z = 0,4 \text{ mm}$, $g = 60 \text{ g/m}^3$	3 états de charge des particules : NaCl chargées une fois, sans charge et neutralisée (^{241}Am)	1 vitesse : 2,5 cm/s 3 taux d'humidité relative : 0,04 %, 1,22 % et 92 %	Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + CPC TSI 3022 Gamme de tailles des particules étudiées : $1 \text{ nm} < d_p < 100 \text{ nm}$ Résultats : Le spectre de pénétration dépend de l'état de charge des particules. L'humidité relative n'a pas d'effet sur le taux de pénétration pour $d_p < 100 \text{ nm}$. Les auteurs observent l'effet du rebond thermique.
Japuntich et al. (2006)	4 media testés : 4 <i>media</i> en fibres de verre: $0,053 \text{ cm} < Z < 0,074 \text{ cm}$ $2,1 \mu\text{m} < d_{f \text{ effectif}} < 5,4 \mu\text{m}$ (selon Davies, 1952, cité par Japuntich et al., 2006) $0,039 < \alpha < 0,050$	2 types de particules : NaCl et DOP neutralisés par ^{85}Kr	1 vitesse : 5,3 cm/s	Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + 2 CPC TSI 3760, et aérosol polydispersé + scans SMPS Gamme de tailles des particules étudiées : $10 \text{ nm} < d_p < 400 \text{ nm}$ Résultats : Taux de pénétration équivalent pour les deux types de particules (NaCl and DOP) MPPS > 100 nm

Réf.	Paramètre			Mesure
	Medium	Particule	Condition opératoire	
Boskovic et al. (2007)	1 <i>medium</i> en polypropylène : $d_f = 12 \mu\text{m}$, $Z = 3 \text{ mm}$, $\alpha = 0,16$, avec ou sans traitement (huile)	2 types de particules : PSL et MgO	2 vitesses : 10 et 20 cm/s	<p>Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + CPC</p> <p>Gamme de tailles des particules étudiées : $50 \text{ nm} < d_p < 300 \text{ nm}$</p> <p>Résultats : Taux de pénétration plus grand pour des particules cubiques que pour des particules sphériques Cet effet est moindre avec un <i>medium</i> traité MPPS > 100 nm</p> <p>Remarque : La charge des particules n'est pas contrôlée avant la mesure de pénétration.</p>
Boskovic et al. (2008)	1 <i>medium</i> en polypropylène : $d_f = 12 \mu\text{m}$, $Z = 2 \text{ mm}$, $\alpha = 0,29$	3 types de particules : PSL, MgO et NaCl	3 vitesses : 5, 10 et 20 cm/s	<p>Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + CPC 3775</p> <p>Gamme de tailles des particules étudiées : $50 \text{ nm} < d_p < 300 \text{ nm}$</p> <p>Résultats : $P(\text{NaCl et MgO}) > P(\text{PSL})$ Cet effet est moins évident lorsque la vitesse augmente MPPS > 100 nm</p> <p>Remarque : La charge des particules n'est pas contrôlée avant la mesure de pénétration.</p>
Kim et al. (2009)	1 <i>medium</i> en fibre de verre : $d_f \text{ effectif} = 1,9 \mu\text{m}$, $Z = 0,53 \text{ mm}$, $\alpha = 0,050$	3 types de morphologies : Ag sphériques, agglomérées et agrégées et neutralisées (^{210}Po)	1 vitesse : 5,3 cm/s	<p>Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + CPC 3760</p> <p>Gamme de tailles des particules étudiées : $30 \text{ nm} < d_p < 300 \text{ nm}$</p> <p>Résultats : $P(\text{Ag agglomérées}) < P(\text{Ag sphériques})$ MPPS > 100 nm</p>

Réf.	Paramètre			Mesure
	Medium	Particule	Condition opératoire	
Brochot <i>et al.</i> (2011)	<p>2 media testés : <i>Medium 1:</i> d_f effectif = 4,23 μm, $Z = 552 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,05$, <i>Medium 2:</i> d_f effectif = 3,25 μm, $Z = 427 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,064$</p>	<p>3 types de particules : C et Cu neutralisées (^{85}Kr), NaCl non neutralisées</p>	<p>1 vitesse : 5 cm/s pour le carbone et le cuivre et 5,3 cm/s pour NaCl</p>	<p>Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + CPC (TSI 3022A pour carbone et cuivre, et TSI 3025A pour NaCl) Gamme de tailles des particules étudiées : $5 \text{ nm} < d_p < 400 \text{ nm}$ Résultats : Le taux de pénétration diminue lorsque la taille des particules diminue. Taux de pénétration équivalent pour les deux bancs de test (pour NaCl et pour C et Cu) MPPS > 100 nm</p>
Buha <i>et al.</i> (2013)	<p>3 épaisseurs de nanofibres sur un substrat</p>	<p>2 types de particules : NaCl et Ag</p> <p>2 types de morphologies : Ag en sphères ou agglomérés</p>	<p>1 vitesse : 5 cm/s</p>	<p>Méthode de test : Aérosol polydispersé + 2 scans SMPS Gamme de tailles des particules étudiées : $14 \text{ nm} < d_p < 400 \text{ nm}$ Résultats : $P(\text{Ag agglomérés}) < P(\text{Ag agrégats}) < P(\text{NaCl})$ MPPS autour de 100 nm Remarques : Des nanofibres sont ajoutées au <i>medium</i>; non applicable pour les <i>media</i> commerciaux.</p>
Chen <i>et al.</i> (2017)	<p>2 media en fibres de verre testés : <i>Medium 1:</i>, d_f effectif = 1 μm, $Z = 260 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,065$, <i>Medium 2</i> (avec traitement): d_f effectif = 3 μm, $Z = 203 \mu\text{m}$, $\alpha = 0,1$</p>	<p>Agglomérats polydispersés et non sphériques générés par un moteur à essence</p>	<p>1 vitesse : 5 cm/s</p>	<p>Méthode de test : Aérosol polydispersé + DMS 500 Gamme de tailles des particules étudiées : $70 \text{ nm} < d_p < 400 \text{ nm}$ Résultats : Le taux de pénétration augmente et MPPS diminue en fonction du temps MPPS diminue de 200 nm à 150 nm (<i>medium 1</i>), et de 220 nm à 200 nm (<i>medium 2</i>) Remarque : La charge des particules n'est pas contrôlée avant la mesure de pénétration.</p>

Note : GSD = *geometric standard deviation*; PSL = *polystyrene latex*; CPC = *condensation particle counter*; DMA = *Differential Mobility Analyzer*; SMPS = *Scanning Mobility Particle Sizer*

2.1.2 Filtration expérimentale – Efficacité initiale des media chargés électrostatiquement

Le Tableau 3 montre le même type de résultats que ceux présentés dans le Tableau 2, mais cette fois-ci dans le cas de *media* électrets.

Les études sur le comportement des *media* électrets ont été effectuées en fonction de différents paramètres liés aux *media*, aux particules filtrées ou aux conditions opératoires. Comme dans les études mentionnées précédemment, les auteurs ont utilisé des porte-filtres dans lesquels un échantillon a été inséré. Pour les *media* électrets, les études rapportent principalement que:

- ✓ L'efficacité de filtration est améliorée en ajoutant des charges électrostatiques (Huang *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2007; Lore *et al.*, 2010; Chang *et al.*, 2016).
- ✓ La taille des particules les plus pénétrantes (MPPS) est inférieure ou proche de 100 nm (Kanaoka *et al.*, 1987; Yang et Lee, 2005; Huang *et al.*, 2007; Lore *et al.*, 2010).
- ✓ L'efficacité de la filtration et la MPPS sont fortement influencées par la charge des particules filtrées et par la charge portée par les fibres (Kanaoka *et al.*, 1987; Yang et Lee, 2005; Huang *et al.*, 2007).
- ✓ L'efficacité de la filtration diminue à mesure que la vitesse de filtration augmente (Kanaoka *et al.*, 1987; Yang et Lee, 2005; Huang *et al.*, 2007; Chang *et al.*, 2016).

Tableau 3. Filtration des nanoparticules par les *media* chargés électrostatiquement – Études expérimentales (études non exhaustives)

Réf.	Paramètre			Mesure
	Medium	Particule	Condition opératoire	
Kanaoka <i>et al.</i> (1987)	<p>1 <i>medium</i> en polypropylène : $d_f = 10 \mu\text{m}$, $Z = 4 \text{ mm}$, $\alpha = 0,031$ $Q = 34,2 \text{ nC/m}$ (données rapportées de Brown, 1979)</p>	<p>4 états de charge : NaCl chargées une fois, chargées plusieurs fois, non chargées ou neutralisées</p>	<p>7 vitesses : 5-200 cm/s</p>	<p>Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + CNC TSI 3020 Gamme de tailles des particules étudiées : $20 \text{ nm} < d_p < 400 \text{ nm}$ Résultats : Particules chargées une fois : MPPS > 100 nm Particules sans charges: MPPS < 100 nm Particules neutralisées: MPPS < 100 nm MPPS se décale vers les plus petites particules quand la vitesse de filtration augmente (pour les 4 états de charge). Remarques : Q a été choisie arbitrairement.</p>
Yang et Lee (2005)	<p>2 <i>media</i> testés : <i>Medium A</i> (avec traitement): $d_f = 30 \mu\text{m}$, $Z = 5 \text{ mm}$, $\alpha = 0,04$ <i>Medium B</i> (du commerce): $d_f = 17,6 \mu\text{m}$, $Z = 1 \text{ mm}$, $\alpha = 0,068$ $Q = 8,33 \times 10^{-9} \text{ C/m}$ (dérivé du champ électrique mesuré)</p>	<p>2 types de particules : NaCl (cubiques et de constante diélectrique = 5,9) Al₂O₃ (sphériques et de constante diélectrique = 9,2) 3 états de charge : Chargées une fois, non chargées et aérosol globalement neutre (⁸⁵Kr)</p>	<p>4 vitesses : 0,1-1,0 m/s</p> <p>2 taux d'humidités relatives : 30 % et 70 %</p>	<p>Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + 2 CPC TSI 3025 Gamme de tailles des particules étudiées : $50 \text{ nm} < d_p < 500 \text{ nm}$ Résultats : Le taux de pénétration augmente avec la vitesse de filtration. $P(\text{Al}_2\text{O}_3) < P(\text{NaCl})$ L'humidité relative n'a pas d'effets sur la pénétration mesurée. Pour le <i>medium</i> traité: $P(\text{NaCl chargée}) < P(\text{NaCl non chargée}) < P(\text{NaCl globalement neutre})$ Pour le <i>medium</i> chargé: MPPS autour de 100 nm Remarques : Les effets du traitement sont le principal sujet de l'étude.</p>

Réf.	Paramètre			Mesure
	Medium	Particule	Condition opératoire	
Huang et al. (2007)	<p>2 media testés : <i>Medium A:</i> non caractérisé, application d'un traitement pour supprimer les charges <i>Medium B:</i> $d_f = 13 \mu\text{m}$, $Z = 6 \text{ mm}$, $\alpha = 0,035$ $\lambda = 12,10^{-6} \text{ C/m}^2$</p>	<p>NaCl globalement neutre (^{241}Am)</p>	<p>1–3 vitesses : <i>Medium A:</i> $8,6 \text{ cm/s}$ <i>Medium B:</i> $2,8, 5,6 \text{ et } 8,0 \text{ cm/s}$</p>	<p>Méthode de test : Aérosol polydisperse + scans SMPS Gamme de tailles des particules étudiées : $4.5 \text{ nm} < d_p < 10 \mu\text{m}$ Résultats : MPPS < 100 nm Le taux de pénétration augmente et la MPPS se décale vers les plus grandes particules (d'autour de 50 nm à autour de 200 nm) quand les effets électrostatiques sont supprimés. Pour le <i>medium</i> traité: MPPS se décale vers les plus petites particules quand la vitesse de filtration augmente. Remarques : La caractérisation d'un des électrets n'est pas présentée.</p>
Kim et al. (2007)	<p>9 media testés : 4 <i>media</i> en fibres de verre (Japuntich et al., 2006), 5 électrets du commerce (3M et Lydall), pas de caractérisation</p>	<p>Particules d'Ag globalement neutres (^{210}Po)</p>	<p>1–3 vitesses : mécanique: $5,3, 10 \text{ et } 15 \text{ cm/s}$ électret: $5,3 \text{ cm/s}$</p>	<p>Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + CPC TSI 3025A Gamme de tailles des particules étudiées : $3 \text{ nm} < d_p < 20 \text{ nm}$ Résultats : Le taux de pénétration diminue lorsque la vitesse de filtration diminue. Taux de pénétration des 5 électrets < Taux de pénétration des 5 <i>media</i> mécaniques Remarque : La caractérisation des électrets n'est pas présentée.</p>
Lore et al. (2010)	<p>2 media testés : 1 <i>medium</i> en fibres de verre (Japuntich et al., 2007), 1 électret du commerce (3M), pas de caractérisation</p>	<p>2 types de particules : NaCl globalement neutre (^{85}Kr) (cubique et constante diélectrique = 6,1) PSL (sphères et constante diélectrique = 2,52)</p>	<p>1 vitesse : liée à la perte de charge sélectionnée</p>	<p>Méthode de test : Aérosol polydispersé + scans SMPS sur les deux montages Gamme de tailles des particules étudiées : $10 \text{ nm} < d_p < 300 \text{ nm}$ Résultats : Le taux de pénétration est presque identique sur les deux montages (NaCl et PSL). MPPS < 100 nm Remarque : La caractérisation des électrets n'est pas présentée.</p>

Réf.	Paramètre			Mesure
	Medium	Particule	Condition opératoire	
Chang <i>et al.</i> (2016)	<p>5 media testés : $d_f = 26,3, 24,0, 16,5,$ $17,2, 15,6 \mu\text{m};$ $Z = 0,94, 0,97, 0,70,$ $0,73, 0,83 \text{ mm};$ $\alpha = 0,072, 0,077,$ $0,105, 0,092, 0,102$ $\lambda = 25, 75, 25, 75,$ $75 \mu\text{C}/\text{m}^2$</p>	<p>2 types de particules : Ag sélectionnées par nanoDMA $(3 < d_p < 20 \text{ nm})$ KCl sélectionnées par longDMA $(30 < d_p < 500 \text{ nm})$</p>	<p>4 vitesses : $0,05\text{-}1,50 \text{ m/s}$</p>	<p>Méthode de test : Particules monodispersées à l'aide d'un DMA + à l'équilibre de Boltzmann + UCPC TSI 3776 Gamme de tailles des particules étudiées: $3 \text{ nm} < d_p < 500 \text{ nm}$ Résultats : Les courbes présentent une pénétration bimodale avec des pics à 10-30 nm et 150-200 nm. MPPS se décale vers les plus petites particules quand la vitesse de filtration augmente. Pour les <i>media</i> très chargés, le premier mode est plus élevé que le second, on observe une tendance inverse pour les <i>media</i> moyennement chargés.</p>

Note : PSL = *polystyrène latex*; DMA = *Differential Mobility Analyzer*; SMPS = *Scanning Mobility Particle Sizer*; UCPC = *ultrafine condensation particle counter*.

2.1.3 Filtration expérimentale – Évolution temporelle de l'efficacité

C'est généralement avec le paramètre de perte de charge que l'évolution du colmatage des *media* est mesurée. La performance de filtration du système est alors affectée, elle aussi, par le colmatage.

Walsh (1996) a été le premier à décrire de façon phénoménologique le colmatage d'un *medium* fibreux. Il a identifié deux étapes de colmatage dans l'évolution de la perte de charge et du taux de pénétration total en fonction de la masse de particules collectée. La première phase est caractérisée par une filtration en profondeur : pendant cette phase, les particules sont collectées essentiellement à l'intérieur du *medium*. Ces particules collectées entraînent une augmentation progressive de la perte de charge et une diminution du taux de pénétration total.

La seconde phase est appelée filtration en surface : les particules se déposent à la surface du *medium* (formant ce que l'on appelle un gâteau de particules), entraînant une forte augmentation de la perte de charge et une forte diminution du taux de pénétration total. Lors de la transition entre ces deux phases, une augmentation importante de l'efficacité et de la perte de charge est observée.

La filtration en profondeur dépend à la fois des caractéristiques de l'aérosol et du *medium*. Lors de la filtration en profondeur, les particules s'accumulent sur les fibres, entraînant une augmentation de la perte de charge. La forme et l'emplacement des dépôts de particules sur une fibre varient en fonction du mécanisme de collecte dominant. En effet, le dépôt de particules prend différentes formes en fonction des trois paramètres adimensionnels Pe , R et St (Kasper *et al.*, 2010). Kasper *et al.* (2010) ont étudié la morphologie et la densité des dépôts de particules lors de leur accumulation sur une fibre d'acier dans des conditions d'inertie et d'interception. Lorsque le régime de diffusion est prédominant, les auteurs supposent que les particules se déposent avec une distribution isotrope autour de la fibre dans une structure relativement ouverte.

Dans le cas des électrets, la première phase de colmatage a été expliquée par Biermann *et al.* (1982) comme étant la neutralisation des charges de fibres par les charges opposées des particules. Walsh (1995) a ensuite proposé une autre explication après avoir montré que la charge de particules plus élevée dégradait moins rapidement le filtre, rendant ainsi l'explication précédente obsolète. Il a alors proposé que la réduction de l'effet électrostatique soit due au fait que les particules collectées couvraient la fibre et diminuaient ainsi l'effet électrostatique. Barrett et Rousseau (1998) ont ensuite proposé une troisième explication en matière d'interactions chimiques entre fibres et particules. La filtration de surface se produit lorsque les pores de surface du milieu sont bouchés. Les particules s'accumulent alors à la surface et remplacent le filtre en capturant d'autres particules, provoquant ainsi une augmentation de la perte de charge. La filtration de surface ne dépend donc que des caractéristiques des particules, y compris leur forme, leur taille et leur disposition.

Thomas *et al.* (2001) ont montré que la géométrie du dépôt diffère selon la taille des particules : pour des particules submicroniques, le dépôt est dendritique, tandis que pour les particules microniques le dépôt est plutôt sous forme d'agglomération. Le dépôt de particules submicroniques est plus aéré (Thomas *et al.*, 2001), et donc de faible compacité. Néanmoins,

les particules ayant un faible diamètre, leur surface spécifique est d'autant plus grande, ce qui conduit à une plus grande perte de charge du *medium*. Le dépôt de particules microniques a une plus grande compacité, mais une surface spécifique moindre pour une même masse de particules déposées. Ainsi, plus les particules sont petites et plus la perte de charge est grande pour une même masse de particules déposée.

Thomas *et al.* (2001) ont également montré que la structure du dépôt de particules dans le *medium* et à sa surface était indépendante de la vitesse de filtration sur la gamme de vitesses testées.

Dans le cas d'un électret, Walsh (1996) et Walsh et Stenhouse (1997) ont constaté que des particules de plus petite taille entraînent une détérioration plus rapide du *medium*. Le taux de pénétration maximal a été atteint plus rapidement (c.-à-d. pour une masse de particules collectée plus faible), le taux de pénétration a également diminué plus rapidement. Ils ont également montré que, pendant la phase de filtration en surface, la perte de charge augmentait linéairement avec la masse d'aérosol collectée et que, pour une masse de particules collectée identique, plus les particules étaient petites, plus la perte de charge était importante.

En plus de la taille des particules et de la vitesse de filtration, la composition, la forme et la distribution des particules, ainsi que l'humidité relative, peuvent également influencer le colmatage. Par exemple, la filtration d'un aérosol liquide par un *medium* mécanique est complexe et implique des réarrangements et des phénomènes de drainage (Walsh, 1996). Un autre exemple : lors de la filtration en surface, l'augmentation de l'humidité relative réduit la résistance aéraulique, réduisant ainsi la chute de pression du gâteau (Gupta *et al.*, 1993, Miguel, 2003. Joubert *et al.*, 2010).

Tous ces résultats sont obtenus pour des particules non nanométriques. Une seule étude portant spécifiquement sur les nanoparticules a été recensée : Barros *et al.* (2016) ont évalué la perte de charge et l'efficacité de collecte lors de la formation de gâteaux de nanoparticules pour des *media* offerts sur le marché. Leurs résultats sont conformes à ceux présentés ci-dessus pour les particules submicroniques.

On peut aussi citer les travaux qui ont été effectués sur des pièces faciales filtrantes (PFF) (faites à partir de *media* électrets). Certains auteurs (Mostofi *et al.*, 2011; Rengasamy *et al.*, 2013; Mahdavi *et al.*, 2015) ont observé une augmentation du taux de pénétration suivie d'une diminution de celle-ci lors de la charge des PFF avec des nanoparticules. Mahdavi *et al.* (2015) ont également noté que l'humidité relative a un effet important sur la pénétration au cours de son utilisation : ils ont observé que le taux de pénétration à la MPPS (taille des particules les plus pénétrantes) diminue au cours du temps durant les tests à un faible taux d'humidité (10 %), mais qu'à un taux d'humidité relative élevée (50 % et 80 %), le taux de pénétration à la MPPS augmente au cours du temps.

2.2 Filtration expérimentale par les filtres dans leur ensemble

Le Tableau 4 ci-dessous présente les six études qui se sont concentrées sur l'efficacité des filtres entiers pour des particules comprenant des particules nanométriques.

Tableau 4. Filtration des nanoparticules par les filtres dans leur ensemble – Études expérimentales

Ref.	Filtre testé		Banc de test	Aérosol de test	Vitesse	Mesure effectuée	Avantage	Inconvénient
	Mécanique	Chargé						
Hanley et al. (1994)	6 filtres ^(a) (25-30 %, 40 %, 65 %, 65 %, 85 %, 95 %)	1 filtre ^(a)	Montage : En circuit fermé (section 610×610 mm)	Neutralisé : KCl (d_p : 0,01-3,00 μm)	Vitesse frontale : 0,45 -1,80 m/s	Taux de pénétration en fonction de la taille des particules : Efficacité initiale + colmatage	– Premier document relatant une procédure de test – A servi de base pour les tests normatifs	Peu de données pour les filtres chargés électrostatiquement
Alderman et al. (2008)	2 filtres HEPA ^(b) (de 2 constructeurs)		Montage : Veine de ventilation (section 310×310 mm)	Sans neutralisation : KCl (d_p : 70-1 000 nm)	Vitesse du <i>medium</i> : 2,0-4,5 cm/s	Taux de pénétration globale : Efficacité initiale + colmatage	Axé sur l'effet de la vitesse de filtration au cours du colmatage	– peu de filtres ont été testés – pas axé sur l'évolution de l'efficacité de filtration
Hecker et Hofacre (2008)	24 types de filtres ^(c) (MERV 6-16)		Montage : En circuit fermé (section 610×610 mm)	Sans neutralisation : KCl (d_p : 0,03-10 μm)	Vitesse nominale du ventilateur	Taux de pénétration en fonction de la taille des particules : Efficacité initiale	Équation empirique développée à l'aide des données expérimentales	Seule l'efficacité initiale a été mesurée

Ref.	Filtre testé		Banc de test	Aérosol de test	Vitesse	Mesure effectuée	Avantage	Inconvénient
	Mécanique	Chargé						
Stephens et Siegel (2013)	2 filtres ^(c) (MERV 4, MERV 6)	4 filtres ^(c) (MERV 10, 11, 13, 16)	In situ : Système HVAC installé dans une maison inoccupée	Sans neutralisation : aérosol ambiant (d_p : 0,005-0,105 μm)	Vitesse nominale du ventilateur	Taux de pénétration en fonction de la taille des particules : Efficacité initiale	Bonne représentation d'un environnement réel	– Les conditions opératoires ne sont pas contrôlées – Seule l'efficacité initiale a été mesurée
Shi et al. (2013)	3 filtres ^(d) (M6, F7, F8) 13 échantillons (8 en fibres de verre et 5 en fibres synthétiques non chargées)	5 filtres ^(c) (M5, M6, F7, F8, F9) 10 échantillons (M5, M6, F7, F8, F9)	Montage : Montage relié à la norme EN 779 Petit montage : section circulaire de 315 mm de diamètre	Neutralisé : DEHS (d_p : 0,014-0,673 μm) Sans neutralisation : DEHS, aérosol d'huile, aérosol ambiant (d_p : 0,014-0,673 μm)	Pour le filtre : 0,16-0,95 m/s Pour le medium : 0,08-0,22 m/s	Taux de pénétration en fonction de la taille des particules : Efficacité initiale	Les informations globales (filtre) et locales (<i>medium</i>) sont collectées	– Seule l'efficacité initiale a été mesurée – Les mesures d'efficacité du filtre et du <i>medium</i> ne sont pas comparées
Karjalainen et al. (2017)	3 filtres ^(d) (F7, H12, H13)	1 filtre électret 1 précipitateur électrostatique à deux étages	Montage : Veine de ventilation	Sans neutralisation : Système de génération d'aérosols imitant les aérosols caractéristiques du trafic (d_p : 3-200 nm)	Vitesse frontale : 0,61-1,34 m/s	Taux de pénétration en fonction de la taille des particules : Efficacité initiale	– Efficacité des filtres appliquée à un aérosol caractéristique du trafic – Étude de la MPPS	Seule l'efficacité initiale a été mesurée

(a) d'après ASHRAE 52-76 (ASHRAE, 1976), (b) d'après ASME : *Code on Nuclear Air and Gas Treatment* (ASME, 2003), (c) d'après ASHRAE 52.2 (ASHRAE, 2017), (d) d'après EN 779 (CEN, 2012).

À la connaissance des auteurs, Hanley *et al.* (1994) est la première étude publiant des mesures d'efficacité de filtration de filtres entiers à l'égard des particules fines. Les auteurs ont mis en évidence une augmentation de l'efficacité de filtration avec la diminution de la taille des particules en dessous de 100 nm et avec l'augmentation de la taille des particules au-dessus de 1 000 nm. Comme observé dans le cas des *media*, la gamme de particules la plus pénétrante (MPPS) se situe entre 100 et 1 000 nm, pour les filtres testés (mécaniques et électrostatiquement chargés). Ils ont également montré que l'efficacité de filtration diminuait à mesure que la vitesse frontale augmentait de 0,65 à 2,25 m/s. Ce résultat a été observé à l'initial et après colmatage. Ils ont également constaté une augmentation de l'efficacité au cours du colmatage pour les filtres mécaniques. Les filtres chargés (dont le *medium* est constitué d'électret) présentaient une efficacité de filtration initiale élevée en raison des charges électrostatiques. Durant le colmatage, cette efficacité diminue en raison de la perte des effets électrostatiques. Ces observations concordent avec celles obtenues sur des *media*.

Aldermann *et al.* (2008) ont étudié précisément l'effet de la vitesse de filtration dans le cas de filtres HEPA. Leurs mesures ont mis en évidence l'effet important de la vitesse de filtration sur deux filtres différents. Ils n'ont cependant rapporté qu'une efficacité globale en fonction du colmatage.

À ce jour, quatre études ont examiné spécifiquement l'efficacité de filtration pour les particules inférieures à 100 nm (Hecker et Hofacre, 2008; Shi *et al.*, 2013; Stephens et Siegel, 2013; Karjalainen *et al.*, 2017). Ils ont tous mesuré uniquement l'efficacité de filtration initiale en fonction de la taille des particules.

Hecker et Hofacre (2008) ont testé un grand nombre de filtres conçus par différents fabricants, et destinés à une utilisation à la fois résidentielle et commerciale. Leurs résultats correspondent aux informations fournies par le fabricant, même si, dans certains cas, ils ont observé une efficacité inférieure à celle indiquée par le fabricant. La Figure 2 illustre certaines de leurs mesures de la pénétration. Une évolution de l'efficacité de filtration entre les différentes classes de filtre (de MERV 6 à MERV 16) est observée. La gamme de particules la plus pénétrante (MPPS) se situe dans la plage 100 – 300 nm. À partir de leurs données expérimentales, les auteurs ont développé une équation empirique afin de prédire la performance du filtre pour un MERV donné.

Shi *et al.* (2013) ont testé des filtres classifiés selon la norme européenne EN 779 (de F9 à M5). Ils ont comparé la mesure de pénétration pour un diamètre de particules de 400 nm (diamètre de particule utilisé pour la norme européenne), pour la taille des particules les plus pénétrantes (MPPS) et pour des particules inférieures à 100 nm avec trois différents aérosols et à différents débits de filtration. Les auteurs ont montré que, pour les particules de taille inférieure à 100 nm, l'augmentation du débit de filtration diminue l'efficacité du filtre. Ils ont également établi que la MPPS était inférieure à 400 nm, un résultat observé à la fois pour des particules neutralisées et pour les particules non neutralisées, et pour toutes les vitesses de filtration testées. Ces résultats concordent avec les résultats obtenus par Hanley *et al.* (1994) et dans le cas des études sur les *media*.

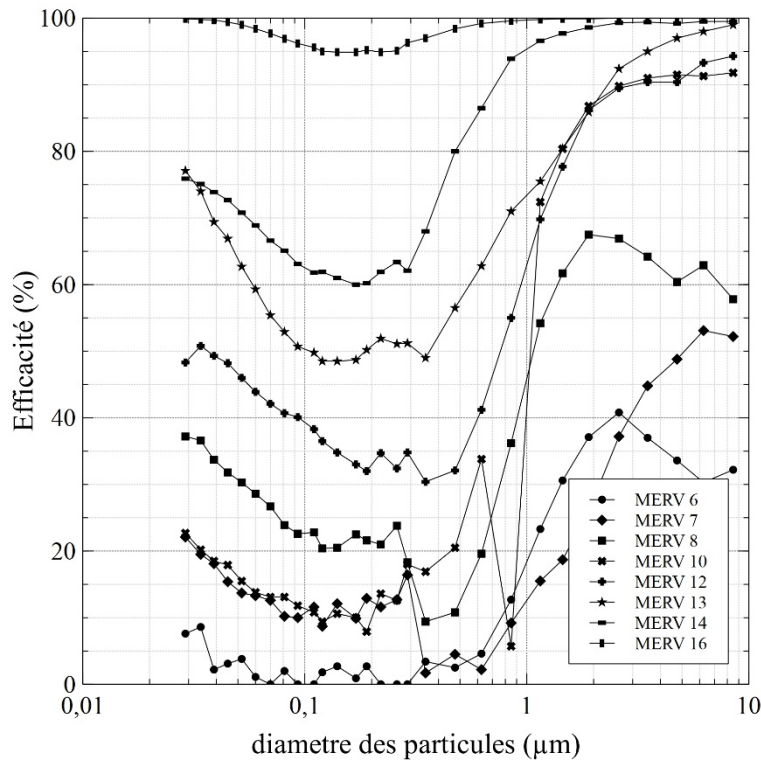


Figure 2. Efficacité de collecte mesurée pour neuf filtres (MERV 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 16; d'après les données de Hecker et Hofacre, 2008).

Stephens et Siegel (2013) se sont intéressés à la performance initiale des filtres (*media* mécaniques et *media* chargés de façon électrostatique) *in situ*, pour des particules allant de 5 à 100 nm (aérosol ambiant). Ils ont mesuré la performance de l'unité de traitement d'air en fonctionnement normal, avec une recirculation d'air à 100 %. Ils n'ont pas pu observer la MPPS pour les filtres mécaniques dans la gamme de particules étudiée. Pour les filtres électrostatiques, la MPPS mesurée se situe entre 20 et 30 nm. Notons aussi que, pour les nanoparticules testées, la performance des filtres électrostatiques n'était pas considérablement supérieure à celle des filtres mécaniques. Les mesures *in situ* obtenues dans cette étude ont l'avantage de montrer la performance réelle des filtres testés. Elles permettent de tenir compte de tous les paramètres pouvant influencer la performance d'un filtre (température, perte de charge, taux d'humidité, vitesse de filtration). L'utilisation d'un aérosol ambiant pour la mesure de pénétration est aussi un bon critère pour l'estimation de la performance réelle du filtre. Cependant, ces paramètres ne peuvent pas être contrôlés, et leurs effets sur la performance ne peuvent pas être identifiés, que ce soit pour la mesure initiale ou au cours de l'utilisation du filtre. Aussi, l'utilisation de l'aérosol ambiant ne permet pas de connaître à tout moment l'aérosol de test : il peut varier en fonction du temps, et son état de charge n'est pas contrôlé. Cette problématique est d'autant plus importante lors de l'utilisation de filtres électrostatiques.

Karjalainen *et al.* (2017) ont étudié cinq filtres commerciaux pour des particules allant de 3 à 200 nm. Deux systèmes de génération (un mode par nucléation et un mode par suie) sont mixés dans une chambre afin de se rapprocher d'un aérosol lié au trafic. Leurs résultats montrent que la taille des particules les plus pénétrantes d'un filtre mécanique classé F7 est supérieure à 200 nm tandis que pour les filtres électrets, la MPPS mesurée était inférieure à 50 nm.

Les six articles présentés dans le Tableau 4 fournissent peu d'informations sur l'efficacité des filtres en fonction des paramètres des particules (charge, forme et composition), des paramètres du filtre (plis, milieu) ou des conditions de fonctionnement (température, taux d'humidité). De plus, généralement, les données d'efficacité en fonction de la taille permettent de mettre en évidence la taille des particules les plus pénétrantes. Et en fait, lorsqu'il est question de l'effet des nanoparticules sur la santé, la MPPS est une des clés pour évaluer la performance d'un filtre.

Une des techniques utilisées pour évaluer la performance de filtres dans leur ensemble est d'étudier le *medium* et d'extrapoler ces résultats au filtre. Deux études (Chang *et al.*, 2015, 2016) ont évalué le niveau de pénétration de cinq *media* électrets utilisés dans les filtres de ventilation. Pour cela, ils ont utilisé des nanoparticules neutralisées et un échantillon de *medium* plat. Leurs données expérimentales montrent que ces filtres sont capables de filtrer ces nanoparticules, et que le taux de pénétration augmente lors de l'augmentation de la vitesse de filtration de 0,05 à 1 m/s. Ils ont aussi établi que, pour les grandes vitesses de filtration utilisées, la courbe du taux de pénétration présente deux modes : une avec un pic à 10-30 nm et l'autre avec un pic à 150-200 nm. Aussi, pour des filtres très chargés électrostatiquement, le premier mode est plus intense que le deuxième, tandis que c'est l'inverse pour des filtres moins chargés électrostatiquement. Ces deux études démontrent l'importance de connaître le comportement du *medium*. Il ne permet pas de connaître exactement le comportement du filtre dans son ensemble dans un système de ventilation (fuites, conditions opératoires), mais il donne les clés pour comprendre son comportement. Notons qu'aucune étude n'a été recensée sur une comparaison de la performance des filtres dans leur ensemble avec celle du *medium* qui le constitue.

L'évolution de la perte de charge sur un filtre dans son ensemble peut être décrite phénoménologiquement selon trois phases : les deux premières sont les mêmes que dans le cas des *media* (filtration en profondeur et filtration en surface). La troisième phase est liée à la réduction de la surface de filtration. Ce phénomène a été peu étudié dans la littérature du fait de sa complexité. En effet, de nombreux paramètres sont mis en jeu, tels que la vitesse de filtration, la distribution en taille des particules filtrées, la structure du filtre et celle du *medium*. Citons cependant Del Fabbro *et al.* (2002) (expérimentalement) et Rebaï *et al.* (2010) (numériquement) qui ont montré que le colmatage du filtre dépendait de la structure du pli du filtre et de la vitesse. De plus, selon leurs conclusions, ces paramètres semblent être liés, ce qui rend difficile l'isolement de chacun d'entre eux. Hasolli *et al.* (2013) ont montré (numériquement) que le nombre de plis influençait l'évolution de la perte de charge lors du colmatage. Leurs mesures ont établi que la perte de charge augmentait plus rapidement lorsque le nombre de plis dans les cartouches testées passait de 70 à 90, pour les deux types de *media* testés. Cependant, aucune étude examinant la performance dynamique de filtres dans leur ensemble avec des nanoparticules n'a été recensée.

2.3 Conclusion

L'étude bibliographique indique clairement que l'état des connaissances sur la performance des filtres en entier en fonction de la taille des particules ultrafines et des nanoparticules est encore très limité. Cette revue de la littérature a déjà fait l'objet d'une publication (Brochot *et al.*, 2019).

Quelques études ont mesuré la performance de filtres dans leur ensemble, soit *in situ*, soit en laboratoire. Les études en laboratoire ont bien mis en évidence l'importance des différents paramètres sur la performance du filtre. Seulement quatre études sont spécifiques aux nanoparticules (trois en laboratoire et une *in situ*), et n'ont fourni que des informations phénoménologiques. Ils ont par exemple montré que la vitesse de filtration influençait très fortement la MPPS. Notons cependant que les tendances observées pour des filtres en entier semblent être conformes à celles de la littérature sur la filtration de *media* à l'égard des nanoparticules.

Les données de la littérature axées sur les *media* fournissent plus de détails sur l'effet des paramètres sur leur performance (par exemple, les paramètres intrinsèques au *medium*, la composition et la morphologie des particules, la vitesse de filtration ou le taux d'humidité). Ces dernières années, un nombre important d'études expérimentales sur la filtration des *media* pour les nanoparticules ont été publiées. Elles concernent les *media* en fibre de verre, les électrets, les *media* utilisés dans les appareils de protection respiratoire, ou des *media* auxquels des nanofibres ont été ajoutées. Ces études mesurent généralement le taux de pénétration du *medium*, la MPPS, ou des mécanismes de collecte particuliers (collecte par diffusion Brownienne, rebond thermique).

La MPPS se situe généralement dans la plage de 100-300 nm dans le cas des *media* mécaniques, avec un diamètre de fibre de l'ordre du micromètre à une dizaine de micromètres, une vitesse frontale comprise entre quelques centimètres et une dizaine de centimètres, et à température et pression normales. L'attraction électrostatique, mécanisme de collecte qui s'ajoute lors de l'utilisation d'électrets, permet d'améliorer l'efficacité de la filtration sans en affecter sa résistance à l'écoulement. Les effets de la charge des particules sur la performance des *media* ont été aussi étudiés, montrant que la MPPS est largement affectée par les charges portées par le *medium* et les particules. Ils ne sont cependant pas encore bien compris.

À la connaissance des auteurs, il n'existe pas d'étude établissant un lien entre la performance (taux de pénétration en fonction la taille des nanoparticules) de filtres en entier et celle de leur *medium*. Toutes les études recensées ont été menées sur des filtres entiers ou sur des échantillons de *medium*.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif principal de ce projet était de mettre en place une procédure de mesure fiable de la performance des filtres mécaniques utilisés en ventilation pour capter les particules de taille inférieure à 300 nm. Le banc réalisé dans cette étude est validé par le banc ASHRAE pour la mesure de la performance des filtres mécaniques.

La réalisation de cet objectif s'est donc effectuée en trois étapes :

1. Concevoir et mettre en place un banc d'essai et développer une procédure afin de mesurer la performance de filtres mécaniques. Le banc de mesure conçu et réalisé durant ce projet, qui sera nommé *Small Filter* dans ce rapport, est présenté dans la section méthodologie du document. Sa qualification et la procédure de mesure utilisée dans ce projet y sont aussi présentées.
2. Valider les mesures du banc d'essai avec des données normatives. La validation a été effectuée par la comparaison des mesures à celles obtenues sur un banc ASHRAE. Le banc de type ASHRAE est présenté dans la section méthodologie. Nommé *Big Loop* dans ce document, il a été spécifiquement modifié pour son utilisation avec des particules nanométriques. Sa qualification et la procédure de mesure sont aussi présentées dans la section méthodologie. La comparaison des taux de pénétrations des deux bancs est présentée dans la section résultats.
3. Mesurer la performance de 5 filtres mécaniques en termes d'efficacité et de perte de charge, selon leurs caractéristiques et la vitesse de filtration. En effet, cette validation a permis de compiler la performance de cinq filtres différents, reflétant une large gamme de filtres. La présentation de la performance des filtres testés figure dans la section résultats.

L'originalité de ce travail repose sur l'obtention de mesures d'efficacité reproductibles en fonction de la taille des particules en utilisant une approche avec des particules polydispersées. Ainsi, ces mesures permettent de combler les lacunes quant à la qualification de l'exposition professionnelle des travailleurs aux particules ultrafines et aux nanoparticules. Le banc de test conçu à l'occasion de ce projet permettra par la suite d'étudier la performance de filtres selon différentes conditions d'utilisation : la vitesse de filtration, mais aussi le taux d'humidité relative, le temps d'utilisation, etc.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 Banc d'étude des paramètres – Banc *Small Filter*

Ce premier banc de test a été construit au laboratoire de filtration des particules de l'Université Concordia. Ce banc de test a permis de mesurer la performance des filtres en fonction de la vitesse de mesure. Il permettra par la suite de faire des études paramétriques sur la performance des filtres en fonction de la vitesse, du taux d'humidité, du temps d'utilisation, etc.

4.1.1 Description du banc

Le banc est présenté dans la Figure 3. Il est constitué d'une veine de section de 305 mm x 305 mm (12 pouces x 12 pouces).

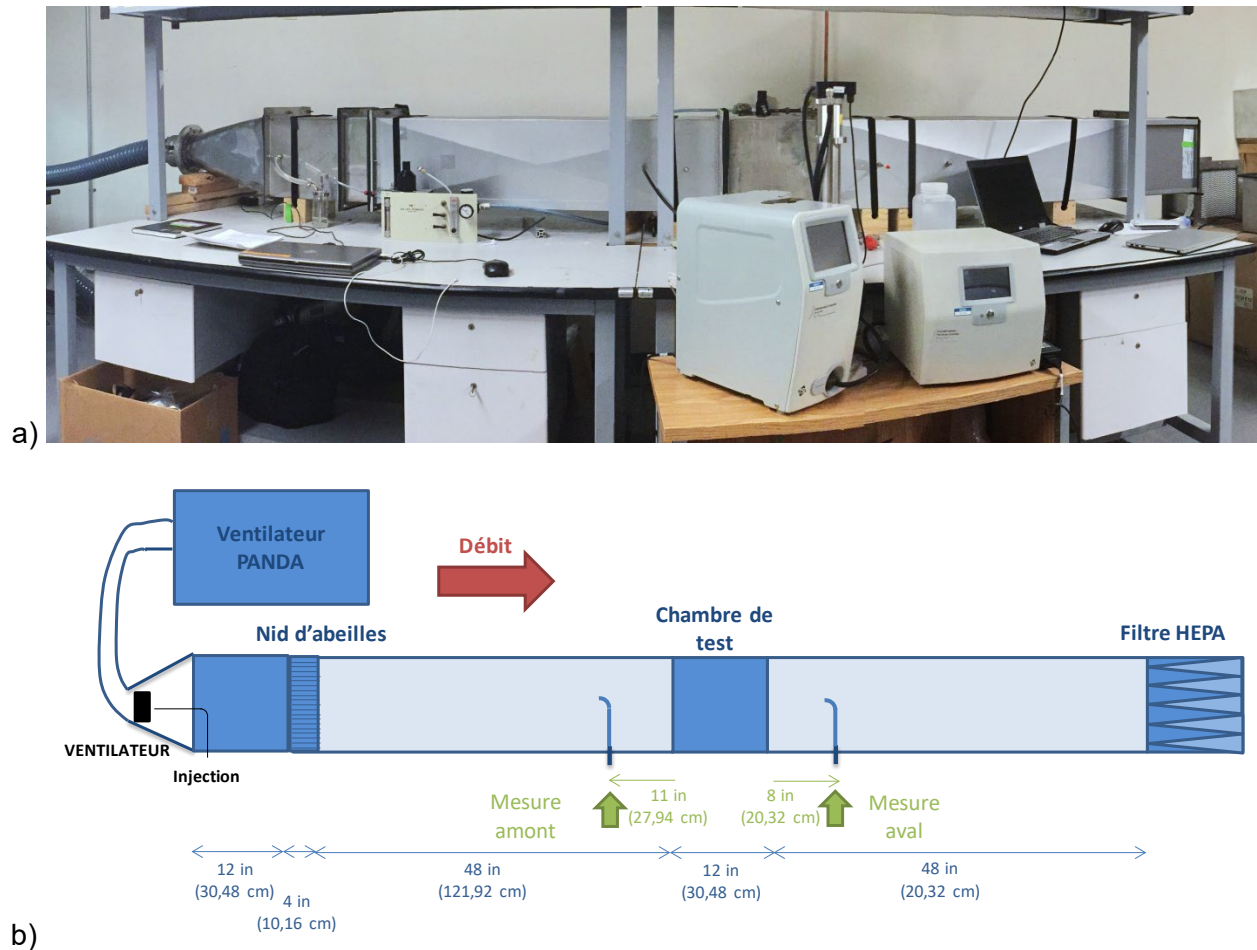


Figure 3. a) Photo et b) schéma du banc de test *Small Filter*.

Le banc de test *Small Filter* se décompose en quatre parties. La première partie permet de régler la vitesse de mesure pour la performance du filtre par le réglage du débit dans la veine à l'aide d'un ventilateur PANDA de TSI (PAN341). La deuxième partie permet de générer les particules de test, de les introduire dans le banc par une canne d'injection et de les homogénéiser dans la section de test par l'utilisation d'un ventilateur et d'une section en nid d'abeilles. La troisième partie, la chambre de test, permet d'installer le filtre à tester dans le banc. Deux cannes de prélèvement identiques, une en amont et une en aval, permettent l'échantillonnage des aérosols. La mesure de la pénétration étant définie comme le ratio des concentrations en amont et en aval, l'erreur liée à la procédure de prélèvement est donc négligeable. Ensuite, un filtre HEPA en fin de veine permet de collecter un maximum de particules avant le rejet du flux d'air dans le laboratoire.

Six points de fonctionnement ont été utilisés durant le projet. La Figure 4 présente les points de mesure sur la courbe de fonctionnement du ventilateur PANDA.

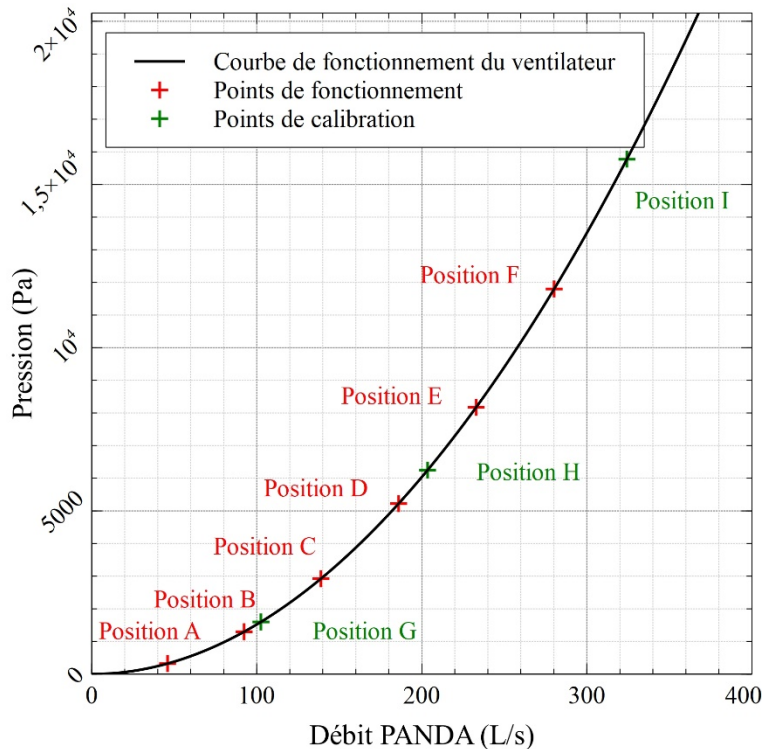


Figure 4. Points de fonctionnement du ventilateur PANDA de TSI.

Les particules de chlorure de sodium (NaCl) sont générées à l'aide de deux générateurs BGI 6-jets Collision (BGI Inc Waltham, MA) réglés à 207 kPa (30 psi) et utilisés avec une solution de NaCl à 1,7 % v/v. Le dispositif génère alors des particules de NaCl polydispersées ayant un diamètre allant de 20 nm à environ 500 nm et centré à 40-50 nm. Il est à noter que, étant donné la faible inertie des aérosols étudiés, un prélèvement isocinétique n'est pas nécessaire.

Le taux de pénétration est ainsi mesuré sur le banc *Small Filter* pour des particules allant de 20 à 500 nm à l'aide du SMPS pour les filtres 12 po x 12 po et à des vitesses allant de 0,25 à 1,50 m/s.

4.1.2 Qualification du banc

En s'inspirant de la norme ASHRAE 52.2, des mesures de qualification du banc ont été mises en œuvre. Elles permettent de s'assurer de l'homogénéité de la vitesse de mesure et de la génération des aérosols. À la suite de cette qualification, un protocole de mesure a été établi.

La première étape de la qualification consistait à effectuer des mesures afin de connaître précisément la gamme de vitesses accessibles par le ventilateur, l'étalonnage de ces vitesses en fonction du moteur et leur homogénéité dans la section de test. Ces mesures ont été obtenues par l'utilisation de l'anémomètre de TSI 9535-A VelociCalc. Cet instrument a une plage de mesure allant de 0 à 30 m/s, avec une précision de lecture soit de 3 % ou soit de 0,015 m/s (la plus grande valeur des deux). Les mesures ont été effectuées pour trois débits du PANDA (positions G, H et I), sur neuf points de la section de test (Figure 5).

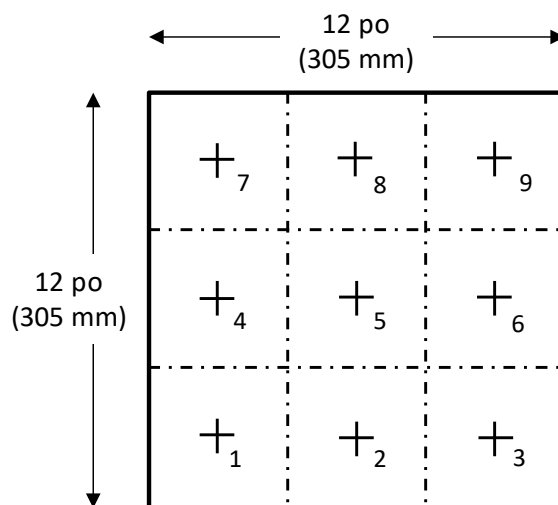
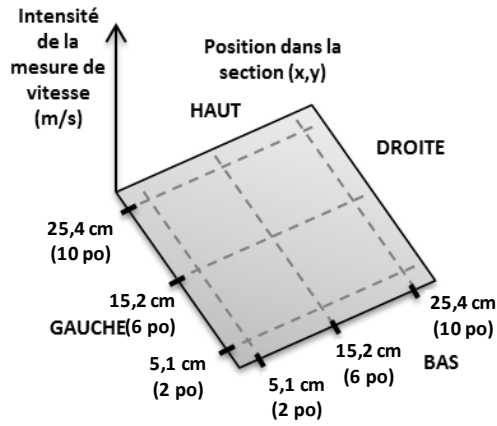


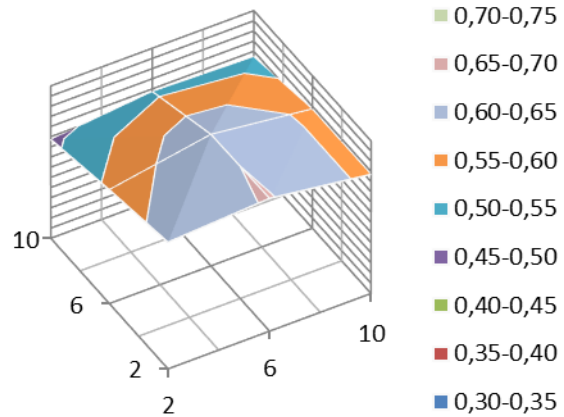
Figure 5. Grille de positionnement des neuf points de mesure pour l'uniformité des vitesses de mesure et de la dispersion des aérosols (conformément à la norme ASHRAE 52.2) sur le banc de test *Small Filter*.

Chaque résultat est une moyenne de trois mesures distinctes de vitesse effectuées durant une minute. Le coefficient de variation est alors calculé sur les neuf mesures de la section et pour les trois configurations. Conformément à la norme ASHRAE, le coefficient de variation (CV) doit être inférieur à 10 % pour les trois configurations testées. Une visualisation des résultats d'uniformité de vitesse est présentée dans la Figure 6.

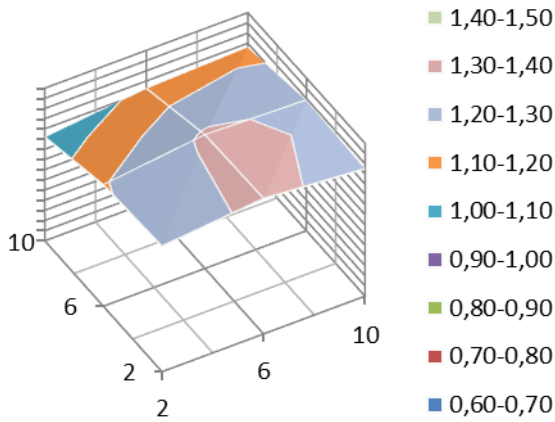
a) Positionnement dans la section de test



b) Position G : CV = 10 %



c) Position H : CV = 8 %



d) Position I : CV = 8 %

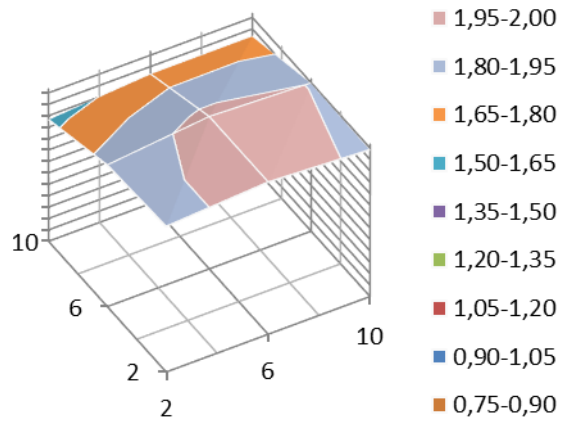


Figure 6. Moyenne des tests d'homogénéité des vitesses (en m/s) en fonction de la position dans la section (a) et selon les trois configurations (b, c et d) sur le banc de test *Small Filter*.

Les mesures de vitesse sont ensuite moyennées sur les neuf points dans le but d'obtenir une régression linéaire de la vitesse mesurée en fonction du débit du PANDA (Figure 7).

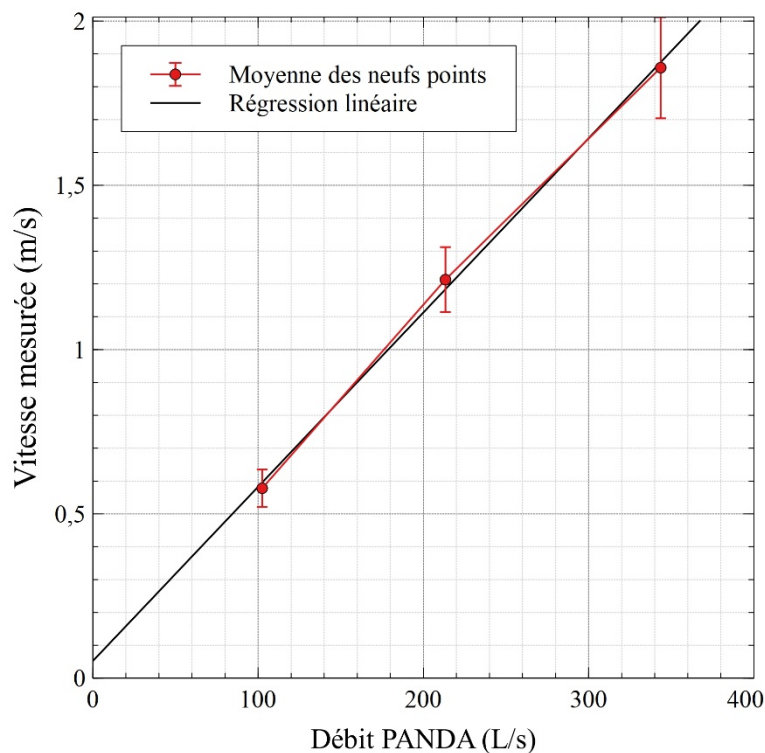


Figure 7. Mesure de la vitesse en fonction du débit PANDA pour le banc de test *Small Filter*, avec régression linéaire.

Selon cette régression, le banc de test permet donc de tester des filtres à des vitesses de mesure allant de 0,25 à 1,50 m/s. Les paramètres PANDA utilisés durant les tests et obtenus à l'aide de la régression linéaire sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5. Paramètre du contrôleur du ventilateur en fonction de la vitesse de test sélectionnée

Vitesse sélectionnée (m/s)	Réglage du contrôleur
0,25	Position A
0,50	Position B
0,75	Position C
1,00	Position D
1,25	Position E
1,50	Position F

Ensuite, la génération des aérosols, sa stabilité et son homogénéité granulométrique sur la section ont été testées. Dans un premier temps, la quantité d'aérosols et la stabilité de la génération ont été mesurées au centre de la section pour trois réglages du contrôleur du ventilateur : 0,60 (Position G), 1,18 (Position H) et 1,77 m/s (Position I). Les résultats ont été obtenus à l'aide du SMPS et du CPC 3775 et sont présentés dans la Figure 8. Les mesures de la granulométrie des neuf points ont été moyennées (courbe noire), puis la moyenne a été maximisée et minimisée de 15 % (courbes rouges).

Notons que la concentration totale en aérosol est stable pendant le temps d'observation. La granulométrie est centrée autour de 50 nm dans les trois configurations. Le coefficient de variation des neuf mesures a ensuite été calculé sur la concentration totale donnée par le SMPS, sur la granulométrie séquencée en deux, ou séquencée en trois gammes de taille. Les coefficients de variation, présentés dans le Tableau 6, sont tous inférieurs à 15 %, comme préconisé dans la norme ASHRAE.

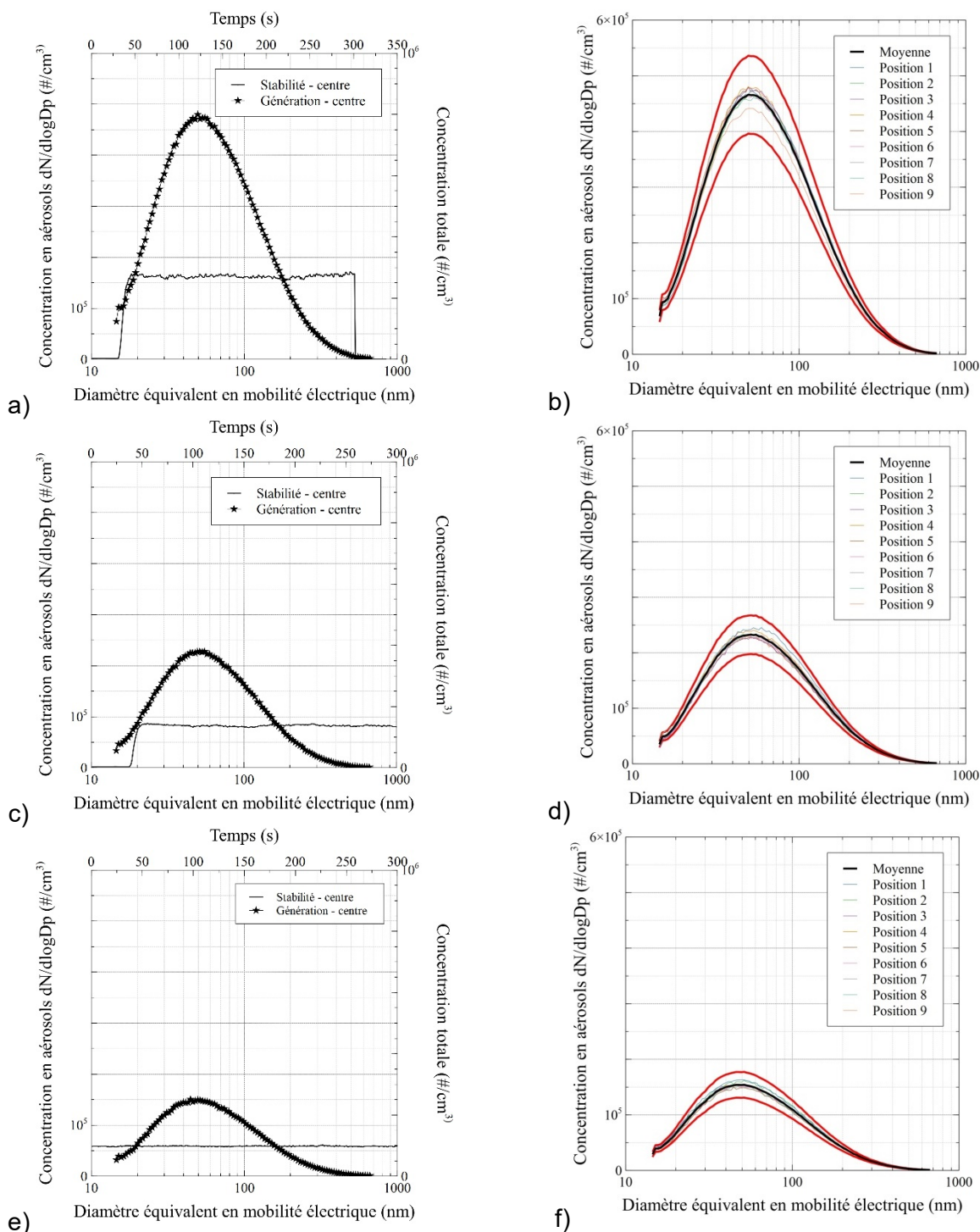


Figure 8. Distribution des aérosols générés, concentration totale (au centre de la section) et distribution des aérosols aux neuf points de la section pour le ventilateur en position G (a et b), en position H (c et d) et en position I (e et f).

Tableau 6. Coefficient de variation (%) calculé pour les deux générations évaluées sur le banc de test *Small Filter*

		Configuration du ventilateur		
		Position G	Position H	Position I
Concentration totale		2	3	3
Granulométrie divisée en deux parties	De 14,6 à 38,5 nm	2	3	3
	De 40,0 à 514 nm	3	3	3
Granulométrie divisée en trois parties	De 14,6 à 25 nm	3	4	4
	De 25,9 à 53,3 nm	2	2	3
	De 55,2 à 514 nm	3	4	3

4.1.3 Méthodologie de mesure

Chaque filtre testé est mesuré sans conditionnement préalable et un joint d'étanchéité est installé sur le contour du filtre à tester afin de supprimer l'effet d'éventuelles fuites entre le filtre et la conduite. Lors de son installation dans le banc de test, un ruban adhésif est ajouté entre le filtre et la conduite.

Les mesures de performance sont alors obtenues selon la procédure suivante. Après avoir rempli les générateurs de solution de NaCl et vérifié le fonctionnement des ventilateurs situés dans la zone de génération, le ventilateur est mis en route à la première vitesse de mesure puis la génération est réglée à 207 kPa (30 psi) et sa stabilisation est vérifiée. Les mesures de granulométrie sont ensuite mesurées en amont du filtre à tester (4 balayages), en aval du filtre (4 balayages) et en amont du filtre (2 balayages). Le ventilateur est ensuite réglé à la vitesse de mesure suivante et la stabilisation de la génération est attendue. Les mesures de granulométries sont ensuite effectuées, selon le même processus et pour toutes les vitesses de mesure.

L'instrumentation utilisée, son fonctionnement et ses réglages sont présentés à l'annexe A. Les balayages en amont sont comparés afin de vérifier la stabilité de la génération sur toute la période de mesure. Le taux de pénétration est obtenu par le rapport des concentrations moyennes en aval et en amont du filtre. Les résultats présentés dans la suite de ce rapport sont la moyenne et l'écart-type mesurés des deux mesures obtenues sur les trois filtres (N = 6). Pour chacun des trois filtres testés, deux mesures de la pénétration ont été effectuées. Elles ont permis de vérifier la reproductibilité des tests. Elles ont aussi permis de vérifier si un effet de colmatage était observé. Les résultats des deux mesures sur un même filtre et dans toutes les configurations (excepté pour le filtre 5) sont présentés en annexes. Ils nous permettent d'affirmer qu'il n'intervient pas de phénomène de colmatage durant nos expérimentations.

Dans le cas particulier du filtre 5 (filtre HEPA), la mesure de pénétration se fait de manière différente, du fait de sa grande efficacité. La génération globale des aérosols est utilisée pour faire la mesure de pénétration du filtre aux différentes vitesses. Dans ce cas, toutes les

particules de l'aérosol généré sont utilisées pour la mesure de pénétration. La génération globale est alors approximée à un aérosol peu polydispersé, centré à 50 nm. La génération globale est mesurée (par le SMPS), puis la mesure de la concentration totale en aérosols (par le CPC 3752 seul) en amont (pendant 2 minutes) en aval (pendant 10 minutes) et en amont (pendant 2 minutes).

Les concentrations en amont sont comparées afin de vérifier la stabilité de la génération sur toute la période de mesure. Le taux de pénétration global est obtenu par le rapport des concentrations moyennes en amont et en aval du filtre. Les résultats présentés dans la suite de ce rapport sont la moyenne et l'écart-type mesurés sur trois tests sur un même filtre (N = 3).

Aussi, une mesure de pénétration en fonction du diamètre de particule est effectuée pour trois tailles sélectionnées (52,3 nm; 107,5 nm; 191,1 nm) et à une vitesse de 1,50 m/s. Le classificateur électrostatique est alors utilisé pour sélectionner une taille des particules, et le CPC est utilisé pour la mesure des concentrations. La concentration est mesurée dans un premier temps en amont du filtre (pendant 2 minutes), en aval (pendant 30 minutes) et en amont (pendant 2 minutes). Les résultats présentés dans la suite de ce rapport sont la moyenne et l'écart-type mesurés sur trois tests sur un même filtre (N = 3).

4.2 Banc d'inspiration ASHRAE – Banc *Big Loop*

Un second banc de test, basé sur la norme ASHRAE 52.2, a permis la mesure de performance de filtres en suivant la logique des tests normatifs.

4.2.1 Description du banc

Le banc de test est présenté dans la Figure 9. Il est constitué d'une veine de recirculation de section 610 mm x 610 mm (24 pouces x 24 pouces), conçue pour que le flux à l'arrivée sur le filtre soit le plus laminaire possible et pour que le débit de filtration soit réglable et modifiable.

Selon les exigences de la norme ASHRAE 52.2 (2017), les finitions intérieures du matériau sont lisses et ses parois sont suffisamment solides pour conserver leur forme lors des mesures en pression. Le banc entier est monté selon une symétrie axiale et isolé des vibrations.

Selon la norme ASHRAE, le banc doit se décomposer en six parties. La première partie du banc permet de régler le débit et donc la vitesse de mesure. Dans la deuxième partie se trouve le dispositif d'injection des aérosols, le système d'homogénéisation des particules ainsi qu'une canne de prélèvement des aérosols pour la mesure en amont. La troisième section est composée du filtre à tester et du filtre final, nécessaires pour la mesure de la rétention et la mesure de l'efficacité du filtre au cours du colmatage. La longueur disponible dans la salle de test étant insuffisante pour le banc, une section coudée a été ajoutée. La section suivante permet le prélèvement de la mesure en aval des concentrations en aérosols. La dernière section du banc de test comprend un filtre HEPA avant une redirection vers l'extérieur, ou vers l'intérieur de la salle d'expérimentation. L'air est ensuite recyclé.

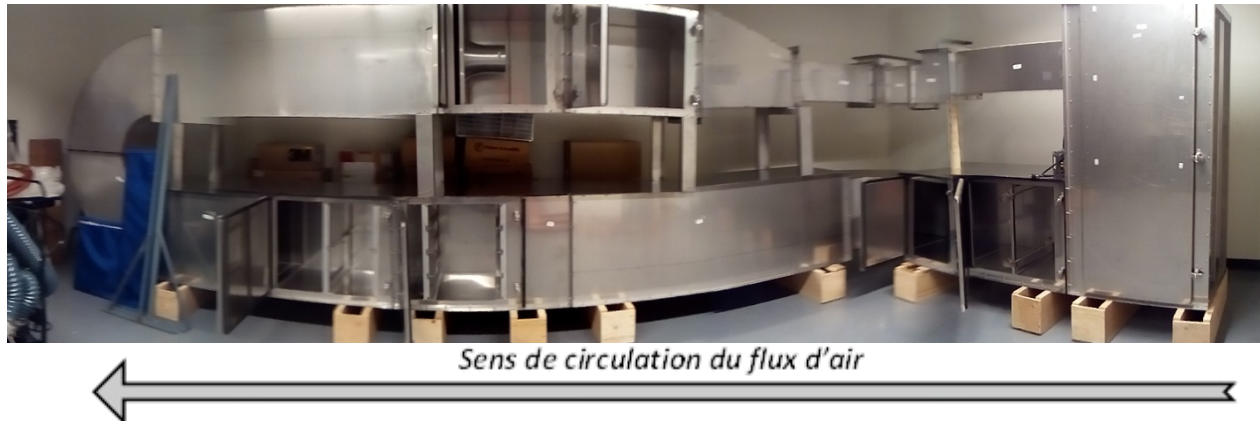


Figure 9. Photo du banc de test ASHRAE.

4.2.2 Modification de l'installation pour une utilisation avec des aérosols nanométriques

Dans le cas de la présente étude, ce banc a été adapté à la mesure pour des particules nanométriques. Une description précise de cette adaptation permettant les mesures de pénétration face à des particules nanométriques est présentée ici (Figure 10).

Le banc *Big Loop* se décompose en trois parties. La première partie est composée d'un ventilateur centrifuge permettant de réguler le débit dans le banc de recirculation. La deuxième partie permet, après avoir filtré l'air avec un filtre HEPA, de générer un aérosol de NaCl à l'aide de deux générateurs Collison (BGI Inc., Waltham, MA) (un générateur 6 jets et un générateur 24 jets). Les deux collisions, réglés à 207 kPa (30 psi) et utilisés avec une solution de 1,7 % v/v de NaCl, permettent de générer des particules polydispersées de 20 nm à environ 500 nm et centrée à 50 nm. Un dispositif de deux ventilateurs et le coude de déviation à 90 ° dans le banc de test permettent une homogénéisation des particules sur la section du banc. La troisième partie est composée de la zone de test dans laquelle est installé le filtre à tester. Une canne de prélèvement en aval permet l'échantillonnage de l'aérosol avec et sans le filtre. Ici aussi, étant donné la faible inertie des aérosols étudiés, un prélèvement isocinétique n'est pas nécessaire. Le flux d'air est ensuite réacheminé jusqu'au ventilateur et filtré avant la partie génération.

Le taux de pénétration est ainsi mesuré sur le banc *Big Loop* pour des particules allant de 20 à 500 nm, à l'aide du SMPS pour les filtres 24 x 24 et à des vitesses allant de 0,75 à 1,00 m/s.

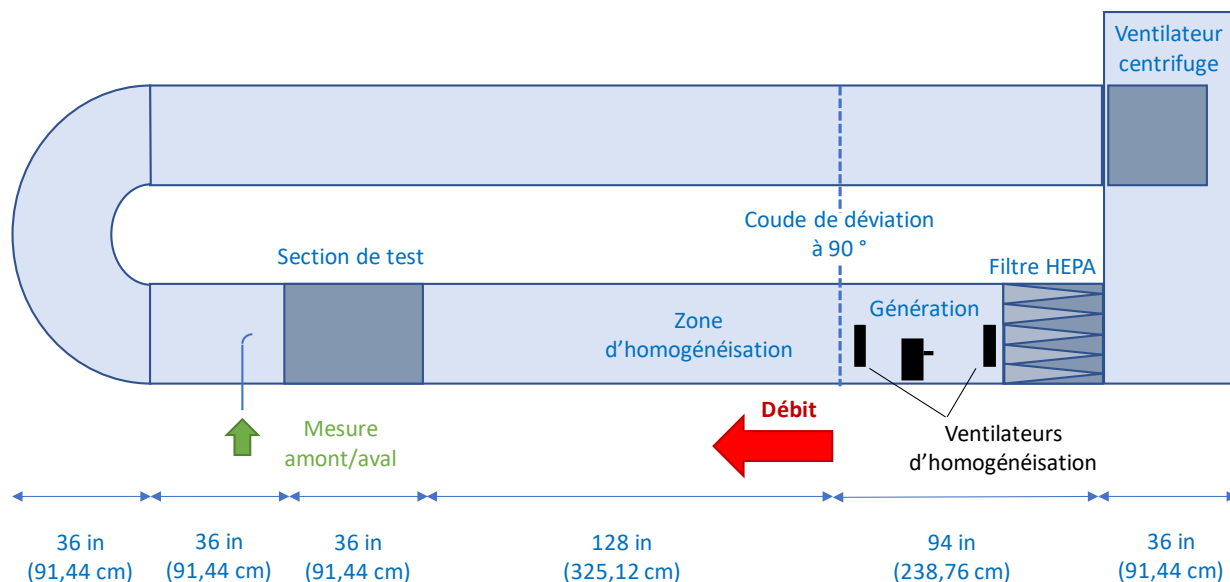


Figure 10. Schéma du banc de test *Big Loop*.

4.2.3 Qualification du banc

Comme précédemment, en s'inspirant de la norme ASHRAE 52.2, des mesures de qualification du banc de test, faisant entrer en jeu l'étanchéité du banc, la vitesse de mesure et la génération des aérosols, ont été effectuées. À la suite de cette qualification, un protocole de mesure a ensuite été institué.

Afin de limiter l'effet de particules non générées, l'étanchéité du banc a été testée. Celle-ci a été obtenue par la mesure du bruit de fond du banc à l'aide du compteur de particules CPC TSI 3775 réglé à un débit de 1,5 L/min. Les mesures sont présentées dans le Tableau 7.

Tableau 7. Mesures du bruit de fond du banc de test *Big Loop*

	Temps de mesure (minute)	Concentration totale (particules/cm ³)		Total des particules (pour 8 min)
		Moyenne	Écart-type	
Air ambiant	5	4,32 x 10 ³	0,07 x 10 ³	
Banc – moteur éteint	4	1,31 x 10 ³	0,03 x 10 ³	
Banc – moteur à 45 Hz	8	20,52 x 10 ⁻⁴	0,02 x 10 ⁻⁴	5 particules
Banc – moteur à 35 Hz	8	8,21 x 10 ⁻⁴	0,01 x 10 ⁻⁴	2 particules
Banc – moteur à 25 Hz	8	4,10 x 10 ⁻⁴	0,01 x 10 ⁻⁴	1 particule
Air ambiant	5	3,87 x 10 ³	0,11 x 10 ³	

Ces mesures de concentration montrent que le banc de mesure ne génère pas de particules qui pourraient gêner la mesure de performance des filtres avec des particules différentes de celles intentionnellement générées.

La deuxième étape de la qualification consistait à effectuer des mesures afin de connaître précisément la gamme de vitesses accessibles par le ventilateur, l'étalonnage de ces vitesses en fonction du moteur et leur homogénéité dans la section de test. Ces mesures ont été obtenues par l'utilisation de l'anémomètre de TSI 9535-A VelociCalc et ont été effectuées pour trois paramètres du moteur (à 25 Hz, à 35 Hz et à 45 Hz), et sur neuf points de la section de test (Figure 11).

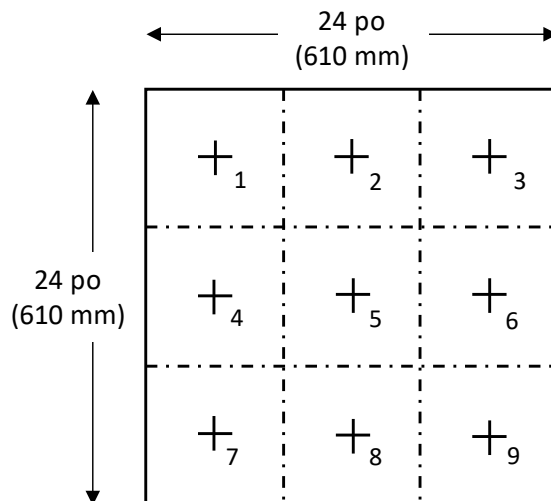
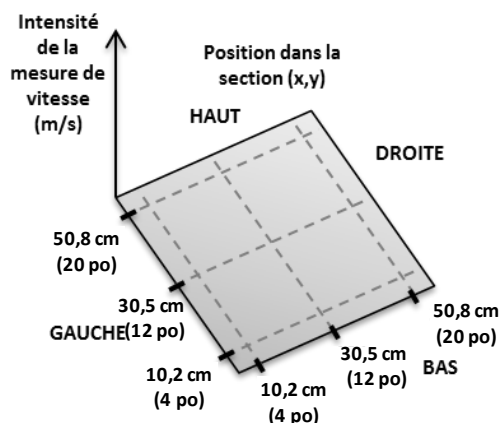


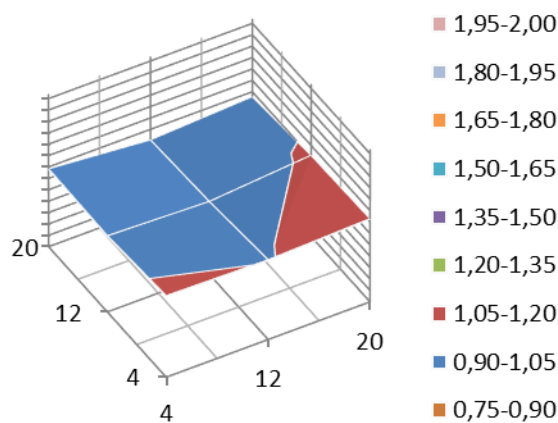
Figure 11. Grille de positionnement des neuf points de mesure pour l'uniformité des vitesses de mesure et la dispersion des aérosols (conformément à la norme ASHRAE 52.2), sur le banc de test *Big Loop*.

Chaque résultat est une moyenne de trois mesures distinctes effectuées durant une minute. Le coefficient de variation est alors calculé sur les neuf mesures de la section et pour les trois configurations (moteur à 25 Hz, à 35 Hz et à 45 Hz). Conformément à la norme ASHRAE, le coefficient de variation (CV) doit être inférieur à 10 % pour les trois configurations testées. Une visualisation des résultats d'uniformité des vitesses est présentée dans la Figure 12.

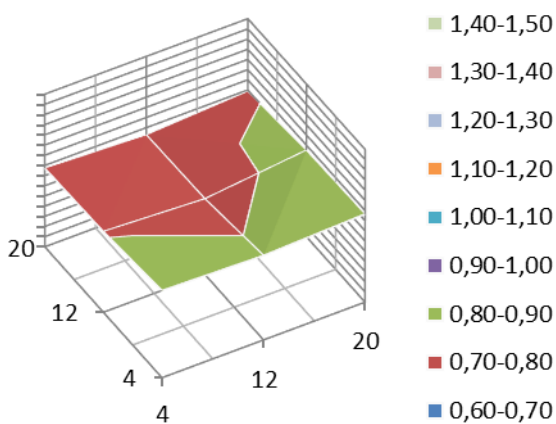
a) Positionnement dans la section de test



b) Moteur réglé à 45 Hz : CV = 6 %



c) Moteur réglé à 35 Hz : CV = 6 %



d) Moteur réglé à 25 Hz : CV = 9 %

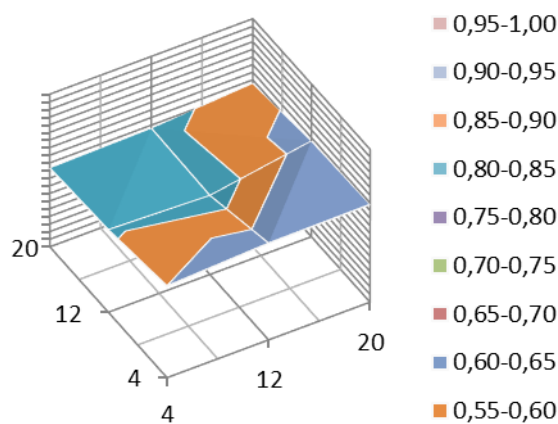


Figure 12. Moyenne des tests d'homogénéité des vitesses (en m/s) en fonction de la position dans la section (a) et selon les trois configurations (b, c et d), sur le banc *Big Loop*.

La mesure de la vitesse est ensuite moyennée sur les neuf points dans le but d'obtenir une régression linéaire de la vitesse mesurée en fonction de la fréquence du moteur (Figure 13).

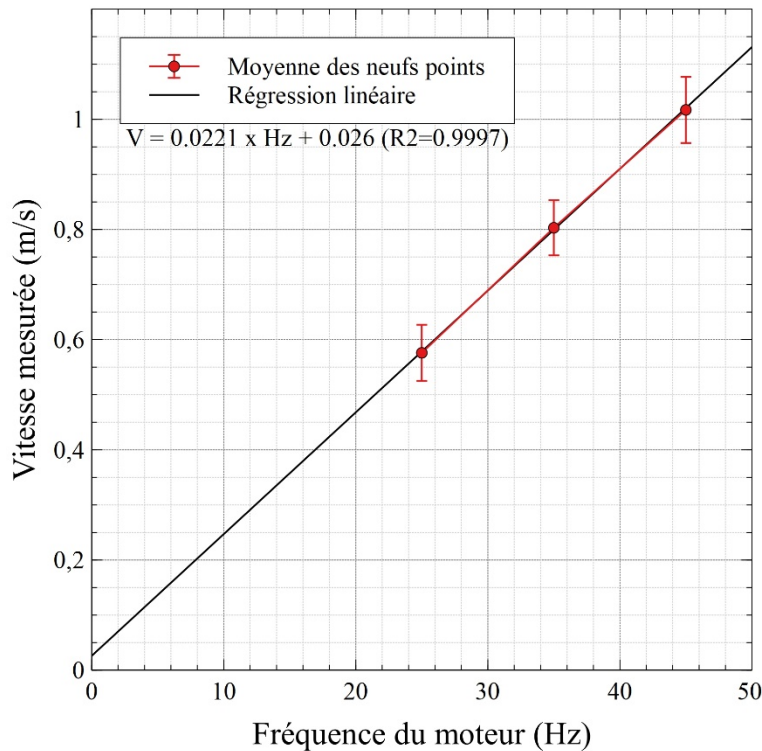


Figure 13. Mesure de la vitesse en fonction de la fréquence du moteur pour le banc de test Big Loop – régression linéaire.

Selon cette régression, le banc permet donc de tester des filtres à des vitesses de mesure allant de 0,6 à 1 m/s. Lors des essais, deux vitesses de mesure seront utilisées : 0,75 m/s et 1,00 m/s, et les fréquences du moteur permettant de les régler sont respectivement de 33 Hz et de 44 Hz.

Enfin, la quantité, la stabilité et l'homogénéité des aérosols générés ont été validées. Dans un premier temps, la quantité d'aérosols et la stabilité de la génération ont été mesurées au centre de la section pour deux vitesses de mesures : 0,75 m/s et 1,00 m/s. Les résultats ont été obtenus à l'aide du SMPS et du CPC 3775 et sont présentés dans la Figure 14. Notons que la concentration en aérosol est importante et qu'elle est restée stable au cours d'une période d'observation de 10 minutes. La granulométrie est centrée à 40-50 nm dans les deux configurations.

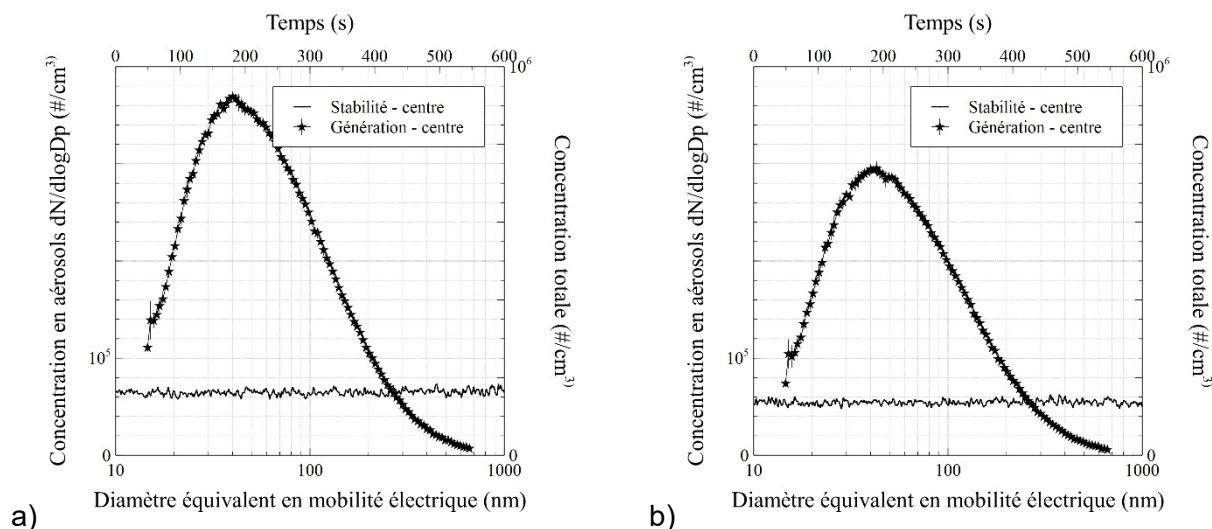


Figure 14. Distribution des aérosols générés et concentration totale au centre de la section de test, aux vitesses de mesure de a) 0,75 m/s (33 Hz) et b) 1,00 m/s (44 Hz) sur le banc Big Loop.

L'homogénéité granulométrique de la génération des aérosols a ensuite été mesurée dans toute la section (neuf points) à l'aide du SMPS. Les résultats ont été obtenus pour les deux vitesses de mesure (0,75 et 1,00 m/s) (Figure 15). Les mesures de la granulométrie des neuf points ont été moyennées (courbe noire) puis la moyenne est maximisée et minimisée de 15 % (courbes rouges).

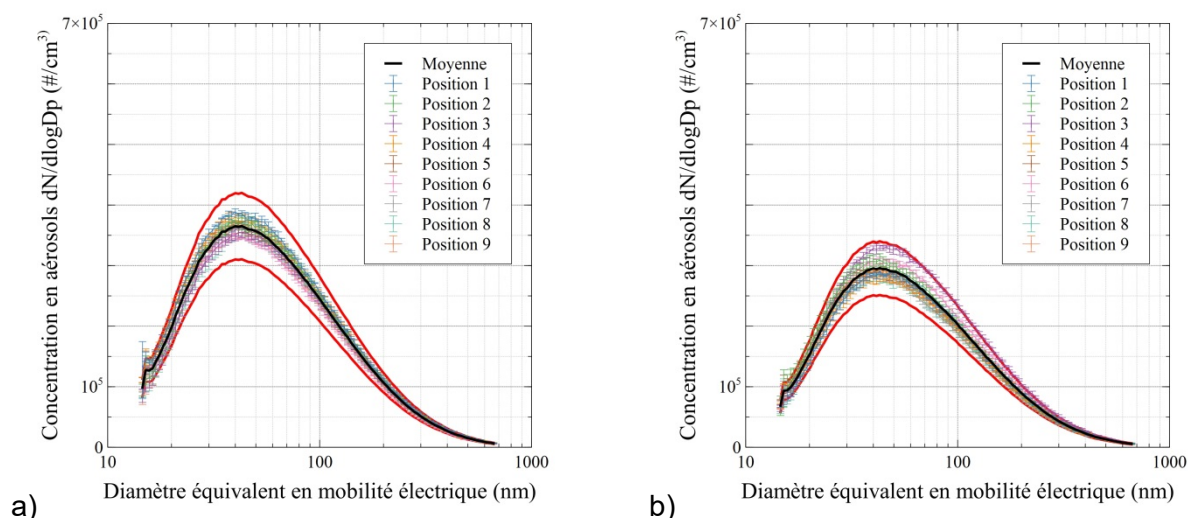


Figure 15. Distribution des aérosols générés aux neuf points de la section de test, aux vitesses de mesure de a) 0,75 m/s (33 Hz) et b) 1,00 m/s (44 Hz) sur le banc Big Loop.

Le coefficient de variation des neuf mesures a ensuite été calculé sur la concentration totale donnée par le SMPS, sur la granulométrie séquentielle en deux ou en trois gammes de taille.

Les coefficients de variation, présentés dans le Tableau 8, sont tous inférieurs à 15 %, comme préconisé dans la norme ASHRAE.

Tableau 8. Coefficient de variation (%) calculé pour les deux générations d'aérosols évaluées sur le banc de test *Big Loop*

		Vitesse de mesure	
		à 0,75 m/s	à 1,00 m/s
Concentration totale		4	5
Granulométrie divisée en deux parties	De 14,6 à 38,5 nm	5	4
	De 40,0 à 514 nm	3	7
Granulométrie divisée en trois parties	De 14,6 à 25 nm	7	5
	De 25,9 à 53,3 nm	4	5
	De 55,2 à 514 nm	3	7

4.2.4 Méthodologie de mesure

Chaque filtre testé est mesuré sans conditionnement préalable, un joint est installé sur le contour du filtre à tester afin de supprimer l'effet d'éventuelles fuites entre le filtre et la conduite. Lors de son installation dans le banc, la porte de la section de test va comprimer le joint et supprimer les fuites.

Les mesures de performance sont alors obtenues selon la procédure suivante : Après avoir rempli les générateurs de solution de NaCl et vérifié le fonctionnement des ventilateurs de la génération, le ventilateur est mis en route à 33 Hz (0,75 m/s) puis la génération est réglée à 207 kPa (30 psi) et sa stabilisation est vérifiée pendant 5 minutes. Les mesures de granulométrie sont ensuite mesurées en aval, sans le filtre à tester (4 balayages), avec le filtre à tester (4 balayages) et sans le filtre à tester (2 balayages). Le ventilateur est ensuite réglé à 44 Hz (1,00 m/s) et la stabilisation de la génération est attendue. Les mesures de granulométrie sont ensuite effectuées en aval, sans le filtre à tester (4 balayages), avec le filtre à tester (4 balayages) et sans le filtre à tester (2 balayages).

L'instrumentation utilisée, son fonctionnement et ses réglages sont présentés dans l'annexe A. Les balayages sans filtre sont comparés afin de vérifier la stabilité de la génération sur toute la période de mesure. Le taux de pénétration est obtenu par le rapport des concentrations moyennes avec le filtre et sans le filtre. Les résultats présentés dans la suite de ce rapport sont la moyenne et l'écart-type mesurés sur trois filtres (N = 3). Pour chacun des trois filtres testés, deux mesures de pénétration ont été effectuées. Elles ont permis de vérifier la reproductibilité de tests. Elles ont aussi permis de vérifier si un effet de colmatage était observé. Les résultats des deux mesures sur un même filtre et dans toutes les configurations (excepté pour le filtre 5) sont présentés en annexes. Ils nous permettent d'affirmer qu'il n'intervient pas de phénomène de colmatage durant nos expérimentations.

Dans le cas particulier du filtre 5 (filtre HEPA), la mesure de pénétration se fait de manière différente, du fait de sa grande efficacité. La génération globale des aérosols est utilisée pour faire la mesure de pénétration du filtre aux deux différentes vitesses. Dans ce cas, toutes les particules de l'aérosol généré sont utilisées pour la mesure de pénétration. La génération globale est alors approximée à un aérosol peu polydispersé, centré à 50 nm. La génération globale est mesurée (par le SMPS), puis la mesure de la concentration totale en aérosols (par le CPC 3752 seul) sans filtre (pendant 2 minutes) avec filtre (pendant 10 minutes) et sans filtre (pendant 2 minutes).

Les concentrations en amont sans filtre sont comparées afin de vérifier la stabilité de la génération sur toute la période de mesure. Le taux de pénétration global est obtenu par le rapport des concentrations moyennes avec le filtre et sans le filtre. Les résultats présentés dans la suite de ce rapport sont la moyenne et l'écart-type mesurés sur trois tests sur un même filtre (N = 3).

4.3 Filtres sélectionnés pour les tests

Cinq filtres différents provenant d'un même fournisseur ont été testés pour valider le banc de test conçu pour ce projet. Les filtres et leurs caractéristiques, données par le fournisseur, sont présentés dans le Tableau 9. Les filtres 1, 2, et 3 sont classés MERV 8 (filtration primaire), le filtre 4 est classé MERV 14 (filtration secondaire) et le filtre 5 a les caractéristiques d'un filtre HEPA (filtration très haute efficacité). Les informations en rouge sont des valeurs estimées selon les informations du fournisseur.

Les filtres 1, 2, 3 et 4 sont composés d'un *medium* filtrant inséré dans une armature en carton. Lors de son utilisation en filtration générale, ceux-ci sont simplement insérés dans le caisson de filtration.

Le filtre 1 contient un *medium* d'épaisseur soufflée uniforme et plissé à l'aide d'une grille de renforcement. Les filtres 2 et 3 contiennent chacun un *medium* composé de coton et de fibres synthétiques, faits à 100 % de matériaux recyclés. Ici aussi, une grille de renforcement est utilisée pour maintenir les plis. Les filtres 1, 2, et 3 sont classés MERV 8. Selon le fabricant, ces trois premiers types de filtres sont utilisés en tant que préfiltres, dans des bâtiments commerciaux ou institutionnels par exemple.

Le filtre 4 contient un *medium* filtrant à base de microfibres de verre, avec des séparateurs en résine ajoutés en faible quantité afin assurer de la rigidité à l'ensemble. Le filtre 4 est classé MERV 14.

Le filtre 5 est composé d'un cadre en acier. Un produit placé à l'intérieur du cadre et appelé lut permet d'assurer l'étanchéité entre le *medium* filtrant et cette armature. Des joints d'étanchéité sont aussi placés en aval autour de l'armature. Le *medium* filtrant utilisé est à base de microfibres de verre, plissées et séparées par de l'aluminium ondulé. L'aluminium permet d'assurer l'uniformité du flux sur tout le filtre tout en maintenant sa stabilité et sa fermeté. Ce filtre a été qualifié pour avoir une efficacité de 99,99 % à 0,3 µm. Le filtre 5 a les caractéristiques d'un filtre HEPA. Selon le fabricant, ce type de filtre est généralement utilisé dans les systèmes de traitement d'air des installations médicales ou pharmaceutiques, ou pour des « procédés propres ».

Tableau 9. Caractéristiques des filtres testés (informations du fabricant)

Filtre	MERV	Taille (hauteur x largeur)	Épaisseur du cadre	Résistance initiale	Capacité de débit d'air	Surface du <i>medium</i>	Nombre de plis
		(pouce)					
Filtre 1	8	12 x 12 (305 x 305 mm)	4	0,27	500	6,95	11
			2	0,31	500	4,2	15
			1	0,23	350	2,5	16
		24 x 24 (610 x 610 mm)	4	0,27	2 000	27,72	11
			2	0,31	2 000	17,3	15
			1	0,23	1 400	9,8	16
Filtre 2	8	12 x 12 (305 x 305 mm)	4	0,21	500	5,05	9
			2	0,23	500	2,75	10
			1	0,22	350	1,7	12
		24 x 24 (610 x 610 mm)	4	0,21	2 000	20	9
			2	0,23	2 000	11,4	10
			1	0,22	1 400	7,1	12
Filtre 3	8	12 x 12 (305 x 305 mm)	4	0,21	500	6,95	11
			2	0,27	500	4,2	15
			1	0,22	350	2,45	16
		24 x 24 (610 x 610 mm)	4	0,21	2 000	28,6	11
			2	0,27	2 000	17,3	15
			1	0,22	1 400	9,8	16
Filtre 4	14	12 x 12	4	0,6	500	26,5	--
		24 x 24	4	0,6	2 000	113	--
Filtre 5	HEPA	12 x 12	11,5	--	430	67,5	--
		24 x 24	11,5	--	1 890	287,5	--

5. RÉSULTATS

5.1 Validation par comparaison des taux de pénétration mesurés sur les deux bancs de test

Les données expérimentales obtenues sur les cinq filtres sont présentées dans les annexes. Elles sont présentées sous la forme de « spectres » de pénétration en fonction de la taille des particules, pour les vitesses de mesure utilisées et sur les deux bancs de test. Dans la suite du document, ce sont ces mêmes données qui sont employées, mais présentées d'une manière différente dans le but de comparer, de valider et d'interpréter les résultats.

5.1.1 Pertinence de la comparaison

Les mesures de pénétration obtenues sur les deux bancs de test sont comparées pour les vitesses de mesure de 0,75 m/s et de 1,00 m/s. Le Tableau 10 présentant la vitesse de filtration qui correspond aux vitesses de mesure permet de vérifier que la comparaison des deux bancs aux deux vitesses de mesure est consistante; en effet, dans les configurations des deux bancs, et selon les surfaces de filtration communiquées par le fabricant, les vitesses de filtration utilisées pour chaque filtre sont équivalentes sur les deux bancs.

Les données de surface de filtration pour les filtres 24 po x 24 po ont toutes été communiquées par le constructeur. Notons que dans le cas des filtres 12 po x 12 po, les surfaces de filtration sont données par le constructeur seulement pour l'épaisseur de 1 po. Les surfaces de filtration des filtres d'épaisseur 4 po et 2 po sont données pour les filtres 12 po x 24 po. Les auteurs ont donc supposé que la surface des filtres 12 po x 12 po est deux fois inférieure à ces surfaces (données présentées en rouge dans le tableau). Dans le cas du filtre 5, les deux surfaces de filtrations ont été communiquées par le constructeur.

A chaque filtre testé, les mesures de pénétration sont ainsi comparées pour le banc *Small Filter* et pour le banc *Big Loop*. Une description globale des résultats et une analyse des résultats seront présentées par la suite.

Tableau 10. Vitesses de filtration calculées en fonction des filtres évalués et pour les deux bancs de test

Filtre	MERV	Taille (hauteur x largeur)	Épaisseur (pouce)	Vitesse de filtration calculée (m/s)					
		(pouce)		à la vitesse de mesure de 0,25 m/s	à la vitesse de mesure de 0,50	à la vitesse de mesure de 0,75	à la vitesse de mesure de 1,00	à la vitesse de mesure de 1,25	à la vitesse de mesure de 1,50
Filtre 1	8	Banc <i>Small Filter</i> (12 x 12)	4 (102 mm)	0,04	0,07	0,11	0,14		
			2 (51 mm)	0,06	0,12	0,18	0,24		
			1 (25,4 mm)	0,10	0,20	0,30	0,40		
		Banc <i>Big Loop</i> (24 x 24)	4 (102 mm)			0,11	0,14		
			2 (51 mm)			0,17	0,23		
			1 (25,4 mm)			0,31	0,41		
Filtre 2	8	Banc <i>Small Filter</i> (12 x 12)	4 (102 mm)	0,05	0,10	0,15	0,20		
			2 (51 mm)	0,09	0,18	0,27	0,36		
			1 (25,4 mm)	0,15	0,29	0,44	0,59		
		Banc <i>Big Loop</i> (24 x 24)	4 (102 mm)			0,15	0,20		
			2 (51 mm)			0,26	0,35		
			1 (25,4 mm)			0,42	0,56		
Filtre 3	8	Banc <i>Small Filter</i> (12 x 12)	4 (102 mm)	0,04	0,07	0,11	0,14		
			2 (51 mm)	0,06	0,12	0,18	0,24		
			1 (25,4 mm)	0,10	0,20	0,31	0,41		
		Banc <i>Big Loop</i> (24 x 24)	4 (102 mm)			0,10	0,14		
			2 (51 mm)			0,17	0,23		
			1 (25,4 mm)			0,31	0,41		
Filtre 4	14	Banc <i>Small Filter</i>	4 (102 mm)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
		Banc <i>Big Loop</i>	4 (102 mm)			0,03	0,04		
Filtre 5	99,99 % @ 0,3 µm	Banc <i>Small Filter</i>	11,5 (280 mm)	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
		Banc <i>Big Loop</i>	11,5 (280 mm)			0,01	0,01		

5.1.2 Données de pénétration en fonction de la taille des particules

La totalité des données de pénétration des cinq filtres en fonction de la taille des particules, pour les deux bancs et pour toutes les vitesses est présentée dans les annexes. La Figure 16 représente un exemple de résultats de pénétration sur les deux bancs de tests, en fonction de la taille des particules pour les quatre premiers filtres, pour une épaisseur de 4 pouces, et aux deux vitesses de mesure (0,75 m/s et 1,00 m/s). Le premier constat évident que l'on peut observer est la différence d'efficacité entre les filtres 1, 2 et 3, d'un côté, et le filtre 4, de l'autre. La différence de classe de MERV est facilement observable sur ces deux graphiques.

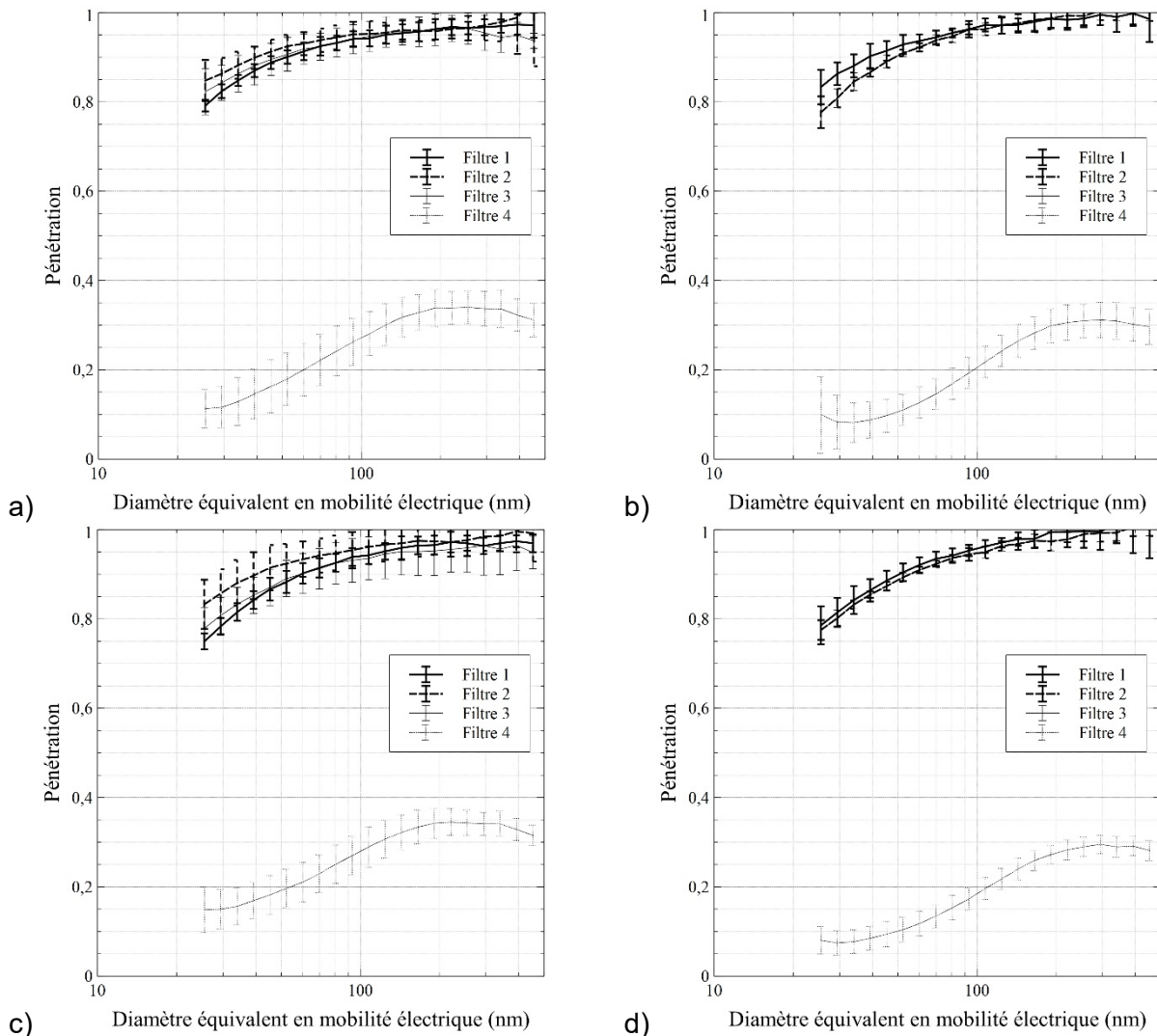


Figure 16. Taux de pénétration pour les quatre premiers filtres d'épaisseur 4 po et à 1,00 m/s a) sur le banc *Small Filter* et b) sur le banc *Big Loop*, puis à 0,75 m/s c) sur le banc *Small Filter* et d) sur le banc *Big Loop*.

Notons aussi que le taux de pénétration mesuré est plus faible lors de la diminution de la taille des particules en dessous de 100 nm, et que la taille des particules les plus pénétrantes est supérieure à 100 nm. Cela est en accord avec la théorie classique de filtration pour les *media* mécaniques et avec les mesures expérimentales précédentes sur les *media* et les filtres. Les données ci-dessous montrent que la plage de 200 – 500 nm permet de fournir une meilleure estimation de la taille des particules les plus pénétrantes, contrairement à la taille fixe de 300 nm.

Ces observations montrent que les résultats expérimentaux concordent avec les données de la littérature. Aussi, les taux de pénétration obtenus sur les deux bancs fournissent les mêmes tendances. La sous-section suivante va précisément s'atteler à comparer les mesures obtenues sur les deux bancs.

5.1.3 Comparaison des taux de pénétration des cinq filtres sur les deux bancs de test

La comparaison des spectres de pénétration pour les différents filtres et pour les deux bancs est présentée dans les Figure 17 et Figure 18. Les résultats de chaque moyenne sont présentés en abscisse par le taux de pénétration mesuré sur le banc *Small Filter* et en ordonnée par le taux de pénétration mesuré sur le banc *Big Loop*.

On observe cependant des écarts significatifs dans certaines mesures de pénétration entre les deux bancs de test. Ceux-ci peuvent être expliqués dans les différences entre les deux expérimentations : les différences dans les deux montages, dans les deux méthodes de mesure de pénétration et dans les filtres testés.

Les deux montages ont été calibrés pour pouvoir considérer que les mesures sont effectuées dans des conditions aérauliques similaires. Aussi, la méthode de mesure entre les deux montages est la même. La seule différence repose sur le fait d'avoir deux cannes de prélèvements dans le banc *Small Filter* tandis qu'une seule canne de prélèvement sur le banc 'Big Loop'. Les mêmes longueurs de tubes ont été utilisées en amont et en aval, et les pertes dans les tubes ont été vérifiées équivalentes.

Les filtres échantillons, même s'ils appartiennent à la même catégorie de filtre, peuvent différer selon qu'ils sont de dimension 12 x 12 ou 24 x 24. Même si le nombre de plis entre les deux dimensions est le même, la surface de *medium* indiquée par le constructeur est approximative. Les renforts en carton, ainsi que la colle entre le carton et le *medium* peuvent faire varier la surface réelle de filtration. Cette diminution de la surface réelle de filtration sera d'autant plus importante dans les filtres de dimension 12 x 12, pouvant entraîner une augmentation du taux de pénétration.

Aussi, il existe une disparité entre les différents filtres échantillons du fait de la disparité dans les *media* utilisés. Chaque filtre échantillon a donc un taux de pénétration qui lui est propre. Rappelons que deux mesures ont été effectuées dans toutes les configurations (excepté pour le filtre 5) afin d'affirmer qu'aucun phénomène de colmatage n'intervient dans les mesures utilisées ici.

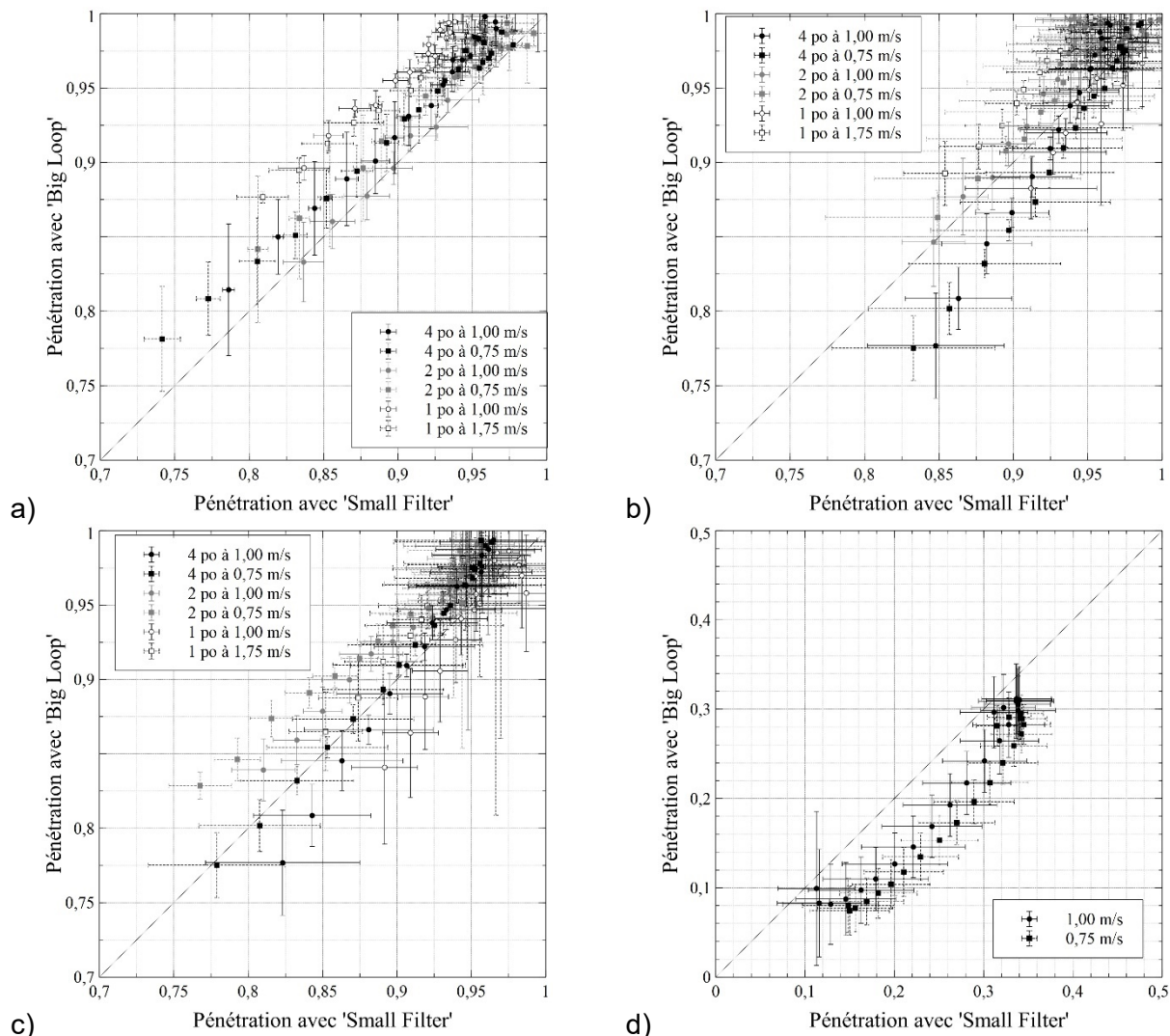


Figure 17. Comparaison des taux de pénétration mesurés sur les deux bancs de test pour le a) filtre 1, b) filtre 2, c) filtre 3 et d) filtre 4.

Dans le cas du filtre classé HEPA (Filtre 5), outre les différences entre les montages, les méthodes de mesure de pénétration et les filtres testés cités précédemment, la sensibilité des instruments de mesure entraîne aussi un biais dans la mesure des taux de pénétration pour le Filtre 5. En effet, la forte efficacité du filtre HEPA entraîne une très faible concentration en aval du filtre. Cette très faible concentration correspond à la détection de moins d'une centaine de particules sur un temps de mesure de 8 minutes. Elle est donc à la limite de détection de l'appareil de mesure et la quantité d'aérosol en aval est insuffisante pour donner une valeur réelle du taux de pénétration. Ce taux de pénétration représente plus une estimation de la gamme d'efficacité du Filtre 5.

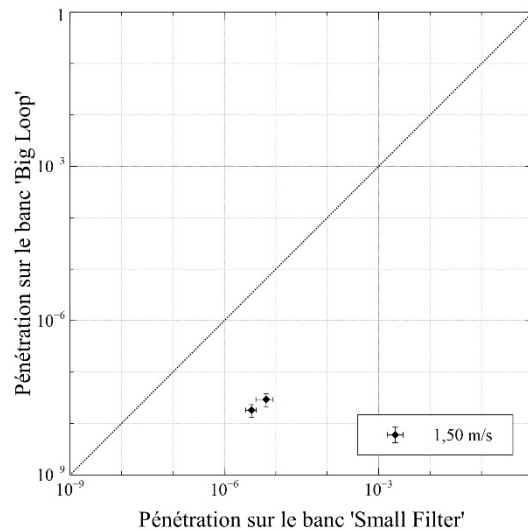


Figure 18. Comparaison des taux de pénétration globaux mesurés sur les deux bancs de test pour le filtre 5.

Notons que les correspondances entre les mesures sur les deux bancs sont bien meilleures pour les filtres 1 - 4 que pour le filtre HEPA. Cependant, elle permet tout de même d'estimer le taux de pénétration du filtre HEPA.

La comparaison des données issues des résultats présentés dans les annexes de ce document montre une assez bonne concordance des mesures de pénétration. Notons que les trois premiers filtres testés, classés MERV 8 donnent des taux de pénétration supérieurs à 75 %, c'est-à-dire une efficacité inférieure à 25 %, pour des particules dont le diamètre est inférieur à 500 nm. Le filtre 4 (classé MERV 14) présente un taux de pénétration inférieur à 40 %. Plus de 60 % des particules sont donc captées par ce type de filtre. Enfin, le dernier filtre (HEPA) montre un taux de pénétration très fort : moins d'une particule sur cent mille (de 50 nm de diamètre) est captée par ce type de filtre.

Pour chaque filtre, le coefficient de corrélation a été calculé à partir des taux de pénétration moyens, pour toutes les épaisseurs de filtres et pour toutes les vitesses de test. Les coefficients sont présentés dans le Tableau 11.

Tableau 11. Coefficient de Pearson calculé pour chacun des quatre filtres testés

Filtre	Données moyennes utilisées	Coefficient de corrélation (R^2)
1	d_p : de 25 nm à 453 nm; 4 po, 2 po et 1 po; à 1,00 m/s et à 0,75 m/s;	0,813
2	d_p : de 25 nm à 453 nm; 4 po, 2 po et 1 po; à 1,00 m/s et à 0,75 m/s;	0,697
3	d_p : de 25 nm à 453 nm; 4 po, 2 po et 1 po; à 1,00 m/s et à 0,75 m/s;	0,623
4	d_p : de 25 nm à 453 nm; 4 po; à 1,00 m/s et à 0,75 m/s;	0,880

5.1.4 Discussion et analyse

Pour la comparaison des deux bancs de test, les filtres 1, 4 et 5 sont utilisés pour représenter la plus grande plage de taux de pénétration et la corrélation entre les deux mesures de pénétration est alors calculée sur les deux bancs. La Figure 19 représente la comparaison des mesures de pénétration sur les deux bancs pour les filtres 1, 4 et 5. Le coefficient de corrélation est alors de $R^2 = 0,994$. La comparaison des deux bancs de tests sur toute la plage de mesure possible donne donc une très bonne corrélation.

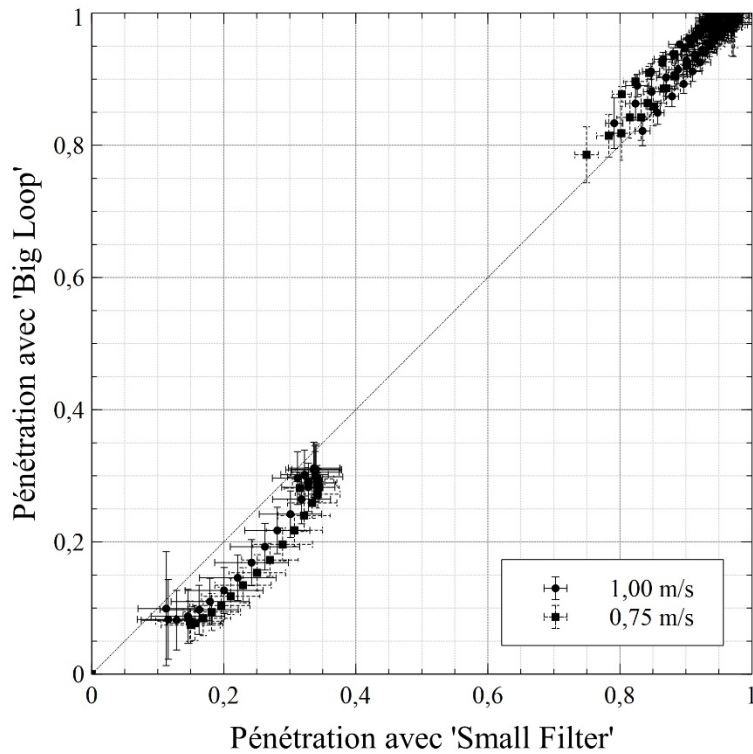


Figure 19. Comparaison des taux de pénétration sur les deux bancs de test, pour les filtres 1, 4 et 5.

5.2 Étude de la performance des filtres testés

Comme présenté en introduction, la performance d'un filtre est principalement caractérisée par sa perte de charge et par son efficacité, notamment à la taille des particules les plus pénétrantes. Dans cette partie, les résultats pour les cinq filtres testés seront exposés.

5.2.1 Mesures des pertes de charge

Les mesures de pertes de charge ont été effectuées sur tous les filtres testés. Elles ont été obtenues à l'aide d'un capteur de pression de TSI DP-Calc 5825. Cet instrument a une plage de mesures de ± 15 pouces d'eau, avec une précision de lecture de $\pm 1\%$. Les mesures de différences de pression ont été effectuées à l'aide des cannes de mesure de concentration. Les résultats de pertes de charge sont présentés sous forme de diagramme de parité sur la Figure 20.

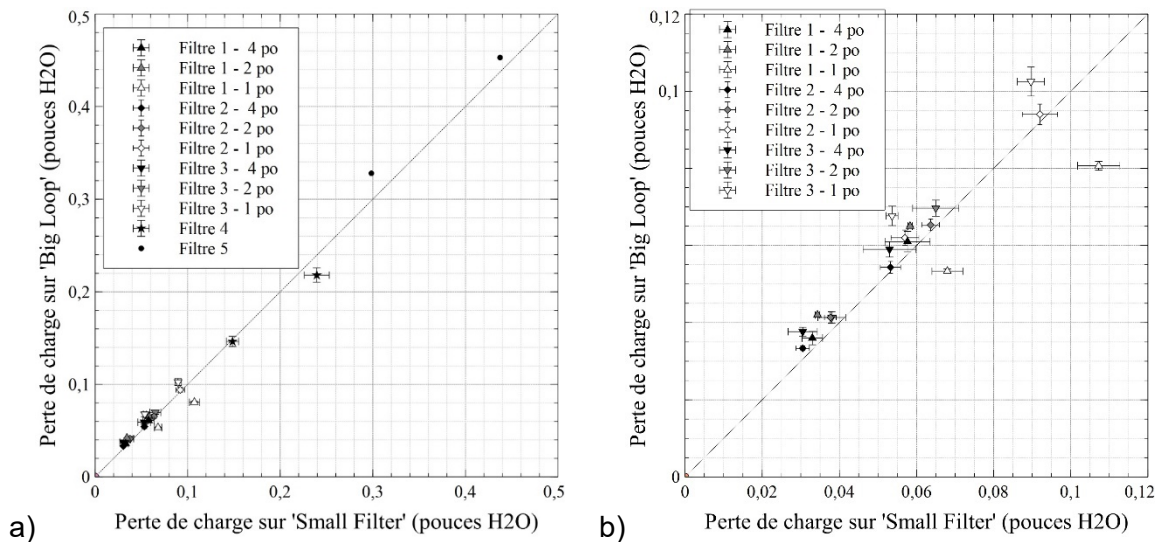


Figure 20. Comparaison des pertes de charge mesurées sur les deux bancs de test : a) pour les cinq filtres testés et b) zoom sur les filtres 1 à 3.

La comparaison des données de la figure 20 présente une assez bonne concordance des mesures de perte de charge entre les deux bancs de test. Dans un premier temps, on peut remarquer que la disparité des mesures de perte de charge (écart-type) est supérieure sur le banc *Small Filter* que sur le banc *Big Loop*. Ceci est dû soit à une plus grande disparité dans les filtres de taille 12 po x 12 po soit à une plus grande difficulté de pose du filtre dans le banc *Small Filter*. Nous n'avons cependant pas observé de difficultés particulières pour l'installation des filtres dans ce banc. On peut aussi observer que, dans le cas des filtres 1 à 3, les pertes de charge mesurées des filtres de un pouce d'épaisseur ont le plus d'écart sur les deux bancs, tandis que les mesures des filtres de deux et quatre pouces sont équivalentes. Ces mesures confirment qu'il existe une plus grande disparité dans les filtres lorsque l'on diminue l'épaisseur.

Dans le cas du filtre 4, on remarque que l'écart-type dans ce cas est plus important que pour les trois filtres précédents. Ceci nous conforte dans l'idée qu'il existe une différence entre les différents échantillons d'un même filtre, que ce soit dans le banc *Big Loop* et dans le banc *Small Filter*.

Pour le filtre 5, on remarque que la perte de charge mesurée dans le banc *Big Loop* est supérieure à celle mesurée dans le banc *Small Filter*. Dans cette configuration, deux solutions sont envisageables pour expliquer ces résultats : comme précédemment, il existe des différences entre le filtre de dimension 12 po x 12 po et le filtre de dimension 24 po x 24 po, ou le filtre 12 po x 12 po est mal positionné et entraîne des fuites, diminuant ainsi la perte de charge dans cette configuration. Ces deux solutions sont en accord avec les résultats de la Figure 18 montrant un taux de pénétration supérieur dans le cas des mesures sur le banc *Big Loop*.

Le *medium*, défini comme un milieu poreux, peut être caractérisé par le nombre de Reynolds de pores. En écoulement laminaire (faibles vitesses de filtration), la perte de charge du filtre vierge peut être établie par la loi de Darcy pour un fluide incompressible; les pertes dues aux

frottements visqueux du fluide sont proportionnelles à la vitesse de filtration. Dans le cas de vitesses plus élevées, la loi de Darcy ne permet plus d'estimer la perte de charge. En effet, des pertes dues aux effets d'inertie et aux singularités s'ajoutent aux pertes attribuables au *medium*. Ces pertes sont proportionnelles à l'énergie cinétique du fluide, donc proportionnelles au carré de la vitesse de filtration.

Les régressions des filtres testés sont donc présentées dans la figure ci-dessous selon l'équation (4) suivante, où v_f est la vitesse de filtration, B et C dépendent des paramètres de structure du filtre et des paramètres physiques de l'air.

$$\Delta p = B.v_f + C.v_f^2 \quad (4)$$

Observons que les pertes de charge sont bien représentées par ces régressions (Figure 21). Les mesures obtenues pour les filtres du banc de test *Small Filter* sont aussi en adéquation avec celles obtenues sur le banc *Big Loop*, et que les données du constructeur sont relativement équivalentes aux mesures de pertes de charge de cette étude.

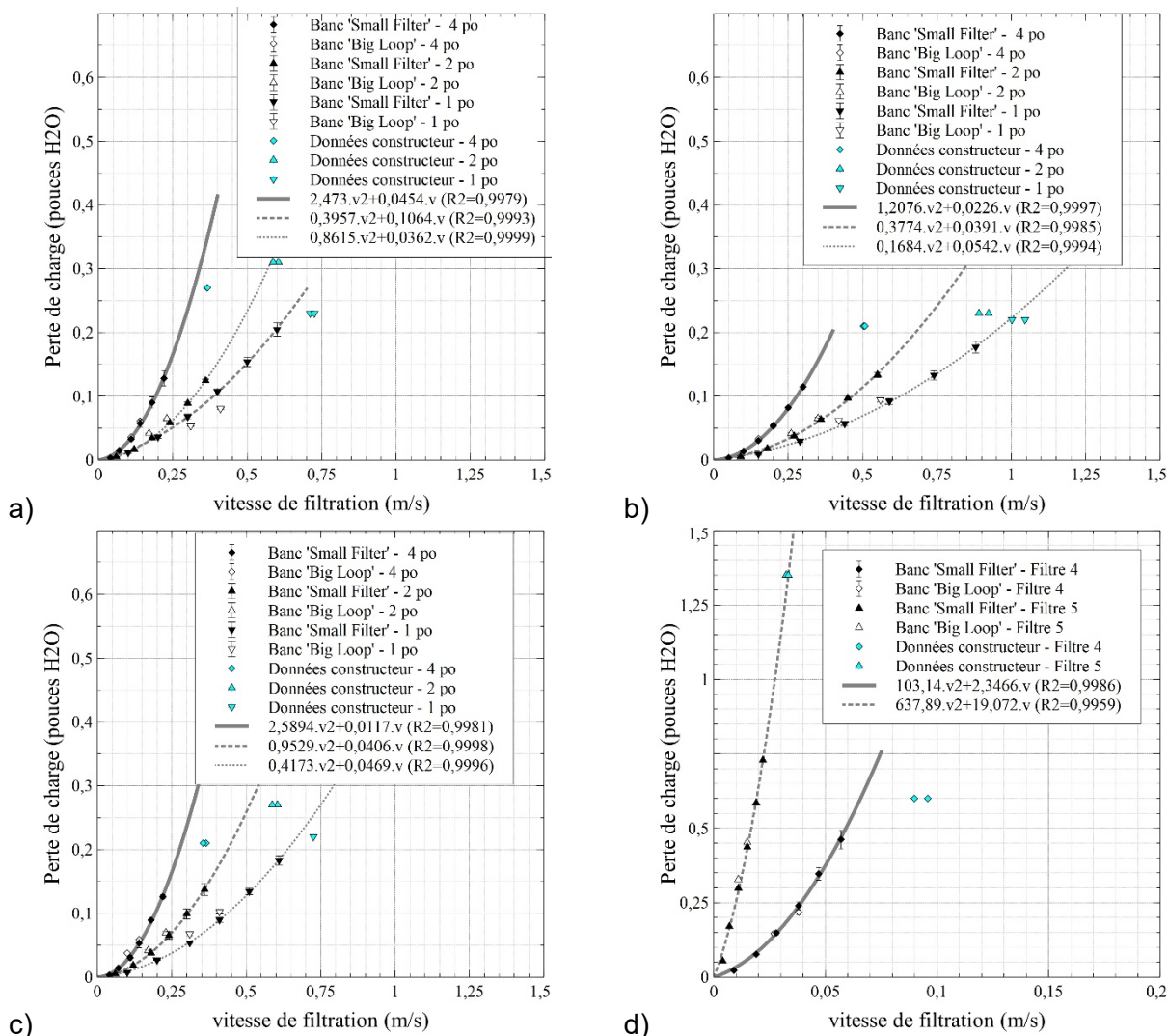


Figure 21. Perte de charge moyenne pour a) le filtre 1, b) le filtre 2, c) le filtre 3 et d) les filtres 4 et 5, sur les deux bancs de test, en fonction de la vitesse de filtration.

5.2.2 Mesure de l'efficacité à la MPPS

Dans le cas des quatre premiers filtres testés, il a été possible de mesurer le taux de pénétration en fonction de la taille des particules (données présentées en annexe). Ces résultats permettent de connaître précisément la gamme de taille des particules les plus pénétrantes (Tableau 12) et le taux de pénétration maximal (Figure 22) dans toutes les conditions testées.

Tableau 12. Gamme MPPS selon les filtres testés

Filtre	Données moyennes utilisées	Gamme MPPS (nm)
1	d_p : de 25 nm à 453 nm; 4 po, 2 po et 1 po; Banc <i>Small Filter</i> : à 1,00 m/s, 0,75 m/s, 0,50 m/s et 0,25 m/s; Banc <i>Big Loop</i> : à 1,00 m/s et à 0,75 m/s;	250 – 450
2	d_p : de 25 nm à 453 nm; 4 po, 2 po et 1 po; Banc <i>Small Filter</i> : à 1,00 m/s, 0,75 m/s, 0,50 m/s et 0,25 m/s; Banc <i>Big Loop</i> : à 1,00 m/s et à 0,75 m/s;	150 – 450
3	d_p : de 25 nm à 453 nm; 4 po, 2 po et 1 po; Banc <i>Small Filter</i> : à 1,00 m/s, 0,75 m/s, 0,50 m/s et 0,25 m/s; Banc <i>Big Loop</i> : à 1,00 m/s et à 0,75 m/s;	150 – 450
4	d_p : de 25 nm à 453 nm; 4 po; Banc <i>Small Filter</i> : à 1,50 m/s, 1,25 m/s, 1,00 m/s, 0,75 m/s, 0,50 m/s et 0,25 m/s; Banc <i>Big Loop</i> : à 1,00 m/s et à 0,75 m/s;	200 – 350

Les gammes MPPS mesurées lors des expériences réalisées au cours de cette étude sont en adéquation avec les tendances observées dans la littérature pour les *media* plans et pour les filtres en entier. Celles-ci contiennent la valeur 300 nm, l'estimation généralement utilisée pour définir la taille des particules les plus pénétrantes. Les filtres 1, 2 et 3, d'efficacité MERV 8, ont une MPPS généralement supérieure à 150 nm et inférieure à 450 nm. Pour le filtre 4, la taille des particules les plus pénétrantes se situe dans la gamme 200 - 350 nm.

La Figure 22 présente la comparaison des valeurs de pénétration maximale mesurées dans nos expérimentations en fonction du taux de pénétration à 300 nm (pour un diamètre équivalent en mobilité électrique de 294,3 nm). Les données ont été regroupées en fonction des vitesses de mesure, pour les deux bancs de test *Big Loop* et *Small Filter*. On peut remarquer que le taux de pénétration mesuré à 300 nm est, dans le cas des filtres mécaniques étudiés, proche du taux de pénétration maximal mesuré. On n'observe cependant pas d'effet significatif de la vitesse de mesure sur la différence dans le taux de pénétration à 300 nm et celui de la pénétration maximale.

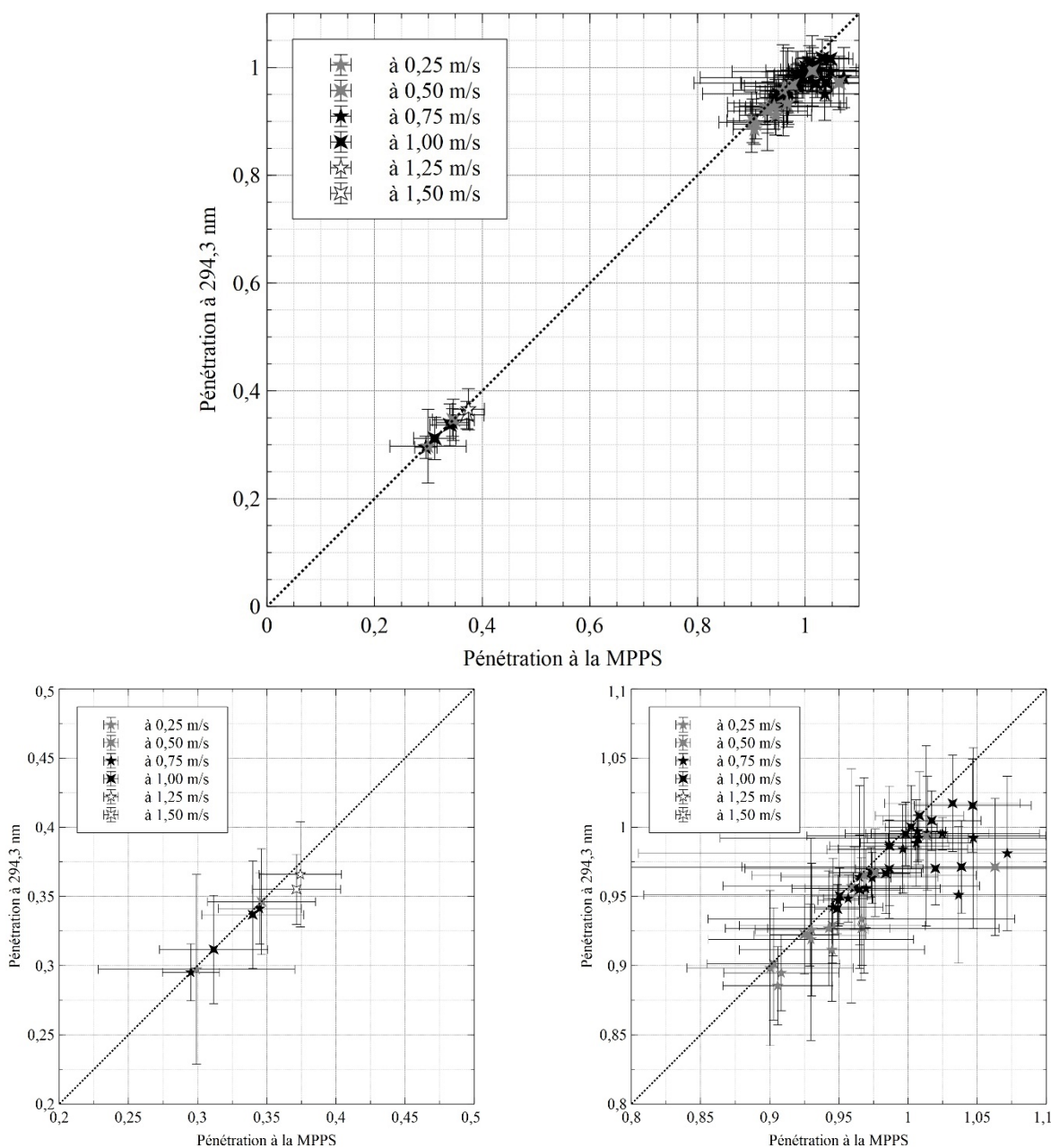


Figure 22. Comparaison du taux de pénétration maximal avec le taux de pénétration à un diamètre équivalent en mobilité électrique de 294,3 nm, selon la vitesse de mesure.

5.3 Étude paramétrique – Effet de la vitesse

5.3.1 Effet de la vitesse à la MPPS

Le taux de pénétration maximal mesuré pour les filtres 1, 2 et 3 est très proche de 100 % (Figure 23). Ces filtres étant vraiment peu efficaces pour des particules dont la taille est

inférieure au micron, il est impossible d'en tirer d'autres tendances. Le filtre 4, classé MERV 14, montre un taux de pénétration maximal autour de 30 - 40 %. À la plage de vitesse testée, il n'y a pas d'effet visible de la vitesse sur la MPPS ou sur le taux de pénétration maximal pour les filtres testés.

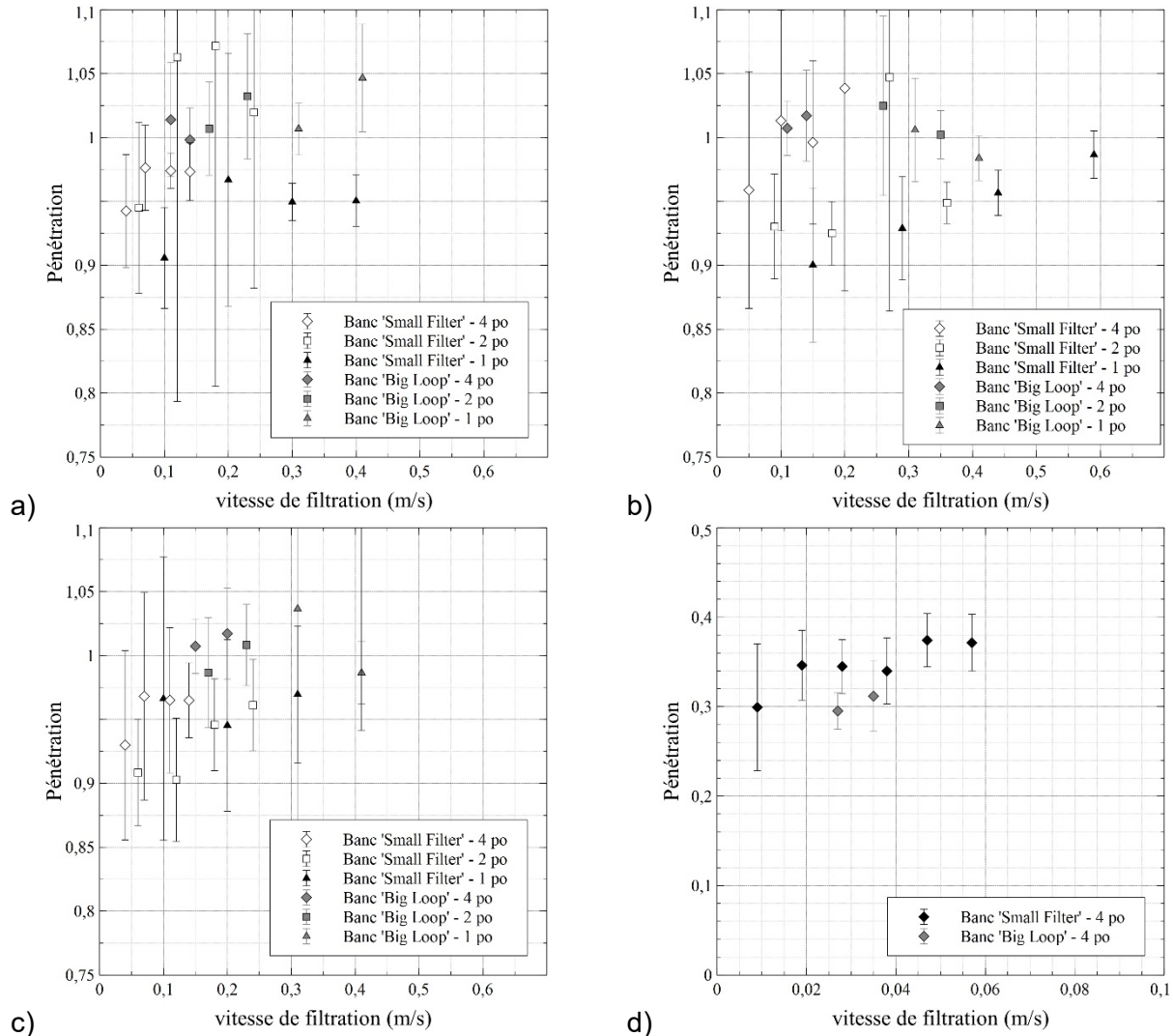


Figure 23. Taux de pénétration maximal mesuré en fonction de la vitesse de filtration pour le a) filtre 1, b) filtre 2, c) filtre 3 et d) filtre 4.

5.3.2 Effet de la vitesse à 50 nm

Dans le cas des particules nanométriques, la revue de la littérature a déjà montré que les particules sont principalement collectées par le *medium* grâce au mécanisme de collecte par diffusion. Les données obtenues dans ce projet, à 50 nm, vont permettre d'étudier ce mécanisme dans le cas de ces filtres. En effet, les mesures de pénétration à 50 nm sont les plus nombreuses (en faisant l'hypothèse que les mesures globales sont équivalentes aux

mesures de pénétration à 50 nm, le diamètre médian de l'aérosol de test). Nous faisons l'hypothèse très vraisemblable que les particules de 50 nm ne sont collectées que par le mécanisme de diffusion.

Les valeurs de pénétration en fonction de la vitesse de filtration sont présentées dans la Figure 24. Les points en noir sont les mesures de pénétration sur le banc *Small Filter* tandis que les points gris sont les mesures sur le *Big Loop*. Les points pleins sont les mesures de vitesse de filtration avec la surface de filtration donnée par le constructeur tandis que les points creux sont les surfaces de filtration estimées.

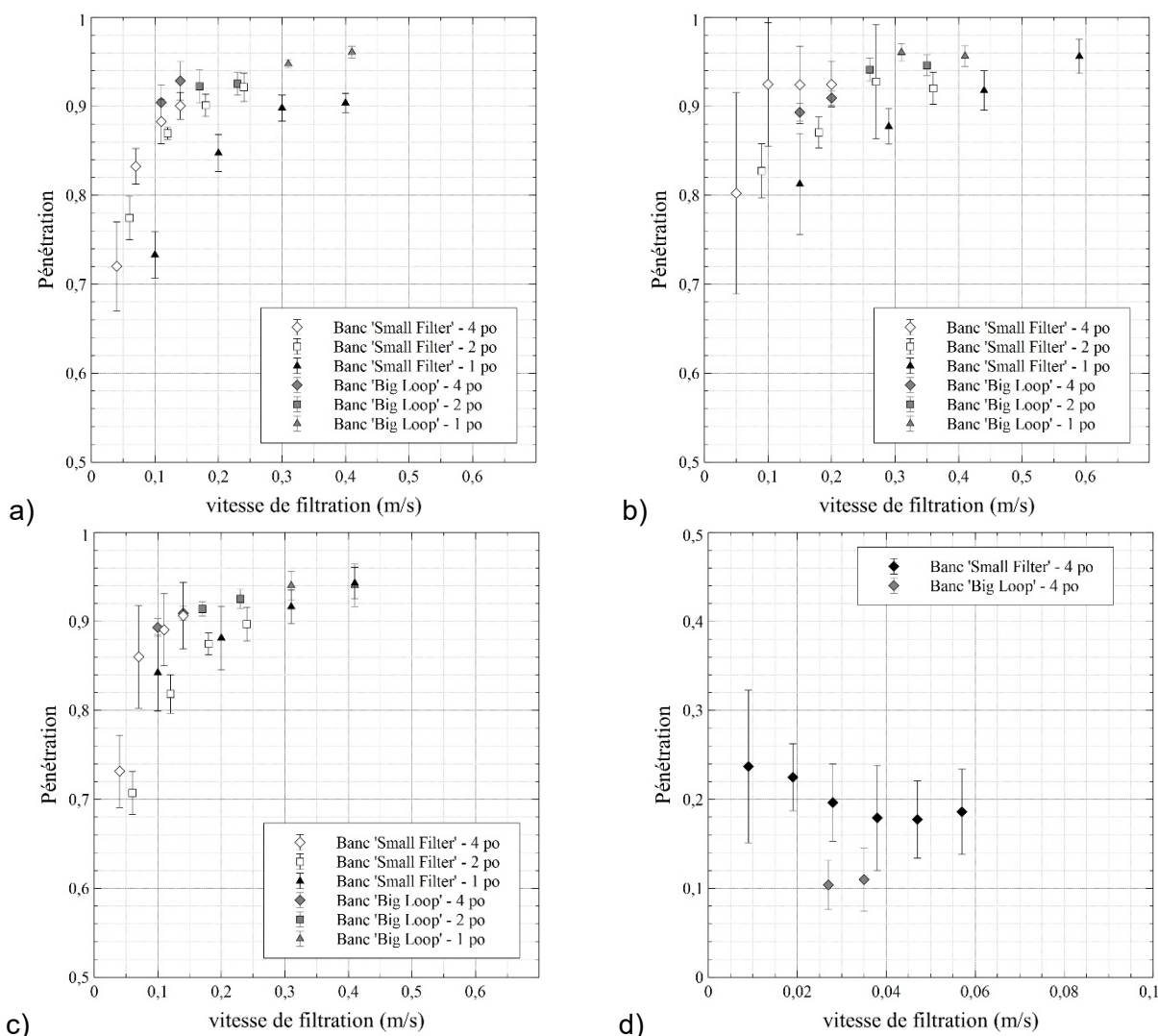


Figure 24. Effet de la vitesse de filtration sur le taux de pénétration des particules de 50 nm et pour le a) filtre 1, b) filtre 2, c) filtre 3 et d) filtre 4.

Les graphiques des filtres 1 à 3 montrent bien que l'augmentation de la vitesse de filtration a pour effet d'augmenter le taux de pénétration à 50 nm, jusqu'à l'atteinte d'un palier. Ces

données reflètent l'effet de la vitesse sur le mécanisme de collecte par diffusion. Dans le cas du filtre 4, aucun effet semblable n'est cependant observé. L'effet de la vitesse de filtration est aussi visible pour le filtre 5 (Figure 25), pour les mesures de pénétration globale cette fois avec un aérosol centré à 50 nm.

Pour interpréter plus clairement les résultats ci-dessus, une étude des paramètres de structure des *media* utilisés permettrait de vérifier notre hypothèse de départ sur le fait que le mécanisme de collecte qui entre en jeu pour les nanoparticules de 50 nm et pour les filtres étudiés est seulement la collecte par diffusion.

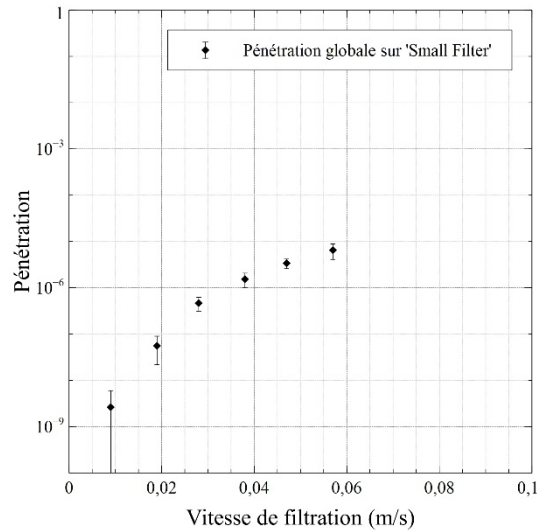


Figure 25. Effet de la vitesse de filtration sur le taux de pénétration de la génération globale centrée à 50 nm, pour le filtre 5.

6. CONCLUSION

À l'échelle nanométrique, les particules présentent des propriétés spécifiques que de plus en plus d'entreprises cherchent à exploiter. L'augmentation de l'exposition aux particules ultrafines et aux nanoparticules dans les milieux de travail, ainsi que les connaissances encore insuffisantes de leurs effets sur la santé des travailleurs, impose aux milieux de travail l'application du principe de précaution afin de gérer cette exposition. Dans ce domaine de la santé et la sécurité du travail, plusieurs aspects ont besoin d'être développés. Le but étant de trouver des outils permettant de répondre à ce principe de précaution. L'évaluation de la performance des moyens de maîtrise des expositions en est un des aspects.

Dans ce domaine, la filtration est un des moyens de protection les plus utilisés en raison de sa relative simplicité de mise en œuvre et de son efficacité à capter des particules de différentes tailles (incluant les PUF). La filtration est utilisée dans des environnements de travail très différents : en présence de ventilation générale ou de ventilation locale, ou même dans des zones de travail restreintes, ventilées ou non. La filtration peut être utilisée de manière constante ou ponctuelle. Cependant, la norme actuelle (ANSI/ASHRAE 52.2) limite l'évaluation de l'efficacité de filtration à des particules dont la taille est comprise entre 0,3 et 10,0 μm . Même si la MPPS dans le cas de *media*/filtres purement mécaniques et à faible vitesse de filtration est communément admise à 300 nm, la littérature fait plutôt état d'une gamme de taille allant de 100 nm à 300 nm, liée à la variabilité des *media* et aux conditions opératoires. De plus, les études sur les *media* montrent qu'à plus grande vitesse et en présence de charges électrostatiques, la MPPS tend vers des particules de taille inférieure à 300 nm. L'objectif principal est donc de développer une procédure de mesure pour évaluer la performance des filtres utilisés dans les systèmes de ventilation pour la filtration des particules de taille inférieure à 300 nm incluant les PUF.

L'étude bibliographique effectuée pendant ce projet a montré que l'état des connaissances sur la performance des filtres dans leur ensemble, en fonction de la taille des nanoparticules, est encore très limité. Notons cependant que les tendances observées pour des filtres en entier semblent être conformes à la littérature sur la filtration de *media* pour les nanoparticules. Notamment, il a été démontré que la vitesse de filtration influençait très fortement la MPPS. Les auteurs n'ont pas été en mesure de recenser d'études établissant un lien entre la performance (taux de pénétration en fonction de la taille des nanoparticules) de filtres en entier et celle du *medium* qui le constitue.

L'originalité de ce travail repose sur l'obtention de mesures d'efficacité reproductibles en fonction de la taille des particules, en utilisant une approche avec des particules polydispersées. Pour cela, les auteurs ont conçu, réalisé et qualifié un banc d'essai, puis développé une procédure afin de mesurer la performance de filtres mécaniques.

La validation du banc d'essai a été effectuée par la comparaison des mesures à celles obtenues sur un banc de type ASHRAE, spécifiquement modifié pour son utilisation avec des particules nanométriques. Trois catégories de filtres différents ont été utilisées pour cette comparaison : un filtre classé MERV 8, un classé MERV 14 et un dernier classé HEPA. Ces trois filtres permettent d'illustrer toute la gamme de taux de pénétration capable d'être mesurée

sur les bancs de tests. La comparaison des deux bancs de tests sur toute cette plage de mesure possible présente une très bonne corrélation.

Les mesures de performance (pénétration et perte de charge) des cinq filtres sont ensuite présentées et discutées. Une diminution de la pénétration, lorsque le diamètre des particules diminue en dessous de 100 nm et que la MPPS est toujours supérieure à 100 nm, est observable. La plage de MPPS mesurée varie selon les filtres : celle-ci est supérieure à 150 nm pour les filtres classés MERV 8 et dans la gamme 200-350 nm pour le filtre classé MERV 14. Les données montrent ainsi que la plage de 150–500 nm permet de donner une meilleure estimation de la taille des particules les plus pénétrantes, contrairement à la taille fixe de 300 nm. Cependant, les mesures de pénétration à 300 nm et à la MPPS sont équivalentes dans le cas des filtres mécaniques (MERV 8 et MERV 14) et aux vitesses de mesure testées. Tous ces résultats sont en accord avec la théorie classique de filtration pour les *media* mécaniques et avec les mesures expérimentales précédentes sur les *media* et les filtres. On peut se demander si on trouverait les mêmes résultats pour des vitesses de mesure supérieures ou pour des filtres électrostatiques.

Ce projet, qui découle d'une entente entre l'IRSST et l'Université Concordia, est la première étape dans la création d'un laboratoire complet sur la filtration des particules, le but principal de ce laboratoire étant la mise en place d'une plateforme de recherche sur la filtration des particules et des gaz.

En conclusion, le banc de test conçu lors de ce projet permet d'estimer la performance de filtres mécaniques allant de MERV 8 à HEPA pour des nanoparticules. Ce banc permettra par la suite de tester différents filtres (filtres électrostatiques, filtres d'aspirateurs industriels) et ce, dans différentes conditions (variation de la vitesse de filtration, du taux d'humidité relative, du temps d'utilisation, etc.). Cependant, la question de savoir, dans le cas d'une exposition à des nanoparticules, quelle est la valeur acceptable de performance pour des filtres permettant de bien protéger les travailleurs demeure entière.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdolghader, P., Brochot, C., Haghghat, F. et Bahloul, A. (2018). Nanoparticle filtration performance by means of fibrous filters: The state-of-the-art review, *Science and Technology for the Built Environment*, 24(6), 648-672.
- Alderman, S. L., Parsons, M. S., Hogancamp, K. U. et Waggoner, C. A. (2008). Evaluation of the effect of media velocity on filter efficiency and most penetrating particle size of nuclear grade high-efficiency particulate air filters. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(11), 713–720.
- ASHRAE. (1976). *Method for testing air cleaning devices*. Norme ANSI/ASHRAE 52.76. Atlanta, GA: ASHRAE.
- ASHRAE. (2017). *Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size*. Norme ANSI/ASHRAE 52.2. Atlanta, GA: ASHRAE.
- ASME. (2003) *Code on nuclear air and gas treatment*. Norme ASME AG-1. New York, NY: ASME.
- Baron, P. A. et Willeke, K. (2001) *Aerosol measurement principles, techniques and applications*. (2^e éd.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Barrett, L. W. et Rousseau, A. D. (1998). Aerosol loading performance of electret filter media. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 59(8), 532–539.
- Barros, P. M., Tanabe, E. H. et Aguiar, M. L. (2016). Performance of fibrous filters during nanoparticle cake formation. *Separation Science and Technology*, 51(6), 1042–1052.
- Bémer, D. et Callé, S. (2000). Evolution of the efficiency and pressure drop of a filter media with loading. *Aerosol Science and Technology*, 33(5), 427–439.
- Biermann, A. H., Lum, B. Y. et Bergman, W. (1982). *Evaluation of permanently charged electrofibrous filters*. Communication présentée à DOE Nuclear Air Cleaning Conference, Denver, CO.
- Boskovic, L., Agranovski, I. E., Altman, I. S. et Braddock, R. D. (2008). Filter efficiency as a function of nanoparticle velocity and shape. *Journal of Aerosol Science*, 39(7), 635–644.
- Boskovic, L., Agranovski, I. E. et Braddock, R. D. (2007). Filtration of nanosized particles with different shape on oil coated fibres. *Journal of Aerosol Science*, 38(12), 1220–1229.
- Boskovic, L., Altman, I. S., Agranovski, I. E., Braddock, R. D., Myojo, T. et Choi, M. (2005). Influence of particle shape on filtration processes. *Aerosol Science and Technology*, 39(12), 1184–1190.
- Brochot, C., Mouret, G., Michielsen, N., Chazelet, S. et Thomas, D. (2011). Penetration of nanoparticles in 5 nm to 400 nm size range through two selected fibrous media. *Journal of Physics Conference Series*, 304, 012068. doi: 10.1088/1742-6596/304/1/012068
- Brochot, C., Abdolghader, P., Haghghat, F. et Bahloul, A. (2019) Filtration of nanoparticles applied in general ventilation. *Science and Technology for the built Environment*, 25(2), 114-127.
- Brown, R.C. (1979). *Electrical effects in dust filters*. Communication présentée au 2nd World Filtration Congress, Londres, Angleterre (p. 291–301).
- Brown, R. C. (1993) *Air filtration: An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*. New York, NY: Pergamon.
- Buha, J., Fissan, H. et Wang, J. (2013). Filtration behavior of silver nanoparticle agglomerates and effects of the agglomerate model in data analysis. *Journal of Nanoparticle Research*, 15(7), 1–11. doi: 10.1007/s11051-013-1709-z

- CEN. (2012). *Particulate air filters for general ventilation: Determination of the filtration performance*. Norme EN 779:2012. Bruxelles, Belgique: CEN.
- Chang, D.-Q., Chen, S.-C., Fox, A.R., Viner, A. S. et Pui, D. Y. H. (2015). Penetration of sub-50 nm nanoparticles through electret HVAC filters used in residence. *Aerosol Science and Technology*, 49(10), 966–976.
- Chang, D.-Q., Chen, S.-C., et Pui, D. Y. H. (2016). Capture of sub-500 nm particles using residential electret HVAC filter media: Experiments and modeling. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(12), 3349–3357.
- Chen, L., Ding, S., Liang, Z., Zhou, L., Zhang, H. et Zhang, C. (2017). Filtration efficiency analysis of fibrous filters: Experimental and theoretical study on the sampling of agglomerate particles emitted from a GDI engine. *Aerosol Science and Technology* 51(9), 1082–1092.
- Davies, C. N. (1973). *Air filtration*. Londres, Angleterre: Academic Press.
- Del Fabbro, L., Laborde, J. C., Merlin, P. et Ricciardi, L. (2002). Air flows and pressure drop modelling for different pleated industrial filters. *Filtration & Separation*, 39(1), 34–40.
- Gougeon, R., Boulaud, D. et Renoux A. (1996) Comparison of data from model fiber filters with diffusion, interception and inertial models. *Chemical Engineering Communications*, 151(1), 19–39. doi: 10.1080/00986449608936539
- Grippari, F. (2012). *Caractérisation et filtration des aérosols nanostructurés : application aux fumées de projection thermique des métaux*. (Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Nancy, France).
- Gupta, A., Novick, V. J., Biswas, P. et Monson, P. R. (1993). Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (HEPA) filters. *Aerosol Science and Technology*, 19(1), 94–107.
- Hanley, J. T., Ensor, D. S., Smith, D. D. et Sparks, L. E. (1994). Fractional aerosol filtration efficiency of in-duct ventilation air cleaners. *Indoor Air*, 4(3), 169–178.
- Hasolli, N., Park, Y. O. et Rhee, Y. W. (2013). Filtration performance evaluation of depth filter media cartridges as function of layer structure and pleat count. *Powder Technology*, 237, 24–31. doi: 10.1016/j.powtec.2013.01.002
- Hecker, R., et Hofacre K. C. (2008). *Development of performance data for common building air cleaning devices*. (Rapport n° EPA/600/ R-08/013). Research Triangle Park, NC: U.S. Environmental Protection Agency.
- Hinds W. C. (1999) *Aerosol technology*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Huang, S.-H., Chen, C.-W. Chang, C.-P. Lai C.-Y., et Chen, C.-C. (2007). Penetration of 4.5 nm to 10 µm aerosol particles through fibrous filters. *Journal of Aerosol Science*, 38(7):719–27.
- INRS. (2012). *Nanomatériaux : prévention des risques dans les laboratoires*. Paris, France : INRS.
- ISO. (2016). *Filtres à air de ventilation générale : partie 1 : spécifications techniques, exigences et système de classification fondé sur l'efficacité des particules en suspension (ePM)*. Norme ISO 16890:2016. Genève, Suisse: ISO.
- Japuntich, D. A., Franklin, L. M., Pui, D. Y., Kuehn, T. H., Kim, S. C. et Viner, A. S. (2006). A comparison of two nano-sized particle air filtration tests in the diameter range of 10 to 400 nanometers. *Journal of Nanoparticle Research*, 9, 93–107. doi: 10.1007/s11051-006-9179-1

- Joubert, A., Laborde, J. C., Bouilloux, L., Callé-Chazelet, S. et Thomas, D. (2010). Influence of humidity on clogging of flat and pleated HEPA filters. *Aerosol Science and Technology*, 44(12), 1065–1076.
- Kanaoka, C., Emi, H., Otani, Y. et Iiyama, T. (1987). Effect of charging state of particles on electret filtration. *Aerosol Science and Technology*, 7(1), 1–13.
- Karjalainen, P., Saari, S., Kuuluvainen, H., Kalliohaka, T., Taipale, A. et Rönkkö, T. (2017). Performance of ventilation filtration technologies on characteristic traffic related aerosol down to nanocluster size. *Aerosol Science and Technology*, 51(12), 1398–1408.
- Kasper, G., Schollmeier, S. et Meyer, J. (2010). Structure and density of deposits formed on filter fibers by inertial particle deposition and bounce. *Journal of Aerosol Science*, 41(12), 1167–1182.
- Kim, C. S., Bao, L., Okuyama, K., Shimada, M. et Niinuma, H., (2006). Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 8, 215–221. doi: 10.1007/s11051-005-9017-x
- Kim, S. C., Harrington, M. S. et Pui, D. Y. H. (2007). Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media. *Nanotechnology and Occupational Health*, 9, 117–125. doi: 10.1007/s11051-006-9176-4
- Kim, S. C., Wang, J., Emery, M. S., Shin, W. G., Mulholland, G. W. et Pui, D. Y. H. (2009). Structural property effect of nanoparticle agglomerates on particle penetration through fibrous filter. *Aerosol Science and Technology*, 43(4), 344–355.
- Lee, K. W. et Liu, B. Y. H. (1981). Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters. *Aerosol Science and Technology*, 1(1), 35–46.
- Liu, B. Y. H. et Rubow, K. L. (1990). *Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media*. Communication présentée au 5th World Filtration Congress, Nice, France.
- Lore, M. B., Sambol, A. R., Japuntich, D. A., Franklin, L. M. et Hinrichs, S. H. (2010). Inter-laboratory performance between two nanoparticle air filtration systems using scanning mobility particle analyzers. *Journal of Nanoparticle Research*, 13, 1581–1591. doi: 10.1007/s11051-010-9909-2
- Mahdavi, A., Haghghat, F., Bahloul, A., Brochot, C. et Ostiguy, C. (2015). Particle loading time and humidity effects on the efficiency of an N95 filtering facepiece respirator model under constant and inhalation cyclic flows. *Annals of Occupational Hygiene*, 59(5), 629–640.
- 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(6), 783–799.
- Mostofi, R., Bahloul, A. et Lara, J. (2011). Investigating of potential affecting factors on performance of N95 respirator. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 28(1), 26–39.
- Mouret, G., Chazelet, S., Thomas, D. et Bemer, D. (2011) Discussion about the thermal rebound of nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, 78(2), 125-131.
- Ostiguy, C., Debia, M., Roberge, B. et Dufresne, A. (2014). *Nanomatériaux : guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques en milieu de travail (2^e éd.)* (Rapport n° R-840). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublIRSST/R-840.pdf?v=2020-06-25>
- Ostiguy, C., Roberge, B., Ménard, L. et Endo, C. A. (2008a). *Guide de bonnes pratiques, favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse* (Rapport n° R-

- 586). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSSST/R-586.pdf?v=2020-06-25>
- Ostiguy, C., Roberge, B., Woods, C. et Soucy, B. (2010). *Les nanoparticules de synthèse : connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST (2^e éd.)* (Rapport n° R-646). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/r-646.pdf>
- Ostiguy C., Soucy, B., Lapointe, G., Woods, C., Ménard, L. et Trottier, M. (2008b). *Les effets sur la santé reliés aux nanoparticules (2^e éd.)* (Rapport n° R-558). Montréal, QC: IRSST. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/r-558.pdf>
- Rebaï, M., Prat, M., Meireles, M., Schmitz, P. et Baclet, R. (2010). A semi-analytical model for gas flow in pleated filters. *Chemical Engineering Science*, 65(9), 2835–2846.
- Rengasamy, S., Miller, A., Vo, E. et Eimer, B.C. (2013). Filter performance degradation of electrostatic N95 and P100 filtering facepiece respirators by dioctyl phthalate aerosol loading. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 8(3), 62–69.
- Schulte, P. A., Kuempel, E. D., Zumwalde, R. D., Geraci, C. L., Schubauer-Berigan, M. K., Castranova, V., Hodson, L., Murashov, V., Dahm, M. M. et Ellenbecker, M. (2012). Focused actions to protect carbon nanotube workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 55(5), 395–411.
- Shi, B., Ekberg, L. E. et Langer, S. (2013). Intermediate air filters for general ventilation applications: An experimental evaluation of various filtration efficiency expressions. *Aerosol Science and Technology*, 47(5), 488–498.
- Shvedova, A. A., Pietroiusti, A., Fadeel, B. et Kagan, V. E. (2012). Mechanisms of carbon nanotube-induced toxicity: Focus on oxidative stress. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 261(2), 121–133.
- Stephens, B. et Siegel, J. A. (2013). Ultrafine particle removal by residential heating, ventilating, and air-conditioning filters. *Indoor Air*, 23(6), 488–497.
- Thomas, D., Penicot, P., Contal, P., Leclerc, D. et Vendel, J. (2001). Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles: Experimental and modelling study. *Chemical Engineering Science*, 56(11), 3549–3561.
- VanOsdell, D. W., Liu, B. Y. H., Rubow, K. L. et Pui, D. Y. H. (1990). Experimental study of submicrometer and ultrafine particle penetration and pressure drop for high efficiency filters. *Aerosol Science and Technology*, 12(4), 911–925.
- Walsh, D. C. (1995). *The behavior of electrically active and prefilter fibrous filters under solid aerosol load* (Thèse de doctorat, Loughborough University of Technology, Loughborough, Angleterre).
- Walsh, D. C. (1996). Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load. *Filtration & Separation*, 33(6), 501–506.
- Walsh, D. C. et Stenhouse, J. I. T. (1997). The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material. *Journal of Aerosol Science*, 28(2), 307–321.
- Wang, H. C. et Kasper G. (1991) Filtration efficiency of nanometer-size aerosol particles, *Journal of Aerosol Science*, 22(1), 31–41.
- Yah, C. S., Simate, G. S. et Iyuke, S. E. (2012). Nanoparticles toxicity and their routes of exposures. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 25(2), 477–491.
- Yang, S. et Lee, G. W. M. (2005). Filtration characteristics of a fibrous filter pretreated with anionic surfactants for monodisperse solid aerosols. *Journal of Aerosol Science*, 36(4), 419–437.

ANNEXE A : INSTRUMENTATION POUR LA MESURE GRANULOMÉTRIQUE

La mesure granulométrique, ou balayage, de l'aérosol (en amont ou en aval) a été effectuée à l'aide un SMPS TSI 3938 (*Scanning Mobility Particle Sizer*), constitué d'un classificateur électrostatique TSI 3082 et d'un compteur de particules à condensation (CPC TSI 3752). Le classificateur électrostatique contient un neutraliseur (TSI 3088) et un analyseur différentiel de mobilité électrique (en anglais DMA, *Differential Mobility Analyzer*). La combinaison de ces instruments est présentée à la Figure 26.

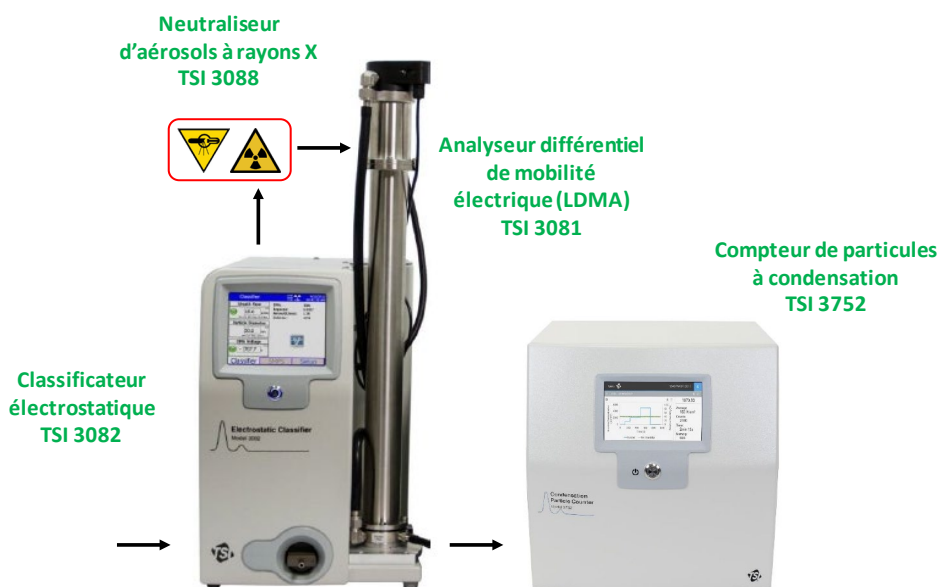


Figure 26. Instrumentation pour la mesure granulométrique.

Le neutraliseur permet de charger les aérosols suivant une distribution de charges électriques connue à l'aide d'une source de rayons X. En effet, la source permet une répartition bipolaire des ions positifs et négatifs permettant la neutralisation globale de l'aérosol par un équilibre de charge connu.

L'aérosol chargé ainsi par diffusion ionique traverse ensuite l'analyseur de mobilité électrique. Sous l'influence d'un champ électrique appliqué, les particules chargées sont déviées et traversent un courant d'air propre circulant le long de l'électrode centrale. On obtient en sortie un aérosol monodispersé et chargé positivement.

Cet aérosol monodispersé entre ensuite dans le compteur de particules. L'aérosol est tout d'abord introduit au-dessus d'un réservoir de butanol (saturateur) chauffé à 39 degrés Celsius ou l'air se sature de butanol avant de passer dans un condenseur dont les parois sont refroidies à 14 degrés. Les vapeurs de butanol se condensent alors sur la particule, ce qui augmente sa

taille. La particule sera ainsi facilement détectée à l'aide d'un photodétecteur. La Figure 27 présente le schéma de fonctionnement de cette combinaison instrumentale.

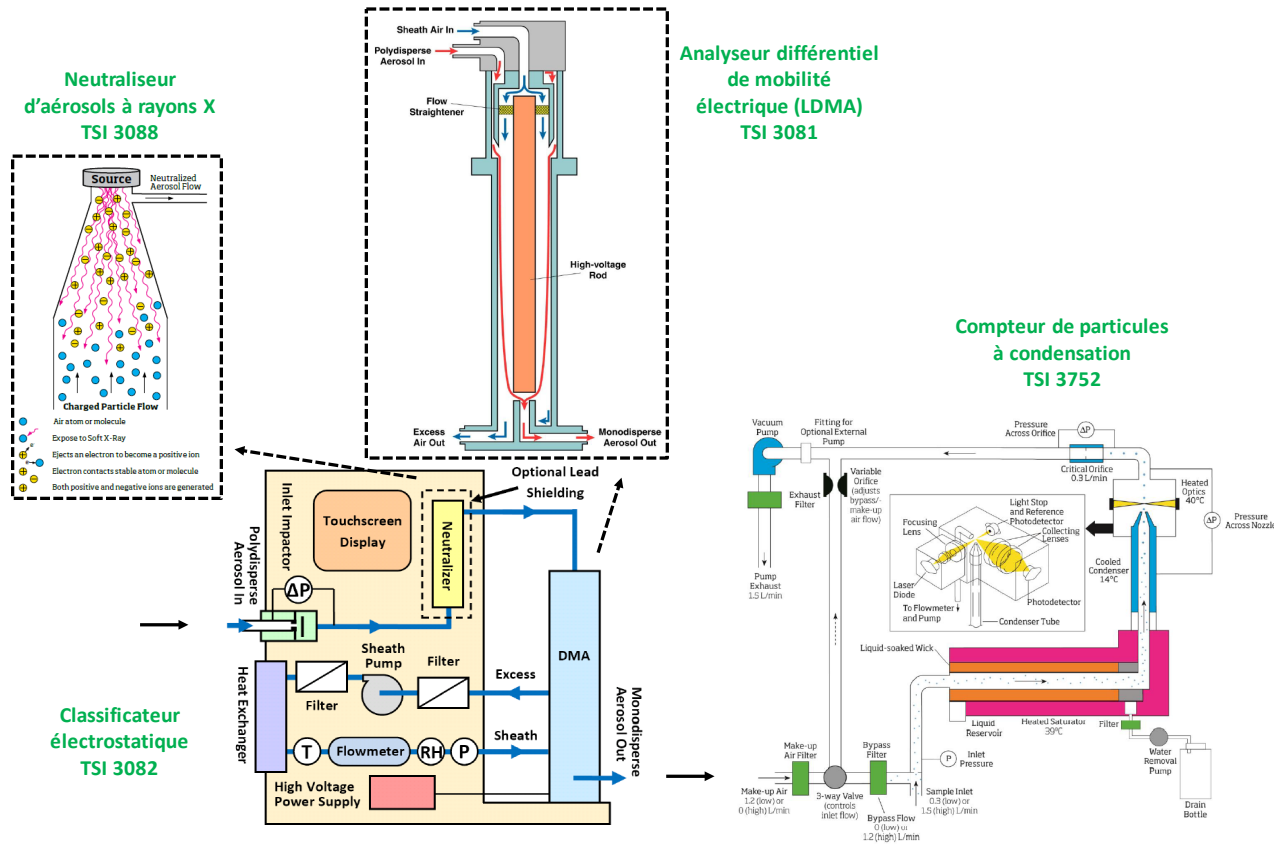


Figure 27 Schéma de fonctionnement de l'instrumentation pour la mesure de la granulométrie (documentation TSI).

L'instrumentation de mesure a été utilisée avec des débits faibles (*Sheath flow* sélectionné à 3 Litres/minute et *Aerosol flow* sélectionné à 0,3 Litres/minute), permettant de couvrir la gamme de diamètres de particules allant de 14,3 nm à 673,2 nm. Le balayage de la plage de diamètres (un balayage) était de 137 secondes (120 secondes de balayage, 7 secondes de retour à l'état initial et 10 secondes de purge). Le balayage est alors sélectionné en 16 canaux.

Notons que la granulométrie est présentée ici selon des diamètres de mobilité électrique. Le diamètre de mobilité électrique est défini comme étant le diamètre d'une particule sphérique portant une charge électrique et ayant la même mobilité électrique que la particule étudiée. Les particules de NaCl utilisées pour les mesures sont des particules cubiques non agglomérées, qui sont proches de la particule sphérique. En effet, le facteur de forme dynamique de la particule cubique est de 1,08. Le facteur de forme dynamique est défini comme le ratio entre la force de traînée agissant sur la particule étudiée et la force de traînée agissant sur une sphère ayant le même volume que la particule.

Dans ce projet, tous les taux de pénétration sont donc représentés en fonction du diamètre de mobilité électrique des particules cubiques de NaCl.

ANNEXE B : SPECTRES DE PÉNÉTRATION DU FILTRE 1

B.1 Spectres de pénétration obtenus avec le banc *Small Filter*

Les spectres de pénétration du filtre 1 présentés à la Figure 28, à la Figure 29 et à la Figure 30 sont une moyenne avec écart-type de la mesure de trois filtres distincts. Chacun des trois filtres a été utilisé pour réaliser deux mesures du taux de pénétration, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La comparaison des deux tests est aussi présentée dans les figures ci-dessous.

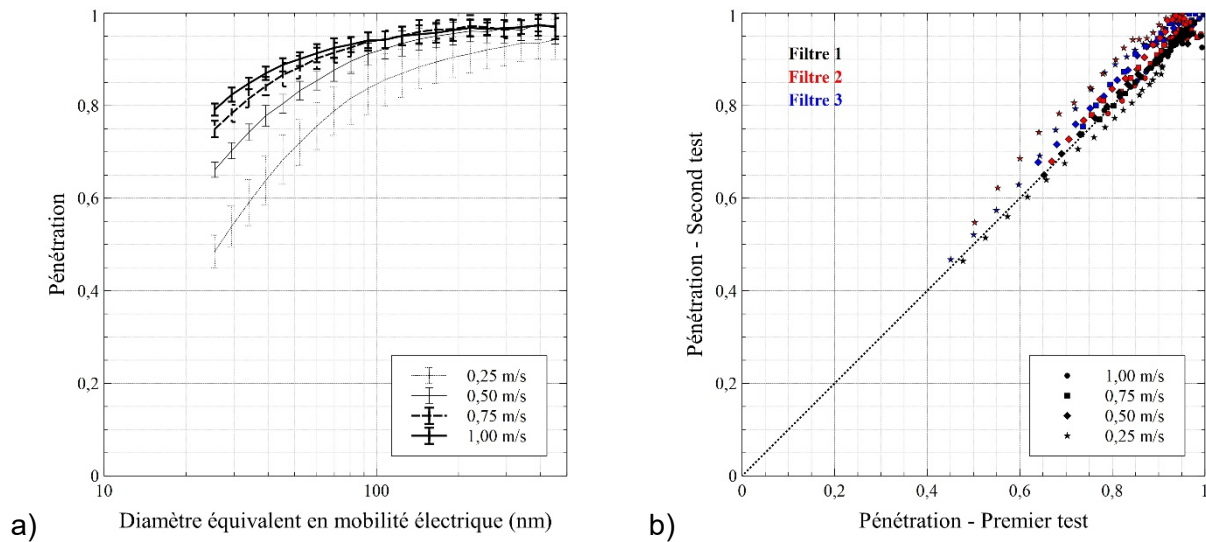


Figure 28. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

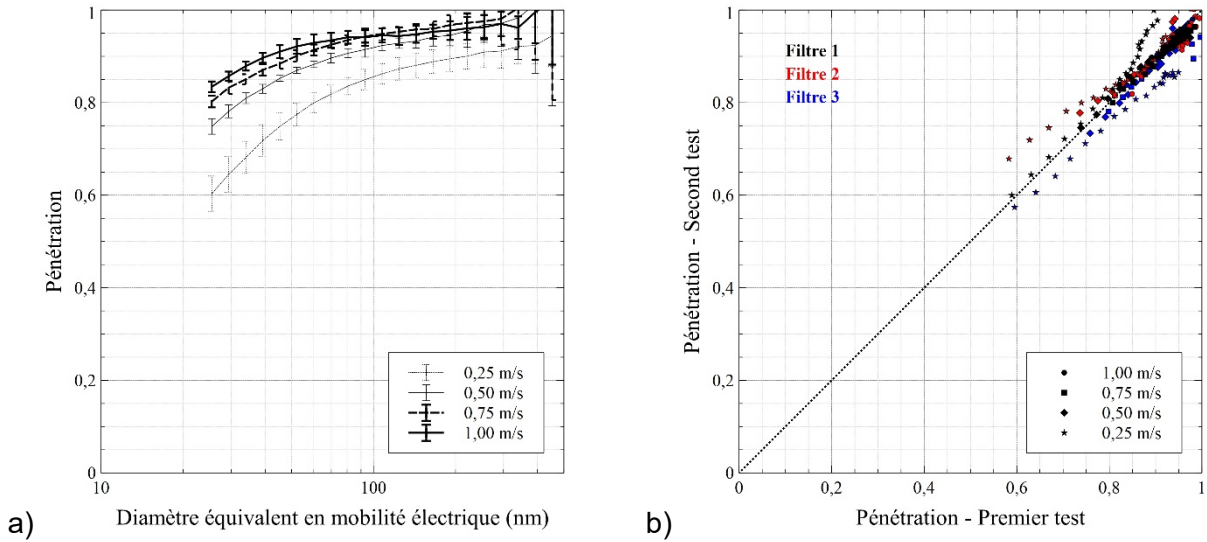


Figure 29. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

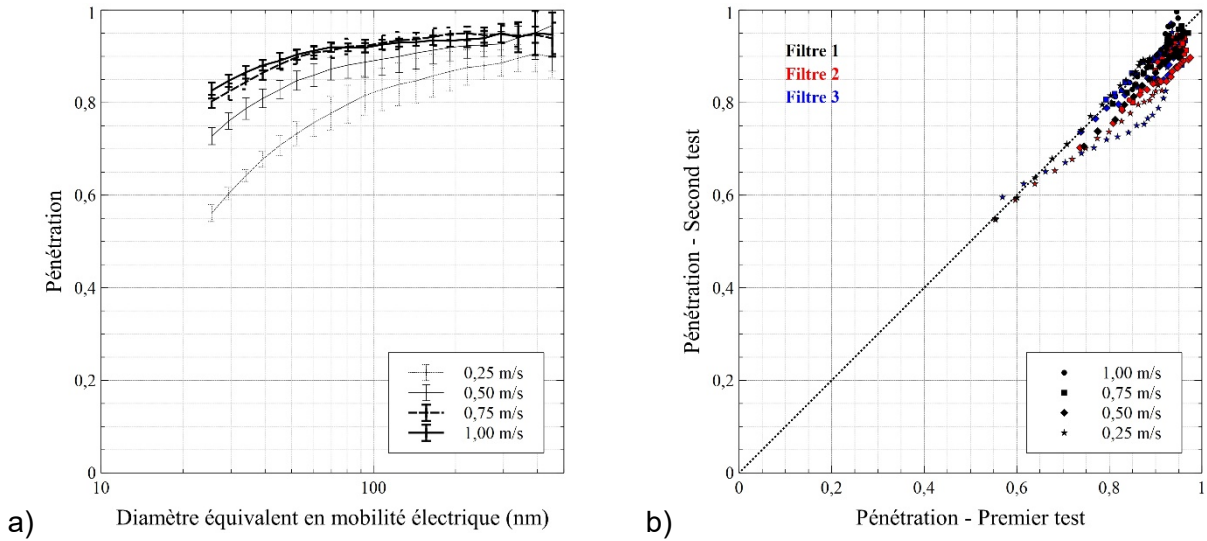


Figure 30. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

B.II Spectres de pénétration obtenus avec le banc *Big Loop*

Les spectres de pénétration du filtre 1 présentés à la Figure 31, à la Figure 32 et à la Figure 33 sont une moyenne et un écart-type de la mesure de trois filtres distincts. Chacun des trois filtres a été utilisé pour faire deux mesures de pénétration, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La comparaison des deux tests est aussi présentée dans les figures ci-dessous.

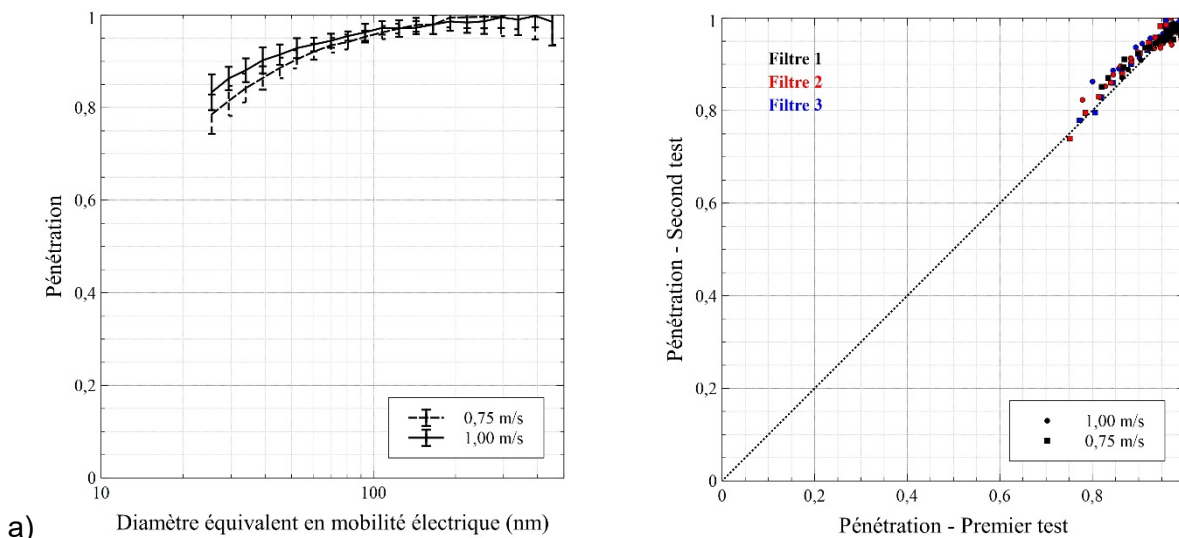


Figure 31. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

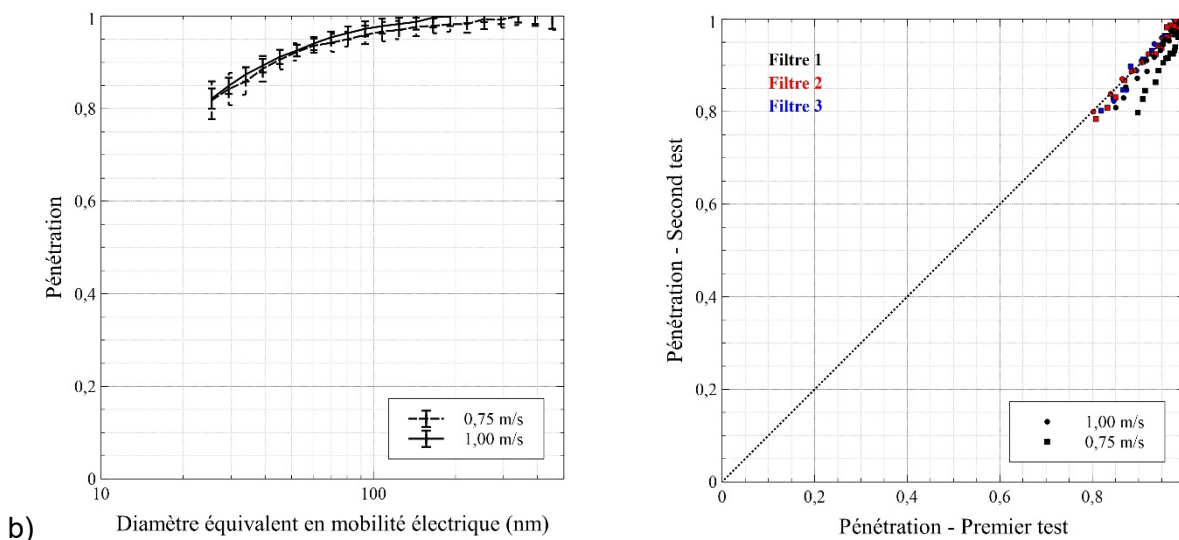


Figure 32. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

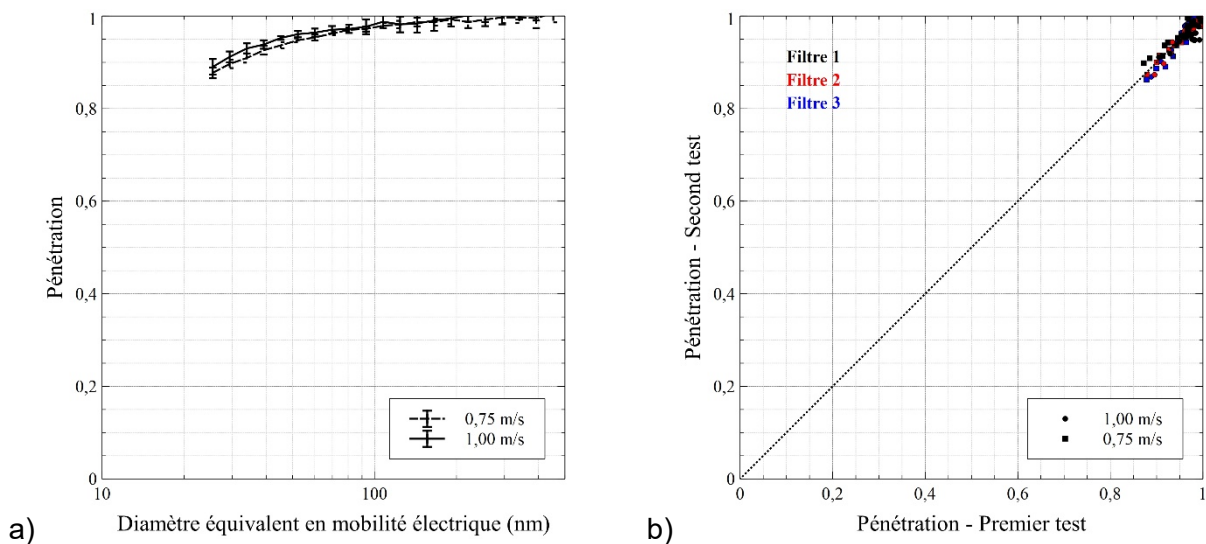


Figure 33. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 1 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

ANNEXE C : SPECTRES DE PÉNÉTRATION DU FILTRE 2

C.I Spectres de pénétration obtenus avec le banc *Small Filter*

Les spectres de pénétration du filtre 2 présentés à la Figure 34, à la Figure 35 et à la Figure 36 sont une moyenne avec un écart-type de la mesure de trois filtres distincts. Chacun des trois filtres a été utilisé pour réaliser deux mesures du taux de pénétration, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La comparaison des deux tests est aussi présentée dans les figures ci-dessous.

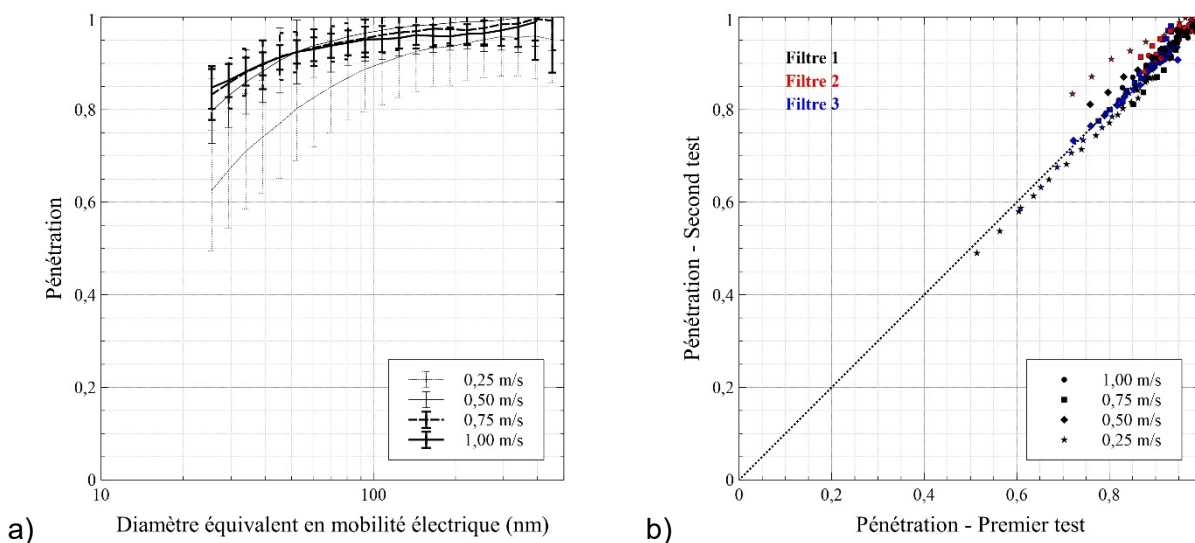


Figure 34. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

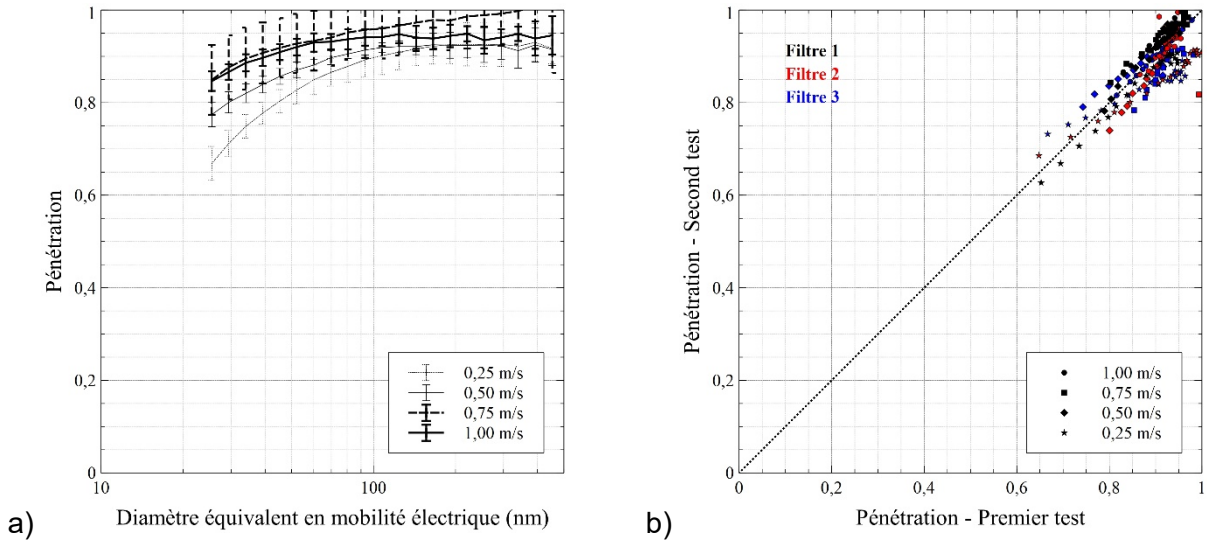


Figure 35. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

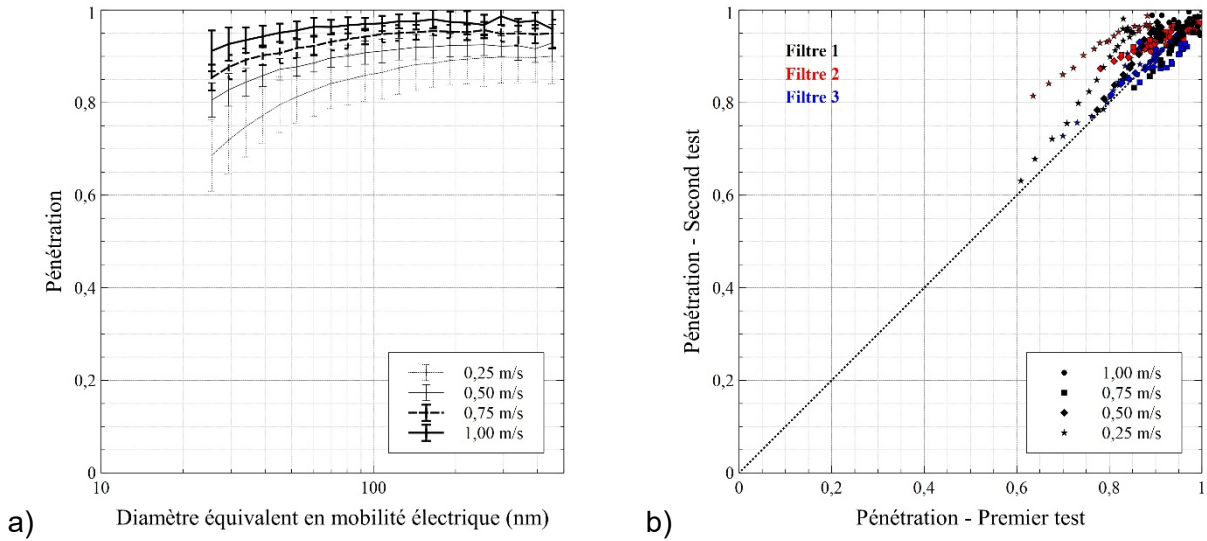


Figure 36. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

C.II Spectres de pénétration obtenus avec le banc *Big Loop*

Les spectres de pénétration du filtre 2 présentés à la Figure 37, à la Figure 38 et à la Figure 39 sont une moyenne avec écart-type de la mesure de trois filtres distincts. Chacun des trois filtres a été utilisé pour réaliser deux mesures de pénétration, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La comparaison des deux tests est aussi présentée dans les figures ci-dessous.

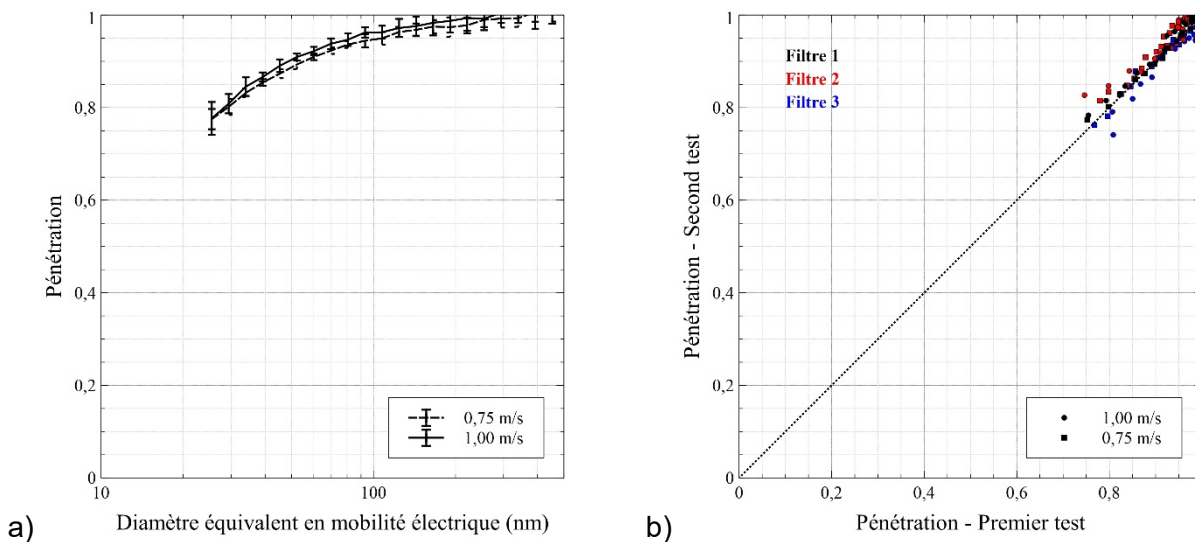


Figure 37. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

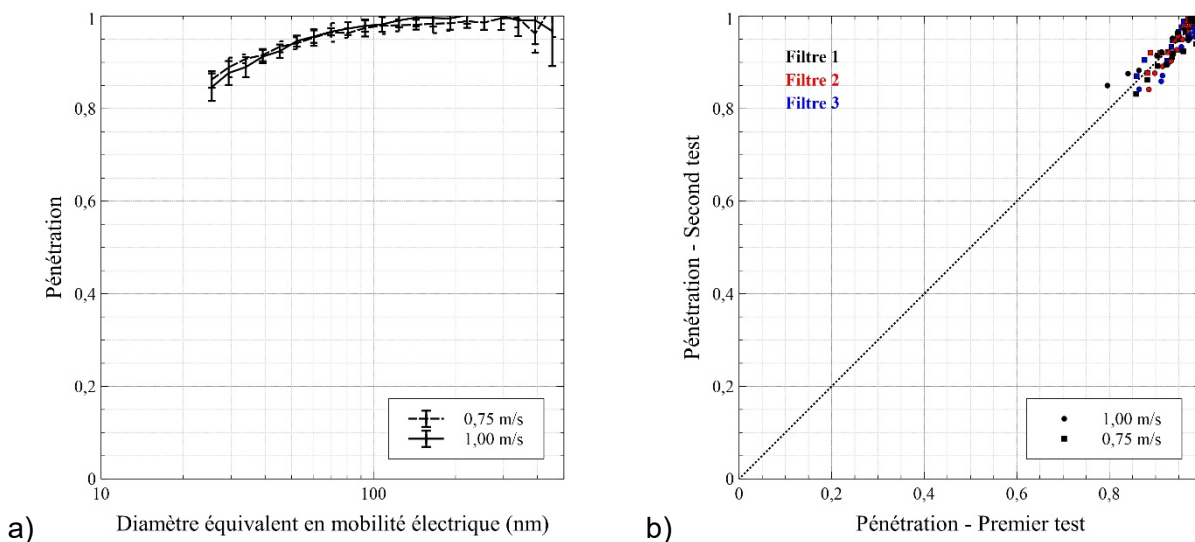


Figure 38. a) Pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

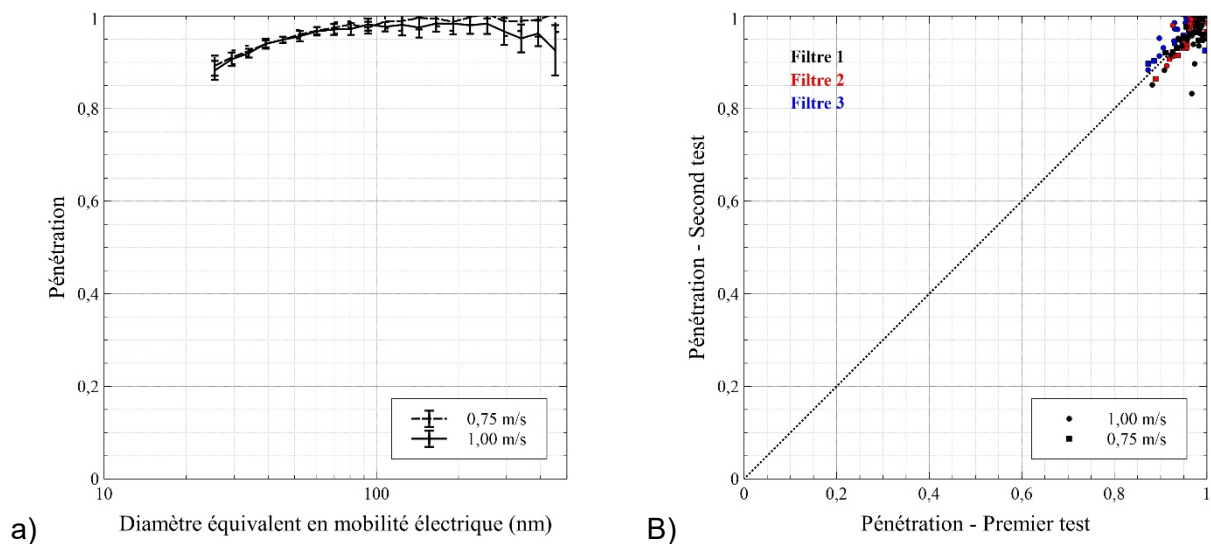


Figure 39. a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 2 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

ANNEXE D : SPECTRES DE PÉNÉTRATION DU FILTRE 3

D.I Spectres de pénétration obtenus avec le banc *Small Filter*

Les spectres de pénétration du filtre 3 présentés à la Figure 40, à la Figure 41 et à la Figure 42 sont une moyenne avec écart-type de la mesure de trois filtres distincts. Chacun des trois filtres a été utilisé pour réaliser deux mesures de pénétration, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La comparaison des deux tests est aussi présentée dans les figures ci-dessous.

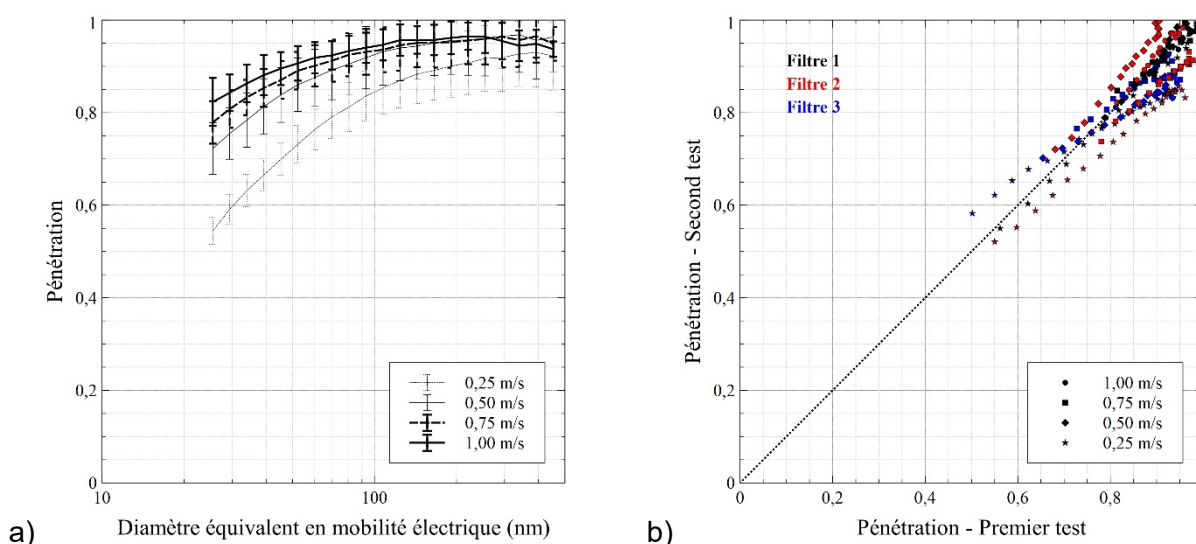


Figure 40. a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

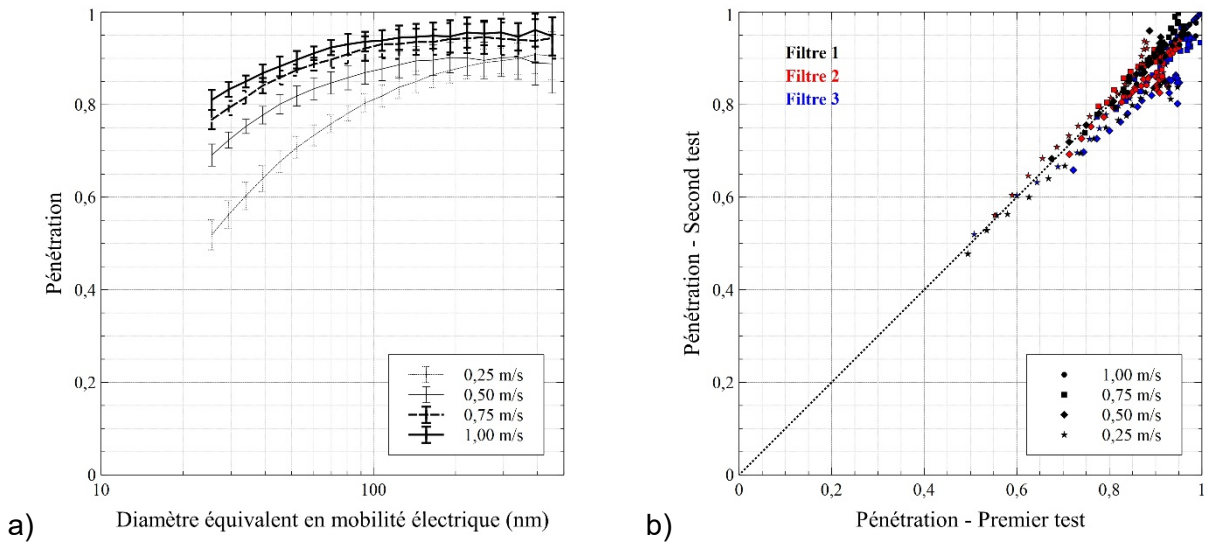


Figure 41. a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

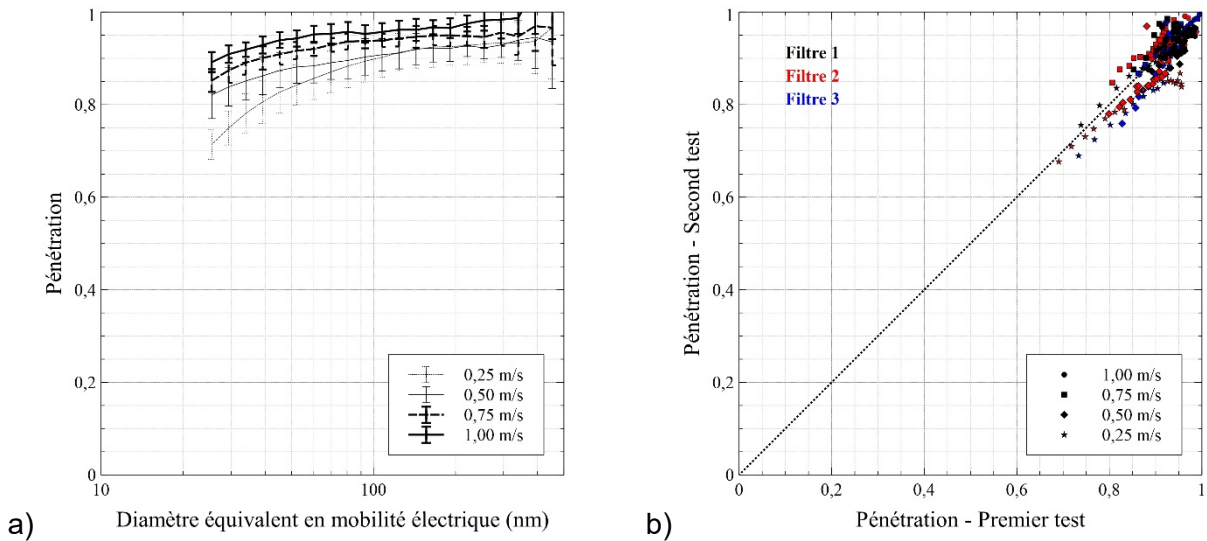


Figure 42. a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Small Filter*.

D.II Spectres de pénétration obtenus avec le banc *Big Loop*

Les spectres de pénétration du filtre 3 présentés à la Figure 43, à la Figure 44 et à la Figure 45 sont une moyenne et un écart-type de la mesure de trois filtres distincts. Chacun des trois filtres a été utilisé pour réaliser deux mesures de pénétration, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La comparaison des deux tests est aussi présentée dans les figures ci-dessous.

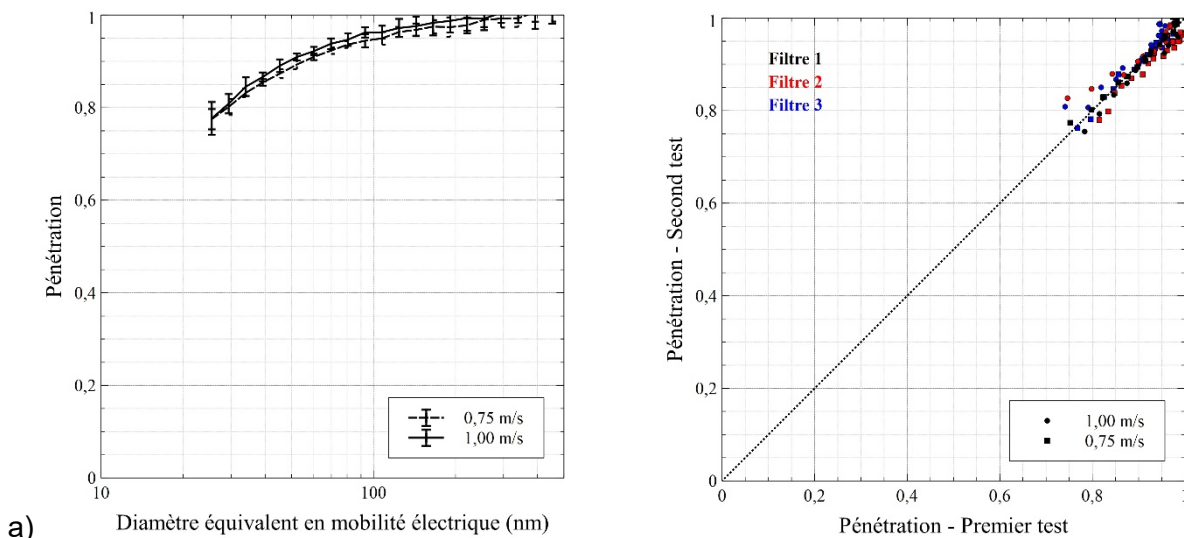


Figure 43. a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 4 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

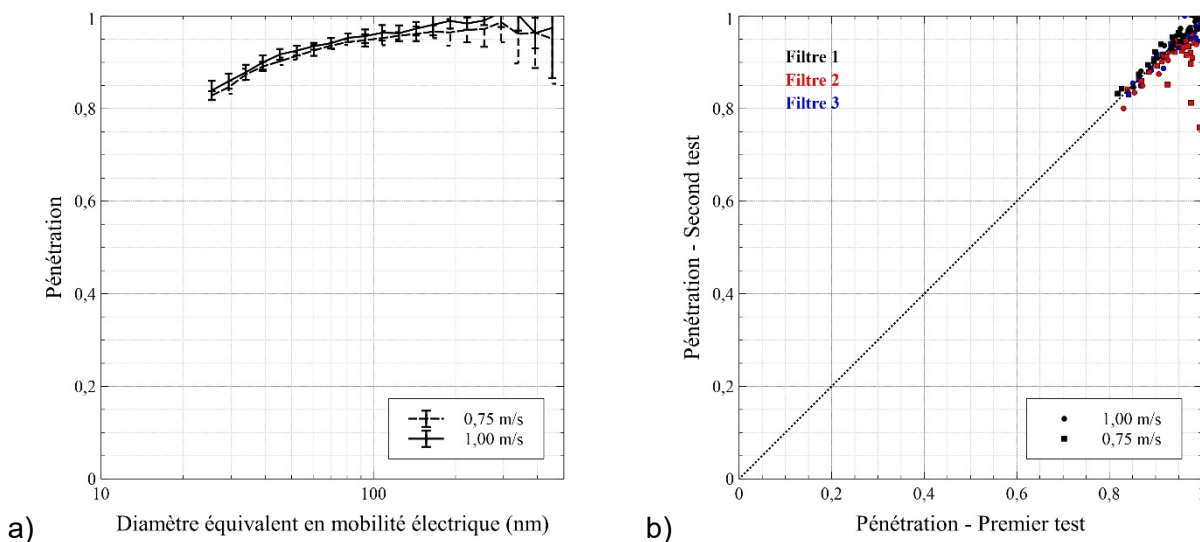


Figure 44. a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 2 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

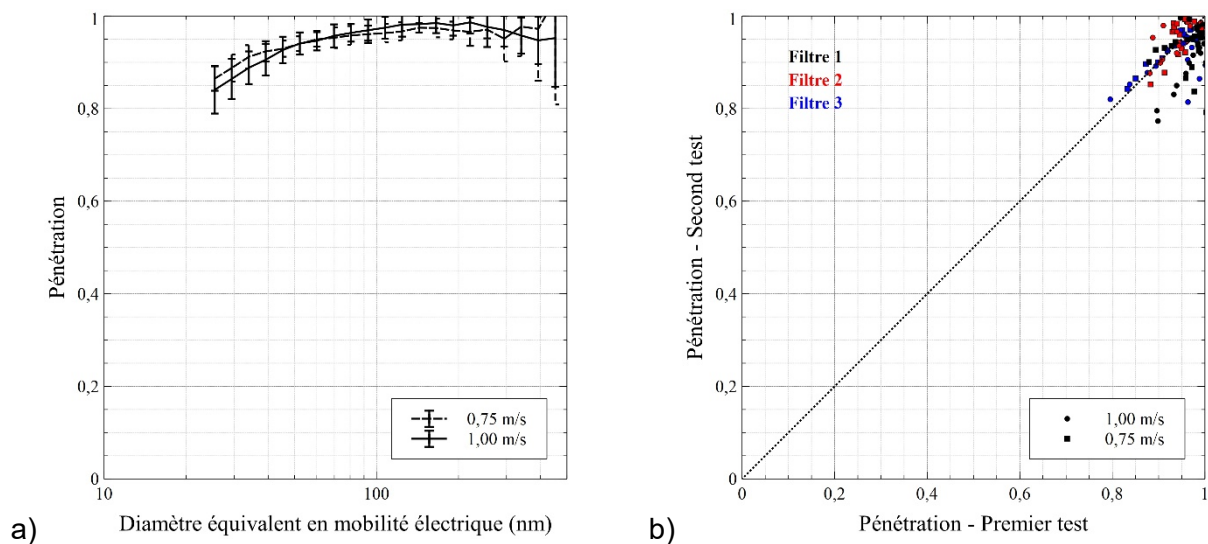


Figure 45. a) Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 3 d'une épaisseur de 1 po, et b) comparaison du taux de pénétration sur deux mesures sur le banc *Big Loop*.

ANNEXE E : SPECTRES DE PÉNÉTRATION DU FILTRE 4

E.I Spectres de pénétration obtenus avec le banc *Small Filter*

Les spectres de pénétration du filtre 4 présentés à la Figure 46 sont une moyenne avec écart-type de la mesure de trois filtres distincts. Chacun des trois filtres a été utilisé pour réaliser deux mesures de pénétration, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La comparaison des deux tests est aussi présentée à la Figure 46.

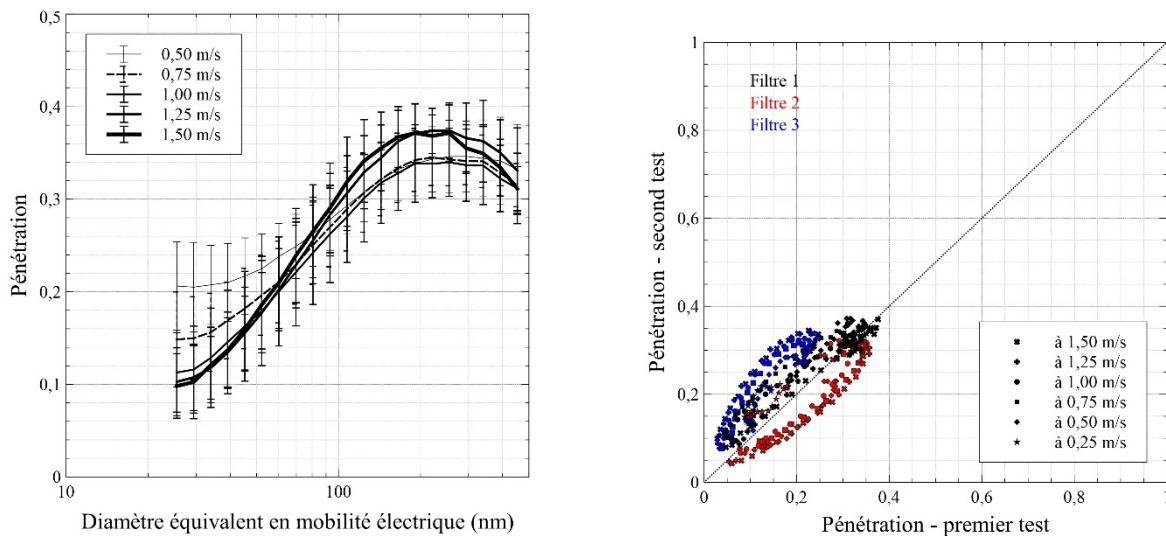


Figure 46. Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules et comparaison du taux de pénétration sur deux tests pour le filtre 4.

E.II Spectres de pénétration obtenus avec le banc *Big Loop*

Les spectres de pénétration du filtre 4 présentés à la Figure 47 sont une moyenne et un écart-type de la mesure de trois filtres distincts. Chacun des trois filtres a été utilisé pour réaliser deux mesures de pénétration, dans le but de vérifier la répétabilité des mesures. La comparaison des deux tests est aussi présentée dans la Figure 47.

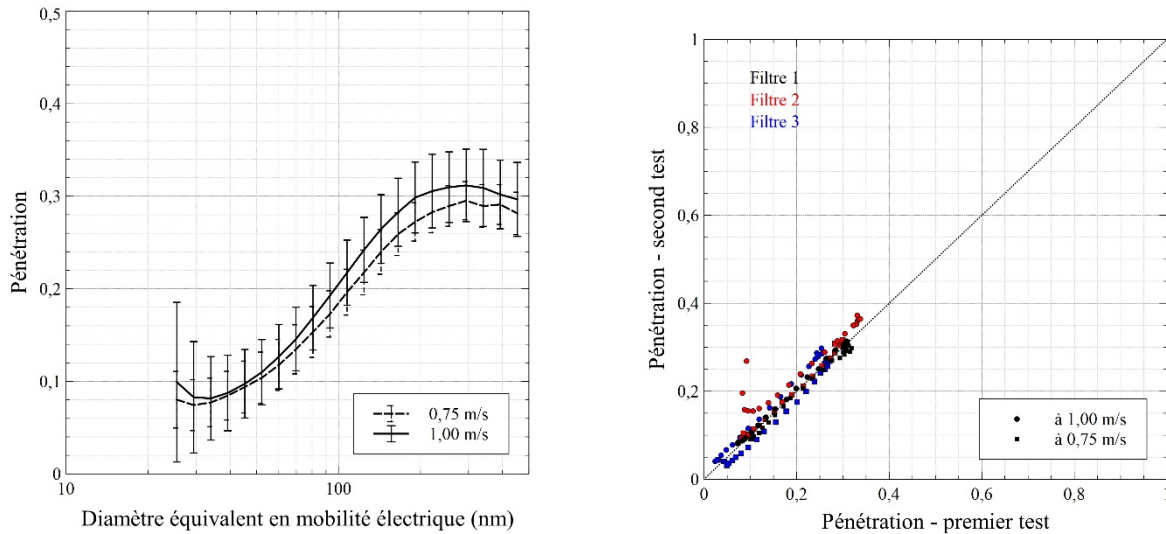


Figure 47. Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules (gauche) et comparaison du taux de pénétration sur deux tests pour le filtre 4 (droite).

ANNEXE F : SPECTRES DE PÉNÉTRATION DU FILTRE 5

F.I Spectre de pénétration obtenu avec le banc *Small Filter*

Le spectre de pénétration du filtre 5 pour une vitesse de mesure de 1,50 m/s est présenté à la Figure 48. Il s'agit d'une moyenne et d'un écart-type de trois mesures distinctes de pénétration.

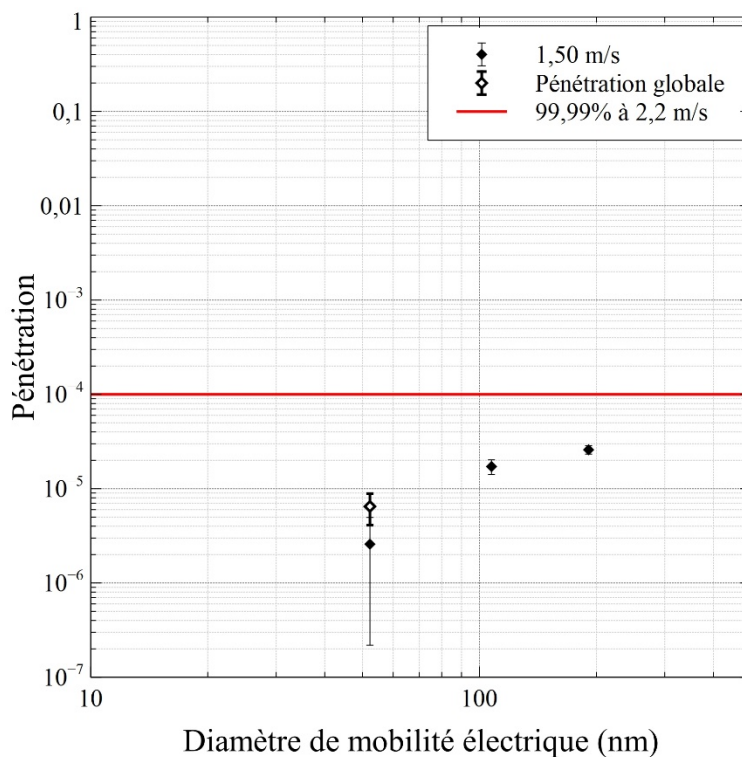


Figure 48. Taux de pénétration en fonction du diamètre des particules pour le filtre 5, mesuré sur le banc *Small Filter*.

La concentration en aérosol de test et la forte efficacité du filtre n'a pas permis de mesurer d'autres taux de pénétration en fonction de la taille des particules.

F.II Mesures globales du taux de pénétration en fonction de la vitesse de mesure

Dans le but de mesurer l'effet de la vitesse sur le taux de pénétration du filtre très efficace utilisé dans cette étude, le taux de pénétration global de l'aérosol total (centré à environ 50 nm) pour les vitesses allant de 0,25 à 1,50 m/s pour le banc *Small Filter* et pour les deux vitesses de 0,75 et 1,00 m/s pour le banc *Big Loop* a été évalué. Les résultats, ainsi que la vérification de la stabilité de la génération en fonction de la vitesse de mesure sont présentés à la Figure 49.

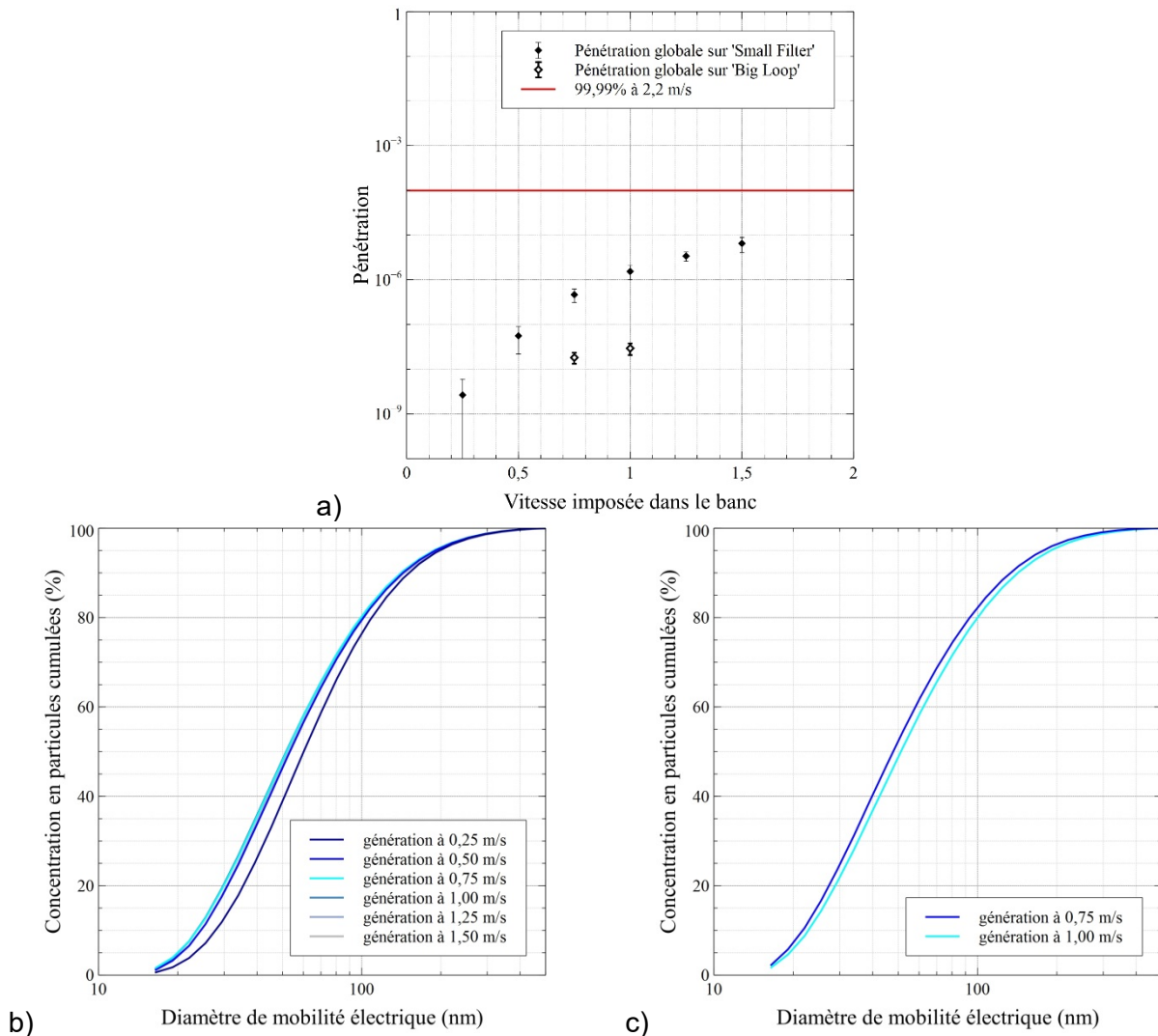


Figure 49. a) Taux de pénétration global en fonction de la vitesse de mesure et vérification de la stabilité de l'aérosol généré en fonction de la vitesse de mesure b) pour le banc *Small Filter* et c) pour le banc *Big Loop*.