

Étude de l'efficacité des vêtements de protection contre la
pénétration d'aérosols nano et submicroniques dans des
conditions proches d'une exposition réelle

par

Mehdi BEN SALAH

THÈSE PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION
DU DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTREAL, LE 19 AVRIL 2018

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Mehdi Ben Salah, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Stéphane Hallé, directeur thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ludovic Tuduri, codirecteur de thèse
Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail

M. Guy Gauthier, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Anh Dung Ngô, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Olivier Vermeersch, membre du jury, examinateur externe
Groupe CTT, Saint-Hyacinthe

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 15 MARS 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Un moment émouvant pour un doctorant est celui où il entreprend d'écrire ces remerciements. Cela signifie en premier lieu l'accomplissement d'un travail intense, mais surtout cela permet de souligner la présence et la participation, de près ou de loin, de nombreuses personnes qui ont pris part à mon aventure, qui m'ont supporté pendant toutes ces années et sans qui je n'aurais pu accomplir ce travail.

Tout d'abord, je souhaite remercier l'ensemble des membres de mon jury qui ont accepté d'examiner ce mémoire et de m'avoir fait parvenir leurs remarques pertinentes.

Je tiens dans un premier temps à remercier mon directeur et mon codirecteur de thèse, Messieurs Stéphane Hallé et Ludovic Tuduri pour m'avoir fait confiance et accueilli au sein de leur équipe, en milieu de thèse, alors que je traversais des moments difficiles. Pour ça, je leur serai à jamais reconnaissant. Merci pour l'enthousiasme dont ils ont fait preuve à travailler sur ce sujet de recherche et la confiance qu'ils m'ont témoignée en me laissant suffisamment d'autonomie dans la progression de mon travail. Merci pour leur disponibilité, ainsi que pour la passion qu'ils ont manifesté et qu'ils m'ont transmise durant nos conversations animées sur la filtration. Enfin je les remercie pour leur appui scientifique et technique qui a été inestimable pour conduire cette thèse.

Un immense merci, à toi, Ludwig « Mr. Vinnechaize » d'avoir fait avancer la réflexion sur les résultats obtenus, en particulier sur la théorie de filtration et l'élaboration de modèles. Ça a été un réel plaisir de travailler avec toi et toujours dans la bonne humeur. Un grand merci également pour m'avoir soutenu et supporté au quotidien pendant toutes ces années, c'est en grande partie grâce à toi que ce travail a pu aboutir.

Merci au Professeur Maximilien Debia du département de santé environnementale et santé au travail de l'Université de Montréal pour le prêt de ses équipements qui m'ont permis de réaliser la majorité des mesures de pénétration. Merci également pour son appui technique et scientifique.

VI

Un merci tout particulier à Patrick « Papy » Blouin et Michel Drouin pour leur soutien technique et leur bonne humeur, ils m'ont été d'une aide inestimable dans la réalisation de certains de mes travaux comme la réalisation du banc d'essai et la conception des capteurs. Merci d'avoir été là à chaque fois que j'en avais besoin.

Au cours de cette thèse, j'ai eu la chance de travailler avec des personnes d'une habilité sans pareil. Je tiens donc à remercier l'ensemble des ingénieurs et des techniciens qui ont compté ni de leur temps ni de leur énergie pour répondre à nos besoins et toujours dans les plus brefs délais : merci à Alexandre Vigneault, Serge Plamondon, Alain Grimard, Olivier Bouthot, Radu Romanica, Michel Orsini, Patrick Sheridan, Jean-Guy Gagnon et Éric Marcoux. Cette équipe de choc a permis de faire face à tous les problèmes. Merci à vous tous !

Cette histoire n'aurait pu se dérouler aussi bien, sans la participation de nos stagiaires qui pour se donner un air « cool » se sont autoproclamés la Nanoteam. Quelle équipe !!! Mille mercis à vous tous. Nicolas Mc Fly, Maud Miss Nano, Jessy Matador, Pierre-Emmanuel et Thomas Jaunin. Merci également à Gérald, Mathieu et Olivier pour toutes ces discussions enrichissantes et ces moments de franche camaraderie passés avec vous.

Je souhaite enfin finir, par toutes les personnes qui comptent le plus pour moi et à qui je dédie ce mémoire. Tout d'abord à mes parents sans qui je ne serai pas là aujourd'hui qui m'ont toujours appuyé et soutenu (sous toutes formes que ce soit) au cours de mes longues études. Bien sûr à mon frère et ma sœur pour simplement exister, ainsi qu'à toute ma famille pour leur soutien indéfectible.

Enfin, merci à Toi de me soutenir dans notre quotidien, de me supporter à longueur d'année, de tout l'amour que tu me donnes et par-dessus tout, merci de m'avoir offert ce petit être qui comble nos vies et dont le sourire emplît mon cœur de joie chaque jour. Merci à Vous deux d'exister dans ma vie.

ÉTUDE DE L'EFFICACITÉ DES VÊTEMENTS DE PROTECTION CONTRE LA PÉNÉTRATION D'AÉROSOLS NANO ET SUBMICRONIQUES DANS DES CONDITIONS PROCHES D'UNE EXPOSITION RÉELLE

Mehdi BEN SALAH

RÉSUMÉ

Du fait de leur forte croissance d'utilisation à l'échelle industrielle, le développement des nanoparticules, leur préparation et leur intégration dans différents produits impliquent un potentiel d'exposition professionnelle important, plusieurs millions de travailleurs à travers le monde. Or, de nombreuses études ont démontré des effets néfastes lors d'un contact cutané (irritations, dermatites). Plusieurs organismes recommandent par précaution le port de vêtements de protection chimique dits de « type 5 » pour se prémunir d'un quelconque danger. Toutefois, bien que certaines études aient été menées pour évaluer leur performance contre une exposition aux nanoparticules, elles n'ont cependant pas tenu compte des conditions d'une exposition réelle en milieu professionnel. Ce projet a été mené afin de contribuer à l'évaluation de l'efficacité de ces vêtements de protection contre des aérosols nano et submicroniques dans des conditions proches d'une exposition réelle. Pour ce faire, 5 vêtements de protection ont été étudiés : 4 combinaisons intégrales de type 5 et une blouse de laboratoire servant de référence. Dans un premier temps, la déformation des vêtements pendant leur utilisation a été mesurée. Par la suite, des déformations mécaniques simulant cette utilisation en condition réelle des matériaux ont été appliquées simultanément à l'exposition aux particules. Il s'avère que pour la majorité des matériaux, le taux de pénétration est relativement faible. Il a ainsi été montré que les sollicitations mécaniques, dans les conditions retenues, n'avaient pas d'impact significatif sur l'efficacité des matériaux de vêtements de protection testés.

Mots-clés : nanoparticules, aérosol, vêtements de protection, conditions de travail, déformations mécaniques

STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF PROTECTIVE CLOTHING AGAINST THE PENETRATION OF NANO AND SUB-MICRON SPRAYS IN CONDITIONS CLOSE TO A REAL EXHIBITION

Mehdi BEN SALAH

ABSTRACT

Because of their strong growth of use on an industrial scale, the development of nanoparticles, their preparation and their integration into different products involve a significant occupational exposure potential, millions of workers across the world. However, many studies have shown adverse effects on skin (irritation, dermatitis). Several organizations recommend caution by wearing "type 5" chemical protective clothing to prevent any risk. However, while some studies have been conducted to assess their performance against exposure to nanoparticles, they have not been conducted under conditions of an actual exposure in the workplace. This project was carried out to assist in the evaluation of the effectiveness of protective clothing against the nano and submicron aerosol in conditions of actual exposure. 5 protective clothing were investigated: 4 type 5 coveralls and 1 lab coat as a reference. In a first step, the deformation of the clothing during use was measured. Thereafter mechanical deformations, simulating the real condition in use of materials, were applied simultaneously with exposure to particles. It turns out that for most materials the penetration rate is relatively low. It has been shown that mechanical stress, in our selected conditions, had no significant impact on the effectiveness of protective clothing tested.

Keywords : nanoparticles, aerosol, protective clothing, work conditions, mechanical deformations.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 OBJECTIFS ET ORIGINALITÉ DE LA RECHERCHE	7
1.1 Déterminer la déformation des combinaisons lors de leur utilisation.....	7
1.2 Développer une méthode d’essai	8
1.3 Comparer et comprendre la pénétration des particules à travers les vêtements	8
1.4 Originalité des travaux.....	9
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	11
2.1 Les nano-objets	11
2.1.1 Définition	11
2.1.2 Les nanoparticules et la santé humaine.....	12
2.1.3 La pénétration cutanée	12
2.1.3.1 La peau et l’absorption cutanée	13
2.1.3.2 Facteurs influençant l’absorption cutanée.	14
2.1.3.3 Étude de la pénétration cutanée	15
2.1.4 Expositions professionnelles aux nanoparticules.....	16
2.2 Les vêtements de protection cutanée	17
2.2.1 Voie d’entrée des particules dans les vêtements de protection chimique	17
2.2.2 Définition des vêtements de protection chimique.....	18
2.2.2.1 Classification.....	18
2.2.2.2 Protection contre les particules solides.....	21
2.2.3 Efficacité sur les vêtements de protection contre les nanoparticules.....	23
2.2.4 Simulation des conditions d’utilisation des vêtements de protection – Étude des déformations mécaniques	27
2.3 Étude des déformations mécaniques subies par les VPC.....	29
2.3.1 Les capteurs de déformation CPC.....	30
2.3.1.1 Théorie de la percolation électrique.....	30
2.3.1.2 Études existantes.....	31
2.4 Écoulement d’un fluide dans un textile nontissé :	34
2.4.1 Efficacité de filtration d’un médium fibreux	35
2.4.2 Efficacité unitaire de collecte.....	36
2.4.2.1 Collecte par diffusion brownienne.....	36
2.4.2.2 Collecte par interception directe	41
2.4.3 Efficacité de collecte totale	43
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	45
3.1 Déformation des vêtements de protection.....	45
3.1.1 Développement des capteurs.....	45
3.1.1.1 Protocole de mise en forme.....	47
3.1.1.2 Étalonnage des capteurs.....	48

3.1.2	Mesures sur sujets humains.....	49
3.2	Efficacité des matériaux de VPC	50
3.2.1	Les matériaux.....	50
3.2.1.1	Description.....	51
3.2.1.2	Caractérisation	52
3.2.2	Banc d'essai	53
3.2.2.1	Description.....	53
3.2.2.2	Génération de l'aérosol et son parcours à travers le montage ...	54
3.2.2.3	Cellule de pénétration	55
3.2.2.4	Système de déformation mécanique	55
3.2.3	Mesure des aérosols	57
3.2.3.1	SMPS	58
3.2.3.2	EEPS	59
3.2.3.3	P-Trak	61
3.2.4	Réalisation des essais de pénétration	63
CHAPITRE 4	MESURE DE LA DÉFORMATION DES VÊTEMENTS DE PROTECTION.....	65
4.1	Étalonnage électromécanique	65
4.1.1.1	Facteur de jauge	66
4.1.1.2	Influence de la vitesse de traction.....	67
4.1.1.3	Comportement du capteur en cycle dynamique.....	68
4.1.1.4	Conversion de la résistance électrique en allongement	69
4.2	Mesure de la déformation des VPC en condition de travail	71
CHAPITRE 5	CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX TEXTILES	75
5.1	Caractérisation de surface	75
5.2	Caractéristiques des matériaux	77
5.2.1	Propriétés physiques	77
5.2.2	Caractérisation aéraulique des matériaux	79
5.2.3	Mesure de la perte de charge à l'intérieur des VPC en mouvement	81
5.3	Comportement mécanique des matériaux textiles	82
5.3.1	Déformation multiaxiale	83
5.3.2	Analyse de surface après déformation	84
CHAPITRE 6	MESURE DE LA PERMÉANCE DE PARTICULES AÉROPORTÉES À TRAVERS LES MATÉRIAUX DE VPC	87
6.1	Caractérisation de la perméance à travers les matériaux	87
6.1.1	Résultats obtenus par SMPS	87
6.1.1.1	Mesure de la perméance totale.....	88
6.1.1.2	Comparaison granulométrique.....	90
6.1.2	Résultats EEPS.....	94
6.1.2.1	Mesure de la perméance totale.....	95
6.1.2.2	Comparaison granulométrique.....	96
6.1.2.3	Influence des déformations dynamiques.....	99
6.1.2.4	Influence de la pression générée sur le taux de perméance	103

6.1.3	Résultats P-Trak	104
6.1.3.1	Mesure de la perméance totale.....	104
6.1.3.2	Influence des déformations dynamiques.....	105
6.2	Comparaison des pressions générées à l'intérieur des VPC et dans la chambre de perméance	109
6.3	Étude comparative	111
6.3.1	Perméance totale	111
CHAPITRE 7 MODÉLISATION DE L'EFFICACITÉ DES MATÉRIAUX		
	DE VPC	115
7.1	Comparaison avec la théorie.....	115
7.2	Développement d'un modèle de l'efficacité de collecte.....	117
7.2.1	Modélisation de l'efficacité de collecte pour le matériau D – U = 0,4 cm/s	119
7.2.1.1	Efficacité unitaire de collecte par diffusion	119
7.2.1.2	Efficacité unitaire de collecte par interception	121
7.2.2	Modélisation de l'efficacité de collecte pour le matériau D – U = 7 cm/s	124
CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE L'ÉTUDE		129
ANNEXE I	Résultats des mesures d'allongement des VPC	135
ANNEXE II	ALGORITHME DE DÉTECTION DES PICS	137
ANNEXE III	PROGRAMME MATLAB DE VALIDATION DES MODÈLES D'EFFICACITÉ.....	139
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		143

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2-1	Critères de performances « chimiques » pour les VPC19
Tableau 2-2	Exigences de performances pour les matériaux de protection chimique.....21
Tableau 2-3	Régime d'écoulement en fonction du nombre de Knudsen38
Tableau 2-4	Expressions de l'efficacité unitaire de collecte par diffusion issue de la littérature40
Tableau 2-5	Expressions de l'efficacité unitaire de collecte par interception issue42
Tableau 2-6	Influence de divers paramètres intrinsèques à l'aérosol, au filtre et à la filtration sur l'efficacité totale d'un filtre à fibres pour les principaux mécanismes de collecte44
Tableau 3-1	Caractéristiques du silicone46
Tableau 3-2	Matériaux sélectionnés51
Tableau 3-3	Principales caractéristiques des appareils de mesure.....62
Tableau 5-1	Spécifications des matériaux77
Tableau 5-2	Détermination du régime d'écoulement à travers les matériaux en fonction de la vitesse de filtration.....80
Tableau 5-3	Caractéristique aéraulique des matériaux81
Tableau 7-1	Domaine d'étude des modèles sélectionnés.....115
Tableau 7-2	Paramètres de l'efficacité unitaire par diffusion obtenue pour le média D.....120
Tableau 7-3	Coefficient de l'efficacité unitaire par interception obtenu pour le média D.....122
Tableau-A I-1	Allongements moyens mesurés pour chaque capteur – Taille S135
Tableau-A I-2	Allongements moyens mesurés pour chaque capteur – Taille L135

Tableau-A I-3	Allongements moyens mesurés pour chaque capteur – Taille 2XL135
---------------	---

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0-1	Principaux domaines d'application des nanoparticules.....2
Figure 2-1	Illustration représentant les principales formes de nano-objets.....11
Figure 2-2	Photos du sujet après exposition.....23
Figure 2-3	Représentation schématique de la déformation multiaxiale appliquée à un matériau lors des tests de pénétration29
Figure 2-4	Évolution de la résistivité électrique d'un matériau en fonction de la concentration volumique de charge conductrice31
Figure 2-5	Prototype de gants et justaucorps équipé de capteurs.....32
Figure 2-6	Mécanisme de collecte par diffusion brownienne37
Figure 2-7	Collecte des particules par impaction et interception41
Figure 2-8	Allure de l'efficacité d'un matériau fibreux selon le diamètre de particules.....43
Figure 3-1	Gabarit de masque46
Figure 3-2	Vulcanisation des capteurs.....47
Figure 3-3	Positionnement des capteurs sur les combinaisons.....49
Figure 3-4	Schéma du montage expérimental : A – en vase clos; B - mode déformation.....54
Figure 3-5	Schéma du banc d'essai et de la sonde de déformation.....56
Figure 3-6	Images microscopiques de nanoparticules de NaCl polydispersées57
Figure 3-7	Schéma de la chaîne de mesure du SMPS58
Figure 3-8	Schéma du EEPS60
Figure 3-9	Schéma du P-Trak.....62

Figure 4-1	Réponse électrique du capteur en fonction de l'allongement du textile	66
Figure 4-2	Réponse électrique du capteur en fonction de l'allongement pour 5 cinq vitesses de traction.....	67
Figure 4-3	Réponse électrique du capteur pendant un test en cycle dynamique	68
Figure 4-4	Réponse électrique moyenne du capteur et la régression associée	69
Figure 4-5	Guide de taille des couvres tout, en cm et en pouces	71
Figure 4-6	Mesure de la déformation d'un VPC au niveau du genou	72
Figure 4-7	Déformation mesurée pour chaque position du capteur et pour chaque sujet	73
Figure 5-1	Images MEB des surfaces des matériaux A, B, C, D et E.	76
Figure 5-2	Perte de charge moyenne mesurée à l'intérieur d'un VPC – matériaux A.....	82
Figure 5-3	Courbes de déformation multiaxiale jusqu'à la rupture des matériaux	83
Figure 5-4	Images MEB des surfaces des matériaux avant et après déformation.	85
Figure 6-1	Granulométrie de l'aérosol en amont, mesuré par SMPS.....	88
Figure 6-2	Perméance totale à travers les VPC en fonction	89
Figure 6-3	Taux de perméance expérimentale pour chacun des matériaux en fonction de la déformation appliquée.....	91
Figure 6-4	Granulométrie de l'aérosol en amont.....	95
Figure 6-5	Perméance totale à travers les VPC en fonction de l'allongement subi par les matériaux	96
Figure 6-6	Taux de perméance pour chacun des matériaux en fonction	98
Figure 6-7	Évolution du taux de perméance en fonction de la déformation	100
Figure 6-8	Données brutes EEPS des matériaux sans déformation.....	101

Figure 6-9	Comparaison des taux de perméance totaux en déformation statique et dynamique	102
Figure 6-10	Taux de perméance et pression	103
Figure 6-11	Perméance totale à travers les VPC en fonction de la déformation appliquée	105
Figure 6-12	Données brutes du P-Trak pendant les essais de déformation dynamique	106
Figure 6-13	Comparaison des taux de perméance en déformation statique et dynamique.....	108
Figure 6-14	Profils des pressions : A) à l'intérieur d'un VPC (hanche / 2XL) et B) lors de test de perméance (allongement 5%) – matériau A	110
Figure 6-15	Résultats comparatifs de la perméance totale des matériaux (mode statique)	113
Figure 7-1	Comparatif de la perméance expérimentale des 5 matériaux avec perméance théorique calculée (selon le matériau D) selon les modèles de Stechkina et Fuchs, de Lee et Liu et de Hinds : A - SMPS; B - EEPS	116
Figure 7-2	Efficacité unitaire de collecte expérimentale et théorique en fonction du diamètre de particules pour le média D – a) $U = 0,4$ cm/s et b) $U = 7$ cm/s	118
Figure 7-3	Corrélation de l'efficacité unitaire de collecte en fonction du nombre de Peclet pour le média D – $U = 0,4$ cm/s	120
Figure 7-4	Comparaison de la perméance entre les différents modèles et les résultats expérimentaux pour le média D	123
Figure 7-5	Comparaison de la perméance à $U = 7$ cm/s avec le modèle développé pour $U = 0,4$ cm/s - média D	124
Figure 7-6	Corrélation de l'efficacité unitaire de collecte en fonction du nombre de Peclet pour le média D – $U = 7$ cm/s	125
Figure 7-7	Comparaison de la perméance entre les différents modèles et les résultats expérimentaux pour le média D – $U = 7$ cm/s.....	126

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
APR	Appareil de Protection Respiratoire
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCHST	Centre Canadien d'Hygiène et de Sécurité au Travail
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CNTP	Conditions Normales de Température et de Pression
CSA	Canadian Standards Association
EEPS	Engine Exhaust Particle Sizer Spectrometer
EPI	Équipements de Protection Individuelle
INRS	Institut National de Recherche et de Sécurité
IRSST	Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail
ISO	International Organization for Standardization
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MET	Microscopie Électronique en Transmission
NFPA	National Fire Protection Association
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PEN	Project on Emerging Nanotechnologies
PIXE	Particle-Induced X-ray Emission
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer Spectrometer
UPC	Ultrafine Particle Counter

VLEP Valeur Limite d'Exposition Professionnelle

VPC Vêtement de Protection Chimique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Lettres latines

A_0 : gain en tension de l'amplificateur	(V)
A_f : surface spécifique des fibres	(m ² ·kg ⁻¹)
C : concentration de particules	(part·cm ⁻³)
C_{amont} : concentration de particules en amont	(part·cm ⁻³)
C_{aval} : concentration de particules en aval	(part·cm ⁻³)
C_u : coefficient de correction de Cunningham	
D : coefficient de diffusion brownienne des particules	(m ² ·s ⁻¹)
d_f : diamètre moyen des fibres	(m)
d_p : diamètre des particules	(m)
J : flux surfacique de particules	(part·m ⁻² ·s ⁻¹)
k_B : constante de Boltzmann	(1,38x10 ⁻²³ J·K ⁻¹)
Kn_p : le nombre de Knudsen de particule	
K_u : facteur hydrodynamique de Kuwabara	
P : pénétration des particules à travers le média	(%)
p : constante	
P_{amont} : pression en amont du média	(Pa)
P_{aval} : pression en aval du media	(Pa)
Pe : nombre de Peclet	
r : constante	
Re : nombre de Reynolds	
R_0 : résistance initiale du capteur	(Ω)
R_{capteur} : la résistance du capteur	(Ω)
R_{pont} : la résistance utilisée pour le montage potentiométrique	(Ω)
R_n : résistance normalisée	(Ω)
St : nombre de Stokes	

XXIV

T : température	(K)
t : exposant critique	
U : vitesse de filtration	(m·s ⁻¹)
V _{cc} : la tension d'alimentation du montage	(V)
V _{capteur} : la tension aux bornes du capteur	(V)
V _{os} : la tension de décalage en sortie l'amplificateur	(V)
Z : épaisseur du filtre	(m)

Lettres grecques

α : compacité du média filtrant	
ΔP : perte de charge	(Pa)
ΔR_n : la variation de résistance unitaire	
$\Delta \varepsilon$: variation de l'allongement unitaire	
ε : allongement unitaire	(mm/mm)
η : efficacité de collecte totale d'une fibre	
η_d : efficacité unitaire de collecte par diffusion	
η_r : efficacité unitaire de collecte par interception directe	
η_i : efficacité unitaire de collecte par impaction	
Φ : concentration de charge	(part·m ⁻³)
Φ_c : concentration de charge au seuil de percolation	(part·m ⁻³)
λ : libre parcours moyen des molécules du gaz porteur	(nm)
ρ : masse volumique du fluide	(kg·m ⁻³)
μ : viscosité dynamique du gaz	(Pa·s ou kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
ρ_e : résistivité électrique du matériau	(Ω ·m)
ρ_0 : résistivité macroscopique des charges	(Ω ·m)
ρ_p : masse volumique des particules	(kg·m ⁻³)

INTRODUCTION

L'engouement suscité par les nanomatériaux s'explique avant tout en raison des avancées techniques et technologiques qu'ils permettent d'accomplir et des propriétés étonnantes qu'ils peuvent présenter (SchloKostoff, Koytcheff et Lau, 2007; Pui et Chen, 1997). Les domaines d'application utilisant les nanomatériaux vont bien au-delà de la seule fabrication de composites ultraperformants et de crèmes solaires transparentes. Ces particules permettent d'accéder à de nouveaux traitements médicamenteux plus efficaces, de disposer de moyens de communication de plus en plus performants ou encore de s'assurer de la fraîcheur et de la salubrité des aliments. Elles affichent également des propriétés intéressantes dans le secteur de l'environnement (réduction des émissions polluantes), de l'énergie (nouvelles cellules photovoltaïques), des matériaux (amélioration des performances), de l'automobile (protection des peintures contre les rayures) ou de l'optique (verre auto nettoyant) (Brasseur et Bondeelle, 2010; Gleiche, Hoffschulz et Lenhert, 2006; Thomas, 2006). Leurs applications et leurs potentiels de développement sont considérables (Figure 0-1). En atteste, la dernière mise à jour (octobre 2013) de la base de données du « Project on Emerging Nanotechnologies » (PEN) qui référence 1628 produits de consommation contenant des nanoparticules. Cela représente une augmentation de 24 % par rapport à la précédente mise à jour de 2010 (Project on Emerging Nanotechnologies, 2014).

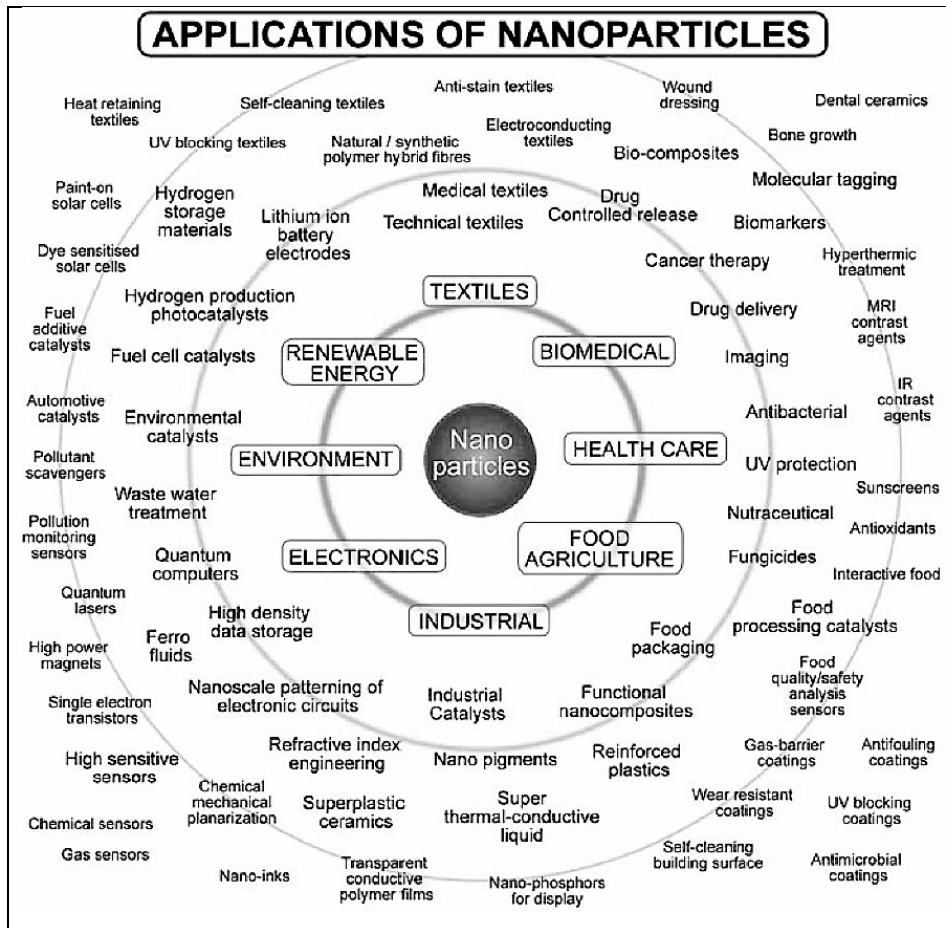


Figure 0-1: Principaux domaines d'application des nanoparticules
Tirée de (Tsuzuki, 2009)

Bien que ces particules aient des propriétés intéressantes pour de nombreux secteurs d'activité, des études ont néanmoins montré que leurs caractéristiques (taille, surface spécifique, forme, charge, etc.) peuvent influencer leur toxicité. En effet, plusieurs recherches réalisées sur des rongeurs ont mis en évidence qu'une dose équivalente en masse, de particules nano et submicronique ($<1\mu\text{m}$) a des effets plus importants que si elle était composée des mêmes particules de taille supérieure. Par exemple, elles peuvent induire des inflammations cutanées, la dégénérescence de certains organes ou des maladies (dermatites, cancers) (Ostiguy et al., 2010).

Aujourd'hui, l'utilisation de nanomatériaux et les procédés générant indirectement des nano-objets sont les principales sources d'expositions professionnelles. Encadrer ces derniers se

fait en prenant comme référence la réglementation contre le risque chimique, car aucune n'existe spécifiquement pour les nanoparticules. Du fait qu'aucune réglementation ne fournit de valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) pour ces particules, le besoin ainsi que l'efficacité du contrôle de l'exposition s'avèrent difficiles. Seuls quelques organismes essaient de mettre en place un cadre législatif. Par exemple, pour le dioxyde de titane, le NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) propose depuis 2005 une valeur limite d'exposition moyenne de 1,5 mg/m³ pour les particules supérieures à 100 nm et de 0,1 mg/m³ les particules nanométriques.

Hormis certaines particules singulières (diesel, silices amorphes et noirs de carbone), dans la majorité des cas les connaissances toxicologiques sont encore insuffisantes et ne permettent pas d'aboutir à des VLEP. En l'absence de valeurs limites, le principe ALARA (acronyme anglais pour *As Low As Reasonably Achievable*) est de mise, celui-ci permet de déterminer le niveau d'exposition le plus bas possible (Ostiguy et al., 2014).

Le manque de données quantitatives nécessaires à l'évaluation des risques pousse certains organismes à mettre en place des mesures préventives dans le but de diminuer les risques. Ainsi, l'INRS ou l'IRSST ont décidé d'éditer des guides de bonnes pratiques regroupant les mesures préventives nécessaires à mettre en place pour prévenir une exposition (Ostiguy et al., 2008; Ricaud, 2009). Les principales recommandations portent sur la limitation de l'exposition professionnelle en limitant celle-ci à la source ou en utilisant des équipements de protection individuelle (EPI).

La problématique de recherche

Les voies respiratoire et cutanée représentent les voies prépondérantes lors d'une exposition professionnelle à des substances toxiques. Bien qu'elle représente une surface de contact importante (environ 2 m² chez l'adulte) et contrairement à l'exposition par voie aérienne, il n'existe aucune valeur limite d'exposition pour la peau concernant les agents biologiques et chimiques, qu'ils soient sous forme liquide, solide ou gazeux. Pourtant, au Québec, d'après les données de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail

(CNESST), les maladies de la peau sont parmi les cinq grandes catégories de maladies professionnelles et représentent 2,5% du nombre de maladies professionnelles acceptées par la CNESST, contre 5 % pour les maladies respiratoires (CNESST, 2005-2007). Il a par ailleurs été démontré qu'une exposition plus ou moins prolongée à certaines particules peut causer des irritations cutanées, des sensibilisations ou des dermatoses (Lachapelle, 2014; Minciullo et al., 2013; Saary, House et Holness, 2001; Schloemer, Zirwas et Burkhart, 2014; Stefaniak et al., 2010). De plus, le manque d'information concernant la toxicité des nanoparticules, leur devenir dans l'organisme et leurs effets sur la santé, exige la plus grande prudence à leur égard. Afin de limiter l'exposition cutanée, certains organismes à travers le monde (NIOSH, IRSST, INRS) recommandent aux travailleurs le port de vêtements de protection chimique (VPC) de type 5, tels que les combinaisons intégrales avec capuche de type Tyvek® (INRS, 2015; Ostiguy et al., 2014). Cependant, leur niveau de performance, vis-à-vis des nanoparticules, n'a pas été spécifiquement vérifié. Il est donc légitime de se poser la question suivante : les VPC préconisés pour protéger les travailleurs exposés aux nanoparticules sont-ils réellement efficaces face à ce risque potentiel ?

De plus, les différents systèmes normalisés de classification des VPC, ne permettent pas de définir adéquatement les performances de matériaux de type 5 (protection contre les particules solides) (ISO, 2007). En effet, le seul test de résistance chimique, la mesure de la « fuite vers l'intérieur », est réalisé sur la combinaison complète et se résume à un résultat binaire succès/échec.

L'objectif global de ce projet porte donc sur la détermination des performances des différents matériaux utilisés pour la conception des VPC contre les particules nano et submicroniques aéroportées dans des conditions proches d'une utilisation réelle.

Plus spécifiquement, cette thèse de doctorat a pour but de mettre en place une méthode d'évaluation de l'efficacité des vêtements de protection cutanée, tissu et nontissé, vis-à-vis de la pénétration d'aérosols de tailles nano et submicroniques. Cette méthode sera élaborée pour compléter les méthodes existantes, en tenant compte des conditions d'utilisation

professionnelles (i.e. en simulant les déformations subies lors de leur utilisation par les travailleurs). En effet, toutes les méthodes développées jusqu'à présent pour les matériaux se sont basées simplement sur le flux de particules traversant le matériau et ont de ce fait, négligé les contraintes mécaniques appliquées aux vêtements lors de l'utilisation. Afin de satisfaire à cette exigence, la mesure des déformations appliquées aux vêtements lors de leur utilisation est nécessaire. Des capteurs de déformation souples ont donc été développés.

L'analyse des tests de pénétration jumelée avec les caractéristiques physico-chimiques des matériaux permettra de mieux comprendre l'impact des différentes structures textiles sur l'efficacité de filtration. Les résultats obtenus permettront également de mettre en évidence les mécanismes facilitant la pénétration des nanoparticules à travers les différents matériaux et l'influence que peuvent avoir les déformations des matériaux sur leur efficacité. Les tests de pénétration permettront également de développer un modèle expérimental basé sur les résultats obtenus. Ce modèle, basé sur la théorie de la filtration classique, servira à prédire l'efficacité de certains matériaux de VPC de type 5 lorsque exposés à des aérosols nano et submicroniques.

Ce manuscrit s'articule autour de sept chapitres distincts. Dans un premier temps, les objectifs et l'originalité des travaux seront présentés (chapitre 1). Par la suite, le chapitre deux sera consacré à une étude bibliographique. Celle-ci présentera dans un premier temps les nanoparticules, leurs effets sur la santé ainsi que les différentes voies d'exposition professionnelle avec un intérêt particulier pour la voie cutanée. Ensuite, elle présentera les VPC, leur classification, leur fabrication, les différents effets filtrants et leur efficacité. Enfin, la revue de littérature se poursuivra avec la présentation de capteurs de déformation flexible et différentes études réalisées sur le développement et la conception de ce type de capteurs. Le troisième chapitre sera consacré à la méthodologie employée pour mener à bien ce projet. La fabrication des capteurs, les différents matériaux ainsi que le banc d'essai conçu pour cette étude seront présentés. Le quatrième chapitre portera sur la mesure de la déformation des VPC à l'aide des capteurs de déformation. Le chapitre cinq traitera de la caractérisation des VPC, leurs différents paramètres intrinsèques ainsi que leurs

comportements lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. Le sixième chapitre présentera les résultats de pénétration des particules aéroportées à travers les différents matériaux sélectionnés en fonction de l'appareillage utilisé, et également en fonction des déformations appliquées. Enfin, le septième et dernier chapitre portera sur le développement d'un modèle prédictif permettant de déterminer l'efficacité des matériaux de VPC.

La thèse se terminera par une conclusion et des pistes de recommandations seront proposées pour le choix de matériaux contre l'exposition cutanée aux nanoparticules. Les difficultés et les limites de cette étude ainsi que les futures investigations à réaliser seront mises de l'avant.

CHAPITRE 1

OBJECTIFS ET ORIGINALITÉ DE LA RECHERCHE

Certaines particules sont responsables de problèmes cutanés allant de la simple irritation jusqu'aux maladies systémiques. Ces problèmes jumelés avec les incertitudes liées à leur taille font en sorte qu'il devient nécessaire de considérer les particules nano et submicroniques avec précaution. Par ailleurs, différents organismes européens (INRS, OSHA) et Nord-américains (NIOSH, CNESST, CCHST, IRSST) recommandent le port de vêtement de protection pour se prémunir des dangers de particules telle que l'amiante. Ainsi, afin de limiter une éventuelle exposition cutanée aux particules, les vêtements de protection chimique (VPC) contre les particules solides, dits « de type 5 » selon la classification ISO 13982, sont recommandés par différents organismes à travers le monde (INRS, 2015; Ostiguy et al., 2014). Toutefois, aucune classe de performance, permettant de guider les utilisateurs sur le choix d'un niveau de protection adéquat en fonction du risque potentiel engendré par leurs activités professionnelles, n'existe au sein de ce type de vêtement. L'objectif de ce projet vise donc à déterminer les performances des différents matériaux constituant les VPC de type 5 contre les particules nano et submicronique aéroportées, dans des conditions proches d'une exposition réelle. Pour y répondre, trois sous-objectifs ont été identifiés.

1.1 Déterminer la déformation des combinaisons lors de leur utilisation

La première partie des travaux cible la mesure des contraintes mécaniques subies par les combinaisons lorsqu'elles sont portées par les travailleurs. Les VPC de type 5 sont soumis à des déformations lorsqu'ils sont portés par les travailleurs. Ces déformations sont susceptibles de modifier l'efficacité des VPC contre la pénétration des particules aéroportées. Cependant, et au meilleur de notre connaissance, il n'y a aucune donnée publiée sur le niveau de déformation subi par les VPC lors de leur utilisation. Par conséquent, il est primordial de déterminer expérimentalement ces contraintes mécaniques. Des capteurs de déformations flexibles ont donc été développés et apposés à différents endroits sur les combinaisons afin

de mesurer leur élongation pendant des séquences d'exercices prédéfinis. En effet, les capteurs conventionnels sont rigides et ne permettent pas d'être appliqués sur des matériaux souples sans en modifier leurs caractéristiques mécaniques. Ces mesures permettront par la suite de connaître les déformations à appliquer pour simuler le port du vêtement lors des tests de pénétration réalisés sur le banc d'essai.

1.2 Développer une méthode d'essai

Le second objectif de ce projet est scindé en deux parties : la première consiste à développer une méthode de mesure de la pénétration des nanoparticules à travers des matériaux textiles dans des conditions d'utilisation. À l'heure actuelle, aucune méthode existante ne prend en compte ces conditions et par conséquent, les taux de pénétration mesurés à travers les vêtements de protection ne reflètent pas forcément la réalité. Cette exigence impose la conception d'un nouveau dispositif expérimental permettant de simuler les déformations mécaniques subies par les matériaux et dans un même temps, de mesurer la pénétration d'un aérosol à travers ces derniers.

Dans un second temps, il est important d'identifier une technique appropriée de mesure des particules. Elle doit permettre de quantifier les particules pouvant traverser les matériaux testés et caractériser la granulométrie de l'aérosol généré. Plusieurs techniques sont disponibles : le spectromètre de mobilité électrique (SMPS, acronyme anglais pour Scanning Mobility Particle Sizer), un spectromètre de mesure de la taille des particules d'échappement des moteurs à combustion (EEPS, acronyme anglais pour Engine Exhaust Particle Sizer Spectrometer) et un compteur de particules ultrafines P-Trak® (UPC, acronyme anglais pour Ultrafine Particle Counter).

1.3 Comparer et comprendre la pénétration des particules à travers les vêtements

Le dernier objectif consiste dans un premier temps à comparer la pénétration des nanoparticules de différentes tailles ayant traversé les différents matériaux testés et dans un second temps à comprendre cette pénétration. Pour ce faire, la pénétration sera tout d'abord

rapportée aux différentes propriétés intrinsèques de chaque matériau et par la suite elle sera comparée avec la théorie de la filtration des filtres à fibres.

1.4 Originalité des travaux

L'utilisation des équipements de protection individuelle (EPI) dans les milieux de travail est considérée comme la dernière ligne de défense contre l'exposition aux nanomatériaux. Cependant, il n'existe actuellement aucune ligne directrice établie pour la sélection des EPI cutanés (NIOSH, 2013). Ce constat s'explique par le manque de données concernant l'efficacité des EPI face aux nanomatériaux. Bien que de nombreuses études aient été réalisées sur l'efficacité des EPI contre les nanomatériaux, celles-ci se sont majoritairement concentrées sur l'efficacité de certains appareils de protection respiratoire (Japuntich et al. 2007; Wang et Pui 2009; Kim et al. 2007; Podgorski 2009).

De nombreuses études ont démontré que les nanomatériaux peuvent pénétrer la peau et de ce fait provoquer des effets dermiques (locaux) (Crosera et al., 2009; Larese Filon et al., 2013; Rouse et al., 2007; Ryman-Rasmussen, Riviere et Monteiro-Riviere, 2006; Smijs et Bouwstra, 2010), mais également des effets systémiques comme des maladies auto-immunes (Buzea, Pacheco et Robbie, 2007). Les données actuellement disponibles pour la sélection d'équipements de protection cutanée ne permettent pas aux travailleurs et leur représentant d'avoir les outils nécessaires pour une sélection adéquate en fonction du risque associé à leur métier. Il est primordial pour les travailleurs d'avoir des outils leur permettant de choisir des EPI appropriés en fonction de leurs tâches de travail.

De plus, il existe très peu de littérature sur l'efficacité des vêtements de protection contre les nanoparticules aéroportées. Seules quelques données quantitatives sont disponibles, mais aucune ne donne précisément de recommandations sur le genre de matériau à employer. Également, ces études ne prennent pas en compte les sollicitations mécaniques subies par les vêtements lors de leur utilisation en milieux pratiques.

L'originalité de ce projet porte donc principalement sur la méthode d'évaluation de la pénétration des nanoparticules à travers les matériaux testés. En effet, il s'agit de la seule

étude permettant d'évaluer des matériaux de vêtements de protection dans des conditions simulant une utilisation en milieu de travail. Il est important de vérifier si des sollicitations mécaniques, appliquées aux matériaux, influencent leur efficacité; ces dernières pourraient engendrer une baisse des performances des vêtements et ainsi offrir une voie d'exposition privilégiée.

Cette recherche permettra à travers les nombreuses données récoltées de connaître dans un premier temps, le taux de déformation des vêtements de protection lors de leur utilisation. Ceci permettra de contraindre les matériaux, lors des tests de pénétration, selon des valeurs réelles d'utilisation. Dans un second temps, elle déterminera l'efficacité des principaux matériaux utilisés pour la conception des vêtements de protection cutanée contre les particules nano et submicroniques ainsi que les différents facteurs favorisant la pénétration de ces dernières.

Tout ceci permettra d'élaborer une base de réflexion (pour établir une ligne directrice) pour la sélection des équipements de protection cutanée et permettre éventuellement de faire des recommandations sur le choix des matériaux à utiliser par les travailleurs exposés à des nanomatériaux.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Les nano-objets

2.1.1 Définition

Les nano-objets sont définis comme étant des objets dont au moins une dimension est comprise entre 1 et 100 nm et possèdent des propriétés différentes de ceux de plus grande dimension (ASTM, 2006; ISO, 2015). La norme mentionne « dimensions » plutôt que « diamètre » car la géométrie peut différer d'un objet à l'autre (Figure 2-1). Ainsi, le dioxyde de titane anatase est sphérique tandis que le rutil est en bâtonnet, alors que les nanotubes de carbone sont cylindriques.

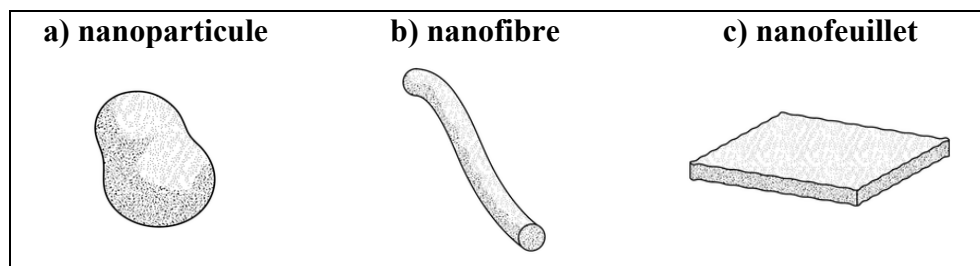


Figure 2-1 : Illustration représentant les principales formes de nano-objets
Tirée de (ISO, 2015)

Pour qu'une particule sphérique soit considérée nanométrique, il faut que son diamètre soit inférieur à 100 nm. Par contre, pour les particules cylindriques (nanofibre) ou en plaques (nanofeuillet), la longueur peut être supérieure à 100 nm aussi longtemps que leur diamètre ou leur épaisseur reste dans le domaine nanométrique.

Dans la suite de ce document, à des fins de simplification, le terme « nanoparticule » sera employé à la place de « nano-objet » quelle que soit la forme de la particule. Il est également important de différencier les termes de particules ultrafines et nanoparticules. Les premières

sont des particules naturelles ou anthropiques (produites de façon involontaire), tandis que les nanoparticules sont des particules fabriquées intentionnellement par l'homme.

2.1.2 Les nanoparticules et la santé humaine

Malgré une augmentation constante des études nanotoxicologiques, les impacts des nanoparticules sur la santé et l'environnement restent à ce jour encore mal connus. Les données contradictoires de la littérature en sont l'une des raisons principales. Elles sont majoritairement causées par des différences de protocoles de recherche entre laboratoires (Xia et al., 2013). De plus, les nombreux paramètres à prendre en compte sont une autre des difficultés rencontrées par les chercheurs. En effet, dans leur étude réalisée en 2013, Fatisson et al. en ont répertorié trente-quatre directement reliés au pouvoir toxique de nanoparticules (Fatisson et al., 2013). En plus de la quantité absorbée et du temps d'exposition, il indique entre autres la forme de la particule, la concentration en nombre, la dimension fractale, l'état d'aggrégation et d'agglomération, etc. Ainsi, pour une même composition chimique, les nanoparticules peuvent produire des effets différents. Par exemple, le noir de carbone (similaire à une sphère) ne semble pas avoir d'effet particulier sur la santé à faible dose (INRS, 2016), alors que les nanotubes de carbone, eux, semblent avoir des effets similaires à l'amiante (Jost, Pletscher et Koller, 2012).

2.1.3 La pénétration cutanée

En raison de leur petite taille, les nanoparticules peuvent pénétrer dans l'organisme par différentes voies, et ce, quel que soit le mode d'exposition (en poudre, en solution, aéroportée ou encore en gel). Du fait de leur utilisation grandissante, les nanomatériaux constituent un risque sanitaire pour les personnes qui y sont exposées, pouvant induire d'éventuels effets néfastes. Les effets qui peuvent en découler se manifestent suite à l'absorption de nanoparticules par l'organisme selon différentes voies : aériennes (système respiratoire), cutanées ou bien par ingestion (Hervé-Bazin, 2007; Ostiguy et al., 2010). Par la suite, elles peuvent ainsi se retrouver dans les systèmes circulatoire et lymphatique, et finalement, se retrouver dans les tissus et les organes (Lahmani, Marano et Houdy, 2004).

Bien que la principale voie d'entrée dans l'organisme des nanoparticules soit l'inhalation, l'exposition cutanée est une voie d'exposition potentiellement importante pour les travailleurs. Il apparaît que l'absorption cutanée pourrait être une voie d'exposition plus importante que l'inhalation pour les travailleurs amenés à manipuler des nanomatériaux préparés et utilisés sous forme de solution. Ainsi, comme il est mentionné dans le rapport R-646 de l'IRSST (Ostiguy et al., 2010) sur les connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST concernant les nanomatériaux : « Les NP absorbées par la peau pourront se retrouver dans la circulation systémique après avoir franchi toutes les couches de la peau. L'absorption peut être facilitée si la couche cornée de la peau est endommagée. De plus, les conditions d'exposition en milieu de travail (par exemple le taux d'humidité ou la pression reliée à la manipulation) peuvent avoir une influence sur l'absorption cutanée. Dans le cas de nanoparticules faiblement absorbées par la peau, une allergie ou une dermatite de contact pourraient être observées. »

La voie cutanée n'est donc pas négligeable et demeure un sujet de préoccupation.

2.1.3.1 La peau et l'absorption cutanée

Avec une surface spécifique d'environ 2 m² et un poids estimé à environ 10% du poids total du corps, la peau est le plus grand organe du corps humain (Elias et Wakefield, 2011; Menon, 2002). Elle constitue la couche corporelle protectrice externe, mais elle est également impliquée dans différents processus fondamentaux tels que la régulation de la température corporelle, la défense immunitaire, le métabolisme (synthèse des vitamines D, sébum), ou encore la perception sensorielle (Elias et Feingold, 2006; Elias et Wakefield, 2011; Menon, 2002). L'absorption cutanée correspond, selon l'OMS, au transfert d'une substance à travers la peau depuis la surface externe jusqu'au sang (Kielhorn, Melching-Kollmuss et Mangelsdorf, 2006). Elle se divise en trois catégories :

1. la pénétration : entrée d'une substance dans une couche ou une structure particulière, comme l'entrée d'un composé dans la couche cornée. Ce mode d'absorption se

décompose selon trois voies : la pénétration intracellulaire, intercellulaire et à travers les annexes cutanées (follicules pileux et glandes sudoripares).

2. la perméation : pénétration d'une substance, d'une couche à une seconde autre couche fonctionnellement et structurellement différente de la première.
3. la résorption : pénétration et diffusion dans l'organisme, via le système lymphatique et vasculaire, d'une substance ayant traversé la peau ou une muqueuse.

2.1.3.2 Facteurs influençant l'absorption cutanée.

L'OMS a répertorié plusieurs facteurs permettant de comprendre l'absorption de substances par la voie cutanée. Ces facteurs sont référencés selon différents paramètres tels que les propriétés physico-chimiques de la substance et, s'il y a lieu, de son véhiculeur (forme, taille des molécules, solubilité, volatilité, pH, etc.), les caractéristiques physico-chimiques de la peau exposée (type, température, pH, état de la couche cornée, etc.) et de la dose reçue (concentration, localisation de l'exposition, durée de l'exposition, etc.) (Kielhorn, Melching-Kollmuss et Mangelsdorf, 2006).

Cependant, ces facteurs sont communs à toutes les substances chimiques et parmi eux, trois vont jouer un rôle important sur une possible pénétration de particules à travers la peau. Ces facteurs sont :

- La forme : en plus de leur taille extrêmement faible, leur forme joue un rôle déterminant dans les procédés de pénétration. Certaines particules de par leur forme et leur morphologie peuvent pénétrer plus facilement dans l'organisme (Fatisson et al., 2013; Oberdörster, Oberdörster et Oberdörster, 2005). Ainsi, une sphère aura un pouvoir pénétrant supérieur à un feuillet.
- Les propriétés de surface: la surface de certaines nanoparticules peut être modifiée chimiquement afin de limiter la formation de radicaux libres, leur agrégation, et améliorer la stabilité dans le temps des produits formulés. Ainsi certains revêtements pourraient favoriser la pénétration cutanée de ces particules grâce à une affinité accrue pour les

lipides de la couche cornée ou encore une réaction avec la sueur (dissolution partielle, formation d'espèces chimiques nouvelles, etc.).

- Les « défauts de la cuirasse » : la présence de pores, de follicules pileux ou de blessure (éraflures, coupures, etc.) constitue une voie de pénétration directe dans l'organisme.

2.1.3.3 Étude de la pénétration cutanée

Certaines études suggèrent que les nanoparticules pourraient entrer dans le corps humain via la peau lors d'exposition professionnelle (NIOSH, 2009). En effet, de nombreuses études ont montré la pénétration de différentes particules nanométriques à travers la peau qu'elle soit saine, endommagée ou malade. Par exemple, Kertész et al. en 2005, ont concentré leurs études sur des crèmes cosmétiques contenant du dioxyde de titane (TiO_2) nanométrique (Kertész et al., 2005). Ces crèmes ont été appliquées sur de la peau humaine greffée sur des souris pour des périodes de 1h et 24h. Des prélèvements de peau ont ensuite été pratiqués, puis observés suivant deux techniques microscopiques (MET et PIXE). Les différents clichés ont révélé la présence de TiO_2 dans l'épiderme. Cette étude a également démontré une augmentation de concentration en nanoparticules de TiO_2 en fonction du temps, certaines de ces particules se retrouvant dans les différentes couches de l'épiderme. Une autre étude réalisée sur des souris par Wu et al., a évalué le profil de pénétration des nanoparticules de dioxyde de titane in vitro et in vivo par voie cutanée (Wu et al., 2009). Les résultats ont révélé que ces particules, de différentes tailles, peuvent pénétrer la peau et se retrouver dans différents organes tels que le cœur, le cerveau, le foie, les poumons, les reins et la rate.

Ces résultats ont par ailleurs été confirmés par l'étude de Gulson et al. en 2010 dans laquelle des hommes et de femmes ont été exposés, pendant cinq jours, à différentes crèmes solaires contenant des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO) (Gulson et al., 2010). Les résultats obtenus ont démontré la présence (en faible quantité) de zinc, issues des particules de ZnO , dans le sang et l'urine de chacun des sujets, et ce, jusqu'à 35 jours après l'exposition.

D'autre part, Larese et al. ont réalisé des études consistant à déposer des solutions d'argent (Larese Filon et al., 2008) et de cobalt (Larese Filon et al., 2013) nanométrique, pendant 24 heures, sur de la peau humaine saine et endommagée. Les résultats obtenus ont révélé la présence d'argent et cobalt dans les différentes couches de la peau et ce peu importe le type de peau. De plus, il en ressort que la pénétration de nanoparticules est nettement plus importante pour une peau endommagée qu'une peau saine.

Par conséquent, au regard de ces résultats contradictoires, il est difficile de conclure avec certitude sur le devenir des nanoparticules après pénétration cutanée.

2.1.4 Expositions professionnelles aux nanoparticules

De nos jours, de nombreux travailleurs sont exposés à un ensemble de particules présentes à l'échelle nanométrique, qu'il s'agisse de particules produites dans un but industriel (nanoparticules) ou de manière non intentionnelle lors d'activités et de procédés industriels (particules ultrafines).

Plusieurs facteurs influencent le potentiel d'exposition des travailleurs sur leur lieu de travail. Il est important de prendre en compte les risques liés aux matières premières mises en œuvre, aux produits intermédiaires formulés pendant les différents procédés ainsi qu'aux produits finaux obtenus. Il est également primordial de considérer les différentes étapes de production, depuis le déchargement et le stockage des produits jusqu'à leur expédition aux consommateurs (Anses, 2014; Debia et al., 2012; Ostiguy et al., 2010). L'exposition à une substance peut être définie comme étant la quantité de particules susceptible d'être absorbée par l'organisme et d'atteindre un organe ou un tissu. Les facteurs principaux influençant le potentiel d'exposition des travailleurs sur leurs lieux de travail sont :

- les quantités utilisées;
- le temps et la fréquence des opérations;
- Les propriétés physico-chimiques des particules : nature chimique, granulométrie, concentration, etc.;

- Le mode d'utilisation des nanoparticules : en poudre, en suspension liquide, en gel, incorporés dans une matrice, etc.;

Ces différents paramètres constituent une liste non exhaustive des paramètres à prendre en compte afin d'évaluer l'exposition aux nanoparticules dans les environnements de travail (Anses, 2014; Ostiguy et al., 2010). Le risque étant directement relié à l'exposition, il est donc important de mettre en place les mesures nécessaires pour diminuer l'exposition. De ce fait, toutes les personnes (travailleurs et chercheurs) utilisant ou manipulant des nanoparticules doivent prendre le plus de précautions possible lors de leur manipulation. Ainsi, en plus d'une protection collective adaptée, le port d'équipement de protection individuelle est fortement recommandé, comme une combinaison, des gants et des lunettes (Ostiguy et al., 2014).

2.2 Les vêtements de protection cutanée

Dans cette thèse, la notion de vêtement de protection rapporte exclusivement aux combinaisons intégrales nontissé ou aux blouses de laboratoire en tissu. Cependant, cette section traitera uniquement des vêtements de protection chimique (VPC) nontissés, utilisés couramment par les travailleurs pour se protéger des particules nano et submicroniques.

2.2.1 Voie d'entrée des particules dans les vêtements de protection chimique

Les différents produits chimiques sont susceptibles de pénétrer la peau en étant en contact direct avec elle, mais également en passant à travers les VPC. Les différentes voies d'entrée des particules aéroportées à l'intérieur d'un VPC sont les suivantes :

- Passage direct à travers le matériau (pores ou perméation).
- Passage à travers les annexes : coutures, glissière, etc.
- Infiltration : passage des particules au niveau des jonctions peau/VPC (poignets, cou et chevilles).

Toutefois, il semble difficile de déterminer laquelle de ces voies d'entrée est prépondérante. En effet, aucune étude n'existe sur la proportion à attribuer à chaque voie d'entrée en fonction du VPC et de l'agent chimique utilisés. De plus, les interactions existantes entre ces voies d'entrée sont pour l'heure actuelle méconnues. De ce fait, « l'effet soufflet » (bellow effect), correspondant au déplacement de l'air à l'intérieur du VPC lorsque celui-ci est porté n'a jamais été caractérisé. Pourtant, cet effet pourrait être un facteur de protection ou de pénétration important, tout dépendant s'il se crée à l'intérieur du VPC une surpression ou une dépression.

2.2.2 Définition des vêtements de protection chimique

2.2.2.1 Classification

Les VPC sont offerts dans une grande variété de matériaux et de conceptions. Ce choix permet de fournir aux utilisateurs une protection contre divers agresseurs chimiques telle que les vapeurs de produits chimiques et gaz, les éclaboussures de liquides, les pulvérisations ou brouillards et les particules et aérosols.

En 2007, l'organisation internationale de normalisation (ISO) a publié une norme, permettant de classer les VPC selon leur niveau de protection: la norme ISO 16602 (2007) : « Vêtements de protection contre les produits chimiques – Classification, étiquetage et exigence de performances » (ISO, 2007). Cette norme permet de désigner l'efficacité des vêtements de protection contre les produits chimiques par un chiffre allant de 1 à 6 (Tableau 2-1). Plus précisément, elle classe les différents types de VPC en fonction de la nature des différents agresseurs chimiques, permettant ainsi de simplifier la sélection des vêtements de protection contre les produits chimiques.

Depuis 2014, l'association canadienne de normalisation (CSA) a publié le pendant canadien de la norme : CAN/CGSB/CSA-Z16602:F14 : « Vêtements de protection contre les produits chimiques - Classification, étiquetage et exigences de performances » (CSA, 2014), permettant de mieux prendre en considération les exigences propres au Canada.

Tableau 2-1 : Critères de performances « chimiques » pour les VPC
selon la norme ISO 16602
Tiré de (ISO, 2007)

Performance générale	Paragraphe	Essai de performance spécifique	Type de vêtement de protection contre les produits chimiques							
			1a	1b	1c	2	3 ^a	4 ^a	5	6 ^a
Intégrité de la totalité du vêtement de protection contre les produits chimiques	5.4	Étanchéité	X	X	X	—	—	—	—	—
	5.5	Fuite vers l'intérieur	—	X ^b	X	X	—	—	—	—
	5.6	Essai au jet de liquide	—	—	—	—	X	—	—	—
	5.7	Essai au brouillard de liquide	—	—	—	—	—	X	—	—
	5.8	Essai de fuite vers l'intérieur d'un aérosol de particules	—	—	—	—	—	—	X	—
	5.9	Essai limité au brouillard de liquide	—	—	—	—	—	—	—	X
Résistance chimique des matériaux des vêtements de protection ^c	6.5	Résistance à la perméation	X	X	X	X	X	X	—	—
	6.6	Résistance à la pénétration de liquides sous pression	—	—	—	—	—	X ^d	—	—
	6.7	Résistance à la pénétration de particules	—	—	—	—	—	—	— ^e	—
	6.8	Étanchéité à la pénétration de liquides	—	—	—	—	—	—	—	X
	6.9	Répulsion liquide	—	—	—	—	—	—	—	X
^a S'ils ne couvrent pas le torse, les bras et les jambes, les vêtements de types 3, 4 et 6 sont des vêtements de protection partielle du corps ne satisfaisant qu'aux exigences de résistance chimique des matériaux du type correspondant. ^b S'applique aux combinaisons de protection contre les produits chimiques de type 1b lorsque la pièce faciale n'est pas fixée en permanence à la combinaison. ^c S'applique au matériau de base utilisé pour la fabrication du vêtement de protection contre les produits chimiques. S'applique ou non aux coutures (voir Article 7). ^d Un essai de résistance à la perméation ou un essai de résistance à la pénétration de liquides sous pression doit être réalisé. ^e Un essai d'évaluation des performances des matériaux des vêtements de protection contre les particules n'est alors pas recommandé.										

Selon cette norme, les vêtements de Type 5 « vêtements de protection contre les produits sous forme de particules solides » sont recommandés pour se prémunir contre les particules solides, qu'elles soient sous forme d'aérosol ou de poudre. Pour cette raison, cette étude portera sur l'évaluation des performances de cette catégorie de VPC contre des aérosols nano

et submicroniques dans des conditions proches de celles rencontrées en milieux professionnels. De plus, ces vêtements qui doivent répondre à des exigences de performance ne sont en réalité soumis qu'à un seul test des résistances chimiques comme l'illustre le Tableau 2-1.

D'après la norme ISO 16602 actuellement utilisée pour caractériser les performances chimique et mécanique des différents VPC, on note un manque flagrant en ce qui concerne la caractérisation de VPC de type 5. Le Tableau 2-2 permet de constater l'ensemble des essais imposés sur les matériaux selon le type de VPC.

Il est aisé de constater qu'aucun test de résistance chimique n'est réalisé sur le matériau de VPC de type 5. Étant donné que ces matériaux sont préconisés par différents organismes de SST à travers le monde pour se protéger contre les nanoparticules (Brun et al., 2012; NIOSH, 2009), il apparaît donc nécessaire de renseigner, caractériser les matériaux sur leur efficacité face à de tels agresseurs chimiques.

Tableau 2-2 : Exigences de performances pour les matériaux de protection chimique
selon la norme ISO 16602
Tiré de (ISO, 2007)

Paragraphe	Exigence spécifique	Type de vêtement de protection contre les produits chimiques							
		1a	1b	1c	2	3	4	5 ^a	6
6.5	Résistance à la perméation	X	X	X	X	X	— X ^b	—	—
6.6	Résistance à la pénétration de liquides sous pression	—	—	—	—	—	X ^b	—	—
6.7	Résistance à la pénétration de particules	—	—	—	—	—	—	—	—
6.8	Étanchéité aux liquides	—	—	—	—	—	—	—	X
6.9	Répulsion aux liquides	—	—	—	—	—	—	—	X
6.10	Résistance à la traction	X	X	X	X	X	X	—	X
6.11	Résistance au déchirement (trapézoïdale)	X	X	X	X	X	X	—	X
6.12	Résistance à la perforation	X	X	X	X	X ^a	X	—	X
6.13	Résistance à l'éclatement	X	X	X	X	X	X	—	X
6.14	Résistance à l'abrasion ^c	X	X	X	X	X	X	—	X
6.15	Résistance à la fissuration par flexion ^c	X	X	X	X	X	X	—	X
6.16	Résistance aux flammes	X	X	X	X	X	X	—	X
<p>^a Les performances du type 5 sont définies par l'ISO 13982-1.</p> <p>^b Les essais de résistance à l'abrasion et à la fissuration par flexion sont réalisés avec un critère d'arrêt cohérent par rapport à l'usage prévu du matériau constituant les vêtements. Les matériaux des vêtements de types 1, 2 et 3 sont soumis à une évaluation avec un critère d'arrêt obtenu à l'aide d'un essai sous pression; les matériaux des vêtements de types 4 et 6 sont soumis à une évaluation visuelle des dommages.</p> <p>^c Un essai de résistance à la perméation ou un essai de résistance à la pénétration de liquides sous pression doit s'appliquer.</p>									

2.2.2.2 Protection contre les particules solides

La classification ISO recommande d'utiliser les VPC dits « de type 5 » contre les particules solides. La protection contre les particules solides est normalisée selon la norme ISO 13982 : « Vêtements de protection à utiliser contre les particules solides ». Selon cette norme, les VPC doivent répondre à des exigences de performances évaluées selon les résultats obtenus après avoir soumis le matériau ou le vêtement à différentes méthodes d'essais normalisés. Par exemple, les matériaux doivent résister à l'abrasion, à la fissuration, au déchirement et à

la perforation (ISO, 2004). La capacité des VPC à garantir une barrière contre les aérosols de poussières sèches et fines est réalisée sur des combinaisons complètes et selon un protocole de mesure des fuites vers l'intérieur. Dans cette méthode d'essai, un aérosol de chlorure de sodium, dont la distribution de taille et la concentration des particules sont contrôlées, est généré à l'intérieur d'une enceinte d'essai. À l'intérieur de cette enceinte, un sujet, portant le vêtement à tester, réalise différents exercices normalisés de marche et d'accroupissement pendant lesquels la concentration particulaire à l'intérieur du VPC est mesurée. La mesure de concentration se fait selon trois positions d'échantillonnages différentes : sur le genou, dans le dos et sur la poitrine. Le rapport de la concentration pour la position sur la concentration dans l'enceinte est alors appelé pourcentage de « fuite vers l'intérieur ».

Bien que cette approche globale de normalisation soit pertinente, elle reste cependant limitée :

- les tests de pénétration ne sont réalisés que sur les vêtements entiers, de ce fait les différentes voies d'entrées des particules à l'intérieur des VPC (matériaux, couture/fermeture éclair et interface peau-VPC) ne sont pas identifiées.
- dans la mesure où la fuite vers l'intérieur est calculée à partir de concentrations massiques, la pénétration des nanoparticules a peu de poids. Autrement dit, une forte pénétration de nanoparticules, comparée aux particules de plus grosses tailles, n'a qu'un impact limité sur le calcul de cette fuite vers l'intérieur.
- aucun essai de résistance chimique n'est requis pour les matériaux de type 5 contrairement aux autres types de VPC, engendrant ainsi une méconnaissance de l'efficacité des matériaux utilisés pour concevoir ces VPC.
- aucune obligation pour le fabricant d'indiquer la performance des vêtements. La seule exigence requise est de satisfaire à la norme ISO 13982, c'est-à-dire une approche binaire échec ou succès.

Bien que l'implantation d'un cadre normatif canadien constitue un pas en avant pour la sécurité des travailleurs, il subsiste des inconnus dans les performances des VPC de type 5.

Finalement, il demeure toujours impossible pour un utilisateur, de départager deux VPC de type 5 en se basant sur ses besoins spécifiques de protection.

2.2.3 Efficacité sur les vêtements de protection contre les nanoparticules

Seules quelques équipes au niveau international ont réalisé des études sur la pénétration de nanoparticules à travers des vêtements de protection. Les deux premières équipes à avoir travaillé sur le sujet ont été les équipes de Hanley et Hofacre en 2006 (Hanley, 2006; Hofacre, 2006). Ces projets ont tous deux porté sur la pénétration d'aérosols nanométriques à travers des vêtements de protection militaires et avaient pour but d'évaluer l'efficacité des équipements utilisés contre les agents chimiques. Dans la première étude, l'équipe d'Hanley a pulvérisé dans une salle étanche des nanoparticules de silice amorphe en y « confinant », pendant 30 minutes, une personne équipée d'une combinaison de protection chimique, telle qu'elle serait portée sur le terrain. À l'issue des 30 minutes, le sujet a été débarrassé de son vêtement et des photos ont été prises sous lumière noire comme illustrée à la Figure 2-2.

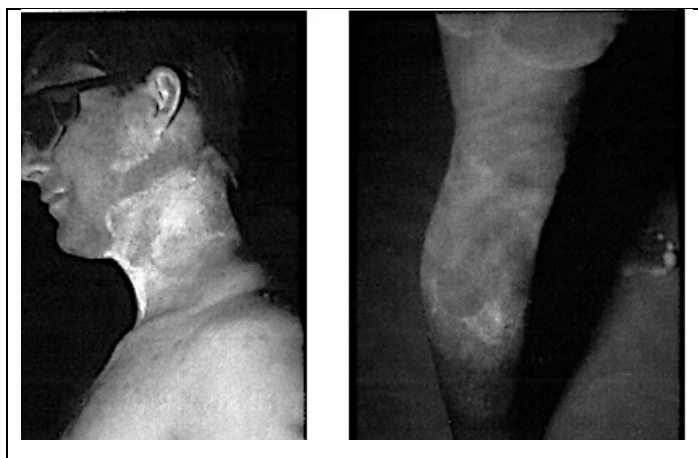


Figure 2-2: Photos du sujet après exposition
Tirée de (Hanley, 2006)

Ces photos ont permis de mettre en évidence la présence de nanoparticules sur la peau du sujet, mais n'ont pas permis la quantification de ces dernières. En effet, ces tests n'avaient pas pour but de quantifier, mais de qualifier la pénétration des aérosols à travers les équipements étudiés. Cependant, cette étude semble avoir démontré une infiltration des particules dans l'équipement plus qu'une pénétration à proprement dit.

Dans la deuxième étude, Hofacre et al. ont pulvérisé des nanoparticules de chlorure de potassium (KCl) à travers deux échantillons de vêtements de protection (neufs et usagés), utilisés par les militaires, confinés dans une enceinte climatique (Hofacre, 2006). Leur objectif était de vérifier si l'efficacité de protection des vêtements variait selon s'ils étaient neufs ou usagés. Les résultats de l'étude montrent une pénétration significative des nanoparticules à travers les deux échantillons. Ils ont également permis de mettre en évidence le fait que le taux de pénétration dépendait de la taille des particules et qu'il y avait une taille pour laquelle l'efficacité des vêtements était la plus faible (≈ 400 nm). Cette taille de particule est appelée MPPS (acronyme anglais pour Most Penetrating Particle Size). Cependant, les résultats n'ont pas permis de différencier les matériaux neufs de ceux usagés. Il pourrait donc être envisageable que le port des vêtements n'endommage pas, de manière significative, les matériaux et donc ne modifierait pas leur efficacité. Cependant, leur méthodologie ne permet pas d'identifier clairement les voies d'entrées de l'aérosol dans le vêtement (pénétration à travers le matériau ou infiltration au niveau des jonctions).

En 2007, Huang et al. ont étudié la pénétration d'aérosol de chlorure de sodium (NaCl) à travers différents matériaux de protection (Huang et al., 2007). Les tests ont été réalisés en imposant un flux d'air à travers les matériaux textiles. Cette étude fait la corrélation entre l'efficacité de filtration des matériaux testés et la taille des particules utilisées. Il en ressort une pénétration de particules croissante jusqu'à atteindre la MPPS (≈ 300 nm) et décroissante une fois cette taille de particule dépassée. Cette étude a également permis de démontrer que l'efficacité de filtration des matériaux textiles présente un comportement comparable à celui d'un filtre mécanique.

Des résultats similaires ont été obtenus, en 2008, par une équipe du CEA (Commissariat à l'énergie atomique). L'objectif de leurs travaux a été de mesurer la pénétration, sans flux d'air, d'aérosols de graphite de 30 et 80 nm à travers différents matériaux servant à la conception des vêtements de protection. Les résultats montrent les bonnes performances

relatives des nontissés vis-à-vis de la pénétration des nanoparticules de graphite, et ce, malgré leur faible épaisseur.

Une autre étude des chercheurs du CEA réalisée en 2009 consistait à étudier la pénétration de nanoparticules de dioxyde de titane et de platine à travers différents textiles utilisées en protection individuelle (Golanski, Guiot et Tardif, 2009). Trois matériaux ont été utilisés, deux tissus (coton et polyester) et un nontissé (polyéthylène). Les tests ont également été réalisés en l'absence de flux d'air à travers les textiles. Leurs résultats ont abouti à la même conclusion que leur première étude, à savoir que le textile nontissé offre la meilleure protection des trois matériaux. De plus, le coton et le polyester offrent des performances quasiment similaires. Enfin, ces résultats ne présentent pas de différence significative entre les deux aérosols de taille identique, mais de nature chimique différente.

Dans une dernière étude, les mêmes auteurs évaluent la pénétration d'un aérosol de graphite à travers trois médias textiles : un tissu de coton de 650 μm d'épaisseur, un nontissé de polypropylène de 320 μm d'épaisseur et un nontissé de polyéthylène haute densité de 115 μm d'épaisseur. Les essais ont été réalisés sous un faible flux d'air afin de simuler les écoulements d'air générés par le mouvement du corps lorsque les vêtements sont portés. Couplés à une analyse du coefficient de diffusion des particules, les résultats obtenus confirment les résultats qu'ils ont obtenus précédemment : les matériaux nontissés sont plus efficaces que le tissu de coton. Cependant, les auteurs n'apportent aucune explication au fait que le nontissé de polyéthylène haute densité est nettement plus efficace que les deux autres matériaux.

En 2011, Park et al. ont étudié la pénétration d'un aérosol aqueux de nanoparticules d'argent à travers une blouse de laboratoire et une combinaison pour salle blanche (Park et al., 2011). Le montage expérimental reprend celui utilisé par Golanski et al. (Golanski, Guiot et Tardif, 2008). Les tests ont été réalisés sur des matériaux secs et humides afin d'identifier l'effet que peut avoir l'eau sur la pénétration. Les résultats obtenus ne présentent pas de différence significative entre les deux textiles. Par contre, ils exposent une grande différence entre les matériaux humides et secs. En effet, les matériaux ayant été préalablement immergés dans

l'eau démontrent une cinétique de pénétration plus importante. Les différences observées entre les matériaux secs et humides s'expliquent par l'effet des forces capillaires qui se créent entre les fibres du matériau en présence d'eau. Ainsi les particules qui rentrent en contact avec le matériau, à cause de la tension de surface de l'eau, se retrouvent piégées par celle-ci. Les particules peuvent ainsi migrer au sein du matériau grâce au gradient de concentration qui se crée à l'intérieur même des zones humides.

Également en 2011, une équipe du NIOSH a analysé la pénétration de particules d'oxydes de fer, nano et submicronique (de 30 à 500 nm) à travers 10 matériaux de protection nontissés suivant deux méthodes d'essais différentes (Gao et al., 2011) et faisant varier la vitesse du flux de particules. Les matériaux testés vont du filet pour cheveux à la combinaison intégrale en passant par des vêtements de pompiers. Les résultats ont révélé que la pénétration est maximale lorsque le diamètre des particules atteint 300-500 nm, dépendamment du matériau. En ce qui concerne les deux méthodes d'essais employées, ils concluent sur le fait que la méthode 1 (filtration), qui force le flux chargé de particules à travers le matériau, tend à augmenter la pénétration (pour 8 des 10 matériaux) contrairement à la méthode 2 (soufflerie). En effet, dans la méthode 2, développée par l'équipe du NIOSH, seul une partie du flux traverse le matériau, se traduisant par une très faible de perte de charge sur celui-ci et donnant une pénétration plus faible des particules. D'autre part, cette étude a permis de mettre en évidence l'influence que peut avoir la vitesse de filtration sur la pénétration des particules ; l'augmentation de la vitesse augmente par le fait même la pénétration des particules à travers les matériaux.

Dans les études présentées précédemment, la majorité d'entre elles n'ont tenu compte que du phénomène de diffusion. De plus, aucune n'a pris en considération les conditions d'utilisation des vêtements de protection et en particulier les déformations mécaniques que subissent les combinaisons de protection lorsqu'elles sont portées.

2.2.4 Simulation des conditions d'utilisation des vêtements de protection – Étude des déformations mécaniques

Lorsqu'ils sont portés, les vêtements sont soumis à de nombreuses sollicitations mécaniques induisant différentes contraintes. Il est donc nécessaire de reproduire en laboratoire les conditions d'utilisation de ces matériaux afin d'obtenir, le plus possible, des résultats de pénétration proches de ceux attendus dans la « réalité ».

La pénétration des particules à travers les vêtements de protection peut être influencée par les conditions environnementales (température, humidité, vent, etc.) et les mouvements réalisés par les travailleurs. Pour ces raisons, les équipes de recherche qui étudient le phénomène se doivent de simuler les conditions réelles d'utilisation et d'exposition. Pour ce faire, plusieurs méthodes d'évaluation ont vu le jour au fil du temps. Il en existe trois aujourd'hui qui permettent de mesurer la pénétration de nanoparticules à travers les vêtements de protection.

La première, dite méthode conventionnelle, est la méthode sur laquelle la majorité des études sont basées (Gao, King et Shaffer, 2007; Golanski et al., 2009; Hill et al., 2013). Il s'agit de la « méthode de filtration ». Dans cette méthode, le matériau est maintenu à la verticale dans une chambre hermétique. La pression à l'intérieur de la chambre et, par conséquent, la vitesse d'écoulement du fluide à travers le matériau sont contrôlées. Les particules en aval et en amont du média sont analysées à l'aide d'un spectromètre de mobilité électrique SMPS (pour Scanning Mobility Particle Sizer). Le taux de pénétration des particules (P) est ensuite calculé de la manière suivante :

$$P = \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \quad (2.1)$$

où C_{aval} et C_{amont} sont respectivement les concentrations en aval et en amont du média.

La deuxième méthode, initiée par l'équipe du CEA, appelé « méthode de diffusion » est basée sur la première, mais diverge de celle-ci par le fait que le différentiel de pression de

part et d'autre du matériau est nul. Puisqu'il n'y a pas de mouvement convectif, seule la diffusion brownienne des particules permet leur passage de part et d'autre du média (Golanski et al., 2009).

La dernière méthode, développée par une équipe du NIOSH, appelée « méthode d'essai en soufflerie » est capable de générer un flux d'air avec des vitesses représentatives des conditions de travail (Jaques, Hsiao et Gao, 2011). Cette méthode a été conçue pour tester l'efficacité des matériaux de protection contre les particules aéroportées dans des conditions de vent proches des conditions réelles d'exposition. Cependant, contrairement à la méthode de filtration où le matériau couvre l'intégralité de la chambre d'essai, ici, l'échantillon à tester est placé au centre du flux d'air. Cette configuration permet d'obtenir des vitesses d'air, traversant le matériau, proche des conditions réelles d'utilisation. L'échantillon à tester est fixé, perpendiculairement au flux d'air, devant l'ouverture de la cellule de pénétration de forme conique. L'exposition aux nanoparticules se fait dans une enceinte en circuit fermé dans laquelle la circulation de l'air est assurée par un ventilateur. Cette méthode a été développée afin d'optimiser la vitesse du flux traversant le matériau (de 0,009 à 0,027 cm/s) et avoir des conditions d'aérosols adéquates pour pouvoir mesurer la pénétration de particules nano et submicronique à travers des matériaux textiles.

Les différentes méthodes existantes sont centrées exclusivement sur mesure de la pénétration de particules. Elles s'écartent des conditions réalistes applicables à l'utilisation des matériaux, car aucune d'entre elles ne prend en compte la déformation et les contraintes que peuvent subir les vêtements lorsqu'ils sont utilisés par les travailleurs.

En effet, différents types de sollicitations mécaniques sont appliquées aux matériaux textiles durant leurs utilisations : la compression, l'extension, la flexion ou encore la déformation multiaxiale (ex : genoux et coudes). Ces sollicitations mécaniques pourraient accroître la pénétration des nanoparticules. Le vêtement étant contraint de suivre les mouvements du corps, les sollicitations mécaniques qui lui seront appliquées seront celles apportées par les déformations corporelles. Dans cette optique, une approche totalement différente a été

développée par Vinches et al. en 2012. La méthode développée consiste à appliquer une déformation (multiaxiale) aux matériaux pendant leur exposition aux nanoparticules (Vinches et al., 2013). Cette méthode fut développée avant tout pour étudier la pénétration de nanoparticules, sous forme de poudre et de solution colloïdale, à travers des gants de protection, au niveau des articulations métacarpo-phalangiennes. Pour ce faire les auteurs ont dû développer une sonde de déformation dite « conique- sphérique » simulant une articulation (Figure 2-3).

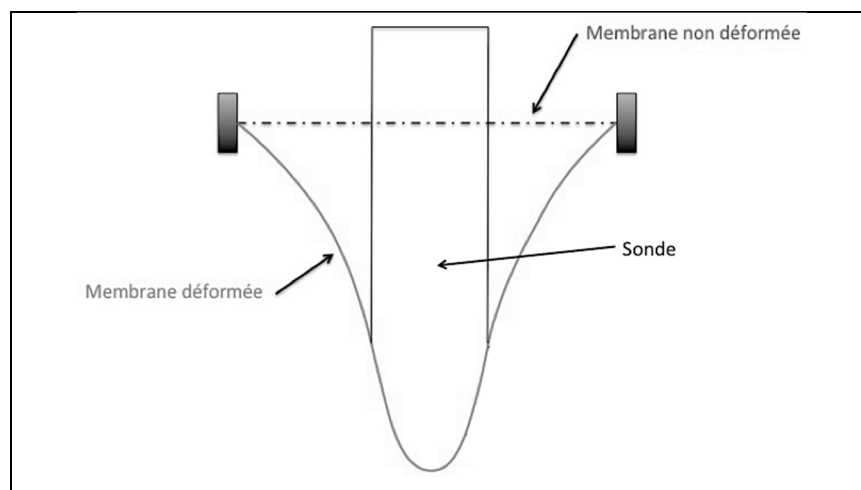


Figure 2-3 : Représentation schématique de la déformation multiaxiale appliquée à un matériau lors des tests de pénétration

2.3 Étude des déformations mécaniques subies par les VPC

Afin de garantir aux travailleurs une utilisation optimale des vêtements de protection lors de leur utilisation, il est important de pouvoir tester leur efficacité face aux aérosols nano et submicroniques dans des conditions proches de la réalité. Ainsi, les tests d'exposition aux aérosols devront se faire dans des conditions similaires de déformations mécaniques que lorsqu'ils sont portés. Pour pouvoir reproduire ces déformations, il faut avant tout les mesurer, et pour ce faire, des capteurs de déformation doivent être apposés sur les

combinaisons. Au cours des années, différents types de capteurs ont vu le jour et notamment des capteurs souples piézorésistifs¹ basés sur le principe des composites polymères conducteurs (CPC). Ces capteurs ont pour avantage d'être extrêmement polyvalents et relativement faciles d'utilisation.

2.3.1 Les capteurs de déformation CPC

2.3.1.1 Théorie de la percolation électrique

Le fonctionnement des capteurs CPC est basé sur le principe de la percolation électrique qui se définit comme la quantité de charges conductrices nécessaire pour rendre un matériau conducteur d'électricité. La Figure 2-4 présente l'évolution de la résistivité ($\log \rho$) d'un matériau en fonction de la concentration volumique de charge conductrice (ϕ).

Lorsqu'une matrice polymère est chargée de particules conductrices d'électricité, celle-ci voit sa conductivité changer. La courbe de l'évolution de la résistivité peut être divisée en trois régions : la première (I) correspond à une quantité trop faible de charges pour modifier la résistivité du matériau; les particules conductrices se trouvent trop éloignées les unes des autres pour pouvoir former un chemin conducteur. La seconde (II) correspond à une quantité de charges suffisamment importantes pour accroître la probabilité de contact entre elles. Ces contacts permettent l'apparition d'un chemin de conduction qui a pour effet de diminuer brusquement la résistivité du matériau et par conséquent de le rendre conducteur d'électricité. Le seuil de percolation correspond exactement à la quantité de charges pour laquelle le matériau devient conducteur. La dernière partie (III) correspond à une quantité maximale de charges pour laquelle la conductivité ne varie presque plus.

¹ Changement de résistance électrique d'un matériau dû à une contrainte mécanique.

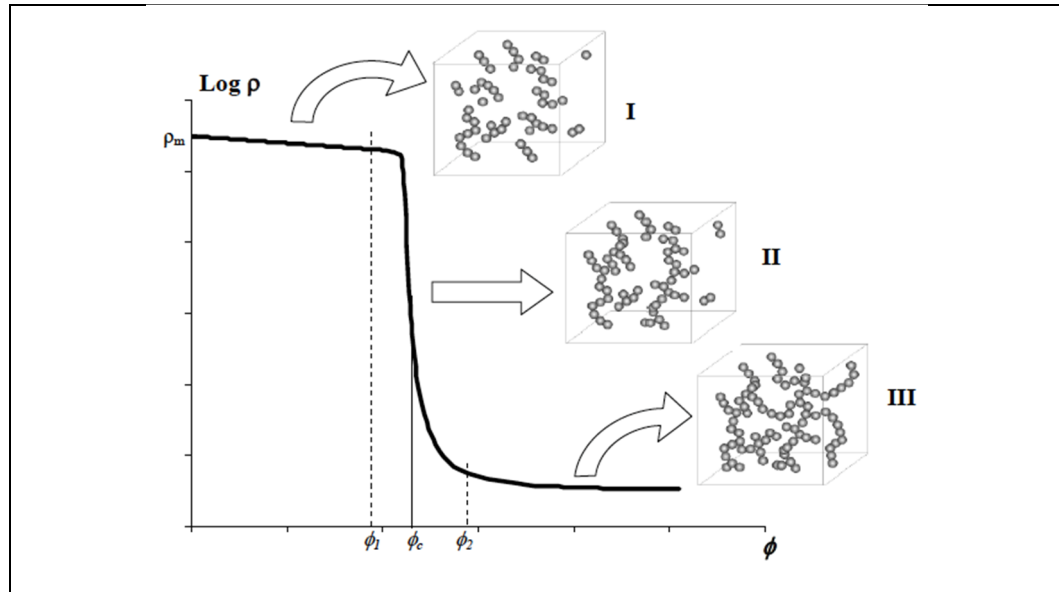


Figure 2-4 : Évolution de la résistivité électrique d'un matériau en fonction de la concentration volumique de charge conductrice
Tirée de (Cochrane, Lewandowski et Koncar, 2010)

Au-delà du seuil de percolation, une augmentation même très importante de charge n'aura que très peu d'effet sur la résistivité du matériau. L'expression générale permettant de décrire ce principe est la suivante :

$$\rho_e = \rho_0 \cdot (\phi - \phi_c)^{-t} \quad (2.2)$$

Avec : ρ_e ($\Omega \cdot m$), la résistivité électrique du matériau; ρ_0 ($\Omega \cdot m$), la résistivité macroscopique des charges; ϕ , la concentration volumique de charge ($g \cdot m^{-3}$); ϕ_c la concentration volumique de charge au seuil de percolation et t , l'exposant critique. L'exposant critique t reflète la dimensionnalité du système. Par exemple, dans un réseau tridimensionnel de charge formé de particules sphériques et réparties aléatoirement alors t est égale à 2.

2.3.1.2 Études existantes

Pour concevoir un bon CPC il est important de trouver un compromis entre quantité de charge électrique et propriétés finales du capteur (élasticité, résistance mécanique et

conductivité). Pour pallier ce problème, l'utilisation de nanoparticules est de plus en plus courante. Leur fort ratio surface sur volume permet d'augmenter considérablement leur réactivité tout en minimisant la quantité nécessaire.

C'est au début des années 2000 que l'industrie textile s'est intéressée aux CPC. Du fait de leurs propriétés particulières : légèreté, grande élasticité et résilience, résistance à la corrosion, flexibilité et résistance aux chocs, les CPC représentent un choix intéressant pour concevoir des dispositifs portables. Nombreuses sont les études réalisées sur le développement de textiles dits « intelligents » et les domaines visés sont extrêmement larges. On retrouve, par exemple, des applications en médecine où ces capteurs sont utilisés pour contrôler les mouvements des patients en rééducation, les forces armées s'en servent pour surveiller l'état de santé de leurs soldats déployés ou encore dans le sport pour analyser les performances des athlètes.

L'équipe de De Rossi (Université de Pise) est l'une des équipes précurseurs dans le domaine des capteurs souples. Elle travaille depuis de nombreuses années sur le développement de capteurs de déformation flexible à usage médical dans le but de détecter les gestes et les mouvements (Bartalesi et al., 2006) de personnes en rééducation. Certains de leurs prototypes sont présentés à la Figure 2-5.

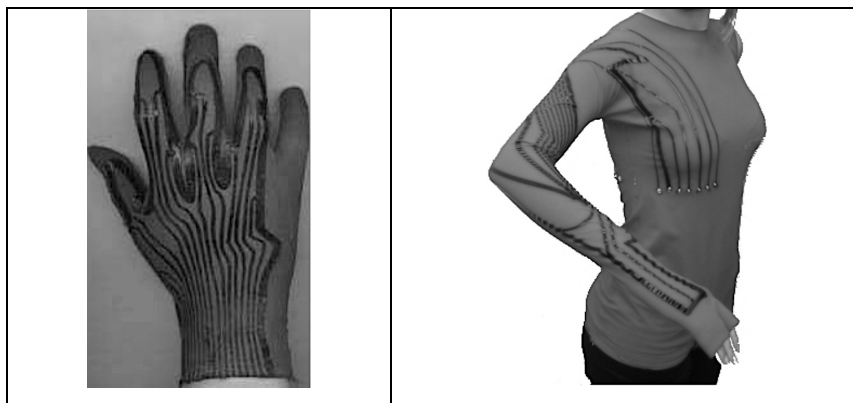


Figure 2-5 : Prototypage de gants et justaucorps équipé de capteurs
Tirée de (Bartalesi et al., 2006)

Les prototypes ont été réalisés grâce à l'enduction d'une pâte silicone conductrice (chargé graphite) à même les matériaux textiles. En 2013, ils ont abouti à l'élaboration d'électrogoniomètres² extensibles et autocollants permettant la mesure et le monitoring des mouvements du corps humain (Dalle Mura et al., 2014; Lorussi et al., 2013). Ces nouveaux capteurs ont pour avantage d'être indépendants de leur support, de ce fait, lorsqu'un capteur est défectueux, il suffit de le remplacer.

Par ailleurs, d'autres études ont vu le jour et avec elles de nouveaux procédés de fabrication ont été développés. En 2010, Cochrane et al. ont développé un capteur conçu à partir de SBS (Styrène-Butadiène-Styrène) et de noir de carbone (Cochrane, Lewandowski et Koncar, 2010). Plutôt que d'utiliser un procédé d'extrusion classique pour réaliser le mélange entre le polymère et les charges, les auteurs ont procédé par voie chimique, c'est-à-dire que le polymère et le noir de carbone ont été mélangés à chaud dans un solvant (chloroforme). Les capteurs ainsi formés ont permis à Cochrane et al. de suivre l'évolution de l'élongation d'une voile de parachute pendant son utilisation.

Enfin, en 2014 une étude réalisée par Mengüç et al. a conduit à l'élaboration de capteurs de contrainte hyperélastique pour le suivi de la démarche humaine (Mengüç et al., 2014). Ces capteurs à base de microcanaux de métal liquide incorporé dans un élastomère sont placés aux différentes articulations (genoux, hanches, genoux, chevilles) afin de mesurer leurs angles respectifs et les forces appliquées lors de différents mouvements.

Ces différentes études démontrent que des solutions existent pour mesurer des déformations complexes comme celles de matériaux textiles, et permettent d'établir une base de travail sur laquelle s'appuyer afin de mesurer les déformations subies par les VPC.

² Instrument de mesure des grandeurs électriques

2.4 Écoulement d'un fluide dans un textile nontissé :

À l'heure actuelle, il n'existe aucune théorie spécifique permettant de déterminer les performances des vêtements de protection contre les particules solides. Cependant, les fibres sont à la base des matériaux nontissés utilisés dans le cadre de ce travail, par conséquent, les vêtements de protection peuvent être perçus comme des médias filtrants conventionnels. Pour ces raisons, il a été décidé d'appréhender la pénétration de particules à travers les différents médias grâce aux lois et mécanismes de la filtration présents pour les filtres à fibres. Les VPC étant constitués de fibres, ils peuvent donc être caractérisés par leurs paramètres de structure :

- La nature chimique des fibres les composants.
- Leur épaisseur Z .
- Leur compacité α , définie comme le rapport entre le volume des fibres et le volume total du matériau.
- Le diamètre des fibres.

Le diamètre des fibres peut être mesuré par microscopie optique ou électronique afin de déterminer une distribution granulométrique et par conséquent un diamètre médian d_f . Toutefois, le diamètre des fibres est généralement déterminé théoriquement à l'aide de la relation empirique de Davies (Davies, 1973; Hinds, 1999) :

$$d_{Davies} = \sqrt{\frac{64\mu U Z \alpha^{3/2} (1 + 56\alpha^3)}{\Delta P}} \quad (2.3)$$

Avec U , la vitesse du fluide (m/s), μ la viscosité dynamique du fluide (Pa · s ou kg/(m · s)) et ΔP , la perte de charge (Pa) définit comme la différence entre les pressions statiques en amont, P_{amont} et en aval, P_{aval} du médium filtrant, elle caractérise la résistance du matériau à l'écoulement de l'air :

$$\Delta P = P_{amont} - P_{aval} \quad (2.4)$$

La performance des filtres est caractérisée selon deux paramètres : la perte de charge ΔP et l'efficacité de filtration E . Ces deux paramètres sont étroitement liés à la structure du matériau et aux conditions opératoires de leur utilisation (notamment la vitesse de filtration). L'efficacité est définie selon l'expression suivante :

$$E = 1 - P = 1 - \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \quad (2.5)$$

Avec P , la perméance, correspondant à la fraction des particules traversant le matériau soit le rapport entre les concentrations volumiques (part./cm³) en aval (C_{aval}) et en amont du filtre (C_{amont}).

2.4.1 Efficacité de filtration d'un médium fibreux

L'efficacité d'un filtre est définie par sa capacité à retenir les particules, solides ou liquides, contenues dans un fluide. Plusieurs auteurs ont montré qu'il est possible d'exprimer théoriquement l'efficacité E d'un filtre à partir de ses propriétés intrinsèques (épaisseur Z , diamètre de fibre d_f), et des conditions opératoires du système (vitesse de filtration U et des concentrations en particules C_{amont} , C_{aval}) (Bémer et al., 2006; Mouret, 2008; Payen, 2009; Pich, 1966). De ce fait, la perméance ou pénétration P du filtre est définie comme étant le rapport de la concentration en aval à la concentration en amont du filtre et s'exprime de la façon suivante :

$$P = \exp\left(-4\eta \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \frac{Z}{\pi d_f}\right) = \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \quad (2.6)$$

À partir de cette relation, l'efficacité globale E du médiet peut être reformulée (Bémer et al., 2006; Payen, 2009):

$$E = 1 - \exp\left(-4\eta \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \frac{Z}{\pi d_f}\right) \quad (2.7)$$

Où η représente l'efficacité unitaire de collecte du filtre. La plupart des auteurs supposent que les mécanismes sont indépendants les uns des autres et considèrent donc η comme étant la somme des efficacités liées à chaque mécanisme.

$$\eta = \sum \eta_j \quad (2.8)$$

2.4.2 Efficacité unitaire de collecte

L'efficacité unitaire de collection d'une fibre se définit comme étant la probabilité que celle-ci puisse capturer une particule de taille donnée (Bémer et al., 2006; Pich, 1966). Plusieurs phénomènes sont responsables de cette capture (diffusion, interception, impaction, sédimentation et attraction électrostatique). Cependant, du fait de la taille des particules étudiées et en l'absence de tout champ de force extérieur autre que la gravité, les mécanismes pris en considération dans cette étude seront la diffusion et l'interception (Hutten, 2007).

2.4.2.1 Collecte par diffusion brownienne

La diffusion brownienne ou mouvement brownien (Figure 2-6), est défini comme étant le parcours pris par une particule, de manière aléatoire, à la suite des impacts qu'elle subit avec les molécules de gaz dans lequel elle se trouve. Dès lors, les particules ne suivent les lignes de courant et adoptent un mouvement brownien (Bémer et al., 2006; Hutten, 2007; Pich, 1966). À l'approche des fibres, des interactions moléculaires faibles de type Van Der Waals font que les particules vont y adhérer. Ce phénomène est dominant pour des particules inférieures à 100 nm.

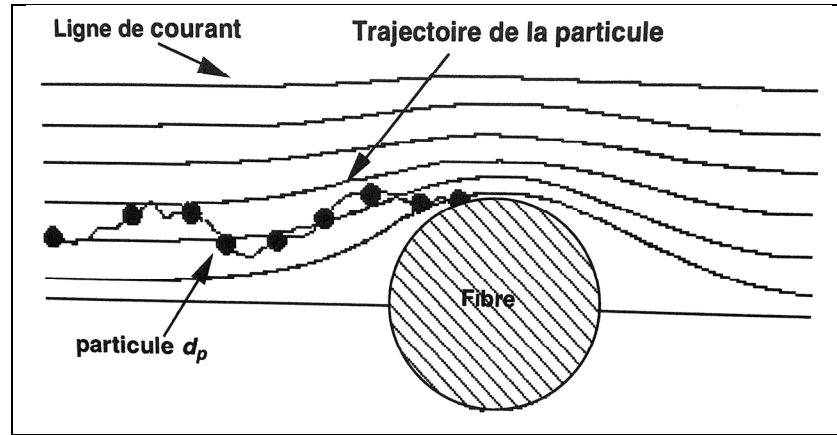


Figure 2-6 : Mécanisme de collecte par diffusion brownienne
Tirée de (Hervé-Bazin, 2007)

Ce mécanisme est caractérisé par le nombre sans dimension de Péclet (Pe) qui représente le rapport entre le transport de la particule par convection de l'air et le transport de celle-ci par diffusion:

$$Pe = \frac{d_f U}{D} \quad (2.9)$$

Avec D le coefficient de diffusion ($m^2.s^{-1}$) défini de la manière suivante :

$$D = \frac{k_B T}{3\pi\mu d_p} Cu \quad (2.10)$$

k_B représente la constante de Boltzmann ($k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$), T la température (K), μ représente la viscosité dynamique du fluide ($1,81 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ pour l'air à 293K) et Cu le coefficient de correction de Cunningham (Bémer et al., 2006). Lorsque la taille des particules est du même ordre de grandeur que le libre parcours moyen des molécules du gaz (λ), ce coefficient permet de considérer la non-continuité du milieu :

$$Cu = 1 + Kn \left(1,165 + 0,483 \cdot \exp \left(-\frac{0,997}{Kn} \right) \right) \quad (2.11)$$

Avec Kn , le nombre de Knudsen exprimant le rapport entre λ (environ 65 nm pour l'air, dans des conditions ambiantes de température et de pression : 22°C, 1 atm) et le diamètre de particules d_p :

$$Kn = 2 \frac{\lambda}{d_p} \quad (2.12)$$

Ce nombre permet également de définir le régime d'écoulement hydrodynamique régnant autour des fibres et présenté Tableau 2-3.

Tableau 2-3: Régime d'écoulement en fonction du nombre de Knudsen

Régime	Valeur de Kn
Continu	$\ll 0,01$
Glissement du fluide	$0,01 < Kn < 0,5$
Transition	$0,5 < Kn < 10$
Moléculaire libre	$10 <$

Déterminer l'écoulement autour des fibres dans les filtres fibreux n'est pas une tâche aisée considérant leur structure complexe. Plusieurs modèles, appelés modèles à cellules, ont été développés afin d'expliquer au mieux le champ d'écoulement dans un filtre. Ces modèles considèrent le filtre comme un assemblage parallèle de cylindres de diamètre identique et disposé perpendiculairement à l'écoulement du fluide. Chaque cylindre est perçu comme entouré par une enveloppe concentrique de fluide, appelé cellule. En régime continu, les modèles les plus fréquemment utilisés sont ceux de Lamb (1932), Happel (1959) et Kuwabara (1959).

Cependant, ces trois modèles ne reflètent pas les conditions réelles de l'écoulement traversant

un filtre. Pour cette raison, il a été décidé d'employer, pour cette étude, le modèle de Kirsch et Fuchs (1968), appelé modèle FAN. Ce dernier est assimilé, contrairement aux trois autres, à un enchevêtrement aléatoire de cylindres parallèles et équidistants. De plus, ce modèle permet de prendre en compte le glissement de fluide qui pourrait survenir autour des fibres. Afin de caractériser la structure du filtre, ces modèles font appel à un facteur hydrodynamique H . Celui du modèle FAN est défini comme suit :

$$H_{FAN} = -0,5 \ln \alpha - 0,52 + 0,64\alpha + 1,43(1 - \alpha)Kn_f \quad (2.13)$$

Avec Kn_f , le nombre de Knudsen relatif à la fibre. Il représente le rapport entre λ et d_f .

Il existe dans la littérature de nombreuses expressions caractérisant la capture par diffusion brownienne. La plupart de ces expressions ont été validées expérimentalement, et sont présentées par le Tableau 2-4.

Tableau 2-4 : Expressions de l'efficacité unitaire de collecte par diffusion issue de la littérature

Auteurs	Expression de η_r	Remarques	Domaine d'étude
(A Kirsch et A Fuchs, 1968)	$2,7Pe^{-2/3}$	Modèle empirique Modèle FAN	$Pe \geq 0,2$ $0,01 < \alpha < 0,15$
(Davies, 1973)	$A.Pe^{-2/3}$	Modèle empirique A de 1,5 à 2	
(Lee et Liu, 1982)	$1,6 \left(\frac{1-\alpha}{H_{Ku}} \right)^{1/3} .Pe^{-2/3}$	Modèle théorique	Aérosol liquide $0,0086 < \alpha < 0,42$ $11 < d_f < 12,9\mu m$ $1 < U < 300 \text{ cm/s}$
(Rao et Faghri, 1988)	$1,8 \left(\frac{1-\alpha}{H_{Ku}} \right)^{1/3} .Pe^{-2/3}$	Modèle théorique Flux de Kuwabara	$0,01 < \alpha < 0,15$ $100 < Pe < 300$ $0,206 < Re < 0,313$
(Liu et Rubow, 1990)	$1,6 \left(\frac{1-\alpha}{H_{Ku}} \right)^{1/3} .Pe^{-2/3} .Cd$ avec $Cd = 1 + 0,388Kn_f \left(\frac{(1-\alpha)Pe}{H_{Ku}} \right)^{1/3}$	Modèle théorique Cd facteur de correction dû au glissement du fluide d_f est le diamètre de Davies	Aérosol liquide $0,03 < d_p < 0,3\mu m$
(Payet et al., 1992)	$1,6 \left(\frac{1-\alpha}{H_{Ku}} \right)^{1/3} .Pe^{-2/3} .Cd .Cd'$ avec $Cd' = \frac{1}{1 + 1,6 \left(\frac{1-\alpha}{H_{Ku}} \right)^{1/3} .Pe^{-2/3} .Cd}$	Modèle théorique Cd et Cd' facteurs de correction dus au glissement du fluide d_f est le diamètre de Davies	Aérosol liquide $0,02 < d_p < 0,5\mu m$ $d_f = 1\mu m$ $\alpha = 0,08$
(Hinds, 1999)	$2Pe^{-2/3}$	Modèle théorique Flux de Kuwabara	$0,1 < U < 200 \text{ cm/s}$ $Re < 1$ $0,1 < d_f < 50\mu m$ $0,005 < \alpha < 0,2$
(Wang, Chen et Pui, 2007)	$0,84Pe^{-0,43}$	Modèle empirique d_f diamètre de Davies	Aérosol solide $0,04 < \alpha < 0,05$ $d_p < 100nm$ $1,9 < d_f < 4,9\mu m$ $5,3 < U < 15cm/s$
(Brochot. C, 2012)	$APe^{-m(\alpha)}$ avec $m(\alpha) = -1,525\alpha + 0,506$	Modèle empirique d_f diamètre de Davies A=0,976 et $m(\alpha)=0,4054$	Aérosol solide $5nm < d_p < 500nm$ $0,055 < \alpha < 0,091$ $1,34 < d_f < 5,02\mu m$ $2,6 < U < 5,3cm/s$

Du fait de la grande disparité entre différents les modèles, il est difficile de choisir le plus adéquat parmi toutes les références.

2.4.2.2 Collecte par interception directe

L'interception est le mécanisme prédominant pour les particules dont le diamètre (d_p) est supérieur à $0,1\mu\text{m}$. Ce phénomène de capture intervient lorsqu'une particule, qui suit une ligne de courant, passe à proximité d'une fibre à une distance inférieure à son rayon, comme illustré à la Figure 2-7. Son efficacité dépend du rapport d_p/d_f , plus ce rapport est élevé et plus l'efficacité de la collecte est importante.

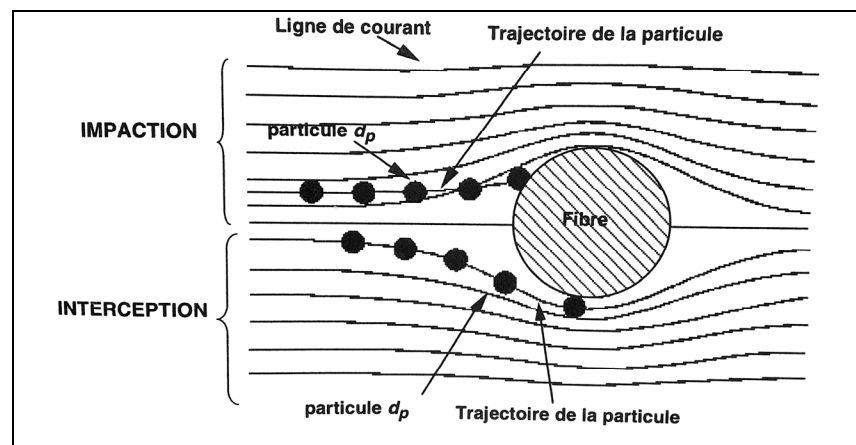


Figure 2-7 : Collecte des particules par impaction et interception
Tirée de (Hervé-Bazin, 2007)

L'interception directe est indépendante de la vitesse de filtration et s'exprime en fonction du paramètre d'interception R :

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (2.14)$$

Plusieurs modèles théoriques existent pour définir l'efficacité de collecte par interception directe. Certains de ces modèles sont présentés Tableau 2-5.

Tableau 2-5 : Expressions de l'efficacité unitaire de collecte par interception issue de la littérature

Auteurs	Expression de η_r	Remarques	Domaine d'étude
(Stechkina et Fuchs, 1966)	$\frac{2(1+R) \cdot \ln(1+R) - (1+R) + \frac{1}{1+R}}{2H_{Ku}}$	Modèle théorique Flux de Kuwabara	$Re < \alpha^{1/2}$ $Pe > 0,2$ et $\alpha < 1$ $R \ll 1$
(Kirsch et Zhulanov, 1978)	$\frac{2(1+R) \cdot \ln(1+R) - (1+R)}{2H_{Ku}} + \frac{1 + 2,86(2+R) \cdot R \cdot Kn_f}{2H_{Ku}}$		
(Lee et Liu, 1982)	$0,6 \left(\frac{1-\alpha}{H_{Ku}} \right) \frac{R^2}{1+R}$	Modèle théorique Flux de Kuwabara	$1 < U < 30 \text{ cm/s}$ $0,05 < d_p < 1,3 \mu\text{m}$ $0,0045 < R < 0,12$ $0,0086 < \alpha < 0,151$
(Miecret et Gustavsson, 1989)	$2,4\alpha^{1/3} R^{1,75}$	Flux de Kuwabara	
(Liu et Rubow, 1990)	$0,6 \left(\frac{1-\alpha}{H_{ku}} \right) \frac{R^2}{1+R} C_r$ avec $C_r = 1 + 1,996 \frac{Kn_f}{R}$		$0,5 < U < 100 \text{ cm/s}$ $0,05 < d_p < 1 \mu\text{m}$
(Hinds, 1999)	$\frac{(1-\alpha)R^2}{H_{Ku}(1+R)}$	Modèle théorique Flux de Kuwabara	$0,1 < U < 200 \text{ cm/s}$ $Re < 1$ $0,1 < d_f < 50 \mu\text{m}$ $0,005 < \alpha < 0,2$

Comme pour la diffusion, les nombreux modèles ainsi que leur relative disparité démontre la difficulté de choisir la bonne expression parmi toutes les références. Par conséquent afin de choisir le modèle adéquat, une comparaison des valeurs expérimentales sera faite avec certaines de ces expressions.

2.4.3 Efficacité de collecte totale

Dans la littérature, l'efficacité globale d'une fibre est la plupart du temps définie comme étant la somme des efficacités associée à chaque mécanisme de collecte. Néanmoins, les différents mécanismes ne sont pas indépendants les uns des autres, pour cette raison, certains auteurs (Brochot. C, 2012; Mouret, 2008), ont défini l'efficacité totale de collecte d'une fibre η par le produit des probabilités d'efficacités de collecte :

$$\eta = 1 - (1 - \eta_d).(1 - \eta_r) \quad (2.15)$$

Comme expliqué précédemment, le diamètre des particules est un paramètre primordial pour déterminer l'efficacité de collecte des matériaux fibreux. Selon le diamètre, les mécanismes de collecte vont jouer un rôle plus ou moins important. L'évolution de l'efficacité totale en fonction de la taille des particules et de l'interaction des trois mécanismes principaux est illustrée Figure 2-8.

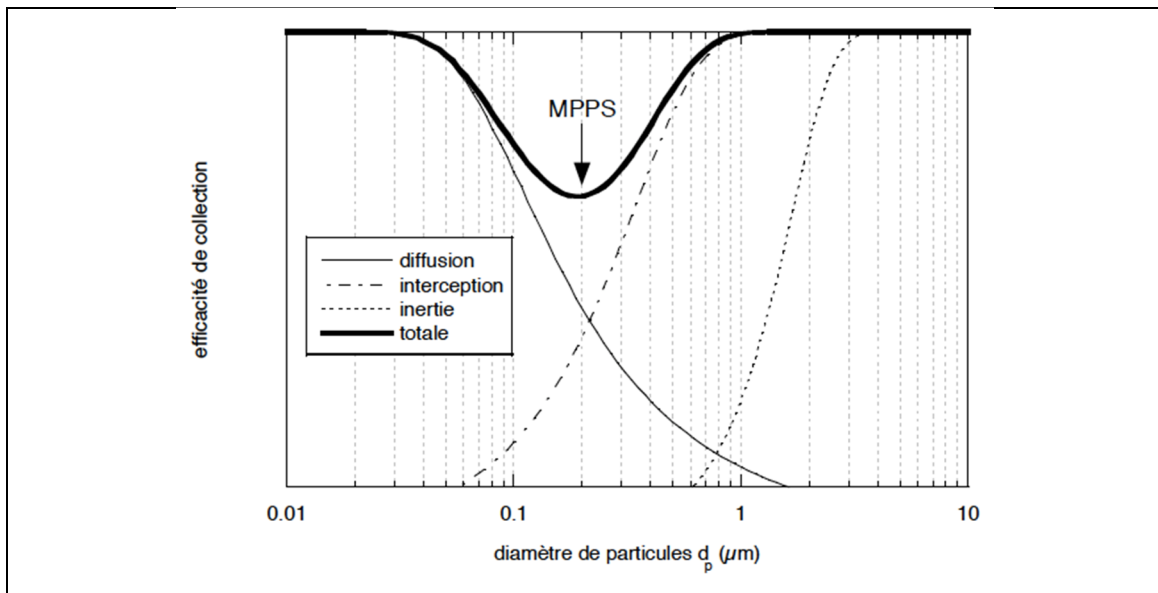


Figure 2-8 : Allure de l'efficacité d'un matériau fibreux selon le diamètre de particules
Tirée de (Mouret, 2008)

L'efficacité globale présente, pour des particules dont la taille avoisine 0,2 μm , un minimum.

Ce domaine correspond à des tailles de particule trop importantes pour que l'effet de diffusion soit efficace et trop petit pour que les mécanismes d'interception et d'impaction puissent jouer un rôle important. Ces particules sont donc logiquement considérées comme étant les plus difficiles à capturer (fraction de l'aérosol le plus pénétrant).

Les différents modèles développés au cours des années ont permis de mettre en évidence l'influence relative des différents paramètres des filtres (diamètre des fibres d_f , compacité α et épaisseur Z), de l'aérosol (masse volumique ρ_p et diamètre d_p des particules) et des conditions opératoires (vitesse de filtration U) sur l'efficacité de collecte des principaux mécanismes. Ainsi Bémer et al. en 2006 ont résumé l'influence des différents paramètres sur l'efficacité de filtration dans Tableau 2-6.

Tableau 2-6 : Influence de divers paramètres intrinsèques à l'aérosol, au filtre et à la filtration sur l'efficacité totale d'un filtre à fibres pour les principaux mécanismes de collecte
Adapté de (Bémer et al., 2006)

Efficacité de collection par	Aérosol		Conditions opératoires	Caractéristiques du filtre		
	$\rho_p \nearrow$	$d_p \nearrow$	$U \nearrow$	$d_f \nearrow$	$\alpha \nearrow$	$Z \nearrow$
Diffusion brownienne	\searrow	\searrow	\searrow	\searrow	\nearrow	\nearrow
Interception directe	-	\nearrow	-	\searrow	\nearrow	\nearrow

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie de cette étude s'articule autour de trois grandes parties. La première correspond à une description des différentes méthodes employées pour la conception des capteurs de déformation. La seconde partie présente la caractérisation des matériaux employés dans cette étude. Enfin, la dernière partie présente la méthodologie employée pour la réalisation des tests de pénétration.

3.1 Déformation des vêtements de protection

3.1.1 Développement des capteurs

Les vêtements de protection, lors de leur utilisation, sont soumis à différentes contraintes mécaniques induites par les mouvements et la gestuelle adoptés par les travailleurs qui les portent. Au meilleur de notre connaissance, aucune étude n'a été réalisée pour déterminer les déformations subies par les matériaux textiles pendant leur utilisation. Afin de satisfaire à cet objectif, des capteurs flexibles de déformation ont été développés.

À l'origine, le polymère (silicone), décrit dans le Tableau 3-1, fut conçu pour la fabrication à grande échelle par injection de pièces plastiques conductrices. Cependant, les travaux réalisés par Lorussi (Lorussi et al., 2005) ont démontré que ce silicone liquide pouvait être utilisé à d'autres fins par exemple pour concevoir des capteurs pour la surveillance de la gestuelle humaine. Il a donc été décidé d'utiliser ce même polymère pour réaliser les capteurs de déformation. Le principal inconvénient de ce polymère est qu'il a besoin d'être cuit pour pouvoir réticuler et ainsi être fonctionnel.

Tableau 3-1: Caractéristiques du silicone

Fournisseur	Wacker silicones
Dénomination	Elastosil LR 3162 A/B; silicone conducteur liquide
Composition	Silicone, graphite (charge conductrice)
Dureté Shore	A 53 : matériau souple
Résistance à la traction.	5,5 MPa
Élongation	400%
Résistivité électrique	11 Ω .m

Il s'agit d'un polymère bi-composant (A et B). Sa mise en œuvre est simple, il suffit de mélanger les deux composants avec un ratio 1:1; les charges (graphite) sont déjà incorporées dans chacun des produits. Une fois le mélange effectué, les capteurs peuvent être mis en forme. Ce processus se fait grâce à l'emploi de masque adhésif, en papier, découpé par laser selon une géométrie simple, il s'agit d'une ligne de 2 mm \times 40 mm et de 0,2 mm d'épaisseur avec un élargissement aux extrémités pour réaliser les liaisons électriques (Fig. 3-1). Cette géométrie simple permet d'obtenir une bonne conductivité électrique, comme l'ont démontré les travaux menés par Cochrane et al. (Cochrane et al., 2007; Cochrane, Lewandowski et Koncar, 2010) et est très facile à mettre en œuvre.

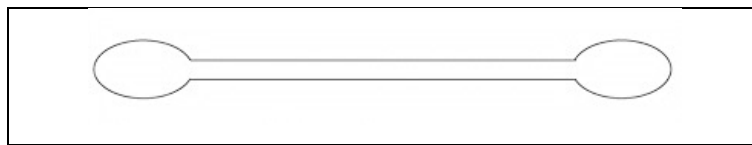


Figure 3-1 : Gabarit de masque

Le masque ainsi découpé est par la suite apposé, sur les matériaux à tester pour réaliser des éprouvettes de tests ou bien pour équiper les combinaisons à tester.

3.1.1.1 Protocole de mise en forme

La principale limite du polymère choisi se situe dans sa mise en forme. En effet, il nécessite d'être vulcanisé à chaud; le fabricant préconise une phase de vulcanisation de 5 min à 165°C afin de donner aux produits finaux leurs caractéristiques. Afin d'éviter d'endommager les matériaux textiles employés dans pour cette étude, il a été nécessaire de diminuer cette température de vulcanisation. En effet, les matériaux étant constitués pour la plupart de polyoléfine ($T_{\text{fusion}} = 120\text{-}130^{\circ}\text{C}$), la température de vulcanisation ne pouvait excéder les 120°C. Par conséquent, le temps de vulcanisation a également dû être revu à la hausse de 15 min pour un temps total de 20 min. Le mode de « cuisson » diffère selon l'utilisation des capteurs. Pour concevoir les capteurs sur des échantillons de faibles dimensions, un four est utilisé. Par contre, pour cuire les capteurs sur les combinaisons, étant donné leurs dimensions, la phase de vulcanisation ne peut être réalisée dans un four. Pour ce faire, l'utilisation d'un pistolet à air chaud (équipé d'un thermostat) est nécessaire comme illustré par la Figure 3-2. La température est contrôlée via un thermomètre numérique jumelé à un thermocouple fixé sur les combinaisons.



Figure 3-2 : Vulcanisation des capteurs

Les connexions électriques sont également réalisées pendant ce même cycle; avant vulcanisation, le matériau est extrêmement malléable (consistance d'une pâte) permettant l'insertion des fils électriques au sein même de la matrice. La vulcanisation rend le matériau

moins plastique, ce qui permet dans un premier temps de réaliser des liaisons solides avec les fils et dans un second temps rend le matériau élastique. Une fois toutes ces étapes réalisées, les capteurs sont fonctionnels, mais ils nécessitent un étalonnage pour pouvoir être opérationnels.

3.1.1.2 Étalonnage des capteurs

Afin de mesurer la déformation des matériaux de protection lors de leur utilisation, il faut tout d'abord s'assurer du bon fonctionnement des capteurs. Pour ce faire, deux séries de tests de traction uniaxiale sont réalisées : la première est réalisée jusqu'à la rupture et la seconde est faite en cycle dynamique de manière à reproduire une utilisation sur un vêtement.

Les essais réalisés en statique permettent de déterminer les propriétés électromécaniques des capteurs, tandis que les essais dynamiques permettent de s'assurer du fonctionnement des capteurs en condition réelle d'utilisation. Les éprouvettes utilisées pour les différents tests sont réalisées de la manière suivante :

- Des bandes de matériau de VPC sont découpées aux dimensions de 20 mm × 80 mm.
- Un capteur (mesurant 2 mm × 40 mm) est ensuite déposé sur chacune des éprouvettes.
- Les éprouvettes sont placées sur les différentes machines de traction, dépendamment du test effectué. Les dimensions utiles des éprouvettes sont de 20 mm × 60 mm.

Pour définir les propriétés électromécaniques des capteurs, les échantillons sont testés à l'aide d'une machine de traction MTS Alliance RF/200. Une traction contrôlée leur est appliquée jusqu'à la rupture tout en mesurant simultanément leur réponse électrique. Dans le but de récolter le maximum de données possibles et en vue d'une utilisation réelle, les capteurs sont testés selon différentes vitesses de traction, allant de 100 mm/min à 500 mm/min (limite de vitesse de l'appareil).

Le fonctionnement en condition réelle est quant à lui déterminé à l'aide d'une machine de traction dynamique MTS 858 Mini Bionix®. Les paramètres de tests utilisés sont les suivants : fréquence de traction de 2 Hz, 10 plages de déformation (0,5 mm à 5 mm) avec un pas de 0,5 mm et 30 cycles pour chaque plage de déformation. Chaque test est réalisé avec un minimum de 5 répliques.

3.1.2 Mesures sur sujets humains

Suite à leur calibration, les capteurs peuvent être utilisés en condition réelle. Pour ce faire les capteurs sont apposés sur les combinaisons (selon le protocole de mise en forme adéquate) aux emplacements désirés, comme illustré par la Figure 3-3.



Figure 3-3 : Positionnement des capteurs sur les combinaisons

En tout, ce sont 9 capteurs (localisés aux genoux (4), cuisse (1), dos (3) et au coude (1)) qui sont appliqués sur les combinaisons. Ces emplacements ont été déterminés après plusieurs essais démontrant qu'ils représentaient les secteurs les plus sollicités. Les combinaisons étant symétriques et afin de limiter les données redondantes, un seul côté est équipé de capteurs.

Suite à l'instrumentation des combinaisons, il a été demandé à trois volontaires de les porter, d'adopter différentes postures et d'effectuer des mouvements particuliers afin de pouvoir reproduire les contraintes subies pendant une utilisation en condition de travail.

Ainsi, il a été demandé aux sujets de suivre une série de mouvements, définis comme suit :

- Flexion et extension répétées des genoux et des hanches (squat).
- Torsions répétées du bassin : pivot lent et progressif du haut du corps, dans un sens puis dans l'autre.
- Flexions répétées du tronc : aller toucher les pieds avec les mains.
- Flexion et extension répétées du coude.
- Adopter une position assise.

Il a également été décidé de mesurer la pression régnant à l'intérieur des vêtements. Ceci a pour but de déterminer, en comparant celle-ci avec les taux de pénétration, si la pression générée par les mouvements du travailleur peut influencer le taux de pénétration des particules. Pour réaliser la mesure, un capteur (Omega ; série PXSDX - identique à celui utilisé pour mesurer le différentiel de pression entre les chambres d'essais) a été installé sur une combinaison de manière à mesurer le différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur du vêtement. Par la suite, les vêtements ont été portés par trois personnes auxquelles il a été demandé de faire une série de mouvements. Le matériau sélectionné pour réaliser l'ensemble des tests sur sujet humain fut celui présentant la plus faible élongation (matériau A). De ce fait, les tests sont tous réalisés dans les conditions du pire scénario.

3.2 Efficacité des matériaux de VPC

3.2.1 Les matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude ont été identifiés auprès de différents manufacturiers comme étant ceux les plus utilisés dans la conception de vêtements de protection chimique tels que des couvre-touts et des blouses de laboratoire.

3.2.1.1 Description

En tout, 5 matériaux ont été choisis : 4 non-tissés et un tissu. Les matériaux nontissés sélectionnés sont : le « flash spinning », le « SMS », le « SMMMS » et le film microporeux. Ils ont été choisis, car ce sont les quatre matériaux utilisés pour la fabrication des combinaisons intégrales disponible sur le marché. Le tissu sélectionné est le sergé; il est utilisé dans la réalisation des blouses de laboratoire et des vêtements de travail conventionnels. Le Tableau 3-2 présente une brève description des matériaux sélectionnés.

Tableau 3-2 : Matériaux sélectionnés

Matériaux	Composition	Structure	Application
A	PEHD	Flash spinning <i>Procédé breveté, les fibres sont créés par vaporisation à chaud et sous pression d'une solution liquide de PEHD.</i>	Couvre-tout
B	PE/PP	Film Microporeux <i>Film de polyéthylène étiré à chaud avec ajout de carbonate de calcium, pour créer les pores, et renforcé par des fibres de polypropylène filés-liés (« spunbonded »).</i>	Couvre-tout
C	PP	SMS <i>Stratifié de trois couches: « spunbonded/meltblown/spunbonded »; le pouvoir filtrant est assuré par la couche intermédiaire (M); les couches extérieures (S) ne servent qu'à renforcer la structure.</i>	Couvre-tout
D	PP	SMMMS <i>Stratifié de cinq couches: Similaire au produit C</i>	Couvre-tout
E	PES/Co	Popeline <i>Tissu d'armure toile avec les fils de chaîne plus fin que les fils de trame</i>	Blouse de laboratoire
<i>Note : PEHD : polyéthylène haute densité; PE : polyéthylène; PP : polypropylène; PES : polyester; Co : coton; S : spunbound (filé-lié); M : meltblown (extrudé soufflé).</i>			

3.2.1.2 Caractérisation

Les paramètres mesurés sont les suivants :

- Épaisseur : mesurée grâce à l'utilisation d'un micromètre digital (Mitutoyo; 293-344), 25 mesures par matériaux ont été réalisées.
- Diamètre de fibres : mesuré via microscopie électronique à balayage (Hitachi ; S-3600N), grossissement x 300 et microscopie optique (Olympus ; DSX500), grossissement x 300 ; 100 mesures ont été faites pour chaque matériau.
- Densité matériau et fibres : calculés selon la relation : surface/épaisseur.
- Porosité : mesurée par porosimétrie à intrusion de mercure (Micromeritics ; AutoPore IV 9500); trois répliques par matériaux.
- Compacité : calculée selon la relation : masse surfacique/(densité fibre × épaisseur matériau) et confirmée par la relation : 1-porosité.
- Volume de pore : mesuré par porosimétrie à intrusion de mercure.
- Perméabilité à l'air : mesuré via un perméabilimètre à air basse pression (Frazier Precision instrument) et selon la norme ASTM D737-04 (2012).
- Résistance mécanique multiaxiale : mesuré par traction uniaxiale (voir section 5.3).
- Différentiel de pression : mesuré grâce à un capteur de pression (Omega ; série PXSDX) mesurant le différentiel de pression de part et d'autre du matériau pendant les tests.

Pour réaliser toutes ces mesures, les échantillons sont préalablement conditionnés pour un minimum de 24 h à $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $65\% \pm 2\%$ d'humidité relative.

La déformation des matériaux a été caractérisée à l'aide d'un scanner 3D Handyscan (EXAscan, Creaforme) permettant la reproduction 3D des matériaux lors des déformations. Pour ce faire, les matériaux ont été placés sur un banc de test similaire au banc utilisé pour les tests de pénétration. Les matériaux ont par la suite été déformés de 0 à 10 mm avec un palier tous les 0,5 mm et numérisés à chaque palier.

3.2.2 Banc d'essai

Cette section apporte un descriptif du dispositif expérimental développé pour mener à bien l'ensemble des tests de pénétration des particules nano et submicroniques à travers les vêtements de protection. La technique employée pour la réalisation des essais est basée sur la méthode de filtration. Contrairement à d'autres études utilisant des méthodes d'évaluations, basées uniquement sur le principe de diffusion ou de filtration des particules (Gao et al., 2011; Golanski et al., 2009; Kim, Harrington et Pui, 2006; Park et al., 2011), la méthode proposée dans cette étude impose une déformation mécanique aux échantillons testés afin de mimer leurs déformations lorsqu'ils sont portés. Les déformations appliquées sont issues des données obtenues par les capteurs.

3.2.2.1 Description

Le montage expérimental, présenté dans la Figure 3-4, est composé d'un système de génération d'aérosols, d'un système d'homogénéisation et de dilution, d'un système de sélection de flux, d'une cellule de pénétration contenant les échantillons à tester, d'un système de déformation mécanique et d'un système d'analyse. La réalisation de ce montage expérimental a demandé d'établir un cahier des charges précis. Il a fallu prendre en compte le mode d'application des particules (aérosols), donc être étanche aux gaz (afin d'éviter les fuites vers l'intérieur ou les infiltrations provenant de l'extérieur) et n'avoir aucune charge électrique afin d'éviter l'adsorption des particules sur les différentes parois. Pour ce faire, l'utilisation de matériaux dissipateurs de charges électriques (polyéthylène chargé carbone) et reliés à la terre a été nécessaire.

Pour cette étude, deux modes de fonctionnements ont été expérimentés. Le premier consiste en un mode entièrement clos, sans système de déformation (Figure 3-4 A); ce mode permet de caractériser l'aérosol dans les différents compartiments du montage. Le second mode est le mode de test à proprement dit (Figure 3-4 B); c'est ce mode qui permet d'exposer les matériaux à l'aérosol tout en le déformant. L'un des défis de ce dernier mode a été de conserver l'étanchéité du système pendant toute la période de test (pour ce faire, il a fallu

concevoir un système flexible capable de se déformer sans que l'aérosol ne s'échappe de la cellule de pénétration).

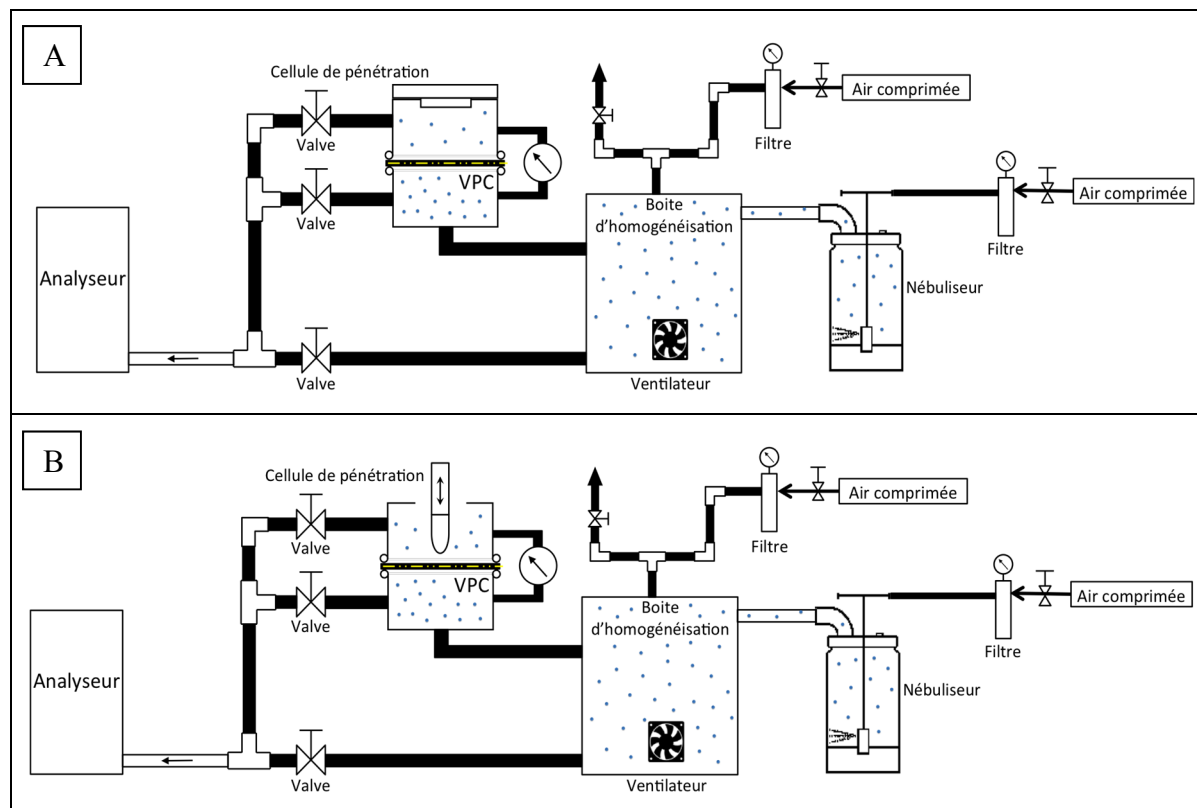


Figure 3-4 : Schéma du montage expérimental : A – en vase clos; B - mode déformation

3.2.2.2 Génération de l'aérosol et son parcours à travers le montage

La génération de l'aérosol est assurée par la technique de nébulisation. Une solution aqueuse de chlorure de sodium à 5% (m/v) est versée dans un nébuliseur à 3 jets (BGI, Inc.), alimenté par de l'air ultra pur à une pression de 0,69 bar (10 psi). Ceci permet de produire, à froid, un aérosol liquide polydispersé composé de particules de NaCl à une concentration d'environ 10^8 particules/cm³ et à un débit de 1,65 ml.min⁻¹ en sortie du nébuliseur. L'aérosol ainsi généré passe ensuite par une boîte d'homogénéisation et de dilution; son rôle est d'assurer une concentration la plus uniforme possible afin que chaque test ait une concentration en amont identique aux autres et également de sécher l'aérosol. Pour ce faire, l'utilisation d'un ventilateur permet une bonne homogénéisation tandis qu'une ligne d'air auxiliaire assure la dilution à la concentration désirée. Ainsi la concentration passe de 10^8 particules/cm³ en

sortie du nébuliseur à 10^6 particules/cm³ dans la boîte et en amont de l'échantillon. Cette concentration assure une certaine stabilité de l'aérosol en limitant l'agglomération des particules.

Le système de sélection de flux à trois valves est également un élément important de ce montage. Contrairement aux différentes études traitant du sujet, il n'a pas été possible de doubler le système d'analyse permettant la mesure simultanée de la granulométrie de l'aérosol en amont et en aval de l'échantillon. C'est donc pour éviter d'avoir à utiliser plusieurs systèmes de mesures en parallèle que le système à trois valves a été développé. Celui-ci permet donc de choisir l'endroit où la mesure est réalisée soit : dans la boîte d'homogénéisation, en amont ou en aval de l'échantillon. Les mesures peuvent être faites à n'importe quel moment lors des tests, sans avoir besoin d'un deuxième appareil de mesure. Un inconvénient à ce dispositif, c'est qu'il ne permet pas de mesurer simultanément l'aérosol aux différents emplacements. Par conséquent différentes manipulations des valves doivent être faites en cours de tests pour s'assurer du bon déroulement de ces derniers.

3.2.2.3 Cellule de pénétration

La cellule de pénétration est le cœur du dispositif expérimental. Elle a été conçue de manière à pouvoir exposer les échantillons (50 cm²) à tester aux particules nano et submicroniques. Elle se compose de deux compartiments (amont et aval) séparés par l'échantillon à tester. La cohésion et l'étanchéité du système sont assurées par une bague de serrage et la pression constante que celle-ci exerce sur deux joints toriques situés à la base de chacun des compartiments. La cellule est également équipée d'un capteur de pression (Omega série PXSDX) permettant de mesurer le différentiel de pression s'exerçant entre les deux compartiments, lorsque séparés par un échantillon.

3.2.2.4 Système de déformation mécanique

Le système de déformation mécanique a été pensé et conçu pour pouvoir simuler différentes situations. Composé d'un actuateur électromécanique jumelé à un système informatisé de

contrôle, ce montage est capable d'appliquer des déformations, statiques ou dynamiques, avec une précision de 0,1 mm, sur une plage de 100 mm. Il permet également d'appliquer des forces pouvant aller jusqu'à 2000 N et générer des vitesses de déformation allant de 100 mm/min ($1,67 \cdot 10^{-3}$ m/s) à 1,5 m/s.

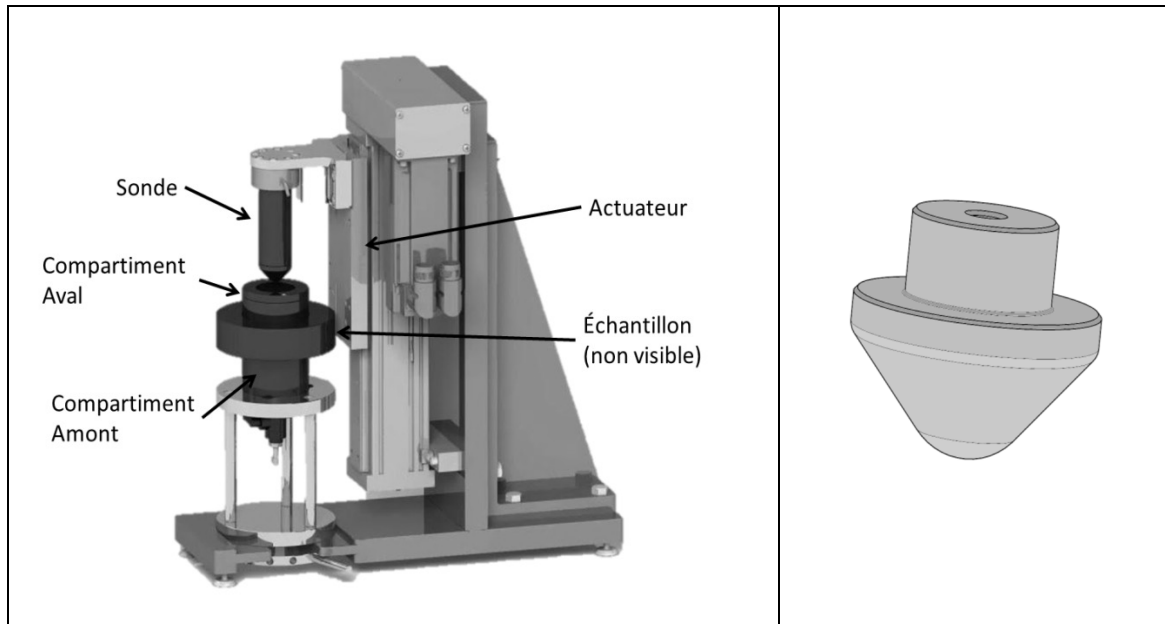


Figure 3-5 : Schéma du banc d'essai et de la sonde de déformation

Au niveau des sollicitations mécaniques, celles-ci sont appliquées grâce à une sonde de déformation à géométrie variable (surface de contact = $22,90 \text{ cm}^2$). Ainsi, différentes déformations mécaniques peuvent être appliquées. La sonde est solidaire de l'actuateur via une cellule de charge assurant la mesure et le contrôle de la force appliquée.

Pour cette étude, les paramètres d'utilisation du banc sont :

- Déformation : statique et dynamique.
- Vitesse : 0,1 m/s en montée et descente.
- Déplacements : 0mm, -2mm, -5mm et -10 mm.
- Fréquence de déformation dynamique : 1 Hz.
- Nombre de déformations/échantillon : 100.
- Force mesurée : < 50N.

Pendant le mode statique, la sonde est en contact permanent avec le matériau et le déforme sans interruption pendant toute la durée de l'essai. À l'inverse, le mode dynamique permet d'ajouter du mouvement à la déformation. Lors de ce dernier, l'échantillon est déformé à intervalles réguliers selon la fréquence souhaitée. L'idée de réaliser des déformations dynamiques est de simuler l'utilisation du vêtement lors de son utilisation. Ainsi, les matériaux subissent des cycles de déformations et relaxations pendant que l'aérosol est généré; cela devrait permettre de déterminer si les mouvements peuvent influencer l'efficacité des VPC.

3.2.3 Mesure des aérosols

Le choix du matériau pour générer les particules s'est porté sur le chlorure de sodium (NaCl). De par son caractère non toxique, ce sel est couramment utilisé pour la génération d'aérosols nanométriques notamment lors des tests normalisés. De plus, leur utilisation, contrairement à d'autres particules (or, argent, carbone, silice, etc.), permet de simplifier les procédures d'utilisation tout en permettant une manipulation sécuritaire. La Figure 3-6 montre des particules de NaCl polydispersées.

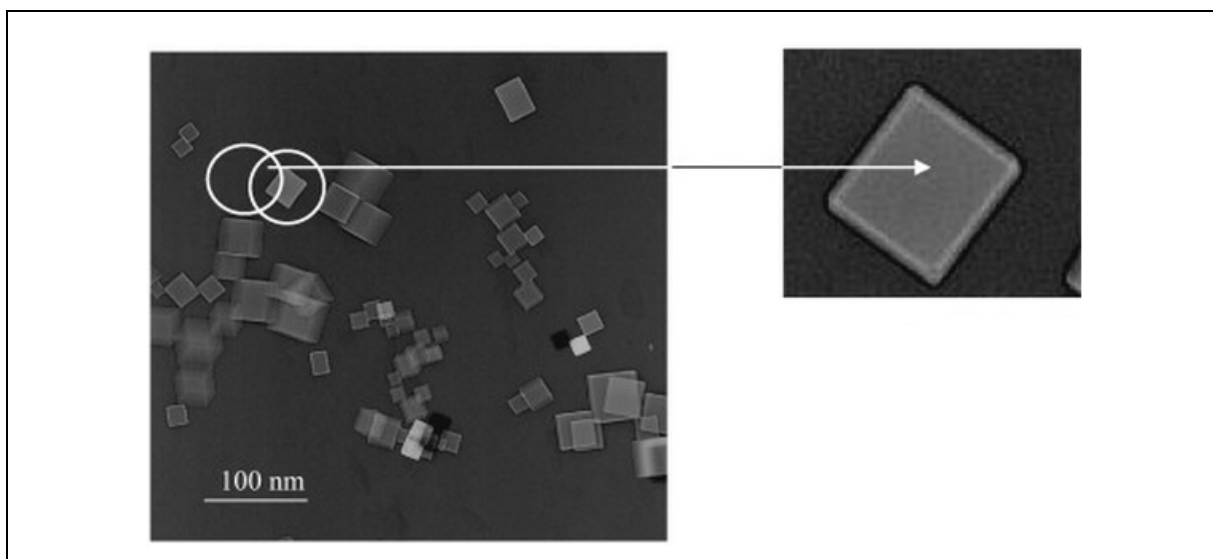


Figure 3-6: Images microscopiques de nanoparticules de NaCl polydispersées (tirée de (Boskovic et al., 2008))

La caractérisation des particules (distribution et concentration) utilisée est directement faite lors des tests de pénétration. Pour ce faire, plusieurs appareils de mesure sont utilisés, le but étant de les comparer et d'identifier d'éventuelles différences entre eux : un SMPS, un EEPS et un P-Trak (tous commercialisés par la société TSI) ont été utilisés.

Cette section présente les différents appareillages utilisés et les protocoles de mesure associés.

3.2.3.1 SMPS

Le fonctionnement du SMPS est basé sur l'analyse de la mobilité électrique des particules et permet de caractériser en taille et en nombre des particules submicroniques. La mesure consiste tout d'abord à charger électriquement les particules avant de les sélectionner par bande de mobilité électrique à l'aide d'un classificateur pour ensuite compter les particules correspondantes à l'aide d'un compteur optique. La chaîne de mesure SMPS se compose donc de trois éléments : un classificateur électrostatique (modèle 3080, TSI), un analyseur différentiel de mobilité électrique (long DMA, modèle 3081, TSI) et d'un compteur de particules par condensation d'eau (CPC, modèle 3786, TSI). L'ensemble de la chaîne de mesure est présenté par la Figure 3-7.

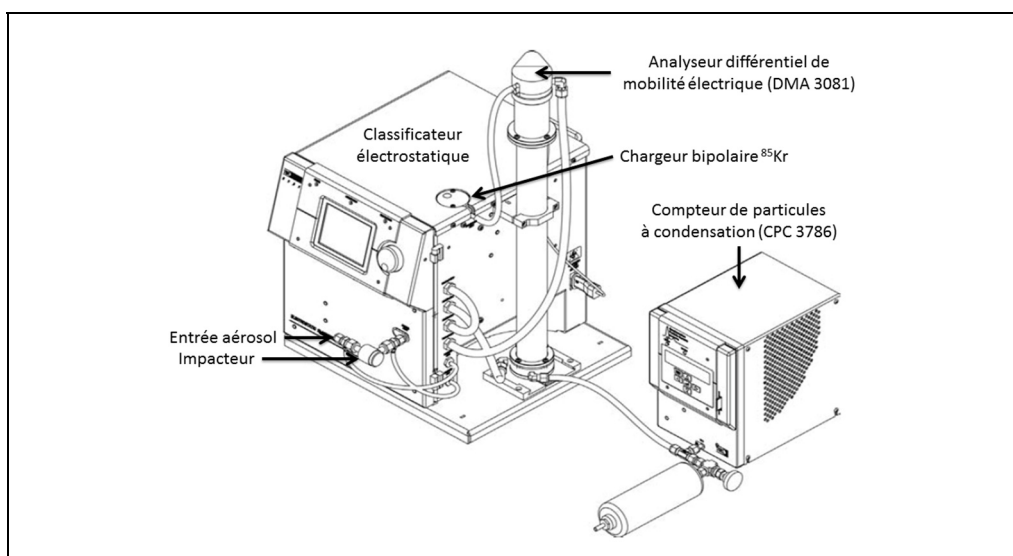


Figure 3-7: Schéma de la chaîne de mesure du SMPS
Tirée de (TSI, 2010)

Dans un premier temps, le rôle du classificateur est de faire une présélection des particules grâce à un impacteur qui élimine toutes particules supérieures à $1\mu\text{m}$. Puis, son rôle est de charger électriquement les particules en fonction de leur taille ; la charge appliquée étant proportionnelle à la taille de la particule. La charge électrique appliquée à chaque particule est produite en ionisant le gaz porteur grâce à un chargeur bipolaire contenant une source radioactive (Krypton 85). Une fois l'aérosol chargé, il est envoyé à travers le DMA, dans lequel un champ électrique, variable, à haute tension est appliqué. Le tri des particules se fait selon leur charge et leur mobilité électrique. La variation graduelle du champ électrique, à l'intérieur de la colonne, permet de dévier une classe précise de particules vers l'orifice de collecte. À ce stade de l'analyse, les particules sont donc triées par taille. L'aérosol est ensuite envoyé vers le compteur de particules pour connaître la concentration en nombre des particules de taille donnée. Cet appareil utilise une technique de condensation (à l'eau) qui modifie la taille des particules. En effet, le compteur de particules est un appareil optique et les particules lui arrivant sont trop petites pour pouvoir être analysées directement, l'étape de condensation permet donc de les rendre détectables pour les compter.

Le SMPS permet d'analyser des particules de taille comprise entre 2,5 nm et $1\mu\text{m}$ sur un maximum de 167 canaux, dépendamment des réglages appliqués à l'appareil. Sa plage de mesure de concentration est relativement importante : 1 à 10^7 particules/ cm^3 par canaux et son temps d'acquisition est relativement lent (70 s dans notre cas).

3.2.3.2 EEPS

Le spectromètre de mesure de la taille des particules d'échappement de moteurs (EEPS acronyme anglais pour Engine Exhaust Particle Sizer) est un autre instrument permettant la mesure de la distribution granulométrique des particules basé sur leurs propriétés de mobilité électrique de manière similaire au SMPS. Cependant, à l'inverse du SMPS, le EEPS, de par sa configuration et les technologies utilisées pour sa conception, permet une acquisition avec une résolution temporelle de 0,1 s de la gamme complète de l'aérosol (dimension et distribution des particules). Cela permet de visualiser en temps réel les résultats, le

changement de dimension et de distribution des particules (Krinke et Zerrath, 2011). Le principe de fonctionnement du EEPS est présenté à la Figure 3-8.

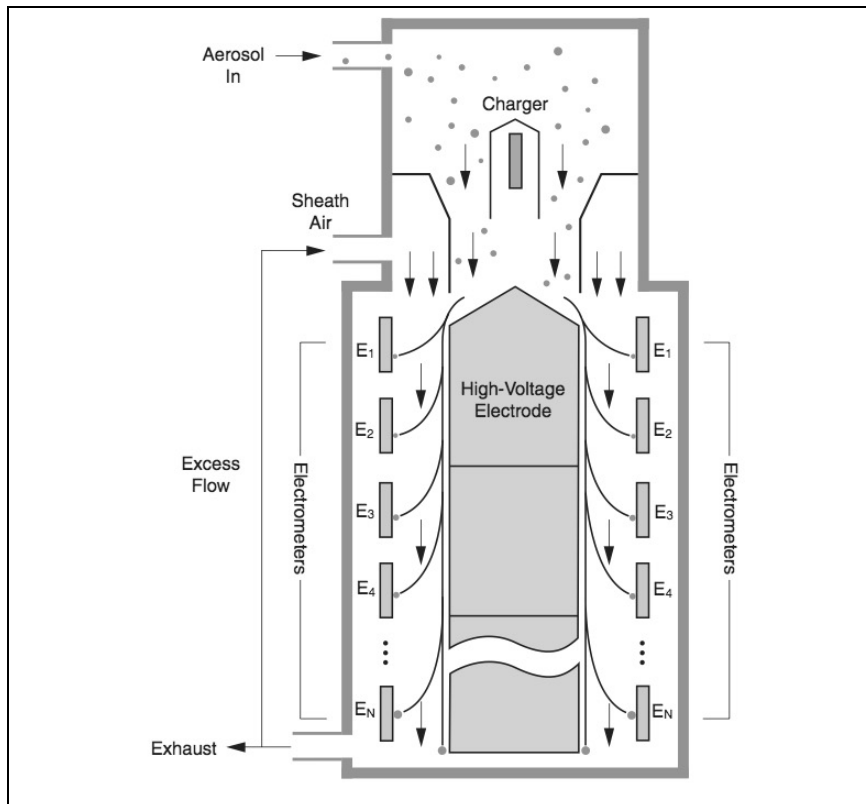


Figure 3-8 : Schéma du EEPS
Tirée de (Krinke et Zerrath, 2011)

Son fonctionnement est relativement simple et similaire au SMPS. Dans un premier temps, l'aérosol pénètre dans un cyclone permettant, tout comme l'impacteur du SMPS, la sélection spécifique des particules de moins d' $1\mu\text{m}$. Les particules passent ensuite dans deux chargeurs corona placés en série. Dans le premier, appelé préchargeur, les particules sont exposées à une charge négative afin d'éviter une surcharge dans le second. Le second, le chargeur principal, génère une charge positive qui confère aux particules une charge finale et connue. Les particules sont ensuite guidées dans une colonne de classification (DMA) contenant une électrode centrale à haute tension autour de laquelle sont disposés 22 électromètres. La colonne génère une tension positive et est divisée en trois compartiments de voltage différents, ainsi les particules chargées positivement sont poussées vers les électromètres

(chargés négativement) pour y être comptées. Le EEPS couvre une plage complète de taille de particules allant de 5,6 nm à 560 nm échelonnée sur 32 canaux et a une plage de concentration similaire au SMPS : 1 à 10^8 particules/cm³. L'utilisation d'un débit d'aspiration important (10 l/min) permet de limiter la perte de particule par diffusion (Krinke et Zerrath, 2011).

3.2.3.3 P-Trak

Le compteur de particules ultrafines P-Trak est un instrument dédié à la mesure des niveaux de particules sur les lieux de travail. Son fonctionnement est basé sur celui des compteurs de particule à condensation CPC. Il mesure la concentration en nombre de particules présentes, sans faire de distinction de taille. Lorsque l'aérosol pénètre dans l'appareil, il est exposé à des vapeurs d'eau ou d'alcool saturé (alcool isopropylique ultrapur pour le P-Trak). Le mélange particules/alcool est ensuite aspiré dans un tube de condensation où l'alcool se condense sur les particules provoquant ainsi un accroissement de leur taille en gouttelettes qui peuvent ainsi être comptées plus facilement. Les gouttelettes ainsi formées passent alors à travers une chambre optique dans laquelle leur concentration est mesurée par un couple laser/photodétecteur. Le principe du P-Trak est illustré à la Figure 3-9.

Cet instrument portable permet la détection et le comptage, en temps réel, de particules dont la taille est comprise entre 20 nm et 1 µm (TSI, 2013). Un inconvénient majeur de cet appareil est sa capacité de comptage limitée. En effet, le P-Trak ne peut compter les aérosols dont la concentration en nombre excède 500 000 particules/cm³.

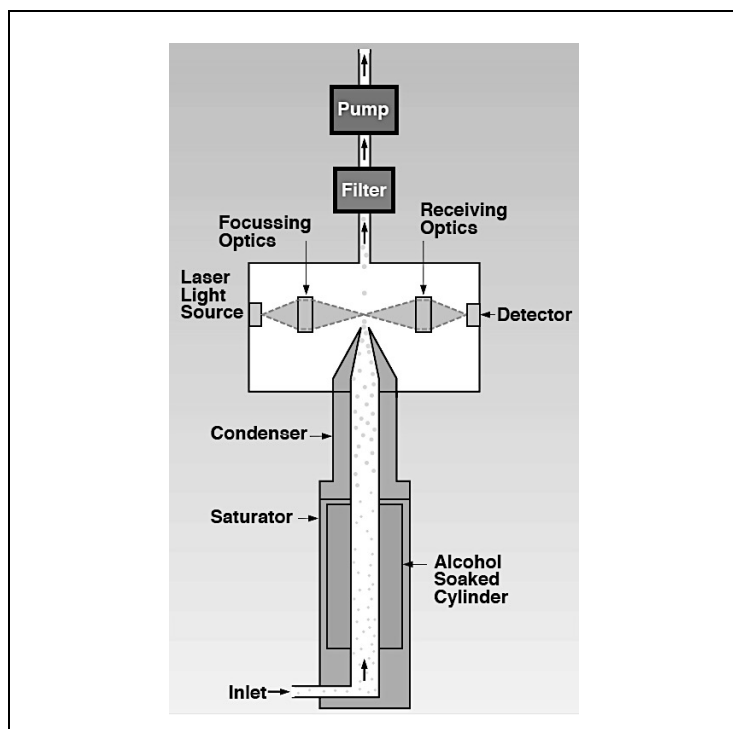


Figure 3-9 : Schéma du P-Trak
Tirée de (TSI, 1999)

Le Tableau 3-3 présente un bref récapitulatif les principales caractéristiques des trois appareils utilisés lors de cette étude.

Tableau 3-3 : Principales caractéristiques des appareils de mesure

	SMPS	EEPS	P-Trak
Plage de taille mesurée	2,5 nm à 1 μm	5,6 nm à 560 nm	20 nm à 1 μm
Plage de concentration mesurée	1 à 10^7 parts/ cm^3	200 à 10^8 parts/ cm^3	1 à $5 \cdot 10^5$ parts/ cm^3
Fréquence de mesure minimale	16 s	0,1 s	1 s
Débit d'aspiration	0,6 l/min	10 l/min	0,7 l/min

3.2.4 Réalisation des essais de pénétration

Pour la réalisation des essais, les matériaux sont découpés selon une forme circulaire d'un diamètre de 10 cm. La stabilisation de l'aérosol au sein de la cellule de pénétration n'étant pas immédiate, il faut prévoir environ 15 à 20 min pour obtenir les conditions d'équilibre du système (concentrations et distribution de taille des particules stables). En outre, afin d'acquérir de bons résultats statistiques pour chaque appareil de mesure utilisé, chaque point de données est une moyenne d'au moins trois échantillons (répliques) et d'un minimum de six mesures par répliques.

CHAPITRE 4

MESURE DE LA DÉFORMATION DES VÊTEMENTS DE PROTECTION

4.1 Étalonnage électromécanique

Afin de pouvoir mesurer la déformation des matériaux, il faut être en mesure d'établir une relation entre la déformation du capteur apposé et la variation de résistance électrique générée. Pour ce faire, le capteur est placé dans un montage potentiométrique (quart de pont) muni d'un amplificateur opérationnel afin d'amplifier le signal émis. Ceci permet d'obtenir une meilleure lecture des résultats. Ce montage, couplé à un programme informatique conçu grâce au logiciel Labview, permet de calculer la résistance du capteur en fonction de la tension en sortie du montage. La résistance aux bornes du capteur s'exprime selon la relation suivante :

$$R_{\text{capteur}} = \frac{R_{\text{pont}} \left(V_{cc} - \frac{(V_{\text{capteur}} - V_{os})}{A_0} + \frac{V_{cc}}{2} \right)}{\frac{V_{\text{capteur}} - V_{os}}{A_0} + \frac{V_{cc}}{2}} \quad (4.1)$$

Avec R_{capteur} (Ω) la résistance du capteur; R_{pont} (Ω) la résistance utilisée pour le montage potentiométrique, V_{cc} (V) la tension d'alimentation, V_{capteur} (V) la tension aux bornes du capteur, V_{os} (V) la tension de décalage en sortie de l'amplificateur et A_0 (V) est le gain en tension de l'amplificateur.

Dans cette étude, V_{cc} est imposée à 10 V, le décalage V_{os} et le gain A_0 de l'amplificateur sont réglés respectivement à 5 V et à 6. La relation précédente peut donc être simplifiée de la manière suivante :

$$R_{\text{capteur}} = \frac{R_{\text{pont}} (70 - 2V_{\text{capteur}})}{50 + 2V_{\text{capteur}}} \quad (4.2)$$

Dans le but de comparer les essais entre eux, il est important de normaliser R_{capteur} . Pour ce faire la résistance initiale (R_0) du capteur est mesurée avant chaque essai à l'aide d'un ohmmètre. La résistance normalisée R_n (Ω) est alors définie comme étant la variation de résistance :

$$R_n = \frac{R_{\text{capteur}} - R_0}{R_0} \quad (4.3)$$

4.1.1.1 Facteur de jauge

La sensibilité d'un capteur est déterminée suivant la mesure simultanée de la variation de résistance aux bornes du capteur et de l'allongement imposée au matériau sur lequel il est posé. La Figure 4-1 présente la réponse électrique du capteur en fonction de l'allongement du matériau à une vitesse de 500 mm/min et jusqu'à sa rupture.

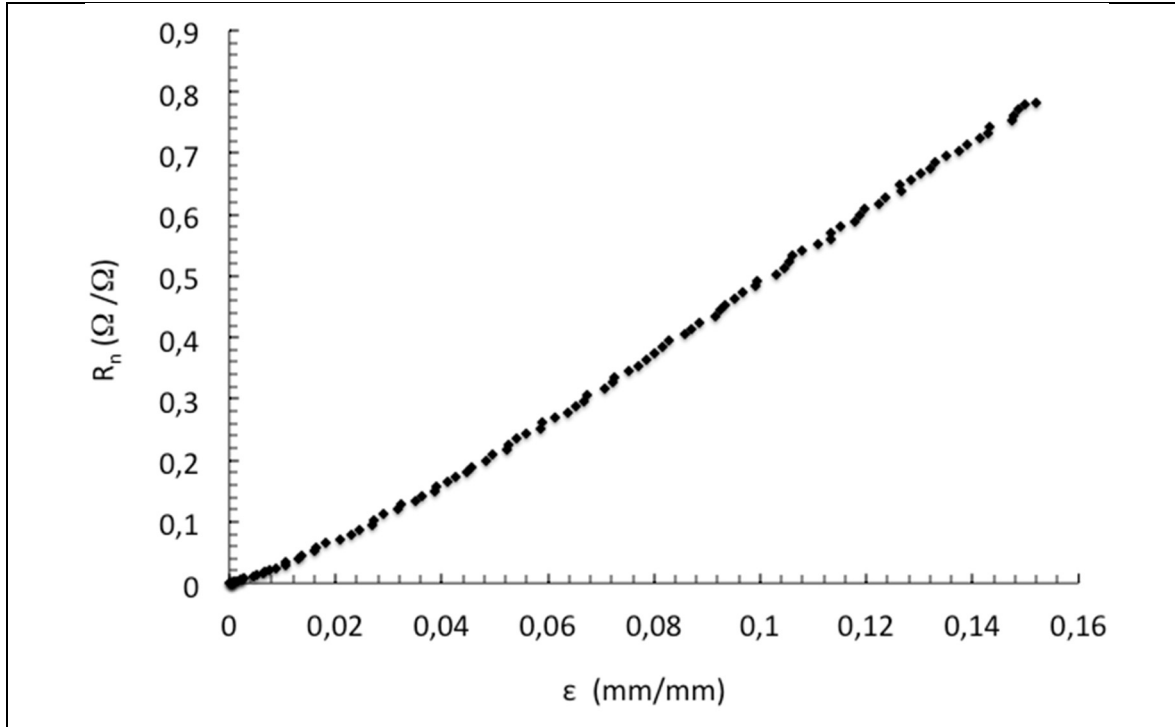


Figure 4-1: Réponse électrique du capteur en fonction de l'allongement du textile

Bien que la variabilité de résistance soit faible, le capteur donne tout de même des résultats intéressants. Celui-ci se comporte comme une jauge de contrainte : la résistance augmente avec l'allongement du matériau. Ce phénomène est dû à la variation de contacts électriques durant l'allongement du capteur. En effet, le nombre de contacts directs ou indirects entre les particules conductrices diminue au fur et à mesure que l'allongement augmente. La résultante de ce phénomène est une augmentation de résistance électrique.

4.1.1.2 Influence de la vitesse de traction

Les vêtements lors de leur utilisation sont soumis à différentes vitesses de sollicitation mécanique, dépendantes des postures adoptées par le travailleur. Cependant dans le cadre de cette thèse, il n'a pas été possible de mesurer ces vitesses. Ainsi, il est important de déterminer si la vitesse de traction joue un rôle sur la réponse du capteur. La Figure 4-2 présente la réaction des capteurs pour cinq vitesses de traction différentes. De ce fait, une extrapolation des résultats obtenus permettra d'ajuster en conséquence les paramètres de la chaîne de mesure.

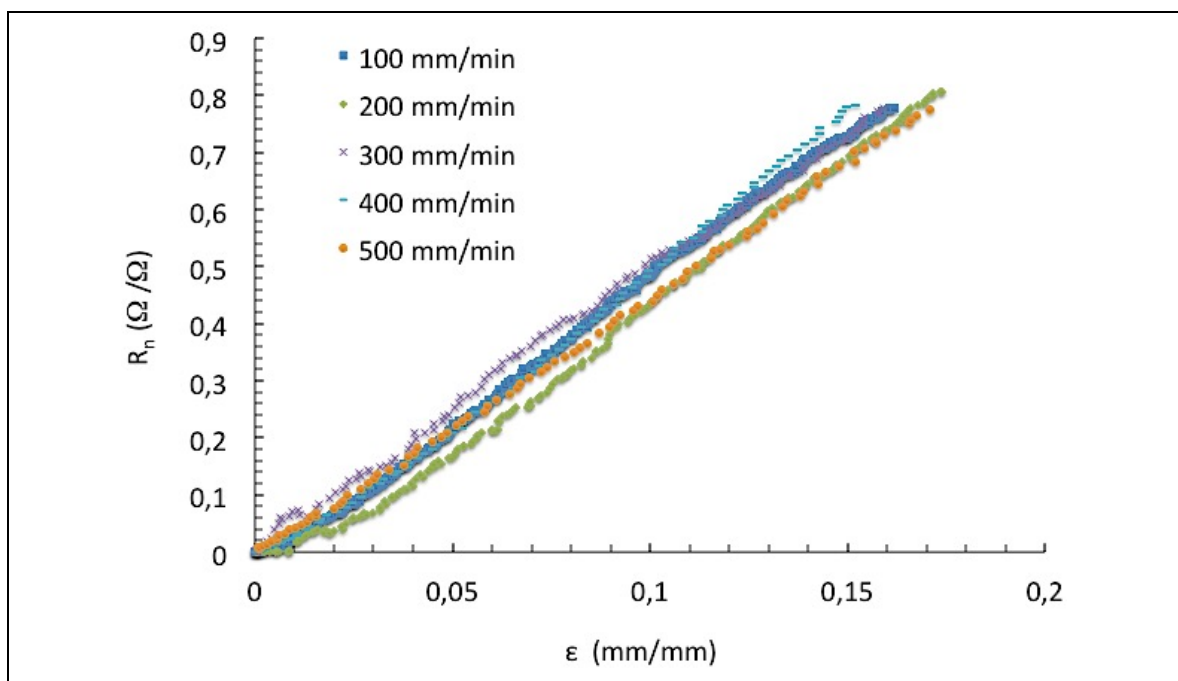


Figure 4-2: Réponse électrique du capteur en fonction de l'allongement pour cinq vitesses de traction

La vitesse n'a pas d'influence sur la réponse du capteur. En effet, la variabilité moyenne sur la mesure (ΔR_n) est relativement faible, de l'ordre de 10 %. Il n'est donc pas nécessaire de connaître la vitesse de déformation des vêtements en conditions réelles. Ainsi, les capteurs devraient être en mesure de donner des valeurs d'allongement fidèles à la réalité et ce peu importe les vitesses de déformation.

4.1.1.3 Comportement du capteur en cycle dynamique

Pour s'assurer que les capteurs puissent être adaptés à une utilisation réelle, il faut préalablement leur faire subir des tests de déformation cyclique. Ces tests dans lesquels, un taux de déformation et une fréquence de déformation sont imposés aux capteurs, permettent de définir leur comportement mécanique durant une utilisation répétée. La Figure 4-3 présente les résultats d'un test en cycle dynamique sur un capteur. Les différents graphiques permettent de visualiser en même temps la réponse électrique (en V) du capteur (gauche) testé et la déformation (en mm) appliquée (droite).

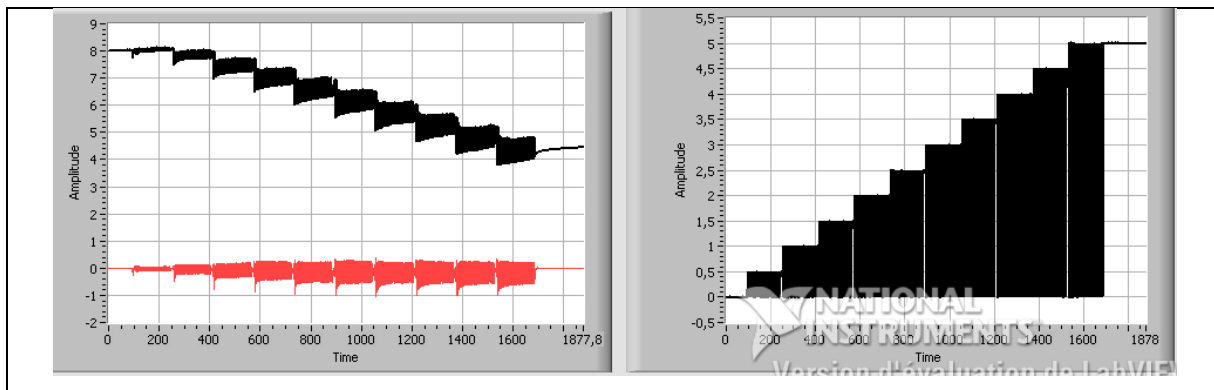


Figure 4-3 : Réponse électrique du capteur pendant un test en cycle dynamique

Le graphique de gauche montre la réponse électrique brute (noir) et linéarisée (rouge) du capteur. Cette dernière est obtenue en ajoutant un condensateur en sortie du montage potentiométrique. Celui-ci permet d'abaisser la tension de sortie tout en supprimant la partie continue du courant qui provoque une dérive du signal visible sur la réponse brute. Le graphique de droite montre les différentes plages de déformation appliquée. Celles-ci sont lues directement depuis la machine de traction, qui est elle-même reliée au système de

mesure via une sortie auxiliaire. Ces résultats démontrent l'efficacité du système mis en place, puisque la réponse électrique du capteur suit exactement la déformation qui lui est imposée. La variation de résistance se fait proportionnellement à la déformation du capteur, plus cette dernière est élevée et plus la résistance change.

4.1.1.4 Conversion de la résistance électrique en allongement

Afin d'évaluer les allongements subis par les VPC, il faut tout d'abord trouver une relation mathématique permettant de convertir la variation de résistance, renvoyée par le capteur, en allongement. Pour ce faire, plusieurs essais de traction uniaxiale, à vitesse constante (500 mm/min), et de traction cyclique sont réalisés. À la suite de ces tests, une régression simple est appliquée pour déterminer la relation existante entre résistance électrique et allongement. La Figure 4-4 présente la réponse moyenne obtenue sur l'ensemble des tests et la courbe de régression obtenue.

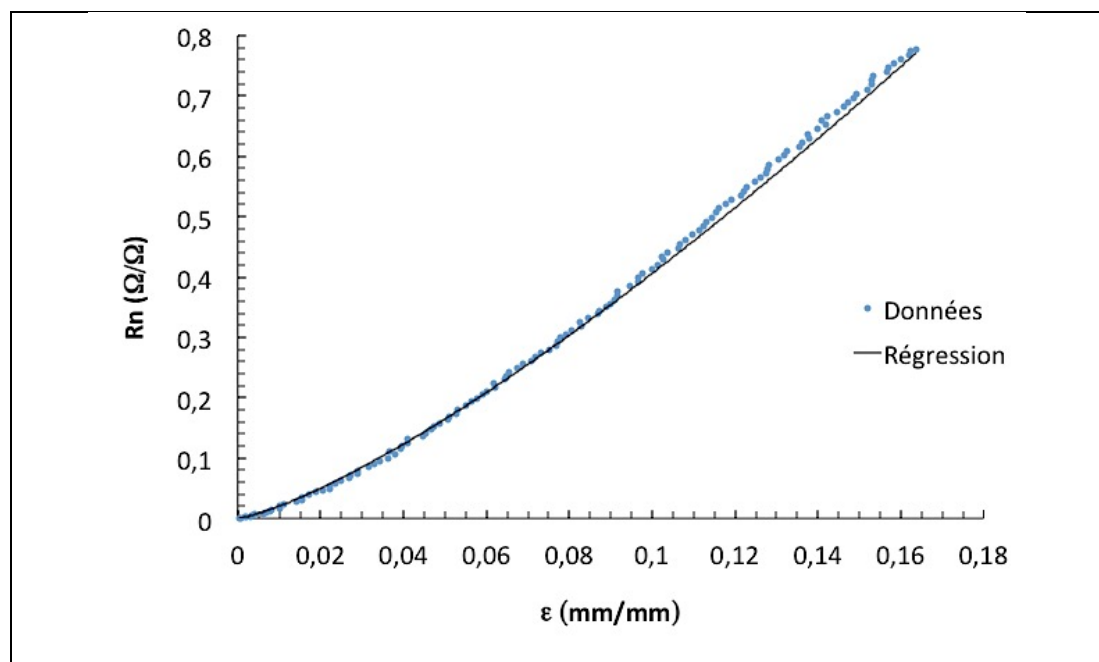


Figure 4-4 : Réponse électrique moyenne du capteur et la régression associée

Ainsi, les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence un comportement non linéaire des capteurs. En effet, la partie de la courbe comprise entre 0 et 0,06 mm/mm n'est pas linéaire. Cela provient du fait que la densité de charge est relativement importante dans les premiers millimètres d'allongement du capteur. Par conséquent, la réponse électrique mesurée varie assez lentement, et ce, jusqu'au moment où la densité de charge devient suffisamment faible pour que la réponse électrique soit plus rapide. La régression appliquée, de type puissance, est la plus adaptée pour expliquer les résultats obtenus et est en accord avec différentes études réalisées sur le sujet (Boland et al., 2014; Cochrane, Lewandowski et Koncar, 2010; Martinez et al., 2010). La relation permettant de relier la variation de résistance du capteur et l'allongement du textile est la suivante :

$$R_n = r \cdot \varepsilon^p \quad (4.4)$$

où r et p sont deux constantes. Dans notre cas, $r = 9,03$ et $p = 1,18$, le coefficient de régression associé est égale à 0,995.

De ce fait, l'allongement ε des matériaux est défini par :

$$\varepsilon = \left(\frac{R_n}{9,03} \right)^{\frac{1}{1,18}} \quad (4.5)$$

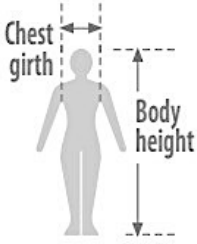
Ces différents tests de caractérisation et d'étalonnage ont permis de démontrer que les capteurs développés dans le cadre de cette thèse fonctionnent comme des capteurs à jauges de contrainte conventionnels. Ils pourraient donc être utilisés pour mesurer l'allongement des matériaux de VPC lors de leur utilisation en condition de travail. Toutefois, la limitation de cette solution réside dans la difficulté d'avoir des capteurs identiques. Étant donné que le polymère se trouve sous la forme d'une pâte, il est difficile de la déposer uniformément sur le matériau. Ainsi, bien qu'un masque soit employé, les capteurs créés n'ont pas tous la même épaisseur, faisant varier leur résistance. De ce fait, la résistance du pont doit être ajustée pour chaque capteur. De plus, le fait de devoir faire réticuler le polymère à chaud demande la mise en place d'un protocole bien spécifique lors du dépôt sur les vêtements. En effet, les VPC

sont tous constitués de matière plastique dont la température de fusion avoisine la température de réticulation du polymère.

4.2 Mesure de la déformation des VPC en condition de travail

Pour mesurer la déformation en conditions « réelles », il a été demandé à trois sujets de porter des combinaisons équipées de 9 capteurs; les positions des capteurs sont rapportées dans la méthodologie. Le VPC choisi pour la tenue de ces tests fut le A. Le choix de ce matériau est fondé sur la résistance mécanique des textiles, le nontissé A ayant la rupture la plus faible, il est donc susceptible de se déchirer plus facilement que les autres matériaux pour une faible déformation. De ce fait, les tests ont été réalisés en considérant le pire scénario.

Il a été choisi de prendre des sujets avec une corpulence relativement différente et qui correspondent aux tailles petite (SM), large (LG) et très très large (2X) selon le guide de taille présenté par la Figure 4-5.



Size	Body height (cm)	Chest girth (cm)	Body height (in)	Chest girth (in)
SM	162–170	84–92	64–67	33–36
MD	168–176	92–100	66–69	36–39
LG	174–182	100–108	68–72	39–43
XL	180–188	108–116	71–74	43–46
2X	186–194	116–124	73–76	46–49
3X	192–200	124–132	75–79	49–52
4X	200–208	132–140	79–82	52–55
5X	208–216	140–148	82–85	55–58
6X	208–216	148–156	82–85	58–61
7X	208–216	156–162	82–85	61–64

Figure 4-5: Guide de taille des couvres tout, en cm et en pouces
Tirée de (Dupont, 2013)

Ce choix de tailles a été fait dans le but d'observer si des niveaux différents de déformations se matérialisaient pour des corpulences différentes, malgré le choix de la taille de vêtement recommandé par le manufacturier. Pour des raisons de confidentialité, aucune donnée morphologique n'a été demandée ni même mesurée sur les sujets.

Suite au choix de la bonne taille de combinaison, il a ensuite été demandé aux sujets d'effectuer plusieurs séries de mouvements et d'adopter différentes postures afin de simuler une utilisation réelle des vêtements. La procédure a été préalablement décrite au chapitre 3. La Figure 4-6 présente un résultat typique de la déformation mesurée par un capteur (capteur 4; partie latérale du genou - taille L) lors du port du VPC. Chaque pic correspond au moment exact où le sujet effectue un mouvement.

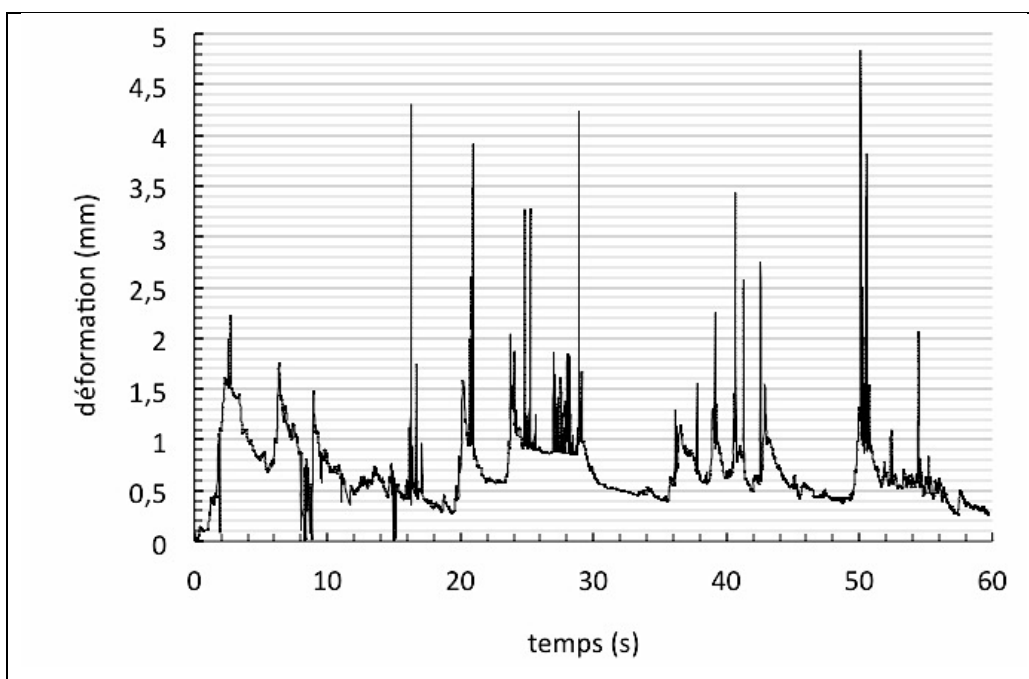


Figure 4-6 : Mesure de la déformation d'un VPC au niveau du genou

Ce graphique montre le fait que le capteur ne revient jamais en position initiale, cela s'explique par le fait que le textile sur lequel est apposé le capteur n'est pas élastique et que par conséquent lors qu'il est déformé, celui-ci ne revient pas à sa position d'origine. Certains pics sont plus larges que d'autres, cela s'explique par la vitesse de réponse du capteur. En effet, les gestes étant effectués trop lentement par le sujet ne déforment pas le capteur de manière assez franche, ce qui donne des pics larges. À l'inverse, les mouvements rapides créent un différentiel de tension important sur un laps de temps court provoquant ainsi des pics beaucoup plus marqués. Enfin, des plateaux apparaissent à différents endroits sur le

graphique. Ils sont générés par une multitude de sollicitations dans un intervalle de temps court qui empêche le matériau de revenir à sa position d'origine.

Les résultats de la déformation moyenne des VPC ont été obtenus en traitant les données, recueillies par les capteurs, via un programme, réalisé sous Matlab, permettant la détection de pic dans un signal (Billauer. E, 2012). Cet outil, dont le code est présenté en annexe III, permet d'extraire chaque pic du signal pour en avoir l'intensité exacte. Chaque pic est extrait en prenant son minimum et son maximum dépendant de la ligne de base propre au pic choisi. La moyenne des résultats obtenus pour chaque position de capteur et pour chaque sujet est présentée à la Figure 4-7. Chaque test est répété trois fois. Les données numériques sont fournies dans l'annexe II.

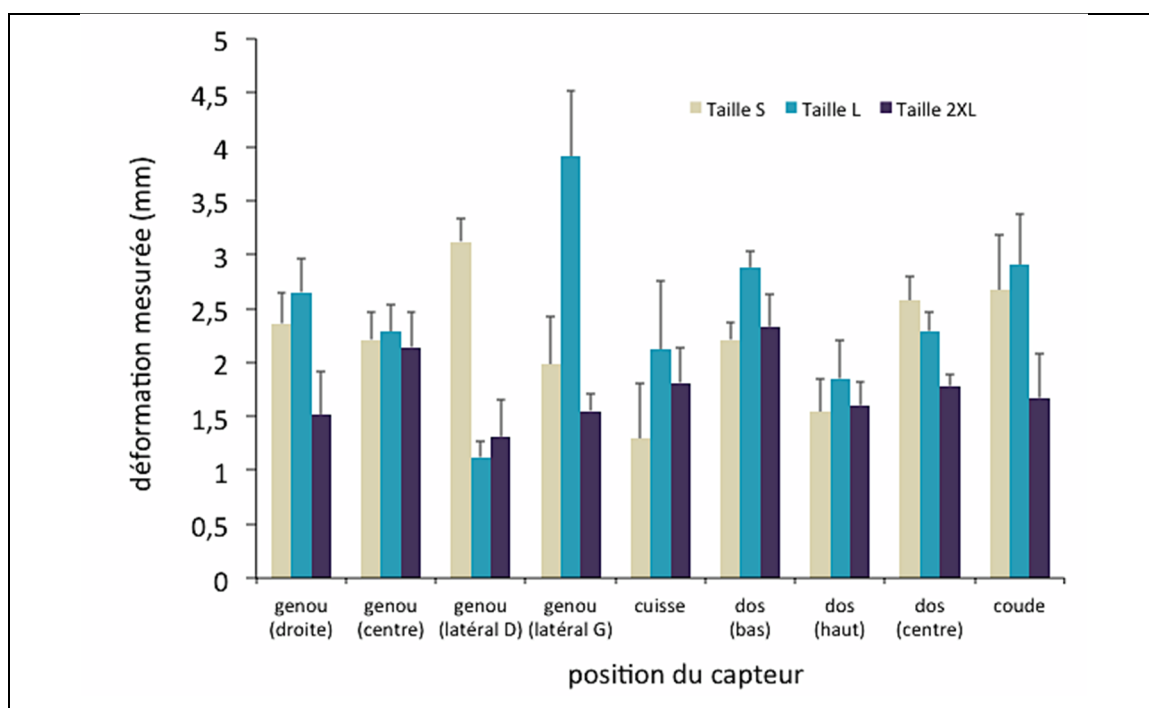


Figure 4-7 : Déformation mesurée pour chaque position du capteur et pour chaque sujet

Les résultats montrent que le vêtement subit des sollicitations relativement importantes. Les déformations du vêtement, lors des exercices, varient de 1,5mm (4%) à un maximum de 4mm (10%). De même, les endroits les plus sollicités sont : la partie latérale du genou, le bas et le haut du dos et le coude. Toutefois, la majorité des sollicitations présentent une

déformation moyenne comprise entre 2 et 2,5 mm. De plus, il est à noter que toutes les tailles ne montrent pas le même niveau déformation. En effet, bien que les tailles S et L présentent des déformations comparables dans l'ensemble, le 2XL semble moins contraint. Toutefois, l'échantillonnage de sujets étant restreint, il est difficile de tirer des conclusions quant à l'impact de la taille sur la déformation. Elle pourrait provenir d'une mauvaise exécution des consignes par le sujet ou bien de la taille non adaptée. Toutefois, lors des tests réalisés par le sujet portant le VPC de taille 2XL, le vêtement s'est déchiré au niveau de l'aisselle. Ce problème n'est survenu qu'avec ce sujet. Ces mesures permettent de définir la déformation à appliquer aux matériaux lors des tests de pénétration. Ainsi, afin de reproduire une utilisation « réelle », les matériaux doivent être déformés au maximum de 4 mm.

Pour la suite des travaux, il a été décidé de soumettre les matériaux à trois niveaux de déformation : 2 mm, 5 mm et 10 mm. La déformation 10 mm ne reflète pas les déformations mesurées. Cependant, cette valeur a été choisie comme un cas extrême. L'objectif était de vérifier si pour une déformation importante, il y avait une variation significative de la pénétration.

CHAPITRE 5

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX TEXTILES

5.1 Caractérisation de surface

Pour mieux appréhender les différences structurelles des matériaux, des observations au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées. La Figure 5-1 présente les faces externe et interne, et des vues en coupe pour chaque matériau. Ces images permettent de visualiser la structure de chaque matériau, de comprendre leur conception et l'importance de celle-ci sur leur capacité de protection relativement aux particules aéroportées. La colonne de gauche présente les vues de face avant (exposée au milieu extérieur) de chaque matériau. À l'exception du matériau B, la colonne au centre présente la même face, mais a un grossissement plus élevé. La face arrière du matériau B est présentée au centre, car celle-ci diffère de la face avant. Enfin, la colonne de droite présente une vue en coupe des matériaux nontissés (matériaux A, B, C et D) et un agrandissement de la face avant du tissu pour le matériau E.

Ces images permettent de visualiser la structure de chaque matériau, de comprendre leur conception et l'importance de celle-ci sur leur capacité de protection face aux particules aéroportées. Le matériau A est constitué d'un mat de fibres très fines, consolidé entre elles par fusion. Ce mat de fibres présente des pores en surface qui permettraient au matériau de respirer. Cependant la vue en coupe montre une structure très compacte formée de plusieurs couches de fibres fondues. Le matériau B est le seul à présenter deux faces différentes. En effet, il est composé d'un côté d'un film microporeux (image B) sensé assurer la filtration et de l'autre, une couche de fibre spunbond (image B1) apportant une certaine résistance mécanique à l'ensemble. La vue en coupe (image B2) montre bien la structure laminée du textile avec d'une part, le film situé à gauche et d'autre part, les fibres du côté droit de l'image. Les matériaux C et D présentent des structures quasi identiques, soient trois couches pour le premier et cinq pour le second. Cette similarité se retrouve dans les images qui leur sont associées.

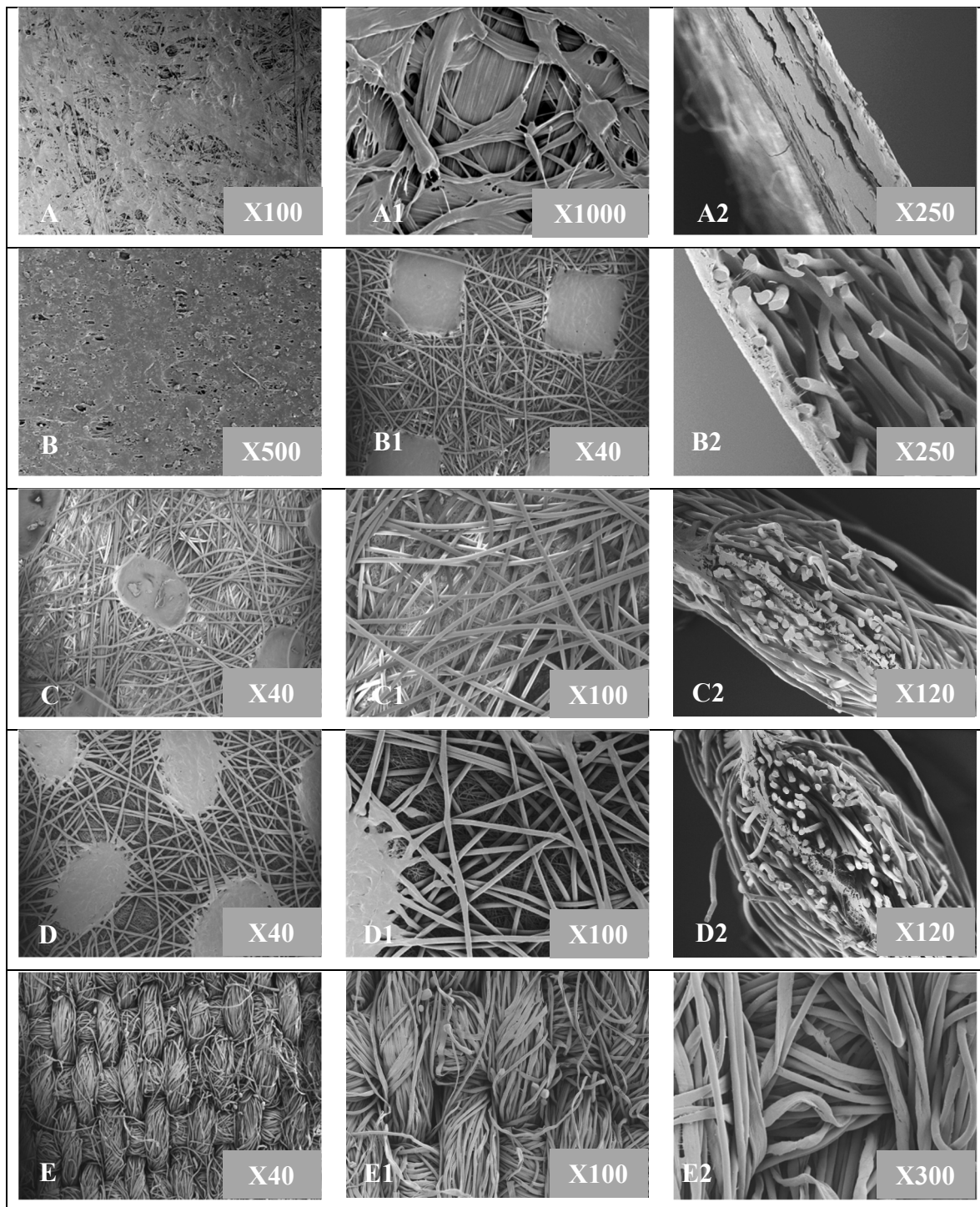


Figure 5-1: Images MEB des surfaces des matériaux A, B, C, D et E.

D'après les images MEB précédentes, il est extrêmement difficile de les différencier. La vue en coupe ne permet pas de distinguer les trois couches de meltblown du matériau D. Ainsi,

les matériaux C et D semblent être les mêmes et enfin, le matériau E. Les images MEB montrent clairement une armure en toile. Le tissu, à l'instar du matériau A, présente une structure en une seule couche. Ici, les fils constituant sa structure font office de barrière filtrante. Ce matériau présente également une structure très poreuse par rapport aux autres textiles. Il semble également que ses fibres aient aussi un diamètre beaucoup plus important.

5.2 Caractéristiques des matériaux

5.2.1 Propriétés physiques

Pour mieux comprendre les interactions qui peuvent survenir lors de la pénétration de particules à travers les matériaux, il est important de connaître les principales propriétés de ces derniers. En effet, le facteur de protection offert par chaque matériau est directement lié à certaines propriétés intrinsèques. Pour ce faire, plusieurs propriétés physiques ont été mesurées pour chaque textile et sont présentées dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1 : Spécifications des matériaux

Matériaux		A	B	C	D	E
Épaisseur (μm)	Moy	135	162	343	335	358
	CV%	15	7	2	3	2
Masse surfacique (g.m^{-2})	Moy	42	62	60	56	173
	CV%	2	3	2	4	1
Diamètre de fibre (μm) Type S /Type M	Moy	8,1	20,1	18,4/1,2	24,8/1,1	10,3
	CV%	26	18	21/20	16/31	20
Porosité	Moy	0,75	0,70	0,84	0,81	0,66
	CV%	2	3	2	1	2
Perméabilité à l'air ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$)	Moy	<0,3	<0,3	7,5	22,1	22,5
	CV%	-	-	4	11	11
Diamètre des pores (μm)	Moy	7,36	45,7	40,8	44,3	50,6
	CV%	2	8	9	3	6
Volume des pores (m^3) $\times 10^{-3}$	Moy	1,61	8,48	9,63	5,79	4,67
	CV%	3	5	2	6	5

Note : Moy = moyenne; CV% = coefficient de variation (rapport écart-type sur la moyenne)

Pour des raisons de disponibilité d'équipement, la porosité du matériau E n'a pas été mesurée, mais calculée. De même que le diamètre des pores pour ce même matériau a été extrait par analyse optique couplée à un traitement d'image.

Les propriétés physiques présentent de grandes différences entre les tissus. Trois groupes ont pu être identifiés : le premier groupe, composé des matériaux A et B, présente la plus faible épaisseur, une faible porosité et une perméabilité à l'air minimale. Le second groupe composé des textiles C et D présente un fort diamètre des fibres externes (type S), mais le plus faible diamètre pour les fibres internes (type M), une épaisseur importante, une forte perméabilité à l'air et la porosité la plus élevée. Enfin, le troisième groupe, comprenant le matériau E, présente l'épaisseur la plus importante et une perméabilité élevée.

Concernant les volumes et diamètres de pores, seul le nontissé A présente des caractéristiques différentes des autres matériaux. En effet, alors que les autres textiles ont un diamètre de pore moyen compris entre 40 et 50 μm et un volume de pores moyen compris entre $4 \cdot 10^{-3}$ et $10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, le matériau A a un diamètre inférieur à 10 μm et un volume de pores en dessous de $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Par conséquent, avec les caractéristiques de pores les plus faibles, le matériau A devrait fournir la pénétration la plus faible.

Toutefois, ces données ne présentent que les propriétés globales des matériaux. Ainsi, hormis les matériaux A et E qui sont composés d'une couche unique, les trois autres textiles sont conçus en multicouches. De ce fait, les diamètres et volumes de pores ne reflètent pas la morphologie exacte des parties filtrantes de ces matériaux, il est donc important de prendre en considération la conception de chaque matériau. En outre, le matériau B est composé d'un film plastique sur lequel des fibres sont déposées, par conséquent, les propriétés mesurées et présentées dans le Tableau 5-1 sont plus représentatives de ces fibres que du film.

5.2.2 Caractérisation aéraulique des matériaux

Cette thèse porte sur l'efficacité de protection des VPC contre les particules aéroportées. Il est donc primordial de connaître les caractéristiques de filtration des matériaux. Dans un premier temps, le régime d'écoulement à travers les différents textiles est déterminé en fonction de la gamme de vitesse étudiée. Les appareils de mesure utilisés dans le cadre de cette étude ont des débits d'échantillonnage de 0,6 l/min pour le SMPS et le P-Trak et de 10 l/min pour l'EEPS. Ces débits engendrent des vitesses d'infiltration (U_f) à travers les matériaux de l'ordre de $0,0043 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ et $0,073 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Pour caractériser l'écoulement d'un fluide à travers un matériau filtrant en fonction de sa vitesse d'écoulement, le nombre de Reynolds de pore Re_{po} peut être calculé selon la relation suivante :

$$Re_{po} = \frac{\rho \cdot U}{\mu \cdot A_f \cdot \alpha} \quad (5.1)$$

Il caractérise l'écoulement global à travers le médium, avec ρ la masse spécifique du fluide, U la vitesse du fluide, μ la viscosité dynamique du fluide, α la compacité du médium et A_f la surface spécifique des fibres :

$$A_f = \frac{4}{d_f} \quad (5.2)$$

Le nombre de Reynolds de pore pour chaque matériau est présenté dans le Tableau 5-2.

Tableau 5-2 : Détermination du régime d'écoulement à travers les matériaux en fonction de la vitesse de filtration

Matériaux	U_f (m·s ⁻¹)	Re _{po} (S)	Re _{po} (M)
A	0,0043	0,0023	-
	0,0730	0,0388	-
B	0,0043	0,0048	-
	0,0730	0,0800	-
C	0,0043	0,0082	0,0005
	0,0730	0,1374	0,0088
D	0,0043	0,0093	0,0004
	0,0730	0,1556	0,0071
E	0,0043	0,0022	-
	0,0730	0,0361	-
<i>Note : S : spunbonded et M : meltblown</i>			

Les résultats obtenus indiquent que le régime d'écoulement est laminaire pour tous les matériaux aux deux vitesses étudiées. Dans ces conditions, la loi de Darcy peut être utilisée pour déterminer les caractéristiques aérauliques de chaque matériau :

- La résistance du matériau à l'écoulement K (m⁻¹): caractérise la résistance du matériau au passage d'un fluide.
- La perte de charge ΔP (Pa) : chute de pression totale lorsque le fluide traverse le matériau.

Le Tableau 5-3 regroupe les valeurs obtenues. K est calculé alors que la perte de charge (ΔP) est mesurée à l'aide d'un capteur de pression placé entre les deux chambres composant la cellule de pénétration.

Tableau 5-3 : Caractéristique aéraulique des matériaux

Matériaux	U_f (m·s ⁻¹)	K (m ⁻¹)	ΔP (Pa)
A	0,0043	$2,59 \times 10^9$	$206 \pm 1\%$
	0,073	$5,03 \times 10^9$	$6684 \pm 2\%$
B	0,0043	$4,41 \times 10^9$	$351 \pm 1\%$
	0,073	$6,36 \times 10^9$	$8452 \pm 2\%$
C	0,0043	$1,79 \times 10^8$	$14 \pm 0,1\%$
	0,073	$4,06 \times 10^8$	$540 \pm 1\%$
D	0,0043	$1,52 \times 10^8$	$12 \pm 0,1\%$
	0,073	$3,22 \times 10^8$	$429 \pm 0,5\%$
E	0,0043	$1,53 \times 10^8$	$12 \pm 0,1\%$
	0,073	$3,16 \times 10^8$	$421 \pm 1\%$

Les résultats présentent de grandes différences entre les matériaux. Les textiles A et B ont une résistance et une perte de charge plus importante que les trois autres, et ce, peu importe la vitesse d'écoulement. Ainsi, d'après ces données, les matériaux A et B se laissent plus difficilement traverser par le fluide, ceci induit une plus forte probabilité de rétention/piégeage des particules. Par conséquent, les matériaux A et B devraient offrir une meilleure efficacité de filtration que les matériaux C, D et E.

5.2.3 Mesure de la perte de charge à l'intérieur des VPC en mouvement

À l'instar des tests de déformation réalisés sur sujets humains, il a été demandé aux trois mêmes sujets de porter une combinaison, correspondant à leur taille, équipée de capteurs de pression placés à différents emplacements. Ces capteurs, comme mentionnés dans la partie méthodologie, mesurent le différentiel de pression entre l'intérieur et l'extérieur du VPC.

Afin de mesurer le ΔP dans des conditions d'utilisations réelles, il a été demandé aux trois sujets de reproduire les mêmes exercices effectués lors de la mesure de la déformation des

VPC. La Figure 5-2 présente la pression mesurée à l'intérieur d'un VPC lors de son utilisation. Le matériau A a été utilisé pour la prise de mesure.

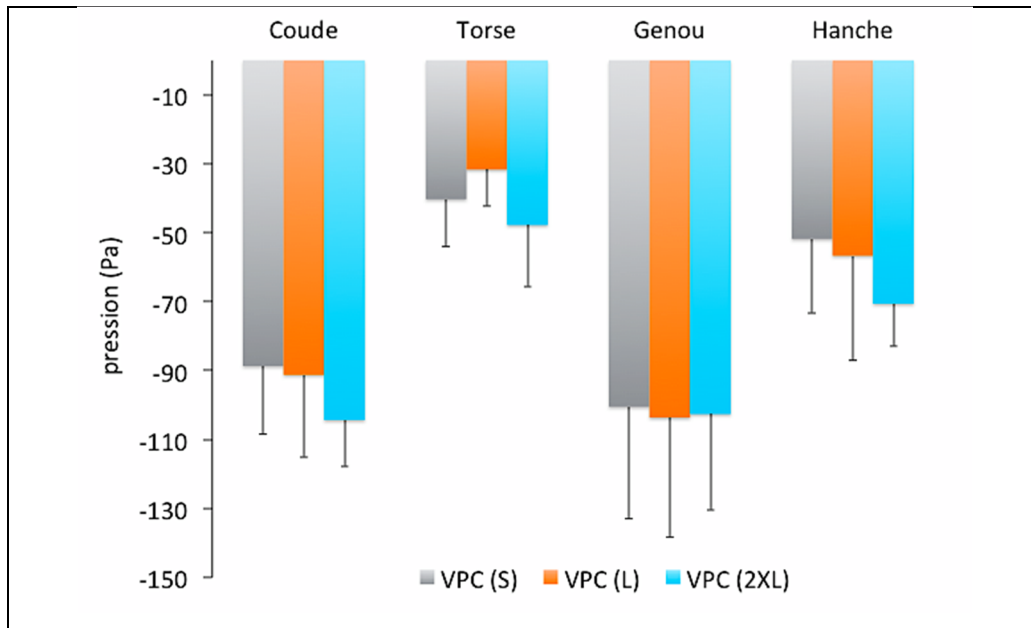


Figure 5-2 : Perte de charge moyenne mesurée à l'intérieur d'un VPC – matériaux A

D'après les résultats obtenus, plusieurs observations peuvent être faites. La première est que la pression régnant à l'intérieur du VPC est négative, cela signifie, compte tenu du branchement du capteur, qu'il se crée, majoritairement, une surpression à l'intérieur du vêtement. La seconde observation faite est que la taille n'influe pas sur la pression générée et enfin, la troisième est que les parties du corps où la pression est la plus importante sont les coudes et les genoux.

5.3 Comportement mécanique des matériaux textiles

Étant donné que les vêtements se trouvent déformés durant leur utilisation, il est important de déterminer si cette déformation mécanique altère leur capacité de protection. Les déformations appliquées, dans le protocole de cette étude, sont des déformations multiaxiales qui permettent de reproduire les tensions générées au niveau des articulations (emplacement où la contrainte est maximale).

5.3.1 Déformation multiaxiale

Les résultats des déformations multiaxiales sont présentés à la Figure 5-3. Ces mesures révèlent deux comportements à la rupture distincts. Le premier, concerne les matériaux B et E qui présentent tous deux une rupture nette du matériau. À l'inverse, les trois autres textiles présentent une rupture progressive de la structure. Toutefois, l'importance de cette étude réside du côté de l'allongement maximal que peuvent subir les matériaux avant la rupture. En effet, pour s'assurer que les déformations n'altèrent pas la structure des textiles, il est important de travailler dans le domaine élastique des matériaux. Pour cette raison, des curseurs (lignes verticales) à 2, 5 et 10 mm ont été placés sur le graphique. Ils représentent les trois déformations qui ont été choisies à la suite des tests réalisés avec les capteurs. Ainsi, les trois déformations qui seront appliquées par la suite se situent bien dans le domaine élastique des matériaux. Néanmoins, ces trois déformations n'ont pas le même impact sur les matériaux. En effet, bien que les déformations de 2 et 5 mm soient relativement éloignées du point de rupture pour chaque textile, la déformation 10 mm présente un allongement important pour le matériau A.

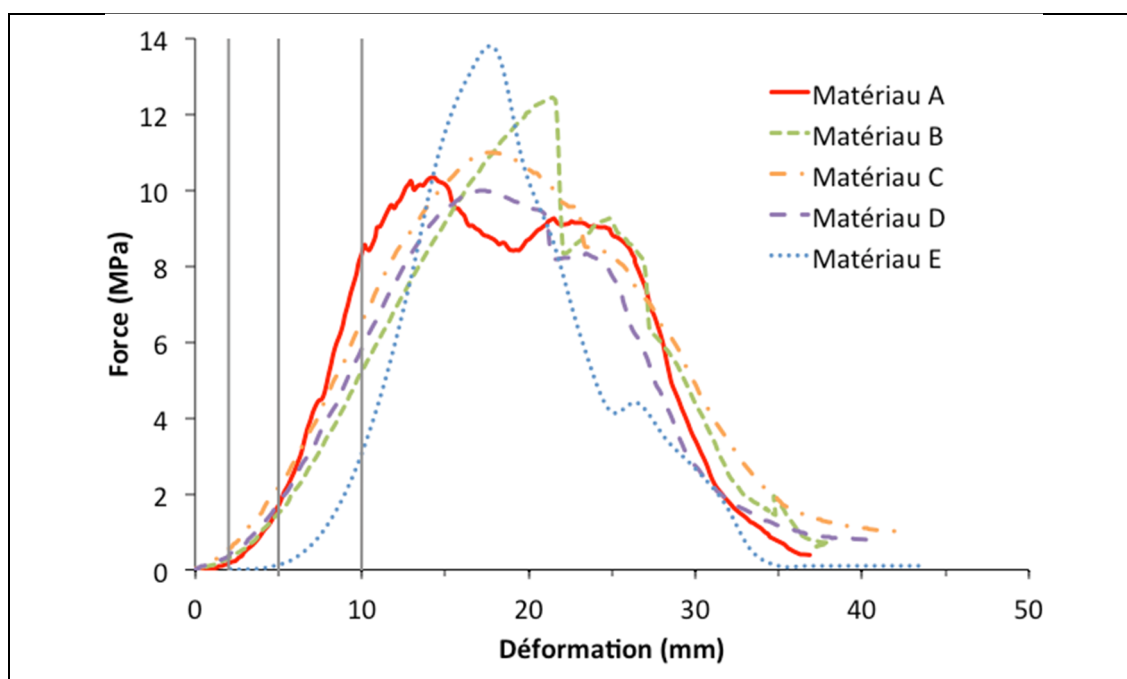


Figure 5-3 : Courbes de déformation multiaxiale jusqu'à la rupture des matériaux

De ce fait, l'application de ces trois déformations permettra de mettre en évidence si un allongement plus ou moins important entraîne une modification de l'efficacité des matériaux.

5.3.2 Analyse de surface après déformation

Des images MEB ont été réalisées avant et après les tests de déformations multiaxiales. Elles sont associées dans la Figure 5-4 à des fins de comparaison. Les images après déformation ont été prises sur les matériaux ayant subi une déformation de 10 mm. La zone observée correspond à la partie la plus étirée. Les matériaux étudiés ne sont pas extensibles. Cependant, les images avant et après déformation ne permettent pas de mettre en évidence une quelconque altération du matériau. En effet, une observation visuelle des échantillons, effectuée après les tests mécaniques, montre qu'ils ne reprennent pas leur forme initiale et qu'au lieu d'être plat, ils se retrouvent tous avec une déformation persistante correspondant à l'empreinte de la sonde. Bien que les images aient été faites sur cette zone précisément, l'observation MEB ne permet pas de visualiser des différences entre les clichés. D'autres techniques devraient être envisagées pour pouvoir évaluer l'altération des matériaux, par exemple la microscopie confocale ou la mesure de porosité par intrusion de mercure.

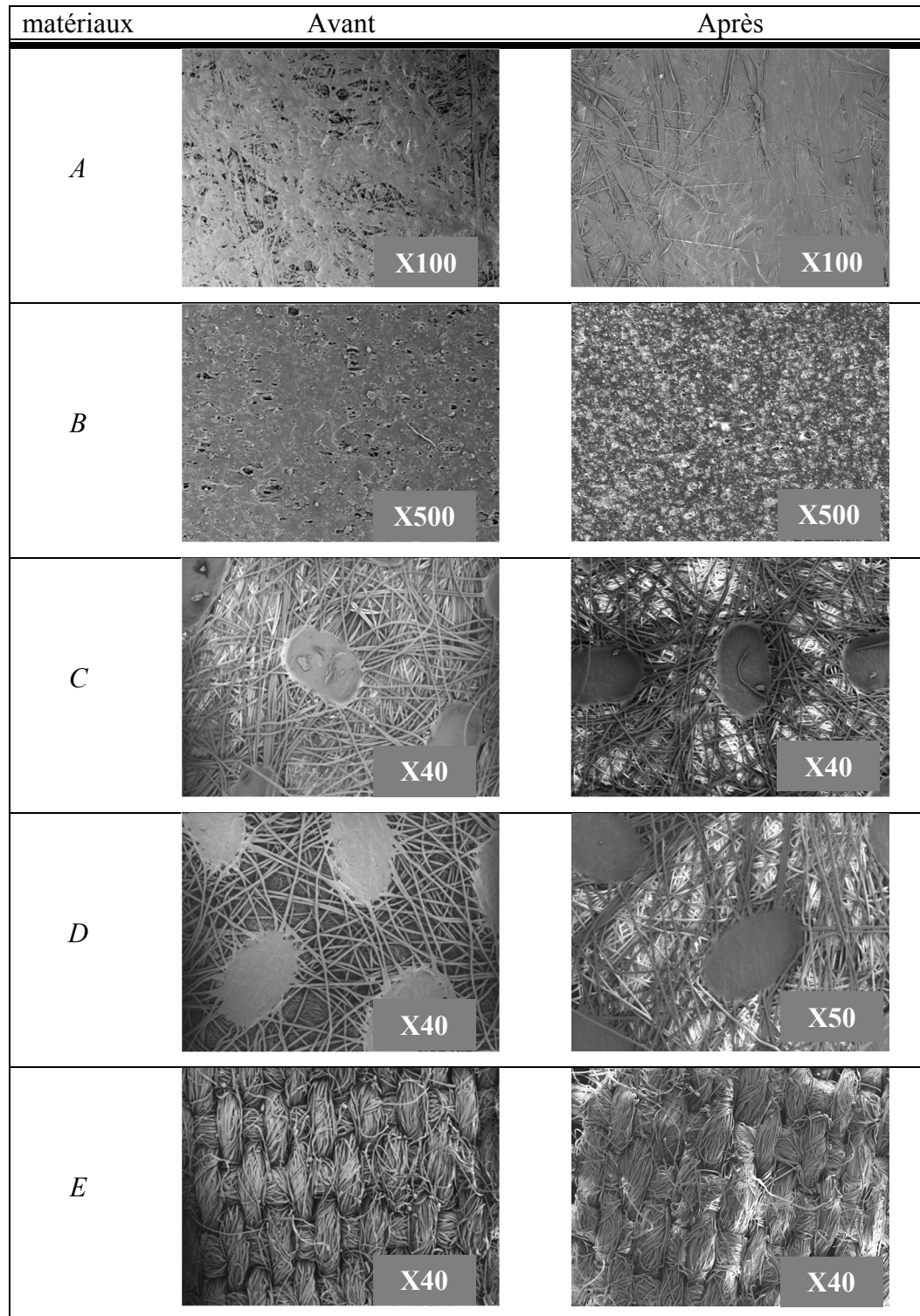


Figure 5-4 : Images MEB des surfaces des matériaux avant et après déformation.

CHAPITRE 6

MESURE DE LA PERMÉANCE DE PARTICULES AÉROPORTÉES À TRAVERS LES MATÉRIAUX DE VPC

Ce chapitre regroupe les tests de perméance réalisés avec trois appareils de mesure différents, un SMPS, un EEPS et un P-Trak, le but étant : *i)* de caractériser la perméance des particules à travers les matériaux, *ii)* de déterminer l'influence du système de mesure sur les résultats de perméance et *iii)* d'estimer l'influence de la vitesse de filtration sur la perméance.

6.1 Caractérisation de la perméance à travers les matériaux

Les mesures de perméance pour chaque matériau sont présentées par la suite selon les différents appareils de mesure.

6.1.1 Résultats obtenus par SMPS

La distribution en taille (diamètre équivalent de mobilité électrique) de l'aérosol généré est présentée par la Figure 6-1. Cette distribution de la taille représente la valeur moyenne et l'écart-type de cinq générations dans le compartiment amont de la cellule de perméance (voir Figure 3-4). La granulométrie de l'aérosol mesuré se situe entre 14 et 495 nm avec un diamètre moyen des particules avoisinant 50 nm.

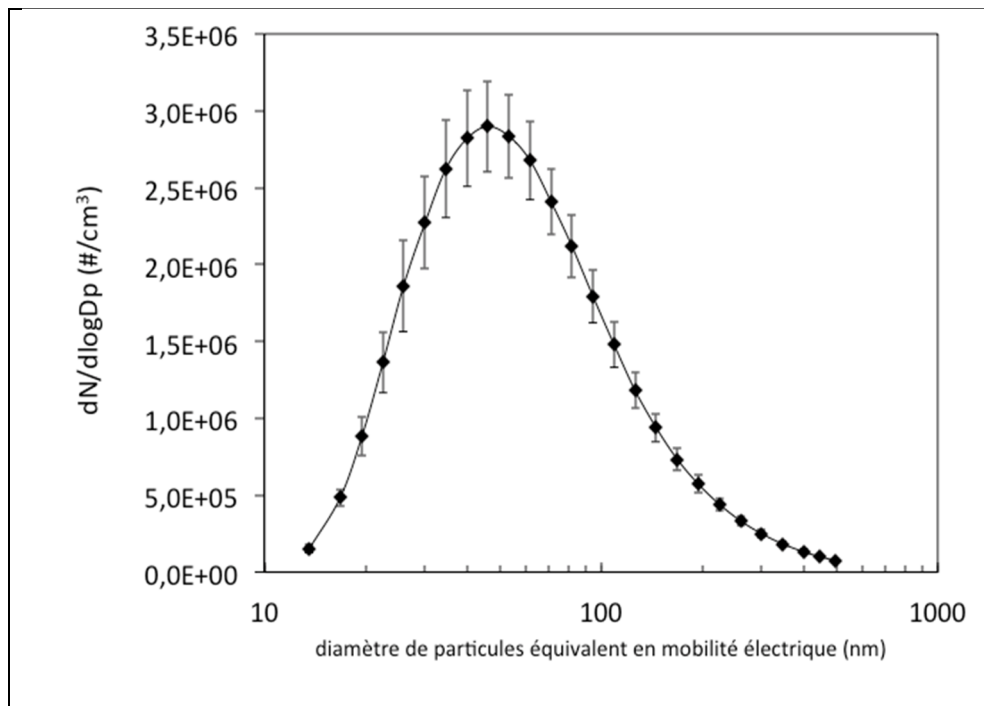


Figure 6-1 : Granulométrie de l'aérosol en amont, mesuré par SMPS

6.1.1.1 Mesure de la perméance totale

La Figure 6-2 présente les résultats expérimentaux de la perméance totale de l'aérosol à travers les cinq matériaux. Ces résultats sont exprimés selon l'état de déformation des matériaux : non déformé et déformé. Les déformations appliquées sont, comme mentionnées au chapitre 4, de 2 mm, 5 et 10 mm, représentant des allongements de 5%, 12,5% et 25% respectivement.

Ces mesures permettent de constater une grande disparité de comportement entre les matériaux. Comme indiqué par d'autres études réalisées sur le sujet (Golanski et al., 2009; Golanski, Guiot et Tardif, 2009), la perméance de l'aérosol est significativement plus faible pour les nontissés (<10%) que pour le tissu (environ 50%). Néanmoins, parmi les quatre matériaux nontissés, trois (A, B et C) offrent une perméance totale inférieure à 1%, tandis que le matériau D présente un taux de perméance autour de 8,5% quelles que soient les déformations. Cette différence de comportement peut être expliquée par la différence de perméabilité à l'air des matériaux (Gao et al., 2011). En effet, le fait d'avoir des matériaux

dont la perméabilité est élevée (D et E) diminue leur capacité de filtration. Cependant, bien que les textiles D et E aient une perméabilité assez semblable respectivement 22,1 et 22,5 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$, la conception et la taille des fibres jouent également un rôle important sur la perméance.

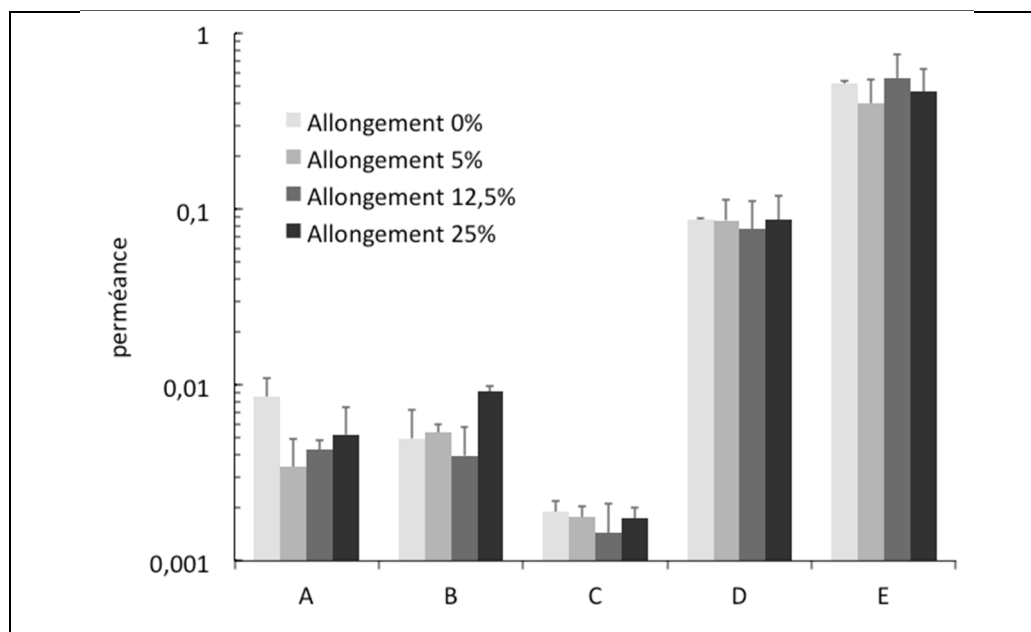


Figure 6-2 : Perméance totale à travers les VPC en fonction de la déformation appliquée

D'après les résultats des matériaux C, D et E, il apparaît que la déformation n'influence pas la perméance totale. Bien que les matériaux A et B présentent une variation plus importante de la perméance en fonction de la déformation appliquée, les écarts-types sur les mesures ne permettent pas de dégager de tendance claire. Ces variations peuvent être expliquées par l'anisotropie des échantillons et à leur inhomogénéité en termes de structure, de perméabilité ou encore d'épaisseur. En effet, les matériaux textiles du fait de leur procédé de fabrication, ne peuvent pas être rigoureusement identiques, ainsi, il n'est pas rare de constater des variations de densité de fibre, d'épaisseur et de masse d'un échantillon à un autre. Celles-ci jouent un rôle direct sur les propriétés des matériaux comme la perméabilité et la porosité.

6.1.1.2 Comparaison granulométrique

La Figure 6-3 présente les résultats de perméance de chaque matériau en fonction de la déformation subie et de la taille des particules. Le profil des courbes montre, en général, que la perméance augmente avec l'accroissement de la taille des particules, jusqu'à un diamètre de mobilité électrique de l'ordre de 495 nm. Cette tendance est cohérente avec la théorie de filtration (Hinds, 1999) et dans une moindre mesure, avec les résultats d'autres études réalisées sur l'efficacité des vêtements de protection (Gao et al., 2011; Golanski et al., 2009; Park et al., 2011).

Les performances de filtration relatives aux cinq matériaux sont cependant différentes. Le taux de perméance maximal pour les nontissés varie de 0,3 % (C) à 40 % (D) et avoisine les 90 % pour le tissu (E). Les courbes granulométriques sont également bien différentes entre les nontissés et le tissu, mais également pour les nontissés entre eux. En effet, l'ensemble des nontissés présente un puits de perméance pour des tailles de particules comprises entre 10 et 20 nm, alors que le phénomène n'est pas présent pour le tissu. D'autre part, les matériaux A, B, D et E montrent une augmentation constante de la perméance pour des particules de plus de 20 nm jusqu'à atteindre un maximum et former un plateau entre 200 et 400 nm. Cette tendance est en accord avec les résultats obtenus lors d'études antérieures (Gao et al., 2011; Golanski et al., 2009; Park et al., 2011), à savoir une courbe de perméance croissante avec l'augmentation du diamètre des particules. Contrairement aux autres matériaux, le nontissé C présente une diminution significative de la perméance pour des particules dont la taille est supérieure à 100 nm. Ainsi les matériaux A, B, D et E ont une MPPS comprise entre 300 nm et 500 nm alors que pour C elle se situe aux alentours de 100 nm.

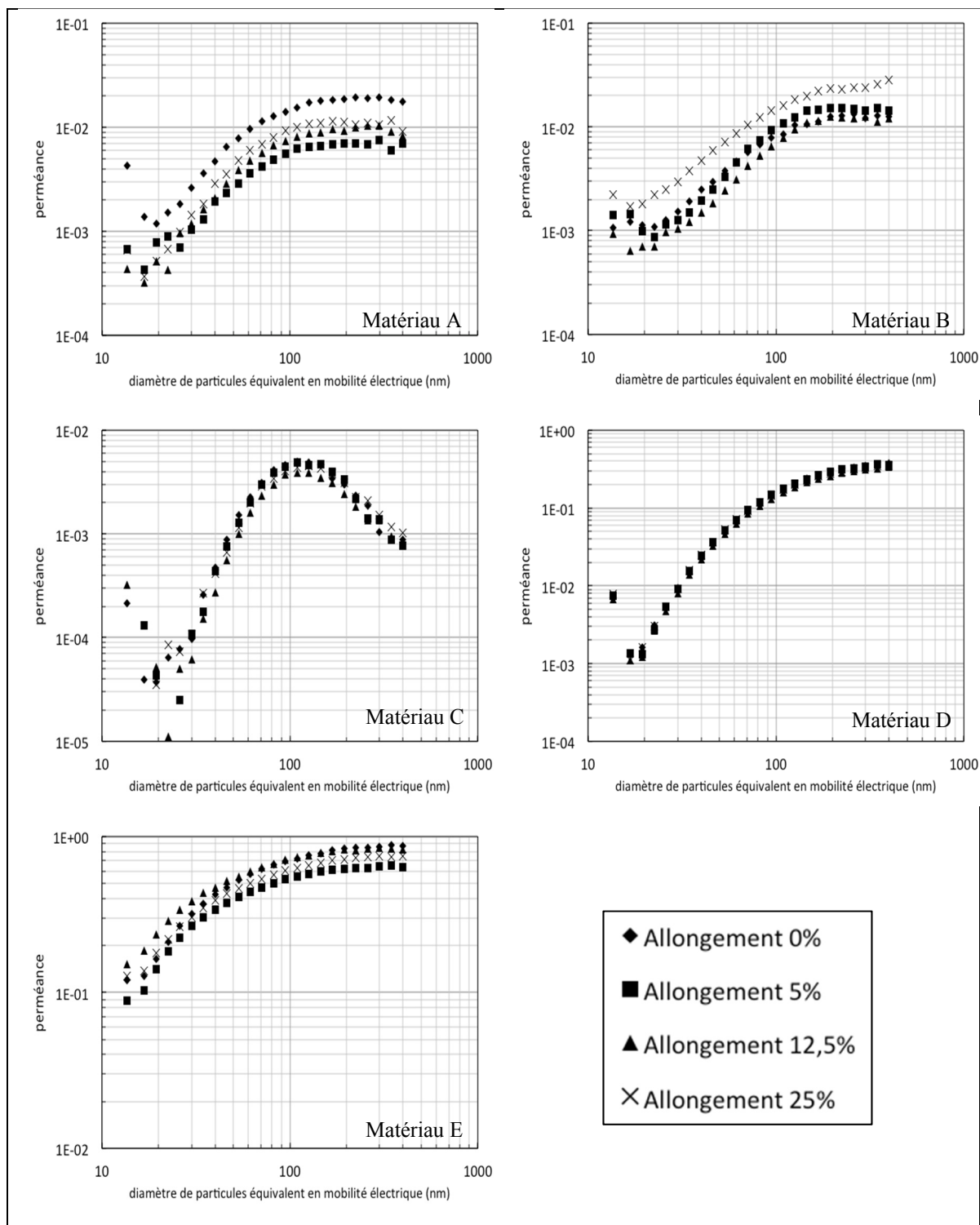


Figure 6-3 : Taux de perméance expérimentale pour chacun des matériaux en fonction de la déformation appliquée

Ces différences de comportement de filtration entre les matériaux testés peuvent être expliquées par leurs conceptions. Les matériaux A, B et C ont les niveaux de perméance les plus faibles, mais ils sont pourtant très différents. Le matériau A, contrairement aux deux autres, n'a pas été conçu selon un procédé de laminage. Après le filage, les fibres ultrafines sont directement consolidées à chaud pour créer un réseau dense constitué de fibres partiellement fondues; dans ce cas, les fibres assurent directement le rôle de filtre. Le matériau B est constitué d'un film plastique étiré à chaud (constituant la barrière protectrice), sur lequel des fibres sont déposées avant d'être thermoliées. Le volume et la taille des pores conditionnent son efficacité et les fibres qui lui sont déposées assurent sa résistance mécanique. Le matériau C est un matériau multicouche constitué d'une couche de fibres « meltblown » entouré par deux couches de fibres « spunbond ». Les « meltblown » constituent un réseau dense de fibres très fines (environ 1 μm de diamètre), ce sont elles qui assurent l'efficacité de filtration. Les deux couches externes sont principalement utilisées pour ajouter de la résistance mécanique au nontissé.

Dans le cas des matériaux A et B, étant donné leur structure compacte, il est fort probable que leur niveau de perméance dépende principalement de l'épaisseur, de la porosité et de la perméabilité. Le matériau C a une porosité environ 16 % plus élevée, mais des fibres plus minces (couche meltblown) et une épaisseur nettement supérieure à A et B ainsi qu'une perméabilité plus importante (25 fois supérieure). D'après ces observations, il semble que le niveau de perméance soit intimement lié aux propriétés des matériaux. Une épaisseur faible pourrait être compensée par une plus faible porosité. À l'inverse, une porosité plus élevée pourrait être compensée par une plus grande épaisseur et un plus faible diamètre de fibres.

Les matériaux D et E présentent le plus faible niveau d'efficacité. Cependant, le tissu D présente les mêmes caractéristiques que le nontissé C : un diamètre de fibre, une épaisseur et une porosité quasi identiques. Les propriétés aérauliques (perméabilité et perte de charge) sont également semblables, la seule différence réside dans leur conception. Le matériau C est constitué de trois couches, par rapport à D qui en comprend cinq : trois « meltblown » et deux « spunbond ». Cette structure permet d'accroître considérablement la perméabilité du matériau (195 % d'augmentation). Outre invoquer l'effet de la perméabilité, il est très

difficile d'expliquer pourquoi le matériau D a une perméance 60 fois supérieure à celle de C. Étant donné que la couche de fibres « meltblown » fournit l'efficacité de filtration, il serait raisonnable de supposer - à condition que les couches M de D soient identiques à la couche M de C - que trois couches sont plus efficaces qu'une seule, mais les résultats du nontissé D contredisent cette hypothèse.

Concernant le tissu (E), sa faible efficacité peut s'expliquer d'une part, par le diamètre des fibres qui sont largement supérieures à celles qui composent la partie filtrante des matériaux A, C et D, et d'autre part, par sa structure qui offre une plus grande perméabilité à l'air et un diamètre de pores plus important. Ces résultats confirment que les vêtements tissés ne devraient pas offrir une protection adéquate contre les particules nano et submicroniques aéropoortées. Ceci est en accord avec les observations faites lors de précédentes études (Golanski et al., 2009; Park et al., 2011).

En outre, concernant l'impact des déformations sur l'efficacité des matériaux, il apparaît, sur la base de l'ensemble des résultats de perméance obtenus avec le SMPS, qu'il n'y a pas d'influence sur la distribution de taille des particules en aval des matériaux. En effet, en regardant la distribution de taille des particules lors des différents tests, celle-ci n'est en rien modifiée. Les particules les plus pénétrantes restent les mêmes. En raison de possibles modifications structurales des matériaux lors de leur déformation, il serait raisonnable de penser que de telles déformations engendrent une modification de perméance des particules en fonction de leur taille. La contrainte mécanique engendrée par le contact de la sonde avec le matériau peut causer une augmentation ou une diminution de la perméabilité des matériaux. En effet, des microfissures ou brèches dans les matériaux, provoquées par les déformations, engendreraient une augmentation de la perméabilité. Inversement si les déformations ne font qu'écraser les matériaux, cela pourrait faire varier leur porosité et pourrait modifier la granulométrie des particules les traversant. Néanmoins, les résultats ne soutiennent pas de telles hypothèses, au contraire, ils démontrent que les déformations appliquées aux matériaux ne modifient pas leurs capacités de protection. D'autres tests seront nécessaires pour confirmer ou réfuter cette thèse, par exemple des tests de porosimétrie ou de

microtomographie. Cela pourra permettre de définir s'il y a eu une ou plusieurs modifications structurelles des matériaux après déformation, sans effet sur la perméance.

En règle générale, selon la théorie de la filtration (Hinds, 1999), la perméance peut être corrélée avec le diamètre des fibres, l'épaisseur du tissu, la porosité, la perte de charge et de perméabilité à l'air. Cependant, les résultats de cette étude, en particulier les résultats des matériaux C et D, montrent que la conception des matériaux peut également jouer un rôle important dans l'efficacité de filtration.

6.1.2 Résultats EEPS

La distribution en taille de l'aérosol généré en fonction du diamètre de mobilité électrique des particules est présentée par la Figure 6-4. Cette distribution de la taille représente la valeur moyenne de cinq mesures, faites avec le EEPS, dans le compartiment amont de la cellule de perméance. La granulométrie de l'aérosol mesuré se situe entre 14 et 523 nm avec un diamètre moyen géométrique avoisinant 50 nm. Bien que le profil de la courbe soit différent de celui obtenu avec le SMPS, les granulométries mesurées avec les deux appareils sont relativement similaires, notamment au niveau du diamètre géométrique aux alentours de 50 nm.

Ces mesures réalisées en amont montrent une faible quantité de particules de diamètre supérieure à 200 nm ($\approx 10^3 \text{ \#/cm}^3$) avec une absence totale de particules supérieures à 500 nm de diamètre.

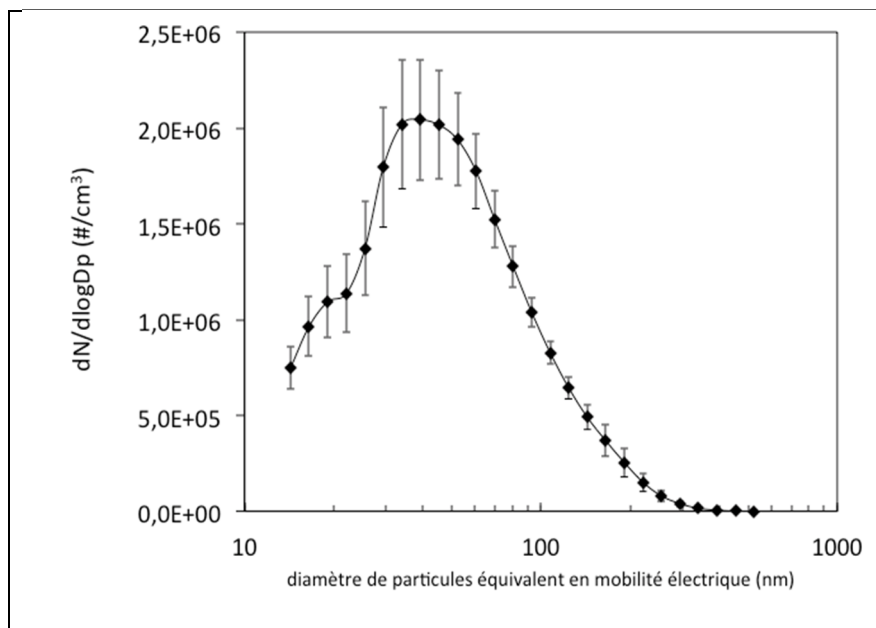


Figure 6-4 : Granulométrie de l'aérosol en amont

6.1.2.1 Mesure de la perméance totale

La Figure 6-5 présente les résultats expérimentaux de la perméance totale de l'aérosol à travers les cinq matériaux. Ces résultats sont exprimés selon l'état de déformation des matériaux : non déformé et déformé. Les déformations appliquées sont les mêmes que celles appliquées dans l'étude avec le SMPS : 2, 5 et 10 mm.

Ces mesures démontrent, à l'instar de celles obtenues avec le SMPS, un taux de perméance plus faible pour les nontissés que pour le tissu. De plus, l'écart de comportement entre les quatre nontissés se confirme : tandis que la perméance des matériaux A, B et C varie entre 2 et 8 %, celle de D se situe entre 40 et 50 %, selon la sollicitation imposée. Les résultats EEPs confirment les résultats du SMPS sur la disparité de perméance entre les nontissés.

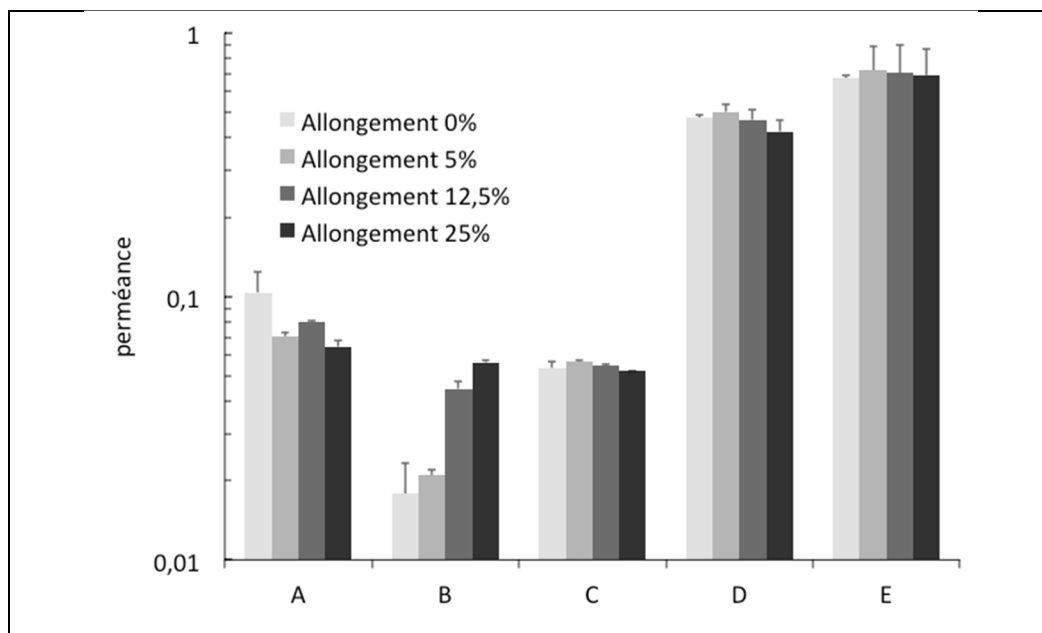


Figure 6-5 : Perméance totale à travers les VPC en fonction de l'allongement subi par les matériaux

Concernant l'état de déformation des matériaux, il semble, d'après ces résultats, hormis pour le nontissé B, qu'il n'y ait pas d'impact significatif sur le niveau de perméance. En effet, comme l'ont démontré les mesures SMPS, les tests réalisés sans déformation montrent des résultats identiques ou supérieurs aux autres tests soumis à une déformation. En outre, l'augmentation de la déformation n'accroît pas la perméance. Quatre des cinq matériaux présentent, par rapport à l'état non déformé, une diminution de la perméance pour les mesures réalisées avec un allongement de 25% (soit 10 mm). Seul le matériau B montre une augmentation de la perméance en fonction de la déformation appliquée. Étant donné qu'un seul matériau présente une variabilité significative de la perméance en fonction des sollicitations appliquées, il est donc difficile de conclure sur les possibles effets de ces déformations.

6.1.2.2 Comparaison granulométrique

La Figure 6-6 présente les résultats de perméance de chaque matériau en fonction de la déformation subie et de la taille des particules. Du fait d'une concentration de particule à la limite de détection de l'appareil, pour les particules inférieures à 14 nm et supérieures à 200

nm, les perméances rapportées le sont pour des tailles de particules comprises dans cet intervalle. Les résultats obtenus sont extrêmement différents de ceux recueillis par le SMPS, tous les matériaux présentent une augmentation de la perméance avec l'accroissement de la taille des particules, jusqu'à un maximum. Cependant, pour les matériaux A et B, la perméance diminue par la suite, phénomène qui n'apparaît pas, hormis pour le matériau C, sur les résultats SMPS. Au vu des résultats de perméance, plusieurs observations peuvent être faites sur les tendances de perméance de chaque matériau. Le matériau A présente un taux de perméance qui augmente légèrement jusqu'à atteindre la MPPS (entre 30 et 40 nm), puis diminue par la suite pour des tailles de particules supérieures. Le matériau B suit la même tendance que A à la différence que sa MMPS se situe entre 70 et 80 nm. Concernant les matériaux C, D et E, ils présentent, de manière générale, une tendance à la perméance très similaire soit une augmentation progressive de la perméance jusqu'à un maximum, aux alentours de 150 nm où elle semble se stabiliser.

En outre, la MPPS ne semble pas être affectée par la vitesse d'aspiration, toutefois, pour les matériaux A et B leur MPPS a diminué. Il apparaît donc que la vitesse de filtration modifie la MPPS pour les matériaux les moins perméables comme en témoignent certains travaux antérieurs (Brochot. C, 2012; Huang et al., 2007).

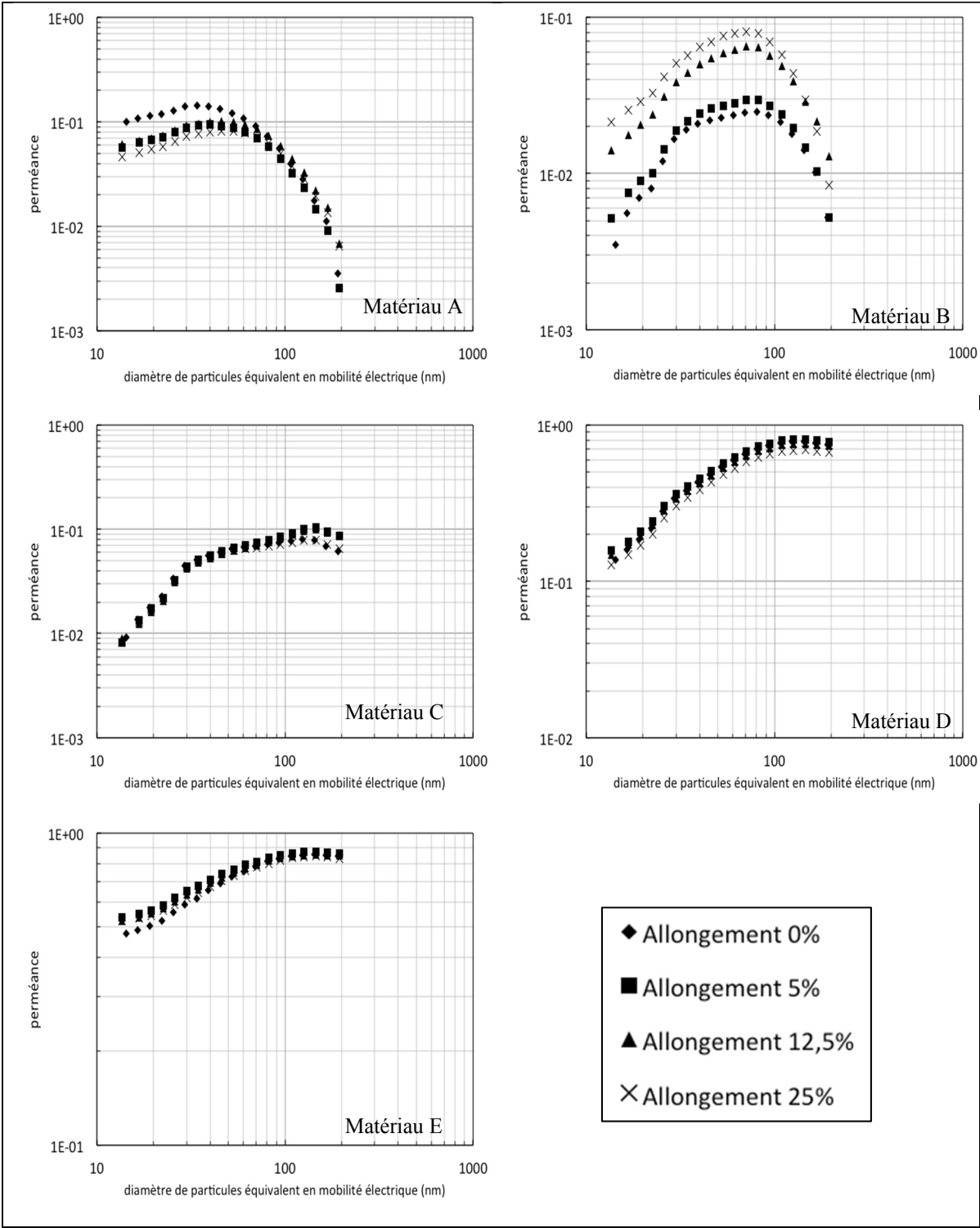


Figure 6-6 : Taux de perméance pour chacun des matériaux en fonction de la déformation appliquée

6.1.2.3 Influence des déformations dynamiques

La méthode dynamique permet d'appliquer aux matériaux différents taux de déformation simultanément à la génération des particules. De ce fait, ces tests permettent de mesurer le taux de perméance des particules à travers les matériaux pendant leur déformation. Deux protocoles de mesure ont été appliqués avec le EEPS : une première série de mesure en déformation statique (sonde immobile pendant toute la durée de la mesure) et une deuxième série en déformation dynamique (sonde en mouvement pendant toute la durée de la mesure, $f=1\text{Hz}$). Ces deux séries de mesures ont permis de mettre en évidence une modification des taux de perméance. En effet, lorsque la sonde est en mouvement, des variations de perméances sont observées.

La Figure 6-7 illustre l'oscillation des résultats de perméance totale pour chaque matériau et pour chaque déformation dynamique imposée. Pour les matériaux A et C, les résultats montrent une augmentation du taux de perméance avec l'augmentation de la déformation. Par contre, pour les trois autres matériaux, le phénomène est moins marqué, il est même décroissant dans le cas du matériau B. Ce phénomène peut s'expliquer par une perméabilité importante pour les matériaux D et E. En effet, plus un matériau est perméable à l'air et plus l'efficacité du matériau sera faible, et ce, peu importe la vitesse d'écoulement du fluide.

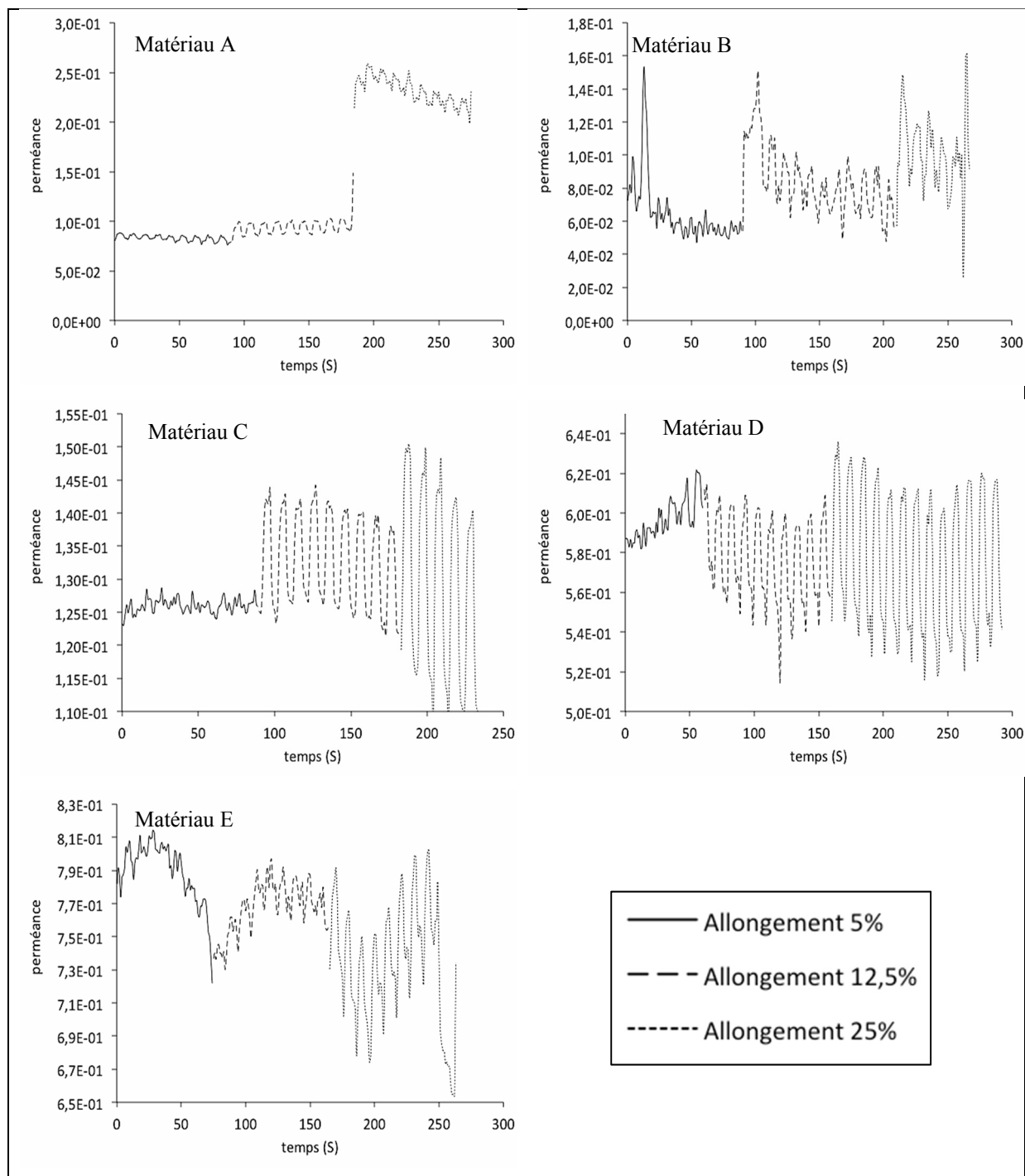


Figure 6-7 : Évolution du taux de perméance en fonction de la déformation

Ces données présentent des résultats en dent de scie. La fréquence des oscillations correspond à la fréquence de déplacement de la sonde. Ce phénomène n'est visible que lorsque la sonde est en mouvement, en atteste la Figure 6-8 présentant les données de

perméance des matériaux non déformés. De plus, dans la majorité des cas, l'amplitude des oscillations s'accroît avec la déformation.

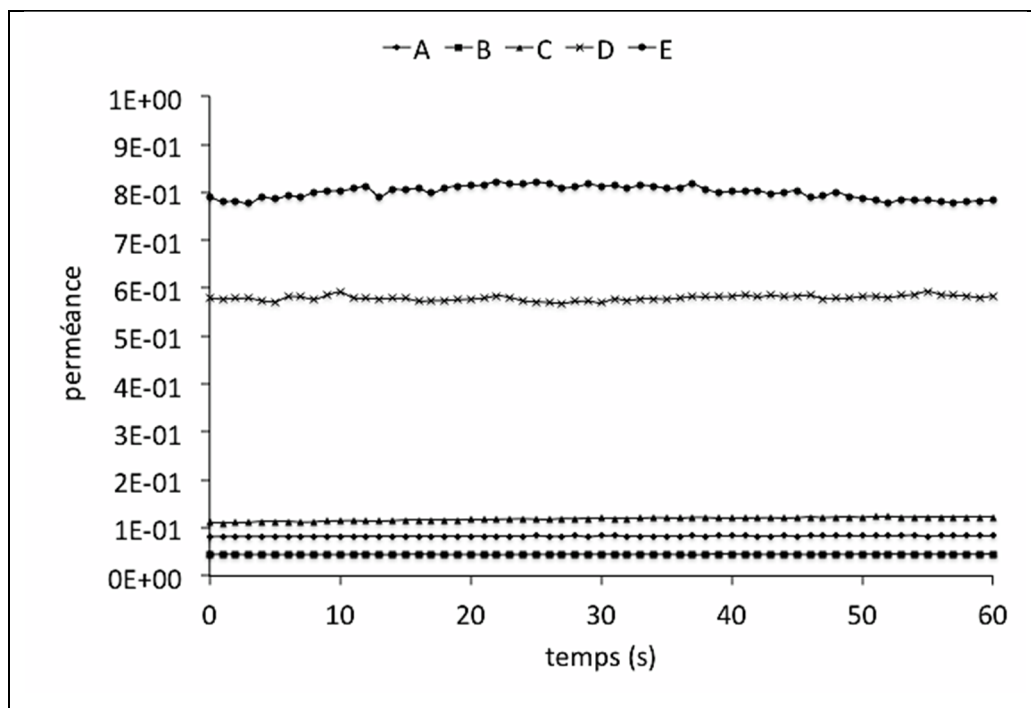


Figure 6-8 : Données brutes EEPs des matériaux sans déformation

Afin de mieux appréhender l'effet des déformations dynamiques sur le taux de perméance, une étude comparative des résultats obtenus selon les deux protocoles a été faite. Les résultats sont présentés par la Figure 6-9. Ces résultats ont été extraits des données aux moments où la sonde atteint son déplacement maximum. Ils montrent, à l'exception du matériau B, l'accroissement de la perméance dans le cas des déformations dynamiques. En effet, bien que le matériau B ne semble pas affecté par le mode de déformation employé, les autres textiles présentent une très nette augmentation de la perméance. Le taux de perméance dépasse ainsi les 100 % pour les matériaux A et C, 800 % pour le matériau D et 1000 % pour le tissu.

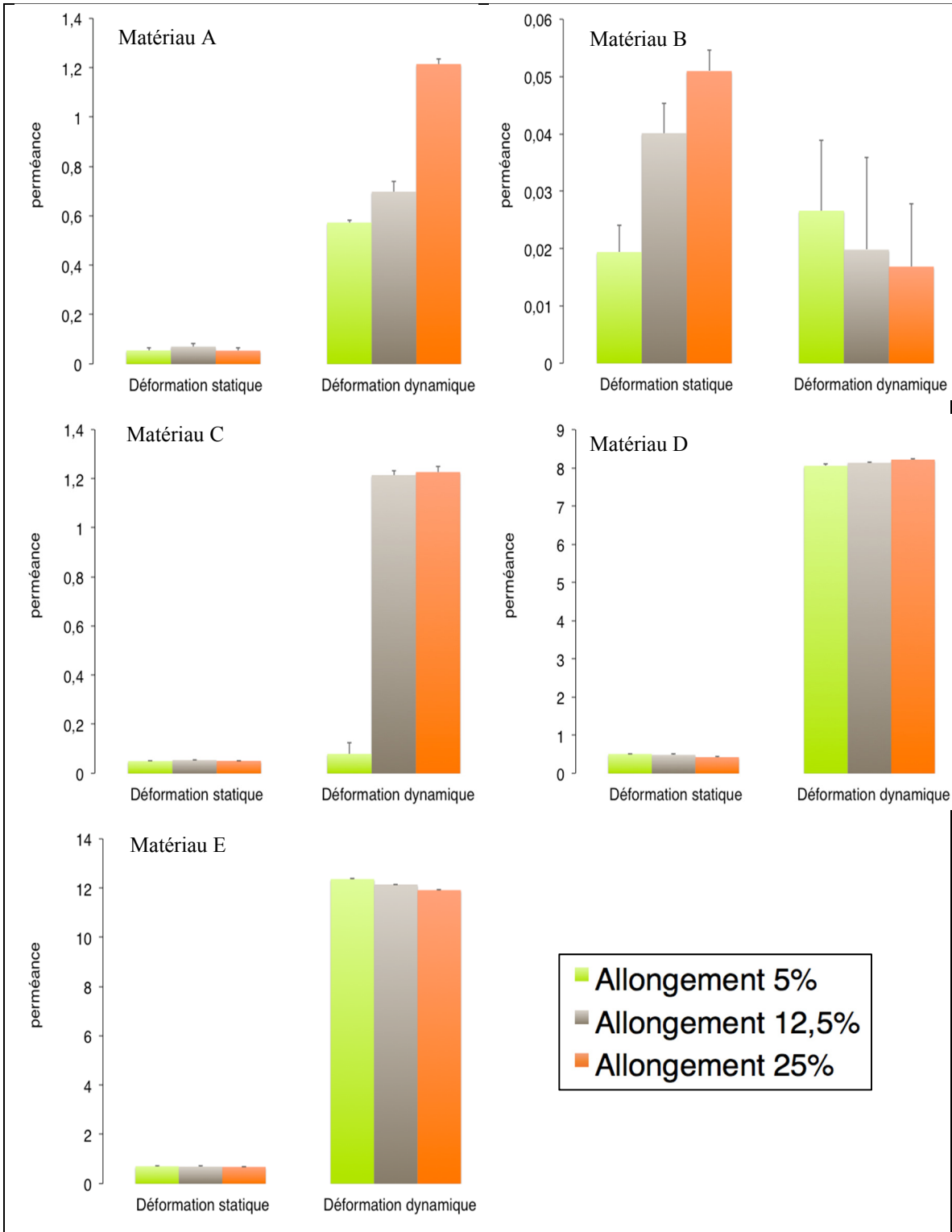


Figure 6-9 : Comparaison des taux de perméance totaux en déformation statique et dynamique

Ces résultats montrent bien que les déformations dynamiques affectent la perméance. Cependant, la seule chose qui différencie les deux protocoles de test est le fait que la sonde soit en mouvement ou pas. Les déformations appliquées étant identiques entre les deux séries de mesures, il semblerait que cette augmentation de perméance ne soit simplement pas due aux déformations, mais aux mouvements de la sonde générant la déformation.

6.1.2.4 Influence de la pression générée sur le taux de perméance

Afin de déterminer la cause d'une telle augmentation du taux de perméance, il a été décidé de mesurer la pression régnant dans la cellule de perméance lors des tests dynamiques. Les résultats obtenus (trait plein), présentés à la Figure 6-10, et jumelés avec les données brutes de l'EEPS (pointillés) ont révélé que l'augmentation de la perméance était induite par le différentiel de pression exercé lors du mouvement de la sonde.

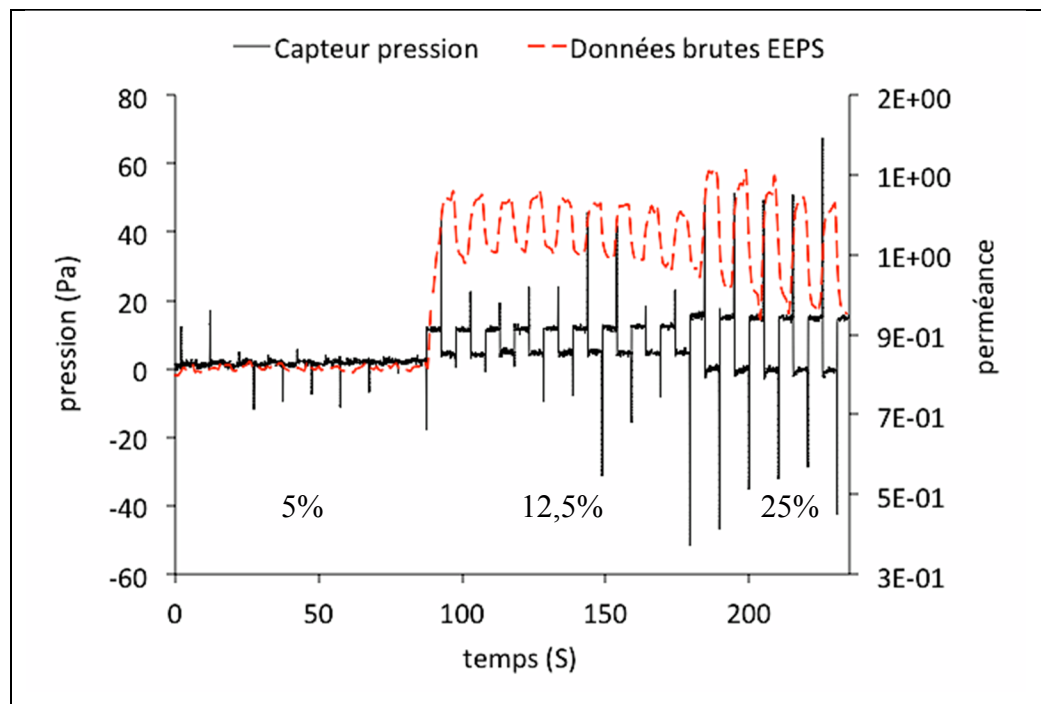


Figure 6-10 : Taux de perméance et pression pendant les essais de déformation dynamique – matériau C

Il apparait, d'après les données recueillies, que la perméance suit le même profil que la pression. Ainsi, lorsque la sonde est en mouvement, elle modifie la pression à l'intérieur de la cellule de perméance. De ce fait, lorsque la sonde impose une déformation (de 0 mm jusqu'à un maximum de 10 mm) elle augmente la pression dans la chambre, en aval, ce qui a pour effet de minimiser le passage des particules à travers le matériau. À l'inverse lorsque la déformation s'interrompt (la sonde revient à 0 mm), le déplacement de la sonde engendre une dépression dans la chambre ce qui entraîne un effet de succion et provoque l'augmentation du passage de particules. En effet, la sonde, lorsqu'elle remonte, joue le rôle d'un piston qui, jumelé à la vitesse de filtration générée par l'EEPS, force le passage des particules à travers le matériau par aspiration. Ce qui est confirmé par le fort taux de perméance obtenu lors des tests dynamiques.

6.1.3 Résultats P-Trak

À l'instar du EEPS, les tests de perméance de particules utilisant le compteur de particules P-Trak les matériaux textiles ont été faits selon deux protocoles de déformation : en mode statique et en mode dynamique. Les résultats présentés dans le paragraphe 6.1.3.1 reflètent la perméance de particules sous déformations statiques. Ce choix est expliqué dans les paragraphes suivants.

6.1.3.1 Mesure de la perméance totale

Étant donné que le P-Trak est un appareil de comptage optique, les résultats obtenus grâce à cet appareil ne permettent pas de connaître la taille des particules pénétrantes.

Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 6-11. À l'instar des résultats de perméance totale obtenus avec le SMPS et le EEPS, les mesures réalisées avec le P-Trak montrent que la perméance totale pour les nontissés est nettement inférieure à celle déterminée pour le tissu. En effet, là où les nontissés ne dépassent pas les 30 % de perméance, celle du tissu peut atteindre jusqu'à 50 %.

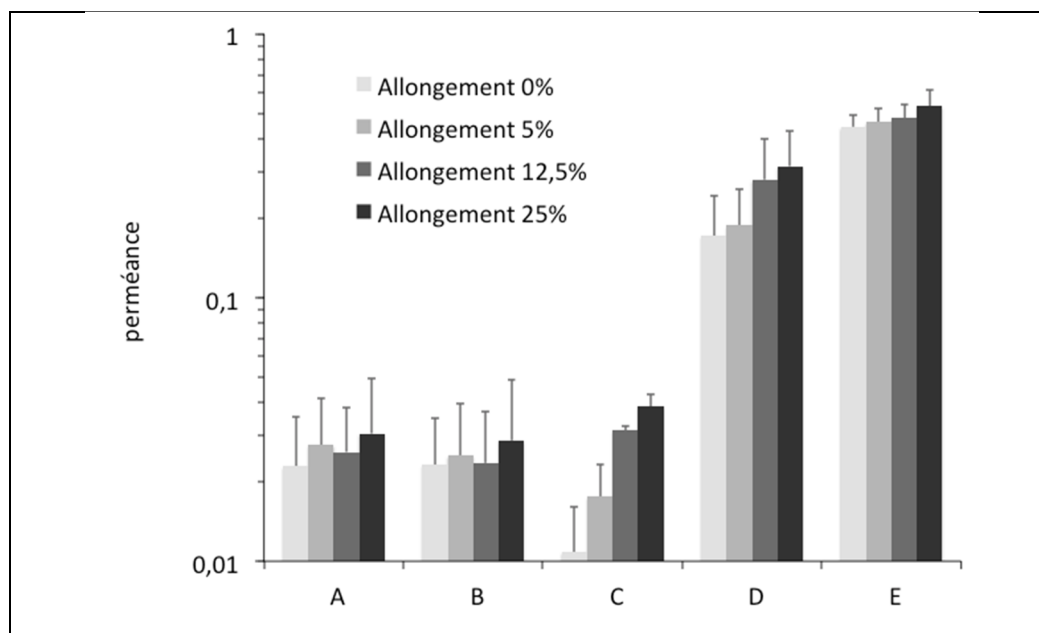


Figure 6-11 : Perméance totale à travers les VPC en fonction de la déformation appliquée

D'autre part, les mesures obtenues avec les nontissés présentent également des similitudes avec les résultats précédents : les trois matériaux A, B et C présentent des taux de perméance nettement inférieurs à ceux du matériau D, dans ce cas-ci, de dix à quinze fois inférieures.

Toutefois, là où ces résultats diffèrent des autres mesures, c'est au niveau de l'effet des déformations. Malgré des barres d'incertitudes significatives, une tendance apparaît pour les matériaux C et D. En effet, l'augmentation des déformations semble induire une augmentation de la perméance, qui est beaucoup moins marquée pour le matériau E. À l'inverse, les nontissés A et B présentent des taux de perméance identiques compte tenu de la variabilité des mesures.

6.1.3.2 Influence des déformations dynamiques

De même que les résultats obtenus avec le EEPS, les mesures faites en déformation dynamique et présentées par la Figure 6-12 présentent une oscillation de la perméance. Cependant, dans ce cas-ci le taux de perméance augmente avec l'accroissement de la

déformation, pour tous les matériaux. Seul le matériau B soumis à une déformation de 5mm présente une perméance plus faible qu'à 2mm.

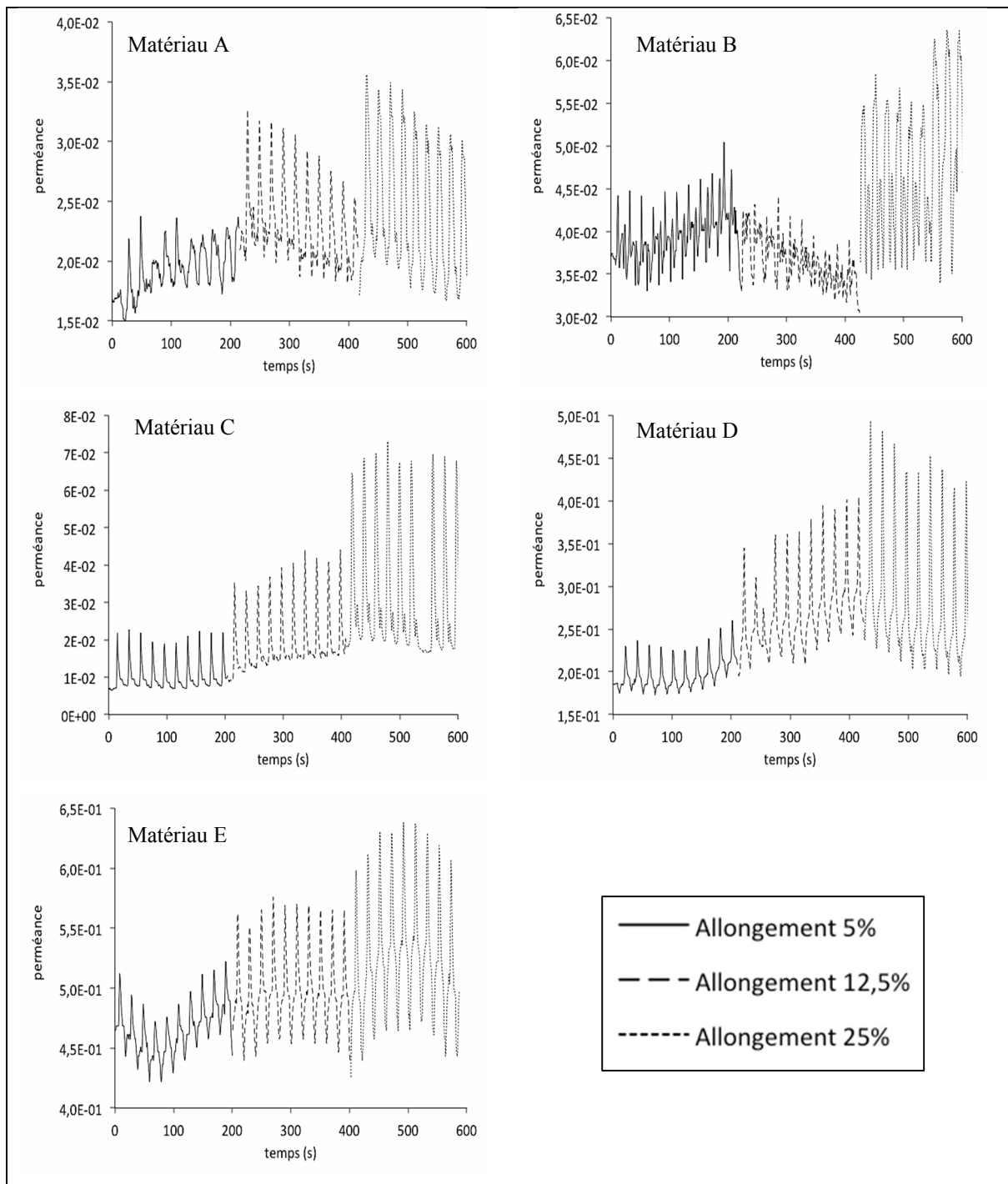


Figure 6-12 : Données brutes du P-Trak pendant les essais de déformation dynamique

Les données présentées ci-dessus montrent des résultats en dent de scie, caractéristiques des déformations dynamiques. Plus la déformation s'accroît et plus l'intensité de l'oscillation augmente; un phénomène observable à cause du déplacement de la sonde qui agit comme un soufflet. Par ailleurs, la même étude que pour l'EEPS, a été faite pour comparer les résultats obtenus selon les deux protocoles de déformation (statique et dynamique). Les résultats sont présentés par la Figure 6-13.

Les résultats montrent, à la différence du EEPS, une légère augmentation du taux de perméance pour l'ensemble des matériaux. La perméance augmente légèrement pour les matériaux A, B et C, mais elle s'accroît de 10 à 20% pour les matériaux D et E. Cette différence de comportement s'explique par la différence de vitesse d'aspiration entre les deux appareils, le EEPS ayant une aspiration près de 15 fois supérieure à celle du P-Trak.

D'autre part, ces tests ont révélé, comme pour le EEPS, une augmentation de la perméance en fonction de la pression générée par le mouvement de la sonde. La perméance varie de la même manière que pour le EEPS, mais dans des proportions moindres du fait de la faible aspiration. De ce fait, les mêmes observations peuvent être faites, la sonde joue le rôle de piston lors de son déplacement et ce phénomène jumelé au débit d'aspiration de l'appareil force le passage des particules à travers le matériau engendrant une augmentation artificielle de la perméance.

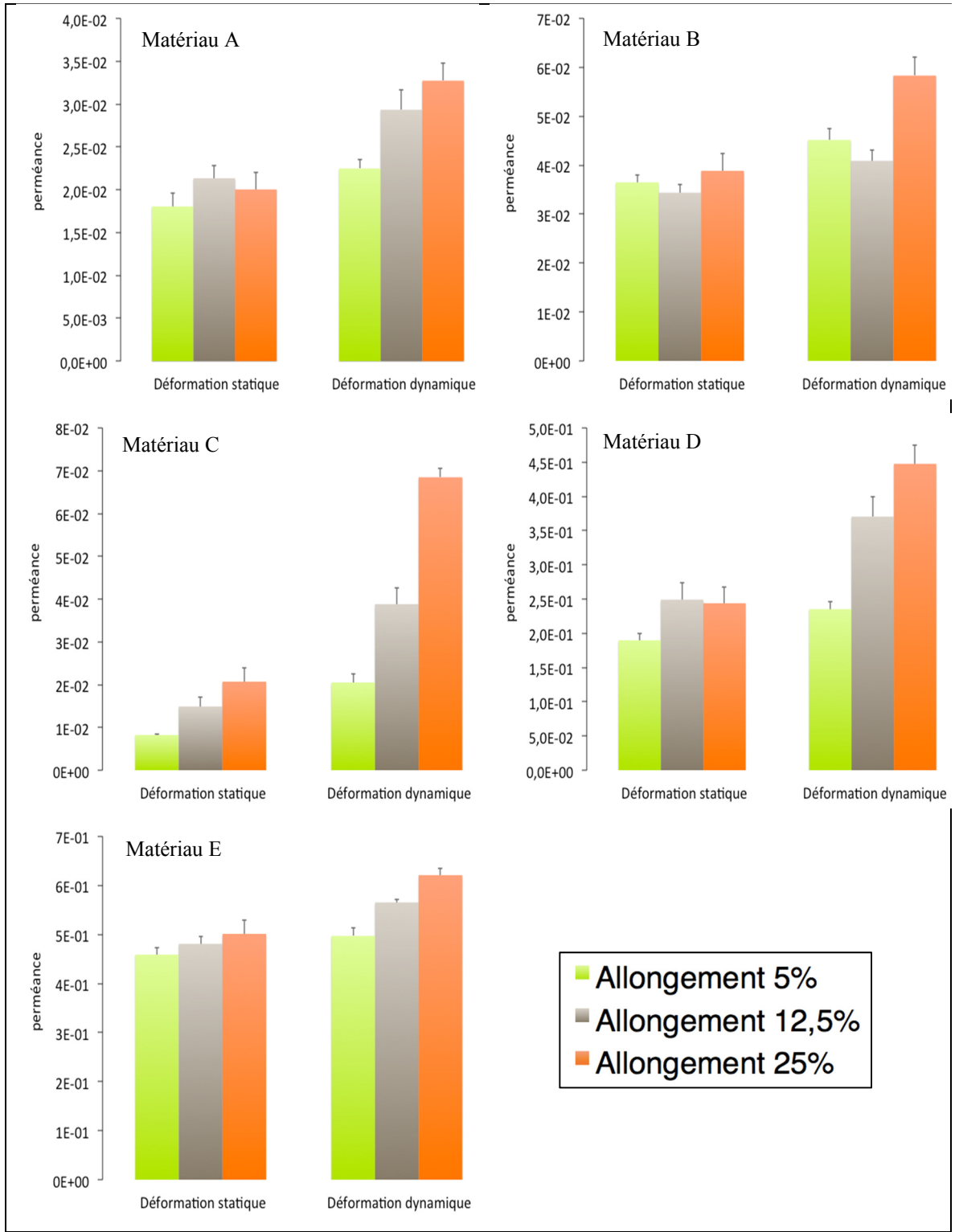


Figure 6-13 : Comparaison des taux de perméance en déformation statique et dynamique

Les résultats obtenus avec le EEPS et le P-Trak démontrent qu'il est extrêmement difficile de travailler avec les matériaux textiles. En effet, leur variabilité structurelle fait en sorte que les résultats obtenus diffèrent d'un échantillon à un autre. De plus, le protocole de mesure employé, bien qu'il soit bien adapté pour des mesures sans mouvement de sonde, ne semble pas adapté lorsque cette dernière est en mouvement. Il serait alors préférable de privilégier un banc d'essai dans lequel une déformation dynamique uniaxiale ou biaxiale serait appliquée. Le matériau serait alors soumis uniquement à des elongations ce qui éviterait d'avoir des changements de pression dus au déplacement d'une sonde. Dans ce cas, la perte de charge serait uniquement affectée par le degré d'étirement du matériau.

6.2 Comparaison des pressions générées à l'intérieur des VPC et dans la chambre de perméance

Les changements de pression générée par la sonde lors de son déplacement ont pour effet d'accroître le taux de perméance. Cependant, lorsqu'un travailleur porte son VPC, bien que celui-ci soit perméable à l'air, les mouvements produits par la personne engendrent une modification de la pression à l'intérieur des VPC.

Les résultats comparatifs de la pression régnant dans un VPC et dans la chambre de perméance sont présentés à la Figure 6-14. Au premier abord, il est aisé de constater que les deux graphiques sont différents, celui du VPC (Figure 6-14 A) présente des pics négatifs (surpression) dont l'amplitude est nettement supérieure aux pics positifs (dépression), tandis que celui de la chambre (Figure 6-14 B) présente une quasi-symétrie des amplitudes entre les différents pics négatifs et positifs.

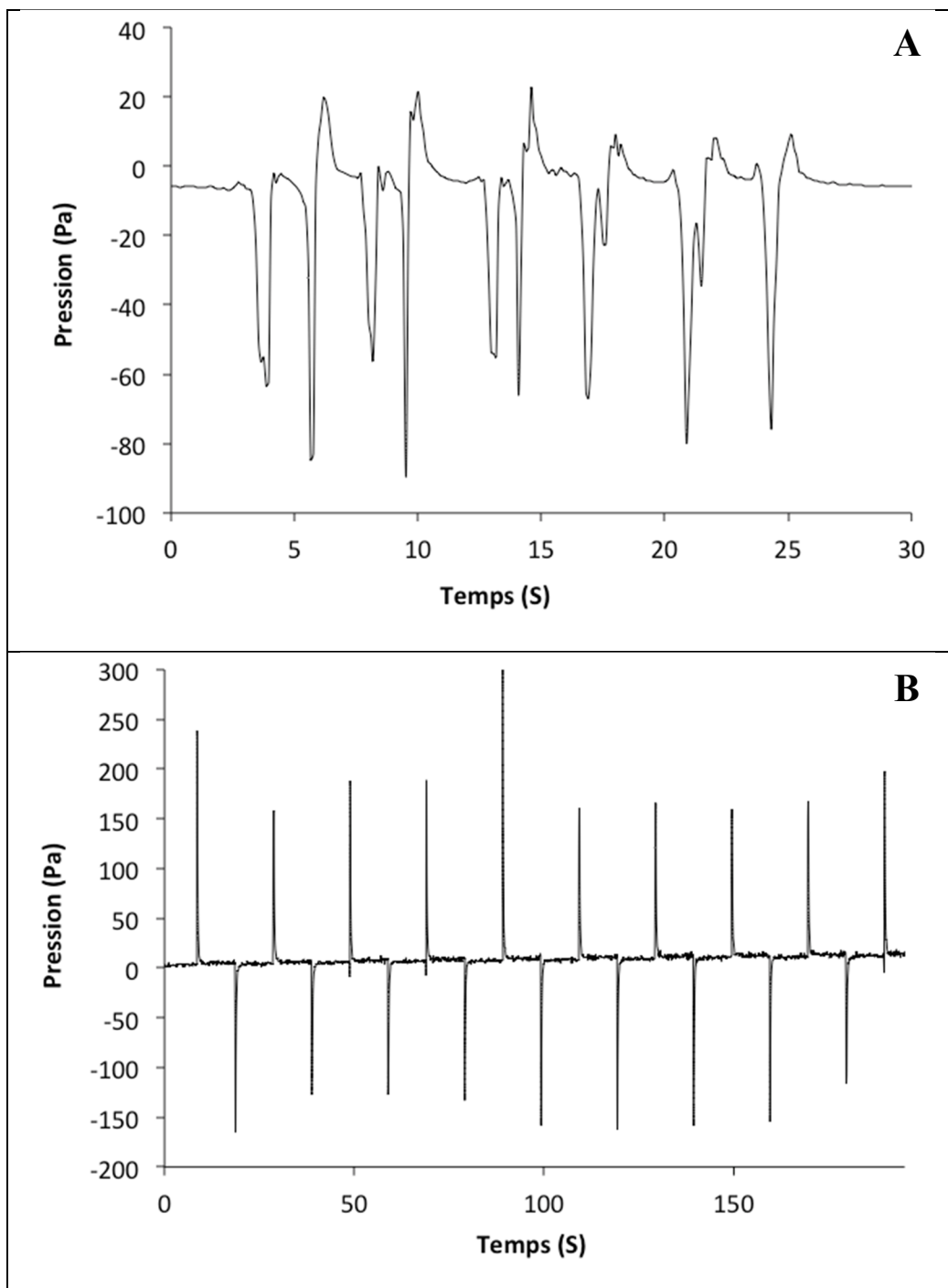


Figure 6-14 : Profils des pressions : A) à l'intérieur d'un VPC (hanche / 2XL) et B) lors de test de perméance (allongement 5%) – matériau A

D'après ces données, la pression générée par le déplacement de la sonde n'est pas représentative de celle régnant dans le VPC. En effet, cette dernière est environ dix-sept fois inférieure à celle générée par le mouvement de la sonde.

Il est indéniable que la pression existante dans les VPC impacte la perméance. Toutefois, la grande disparité existant entre ces deux expérimentations, démontre que le montage utilisé n'est pas le plus adapté pour simuler des conditions d'utilisation. Il serait alors préférable de réaliser les tests sur un banc reproduisant le différentiel de pression régnant à l'intérieur des combinaisons pendant que celles-ci sont déformées.

6.3 Étude comparative

Le but de cette étude est de comparer les différents résultats obtenus à l'aide des trois appareils de mesures, afin d'évaluer les atouts et les faiblesses des méthodes d'analyse employées en fonction des phénomènes étudiés.

6.3.1 Perméance totale

La Figure 6-15 résume tous les résultats de perméance totale pour chaque matériau en fonction de l'appareillage utilisé. D'après ces résultats, le SMPS est l'appareil qui donne la perméance la plus faible et le EEPS, au contraire, donne dans la quasi-totalité des cas la plus forte perméance. Quant au P-Trak, les perméances mesurées sont supérieures à celles fournies par le SMPS, mais nettement inférieures à celles du EEPS, à une exception près le matériau B sans déformation et allongé de 5% (déformation 2 mm). De plus, les variabilités de mesure du P-Trak pour ce même matériau sont extrêmement importantes.

La différence entre les trois appareils s'explique principalement par la vitesse de filtration générée. En effet, le SMPS impose une faible vitesse de filtration (0,0043 m/s), s'en suit le P-Trak avec 0,0051 m/s et enfin le EEPS qui a la vitesse la plus importante avec 0,0730 m/s soit 17 fois plus que le SMPS.

D'autre part, il semble ne pas y avoir d'effet significatif des déformations en fonction de l'appareil utilisé. Bien que les résultats soient différents entre les trois systèmes de mesure, l'allongement subit de manière plus ou moins important par les matériaux n'a pas d'effet significatif sur leur perméance. Seules deux mesures indiquent le contraire, le matériau B avec le EEPS et le matériau C avec le P-Trak. Elles présentent toutes deux une augmentation de la perméance avec l'augmentation de la déformation. Encore une fois, cela peut s'expliquer par la disparité des matériaux testés.

Au vu des différents résultats obtenus, il apparaît que les méthodes utilisées ne sont peut-être pas toutes adaptées au protocole mis en place, ou alors que le protocole n'est peut-être pas adapté aux appareils. En effet, bien que le EEPS permette de réaliser des mesures en temps réel, son fort débit d'aspiration limite son utilisation. La vitesse du fluide en résultant, force le passage des particules à travers les matériaux, plus ces derniers sont poreux et perméables à l'air et plus leur perméance s'en trouvera affectée. Afin de limiter cet effet, il serait préférable d'installer un circuit d'évitement pour compenser le débit d'aspiration. À l'inverse, le SMPS ne rencontre pas ce problème, par contre sa limitation se trouve dans sa vitesse d'acquisition qui ne permet pas de faire des mesures en temps réel et par conséquent, il ne peut être utilisé dans toutes les conditions. Enfin, le P-Trak offre un compromis entre le SMPS et le EEPS, car il offre une lecture en temps réel et un débit d'aspiration faible. Toutefois, cet appareil se voit limité dans son utilisation, car il ne s'agit que d'un compteur de particules. Par conséquent la granulométrie de l'aérosol généré n'est jamais connue.

Il existe un autre paramètre non négligeable qui limite la comparaison entre ces trois appareils de mesure, il s'agit des matériaux utilisés. En effet, les matériaux choisis ne sont pas isotropes et présentent des variations de propriétés importantes, par exemple une densité de fibre aléatoire d'un endroit à un autre des matériaux.

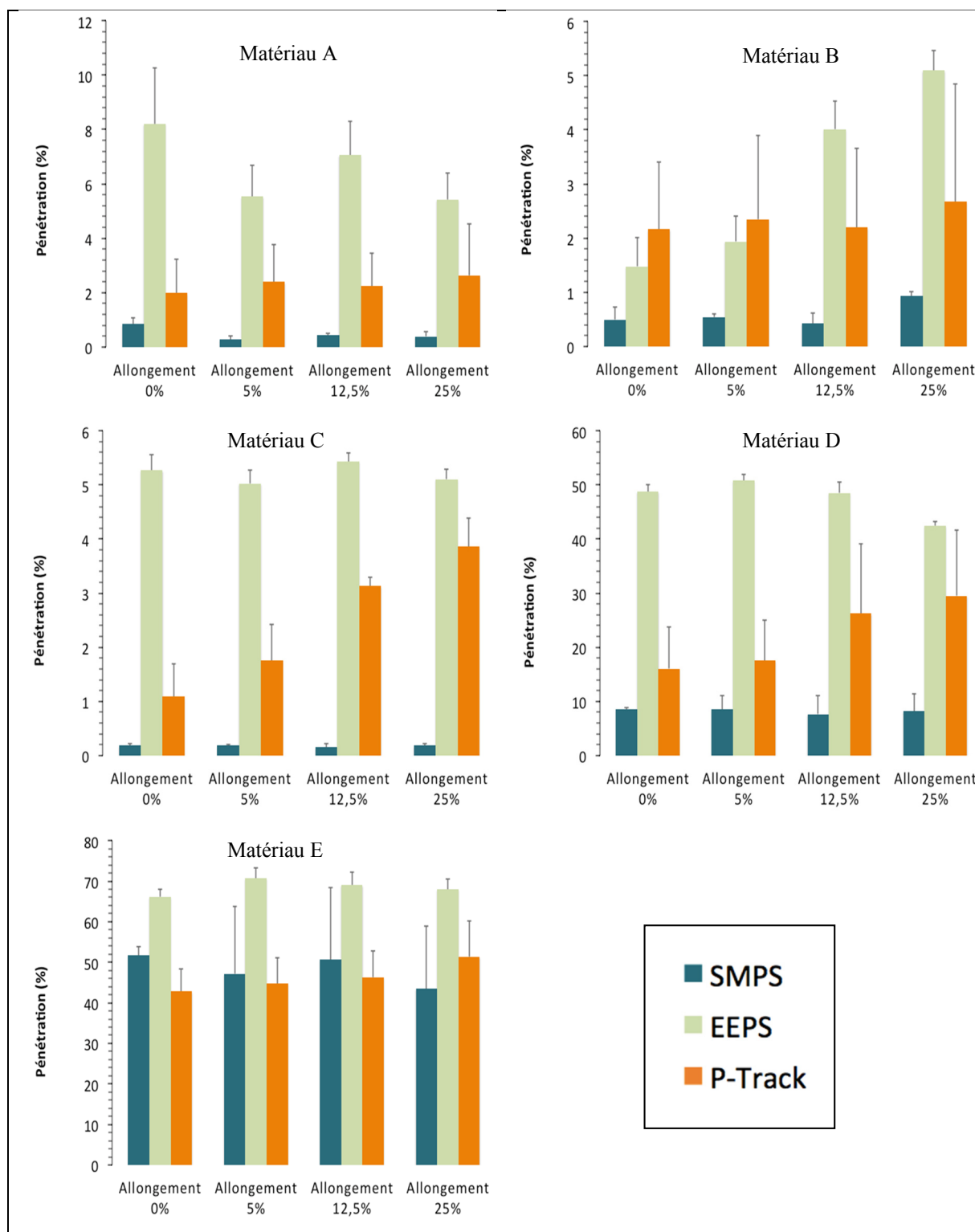


Figure 6-15 : Résultats comparatifs de la perméance totale des matériaux (mode statique)

Cette étude comparative a permis de mettre en évidence les principaux attraits et limites de ces techniques, mais ne permet pas de les comparer outre mesure. Pour ce faire, il aurait été préférable d'utiliser un matériau étalon, et également un aérosol monodisperse. Cependant, les techniques granulométriques permettent d'identifier la taille des particules traversant les matériaux contrairement à un compteur de particules classique. Il est donc préférable de privilégier le SMPS ou le EEPS pour déterminer précisément la taille de particule la plus pénétrante. Toutefois, à des fins de simple analyse de perméance (en nombre), le P-Trak s'avère être un bon outil.

Enfin, il est à noter que la norme ISO 13982 utilise un photomètre de flamme pour mesurer la perméance. Par conséquent, aucune taille de particule n'est alors mesurée, seule la perméance totale est connue. Au regard des différents résultats obtenus lors de cette thèse, il serait préférable que la norme soit modifiée en adoptant un appareil granulométrique pour réaliser les mesures. Ceci permettra de déterminer réellement l'efficacité des vêtements testés en fonction de la taille des particules générées.

CHAPITRE 7

MODÉLISATION DE L'EFFICACITÉ DES MATÉRIAUX DE VPC

7.1 Comparaison avec la théorie

Dans le but de déterminer si les résultats obtenus, pour les différents matériaux testés, sont en accord avec la théorie de la filtration existante, une modélisation a été effectuée. Parmi, tous les modèles existants, trois ont été retenus, celui de Stechkina et Fuchs (1966), de Lee et Liu (1982), et de Hinds (1999). Il s'agit des modèles dont le domaine d'étude se trouve proche des matériaux et conditions expérimentales de cette thèse (Tableau 7-1). La Figure 7-1 présente les résultats comparatifs des mesures expérimentales (sans déformation) avec les trois modèles.

Tableau 7-1 : Domaine d'étude des modèles sélectionnés

Auteurs	Domaine d'étude
Stechkina et Fuchs (1966)	$Re < \alpha^{1/2}$ $Pe > 0,2$ et $\alpha < 1$ $R \ll 1$
Lee et Liu (1982)	$0,0086 < \alpha < 0,42$ $11 < d_f < 12,9 \mu m$ $1 < U < 300 \text{ cm/s}$
Hinds (1999)	$0,1 < U < 200 \text{ cm/s}$ $Re < 1$ $0,1 < d_f < 50 \mu m$ $0,005 < \alpha < 0,2$
Matériau étudié	$\alpha = 0,19$ $d_f = 2,7 \mu m$ $0,4 < U < 7 \text{ cm/s}$

La perméance estimée par les différents modèles ne s'avère pas concordante avec les résultats expérimentaux. Il apparaît que pour les matériaux les moins efficaces, D et E, les modèles sous-estiment la perméance, et ce, peut importe la taille des particules et la vitesse

de filtration. D'autre part, pour les trois autres médias, les modèles présentés sous-estiment la perméance pour les petites particules (<100 nm) et la surestiment pour les plus grosses. Ce constat, à l'instar des médias D et E, se vérifie également pour différentes vitesses de filtration.

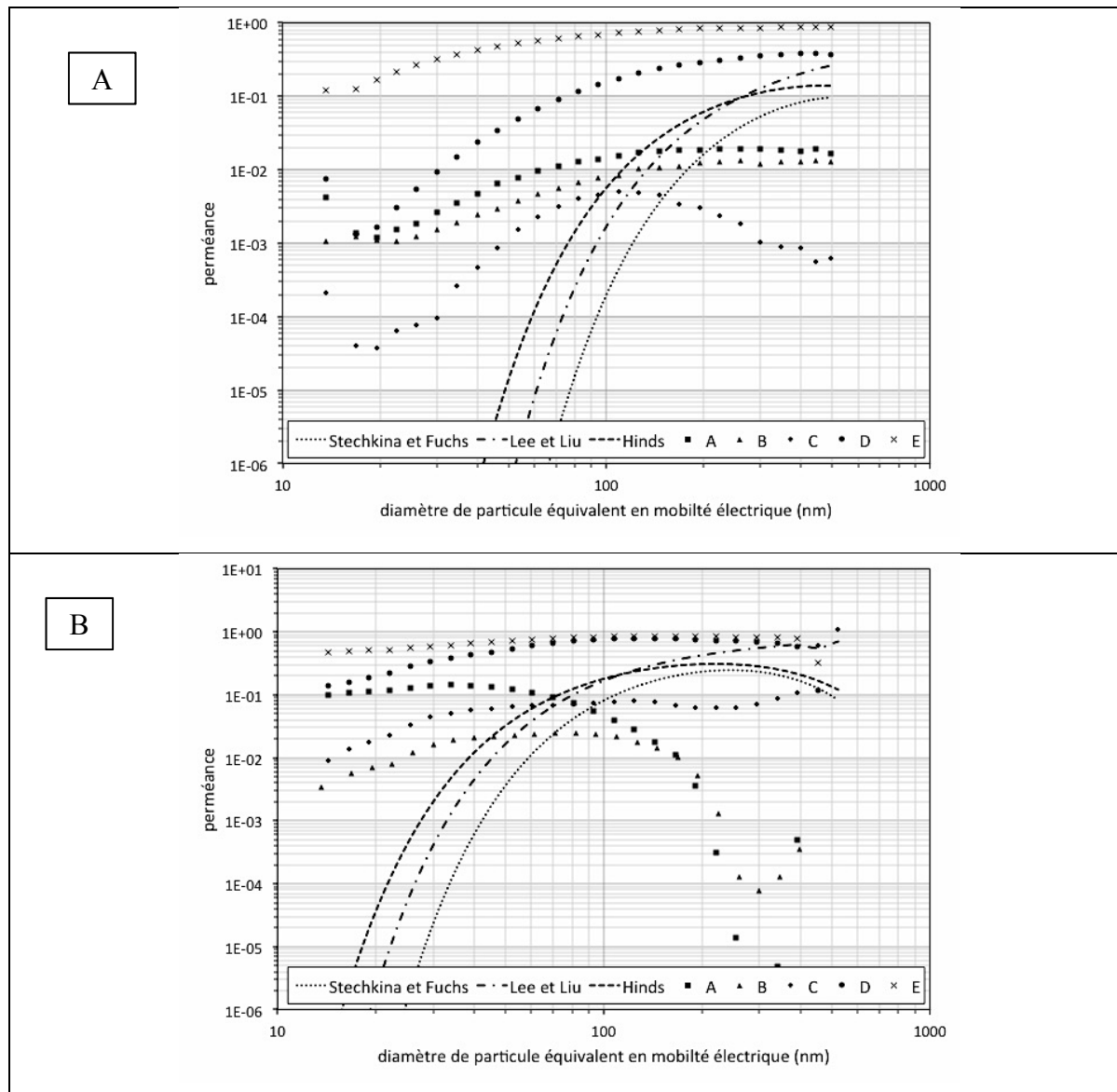


Figure 7-1 : Comparatif de la perméance expérimentale des 5 matériaux avec perméance théorique calculée (selon le matériau D) selon les modèles de Stechkina et Fuchs, de Lee et Liu et de Hinds : A - SMPS; B - EEPS

Au vu des différentes données obtenues, il apparaît relativement difficile de s'appuyer sur les modèles existants pour expliquer les résultats expérimentaux. Ceci est principalement dû au fait que ces différents modèles se basent sur l'écoulement autour d'un arrangement idéalisé de fibres qui est loin de traduire la réalité. Ces modèles nécessitent d'être confrontés et ajustés en fonction de résultats expérimentaux afin de mieux prendre en compte la complexité structurelle des matériaux textiles utilisés dans la conception des VPC. De plus, comme présenté au chapitre sur la littérature (2.4.1), le modèle développé sera fonction du domaine FAN au lieu de celui de Kuwabara, car plus représentatif du médium et des conditions réelles, comme expliqué à la section 2.4. Il semble donc nécessaire de développer un modèle de filtration adapté à ces matériaux.

7.2 Développement d'un modèle de l'efficacité de collecte

Avant toute chose, cette partie ne traitera que du développement d'un modèle pour le matériau D. Les trois premiers médias ont des efficacités relativement importantes qui satisfont à leur usage, il n'est donc pas utile d'étudier plus en détail leurs mécanismes de capture. Le matériau E n'est clairement pas destiné à protéger contre les aérosols (de taille étudiée), il est donc préférable de se consacrer au médium présentant une perméance en contradiction avec son utilisation.

L'efficacité de collecte est dépendante de l'efficacité unitaire de collecte (équation (2.7)) qui dépend elle-même de plusieurs mécanismes, comme présenté au (2.4.2). Ainsi, en considérant l'échelle de taille des particules utilisées pour cette étude, les principaux mécanismes de collecte sont la diffusion et l'interception (Bémer et al., 2006). En se basant sur le comparatif de l'efficacité de collecte totale expérimentale et théorique, il apparaît que la collecte par diffusion exprimée par les modèles théoriques ne correspond pas aux résultats expérimentaux, comme illustré par la Figure 7-2, et ce, peu importe la vitesse de filtration.

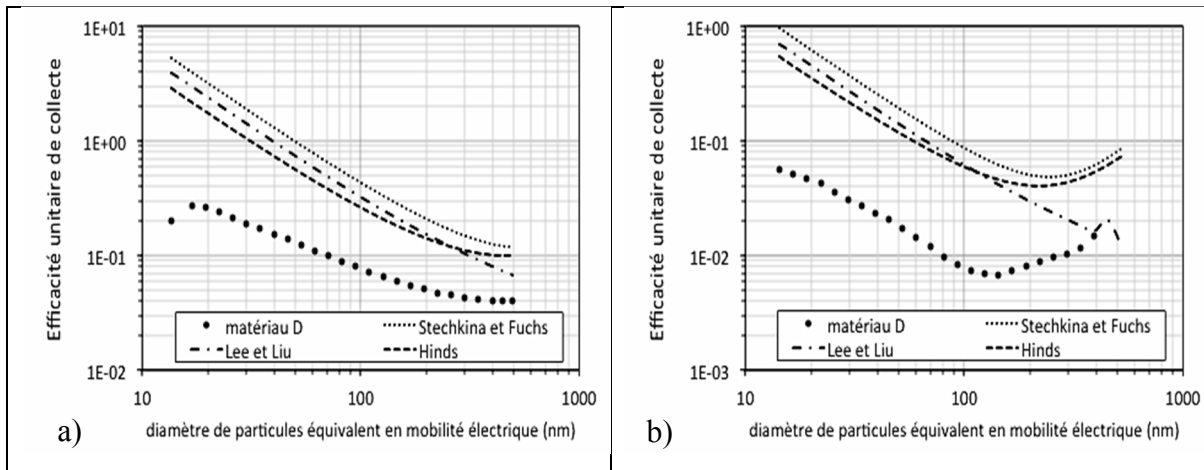


Figure 7-2 : Efficacité unitaire de collecte expérimentale et théorique en fonction du diamètre de particules pour le média D – a) $U = 0,4$ cm/s et b) $U = 7$ cm/s

La comparaison entre les trois modèles théoriques sélectionnés et les résultats expérimentaux montre, dans un premier temps, que l'efficacité unitaire de collecte globale diminue avec l'augmentation du diamètre, comme proposé par toutes les expressions théoriques. Toutefois, les résultats obtenus avec le matériau D présentent une courbe non linéaire qui tend vers une stabilisation de l'efficacité pour un diamètre supérieur à 300 nm pour $U = 0,4$ cm/s et augmente dans le cas de $U = 7$ cm/s pour $d_p > 150$ nm. Les modèles de Hinds et Steckina présentent les mêmes similitudes. Ce profil de courbe trouve son explication dans la mise en œuvre des différents mécanismes de capture. En effet, pour un diamètre inférieur à 100 nm, la diffusion prédomine d'où une pente négative de la courbe. La stabilisation ou l'augmentation de l'efficacité s'explique ensuite par l'entrée en jeu des autres mécanismes de collecte, que sont l'interception et l'impaction, bien que ce dernier soit négligeable dans ce cas. De plus, cette figure permet de mettre en évidence le fait que l'efficacité de collecte due à la diffusion ne peut être modélisée par une équation dont le nombre de Peclet est à la puissance $-2/3$. Le modèle proposé par Hinds, bien que le plus proche des résultats expérimentaux ne permet pas de modéliser adéquatement l'efficacité de collecte obtenue pour le médium D. En outre, celui-ci ne fait pas intervenir la structure réelle du média. Par conséquent, en se basant sur ce modèle, il a été décidé d'en développer un nouveau plus approprié au média D.

7.2.1 Modélisation de l'efficacité de collecte pour le matériau D – U = 0,4 cm/s

7.2.1.1 Efficacité unitaire de collecte par diffusion

Tel que l'ont démontré les différents modèles développés à ce jour, l'efficacité de collecte d'un filtre due à la diffusion est évaluée en fonction du nombre de Peclet. Dans certains cas, elle dépend également de la compacité du média et du facteur hydrodynamique H (Stechkina et Fuchs, Lee et Liu). Cependant, la majorité des expressions utilisées pour exprimer l'efficacité unitaire due à la diffusion utilisent le nombre de Peclet à la puissance -2/3. Or, comme montrée précédemment, l'expérimentation ne suit pas cette tendance. Cela a par ailleurs été confirmé par les études expérimentales de Wang et Brochot qui utilisent tous deux des puissances non fractionnaires. De même, le coefficient multiplicateur du nombre de Peclet utilisé par Hinds ne semble pas correspondre. Ainsi, pour estimer l'efficacité unitaire par diffusion, il est préférable d'utiliser l'expression suivante :

$$\eta_d = A.Pe^{-m} \quad (7.1)$$

où les paramètres A et m sont à déterminer selon le matériau utilisé.

La corrélation (de type puissance) de l'efficacité unitaire de collecte en fonction du nombre de Peclet (Figure 7-3), permet l'obtention des paramètres A et m.

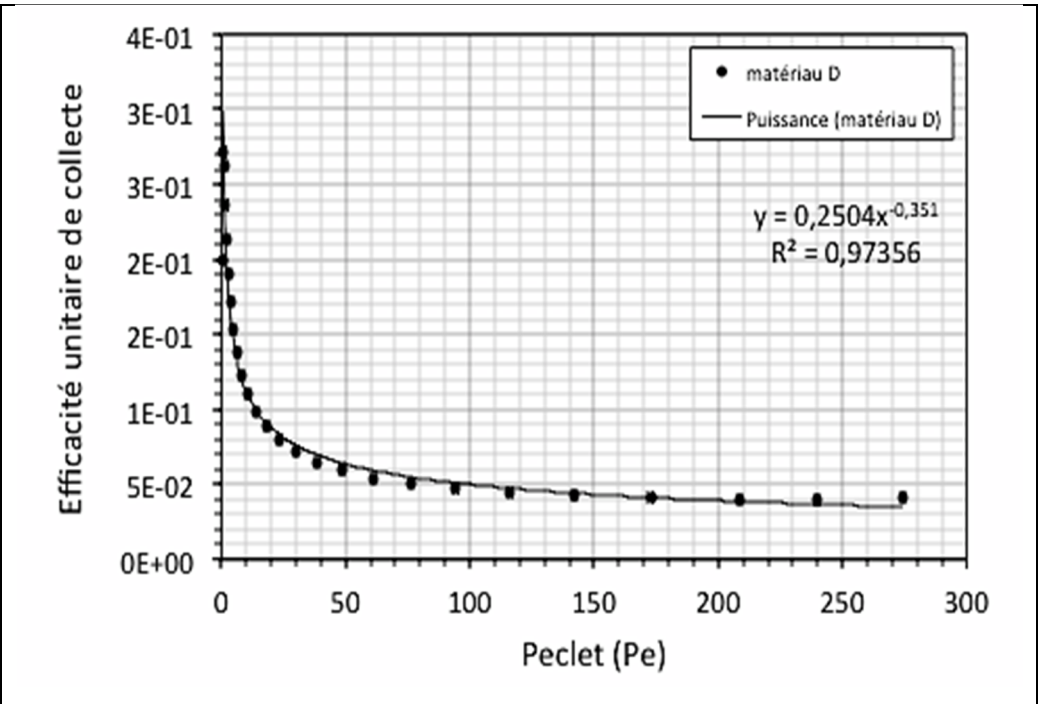


Figure 7-3 : Corrélation de l'efficacité unitaire de collecte en fonction du nombre de Peclet pour le média D – U = 0,4 cm/s

La figure précédente permet de mettre en évidence qu'une corrélation de type puissance est la mieux adaptée pour exprimer l'efficacité unitaire de collecte par diffusion. Ainsi, en effectuant une régression de type puissance, les paramètres A et m peuvent être déterminés grâce à l'équation de la droite de régression. Leurs valeurs sont listées dans le Tableau 7-2; elles ont été obtenues sur différents échantillons du médium.

Tableau 7-2 : Paramètres de l'efficacité unitaire par diffusion obtenue pour le média D

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	moyenne
A	0,25	0,25	0,23	0,26	0,26	0,26	0,25 ± 0,01
m	0,35	0,345	0,34	0,36	0,37	0,33	0,35 ± 0,01

L'exploitation des ces données montre que les paramètres A et m sont très différents des modèles existants et peuvent se voir attribuer une valeur constante égale à la moyenne des

tests réalisés. A est donc considéré comme une constante dont la valeur est égale à $0,25 \pm 0,01$ et m une constante égale à $0,35 \pm 0,01$.

Le modèle d'efficacité unitaire de collecte par diffusion pour le médium D peut donc s'exprimer de la manière suivante :

$$\eta_{d-MODELE} = 0,25.Pe^{-0,35} \quad (7.2)$$

Ce paramètre ne représente toutefois que la première partie de l'équation globale de l'efficacité du matériau, il est donc important de définir la seconde partie, représentée par le mécanisme de collecte par interception.

7.2.1.2 Efficacité unitaire de collecte par interception

De nombreux modèles ont été définis pour déterminer l'efficacité résultante du mécanisme d'interception. La plupart des expressions employées pour l'exprimer utilisent des paramètres propres à chaque matériau comme la compacité, le facteur hydrodynamique et le nombre d'interception calculé selon de diamètre de Davies (équation (2.3)). À l'instar de la diffusion, le modèle proposé par Hinds servira de base pour développer cette partie. Toutefois, comme le montre les Figure 7-1 et Figure 7-2, ce modèle n'est pas en adéquation avec les résultats expérimentaux et nécessite d'être confronté et ajusté en fonction de résultats obtenus. Ainsi, il a été déterminé que l'expression de base nécessite l'ajout d'un coefficient multiplicateur, comme le révèle le modèle de Lee et Liu. L'efficacité unitaire de collecte par interception pour le matériau D peut donc s'exprimer suivant cette expression :

$$\eta_r = B \left(\frac{1 - \alpha}{H_{FAN}} \right) \frac{R^2}{1 + R} \quad (7.3)$$

où le coefficient B est déterminé selon le médium et les conditions opératoires.

Les valeurs de B sont listées dans le Tableau 7-3 et ont été obtenues à l'aide de différentes mesures expérimentales.

Tableau 7-3 : Coefficient de l'efficacité unitaire par interception obtenu pour le média D

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	moyenne
B	0,63	0,62	0,50	0,68	0,57	0,60	0,60 ± 0,07

L'exploitation de ces données montre que le coefficient B est similaire au modèle de Lee et Liu et est égale à la valeur moyenne des essais, soit $0,60 \pm 0,07$. Le modèle d'efficacité unitaire de collecte par interception pour le médium D est donc quasiment identique à celui proposé par Lee et Liu, seul diffère l'expression du facteur hydrodynamique. L'expression correspondante est la suivante :

$$\eta_{r-MODELE} = 0,6 \left(\frac{1-\alpha}{H_{FAN}} \right) \frac{R^2}{1+R} \quad (7.4)$$

Les deux équations développées peuvent alors être utilisées dans l'expression de la perméance totale du filtre (équation (2.6)), avec $\eta = 1-(1-\eta_d-MODELE).(1-\eta_r-MODELE)$. Celle-ci est ensuite comparée avec les trois modèles sélectionnés et les résultats expérimentaux à la Figure 7-4.

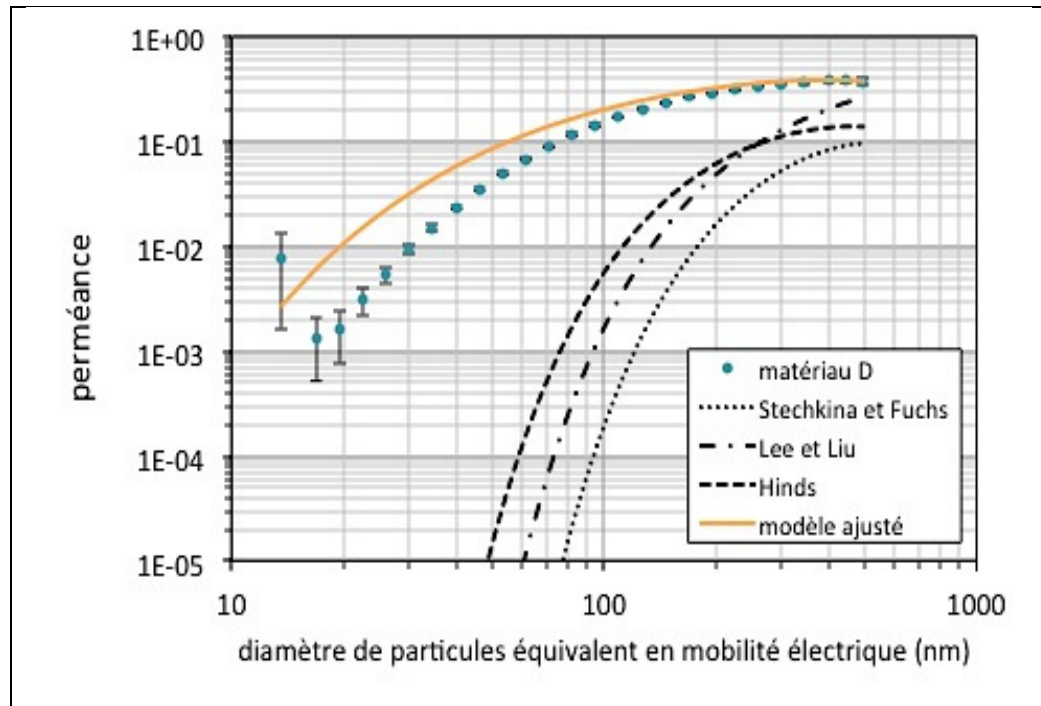


Figure 7-4 : Comparaison de la perméance entre les différents modèles et les résultats expérimentaux pour le média D

Comme le montre la figure, le modèle proposé donne une estimation nettement plus réaliste (coefficient de corrélation = 0,9872) que ceux existants.

$$\eta = 1 - \left(1 - 0,25Pe^{-0,35}\right) \cdot \left(1 - 0,6 \left(\frac{1-\alpha}{H_{FAN}}\right) \cdot \frac{R^2}{1+R}\right) \quad (7.5)$$

Il est important pour qu'un modèle soit utilisable de déterminer son domaine de validité. Celui-ci correspond à un intervalle pour lequel le modèle est valide, compte tenu de la situation qu'il décrit.

Pour déterminer le domaine de validité de ce modèle, il a été décidé de considérer l'écart entre le modèle et son domaine d'application égal à un maximum de 10 %. Étant donné qu'aucune valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) n'existe pour les aérosols du genre étudiés, cet écart a été fixé arbitrairement. Pour valider ce modèle, l'utilisation d'un programme Matlab (développé par L.Vinches et présenté en ANNEXE III) a été nécessaire.

Il permet de définir l'ensemble des paramètres du médium (α et d_f) et de l'expérimentation (U) pour que le modèle reste valide avec un écart de $\pm 10\%$. Pour ce faire, ce programme fait varier les différents paramètres (α , d_f et U) afin de déterminer leurs extrêmes, correspondant pour chaque point de la courbe, afin que l'écart souhaité reste égal à $\pm 10\%$. Ainsi, pour que le modèle proposé soit pertinent (pour le système réel), son application doit être restreinte au domaine d'étude suivant :

$$0,08 < \alpha < 0,24$$

$$2\mu\text{m} < d_f < 5\mu\text{m}$$

$$0,15 \text{ cm/s} < U < 0,90 \text{ cm/s}$$

7.2.2 Modélisation de l'efficacité de collecte pour le matériau D – $U = 7 \text{ cm/s}$

Dans un premier temps il a été décidé d'appliquer le modèle développé précédemment (7.2.1) aux résultats obtenus avec l'appareil EEPS dont la vitesse de flux est de 7 cm/s . La comparaison est présentée à la Figure 7-5.

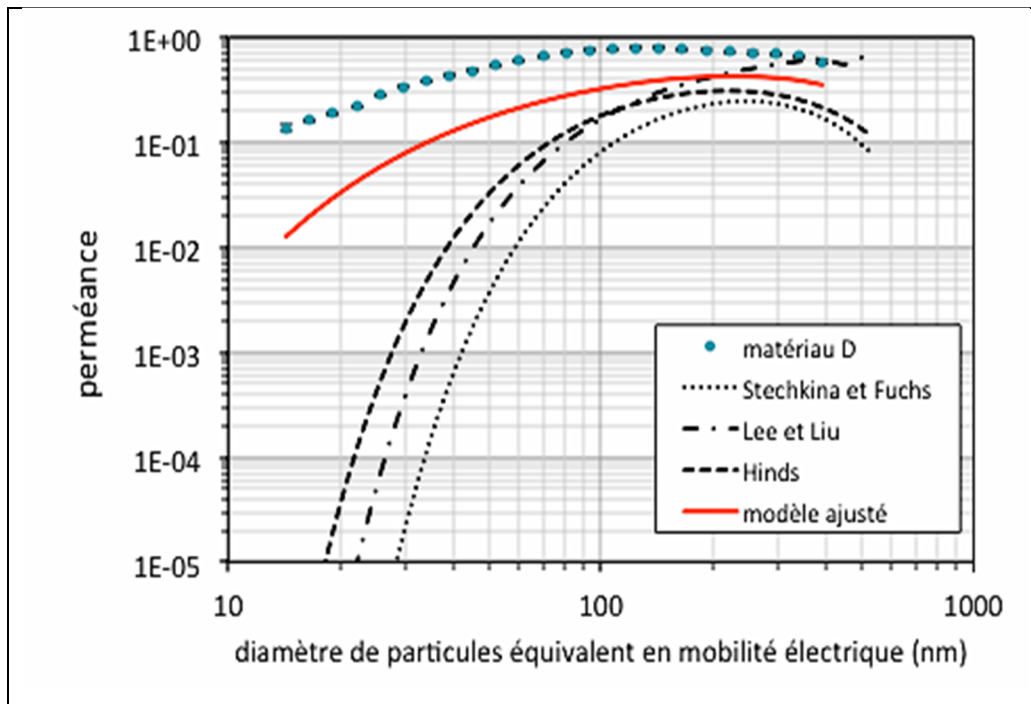


Figure 7-5 : Comparaison de la perméance à $U = 7 \text{ cm/s}$ avec le modèle développé pour $U = 0,4 \text{ cm/s}$ - média D

Comme le domaine de validité le prédisait, le modèle développé pour $U = 0,4 \text{ cm/s}$ ne s'applique pas pour les résultats obtenus avec une vitesse presque vingt fois supérieure (coefficient de corrélation de 0,8833). En effet, la vitesse de filtration intervient directement dans l'expression de l'efficacité de diffusion puisque le nombre de Peclet est dépendant de la vitesse du fluide (équation (2.9)). Ainsi, plus la vitesse du fluide augmente, plus le nombre de Peclet augmente et plus l'efficacité de diffusion diminue. Ce phénomène est par ailleurs en accord avec la théorie de la filtration classique qui stipule que la diffusion des particules est minimisée par l'augmentation de la vitesse du fluide transporteur (Hervé-Bazin, 2007; Hinds, 1999). En témoigne la Figure 7-6 qui présente l'efficacité unitaire de collecte par diffusion en fonction du nombre de Peclet.

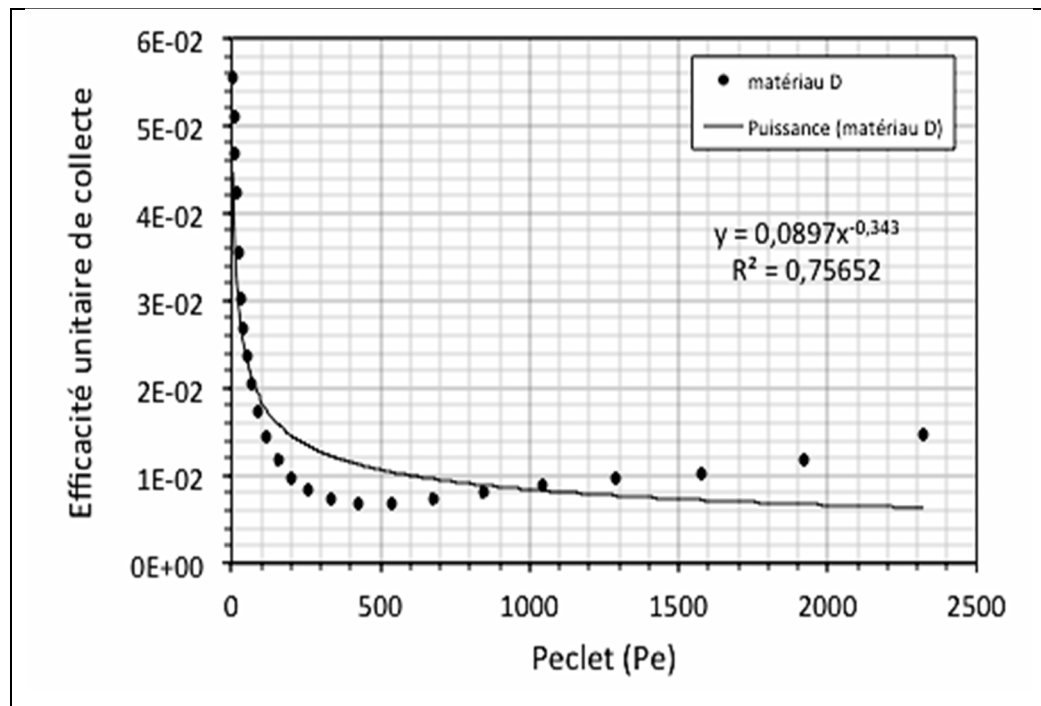


Figure 7-6 : Corrélation de l'efficacité unitaire de collecte en fonction du nombre de Peclet pour le média D – $U = 7 \text{ cm/s}$

En comparant cette figure avec la Figure 7-3, l'efficacité de diffusion apparaît nettement moins importante pour une vitesse de flux élevée.

Le modèle précédemment développé n'étant pas adapté à la vitesse de l'EEPS, il est donc important d'en développer un autre. Pour ce faire, le même protocole utilisé à la section 7.2.1 est employé et le résultat est présenté Figure 7-7.

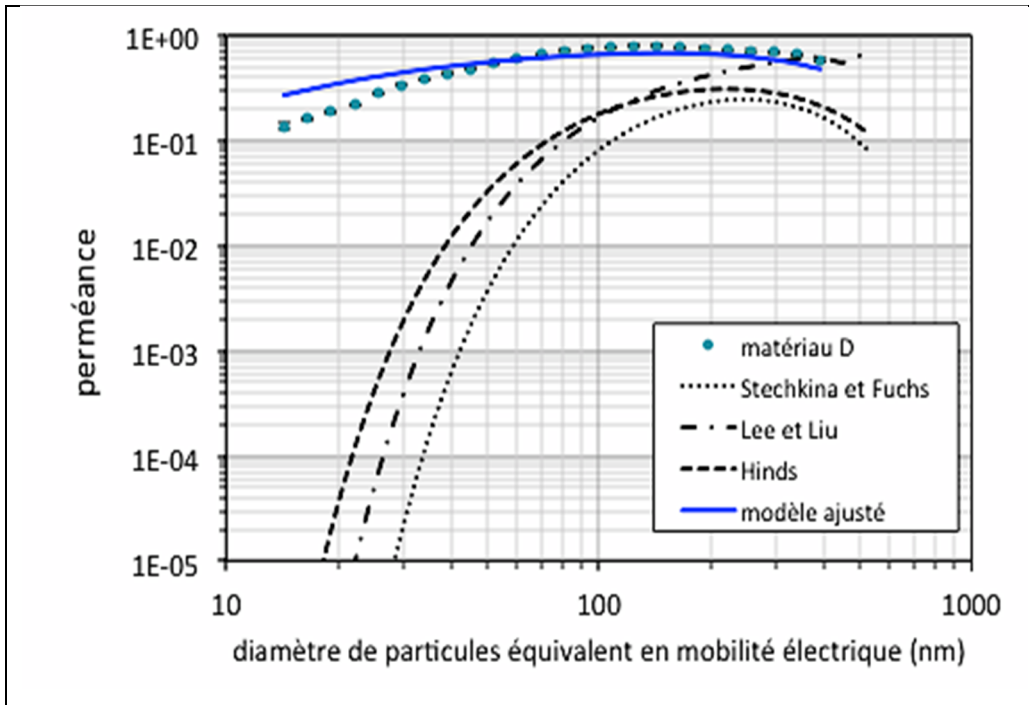


Figure 7-7 : Comparaison de la perméance entre les différents modèles et les résultats expérimentaux pour le média D – $U = 7$ cm/s

La régression de type puissance a permis de définir la valeur de 0,09 pour A et 0,34 pour m. L'interception n'étant pas dépendante de la vitesse de filtration, le coefficient B est resté inchangé et est égal à 0,6. Comme pour le modèle précédent, celui proposé ici donne une estimation assez réaliste (coefficient de corrélation de 0,9452) de l'expérimentation. L'équation du modèle pour le matériau D soumis à une vitesse de flux de 7 cm/s est la suivante :

$$\eta = 1 - \left(1 - 0,09 Pe^{-0,34}\right) \cdot \left(1 - 0,6 \left(\frac{1 - \alpha}{H_{FAN}}\right) \cdot \frac{R^2}{1 + R}\right) \quad (7.6)$$

Comme déterminé pour le précédent modèle, le domaine de validité a été fixé à $\pm 10\%$, le même programme que discuté à la section 7.2.1 a été utilisé et a ainsi permis de restreindre le domaine de validité du modèle aux intervalles suivants :

$$0,120 < \alpha < 0,260$$

$$4\mu\text{m} < d_f < 10\mu\text{m}$$

$$5,5 \text{ cm/s} < U < 10 \text{ cm/s}$$

Bien que les paramètres α et d_f aient une partie de leur domaine commun dans les deux modèles proposés, la principale limitation à la généralisation d'un modèle est la vitesse de filtration U . Cette étude a permis de démontrer que pour un même média les conditions opératoires influent de manière importante sur son efficacité. Afin de pouvoir prédire le caractère protecteur d'un VPC il est donc primordial de bien étudier l'environnement dans lequel celui-ci sera utilisé.

Ces deux modèles, bien que satisfaisants, ont été validés uniquement dans le cadre de cette thèse. Par conséquent, il serait préférable de poursuivre cette étude en modifiant certains paramètres comme la nature chimique des particules ou leur forme. De même, il serait préférable de travailler avec des vitesses d'air représentatives des conditions réelles et non avec celles imposées par les appareils. En effet, comme l'ont démontré les différents résultats, la vitesse du fluide joue un rôle important sur l'efficacité des matériaux.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE L'ÉTUDE

L'objectif premier de cette thèse était de montrer expérimentalement si les matériaux de vêtements de protection chimique de type 5 sont efficaces contre des aérosols nano et submicronique. Dans cette optique, ce projet a permis d'approfondir les connaissances sur les performances des matériaux les composant, en conditions proches des conditions réelles d'utilisation.

Dans un premier temps, l'étude bibliographique, présentant les normes associées aux VPC de type 5 étudiés, a montré que les normes actuelles ne permettent pas de déterminer l'efficacité de ces VPC pour des nanoparticules. Par ailleurs, il n'existe actuellement aucune ligne directrice permettant d'aiguiller les acheteurs ou utilisateurs sur la sélection du VPC de type 5 adéquat, principalement dû au fait du manque de données sur leur efficacité contre les nanoparticules. Ainsi, il n'est actuellement pas possible pour les travailleurs de sélectionner leurs vêtements en se basant sur leurs besoins spécifiques de protection.

Les études menées antérieurement sur l'efficacité des vêtements de protection cutanée contre des particules aéroportées ont généralement été obtenues pour des matériaux textiles non spécifiques à la protection contre les nanoparticules. Il s'agit ici de la première étude à cibler spécifiquement les VPC et plus précisément les VPC de type 5. De plus, une majorité de ces études a été menée sans prendre en compte les conditions réelles d'utilisation des matériaux. Bien que certaines aient déterminé l'influence de la vitesse d'air, aucune n'a pris en compte la déformation des matériaux lors de leur utilisation.

Suite à cette phase descriptive, la déformation des vêtements de protection sélectionnés a été mesurée à l'aide de capteurs de déformation souple développés exclusivement en ce sens. Une fois les tests de caractérisation et de calibration effectués, les capteurs ont été apposés sur plusieurs combinaisons de tailles différentes. Les résultats obtenus ont démontré que l'allongement moyen subi par les matériaux était d'environ 2,5 mm (6,25 %) et que les

zones les plus sollicitées sont les articulations des genoux et des coudes. Aux meilleurs de nos connaissances, il s'agit de la toute première étude réalisée sur le sujet.

Les résultats ont été toutefois obtenus sur un faible nombre de sujets. Il apparaît donc nécessaire d'approfondir cette étude en ayant recours à un panel de sujets plus important (au moins trois sujets par taille de combinaison), avec de préférence différentes morphologies pour une même taille de vêtement et différents vêtements.

Par ailleurs, les données obtenues grâce à cette étude de déformation jumelées à une analyse du comportement mécanique des matériaux ont permis de déterminer la déformation à appliquer aux matériaux lors des tests de pénétration. Ainsi, afin d'étudier plus précisément le rôle de la déformation des matériaux sur l'efficacité de protection des VPC, trois niveaux de déformation ont été choisis : 2, 5 et 10 mm, représentant un allongement de 5%, 12,5% et 25% respectivement. Ces trois seuils correspondent à un allongement faible, un allongement modéré et un allongement extrême des matériaux. Le but étant de déterminer si un accroissement de la déformation influe sur la pénétration de particules à travers les vêtements de protection.

L'efficacité des matériaux, constituant les vêtements sélectionnés, a ensuite été mesurée à l'aide d'un banc d'essai spécialement développé pour mesurer la pénétration de particules pendant que les matériaux sont soumis à des déformations mécaniques. Les résultats de pénétration des matériaux ont été obtenus en utilisant trois appareils de mesure : un SMPS, un EEPS et un P-Trak. Ces appareils ont été choisis pour déterminer, dans un premier temps, l'apport respectif de chacune des techniques pour caractériser l'efficacité de filtration et évaluer enfin l'effet de la vitesse de filtration sur cette efficacité.

Les mesures de pénétrations totales obtenues mettent en évidence de grandes différences entre les matériaux, mais également entre les trois appareils. Néanmoins, une même tendance se dégage : les matériaux nontissés (A, B, C et D) présentent tous une pénétration plus faible que le tissu (E). Toutefois, les nontissés A, B et C montrent une pénétration nettement plus

faible que D. Cela peut s'expliquer principalement par les caractéristiques intrinsèques des matériaux. En effet, D et E sont les deux matériaux dont la perméabilité à l'air est la plus élevée. Toutefois, certaines interrogations demeurent. En effet, bien que les matériaux C et D soient quasiment identiques, leurs taux de pénétration diffèrent pourtant d'un facteur 10 et pas dans le sens escompté (cinq couches sont moins efficaces que trois).

En s'attardant sur les courbes granulométriques, il a été mis en évidence un comportement très différent entre les matériaux. Par exemple, les résultats SMPS mettent de l'avant que le nontissé C présente une MPPS aux alentours de 100 nm alors que pour les autres textiles elle se situe entre 300 nm et 500 nm. Par ailleurs, les autres matériaux présentent des résultats en concordance avec plusieurs études sur la filtration des aérosols nanométriques et submicroniques qui ont montré, dans les domaines étudiés, que la pénétration des aérosols à travers des médias textiles augmente avec la taille de l'aérosol. À l'inverse, les mesures EEPS présentent des résultats très disparates. Les textiles A et B montrent des courbes granulométriques mettant de l'avant un phénomène qui n'avait jamais été observé auparavant. En effet, une fois atteint la MPPS (vers 80 nm) la pénétration chute pour des tailles de particules jusqu'à 200 nm. À l'inverse les trois autres matériaux présentent des courbes granulométriques, à l'instar des résultats SMPS, en constante augmentation. Ces résultats permettent de mettre en avant le fait que les matériaux A, B et C offrent la meilleure efficacité. Cependant, le matériau C offre une meilleure perméabilité à l'air et une perte de charge nettement inférieure aux deux autres. Par conséquent, bien que ce ne soit pas les seuls paramètres à prendre en compte, il semblerait que C puisse offrir également un meilleur confort aux utilisateurs.

Cette étude trouve ses limites dans la difficulté à caractériser les matériaux textiles. En effet, ces matériaux, en particulier les non-tissés, ne sont pas des matériaux isotropes et leurs méthodes de fabrication ne permettent pas de les rendre homogènes. De plus certaines structures multicouches sont plus difficiles à étudier, et demandent des techniques d'analyse particulières (microscopie confocale, microtomographie, etc.). Ces méthodes permettraient

de mieux caractériser les textiles en donnant des renseignements supplémentaires, par exemple la tortuosité des matériaux ou alors leur porosité après déformation.

Cette étude s'est consacrée à l'étude exclusive des matériaux de VPC et à la pénétration directe de particules à travers ceux-ci. Cependant cela constitue le début d'un travail beaucoup plus long. En effet, les VPC sont constitués d'annexes (coutures, fermeture Éclair et jonction peau/VPC) qui offrent autant de sites de pénétration. Par conséquent, d'autres études devraient être réalisées pour mesurer de manière granulométrique les fuites vers l'intérieur.

Concernant les équipements utilisés, le SMPS mène aux résultats de pénétration les résultats les plus faibles, suivi par le P-Trak et enfin le EEPS. La différence provient principalement du fait que le EEPS a une vitesse d'aspiration à travers les matériaux nettement supérieure à celle des deux autres appareils : 0,073 m/s contre 0,0043 pour le SMPS et 0,0051 m/s pour le P-Trak. Cette vitesse influe directement sur les mécanismes de collecte mis en jeu et par conséquent la taille des particules pénétrantes.

Par contre, les différences observées dans les résultats entre le SMPS et le P-Trak ne trouvent pas d'explication probante et semblent difficilement imputables à la variation de vitesse de filtration existante entre les deux appareils. Il semble indéniable que le choix de l'appareil influe sur l'aspect qualitatif des résultats. Toutefois, cette étude ne permet pas de différencier adéquatement les appareils. Pour ce faire, il aurait été préférable d'utiliser un seul matériau ainsi qu'un aérosol monodisperse afin de limiter les différences imputables à la conception des matériaux et la distribution de taille des particules. Du fait de la cohérence avec d'autres études, l'utilisation d'un SMPS semble la plus indiquée. Toutefois, le P-Trak apparaît comme un outil intéressant pour évaluer rapidement l'efficacité des matériaux. Son prix ainsi que sa facilité d'utilisation en font une bonne alternative pour tous ceux qui souhaitent simplement faire des mesures préliminaires.

En complément de cette étude, deux protocoles de déformation ont été appliqués et comparés. Les résultats obtenus démontrent la difficulté d'étudier l'efficacité des matériaux en condition simulant une utilisation réelle. En effet, les mesures réalisées en déformation dynamique sont plus élevées que celles obtenues en déformation statique. Cette différence est provoquée par le mouvement de la sonde, qui dans un environnement étanche au gaz se comporte comme un piston et crée une aspiration des particules à travers le matériau à chaque remontée. Ce phénomène est accentué pour le EEPs à cause de son fort débit d'aspiration.

Il apparaît que ce système de déformation ne semble pas être le plus adapté à une telle étude. Il serait peut-être préférable de remplacer la déformation appliquée par une traction uniaxiale ou biaxiale, de ce fait, le matériau peut subir des déformations dynamiques sans que la mesure de pénétration s'en trouve perturbée par des cycles de surpression/dépression.

Finalement, il a été mis en évidence, à partir des résultats granulométriques, que la théorie de la filtration classique peut servir de base pour prédire les efficacités de collecte des matériaux de VPC. Cependant, la multitude d'études et de modèles existants nécessite un travail long et fastidieux pour déterminer l'expression exacte pour chaque matériau. De plus, la modélisation de l'efficacité de ces médias a démontré la complexité pour définir un modèle unique. En effet, leurs paramètres intrinsèques (structure, perméabilité, porosité, etc.) ainsi que les conditions environnementales (humidité, température, vitesse de fluide, etc.) sont des facteurs importants pour concevoir un modèle. Ainsi pour un même matériau, avec des conditions environnementales d'utilisation différentes, nécessitera l'utilisation de plusieurs modèles pour prédire son efficacité dans les différentes configurations, comme en témoignent les modèles développés lors de cette étude.

D'autre part, bien que les modèles proposés soient satisfaisants, leur validité n'est vérifiée que pour un seul matériau. Par conséquent, il serait préférable de poursuivre cette étude en modifiant certains paramètres comme la nature chimique des particules ou leur forme. De même, il serait préférable de travailler avec des vitesses d'air représentatives des conditions

réelles et non avec celles imposées par les appareils. Étant donné que cette étude n'a été faite que sur les matériaux composant les VPC, les modèles proposés ne reflètent pas l'efficacité totale des VPC. Certains paramètres n'ont pas été considérés, comme l'infiltration de l'aérosol par les coutures ou les jonctions (poignets, cou et chevilles).

En perspective de ce travail, il serait intéressant de développer un modèle précis afin d'évaluer l'efficacité de collecte pour chaque VPC dans son ensemble. Celui-ci devra prendre en compte les caractéristiques intrinsèques à chacun des médias (compacité, porosité, tortuosité, etc.). De plus, pendant les essais de pénétration, la forme des particules peut jouer un rôle sur l'efficacité mesurée des médias. L'interaction entre les VPC et des particules de différentes formes, reste à ce jour un domaine très peu étudié. Des essais de pénétration avec des particules de géométrie différente, telles que des tubes (nanotube de carbone), des sphères (silice, latex), etc., renseigneraient de l'importance que peut avoir la forme des particules dans les modèles théoriques proposés jusqu'à ce jour.

En conclusion, il a été démontré ici l'importance du choix du matériau utilisé pour concevoir les VPC. Bien que l'étude ait besoin d'être approfondie, elle permet de prendre conscience de la nécessité d'établir une base de données regroupant l'efficacité des VPC de type 5 vis-à-vis d'aérosols nano et submicronique. D'autre part, cette étude a permis de démontrer la relative complexité à analyser les résultats en fonction de l'appareillage utilisé. Elle a aussi permis de mettre en évidence l'importance d'analyser la granulométrie des aérosols afin de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu, ainsi que déterminer les tailles de particules les plus pénétrantes. De ce fait, il serait préférable que les normes actuelles soient adaptées pour prendre en compte ce paramètre.

ANNEXE I

RÉSULTATS DES MESURES D'ALLONGEMENT DES VPC

Tableau-A I-1: Allongements moyens mesurés pour chaque capteur – Taille S

Capteur	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Allongement (mm)	2,36	2,21	1,29	3,12	1,98	2,21	1,54	2,57	2,67
ET (mm)	0,29	0,26	0,21	0,45	0,52	0,16	0,30	0,23	0,51
Allongement (%)	5,9	5,5	3,2	7,8	5,0	5,5	3,9	6,4	6,7
ET (%)	0,7	0,7	0,5	1,1	1,3	0,4	0,8	0,6	1,3

Tableau-A I-2: Allongements moyens mesurés pour chaque capteur – Taille L

Capteur	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Allongement (mm)	2,65	2,28	1,12	3,91	2,12	2,88	1,85	2,29	2,9
ET (mm)	0,31	0,26	0,15	0,61	0,64	0,15	0,35	0,18	0,47
Allongement (%)	6,6	5,7	2,5	9,8	5,3	7,2	4,6	5,7	7,3
ET (%)	0,8	0,7	0,4	1,5	1,6	0,4	1,0	0,5	1,2

Tableau-A I-3: Allongements moyens mesurés pour chaque capteur – Taille 2XL

Capteur	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Allongement (mm)	1,51	2,14	1,31	1,55	1,81	2,33	1,60	1,78	1,67
ET (mm)	0,41	0,33	0,35	0,16	0,33	0,30	0,22	0,11	0,41
Allongement (%)	3,8	5,4	3,3	3,9	4,5	5,8	4,0	4,5	4,2
ET (%)	1,0	0,8	0,9	0,4	0,8	0,8	0,6	0,3	1

ANNEXE II

ALGORITHME DE DÉTECTION DES PICS

Code développé et rendu public par l'ingénieur Eli Billauer permettant la détection de pics dans un signal :

```
maxtab = [];  
mintab = [];  
v = v(:); % Just in case this wasn't a proper vector  
if nargin < 3  
    x = (1:length(v))';  
else  
    x = x(:);  
    if length(v) ~= length(x)  
        error('Input vectors v and x must have same length');  
    end  
end  
if (length(delta(:))) > 1  
    error('Input argument DELTA must be a scalar');  
end  
if delta <= 0  
    error('Input argument DELTA must be positive');  
end  
mn = Inf; mx = -Inf;  
mnpos = NaN; mxpos = NaN;  
lookformax = 1;  
for i=1:length(v)  
    this = v(i);  
    if this > mx, mx = this; mxpos = x(i); end  
    if this < mn, mn = this; mnpos = x(i); end  
    if lookformax  
        if this < mx-delta  
            maxtab = [maxtab ; mxpos mx];  
            mn = this; mnpos = x(i);  
            lookformax = 0;  
        end  
    else  
        if this > mn+delta  
            mintab = [mintab ; mnpos mn];  
            mx = this; mxpos = x(i);  
            lookformax = 1;  
        end  
    end  
end  
end
```


ANNEXE III

PROGRAMME MATLAB DE VALIDATION DES MODÈLES D'EFFICACITÉ

Code développé le Dr. Ludwig Vinches permettant de déterminer le domaine de validité des modèles :

```
function [R, Knf, H, ER, Knp, Cc, Dif, Pec, ED, ETH, PTH] =  
proposed_model_SMMMS_MBS  
%%Constantes  
t=323E-6;           %épaisseur (m)  
Vd=1.81E-5;         %viscosité dynamique (Pa.s)  
kb=1.3805E-23;      %constante de Boltzmann (m2.kg/s2/K)  
Temp=295.15;        %température (K)  
Lp=6.5E-8;          %libre parcours moyen (m)  
alpha=0.190;        %compacité  
fiber=3.94E-6;      %diamètre des fibres - Utilisation du diamètre de Davies  
(m)  
U=0.07256;          %vitesse du flux (m/s)  
  
%% Calcul de l'efficacité unitaire totale et de la pénétration théorique %  
  
i=1;  
for part = 10.E-9:10E-9:500.E-9  
i=i+1;  
R = part/fiber;  
Knf = (2*Lp)/fiber;  
H=-0.5*log(alpha)-0.53+0.64*alpha+1.43*(1-alpha)*Knf;  
ER = 0.3*((1-alpha)/H)*(R^2/(1+R));  
Knp = (2*Lp)/(part);  
Cc = 1+Knp*(1.165+0.483*exp(-0.997/Knp));  
Dif = (kb*Temp*Cc)/(3*pi*Vd*part);  
Pec = (U*fiber)/Dif;  
ED = 0.23*Pec.^(-0.545);  
ETH = ER+ED;  
PTH(i) = exp((-4*ETH*(alpha/(1-alpha))*(t/(pi*fiber))))*100;  
end  
  
function [R, Knf, H, ER, Knp, Cc, Dif, Pec, ED, E, P] =  
parameters_SMMMS_MBS  
  
%%Constantes  
t=323E-6;           %épaisseur (m)  
Vd=1.81E-5;         %viscosité dynamique (Pa.s)  
kb=1.3805E-23;      %constante de Boltzmann (m2.kg/s2/K)  
Temp=295.15;        %température (K)  
Lp=6.5E-8;          %libre parcours moyen (m)  
  
%% Compteurs + domaines du calcul
```

```

format shortEng

i=1;
for part = 10.E-9:10E-9:500.E-9
i=i+1;
j=1;
for alpha = 0.020:0.020:0.300
j=j+1;
k=1;
for fiber = 1E-6:0.5E-6:10E-6
k=k+1;
l=1;
for U = 0.01:0.005:0.1
l=l+1;

%% Calcul des paramètres utiles pour le calcul de l'efficacité unitaire
due à l'interception %%

%Calcul de R
R(i,j,k,l) = part/fiber;

% Calcul du nombre de Knudsen de fibre
Knf(i,j,k,l) = (2*Lp)/fiber;

% Calcul du nombre de Knudsen de particule
Knp(i,j,k,l) = (2*Lp)/part;

% Calcul du facteur hydrodynamique
H(i,j,k,l) = -0.5*log(alpha)-0.53+0.64*alpha+1.43*(1-alpha)*Knf(i,j,k,l);

% Calcul de l'efficacité unitaire due à l'interception
ER(i,j,k,l) = 0.3*((1-alpha)/H(i,j,k,l))*(R(i,j,k,l)^2/(1+R(i,j,k,l)));

%% Calcul des paramètres utiles pour le calcul de l'efficacité unitaire
due à la diffusion %%

%Calcul du nombre de Cunningham
Cc(i,j,k,l) = 1+Knp(i,j,k,l)*(1.165+0.483*exp(-0.997/Knp(i,j,k,l)));

% Calcul du coefficient de diffusion
Dif(i,j,k,l) = (kb*Temp.*Cc(i,j,k,l))./(3*pi*Vd*part);

% Calcul du nombre de Peclet
Pec(i,j,k,l) = (U*fiber)/Dif(i,j,k,l);

% Calcul de l'efficacité unitaire due à la diffusion
ED(i,j,k,l) = 0.23*Pec(i,j,k,l)^(-0.545);

%% Calcul de l'efficacité unitaire totale et de la pénétration théorique

% Efficacité unitaire totale

```



```

E(i,j,k,l) = ER(i,j,k,l)+ED(i,j,k,l);

%Pénétration théorique et affichage des résultats
P(i,j,k,l) = exp((-4*E(i,j,k,l)*(alpha/(1-alpha))*(t/(pi*fiber))))*100;
end
end
end
end

%% Détermination du domaine de validité

i=1;
z=0;
for part = 10.E-9:10E-9:500.E-9
i=i+1;
j=1;
for alpha = 0.020:0.020:0.300
j=j+1;
k=1;
for fiber = 1E-6:0.5E-6:10E-6
k=k+1;
l=1;
for U = 0.01:0.005:0.1
l=l+1;
diff(i,j,k,l) = abs(PTH(i)-P(i,j,k,l));
result(i,j,k,l) = 0;
if diff(i,j,k,l) <= 10 && diff(i,j,k,l) >= 9.9992
result(i,j,k,l) = 1;
z=z+1;
alpha1(z) = alpha;
fiber1(z) = fiber;
U1(z) = U;
else
result(i,j,k,l) = 0;
end
disp('part alpha fiber U Diff Result');
disp([part alpha fiber U diff(i,j,k,l) result(i,j,k,l)]);
end
end
end
end

maxa = max(alpha1);
mina = min(alpha1);
maxf = max(fiber1);
minf = min(fiber1);
maxu = max(U1);
minu = min(U1);

disp('alpha min alpha max fiber min fiber max U min U max');
disp([mina maxa minf maxf minu maxu]);

```


RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A Kirsch, A., et N. A Fuchs. 1968. *Studies on Fibrous Aerosol Filters--III Diffusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters*, 11. 299-304 p.
- Anses. 2014. *Évaluation des risque liés aux nanomatériaux - Enjeux et mise à jour des connaissances*. Coll. « Nanomatériaux et santé », 2012-SA-0273. Maisons-Alfort, 196 p.
- ASTM. 2006. *Standard Terminology Relating to Nanotechnology*. 2456 - 06(2012) West Conshohocken: ASTM, 4 p.
- Bartalesi, R., N. Carbonaro, F. Lorussi, M. Tesconi, A. Tognetti, G. Zupone et D. De Rossi. 2006. « Smart textiles: Toward a wearable motion capture system ». In *Ninth International symposium on the 3D analysis of human movement*. (Valenciennes, France, June 28-30).
- Bémer, D. , R. Régnier, S. Callé, D. Thomas, X. Simon et J.C. Appert-Collin. 2006. *Filtration des aérosols - performance des médias filtrants*. Coll. « Hygiène et sécurité du travail »: INRS, 15 p.
- Billauer. E. 2012. *peakdet: Peak detection using MATLAB*. Consulté le février 2014.
- Boland, Conor S., Umar Khan, Claudia Backes, Arlene O'Neill, Joe McCauley, Shane Duane, Ravi Shanker, Yang Liu, Izabela Jurewicz, Alan B. Dalton et Jonathan N. Coleman. 2014. « Sensitive, High-Strain, High-Rate Bodily Motion Sensors Based on Graphene–Rubber Composites ». *ACS Nano*.
- Boskovic, Lucija, Igor E. Agranovski, Igor S. Altman et Roger D. Braddock. 2008. « Filter efficiency as a function of nanoparticle velocity and shape ». *Journal of Aerosol Science*, vol. 39, n° 7, p. 635-644.
- Brasseur, G., et A. Bondeelle. 2010. « La révolution "Nano" ». *Travail et sécurité*, vol. juillet-août 2010, n° 708, p. 20-37.
- Brochot. C. 2012. « Filtration des nanoparticules - Application aux appareils de protection respiratoire ». Nancy, Institut National Polytechnique de Lorraine 180 p.

- Brun, E., R. Gibson, N. Stacey, E. Draais et H. Wallin. 2012. *Risk perception and risk communication with regard to nanomaterials in the workplace*. TE-RO-12-001-EN-N. Luxembourg: European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA).
- Buzea, C., I. Pacheco et K. Robbie. 2007. « Nanomaterials and nanoparticles: Sources and toxicity ». *Biointerphases*, vol. 2, n° 4, p. MR17-MR71.
- Cochrane, C., V. Koncar, M. Lewandowski et C. Dufour. 2007. « Design and Development of a Flexible Strain Sensor for Textile Structures Based on a Conductive Polymer Composite ». *Sensors*, vol. 7, n° 4, p. 473-492.
- Cochrane, C., M. Lewandowski et V. Koncar. 2010. « A Flexible Strain Sensor Based on a Conductive Polymer Composite for in situ Measurement of Parachute Canopy Deformation ». *Sensors*, vol. 10, n° 9, p. 8291-8303.
- Crosera, M., M. Bovenzi, G. Maina, G. Adami, C. Zanette, C. Florio et F. Larese Filon. 2009. « Nanoparticle dermal absorption and toxicity: a review of the literature ». *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 82, n° 9, p. 1043-1055.
- CSA. 2014. *Vêtements de protection contre les produits chimiques - Classification, étiquetage et exigences de performances* CAN/CGSB/CSA-Z16602:F14.
- Dalle Mura, G., F. Lorussi, A. Tognetti, G. Anania, N. Carbonaro, M. Pacelli, R. Paradiso et D. De Rossi. 2014. « Piezoresistive Goniometer Network for Sensing Gloves ». In *Proceedings of the XIII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing*. (2014). Springer International Publishing.
- Davies, C. N. 1973. *Air filtration*. London Academic Press.
- Debia, M., C. Beaudry, S. Weichenthal, R. Tardif et A. Dufresne. 2012. *Caractérisation et contrôle de l'exposition professionnelle aux nanoparticules et particules ultrafines*. Coll. « Substances chimiques et agents biologiques », R-746. Montréal: IRSST.
- Dupont. 2013. « Dupont safespec 2.0 ». < <http://safespec.dupont.com/safespec/productHome> >. Consulté le 5 mai 2013.

- Elias, P. M. , et K. R. Feingold. 2006. *Skin barrier*. New York Taylor & Francis.
- Elias, P. M., et J. S. Wakefield. 2011. « Skin Barrier Function ». In *Nutrition for Healthy Skin*, sous la dir. de Krutmann, Jean, et Philippe Humbert. p. 35-48. Springer Berlin Heidelberg.
- Fatissou, J., S. Hallé, S. Nadeau, C. Viau, M. Camus, B. Ateme-Nguema et Y. Cloutier. 2013. *Nanoparticules synthétiques - Gestion adaptative des risques à la santé et à la sécurité des travailleurs*. Coll. « Substances chimiques et agents biologiques ». Montréal: IRSST, 55 p.
- Gao, P., P. A. Jaques, T.-C. Hsiao, A. Shepherd, B. C. Eimer, M. Yang, A. Miller, B. Gupta et R. Shaffer. 2011. « Evaluation of Nano- and Submicron Particle Penetration through Ten Nonwoven Fabrics Using a Wind-Driven Approach ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 8, n° 1, p. 13-22.
- Gao, P., W. King et R. Shaffer. 2007. « Review of Chamber Design Requirements for Testing of Personal Protective Clothing Ensembles ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 4, n° 8, p. 562-571.
- Gleiche, M., H. Hoffschulz et S. Lenhert. 2006. *Nanotechnology in consumer products*. Nanoforum
- Golanski, L., A. Guiot, F. Rouillon, J. Pocachard et F. Tardif. 2009. « Experimental evaluation of personal protection devices against graphite nonoerosols - fibrous filters media, masks, protective clothing, and gloves ». *Human & Experimental Toxicology*, vol. 28, p. 353–359.
- Golanski, L., A. Guiot et F. Tardif. 2009. « Experimental evaluation of individual protection devices against different types of nanoaerosols: graphite, TiO₂, and Pt ». *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 12, n° 1, p. 83-89.
- Gulson, B., M. McCall, M. Korsch, L. Gomez, P. Casey, Y. Oytam, A. Taylor, M. McCulloch, J. Trotter, L. Kinsley et G. Greenoak. 2010. « Small Amounts of Zinc from Zinc Oxide Particles in Sunscreens Applied Outdoors Are Absorbed through Human Skin ». *Toxicological Sciences*, vol. 118, n° 1, p. 140-149.

- Hanley, J. T. 2006. « Aerosol system and swatch testing of chemical protective garments ». In *Elevated Wind Studies International Conference*. (Arlington, VA, Arlington, 25-26 septembre 2006). Research Triangle Institute.
- Hervé-Bazin, B. 2007. *Les nanoparticules: un enjeu majeur pour la santé au travail?* Coll. « Avis d'experts ». Les Ulis: EDP sciences.
- Hill, M. A., T. A. Ghee, J. Kaufman et S. Dhaniyala. 2013. « Investigation of Aerosol Penetration Through Individual Protective Equipment in Elevated Wind Conditions ». *Aerosol Science and Technology*, vol. 47, n° 7, p. 705-713.
- Hinds, William C. 1999. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons.
- Hofacre, K. C. 2006. « Aerosol penetration of fabric swatches ». In *Elevated Wind Studies International Conference*. (Arlington, VA, Arlington, 25-26 septembre 2006). Battelle.
- Huang, S-H., Y-H. Huang, C-W. Chen et C-P. Chang. 2007. « Nanoparticles penetration through protective clothing materials ». In *3rd International Symposium on Nanotechnology, Occupational and Environmental Health*. (Taiwan).
- Hutten, I. M. (473). 2007. *Handbook of nonwoven filter media*. Elsevier Science & Technology Books.
- INRS. 2015. *Quels vêtements de protection contre les risques chimiques ?* . Coll. « Fiche pratique de sécurité », ED 127, 4 p.
- INRS. 2016. *Noir de carbone - Fiche toxicologique synthétique n°264*.
- ISO. 16602. 2007. *Vêtements de protection contre les produits chimiques -- Classification, étiquetage et exigences de performances*.
- ISO. 80004-4. 2015. *Nanotechnologies -- Vocabulaire -- Partie 2: Nano-objets*. 7 p.
- ISO, NF EN. 13982-1. 2004. *Vêtements de protection à utiliser contre les particules solides - Partie 1: Exigences de performance des vêtements de protection contre les produits*

chimiques offrant une protection au corps entier contre les particules solides transportées par l'air (vêtements de type 5).

- Jaques, P. A., T.-C. Hsiao et P. Gao. 2011. « A Recirculation Aerosol Wind Tunnel for Evaluating Aerosol Samplers and Measuring Particle Penetration through Protective Clothing Materials ». *Annals of Occupational Hygiene*, vol. 55, n° 7, p. 784-796.
- Jost, M., C. Pletscher et M. Koller. 2012. *Nanoparticules et particules ultrafines au poste de travail*. Coll. « Factsheets_médecine du travail ».
- Kertész, Zs., Z. Szikszai, E. Gontier, P. Moretto, J.-E. Surlève-Bazeille, B. Kiss, I. Juhasz, J. Hunyadi et A.Z. Kiss. 2005. « Nuclear microprobe study of TiO₂-penetration in the epidermis of human skin xenografts ». *Nuclear instruments and methods in physics research B* (Debrecen (Hungary)). 23 Mars 2005, p. 280-285.
- Kielhorn, J., S. Melching-Kollmuss et I. Mangelsdorf. 2006. *Dermal absorption*. Coll. « Environmental Health Criteria ». Hanover, Germany: WHO.
- Kim, S., M.. Harrington et D. Pui. 2006. « Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media ». *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 9, n° 1, p. 117-125.
- Kirsch, A. A., et Ur V. Zhulanov. 1978. « Measurement of aerosol penetration through high efficiency filters ». *Journal of Aerosol Science*, vol. 9, n° 4, p. 291-298.
- Kostoff, Ronald N., Raymond G. Koytcheff et Clifford G. Y. Lau. 2007. « Global nanotechnology research literature overview ». *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 74, n° 9, p. 1733-1747.
- Krinke, T., et A. Zerrath. 2011. EEPS/FMPS : From raw data to size distribution. TSI Fast Sizer Workshop Aachen TSI, 34 p.
- Lahmani, M., F. Marano et P. Houdy. 2004. *Les nanosciences : 4. Nanotoxicologie et nanoéthique*. Coll. « Échelles ». Paris, 608 p.
- Larese Filon, F., M. Crosera, E. Timeus, G. Adami, M. Bovenzi, J. Ponti et G. Maina. 2013. « Human skin penetration of cobalt nanoparticles through intact and damaged skin ». *Toxicology in Vitro*, vol. 27, n° 1, p. 121-127.

- Larese Filon, F., F. D'Agostin, M. Crosera, G. Adami, N. Renzic, M. Bovenzi et G. Maina. 2008. « Human skin penetration of silver nanoparticles through intact and damaged skin ». *Toxicology*, n° 255, p. 33-37.
- Lee, K. W., et B. Y. H. Liu. 1982. « Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters ». *Aerosol Science and Technology*, vol. 1, n° 2, p. 147-161.
- Liu, B.Y.H., et K.L. Rubow. 1990. « Efficiency, Pressure Drop and Figure of Merit of High Efficiency Fibrous and Membrane Filter Media. ». In *5th World Filtration Congress*. (Nice, France).
- Lorussi, F., S. Galatolo, R. Bartalesi et D. De Rossi. 2013. « Modeling and Characterization of Extensible Wearable Textile-Based electrogoniometers ». *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, n° 1.
- Lorussi, F., E. P. Scilingo, M. Tesconi, A. Tognetti et D. De Rossi. 2005. « Strain sensing fabric for hand posture and gesture monitoring ». *IEEE Transactions on Information Technology in BioMedicine*, vol. 9.
- Martinez, Fernando, Gregorio Obieta, Ion Uribe, Tomasz Sikora et Estibalitz Ochoteco. 2010. « Polymer-Based Self-Standing Flexible Strain Sensor ». *Journal of Sensors*, vol. 2010, p. 5.
- Mengüç, Y., Y.-L. Park, H. Pei, D. Vogt, P. M. Aubin, E. Winchell, L. Fluke, L. Stirling, R. J. Wood et C. J. Walsh. 2014. « Wearable soft sensing suit for human gait measurement ». *The International Journal of Robotics Research*, vol. 33, n° 14, p. 1748-1764.
- Menon, G. K. 2002. « New insights into skin structure: scratching the surface ». *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 54, Supplement, n° 0, p. S3-S17.
- Miecret, G., et J. Gustavsson. 1989. « Mathematical expression of HEPA and ULPA filters efficiency; experimental verification ». In *Contaminexpert*. (Versaille, France), sous la dir. de ASPEC.
- Minciullo, P. L., S. Imbesi, V. Tigano et S. Gangemi. 2013. « Airborne contact dermatitis to drugs ». *TITLEREVISTA*, vol. 41, n° 02, p. 121-126.

- Mouret, G. . 2008. « Étude de la filtration des aérosols nanométriques ». Nancy, ENSIC, 203 p.
- NIOSH. 2009. *Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials*. Coll. « Approaches to Safe Nanotechnology », 2009–125. Cincinnati: DHHS (NIOSH) Publication.
- NIOSH. 2013. *Current Strategies for Engineering Controls in Nanomaterial Production and Downstream Handling Processes*. Publication No. 2014–102. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention: National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH), 95 p.
- Oberdörster, G., E. Oberdörster et J. Oberdörster. 2005. « Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles ». *Environmental health perspectives*, vol. 113, n° 7, p. 823-839.
- Ostiguy, C., M. Debia, B. Roberge et A. Dufresne. 2014. *Nanomatériaux – Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques en milieu de travail, 2e édition*. R-840. Montréal: IRSST.
- Ostiguy, C., B. Roberge, L. Ménard et C-A. Endo. 2008. *Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse* Montréal: IRSST.
- Ostiguy, C., B. Roberge, C. Woods et B. Soucy. 2010. *Les nanoparticules de synthèse - Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en SST*. Coll. « Substances chimiques et agents biologiques », R-646. Montreal: IRSST.
- Park, J., B. Kwak, Y. Kim et J. Yi. 2011. « Efficiency of protective dermal equipment against silver nanoparticles with water aerosol ». *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 13, n° 7, p. 3043-3049.
- Payen, J. . 2009. « Étude et développement de structure fibreuses nontissé dédiées à la filtration de particules fines dans l'air. ». Valenciennes (France), Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 257 p.

- Payet, S., D. Boulaud, G. Madelaine et A. Renoux. 1992. « Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles ». *Journal of Aerosol Science*, vol. 23, n° 7, p. 723-735.
- Pich, J. . 1966. « Theory of aerosol filtration by fibrous and membrane filters ». In *Aerosol Science*, sous la dir. de C.N. Davies. p. 223-285. London and New-York: Academic Press.
- Project on Emerging Nanotechnologies. 2014. « Consumer Product Inventory. ». < <http://www.nanotechproject.org/cpi> >. Consulté le mai 2014.
- Pui, David Y. H., et Da-Ren Chen. 1997. « Nanometer particles: A new frontier for multidisciplinary research ». *Journal of Aerosol Science*, vol. 28, n° 4, p. 539-544.
- Rao, N., et M. Faghri. 1988. « Computer Modeling of Aerosol Filtration by Fibrous Filters ». *Aerosol Science and Technology*, vol. 8, n° 2, p. 133-156.
- Ricaud, M. 2009. « Nanoparticules: Demarche de prevention et moyens de protection ». In *Préventica*. (Lyon), sous la dir. de INRS.
- Rouse, Jillian G., Jianzhong Yang, Jessica P. Ryman-Rasmussen, Andrew R. Barron et Nancy A. Monteiro-Riviere. 2007. « Effects of Mechanical Flexion on the Penetration of Fullerene Amino Acid-Derivatized Peptide Nanoparticles through Skin ». *Nano Letters*, vol. 7, n° 1, p. 155-160.
- Ryman-Rasmussen, Jessica P., Jim E. Riviere et Nancy A. Monteiro-Riviere. 2006. « Penetration of Intact Skin by Quantum Dots with Diverse Physicochemical Properties ». *Toxicological Sciences*, vol. 91, n° 1, p. 159-165.
- Saary, M. Joan, Ronald A. House et D. Linn Holness. 2001. « Dermatitis in a particleboard manufacturing facility ». *Contact Dermatitis*, vol. 44, n° 6, p. 325-330.
- Schloemer, J. A., M. J. Zirwas et C. G. Burkhart. 2014. « Airborne contact dermatitis: common causes in the USA ». *International Journal of Dermatology*, p. 271-274.
- Smijs, Threes G. M., et Joke A. Bouwstra. 2010. « Focus on Skin as a Possible Port of Entry for Solid Nanoparticles and the Toxicological Impact ». *Journal of Biomedical Nanotechnology*, vol. 6, n° 5, p. 469-484.

- Stechkina, I. B., et N. A. Fuchs. 1966. « Studies on Fibrous Aerosol Filters—I. Calculation of Diffusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters ». *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 9, n° 2, p. 59-64.
- Stefaniak, A. B., C. J. Harvey, M. A. Virji et G. A. Day. 2010. « Dissolution of cemented carbide powders in artificial sweat: implications for cobalt sensitization and contact dermatitis ». *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 12, n° 10, p. 1815-1822.
- Thomas, J. 2006. « An Introduction to Nanotechnology: The next small big thing ». *Development*, vol. 49, n° 4, p. 39-46.
- TSI. 1999. « P-Track : ultrafine particle counter ». p. 6.
- TSI. 2010. *Model 3936 Scanning Mobility Particle Sizer™ (SMPS™) Spectrometer - Operation and Service Manual*. Coll. « Particle instruments - Aerosol neutralizers », P/N 1933796: TSI, 89 p.
- TSI. 2013. *P-Track® Ultrafine particule counter model 8525 - operation and service manual* TSI.
- Tsuzuki, T. 2009. « Commercial scale production of inorganic nanoparticles ». *International Journal of Nanotechnology*, vol. 6, n° 5/6, p. 567.
- Vinches, Ludwig, Nicolas Testori, Patricia Dolez, Gérald Perron, Kevin J. Wilkinson et Stéphane Hallé. 2013. « Experimental evaluation of the penetration of TiO₂ nanoparticles through protective clothing and gloves under conditions simulating occupational use ». *Nanoscience Methods*, vol. 2, n° 1, p. 1-15.
- Wang, J., D. R. Chen et D. Y. H. Pui. 2007. « Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media ». In *Nanotechnology and Occupational Health*, sous la dir. de Maynard, AndrewD, et DavidY H. Pui. p. 109-115. Springer Netherlands. < http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5859-2_11 >.
- Wu, J., W. Liu, C. Xue, S. Zhou, F. Lan, L. Bi, H. Xu, X. Yang et F.-D. Zeng. 2009. « Toxicity and penetration of TiO₂ nanoparticles in hairless mice and porcine skin after subchronic dermal exposure ». *Toxicology letters*.

Xia, T., R. F. Hamilton Jr, J. C. Bonner, E. D. Crandall, A. Elder, F. Fazlollahi, T. A. Girtsman, K. Kim, S. Mitra, S. A. Ntim, G. Orr, M. Tagmount, A. J. Taylor, D. Telesca, A. Tolic, C. D. Vulpe, A. J. Walker, X. Wang, F. A. Witzmann, N. Wu, Y. Xie, J. I. Zink, A. Nel et A. Holian. 2013. « Interlaboratory evaluation of in vitro cytotoxicity and inflammatory responses to engineered nanomaterials: The NIEHS Nano go consortium ». *Environmental Health Perspectives*, vol. 121, n° 6, p. 683-690.