

**Vêtements de protection chimique
contre les aérosols solides
Performance des matériaux
sous différentes conditions d'exposition
et caractérisation des déterminants**

Ludovic Tuduri
Loïc Wingert
Yves Cloutier
Stéphane Hallé
Jean Luc Giraudel
Ali Bahloul
Dominic Tessier
Patricia Dolez

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1072

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Mission

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

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

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

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

Pour en savoir plus

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

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2020
ISBN : 978-2-89797-083-3
ISSN : 0820-8395

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

Vêtements de protection chimique contre les aérosols solides

Performance des matériaux sous différentes conditions d'exposition et caractérisation des déterminants

Ludovic Tuduri¹, Loïc Wingert¹, Yves Cloutier¹,
Stéphane Hallé², Jean Luc Giraudel³, Ali Bahloul¹,
Dominic Tessier⁴, Patricia Dolez⁵

¹ IRSST

² École de technologie supérieure

³ Université de Bordeaux

⁴ Groupe CTT

⁵ Université d'Alberta

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1072



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document.

En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

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

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



ÉVALUATION PAR DES PAIRS

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

REMERCIEMENTS

Les auteurs du rapport tiennent à remercier le comité de suivi du projet, ainsi que les stagiaires Charlotte Godoy et Nicolas St-Hilaire pour leur contribution à ce projet.

Ils remercient fortement Joanna Augustin, Carole-Anne Villeneuve et Geneviève Marchand pour les mesures de microscopie.

Phil Gibson et Pearl Yip, du *U.S. Army Natick Soldier Research, Development and Engineering Center* (Natick, MA, USA) sont également sincèrement remerciés pour leur travail sur la mesure du taux de transmission de vapeur d'eau.

SOMMAIRE

Historiquement, les mesures jugées prioritaires en hygiène industrielle ont été orientées vers la prévention de l'exposition par les voies respiratoires. Des centaines de valeurs limites d'exposition ont ainsi pu être établies à partir de méthodes d'évaluation quantitative du risque.

La part de l'exposition cutanée dans l'exposition professionnelle aux substances toxiques est pourtant significative. Le *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) estime à 13 millions le nombre de travailleurs exposés à des produits chimiques par la peau avec des coûts annuels induits par le traitement des troubles cutanés évalués à un milliard de dollars. Il n'existe pas de données équivalentes pour le Canada. Au Québec, les maladies de la peau représentent 0,8 % du nombre de maladies professionnelles acceptées sur la période 2013-2015 (contre 86,2 % pour les troubles de l'oreille, 2,8 % pour les maladies respiratoires, et 1,6 % pour les néoplasmes, tumeurs et cancers).

Pour alerter du danger potentiel que peut représenter l'exposition cutanée, des mentions spéciales, les *skin notation*, peuvent être attribuées à certains contaminants. Au Québec, c'est la mention *Pc* qui est utilisée dans le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST). Pour réduire l'exposition cutanée en milieu de travail, l'utilisation d'équipement de protection individuelle est parfois requise. Lorsque nécessaire, il est important de bien choisir son vêtement de protection chimique. Il est recommandé de se référer à la norme CAN/CGSB/CSA-Z16602 : F14 qui traite de la classification, de l'étiquetage et des exigences de performances. Dans cette classification, différents types de vêtements de protection chimique (VPC) sont décrits, et notamment ceux de type 5, devant protéger contre les particules solides aéroportées. Depuis peu, la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) met l'accent sur le port de ces vêtements certifiés en cas d'exposition à des particules, toxiques, corrosives ou causant une sensibilisation cutanée (amiante, béryllium, etc.).

L'objectif général du présent projet était de mieux comprendre la résistance chimique des matériaux constituant les VPC de type 5. À plus long terme, ce projet devrait contribuer à faciliter le choix d'un VPC de type 5 plutôt qu'un autre.

Ce projet s'est décliné en plusieurs étapes : 1) sélectionner 20 matériaux de VPC de type 5 parmi ceux disponibles au Québec; 2) les caractériser à l'aide de certaines de leurs propriétés physico-chimiques; 3) mesurer et comprendre leurs performances à l'aide d'indicateurs de confort physiologique et de mesure d'efficacité de protection.

Les vingt matériaux choisis appartiennent à trois grandes familles de non-tissés : neuf microporeux, dix « SMS » composés de couches fibreuses et 1 matériau « *flashpun* ». Alors que certains modèles de VPC retenus sont certifiés type 5 en Europe par exemple, leurs homologues au Québec ne présentent pas l'étiquetage nous assurant d'une certification. Tant que la certification n'est pas requise par la réglementation, aucune obligation ne s'impose auprès des manufacturiers.

La fouille de données effectuée à l'aide des cartes auto-organisatrices de Kohonen a permis d'objectiver les différences entre ces 3 familles en se basant sur leurs densités surfaciques,

leurs distributions de tailles de pores et leurs épaisseurs. Les matériaux microporeux présentent la plus faible porosité alors que les matériaux *spunbond/meltblown/spunbond* (SMS) présentent la plus élevée.

La mesure de la perméabilité à l'air et à la vapeur d'eau a révélé de grosses différences. Les microporeux ont les plus faibles perméabilités à l'air et l'eau, et les SMS les plus élevés. Le matériau *flashspun* présente une perméabilité à l'air intermédiaire, et une perméabilité à la vapeur d'eau proche de celles des microporeux. Des tailles de pores importantes semblent associées à une meilleure respirabilité. Même s'il est difficile de juger du confort potentiel des travailleurs, les matériaux SMS apparaissent comme les plus respirants.

La mesure des efficacités de protection des vingt matériaux a été réalisée sur un banc d'essai de type « conduite ventilée », réalisé spécifiquement pour ce projet. Il permet de mesurer de faibles taux de pénétration de particules de chlorure de sodium à de faibles vitesses de filtration, comprises entre 0,05 et 0,3 cm/s.

Les résultats montrent qu'il est possible de scinder les matériaux en trois groupes, du plus efficace au moins efficace. Les deux groupes les moins efficaces sont chacun constitués de quatre matériaux SMS, alors que le groupe le plus efficace rassemble les microporeux, le *flashspun* ainsi que deux SMS. La caractérisation de la couche filtrante « M » des SMS, a montré que les différences observées entre ces matériaux étaient certainement dues à l'épaisseur de cette couche, plutôt qu'à la taille des fibres la constituant. Par ailleurs, la couche « M » des deux SMS les plus performants a été traitée selon une méthode permettant d'activer le piégeage électrostatique des particules. Le traitement a pour effet d'augmenter l'efficacité générale et d'induire un déplacement de la taille de particule la plus pénétrante de 300-400 nm vers 50-60 nm.

Les coutures présentes sur les différents vêtements laissent passer les particules dans des proportions différentes. Les plus efficaces dans nos conditions d'essai sont les coutures scellées, suivies des coutures liées, et enfin les coutures surjetées. Par ailleurs, l'usure des matériaux simulée en laboratoire ne montre pas d'effet majeur sur les efficacités de protection. Elle augmenterait l'efficacité des SMS.

Les efficacités de protection des quatre matériaux SMS les moins efficaces ont pu être modélisées à l'aide d'équations générales conformes à la théorie de la filtration. Cela permet de projeter l'efficacité des matériaux dans des conditions de vitesses différentes de celles expérimentées. Devant la méconnaissance des vitesses réelles de filtration rencontrées en milieu de travail, c'est certainement une assise importante pour le futur de cette thématique de recherche.

Les données obtenues sont d'une importance majeure pour mieux comprendre l'ampleur de la fuite vers l'intérieur des VPC de type 5. Cependant, tant que les autres voies d'entrée des particules à l'intérieur du VPC ne sont pas mieux caractérisées (interfaces VPC-peau, zips ou coutures), la sélection d'un VPC de type 5 plutôt qu'un autre n'est pas encore possible. Des mesures d'efficacité sur des VPC portés par des sujets humains, pendant lesquelles des mesures de confort physiologique devront également être mises en œuvre, seront nécessaires à cette fin.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XI
1. INTRODUCTION	1
1.1 L'exposition cutanée aux substances toxiques : un survol de la situation.....	1
1.2 Le cas des aérosols solides	2
1.3 La protection cutanée contre les particules	3
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
2.1 L'approche de filtration classique	5
2.2 L'approche diffusionnelle	8
2.3 L'approche conduite ventilée	9
2.4 Modélisation des résultats.....	11
2.5 Bilan	14
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	15
4. MÉTHODOLOGIE	17
4.1 Sélection des matériaux de VPC.....	17
4.2 Caractérisation physique des matériaux	17
4.2.1 Les matériaux en tant qu'assemblage global	17
4.2.2 Couche filtrante	19
4.3 Performances des matériaux	22
4.3.1 Indicateurs de confort physiologique	22
4.3.2 Efficacité de protection	24
4.4 Fouille des données de caractérisation physique des matériaux et de leurs performances.....	35
5. RÉSULTATS	39
5.1 Choix des matériaux de VPC	39
5.2 Propriétés physiques des matériaux	41
5.3 Indicateurs de confort physiologique.....	42

5.4	Mesure des performances de protection des matériaux.....	45
5.4.1	Validation du banc d'essai.....	45
5.4.2	Efficacité de protection des matériaux.....	47
5.5	Fouille de données et déterminants des performances.....	63
5.6	Synthèse.....	68
6.	DISCUSSION	71
6.1	Contexte québécois.....	71
6.2	VPC de type 5 : Vers une amélioration des exigences de résistance chimique ?	71
6.2.1	La mesure des concentrations pour calculer la fuite vers l'intérieur.....	72
6.2.2	Les classes de performances.....	75
6.3	Le compromis protection confort.....	76
6.4	La résistance mécanique des matériaux et des coutures.....	77
7.	CONCLUSION	79
	BIBLIOGRAPHIE	83
ANNEXE A :	COMPARAISON ENTRE PETITE ET GRANDE CELLULE	91
ANNEXE B :	MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT	93
ANNEXE C :	CARTES GRADIENTS	95

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Exemples de particules dont il faut se protéger	2
Tableau 2.	Conditions d'essais de filtration sur des matériaux de vêtements.....	7
Tableau 3.	Séquence de prélèvement pour le calcul des efficacités de protection.....	29
Tableau 4.	Liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par diffusion brownienne.....	32
Tableau 5.	Liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par interception.....	33
Tableau 6.	Liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par impaction inertielle.....	33
Tableau 7.	Liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par interaction diffusion/interception	34
Tableau 8.	Jeux de données utilisés dans l'étude.....	38
Tableau 9.	Matériaux retenus pour l'étude.....	40
Tableau 10.	Propriétés physiques mesurées ou calculées	41
Tableau 11.	Perméabilité à l'air des matériaux	43
Tableau 12.	Coefficients de variation des vitesses d'air sur une section du tunnel	46
Tableau 13.	Coefficients de variation des concentrations sur une section du tunnel.....	46
Tableau 14.	Classement des modèles de capture de particules retenus	57

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Banc d'essai de filtration (adapté de Shalev, Barker, McCord, Tucker et Lisk, 2000).	6
Figure 2.	Banc d'essai pour l'approche diffusionnelle (adapté de Golanski <i>et al.</i> , 2009).	9
Figure 3.	Banc d'essai de type conduite ventilée (adapté de Gao <i>et al.</i> , 2011).	10
Figure 4.	Modélisation de la pénétration par un matériau SMMMS (Vinches <i>et al.</i> , 2018).	13
Figure 5.	Détermination de l'épaisseur des couches M des matériaux SMS.	20
Figure 6.	Banc d'essai utilisé pour les mesures d'efficacité de protection.	24
Figure 7.	Distribution granulométrique de l'aérosol généré.	25
Figure 8.	Grille des neuf zones de mesure pour les vérifications d'homogénéité.....	26
Figure 9.	Cellule de mesure d'efficacité pour matériaux neufs.	27
Figure 10.	Cellule de 39 mm pour les essais sur matériaux usés et avec couture.....	28
Figure 11.	Représentation schématique du modèle de construction d'une carte auto-organisatrice (carte de Kohonen).	36
Figure 12.	Carte auto-organisatrice à l'issue de l'apprentissage permettant de visualiser simultanément le gradient des descripteurs et la position des matériaux étudiés.....	37
Figure 13.	Distribution des tailles de pores des matériaux.	42
Figure 14.	Indicateurs de confort physiologique.	44
Figure 15.	Champ de vitesse d'écoulement à 25 cm de la sortie pour deux vitesses d'entrée.....	45
Figure 16.	Vitesse moyenne (A) et concentration moyenne (B) à 25 cm de la sortie en fonction de la vitesse d'entrée.....	46
Figure 17.	Coefficients de variation des concentrations fractionnelles sur une section du tunnel.....	47
Figure 18.	Efficacité de protection des vingt matériaux (0,3 cm/s).	48
Figure 19.	Effet de la vitesse de filtration sur la MPPS.....	50
Figure 20.	Effet de la vitesse de filtration sur l'efficacité pour la MPPS.	51
Figure 21.	Groupes d'efficacité des SMS.	53
Figure 22.	Propriétés de la couche M des SMS.	54
Figure 23.	Effet simulé de l'augmentation de l'épaisseur d'une couche M sur l'efficacité de protection.....	55
Figure 24.	Diamètre moyen des fibres des couches S.	56

Figure 25.	Modélisation des données expérimentales d'efficacité de quatre matériaux SMS avec le modèle St-K-St-Lan.....	58
Figure 26.	Modélisation et extrapolation de l'efficacité du matériau 3M 4530.....	59
Figure 27.	Effet des coutures sur l'efficacité de protection.	60
Figure 28.	Effet des coutures sur la perméabilité des matériaux.	61
Figure 29.	Effet de l'usure sur l'efficacité de protection.	62
Figure 30.	Ordination des matériaux obtenus selon leurs descripteurs physiques.	63
Figure 31.	Ordination des matériaux selon leurs performances.	64
Figure 32.	Gradients de certains indicateurs de performances.	65
Figure 33.	Ordination des matériaux selon leurs performances et leurs descripteurs physiques.....	66
Figure 34.	Gradients de descripteurs sélectionnés.	67
Figure 35.	Comparabilité des résultats provenant des deux cellules.	91
Figure 36.	Champ de vitesse d'écoulement à 25 cm de la sortie pour des vitesses d'entrée de 80 cm/s (A) et 100 cm/s (B).....	93
Figure 37.	Gradients des descripteurs « D 98 » (A), « D 90 » (B) et « D 85 » (C).....	95

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

α :	Solidité du matériau
$C_{am,i}$:	Concentration en particules d'une taille donnée lors du $i^{\text{ème}}$ prélèvement en amont des matériaux ($\#/cm^3$)
$C_{av,i}$:	Concentration en particules d'une taille donnée lors du $i^{\text{ème}}$ prélèvement en aval des matériaux ($\#/cm^3$)
ρ_f :	Masse volumique de la fraction solide (g/m^3)
ΔP :	Perte de charge du matériau (Pa)
ΔP_M :	Perte de charge de la couche M (Pa)
ΔP_{SMS} :	Perte de charge du matériau SMS (Pa)
$d_{f,M}$:	Diamètre des fibres de la couche M (μm ou m)
d_f :	Diamètre de fibres (m)
ϵ :	Porosité de la couche filtrante
ϵ_M :	Porosité de la couche M
ϵ_T :	Porosité totale du matériau
E :	Efficacité fractionnelle
E_A :	Efficacité totale moyenne du groupe A
E_i :	$i^{\text{ème}}$ efficacité fractionnelle
E_T :	Efficacité totale de filtration
E_Y :	Efficacité totale du vêtement virtuel Y
e_f :	Efficacité unitaire de collecte
e_{br} :	Efficacité unitaire associée à la collecte par diffusion brownienne
e_r :	Efficacité unitaire associée à la collecte par interception

e_i :	Efficacité unitaire associée à la collecte par impaction inertielle
e_{br+r} :	Efficacité unitaire associée à la collecte par interaction diffusion/interception
E_D :	Efficacité unitaire de collecte par diffusion
H_{Fan} :	Facteur hydrodynamique de Kirsch et Stechkina
H_{Ku} :	Facteur hydrodynamique de Kuwabara
H_{La} :	Facteur hydrodynamique de Lamb
H_{Ye} :	Facteur hydrodynamique de Ye et Liu
Kn_f :	Nombre de Knudsen relatif aux fibres
K :	Perméabilité intrinsèque du matériau (m^2)
K_S :	Perméabilité intrinsèque des couches S (m^2)
K_M :	Perméabilité intrinsèque de la couche M (m^2)
M_j :	$j^{\text{ème}}$ matériau (fouille de données)
Pe :	$e^{\text{ème}}$ matériau virtuel des cartes de Kohonen
W :	Masse surfacique (g/m^2)
Z_T :	Épaisseur totale des matériaux (m)
Z_M :	Épaisseur de la couche moyenne M du groupe A(m)
$Z_{M,A}$:	Épaisseur de la couche M (m)
Z_S :	Épaisseur des couches S, (m)
AIHA :	American Industrial Hygiene Association
AFSSET :	Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail
APS :	Aerodynamic Particle Sizer
C :	Cai
CBRN :	Chimique, biologique, radiologique et nucléaire

CEN :	Comité européen de normalisation
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CSTC :	Code de sécurité pour les travaux de construction
D :	Davies
ELPI+ :	<i>Electrical Low Pressure Impactor</i> / impacteur électrique à basse pression
EPI :	Équipement de protection individuelle
FDS :	Fire Dynamic Simulator
FS :	Flashspun
FST :	Fuchs et Stechkina
HE :	High Efficiency
HSE :	Health and Safety Executive
IOM:	Institute of Occupational Medicine
ISO:	International Standard Organisation
K :	Kirsch
Ku :	Kuwabara
Lan :	Langmuir
LEV :	Local Exhaust Ventilation
Lh :	Landhal et Hermann
LI1, LI2 :	Lee et Liu 1, Lee et Liu 2
LSST :	Loi sur la santé et la sécurité du travail
Lr :	Liu et Rubow
Mg :	Miecret et Gustavson
MP :	Microporeux
MTESS :	Ministère du Travail, de l'Emploi et de la Solidarité sociale

NaCl :	Chlorure de sodium
Nat :	Nathanson
NF :	Norme française
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health
SMS :	Spunbond/meltblown/spunbond
SMMMS:	Spunbond/3×meltblown/spunbond
SMPS :	Scanning Mobility Particle Sizer spectrometer
SOM:	Self organizing maps (carte autoorganisatrice)
St :	Stechkina
VLE :	Valeurs limites d'exposition
VPC :	Vêtements de protection chimique
W :	Wang

1. INTRODUCTION

1.1 L'exposition cutanée aux substances toxiques : un survol de la situation

Historiquement, les mesures jugées prioritaires en hygiène industrielle ont été orientées vers la prévention de l'exposition par les voies respiratoires (Boeninger, 2003). Des centaines de valeurs limites d'exposition (VLE) ont ainsi pu être établies à partir de méthodes d'évaluation quantitative du risque pour encadrer l'exposition des travailleurs aux contaminants chimiques. Un tel référentiel n'existe pas encore pour exercer un meilleur contrôle de l'exposition cutanée en milieu de travail. Certains auteurs expliquent cette situation en soulignant le défi que représentent la mesure de l'exposition cutanée et l'interprétation de ces mesures (Schneider, Cherrie, Vermeulen et Kromhout, 2000) d'une part, l'établissement de relations dose-réponse et de seuils d'effets de manière reproductible et homogène (Brouwer, Aitken, Oppl. et Cherrie, 2005 ; Arts, Mommers, et de Heer, 2006) d'autre part.

La part de l'exposition cutanée dans l'exposition professionnelle aux substances toxiques est pourtant significative. Le *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH) estime à 13 millions le nombre de travailleurs exposés à des produits chimiques par la peau avec des coûts annuels induits par le traitement des troubles cutanés évalués à un milliard de dollars US (NIOSH, 2011). Alors que les taux de prévalence des principales maladies professionnelles décroissent, ceux des maladies de la peau augmentent. En Europe, les maladies de la peau occupent le second rang des maladies professionnelles, après les troubles musculo-squelettiques (*European Agency for Safety and Health at Work*, 2009). S'il n'existe pas de données canadiennes pour estimer le nombre de cas de maladies professionnelles de la peau (*Canadian Center for Occupational Health and Safety*, 2010), au Québec, les maladies de la peau représentent 0,8 % du nombre de maladies professionnelles acceptées sur la période 2013-2015 (contre 86,2 % pour les troubles de l'oreille, 2,8 % pour les maladies respiratoires, et 1,6 % pour les néoplasmes, tumeurs et cancers)¹.

Les *skin notation* pour les contaminants font partie du faible nombre de balises disponibles permettant de mieux gérer le risque d'exposition cutanée en milieu de travail. Au Québec, c'est la mention *Pc* qui est utilisée dans le Règlement sur la Santé et la Sécurité du travail (RSST, Règlement sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, c. S-2.1., r. 13). L'attribution de ces *skin notation* à des contaminants réglementés reste basée sur des critères et des méthodologies pouvant varier selon les sources (Nielsen et Grandjean, 2004). Le NIOSH a récemment entrepris de revoir sa méthodologie d'attribution (NIOSH, 2017) des *skin notation*. L'application d'une méthodologie normalisée permet désormais de distinguer les produits corrosifs et ceux irritants pour la peau par exemple.

¹ Source de données : Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail, Dépôt de données central et régional (DDCR), Données de 2013 à 2015. Traitement des données par l'IRSST, janvier 2019, Montréal, QC.

1.2 Le cas des aérosols solides

Parmi les agents causaux générant des lésions cutanées, mais aussi d'autres maladies, les produits chimiques occupent une place importante. Certains se présentent sous forme liquide, purs ou en solution. D'autres se rencontrent à l'état solide, en poudre, en grains ou en suspension dans un liquide. Finalement, ils peuvent se retrouver à l'état de vapeurs ou en suspension dans l'air sous forme d'aérosols liquides et solides de diamètre variable.

Parmi les aérosols « solides »² rencontrés en milieu de travail, on trouve notamment des irritants et des allergènes pouvant être responsables de dermatites aéroportées (*Airborne Contact Dermatitis*) (Tableau 1). Leur nombre est certainement mal estimé, car les routes d'exposition ne sont pas nécessairement précisées dans les rapports médicaux disponibles décrivant les dermatites. Ces mêmes routes d'exposition sont également mal comprises (Santos et Goossens, 2007 ; Swinnen et Goossens, 2013).

Des nanoparticules sont également retrouvées en milieu de travail. De nombreuses synthèses sur l'évaluation ou la prévention des risques professionnels ont été publiées ces dernières années (par exemple Ostiguy, Roberge, Ménard et Endo, 2008 ; Baert, Novack et Lison, 2013). Bien que la voie d'exposition respiratoire soit la plus courante, la pénétration des nanoparticules à travers la peau a pu être démontrée dans certaines circonstances (Baert *et al.*, 2013), sans pour autant que le lien avec un risque professionnel soit simple à établir (NIOSH, 2009). Dans ce contexte la norme CSA Z12885-12 (Groupe CSA, 2012) et l'IRSST (Ostiguy *et al.*, 2008) recommandent une approche préventive basée sur le principe de précaution visant à limiter l'exposition.

La prévention de l'exposition cutanée à l'amiante ou à la silice est également à considérer non seulement pour les effets abrasifs locaux, mais aussi pour les risques de réaérosolisation des dépôts cutanés. Pour ces particules, le transfert hors des zones de contamination doit être contrôlé pour limiter l'exposition ultérieure par les voies respiratoires.

Tableau 1. Exemples de particules dont il faut se protéger

Type/nature des particules	Effets potentiels	Références
Chrome, cobalt, béryllium, poussières de bois, farine	Irritation, dermatites de nature variée, sensibilisation, lésions cutanées	Liden <i>et al.</i> , 1998. Makinen et Linnainmaa, 2004. Saary, House et Holness, 2001. Stefaniak, Harvey, Virji et Day, 2010.
Nanoparticules	Incertitudes sur la pénétration cutanée et les effets	Groupe CSA, 2012. Ostiguy <i>et al.</i> , 2008.
Amiante, silice cristalline	Obligation réglementaire-transfert de contamination	CNESSST, 2014a. CNESSST, 2018.

² Dans la suite du texte, le terme « particule » sera utilisé au lieu d'aérosol solide à des fins d'allègement du texte.

1.3 La protection cutanée contre les particules

Alors même que les activités de divers secteurs d'activités professionnelles peuvent impliquer l'exposition des travailleurs à de multiples dangers, la Loi sur la santé et la sécurité du travail (LSST, Loi sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, c. S-2,1) vise leur élimination à la source. Elle prévoit également, lorsque tous les moyens de contrôle de l'exposition à la source ont été mis en œuvre, le recours à la protection collective et individuelle.

Dans le contexte québécois de la protection individuelle, le RSST (Règlement sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, c. S-2.1., r.13) prévoit l'utilisation d'appareils de protection respiratoire certifiés par le NIOSH suivant le règlement « approval of respiratory protective devices » (42 CFR part 84, 2018). Leur ajustement, leur utilisation ainsi que leur entretien doivent suivre la norme CSA Z94.4, « Choix, entretien, et utilisation des respirateurs » (Groupe CSA, 1993)³. Un programme de protection respiratoire doit également être mis en place selon les balises présentées dans cette norme. Dans le cas des particules, ce sont des filtres des séries N, R et P, d'efficacité 95 à 100, ou HE (*High Efficiency*) qui doivent être utilisés.

Pour les équipements de protection cutanée contre le risque chimique, les recommandations réglementaires ne renvoient pas vers des équipements certifiés, qu'il s'agisse de gants ou de vêtements de protection. On emploie les termes de « survêtements » ou « vêtements de travail » pour décrire les vêtements de protection, sans référer à des exigences de performances particulières. Le code de sécurité des travaux de construction (CSTC, Code de sécurité pour les travaux de construction, RLRQ, c. S-2.1., r.4) précise cependant qu'un vêtement de protection s'entend comme un vêtement qui résiste à la pénétration des fibres d'amiante. L'adoption par le Groupe CSA de la norme ISO 16 602 « Vêtements de protection contre les produits chimiques-Classification, étiquetage et exigences de performances » (ISO, 2007 ; Groupe CSA, 2014) pour l'intégrer au bassin canadien de normes en santé et sécurité du travail devrait permettre de préciser les préconisations de protection cutanée en ce qui concerne l'exposition aux produits chimiques en général, et aux particules solides en particulier. En ce sens, la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) a récemment demandé aux distributeurs d'équipements de protection individuelle (ÉPI) d'avoir disponibles des vêtements de protection de type 5 en cas d'exposition à des particules solides toxiques, corrosives ou causant une sensibilisation (CNESST, 2014).

Selon la norme ISO 13982-1 (ISO, 2005a), les vêtements de protection chimique (VPC) de type 5, « vêtements de protection à utiliser contre les particules solides » doivent répondre à des exigences de performances spécifiques, et sont soumis à différentes méthodes d'essai normalisées. Contrairement à la résistance mécanique, la résistance « chimique » de ces VPC est évaluée sur une combinaison complète. Dans une chambre d'exposition environnementale, un sujet porte le VPC à l'étude tandis qu'il est exposé à un aérosol de chlorure de sodium (NaCl). Il réalise différents exercices, pendant que la concentration massique en aérosol est alternativement mesurée à l'intérieur et à l'extérieur du VPC. Le paramètre calculé, appelé « fuite vers l'intérieur », permet alors de juger de la résistance chimique du VPC. Il ne doit pas dépasser certains seuils pour bénéficier de la certification de « type 5 ».

³ En date du 01/04/2019, c'est la version datant de 1993 qui est réglementaire.

Dans ce contexte, et après la publication d'un guide de la CNESST sur les « vêtements de protection à utiliser contre les particules solides » (CNESST, 2014b), un bilan de l'étude des normes ISO 3982-1 et ISO 13982-2 semble pertinent. Il permet d'identifier certaines limites à la qualité des recommandations de VPC de ce type.

- Aucun classement relatif des VPC de type 5 n'est possible dans la mesure où le seul test de résistance chimique, la « fuite vers l'intérieur », se résume à un résultat binaire de type échec/succès.
- Contrairement aux VPC de type 1, 2, 3, 4 et 6, aucun essai de résistance « chimique » sur les matériaux constituant les VPC n'est requis. La contribution relative des matériaux, des coutures ou des zones de jonction VPC/peau (poignet, chevilles, visage) à la fuite totale vers l'intérieur est inconnue.
- La mesure de concentration en particules de NaCl sur une base massique dans la norme ne permet pas de connaître la fuite vers l'intérieur en fonction de la taille des particules.

C'est sur la base de ces constats sur la protection cutanée contre les particules, mais aussi en raison des contraintes associées au port de VPC en termes de confort, que ce rapport traitera de la performance des matériaux constituant les VPC contre les particules solides.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Les résultats d'une récente étude tendent à montrer que le choix d'un matériau de VPC résistant à la pénétration d'aérosols solides ne permet pas à lui seul d'expliquer de bonnes performances lors de la mesure de fuite totale vers l'intérieur lorsque ce matériau est testé avec des nanoparticules (Domat, Pla, Cadavid-Rodríguez et Fito, 2017). En effet, l'ajustement insuffisant de certains modèles de VPC serait responsable de l'apparition d'interstices entre la peau du travailleur et l'équipement lui-même lors de différents mouvements, ouvrant ainsi une voie de contamination pour les particules. Il est ainsi recommandé dans cet article de sceller les VPC aux extrémités.

Cette approche questionne scientifiquement la conception des vêtements de protection et la manière dont sont par exemple pris en compte les effets de soufflets (*bellow effects*), décrits par Vokac, Køpke et Keül (1973). Pour ces auteurs, ils traduisent des déplacements d'air entre l'intérieur et l'extérieur d'un vêtement consécutifs aux mouvements corporels humains, et ont pour conséquence une diminution du niveau d'isolation thermique du vêtement. Gao *et al.* (2011) mentionnent qu'ils peuvent être responsables de la pénétration de particules à l'intérieur du vêtement.

Dès lors, ce sont les conditions réelles d'utilisation d'un VPC qui risquent d'impacter la dynamique de pénétration des particules à l'intérieur du VPC. En pratique, le scellage des VPC contribuerait à réduire la fuite vers l'intérieur des particules, en limitant les mouvements d'air à travers les interstices aux interfaces avec la peau. Le corollaire de cette pratique serait que le mouvement extérieur/intérieur des particules et de l'air soit majoritairement réalisé à travers les matériaux (et les coutures).

Il est donc souhaitable de trouver un compromis entre la perméabilité à l'air, garante d'un certain niveau d'échange thermique entre l'intérieur et l'extérieur du VPC, et le pouvoir filtrant des matériaux utilisés dans la conception des VPC contre les particules solides. À ce titre, certains auteurs utilisent le rapport entre l'efficacité d'un matériau filtrant pour le piégeage des particules et la perte de charge engendrée par la circulation de l'air à travers ce filtre pour définir mathématiquement un facteur de qualité (Spurny, Shoermann et Opiela, 1990 ; Maini, Hersch et Tucker, 1995).

Afin d'utiliser ces facteurs de qualité comme des indicateurs de performances pour les matériaux de VPC, les essais de filtration devraient être réalisés dans des conditions expérimentales reproduisant au mieux l'exposition des VPC aux particules en milieu de travail. La présente sous-section rend donc compte des différentes approches retenues dans la littérature pour tester la résistance à la pénétration de particules de différents matériaux utilisés dans des VPC ou d'autres types de vêtements.

2.1 L'approche de filtration classique

La mesure de l'efficacité des médias filtrants dans le domaine des équipements de protection est une procédure expérimentale maîtrisée et normalisée quand il s'agit de filtres intégrés à des systèmes de ventilation ou des appareils de protection respiratoire filtrants comme les N95 ou

les P100 (NIOSH, 2016 ; ASHRAE, 2012). Pour les matériaux de vêtements utilisés dans la protection individuelle, les mesures expérimentales disponibles dans la littérature sont beaucoup plus parcellaires et les conditions d'essai retenues varient énormément. Gao *et al.* (2011) ont utilisé un testeur de filtre commercial, de type HEPA ou N95, pour comparer les performances de dix matériaux non-tissés utilisés dans la confection de lingettes nettoyantes, de vêtements de protection et de filets à cheveux. Dans les domaines de tailles (30-400 nm) et de vitesses considérés (0,25-0,50 cm/s), les matériaux de vêtements de protection étaient les plus efficaces, bien que pouvant atteindre des taux de pénétration d'environ 60 %. D'autres études portant sur les matériaux de vêtements de protection ont été publiées, chacune avec des conditions d'essai différentes. Un exemple représentatif de banc d'essai de filtration mis à profit dans ces études est présenté à la Figure 1.

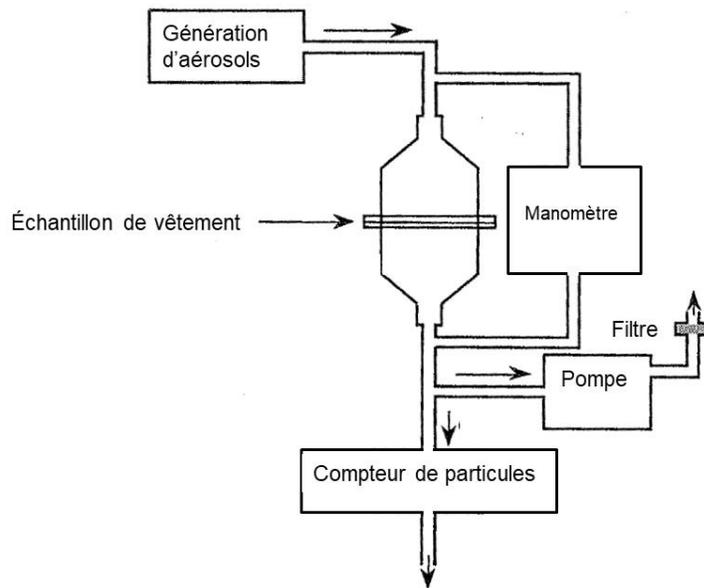


Figure 1. Banc d'essai de filtration (adapté de Shalev, Barker, McCord, Tucker et Lisk, 2000).

Il consiste en une source d'aérosols, qui peut varier selon la nature de l'aérosol. Des nébuliseurs sont utilisés pour les particules de NaCl, de sébacate d'éthylhexyle, mais également des électrodes usées par décharge électrique pour les nanoparticules de graphites (Tableau 2). L'air ainsi contaminé peut être dilué. Il est ensuite amené dans une cellule d'essai avec un passage forcé à travers le matériau. La pénétration, ou l'efficacité de filtration sont déterminées en mesurant les concentrations de particules en amont et en aval du matériau. Selon les études, différents compteurs de particules peuvent être utilisés. Pour l'amiante, on privilégie la microscopie électronique (Hartsky, Reed et Warheit, 2000), alors que pour le NaCl ou le sébacate d'éthylhexyle, un spectromètre de mobilité électrique (*Scanning Mobility Particle Sizer spectrometer* SMPS) et un spectromètre de mesure du diamètre aérodynamique des particules (*Aerodynamic particle sizer*, APS) sont utilisés (Jamriska, 2009 ; Ben Salah, Hallé et Tuduri, 2016).

Les dimensions de la cellule et de la surface du matériau sont très variables, de même que les débits d'air traversant les matériaux. Cela conduit à obtenir des vitesses de filtration très différentes selon les études (Tableau 2).

Tableau 2. Conditions d'essais de filtration sur des matériaux de vêtements

Matériaux	Vitesse de filtration (cm/s)	Nature des particules	Taille des particules (µm)	Ref.
9 tissés 3 non-tissés	Jusqu'à 14,7	Particules ambiantes et talc Borate de cadmium tungstate de magnésium	0,5-1 ≈20 ≈10	Lidwell et Mackintosh, 1978
9 non-tissés	1-6	Fibre d'amiante	multiples	Spurny <i>et al.</i> , 1990
8 tissés 1 non-tissé	1,8	Polystyrène	0,6-4,5	Hersh et Tucker, 1993.
1 tissé 2 non-tissés	0,6	Graphite	0,01-0,09	Golanski, Guiot, Rouillon, Pocachard et Tardif, 2009a.
2 non-tissés	1,2-30,3	Silice	0,5-10	Warheit, Hartsky et Reed, 2000.
4 non-tissés	1,4	Fibres d'amiante	multiples	Hartsky <i>et al.</i> , 2000
5 tissés 5 non-tissés 5 assemblages	1,7	Polystyrène	2,2	Shalev <i>et al.</i> , 1996
10 tissés, non-tissés et assemblages	1,8	Polystyrène	0,48	Shalev <i>et al.</i> , 2000
Assemblages CBRN*	5-25	Chlorure de sodium Sebacate de diethylhexyle	0,03-3	Jamriska, 2009
10 non-tissés	0,25-0,5	Chlorure de sodium	0,03-0,4	Gao <i>et al.</i> , 2011
4 non-tissés de type 5 1 tissé	0,4	Chlorure de sodium	0,015-0,4	Ben Salah <i>et al.</i> , 2016
8 non-tissés de type 5	0,5	Chlorure de sodium	0,015-0,4	Vinches et Hallé, 2017

* CBRN : chimique, biologique, radiologique et nucléaire

Dans la mesure où les conditions d'essai sont différentes d'une étude à l'autre, et que les matériaux sont rarement identifiés avec leur nom commercial, il est délicat de tirer autre chose que des enseignements généraux de la synthèse de ces études. Cependant, quand les performances du Tyvek® sont comparées à celle d'un Kleenguard® (« G.P », « General

Protection » ou « Heavy Duty ») ou de matériaux tissés, elles sont toujours supérieures (Harstky *et al.*, 2000 ; Golansky *et al.*, 2009a ; Warheit *et al.*, 2000 ; Hersh et Tucker, 1993). Le Tyvek[®] fait également partie des matériaux générant une perte de charge conséquente lors des essais (Warheit *et al.*, 2000 ; Hersh et Tucker, 1993). Dans le cas de matériaux tissés, l'armure semble impacter la pénétration, de même que l'épaisseur et la densité surfacique (Hersh et Tucker, 1993, Jamriska, 2009). À densité surfacique égale, la toile est plus résistante à la pénétration que le tissu sergé. Pour ces deux armures, une augmentation de la densité surfacique réduit le niveau de pénétration.

Finalement, ces études questionnent les critères de choix d'une vitesse de filtration unique pour tester de manière normalisée la résistance à la pénétration des matériaux de VPC. Ceux-ci devraient porter sur la représentativité de situations réelles d'exposition, la prise en compte de « pires cas », mais aussi la perméabilité requise pour favoriser des conditions de travail acceptables pour les travailleurs. Spurny *et al.* (1990), sur la base de leurs travaux, proposent une vitesse de 3 cm/s. Golanski *et al.* (2009a) ont adopté la valeur de 0,6 cm/s. Dans une étude de modélisation des vitesses d'air autour d'un cylindre censé représenter le corps humain, Brassier (2006) a déterminé que les vitesses d'air traversant des vêtements ne dépassaient pas 0,8 cm/s pour des vents de 1,4 m/s et des matériaux à perméabilité « élevée ». Les vitesses d'air en milieu de travail rapportées dans la littérature sont quant à elles 85 % du temps inférieures à 0,3 m/s (Baldwin et Maynard, 1998), donnant de ce fait des vitesses d'air à travers les vêtements inférieures à 0,8 cm/s. Dans d'autres cas d'exposition, en particulier pour le secteur militaire, les vitesses de filtration pertinentes pourraient aller jusqu'à 25 cm/s (Jamriska, 2009) ou 27 cm/s (Ghee et Dhaniyala, 2014).

2.2 L'approche diffusionnelle

En complément des approches de filtration classique, des auteurs proposent de s'intéresser plus spécifiquement à la composante diffusionnelle du passage des aérosols à travers les matériaux. La Figure 2 présente un banc d'essai décrit dans la littérature dont la cellule est inspirée des cellules utilisées dans différentes méthodes normalisées de mesure de la résistance à la perméation (ISO, 2013a ; ASTM international, 2012a). Dans ce banc d'essai, l'aérosol généré circule en amont du matériau de vêtement à tester, à un débit donné, et est évacué par une fuite contrôlée. En parallèle, un flux d'air propre en aval du matériau de vêtement circule dans la cellule et entraîne les particules ayant diffusé à travers le matériau vers le compteur de particules. Ce processus se réalise à perte de charge nulle entre les deux compartiments de la cellule (Golanski, Guiot et Tardif, 2009 b), ou avec une perte de l'ordre de quelques millibars.

À l'aide de ce banc d'essai, la pénétration de nanoparticules de graphite (40 et 80 nm), de dioxyde de titane (10 nm, TiO₂) et de platine (Pt, 10 nm) a pu être étudiée. Le Tyvek[®] s'est montré plus résistant qu'un non-tissé en polypropylène et qu'un matériau tissé en coton (Golanski *et al.* 2009 b, Golanski, Guiot, A et Tardif F, 2010), quelles que soient les particules.

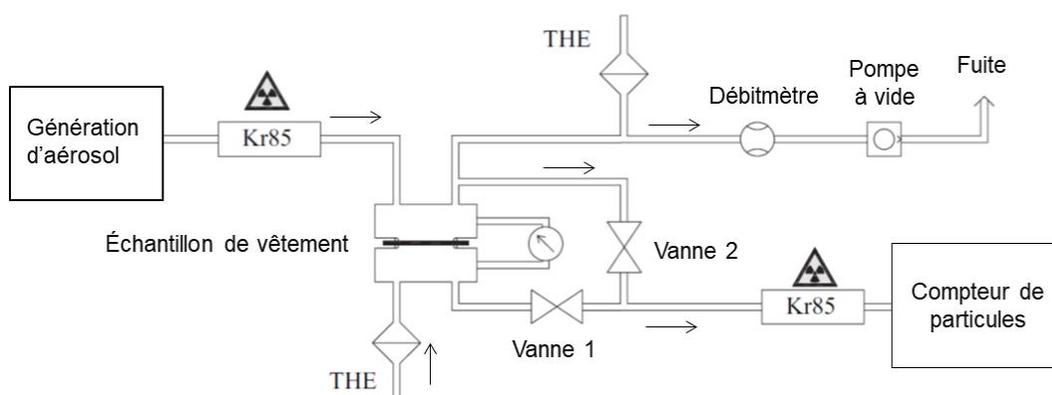


Figure 2. Banc d'essai pour l'approche diffusionnelle (adapté de Golanski *et al.*, 2009).

À l'aide d'un banc d'essai similaire, Park, Kwak, Kim et Yi. (2011) ont pu comparer la pénétration de nanoparticules d'argent (30-100 nm) à travers un matériau en coton tissé constituant un sarrau de laboratoire et un vêtement de salle blanche en polyester. De manière similaire à l'analyse qui peut être faite de données de perméation obtenues avec des cellules et une approche expérimentale similaires, ils ont constaté que les nanoparticules à l'étude traversaient plus rapidement le vêtement en polyester (épaisseur = 143 μm) que le matériau en coton (épaisseur = 337 μm). Lorsque les deux matériaux étaient imbibés d'eau, le temps de percée se trouvait réduit, l'effet étant attribué au transport par capillarité des nanoparticules à travers les matériaux.

Alors que les approches classiques de filtration présentées dans la sous-section 2.1 se heurtaient au choix pertinent d'une vitesse de filtration pour comparer les performances des matériaux, l'approche diffusionnelle, du fait de sa définition, se heurte aux problèmes de la gamme de particules étudiables : sans flux d'air traversant les matériaux, les seules particules susceptibles de les traverser sont celles soumises à la diffusion brownienne (jusqu'à 200 nm de diamètre environ). Par ailleurs, la détermination des concentrations en aval du matériau est sujette à caution et de ce fait, le calcul d'un taux de pénétration. En plus du nombre de particules ayant effectivement pénétré à travers le matériau, ces concentrations dépendraient aussi du débit d'air choisi pour les collecter. Ainsi, Golanski *et al.* (2009 b) comparent les performances des matériaux en calculant des flux de particules (en nombre de particules/min) à travers les matériaux plutôt que des taux de pénétration. À l'opposé, Park, Kwak, Kim et Yi (2011) calculent des taux de pénétration qui s'avèrent être très proches pour leurs deux matériaux en coton et en polyester.

2.3 L'approche conduite ventilée

Avec le souci d'être plus représentatifs des conditions réelles d'exposition, différents auteurs ont proposé des systèmes d'exposition de matériaux aux particules dans des tunnels à vent. La Figure 3 présente un tel appareillage expérimental. Ce montage a été validé d'un point de vue aérodynamique (Jaques, Hsiao et Gao, 2011). Il s'agit d'une boucle fermée à recirculation, fonctionnant avec des aérosols d'oxyde de fer (Fe_3O_4), à forte susceptibilité magnétique. Ce choix de particules permet également l'utilisation d'échantillonneurs passifs de particules

(Jaques, Hopke et Gao, 2012), une alternative aux compteurs de particules plus classiques (SMPS par exemple) qui impliquent un pompage de l'échantillon d'air en aval des matériaux. La conception du banc d'essai permet de régler la vitesse du vent et la grande section de sa cellule d'exposition permet de maximiser le flux de particules à travers les matériaux testés, et donc de faciliter leur détection en aval des matériaux.

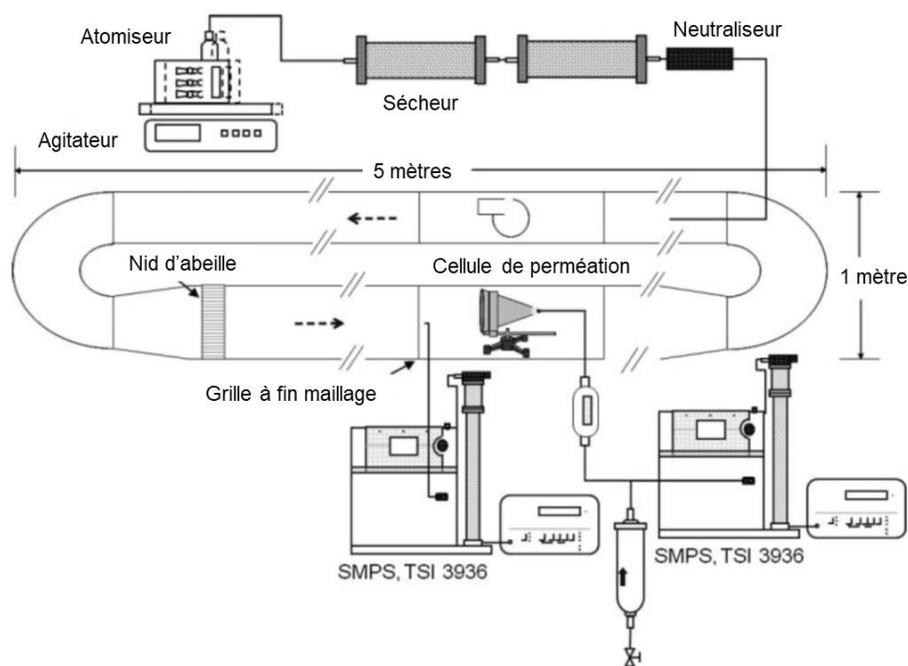


Figure 3. Banc d'essai de type conduite ventilée (adapté de Gao *et al.*, 2011).

Lors d'une première étude menée à l'aide de ce banc et des nanoparticules de taille inférieure à 500 nm, dix matériaux non-tissés ont été comparés pour des vitesses d'air d'infiltration identiques (0,009, 0,018 et 0,027 cm/s) obtenues en faisant varier la vitesse de vent incidente. Parmi les matériaux les moins pénétrants se retrouvent trois des quatre matériaux utilisés pour des vêtements de protection. Les auteurs mentionnent que la taille des fibres constituant ces matériaux, ainsi que leur porosité et la taille des pores jouent un rôle important dans la capture efficace des particules submicrométriques, et compensent leur faible épaisseur. Ils ajoutent que le temps de résidence dans le matériau à ces faibles vitesses peut avoir un impact sur le niveau de pénétration : une épaisseur importante et une perméabilité à l'air réduite favorisent le piégeage des nanoparticules.

Dans une étude subséquente, Jaques et Portnoff (2017) utilisent un échantillonneur magnétique passif placé dans une nouvelle cellule pour mesurer les pénétrations de particules de taille inférieure à 750 nm à travers trois types de chiffons de nettoyage non-tissés et un matériau de vêtement de protection, entre 0,25 et 0,5 cm/s. L'épaisseur et la perméabilité à l'air des matériaux sont utilisées pour expliquer les résultats. Ils comparent également leurs résultats avec ceux obtenus avec un testeur de filtre commercial aux mêmes vitesses et concluent que la méthode de filtration présente des taux de pénétration entre 1,5 et 5,5 fois supérieurs à la méthode faisant intervenir l'infiltration, suggérant une surestimation par l'approche filtration, car

elle forcerait le passage des particules à l'intérieur des matériaux. Cependant, bien qu'effectuées à vitesses identiques, ces deux séries d'essais sont réalisées sur des particules de nature différente, et à partir de méthodes de comptage différentes. La conclusion de cette étude reste donc à confirmer.

Enfin, Hill, Ghee, Kaufman et Dhaniyala (2013) se sont intéressés de leur côté à la pénétration de particules de sébacate de dioctyle à travers un matériau non-tissé pouvant être utilisé contre des agents de guerre chimiques. À cette fin, ils ont réalisé des essais selon l'approche de filtration classique, ainsi que dans un tunnel à vent. Les données obtenues montrent que les deux approches fournissent des résultats de pénétration identiques lorsque la vitesse de filtration est identique, quelle que soit la vitesse du vent dans le tunnel. L'efficacité de filtration peut être décrite selon la théorie classique. À l'aide de ces données, puis d'un modèle décrivant les vitesses d'air traversant les matériaux en fonction des vitesses d'air ambiantes, ils parviennent à décrire la pénétration des particules à travers un cylindre recouvert du matériau simulant le bras humain.

2.4 Modélisation des résultats

Afin d'expliquer, comprendre et éventuellement extrapoler les résultats de pénétration observés dans ces différentes études, leur modélisation serait souhaitable. La théorie de la filtration (Hinds, 1999), qui décrit déjà de manière satisfaisante les phénomènes de capture de particules selon leur taille pour des filtres à air ou des médias filtrants équipant les appareils de protection respiratoire (Wang, Golshahi et Chen, 2017 ; Wang, Chen et Pui, 2007) pourrait donc être utile. Le bassin de données dans la littérature présentant des courbes de pénétration ou d'efficacité en fonction d'une gamme suffisamment large de tailles de particules pour des matériaux tissés ou non-tissés laisse penser que cette approche est parfaitement recevable. Certains auteurs s'attendent cependant à des difficultés de modélisation des résultats expérimentaux, car les matériaux utilisés pour fabriquer des vêtements de protection, tissés ou non-tissés, sont des assemblages parfois complexes, différents des médias filtrants fibreux (Jamriska, 2009).

Les résultats de Hill *et al.* (2013) démontrent que l'équation générale de la théorie de la filtration, décrivant l'efficacité totale comme la composante de plusieurs mécanismes de piégeage (Davies, 1973), ajustée à l'aide de constantes, est effectivement utilisable pour décrire leurs résultats de filtration de particules (30-1000 nm) sur un matériau tissé.

Dans le cas d'un matériau, non-tissé fibreux constituant un voile médical testé à différentes vitesses de filtration (0,01 cm/s à 5 cm/s), Ling, Wang et Pui (2012) démontrent un bon accord entre valeurs expérimentales de pénétration, valeurs calculées par une simulation numérique de dynamique des fluides et une modélisation faisant appel à la théorie de la filtration (réduite à la collecte par diffusion) pour des nanoparticules de NaCl de 80 nm. Pour les particules de 20 nm, un écart plus important est obtenu. L'expression utilisée pour décrire le mécanisme de collecte par diffusion est :

$$E_D = 2 * Pe^{-2/3} \quad \text{Équation 1}$$

Avec :

E_D : Efficacité unitaire de collecte par diffusion

Pe : Nombre de Péclet

À l'opposé, les travaux de Ben Salah (2018) sur un matériau non-tissé à cinq couches (SMMMS, *spunbond/3×meltblown/spunbond*) et des nanoparticules (20-500 nm) à des vitesses de 0,4 et 7 cm/s, les équations disponibles dans la littérature décrivant l'efficacité unitaire de collecte par diffusion et interception ne semblent pas directement utilisables. Dans un travail subséquent portant sur trois matériaux SMMMS, Vinches, Tuduri et Hallé (2018) proposent l'équation suivante, en utilisant de diamètre de Davies (Davies, 1973) de fibres plutôt que le diamètre réel, pour modéliser l'efficacité de filtration :

$$E = 0,06 * \left(\frac{1-\alpha}{Hy_e}\right)^{0,9} Pe^{-0,52} + 0,06 * \left(\frac{1-\alpha}{Hy_e}\right) * \left(\frac{R^2}{1+R}\right) \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

α : Solidité du matériau

H : Facteur hydrodynamique de Ye et Liu

R : Paramètre d'interception

La Figure 4 présente l'adéquation du modèle développé avec les mesures expérimentales, et met de l'avant la faiblesse de modèles utilisés par ailleurs pour des médias fibreux. Un écart entre mesures expérimentales et les résultats du modèle développé apparaît pour les particules dont la taille est inférieure à 30 nm.

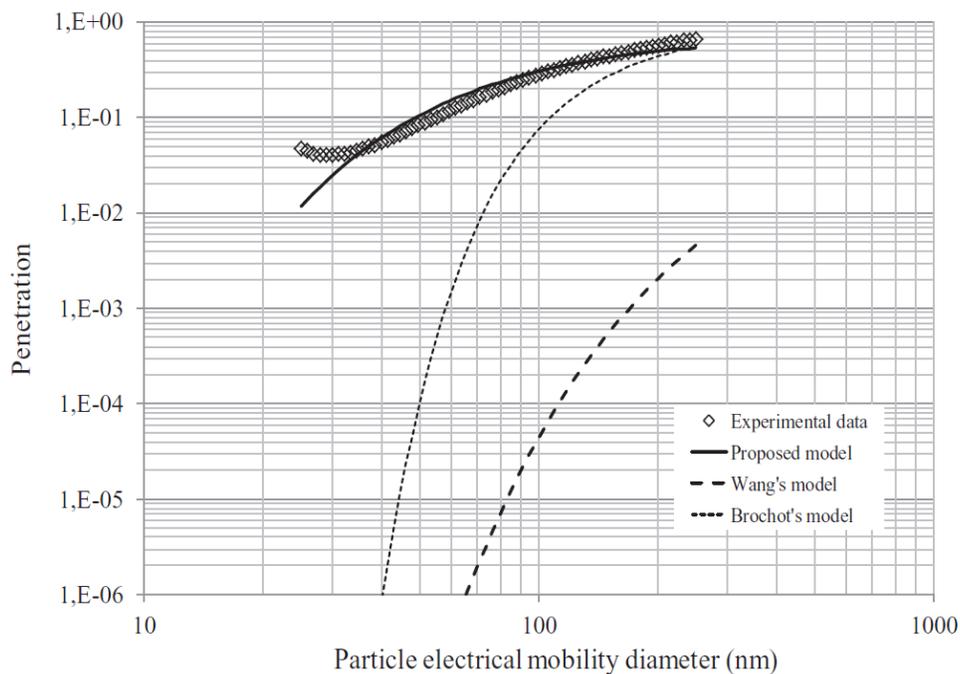


Figure 4. Modélisation de la pénétration par un matériau SMMMS (Vinches *et al.*, 2018).

2.5 Bilan

La littérature scientifique ne propose que peu de résultats traitant de l'efficacité de filtration des matériaux constituant les vêtements de protection contre les aérosols solides de taille micro et submicrométriques. Outre les références utilisées dans ce rapport, d'autres ont pu être identifiées sans qu'il soit possible d'y accéder. Il s'agit notamment de rapports de bureaux d'études ou de résultats consignés dans des actes de conférences, en particulier dans les années 1980-1990. Par ailleurs, outre le Tyvek[®], les références claires à des matériaux utilisés couramment dans la fabrication de VPC de type 5 sont rares.

Il existe différentes approches expérimentales pour mesurer cette efficacité, mais le choix de conditions d'essais en laboratoire proches de la réalité de l'exposition professionnelle reste encore à explorer.

Les paramètres physiques des matériaux impactant l'efficacité de collecte sont identifiables si l'on considère simplement la théorie générale de la filtration, mais la variabilité des assemblages de matériaux et leurs différences structurelles par rapport aux médias filtrants fibreux rendent l'identification de tendances hasardeuses.

Dans ces conditions, il apparaît que les connaissances à disposition pour mieux comprendre les performances de VPC de type 5, ou tout du moins destinées à protéger des particules solides aéroportées sont insuffisantes. La contribution directe de la pénétration à travers les matériaux sur la fuite vers l'intérieur n'est pas à ce jour évaluable, et encore moins les interactions entre cette voie d'entrée et les autres.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif général de ce projet est de mieux comprendre et de déterminer la résistance à la pénétration d'aérosols solides à travers les matériaux constituant les VPC de type 5 dans des conditions d'exposition variables.

À cette fin, les objectifs spécifiques suivants ont été poursuivis :

- Sélectionner un échantillon d'une vingtaine de matériaux de VPC vendus au Québec pour protéger contre les particules solides aéroportées.
- Concevoir et valider un banc d'essai permettant de mettre à l'épreuve les matériaux choisis.
- Caractériser les matériaux finis de VPC à l'aide de propriétés physiques/physico-chimiques et d'indicateurs de confort physiologique potentiels.
- Mesurer la résistance à la pénétration de la vingtaine de matériaux de VPC de type 5 à l'état neuf, puis usagés pour un nombre restreint.
- Évaluer la résistance à la pénétration des différents types de coutures mises en œuvre lors de l'assemblage des VPC.
- Comprendre les données expérimentales à l'aide de la théorie de la filtration classique et d'une approche basée sur les réseaux de neurones et les cartes auto-organisatrices de Kohonen.

4. MÉTHODOLOGIE

4.1 Sélection des matériaux de VPC

Afin d'avoir un échantillon le plus représentatif possible des matériaux effectivement utilisés pour fabriquer des vêtements de protection contre les particules solides, et étant susceptibles d'être utilisés au Québec, une enquête commerciale a été menée. Dans un premier temps, le *Global strategic business report* sur les ÉPI publiés par *Global Industry Analyst Inc* (2014) a été consulté afin d'identifier le plus de compagnies possibles fabricant des VPC. Cette première étape a été complétée par une recherche internet, ainsi que la visite de salons professionnels (*National Safety Council Congress & Expo*, *Hightex*, *American Industrial Hygiene Association* (AIHA), etc.). Des prises de contact téléphoniques et des courriels ont ensuite été lancés. À l'issue de ce processus, 20 matériaux ont été sélectionnés, couvrant les familles SMS, microporeux (MP) et « *flashpun* » (FS).

4.2 Caractérisation physique des matériaux

Afin de mieux comprendre, analyser et expliquer les performances de confort et de protection des matériaux constituant les VPC contre les aérosols solides, une caractérisation de leur structure a été réalisée. Cette caractérisation a été menée en utilisant autant que possible des méthodes normalisées. La quasi-totalité des vêtements de protection étudiés de ce projet est composée de deux ou trois couches dont seulement une apporte une contribution significative à la collecte des particules. Pour les vêtements de type MP, il s'agit du film microporeux (face extérieure du matériau), et pour ceux du type SMS, de la (des) couche(s) centrale de *meltblown* (entourée d'une couche *spunbond* sur les faces extérieure et intérieure du matériau). Du fait de ces structures multicouches, la caractérisation des matériaux peut être abordée sous deux angles différents : celui du matériau entier et celui de la couche filtrante.

4.2.1 Les matériaux en tant qu'assemblage global

4.2.1.1 Épaisseur

L'épaisseur totale des matériaux des vêtements étudiés a été mesurée selon la norme CAN/CGSB-4.2 No. 37-2002 (CSGB, 2002). Cette norme développée pour les matériaux textiles compressibles consiste en la mesure de l'épaisseur d'un échantillon entre deux surfaces planes parallèles en le soumettant à une pression arbitrairement fixée. Dans notre cas, la pression appliquée était de 1 kPa (environ 10 kg/m²) pour une surface de pied presseur d'environ 5 cm², soit l'équivalent d'une masse d'environ 5 g sur l'échantillon. La valeur d'épaisseur délivrée est une moyenne de cinq mesures prises à différents endroits de l'échantillon. Du fait de cette pression et de l'utilisation de conditions normées, les épaisseurs obtenues permettent de comparer facilement les matériaux entre eux.

4.2.1.2 Masse surfacique

La masse surfacique des matériaux a été mesurée selon la norme CAN/CGSB-4.2 No 5.1-M90 (CSGB, 2013). Les échantillons peuvent être découpés à l'emporte-pièce ou en suivant un contour tracé à la main en utilisant une règle rigide permettant de connaître la largeur et la longueur des échantillons à 1 mm près afin de calculer la surface. La masse des échantillons doit être mesurée à l'aide d'une balance précise à $\pm 0,1\%$. La masse surfacique d'un échantillon donné correspond au rapport entre sa masse et sa surface. La valeur délivrée est la moyenne de cinq échantillons d'une surface d'au moins 20 cm^2 .

4.2.1.3 Masse volumique de la fraction solide

La masse volumique de la fraction solide des matériaux constitutifs des VPC a été mesurée selon la norme ASTM D792-08 (ASTM international, 2008) par immersion dans l'eau. Deux étapes sont nécessaires pour obtenir la masse volumique de la fraction solide des matériaux, la première étant la détermination de leur densité relative. Une fois la densité relative mesurée, la masse volumique de la fraction solide des matériaux est obtenue en multipliant la densité relative par la masse volumique de l'eau à $23\text{ }^\circ\text{C}$. Selon cette norme, les mesures sont à réaliser sur au moins deux échantillons par matériau étudié, le résultat final correspondant à la moyenne des expériences.

4.2.1.4 Porosité

Connaissant la masse surfacique des matériaux, la masse volumique de leur fraction solide ainsi que leur épaisseur totale, il est possible de calculer leur porosité totale avec la relation suivante :

$$\epsilon_T = 1 - \frac{W}{(\rho_f \cdot Z_T)} \quad \text{Équation 3}$$

Avec :

ϵ_T : porosité totale du matériau

W : Masse surfacique (g/m^2)

ρ_f : Masse volumique de la fraction solide (g/m^3)

Z_T : Épaisseur totale (m)

4.2.1.5 Distribution des tailles de pores

La distribution de diamètre des pores a été mesurée selon la norme ASTM D6767-16 (ASTM international, 2016a) développée pour la caractérisation des géotextiles. Cette norme consiste en un test d'écoulement capillaire permettant de mesurer les pores de très faibles tailles (diamètre supérieur ou égal à $1\text{ }\mu\text{m}$). Lors de ce test, le milieu poreux est d'abord saturé avec un fluide mouillant, ce fluide restant par la suite piégé dans les pores du fait de l'attraction capillaire et de sa tension de surface. L'échantillon est alors soumis à une pression croissante

d'un gaz. Plus cette pression est élevée, plus faible sera le diamètre des pores disponibles pour la circulation du gaz. Pour chaque incrément de pression, le volume cumulé de liquide extrait du milieu poreux est aussi calculé afin de connaître le volume poreux représenté par chaque diamètre de pores. Cela permet d'accéder alors à une distribution cumulée.

4.2.1.6 Diamètre de fibres

Dès lors qu'un vêtement de protection comporte des couches *spunbond* et/ou *meltblown*, un diamètre de fibre peut être mesuré. Cela concerne donc les vêtements de type SMS et les couches S des vêtements de type microporeux. Les mesures ont été réalisées sur des photographies prises par microscopie optique (*Nikon Eclipse E400*) grossies 400 fois. Pour chaque couche M ou S, la valeur obtenue est une moyenne de 100 mesures prises à l'aide du logiciel ImageJ[®]. Dans le cas des vêtements de type SMS, le diamètre des fibres des deux couches S (couches extérieures et intérieures) a été mesuré en plus de celui de la couche M.

4.2.2 Couche filtrante

La caractérisation des couches filtrantes des matériaux est plus difficile que celle des matériaux dans leur entièreté. Cela est dû au fait que les couches S et M ne peuvent pas être séparées sans être endommagées. En effet, les couches S et M sont collées ensemble par une fusion locale et une compression globale entre des cylindres chauffants qui peuvent affecter la structure des milieux poreux, notamment leur épaisseur et leur porosité. Des méthodes non conventionnelles ont donc été utilisées afin d'obtenir des valeurs de porosité et d'épaisseur pour les couches M des vêtements de type SMS. Concernant les films microporeux, leur caractérisation apparaît moins problématique et nécessaire puisque, par définition, ils tirent leurs performances principalement de la très faible taille de leurs pores et que cela pourra être mis en évidence par les essais suivant la norme ASTM D6767-16 décrite précédemment.

4.2.2.1 Épaisseur des couches *meltblown* des matériaux SMS

Les épaisseurs des couches M des vêtements de type SMS ont été mesurées à partir d'images en coupe transversale. Ces photographies ont été prises au stéréomicroscope (*Nikon SMZ-18*) permettant d'obtenir à la fois une assez grande distance d'observation (quelques cm) et un grossissement assez fort, c.-à-d. 135 fois. Pour réaliser ces observations, les échantillons ont été placés entre lame et lamelle permettant de les soutenir sans causer de compression. Les matériaux composant les SMS étant d'une seule couleur, le plus souvent blanche et parfois bleue, les échantillons ont été légèrement colorés sur chaque face avec une peinture en aérosol. Du rouge et du blanc ont été utilisés pour les matériaux blancs et bleus, respectivement. Le but de cette coloration par un aérosol de peinture est de capitaliser sur la grande différence d'efficacité de filtration entre les différentes couches afin de ne colorer que les couches S et d'augmenter le contraste avec les couches M. Les images acquises ont été dans un premier temps traitées manuellement avec le logiciel libre GIMP[®] en les rognant afin de ne garder que les zones clairement exploitables. Les contours de la couche M ont été ensuite délimités manuellement afin de colorer en noir les zones n'y appartenant pas (Figure 5). Ces images ont ensuite été analysées automatiquement grâce à un programme développé sous Matlab[®]. Les différentes étapes de ce programme sont les suivantes :

- Convertir l'image traitée manuellement en niveaux de gris, avec des teintes de 1 (noir) à 255 (blanc).
- Binariser l'image avec un seuil de 1 pour que les couches M apparaissent en blanc et les autres zones en noir.
- Pour chaque colonne de pixels, de la gauche vers la droite de l'image, marquer le premier et le dernier pixel blanc.
- Pour chaque colonne de pixels, de la gauche vers la droite de l'image, compter le nombre de pixels entre le premier et le dernier pixel blanc, c.-à-d., l'épaisseur de la couche M en pixels.
- Pour chaque colonne de pixels, de la gauche vers la droite de l'image, convertir l'épaisseur de la couche M en μm grâce à l'étalonnage du microscope (1 pixel = $0,714 \mu\text{m} \times 0,714 \mu\text{m}$).

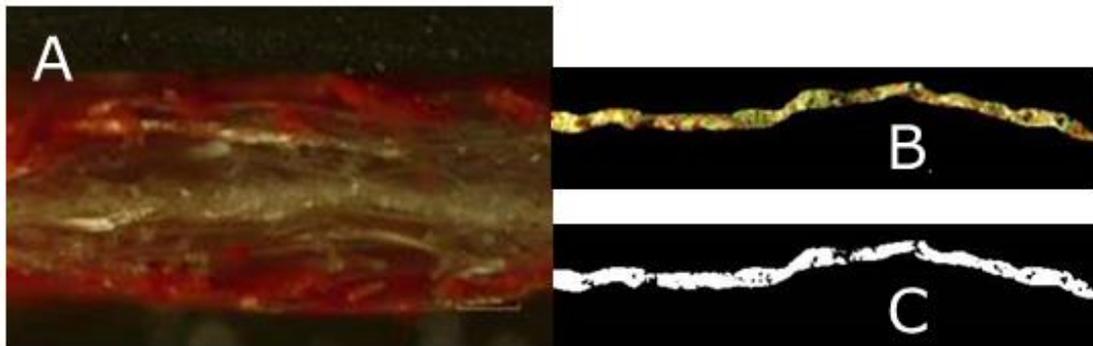


Figure 5. Détermination de l'épaisseur des couches M des matériaux SMS.

A) Matériau SMS peint ; B) Coloration de la photo initiale ; C) Binarisation en noir/blanc

Avec la résolution de la caméra du stéréomicroscope (1280 pixels×960 pixels), il est possible par cette méthode d'obtenir jusqu'à 1280 valeurs d'épaisseur par image. Pour chaque vêtement de type SMS, deux échantillons ont été analysés en prenant des photos sur toute leur longueur. Cela a permis d'obtenir pour chaque vêtement entre 5 000 et 22 000 valeurs d'épaisseur. Aux fins de comparaison avec la méthode normalisée CAN/CGSB-4.2 No. 37-2002 (CSGB, 2002) et de validation, cette méthode a aussi été utilisée pour mesurer l'épaisseur totale des échantillons. Pour tous les vêtements de type SMS, une différence moyenne de $\pm 10 \%$ a été trouvée. Le fait que les mesures normalisées soient systématiquement inférieures à celles obtenues au microscope tend à exclure le phénomène de compression dans ce dernier cas. Cela est par ailleurs cohérent avec l'application d'une pression de 1 kPa sur l'échantillon lors mesures normalisées.

4.2.2.2 Porosité des couches *meltblown* des matériaux SMS

Puisque les couches *meltblown* ne peuvent pas être analysées séparément sans être endommagées, des mesures et des calculs indirects ont été nécessaires pour obtenir leur porosité. Cette dernière a été calculée par application de la loi de Davies traitant de la perte de charge des médias fibreux :

$$\Delta P_M = \frac{1}{K_M} \cdot \mu \cdot U \cdot Z_M = \frac{64 \cdot (1 - \epsilon_M)^2 \cdot (1 + 56 \cdot (1 - \epsilon_M)^3)}{d_{f,M}^2} \cdot \mu \cdot U \cdot Z_M \quad \text{Équation 4}$$

Avec :

ΔP_M : Perte de charge de la couche M (Pa)

K_M : Perméabilité intrinsèque de la couche M (m²)

ϵ_M : Porosité de la couche M

$d_{f,M}$: Diamètre des fibres de la couche M (m)

μ : Viscosité dynamique du fluide porteur (Pa.s)

U : Vitesse superficielle (m/s)

Z_M : Épaisseur de la couche M (m)

$d_{f,M}$, U , Z_M et μ étant connus, ϵ_M est calculable pourvu que ΔP_M soit mesurable. Pour des raisons déjà expliquées (cf. 4.2.2), elle ne l'est pas directement. Puisque la couche M est principalement responsable de la collecte des particules, l'hypothèse selon laquelle la couche M serait également responsable de la perte de charge totale du matériau a été faite, et ϵ_M a pu être déterminée. La méthode décrite en 4.3.1.1 a été appliquée.

Pour vérifier la validité de cette hypothèse, il a de nouveau été fait appel à la loi de Davies appliquée au matériau complet pour exprimer la perte de charge du matériau entier comme la somme des contributions des couches S et M :

$$\Delta P_{SMS} = \frac{1}{K_M} \cdot \mu \cdot U \cdot Z_M + \frac{1}{K_S} \cdot \mu \cdot U \cdot Z_S = \frac{64 \cdot (1 - \epsilon_M)^2 \cdot (1 + 56 \cdot (1 - \epsilon_M)^3)}{d_{f,M}^2} \cdot \mu \cdot U \cdot Z_M + \frac{Z_S}{K_S} \cdot \mu \cdot U \quad \text{Équation 5}$$

Avec :

ΔP_{SMS} : Perte de charge du matériau SMS (Pa)

K_S : Perméabilité intrinsèque des couches S (m²)

Z_S : Épaisseur des couches S

$d_{f,M}$, Z_M , ϵ_M , μ et U étant connus, Z_S étant calculable à partir de Z_T et Z_M , alors seule K_S doit être déterminée pour évaluer ϵ_M , la porosité de la couche M.

La méthode expérimentale utilisée pour déterminer la perméabilité intrinsèque des 20 matériaux (cf. 4.3.1.1) a donc également été appliquée pour mesurer la valeur de K_S de cinq couches S, provenant de cinq vêtements microporeux différents (M 1800, M 2000, ST 40, NGA et LMX, selon la dénomination du Tableau 9), car elles sont facilement séparables des films microporeux. La seule différence avec le protocole décrit en 4.3.1.1 réside en l'utilisation d'un pied à coulisse numérique (*Numerical Super Caliper CD67-S6"PS*, Mitutoyo) pour mesure l'épaisseur des cinq couches S (dix répétitions par couche S).

Puisque le procédé de fabrication des couches S est le même, que l'on parle des assemblages dits microporeux ou SMS, il est possible de faire l'hypothèse que les couches S ont des perméabilités intrinsèques proches indépendamment de leur provenance. Cette hypothèse est d'autant plus probable que les diamètres de fibres des différentes couches S sont proches (cf 5.4.2.2.2). La moyenne des K_S obtenue sur les cinq couches S a donc été utilisée pour calculer la porosité ϵ_M à l'aide de l'Équation 5, pour ensuite comparer avec la valeur ϵ_M calculée avec l'Équation 4.

4.3 Performances des matériaux

Cette sous-section traite des méthodes utilisées pour évaluer les performances des matériaux retenus pour l'étude, tant du point de vue des indicateurs de confort physiologique que de l'efficacité de protection (ou résistance à la pénétration).

4.3.1 Indicateurs de confort physiologique

4.3.1.1 Perméabilité à l'air et résistance à l'écoulement d'air

La perméabilité à l'air a été mesurée selon la méthode normalisée CAN/CGSB-4.2 No36-M89 (CSGB, 1997) qui consiste à appliquer un différentiel de pression de 124,5 Pa (12,7 mm H₂O) de part et d'autre du matériau testé puis de mesurer le débit d'air le traversant par unité de surface exposée. Selon cette norme, les mesures sont à réaliser sur dix échantillons par matériau étudié. La valeur finale fournie dans ce rapport correspond à la moyenne des expériences.

Sur les vingt résultats de mesure pour les matériaux à l'étude, dix se sont trouvés inférieurs à la limite de détection de la méthode, soit 0,3 cm³/(cm² s). Une autre méthode a donc été mise en œuvre pour mieux différencier les matériaux entre eux.

La perte de charge générée par un milieu poreux est décrite en régime laminaire par la loi de Darcy :

$$\Delta P = \frac{1}{K} \cdot \mu \cdot U \cdot Z_T \quad \text{Équation 6}$$

Avec :

ΔP : Perte de charge du matériau (Pa)

K : Perméabilité intrinsèque du matériau (m^2)

La perméabilité intrinsèque, qui ne tient pas compte de l'épaisseur des échantillons (rapport Z/K), a été évaluée pour pouvoir comparer les différents matériaux constitutifs des vêtements de protection. Ce ratio sera appelé résistivité hydraulique dans la suite de ce rapport. D'après l'Équation 6, la résistivité hydraulique peut être obtenue facilement après avoir mesuré la perte de charge générée par un matériau de surface prédéterminée au passage d'un débit d'air connu. Les mesures de perte de charge ont été réalisées au moyen de capteurs de pression différentielle 0-250 Pa et 0-1 000 Pa reliés à une centrale d'acquisition (Almemo 2290, Alborn) pour les matériaux de type SMS et le matériau FS. Du fait de leur plus grande résistance à l'écoulement, un manomètre différentiel incliné 0-5 000 Pa (Type 4, *Airflow developments*) a été utilisé pour les matériaux de type microporeux. Les débits d'air ont été mesurés au moyen de débitmètres massiques de 0-20 L/min (4100, TSI). Pour ces mesures, les échantillons ont été placés dans un porte-filtre semi-ouvert de 39 mm de diamètre (*Cassette Slaton*, BGI Mesa labs). Ces expériences ont été réalisées en triplicata pour tous les matériaux et trois vitesses superficielles différentes ont été utilisées pour chaque échantillon. Afin de rester dans un régime d'écoulement laminaire et de pouvoir appliquer la loi de Darcy, ces vitesses superficielles ont été maintenues assez basses : de 0,5 à 0,9 cm/s pour les VPC de type SMS et FS et de 0,04 à 0,1 cm/s pour ceux de type MP. En effet, le nombre de Reynolds (dimension caractéristique : diamètre de fibre) était au maximum de 0,015 en se basant sur le plus grand diamètre de fibre mesuré, c.-à-d., environ 25 μm pour certaines couches S.

4.3.1.2 Taux de transmission de vapeur d'eau

Le taux de transmission de la vapeur d'eau, exprimé en $g/m^2/jour$ a été mesurée selon une adaptation de la norme ASTM F2298-03 (ASTM International, 2009). Cette méthode utilise une cellule de perméation dynamique de l'humidité (DMPC pour « Dynamic Moisture Permeation Cell ») exposant les deux faces d'un échantillon de 10 cm^2 à deux écoulements co-courants différant simplement par leur humidité relative. Cette différence était de 90 % (95 % d'un côté - 5 % de l'autre). Un différentiel de pression est également appliqué aux bornes de l'échantillon. Cette différence de pression est graduellement augmentée de -150 Pa à 150 Pa. À la sortie de la DPMC, l'humidité relative des deux écoulements est à nouveau mesurée pour chaque incrément de pression différentielle. Les changements d'humidité relative dans ces écoulements permettent ainsi de calculer et de tracer un flux de vapeur d'eau en fonction de la différence de pression. La valeur retenue pour un matériau donné correspond à l'ordonnée à l'origine de la courbe obtenue. Cette caractéristique des vêtements de protection est ainsi représentative d'un flux de vapeur d'eau par diffusion.

4.3.2 Efficacité de protection

4.3.2.1 Conception du banc d'essai

Pour les besoins de l'étude, et en fonction de l'espace laboratoire disponible, le choix du type de banc d'essai pour déterminer les efficacités de protection s'est porté sur un tunnel à vent (Figure 6) dont les dimensions et les équipements permettent :

- d'atteindre des vitesses d'air comprises entre 0,1 et 1 m/s
- de générer des concentrations suffisantes en particules de tailles comprises entre 20 nm et 3000 nm
- d'exposer une surface suffisamment importante de matériau pour être capable de mesurer de faibles taux de pénétration à de faibles vitesses de filtration (< 1 cm/s).

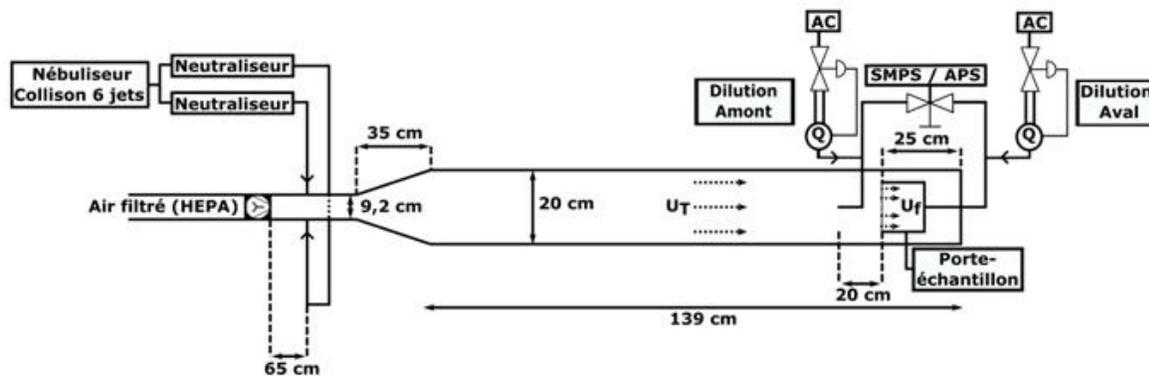


Figure 6. Banc d'essai utilisé pour les mesures d'efficacité de protection.

L'air ambiant du laboratoire est filtré par un filtre HEPA puis entraîné dans le tunnel grâce à un ventilateur (Fantech) à puissance modulable. Pour toutes les expériences de mesure des efficacités de protection, un aérosol a été généré par nébulisation (Collison 6 jets, BGI/Mesa labs) d'une solution NaCl à 2,7 % à une pression de 30 PSIG (207 kPa). Une fois neutralisée (Neutraliseur 3012, TSI), l'injection de l'aérosol dans le tunnel s'est fait à environ 65 cm en aval du ventilateur par deux orifices de diamètre de 1/2 po se faisant face afin d'en optimiser la dispersion et l'homogénéité. Un SMPS (3936, TSI) pour les particules de diamètre inférieur à 600 nm et un APS (3314, TSI) pour les particules plus grandes ont été utilisés pour la mesure des distributions granulométriques de l'aérosol en amont et aval du matériau à tester. Le SMPS et l'APS mesurant des concentrations en fonction de diamètres équivalents en mobilité électrique et aérodynamique, respectivement, une conversion a été effectuée en utilisant l'extrapolation d'une courbe de densité effective de particules de NaCl cubiques publiée par Zelenyuk, Cai et Imre (2006).

Les débits d'échantillonnage de ces appareils sont de 0,3 L/min et 5 L/min pour le SMPS et l'APS, respectivement. Pour les mesures de concentrations en amont du matériau, les prélèvements ont été réalisés au moyen d'une sonde centrée avec l'échantillon et placée à

environ 20 cm en avant de ce dernier. Les distributions granulométriques correspondantes mesurées par le couplage SMPS/APS sont représentées sur la Figure 7. Les prélèvements en aval du matériau ont été réalisés à l'aide de deux cellules présentées dans la sous-section 4.3.2.3.

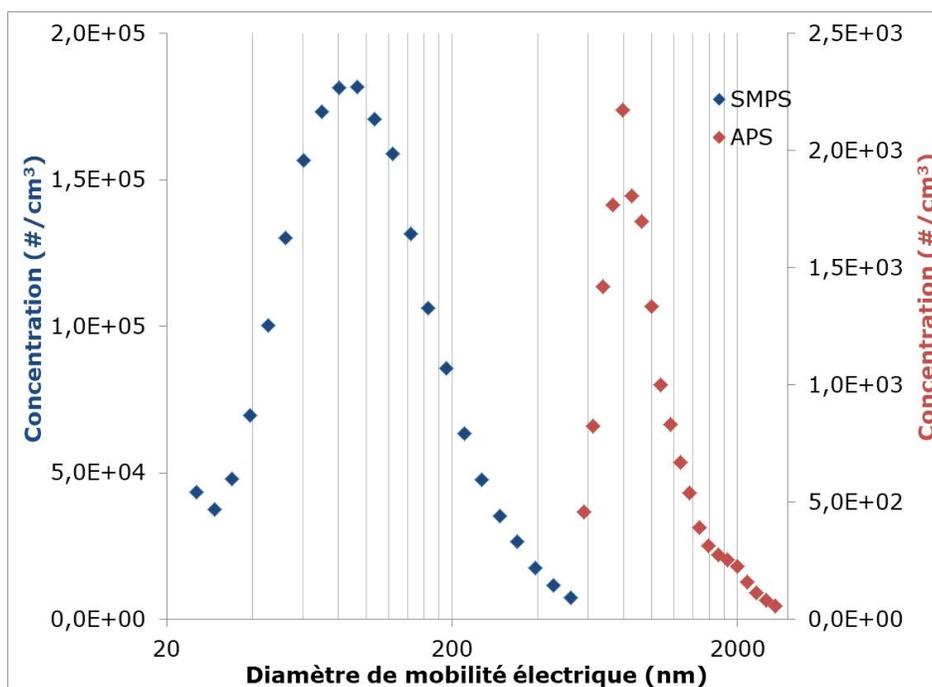


Figure 7. Distribution granulométrique de l'aérosol généré.

4.3.2.2 Validation du banc d'essai

4.3.2.2.1 Modélisation

Le banc d'essai utilisé pour les mesures d'efficacité de protection a été modélisé numériquement. L'objectif des simulations était de vérifier l'uniformité des vitesses d'écoulement et de la concentration des particules de NaCl dans le tunnel à 25 cm de la sortie, ce qui correspond à la position de la porte-échantillon. De plus, la fraction déposée aux parois a été déterminée de façon à quantifier la perte des particules par déposition gravitationnelle et diffusion turbulente. Le champ de vitesses d'écoulement a été modélisé à l'aide d'un logiciel à libre accès *Fire Dynamic Simulator* (FDS V.7.0), qui a fait l'objet de nombreuses études de vérification et de validation (McGrattan *et al.* 2018a, 2018b). FDS résout les équations de Navier-Stokes en régime transitoire en utilisant la méthode de simulation des grandes échelles. La modélisation du comportement aérodynamique de l'aérosol fait appel à un modèle eulérien de glissement (Zhao, Yang, Yang et Liu, 2008). Ce modèle est basé sur la résolution d'une équation de transport d'un scalaire passif, modifiée pour tenir compte de la sédimentation des particules. La discrétisation spatiale du domaine de calcul est essentielle à la résolution numérique des équations de conservation régissant l'écoulement d'air et le transport des particules. Dans FDS, le domaine de calcul est discrétisé en parallélépipède de volume minimal $1,25 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ pour un nombre de nœuds total de 164 720.

Six vitesses d'écoulement comprises entre 0,4 et 1,4 m/s par incréments de 0,2 m/s ont été imposées à l'entrée du tunnel. Pour chaque vitesse, des particules d'un diamètre (d_p) respectif de 1 μm et 2 μm ont été injectées dans la section cylindrique à la même position que celle imposée dans le banc d'essai soit 30 cm en amont de la section divergente (Figure 6). Les particules sont supposées sphériques et de masse volumique égale à 2160 kg/m^3 . Toutes les simulations ont été réalisées jusqu'à l'atteinte d'un régime permanent.

4.3.2.2 Homogénéité des vitesses et des concentrations de particules dans le tunnel

Les critères de la norme ASHRAE 52.2-2012 (ASHRAE, 2012) ont servi de guide pour évaluer la qualité du banc d'essai. L'uniformité de la vitesse de l'air et de la concentration en aérosol ont été évaluées sur la base d'un découpage en neuf zones de la section du tunnel (Figure 8), au niveau du point de prélèvement amont de la cellule. Pour les vitesses comme les concentrations, les mesures ont été réalisées dans les neuf zones (au centre de chacune) pour trois vitesses cibles, c.-à-d., 0,1 m/s, 0,2 m/s et 0,3 m/s au centre de la grille de prélèvement (point E).

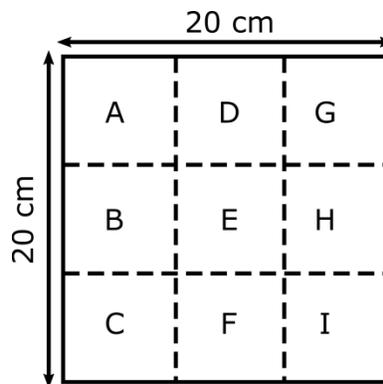


Figure 8. Grille des neuf zones de mesure pour les vérifications d'homogénéité.

Les mesures de vitesses ont été réalisées avec un anémomètre à fil chaud (Velocicalc 8357, TSI). Pour chacun des neuf points, la moyenne de trois séries de douze mesures également réparties sur une minute a été calculée. D'après les critères de la norme ASHRAE 52.2-2012, le coefficient de variation (rapport entre l'écart-type et la moyenne) de ces vitesses moyennes aux neuf points de mesure devrait être inférieur ou égal à 10% pour chaque vitesse cible.

La validation de l'homogénéité des concentrations a été réalisée au moyen d'un impacteur électrique à basse pression (ELPI+, Dekati). Cet appareil permet de connaître les concentrations en nombre de 14 classes granulométriques entre 10 nm et 10 000 nm. Pour chacun des neuf points de prélèvement, une mesure de distribution granulométrique moyennée sur cinq minutes a été réalisée. En adaptant les critères de la norme ASHRAE 52.2-2012 à la plage granulométrique d'intérêt (20 nm – 3 000 nm), le coefficient de variation des concentrations en nombre mesurées aux neuf points de prélèvement devrait être inférieur ou égal à 15 % pour chaque classe granulométrique de l'ELPI+ et pour chaque vitesse de vent dans le tunnel.

4.3.2.3 Cellules de mesure de la pénétration

Deux cellules, ou porte-échantillons, ont été utilisées dans ce projet selon les besoins. Pour les mesures d'efficacité de protection des matériaux neufs, un grand porte-échantillon circulaire en aluminium de 17 cm de diamètre (Figure 9) a été préféré.

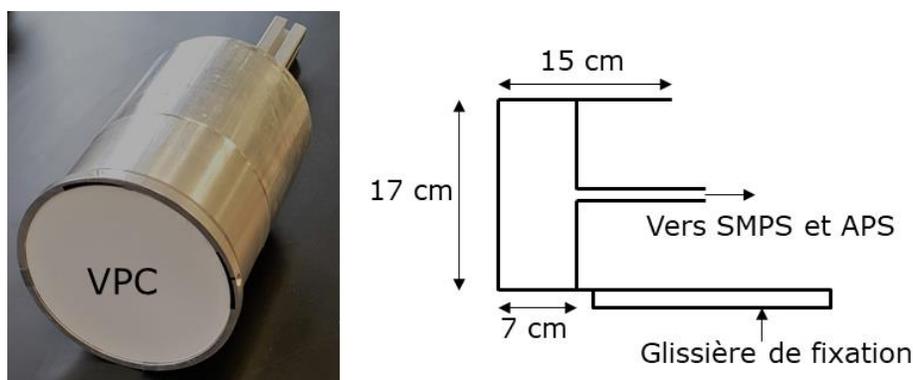


Figure 9. Cellule de mesure d'efficacité pour matériaux neufs.

La grande surface du porte-échantillon a permis d'atteindre de très faibles vitesses de filtration tout en gardant des débits suffisamment élevés pour être mesurables. Ces débits étant cependant inférieurs aux 5,3 L/min nécessaires au couplage SMPS/APS, une dilution en aval de l'échantillon a été requise. Ce taux de dilution en aval du matériau a varié entre 1,3 et 7,8 selon les vitesses expérimentales de filtration. Les mesures d'efficacité de protection ont été réalisées à 0,05 cm/s, 0,15 cm/s et 0,3 cm/s.

Pour les mesures d'efficacité de protection des matériaux usés et des coutures, une cellule de diamètre inférieur a été préférée pour des considérations pratiques. En effet, l'usure des matériaux par abrasion et flexion mesurée respectivement selon les normes ASTM D4966-12 et ASTM F392/F392M-11 (*ASTM International*, 2012 b, 2011) requiert des surfaces d'échantillons inférieures à celle de la cellule précédente, et les matériaux usés n'ont donc pas pu être montés dans la cellule standard. Dans le cas des matériaux avec coutures, la cellule de grand diamètre n'a pas permis d'atteindre l'étanchéité requise du fait du surcroît d'épaisseur au niveau des coutures.

Pour satisfaire les contraintes liées à la fois aux matériaux usés et à ceux munis de coutures, il a été décidé d'opter pour un porte-échantillon de type cassette de 39 mm de diamètre utile avec un mécanisme de fermeture compressif par vissage (Cassette Slaton, BGI by Mesa Labs) (Figure 10).

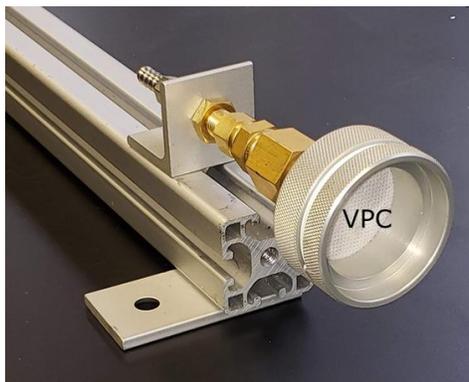


Figure 10. Cellule de 39 mm pour les essais sur matériaux usés et avec couture.

Les essais sur les matériaux usés ou munis de couture étant effectués à des fins de comparaison avec les échantillons neufs, les expériences n'ont été réalisées qu'à la vitesse de 0,3 cm/s. En effet :

- elle représente le cas le plus défavorable en termes de protection contre les particules les plus pénétrantes (environ 300-500 nm).
- il s'agit de la vitesse permettant d'obtenir le taux de dilution en aval du matériau le plus faible compte tenu de la diminution de la surface de l'échantillon. À cette vitesse, une diminution de la surface par un facteur 19 (226 cm^2 contre 12 cm^2) engendre une augmentation du taux de dilution en aval du matériel d'un même facteur, soit de 1,3 à 24,6.

Afin de s'assurer de la comparabilité des résultats d'efficacité de protection, cette efficacité a été mesurée pour une même vitesse de filtration et trois matériaux avec les deux cellules (annexe A).

4.3.2.4 Mesures expérimentales et calcul des efficacités de protection

Les efficacités de protection des échantillons ont été calculées à partir des mesures sur les cellules de prélèvement en amont et en aval du matériau. La séquence de prélèvement est basée sur la norme NF EN 779 (CEN, 2012) qui traite des filtres à air de ventilation générale. Elle est décrite dans le Tableau 3. Elle enchaîne prélèvements en amont ($C_{am,i}$) et en aval ($C_{av,i}$) des matériaux et interpose des prélèvements dits de purge (P) entre eux afin de calculer l'efficacité fractionnelle (efficacité de protection par taille de particule) selon l'Équation 7.

$$E_i = \frac{C_{am,i} - C_{av,i}}{\left(\frac{C_{am,i} + C_{am,i+1}}{2}\right)} \quad \text{Équation 7}$$

Avec :

E_i : $i^{\text{ème}}$ efficacité fractionnelle

$C_{am,i}$: $i^{\text{ème}}$ concentration en aérosol mesurée en amont du matériau ($\#/cm^3$)

$C_{av,i}$: $i^{\text{ème}}$ concentration en aérosol mesurée en aval du matériau ($\#/cm^3$)

Tableau 3. Séquence de prélèvement pour le calcul des efficacités de protection

<u>Ordre de prélèvement</u>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Amont	$C_{am,1}$			P	$C_{am,2}$			P	$C_{am,3}$			P	$C_{am,4}$
Aval		P	$C_{av,1}$			P	$C_{av,2}$			P	$C_{av,3}$		

Finalement, les efficacités de protection d'un échantillon correspondent à la moyenne des η_i calculées :

$$E = \frac{\sum_{i=0}^3 E_i}{3} \quad \text{Équation 8}$$

Les résultats d'efficacité fournis dans ce rapport correspondent à la mesure d'efficacité réalisée sur trois échantillons de chacun des 20 matériaux.

4.3.2.5 Modélisation

Afin de mieux comprendre les résultats d'efficacité obtenus dans ce projet, puis éventuellement de prédire ceux d'autres matériaux non retenus dans cette étude, des travaux de modélisation ont été mis en œuvre. Ils se sont concentrés sur les matériaux fibreux de type SMS.

L'efficacité totale de filtration de particules d'une taille donnée par un média fibreux est calculable par la relation suivante (Hinds, 1998) :

$$E_T = 1 - \exp\left(-4 \cdot e_f \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \cdot \frac{Z}{\pi \cdot d_f}\right) \quad \text{Équation 9}$$

Avec :

E_T : Efficacité totale de filtration

e_f : Efficacité unitaire de collecte

ϵ : Porosité du média fibreux

d_f : Diamètre des fibres (m)

Z : Épaisseur du média fibreux (m)

L'efficacité unitaire est la résultante des efficacités associées aux mécanismes de collecte par diffusion brownienne, interception, impaction inertielle, et interaction diffusion/interception (Thomas, Charvet, Bardin-Monnier et Appert-Colin, 2017) :

$$e_f = 1 - (1 - e_{br}) * (1 - e_r) * (1 - e_i) * (1 - e_{br+r}) \quad \text{Équation 10}$$

Avec :

e_{br} : Efficacité unitaire associée à la collecte par diffusion brownienne

e_r : Efficacité unitaire associée à la collecte par interception

e_i : Efficacité unitaire associée à la collecte par impaction inertielle

e_{br+r} : Efficacité unitaire associée à la collecte par interaction diffusion/interception

Dans de nombreux cas décrits dans la littérature, le développement de modèles d'efficacité s'est fait de manière empirique en ajustant les différents facteurs ou exposants présents dans les équations d'efficacité unitaire relatives à chaque mécanisme. Étant donnée la variété de modèles existant dans la littérature, il a été choisi de ne pas en générer de nouveaux, mais plutôt d'évaluer de manière automatisée l'accord entre les données expérimentales de ce projet et un grand nombre de modèles existants. Ces modèles ont été obtenus en combinant de toutes les façons possibles les différentes expressions d'efficacité unitaire de collecte relatives aux quatre mécanismes.

La première étape de ce travail de modélisation a été de trouver, dans la littérature, les modèles d'efficacité unitaire de collecte dont les conditions d'applicabilité sont compatibles avec les conditions expérimentales de cette étude. La combinaison de tous les modèles de collecte retenus pour la diffusion brownienne (10), pour l'interception (4), pour l'impaction inertielle (2) et

pour l'interaction diffusion/interception (3) a mené à un total de $10 \times 4 \times 3 \times 2 = 240$ expressions possibles d'efficacité unitaire totale (Équation 10).

Une fois identifiées, les 240 expressions d'efficacité unitaire totale ont été utilisées afin de calculer, pour les trois vitesses de filtration expérimentale (0,05 cm/s, 0,15 cm/s et 0,3 cm/s) et pour des particules de taille comprises entre 20 nm et 3 000 nm, les 240 courbes d'efficacité de collecte des VPC de quatre matériaux de type SMS. Les couches M procurant l'essentiel de la protection contre les aérosols, l'influence des couches S a été négligée pour ces calculs. En conséquence, les paramètres du milieu filtrant alimentant les modèles sont exclusivement ceux issus de la caractérisation des couches M décrite notamment dans les sous-sections 4.2.1.6 et 4.2.2. Les sous-sections suivantes présentent les modèles retenus. Les références des modèles retenus, ainsi que le détail propre à certaines variables de ces modèles, peuvent être trouvés dans l'ouvrage publié par Thomas *et al.*, 2017.

4.3.2.5.1 Collecte par diffusion brownienne

Le Tableau 4 donne la liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par diffusion brownienne retenus pour l'étude.

Tableau 4. Liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par diffusion brownienne

Modèles	Abréviation	Équation
Fuchs et Stechkina	FST	$2,9 \cdot H_{Ku}^{-\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-2/3}$
Stechkina <i>et al.</i>	St	$2,9 \cdot H_{Ku}^{-\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} + 0,624 \cdot Pe^{-1}$
Kirsch	K	$2,7 \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(1 + 0,39 \cdot H_{Fan}^{-\frac{1}{3}} \cdot pe^{\frac{1}{3}} \cdot Kn_f\right) + 0,624 \cdot Pe^{-1}$
Lee et Liu (1)	LI1	$2,6 \cdot \left(\frac{\epsilon}{H_{Ku}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}}$
Lee et Liu (2)	LI2	$1,6 \cdot \left(\frac{\epsilon}{H_{Ku}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}}$
Liu et Rubow	Lr	$1,6 \cdot \left(\frac{\epsilon}{H_{Ku}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}} \cdot \left(1 + 0,388 \cdot Kn_f \cdot \left(\epsilon \cdot \frac{Pe}{H_{Ku}}\right)^{\frac{1}{3}}\right)$
Langmuir	Lan	$1,7 \cdot H_{La}^{-\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}}$
Nathanson	Nat	$2,9 \cdot H_{La}^{-\frac{1}{3}} \cdot Pe^{-\frac{2}{3}}$
Davies	D	$1,5 \cdot Pe^{-\frac{2}{3}}$
Wang	W	$0,84 \cdot Pe^{-0,43}$

Les modèles d'efficacité unitaire de collecte par diffusion brownienne sont des fonctions du nombre de Peclet (Pe) et dans la plupart des cas d'un facteur hydrodynamique (H). Le nombre de Peclet traduit l'importance du transfert de matière par diffusion par rapport à celui par convection. Concernant le facteur hydrodynamique, il en existe plusieurs variantes qui permettent de traduire la géométrie de l'écoulement entre les fibres.

4.3.2.5.2 Collecte par interception

Le Tableau 5 fournit la liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par interception sélectionnés pour l'étude.

Tableau 5. Liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par interception

Modèles	Abréviation	Équation
<u>Stechkina et al.</u>	St	$\frac{1}{2 \cdot H_{Ku}} \cdot \left(2 \cdot (1 + R) \cdot \log(1 + R) - (1 + R) + \frac{1}{1 + R} \right)$
Kirsch	K.	$\frac{1}{2 \cdot H_{Fan}} \cdot \left(2 \cdot (1 + R) \cdot \log(1 + R) - (1 + R) + \frac{1}{1 + R} + \frac{2,86 \cdot (2 + R) \cdot R \cdot Kn_f}{1 + R} \right)$
<u>Kuwabara</u>	Ku	$2,9 \cdot (1 - \epsilon)^{\frac{1}{3}} \cdot R^{1,75}$
Cai	C	$2,4 \cdot (1 - \epsilon)^{\frac{1}{3}} \cdot R^{1,75}$

Les modèles d'efficacité unitaire de collecte par interception dépendent d'un facteur hydrodynamique, de la porosité du filtre et du paramètre d'interception (R). Ce paramètre s'exprime comme le rapport entre le diamètre de la particule à filtrer et celui des fibres. Il traduit la capacité d'une particule à s'approcher d'une fibre sans entrer en collision avec elle. Certaines corrélations peuvent aussi dépendre du nombre de Knudsen (Kn_f) qui s'exprime comme le rapport entre le libre parcours moyen des molécules dans l'air et le rayon des fibres et qui traduit le caractère continu ($d_f > 1 \mu\text{m}$) ou non du fluide.

4.3.2.5.3 Collecte par impaction inertielle

La liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par impaction inertielle sélectionnés pour l'étude est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6. Liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par impaction inertielle

Modèles	Abréviation	Équation
Langmuir	Lan	$\frac{Stk^2}{(1 + 0,55 \cdot Stk)^2}$
<u>Landhal et Hermann</u>	Lh	$\frac{Stk^3}{Stk^3 + 0,77 \cdot Stk^2 + 0,22}$

Les modèles d'efficacité unitaire de collecte par impaction inertielle dépendent du nombre de Stokes (Stk) qui s'exprime comme le rapport entre la distance d'arrêt d'une particule et une dimension caractéristique de l'obstacle à franchir (une fibre). Cette dimension est prise égale au rayon de la fibre dans notre cas. Le nombre de Stokes traduit l'incapacité d'une particule à suivre les lignes de courant contournant une fibre afin de l'éviter.

4.3.2.5.4 Collecte par interaction diffusion/interception

Le Tableau 7 donne la liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par interaction diffusion/interception retenus pour l'étude.

Tableau 7. Liste des modèles d'efficacité unitaire de collecte par interaction diffusion/interception

Modèles	Abréviation	Équation
Steckina	St	$1,24 \cdot H_{Ku}^{-\frac{1}{2}} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot Pe^{-\frac{1}{2}}$
Miecret et Gustavson	Mg	$1,24 \cdot H_{Fan}^{-\frac{1}{2}} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot Pe^{-\frac{1}{2}}$
Non prise en compte		0

Les modèles d'efficacité unitaire de collecte liée à l'interaction entre les mécanismes de diffusion brownienne et d'interception dépendent des mêmes paramètres que ceux relatifs à ces deux mécanismes pris indépendamment c.-à-d., le nombre de Peclet, le paramètre d'interception et un facteur hydrodynamique. La dernière ligne du tableau correspond à la situation la plus courante dans la littérature, à savoir, la non-prise en compte de cette interaction avec un terme nul dans l'Équation 10.

4.3.2.5.5 Identification des 10 meilleurs modèles descriptifs

Pour une configuration expérimentale donnée, c.-à-d., un matériau et une vitesse superficielle, l'accord entre les 240 modèles et les mesures a été quantifié en utilisant la méthode des moindres carrés. Ainsi pour un modèle donné, la somme des carrés des écarts aux valeurs expérimentales a été calculée pour chaque taille de particules. Les dix modèles menant aux dix plus faibles totaux de cette somme ont alors été considérés comme ceux étant les plus en adéquation avec les résultats expérimentaux.

4.4 Fouille des données de caractérisation physique des matériaux et de leurs performances

Afin de mieux appréhender les données de caractérisation des matériaux et leurs performances, une fouille de données a été organisée. Les données disponibles concernent 20 matériaux de VPC $(M_j)_{1 \leq j \leq 20}$ pour lesquels sont disponibles les descripteurs suivants :

- des mesures caractérisant les matériaux :
 - la masse surfacique (1 descripteur)
 - l'épaisseur (1 descripteur)
 - la distribution des tailles de pores (10 descripteurs)
- des mesures de performance
 - la résistivité hydraulique (1 descripteur)
 - le taux de transmission de vapeur d'eau (1 descripteur)
 - des mesures d'efficacité (50 descripteurs, correspondant à 50 tailles de particules)

Le jeu de données est donc caractérisé par un grand nombre de descripteurs en proportion d'un nombre relativement faible de matériaux étudiés. Ce contexte exclut pour la fouille de données l'utilisation des méthodes classiques de régression ou des réseaux de neurones multicouches à rétropropagation de l'erreur. Des cartes auto-organisatrices ont donc été utilisées.

L'algorithme des cartes auto-organisatrices SOM (*Self Organizing Maps*) a été proposé par Kohonen (2001). La description détaillée de l'algorithme SOM, la comparaison de cet algorithme avec des méthodes plus classiques et les avantages qui lui sont attachés ont été notamment détaillés par Giraudel et Lek (2001). Cet algorithme est un modèle de la famille des réseaux de neurones. Il partage avec les algorithmes classiques d'ordination (analyse en composantes principales, analyse des correspondances, etc.) l'idée de représenter des données multidimensionnelles dans un espace de dimension inférieure (généralement un espace de dimension 2). Les données sont projetées non linéairement sur une grille rectangulaire pavée de s hexagones : la carte de Kohonen. (Figure 11).

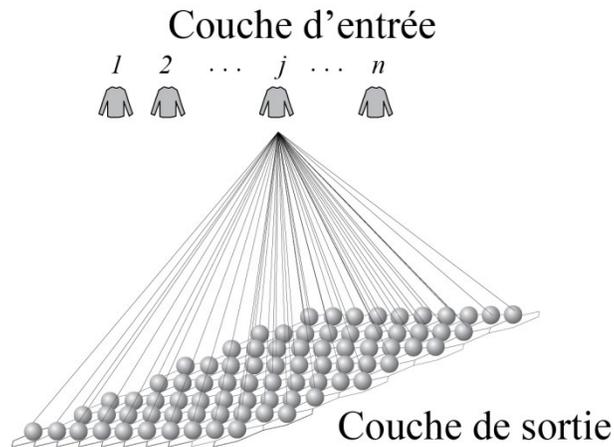


Figure 11. Représentation schématique du modèle de construction d'une carte auto-organisatrice (carte de Kohonen).

Le jeu de données est composé de n matériaux pour lesquels sont pris en compte p descripteurs. La fonction logarithmique $x \rightarrow \ln(x + 1)$ est appliquée au jeu de données qui est ensuite standardisé (moyenne = 0 ; écart-type = 1). L'algorithme est alors appliqué aux valeurs obtenues $(m_{jk})_{1 \leq j \leq 20, 1 \leq k \leq p}$. L'objectif de l'algorithme consiste à placer sur la carte les matériaux étudiés en préservant leurs proximités. Ainsi les matériaux similaires se retrouveront proches les uns des autres sur la grille. Le réseau de neurones est formé de deux couches : la première (couche d'entrée) est connectée au jeu de données, la seconde (couche de sortie) est constituée par la carte de Kohonen où chaque hexagone contient un matériau virtuel $(V_i)_{1 \leq i \leq s}$. Ces matériaux virtuels donnent une représentation ordonnée de la distribution des matériaux du jeu de données. De manière itérative et non supervisée, l'algorithme SOM permet de calculer à partir des données de l'espace d'entrée les valeurs prises par les descripteurs $(v_{ik})_{1 \leq i \leq s, 1 \leq k \leq p}$ pour chaque matériau virtuel. À l'issue de l'apprentissage, chaque matériau réel est comparé à tous les matériaux virtuels et est placé dans l'hexagone du matériau virtuel dont il est le plus proche.

Afin de s'affranchir de la sensibilité de l'apprentissage aux conditions initiales et d'optimiser l'ordination obtenue, plusieurs cartes sont calculées. Dans un premier temps, le nombre d'hexagones est progressivement augmenté jusqu'à ce que :

- pour tout matériau réel, les deux matériaux virtuels dont il est le plus proche soient situés dans des hexagones adjacents (erreur topographique nulle).
- pour chaque descripteur k et pour chaque matériau M_j , il existe au moins un matériau virtuel V_i tel que $\left| \frac{m_{jk} - v_{ik}}{v_{ik}} \right| < 5\%$.

Puis parmi toutes les cartes de même taille, la carte retenue sera celle pour laquelle l'erreur de quantification (somme du carré des distances entre chaque matériau réel et le matériau virtuel dont il est le plus proche) est minimale.

Les cartes auto-organisatrices ne permettent pas seulement de réaliser une ordination des individus étudiés. En représentant par des dégradés colorés les valeurs $(v_{ik})_{1 \leq i \leq s, 1 \leq k \leq p}$ de la couche de sortie, il est possible de visualiser simultanément la position relative des matériaux étudiés et le gradient de chaque descripteur (Figure 12).

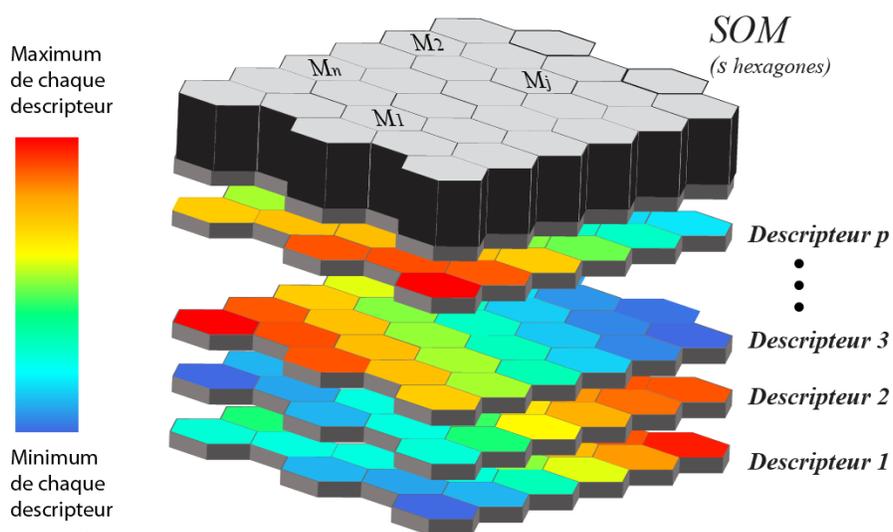


Figure 12. Carte auto-organisatrice à l'issue de l'apprentissage permettant de visualiser simultanément le gradient des descripteurs et la position des matériaux étudiés.

Trois jeux de données ont été étudiés, ils sont répertoriés dans le Tableau 8.

Tableau 8. Jeux de données utilisés dans l'étude

Jeux de données	Matériaux	Descripteurs		Carte
		Physique	Performance	
Jeu A		Masse surfacique Épaisseur Tailles de pores		s = 72 cases Erreur de quantification : 5,80
Jeu B	Tous (n=20)		Efficacité de protection Résistivité hydraulique Taux de transmission de vapeur d'eau	s =80 cases Erreur de quantification : 2,62
Jeu D		Masse surfacique Épaisseur Taille de pores	Efficacité de protection Résistivité hydraulique Taux de transmission de vapeur d'eau	s = 110 cases Erreur de quantification : 1,81

5. RÉSULTATS

5.1 Choix des matériaux de VPC

Malgré un choix commercial important de vêtements au niveau international, la sélection finale s'est heurtée à des problèmes de disponibilité au Québec. Par ailleurs, lors de l'approvisionnement, des incertitudes sur la certification de type 5 des vêtements retenus sont apparues. Ainsi, un modèle de vêtements peut présenter une étiquette attestant de la certification pour un marché géographique donné, et pas pour un autre. Il est alors délicat d'affirmer que les vingt matériaux proviennent de vêtements certifiés de type 5.

Les VPC de type 5 de notre sélection possèdent également la certification de type 6, offrant une protection limitée contre les produits liquides (pulvérisation légère ou éclaboussures), ce qui est habituel. Par contre, les vingt matériaux n'ont pas été choisis parmi des vêtements qui pourraient aussi être certifiés de type 4, contre les pulvérisations liquides, afin d'éviter une protection supérieure au type 5.

Le Tableau 9 présente les vingt matériaux retenus pour l'étude. Ils comprennent dix matériaux de type SMS (dont certains avec plusieurs couches M), neuf matériaux microporeux et un de type *flashspun*. Pour les essais menés, différents exemplaires ont été achetés au Québec en faisant appel à plusieurs fournisseurs. Entre les phases d'achat et d'écriture de ce rapport, il est à noter que certains modèles ont pu changer de nom. Par exemple, le Tyvek® Xpert est devenu le Tyvek® 500 et le Proshield NexGen est devenu le Proshield 60.

Tableau 9. Matériaux retenus pour l'étude

Manufacturier	Modèle	Type de matériau	Matériau*	Abréviation
3M	4510	MP	PE/PP	3M 4510
3M	4520	SMMMS	PP	3M 4520
3M	4530	SMMS	PP	3M 4530
3M	4540	MP	PE/PP	3M 4540
Alphatec	Microchem 1500	SMS	PP	M 1500
Alphatec	Microchem 1500+	SMS	PP	M 1500+
Alphatec	Microchem 1800	MP	PE/PP	M 1800
Alphatec	Microchem 2000	MP	PE/PP	M 2000
Dupont	Tyvek Xpert	FS	HD-PE	Tyvek®
Dupont	Proshield NexGen	MP	PE/PP	DPN
Honeywell	North Gen Pro	SMMMS	PP	NGP
Honeywell	North Gen Air	MP	PE/PP	NGA
Käppler	Provent 10 000	MP	PE/PP	KP 10000
Kimberly-Clark	A10	SMS	PP	KC A10
Kimberly-Clark	A20	SMS	PP	KC A20
Kimberly-Clark	A30	SMS	PP	KC A30
Lakeland	Safeguard	SMS	PP	LSG
Lakeland	Micromax NS	MP	PE/PP	LMX
Portwest	ST 30	SMS	PP	ST 30
Portwest	ST 40	MP	PE/PP	ST 40

PP : Polypropylène ; PE : Polyéthylène ; HD-PE : Polyéthylène haute densité.

5.2 Propriétés physiques des matériaux

Le Tableau 10 présente les propriétés mesurées des matériaux, ou, dans le cas de la porosité, calculées (Équation 3) à partir de données mesurées. Les MP présentent en moyenne une masse surfacique supérieure aux SMS (59 g/m² vs 46 g/m²) malgré leur épaisseur moins importante (282 µm vs 322 µm). Les SMS présentent au minimum trois couches lamellées, alors que pour la plupart des microporeux, seules deux couches sont présentes. Par ailleurs, la porosité des SMS est la plus élevée. Le matériau FS, à couche unique, présente quant à lui la masse surfacique, l'épaisseur et la porosité parmi les plus faibles obtenues.

Tableau 10. Propriétés physiques mesurées ou calculées

Type de matériau	Matériau	Masse surfacique (g/m ²)	Épaisseur (µm)	Porosité
MP	3M 4510	48,2	240	0,807
	3M 4540	49,3	180	0,772
	DPN	60,9	310	0,810
	KP 10000	80,3	480	0,799
	LMX	56,4	240	0,777
	M 1800	53,6	250	0,797
	M 2000	62,4	270	0,787
	NGA	62,8	310	0,773
	ST 40	57,1	260	0,795
		Moyenne (± écart-type)	59 ± 10	282 ± 84
SMS SMMS SMMMMS	3M 4520	41,6	310	0,851
	3M 4530	54,9	330	0,810
	KC A10	38,3	290	0,851
	KC A20	38,7	290	0,849
	KC A30	49,1	350	0,839
	LSG	43,4	320	0,849
	M 1500	46,3	320	0,831
	M 1500+	54,1	360	0,828
	NGP	42,8	320	0,847
	ST 30	48,2	330	0,834
	Moyenne (± écart-type)	46 ± 6	322 ± 23	0,84 ± 0,02
FS	Tyvek®	43,1	230	0,764

La Figure 13 présente la distribution des tailles de pores des vingt matériaux. Pour un matériau, elle illustre la quantité de pores (en %) inférieurs à une certaine taille.

Il apparaît une nette distinction entre les SMS d'une part et les MP d'autre part. Les diamètres de pores maximaux mesurés pour les MP ne dépassent pas 4,2 μm (LMX) alors qu'ils atteignent 28,4 μm pour un SMS (LSG). La distribution de tailles de pores pour les MP n'est pas très précise du fait de limites instrumentales sur la mesure de pores de taille < 1 μm . Cette limitation semble sans incidence sur les SMS, qui présentent des distributions étalées, à l'exception des matériaux LSG, ST 30 et M1500. Le Tyvek® présente quant à lui une taille maximale de pores (8,6 μm) intermédiaire entre SMS et MP.

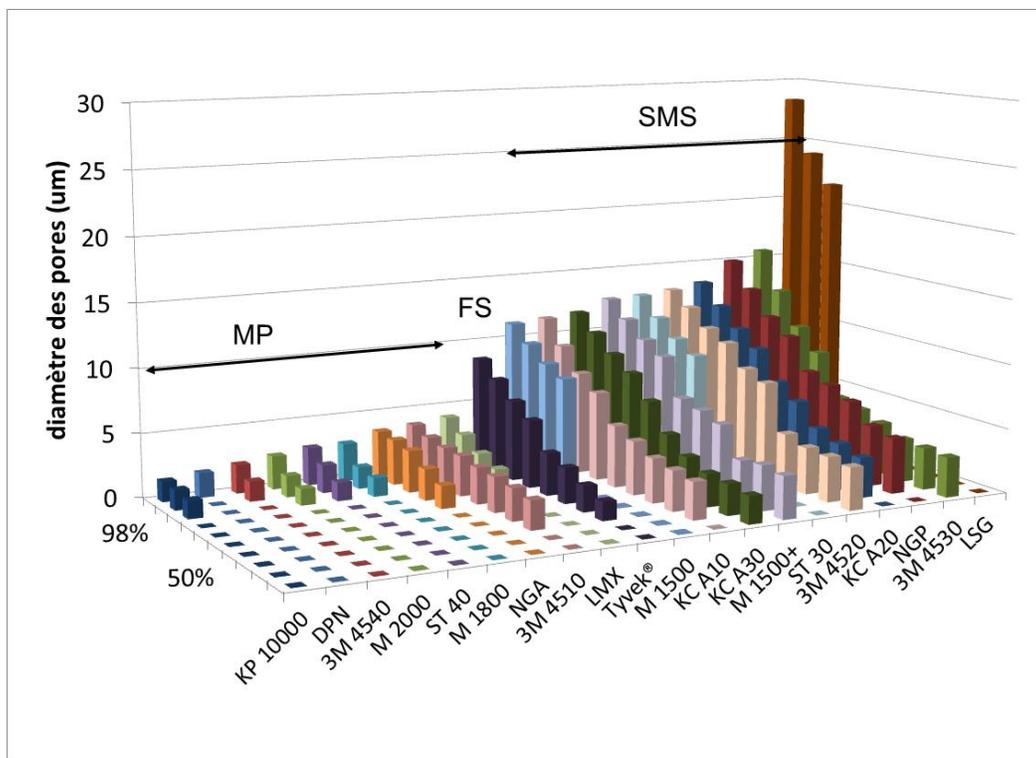


Figure 13. Distribution des tailles de pores des matériaux.

5.3 Indicateurs de confort physiologique

Slater (1977, 1986) définit le confort des vêtements comme un phénomène complexe composé d'au moins trois dimensions : physique, physiologique et psychologique. Du point de vue physiologique, le confort est défini comme l'atteinte d'un équilibre thermique avec une température du corps dans les normes, et un minimum de régulation corporelle. La production externe ou interne de chaleur pour le corps humain devrait donc être totalement dissipée pour maintenir cet équilibre. L'entrave à l'élimination de chaleur par des VPC peut donc mettre en péril cet équilibre. Pour limiter ces entraves, les VPC de type 5, portés généralement par-dessus d'autres vêtements devraient être respirants, c'est-à-dire qu'ils devraient permettre un

échange d'air et de vapeur d'eau entre l'intérieur et l'extérieur du VPC suffisant pour limiter l'augmentation de la température corporelle et la sudation, et permettre l'élimination de l'humidité associée.

Le Tableau 11 présente les perméabilités à l'air mesurées selon la méthode CAN/CGSB-4.2 No36-M89 (CSGB, 1997). Les matériaux MP et le FS apparaissent comme les moins perméables, mais la méthode utilisée ne permet pas de quantifier cette perméabilité. Au contraire, les SMS sont les plus perméables, avec le LSG se distinguant nettement des autres.

Tableau 11. Perméabilité à l'air des matériaux

Type de matériau	Matériau	Perméabilité à l'air (cm ³ /cm ² ·s)
MP	3M 4510	<0,3
	3M 4540	<0,3
	DPN	<0,3
	KP 10000	<0,3
	LMX	<0,3
	M 1800	<0,3
	M 2000	<0,3
	NGA	<0,3
	ST 40	<0,3
	SMS	3M 4520
3M 4530		21,2
KC A10		21,8
KC A20		20,1
KC A30		13,8
SMMS		
SMMMMS		
LSG		79,8
M 1500		15,1
M 1500+		17,6
FS	NGP	23,0
	ST 30	18,7
	Tyvek®	<0,3

La Figure 14 présente les deux autres mesures réalisées. La résistivité hydraulique est conforme aux résultats de perméabilité à l'air, à savoir que la perméabilité (notion inverse de la résistance) à l'air est beaucoup plus faible pour les matériaux MP. Le matériau FS a une résistance intermédiaire et les SMS ont des valeurs plus faibles. Les SMS LSG et KC A30 présentent les valeurs extrêmes dans cette famille pour les deux séries de valeurs traduisant la perméabilité à l'air. Les SMS ont un taux de transmission de vapeur d'eau plus élevée que les MP. Au sein de la famille MP, les valeurs extrêmes observées ont un rapport d'environ 2. Le matériau FS se situe dans la zone des MP autorisant la transmission la plus élevée de vapeur d'eau.

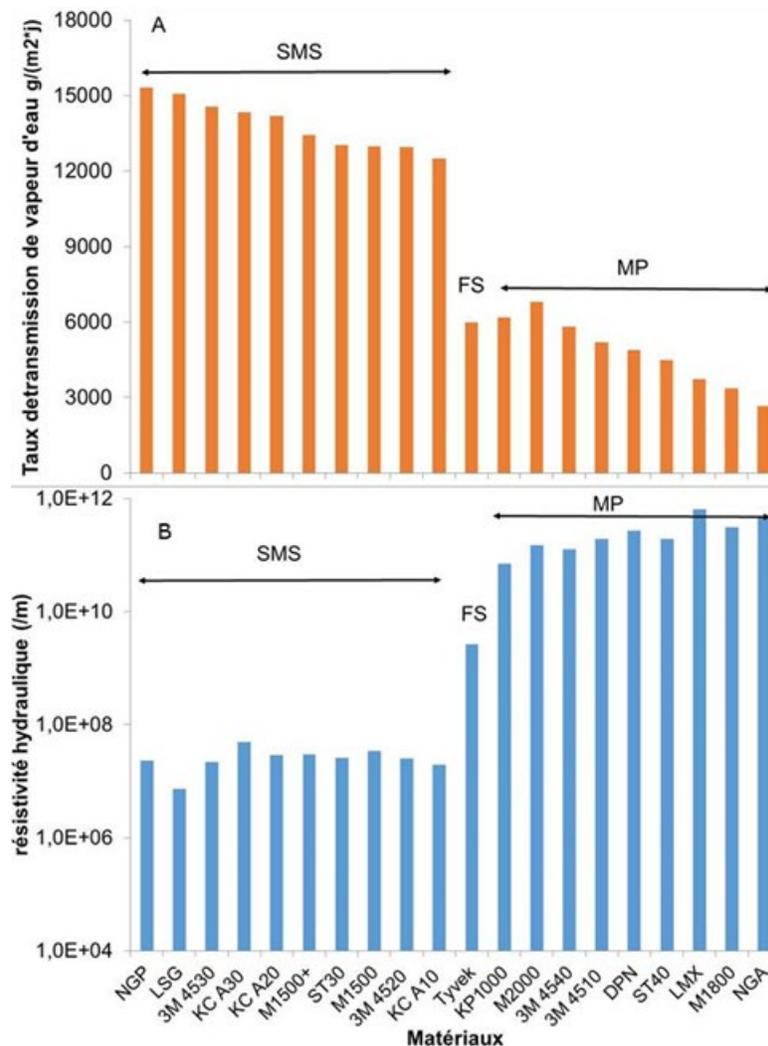


Figure 14. Indicateurs de confort physiologique.

A) Taux de transmission de vapeur d'eau ; B) résistivité hydraulique

Sur la base des performances des matériaux, ce sont donc les SMS qui présentent le meilleur potentiel d'échange d'air et d'humidité entre l'intérieur et l'extérieur du VPC.

5.4 Mesure des performances de protection des matériaux

5.4.1 Validation du banc d'essai

5.4.1.1 Modélisation

La Figure 15 présente le champ de vitesse d'écoulement à 25 cm de la sortie pour des vitesses d'entrée de 40 (A) et 140 cm/s (B) respectivement. On remarque que la vitesse est relativement uniforme au centre du tunnel, et atteint des valeurs maximales de 0,090 m/s et 0,285 m/s pour les deux conditions de vitesse d'entrée. Cependant, des variations de vitesse plus importantes sont observées près des parois. Les résultats obtenus pour des vitesses d'entrées de 80 et 100 cm/s sont comparables et sont présentés à l'Annexe B.

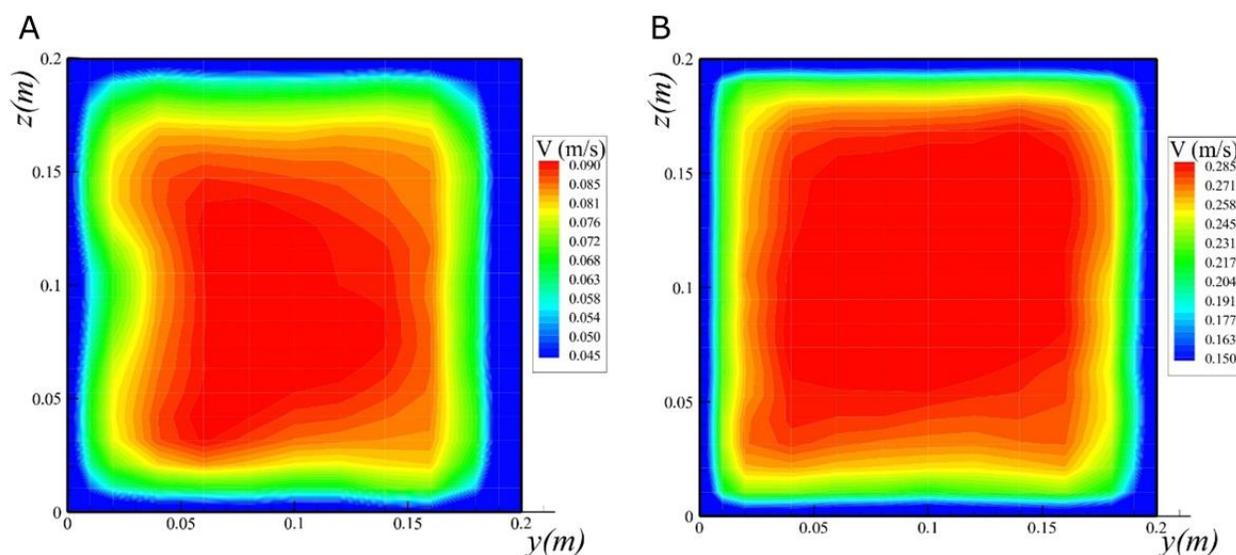


Figure 15. Champ de vitesse d'écoulement à 25 cm de la sortie pour deux vitesses d'entrée.

La Figure 16 présente respectivement la vitesse moyenne (A) et la concentration (B) de particules dans la section centrale du tunnel à 25 cm de la sortie. La section centrale est délimitée par les coordonnées [0,02 - 0,18] m dans les directions y et z, ce qui correspond à une surface de 256 cm², supérieure à la section de la porte-échantillon. On remarque que la vitesse moyenne est directement proportionnelle à la vitesse d'entrée. Les coefficients de variation sur la vitesse et la concentration, calculés respectivement en divisant les écarts-types par les valeurs moyennes de vitesse ou de concentration, sont relativement faibles. Pour une vitesse d'entrée de 1,4 m/s, le coefficient de variation est de 3,7 % et atteint une valeur maximale de 5,3 % pour $V_{\text{entrée}} = 0,4$ m/s. Les écarts sont plus faibles pour la concentration de NaCl avec des écarts-types relatifs compris entre 0,2 % ($V_{\text{entrée}} = 1,4$ m/s ; $d_p = 1$ μm) et 2,3 % ($V_{\text{entrée}} = 0,4$ m/s ; $d_p = 2$ μm).

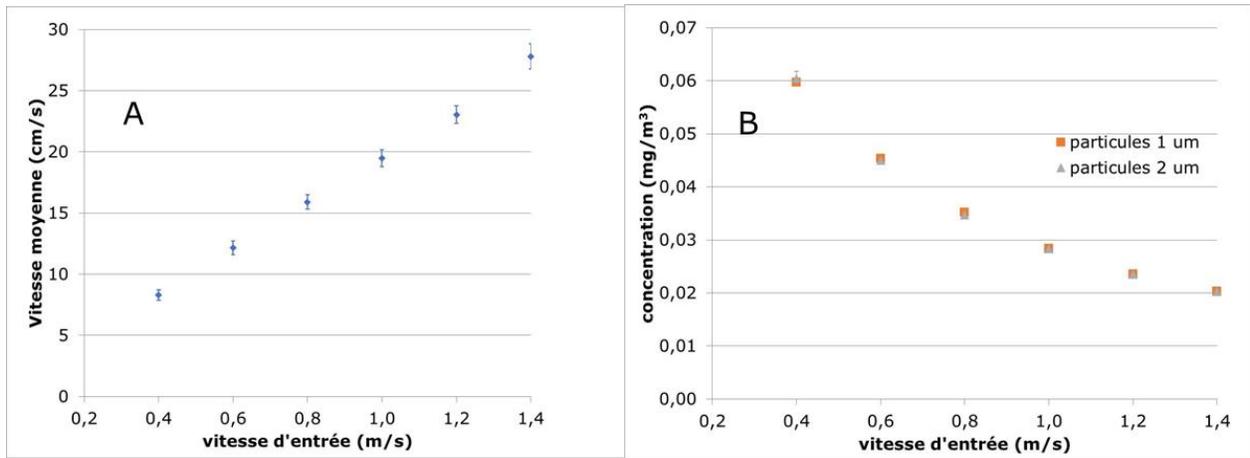


Figure 16. Vitesse moyenne (A) et concentration moyenne (B) à 25 cm de la sortie en fonction de la vitesse d'entrée.

5.4.1.2 Validation expérimentale

En sus de la modélisation, des vérifications de l'homogénéité des vitesses d'air sur la sous-section du tunnel orthogonale au flux d'air ont été réalisées comme décrit à la sous-section 4.3.2.2.2. Les résultats pour trois vitesses de vents présentés dans le Tableau 12 sont en accord avec le seuil d'acceptabilité de 10 % de la norme ASHRAE 52.2-2012 et confirment les résultats de la simulation.

Tableau 12. Coefficients de variation des vitesses d'air sur une section du tunnel

Vitesse (m/s)	0,10	0,20	0,30
Coefficient de variation (%)	11,7	8,9	10,2

L'homogénéité des vitesses d'air dans le tunnel a donc été considérée comme suffisante pour les besoins de l'étude. Ce résultat est d'autant plus satisfaisant que le passage de l'aérosol est forcé au travers de l'échantillon par les pompes des instruments de mesure (SMPS/APS) et non par les conditions de vents dans le tunnel.

Les vérifications de l'homogénéité des concentrations sur une section du tunnel orthogonale au flux d'air ont également été réalisées aux trois vitesses utilisées précédemment (0,10, 0,20 et 0,30 m/s). Les résultats relatifs à l'homogénéité de la concentration totale en particules sont reportés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Coefficients de variation des concentrations sur une section du tunnel

Vitesse (m/s)	0,10	0,20	0,30
Coefficient de variation (%)	4,2	6,1	3,5

Les résultats concernant l'homogénéité des concentrations fractionnelles (par taille de particules) sur la même section de tunnel sont présentés sur la Figure 17. Le seuil d'acceptabilité des coefficients de variation de la concentration fractionnelles sur une section de tunnel fixé par la norme ASHRAE 52.2-2012 est de 15 %. On remarque que ce seuil est majoritairement respecté, excepté pour des particules de diamètre entre 1 et 2 µm. Ce dépassement par rapport à la norme étant très faible (3 %) et circonscrit à une fraction restreinte de la distribution granulométrique, l'homogénéité des concentrations a été considérée comme acceptable pour les besoins de l'étude. L'utilisation de deux cellules de diamètres différents pour les études d'efficacité de protection dans cette étude a d'autre part confirmé leur équivalence (annexe A), confirmant ainsi l'acceptabilité du banc d'essai pour notre type d'étude.

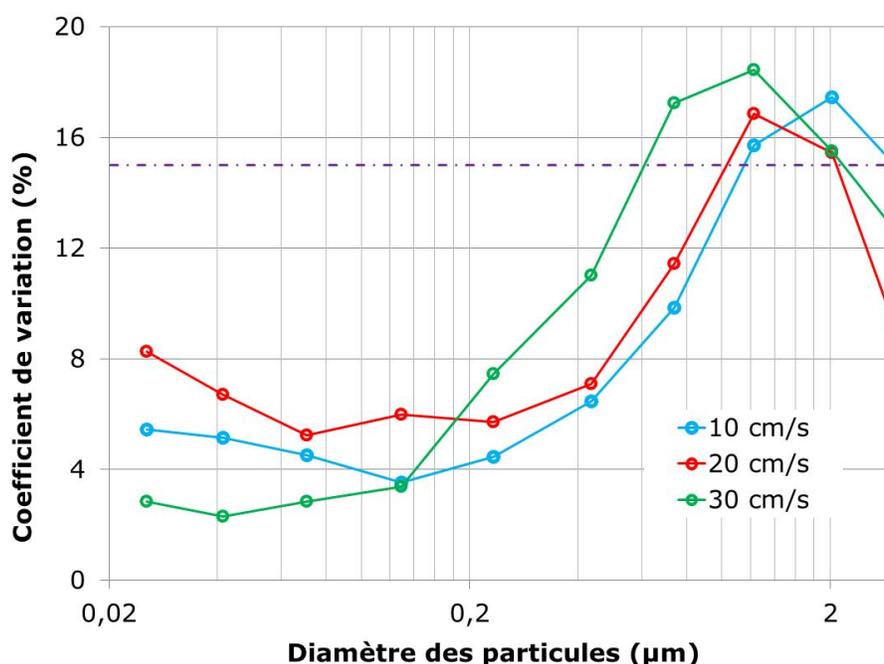


Figure 17. Coefficients de variation des concentrations fractionnelles sur une section du tunnel.

5.4.2 Efficacité de protection des matériaux

5.4.2.1 Matériaux neufs

5.4.2.1.1 Criblage des matériaux

La Figure 18 présente l'efficacité de protection des vingt matériaux pour des particules de taille comprise entre 25 et 2700 nm pour une vitesse de filtration de 0,3 cm/s. Le cadran A permet de distinguer trois profils d'efficacité. Le premier, groupe A, rassemble les quatre matériaux SMS les moins efficaces (ST 30, NGP, 3M 4530 et M1500+).

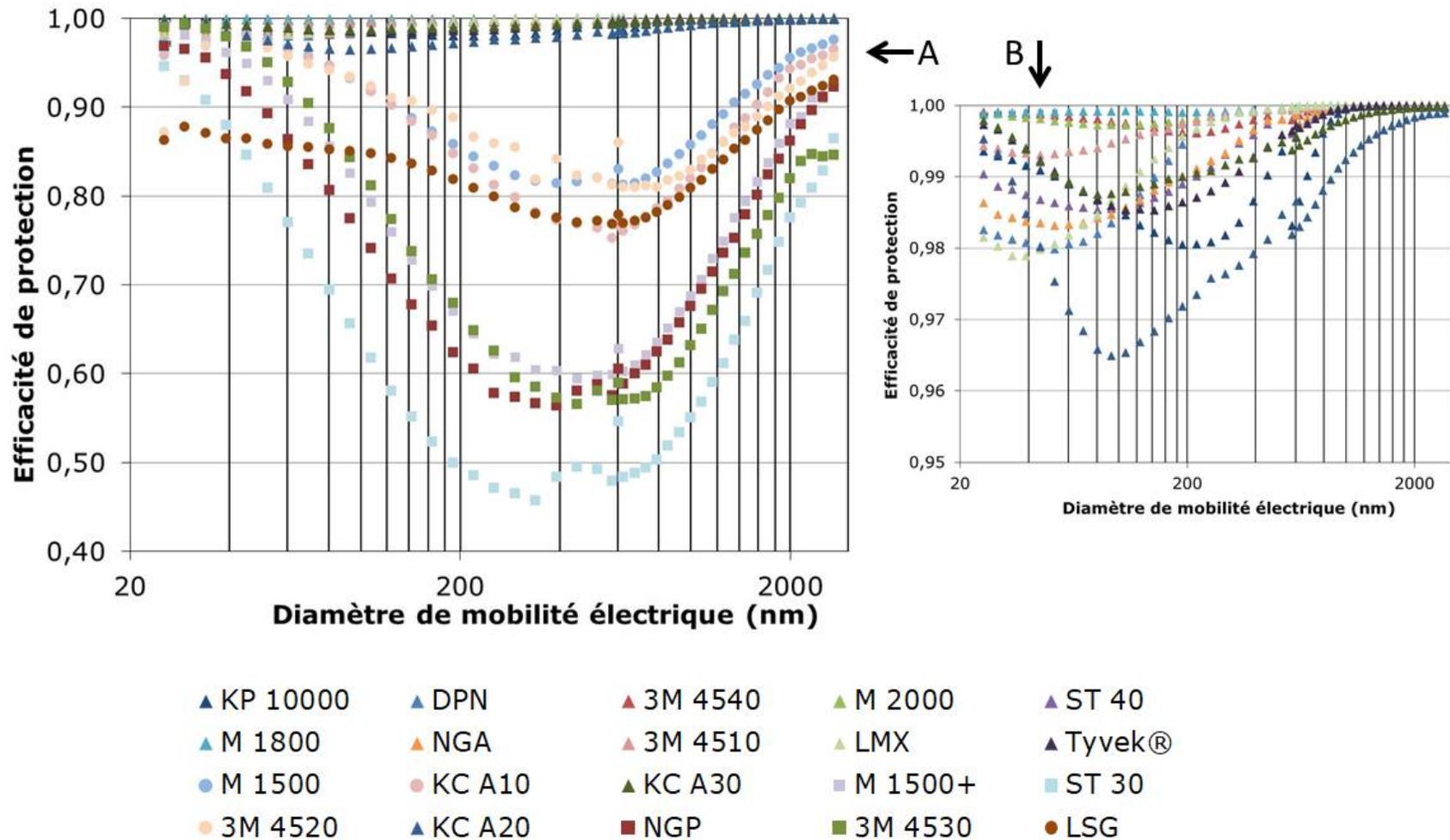


Figure 18. Efficacité de protection des vingt matériaux (0,3 cm/s).

Ils présentent un minimum d'efficacité entre 300 et 500 nm (50-60 %). Le matériau ST 30 s'écarte un peu de la tendance. Le second groupe (groupe B), d'efficacité moyenne, rassemble également quatre SMS (LSG, M1500, 3M 4520 et KC A10) avec un minimum d'efficacité entre 350 et 550 nm (75-85 %). Le LSG présente une courbe d'efficacité aplatie, en raison d'une faible performance pour les particules de 25-100 nm. Le troisième groupe (groupe C), plus visible sur le cadran B, d'efficacité supérieure, rassemble les neuf MP, le FS et deux SMS (KC A20 et KC A30) avec un minimum d'efficacité entre 25 et 200 nm (95 %).

Les matériaux MP sont donc les plus efficaces, mais le FS et deux SMS arrivent à obtenir des performances équivalentes.

5.4.2.1.2 Effet de la vitesse de filtration

Les efficacités de protection ont également été mesurées à 0,05 et 0,15 cm/s. La Figure 19 présente l'effet de la vitesse de filtration sur la MPPS, ou taille de particule la plus pénétrante. On note que la MPPS décroît avec la vitesse de filtration pour la quasi-totalité des matériaux, conformément aux attentes (Thomas, Charvet, Bardin-Monnier et Appert-Colin, 2017). Les MP présentent de manière générale, avec le matériau FS, des MPPS plus faibles que les matériaux fibreux de type SMS. Les matériaux KC A20 et KC A30 se distinguent cependant des autres SMS avec une MPPS plus faible. Les courbes d'efficacité particulièrement plates du matériau LSG aux plus faibles vitesses ne permettent pas de déterminer précisément cette MPPS.

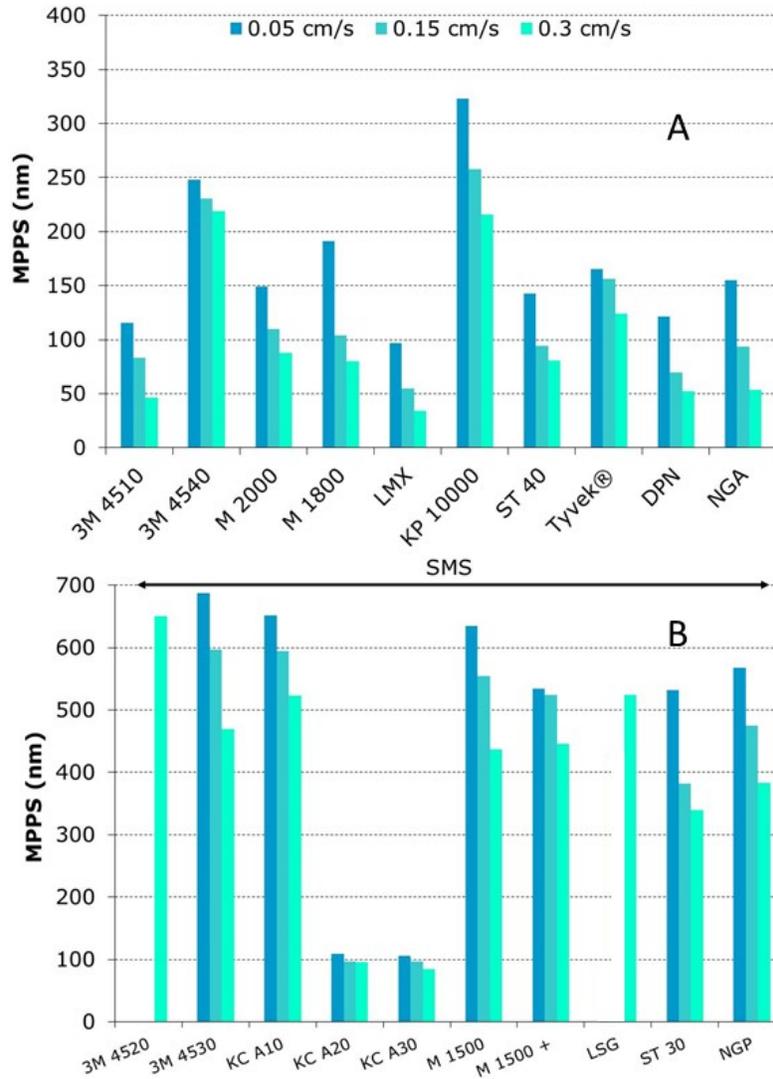


Figure 19. Effet de la vitesse de filtration sur la MPPS.

L'effet de la vitesse de filtration sur l'efficacité a également été étudié. La Figure 20 présente ces résultats à la MPPS (525 nm pour LSG).

Pour les matériaux MP et le FS (cadran A), les niveaux d'efficacité aux différentes vitesses sont élevés, et la vitesse ne semble pas avoir d'effet systématique ou particulièrement marqué. Pour les SMS (cadran B), le comportement typique d'un média filtrant pour aérosols solides a pu être observé à mesure que la vitesse superficielle diminuait, à savoir une augmentation de l'efficacité de collecte avec la diminution de la vitesse superficielle, surtout pour les particules de plus faible diamètre, du fait du renforcement de la collecte par diffusion brownienne. L'effet de la vitesse sur l'efficacité des matériaux KC A20 et KC A30 est moins marqué que pour les autres SMS.

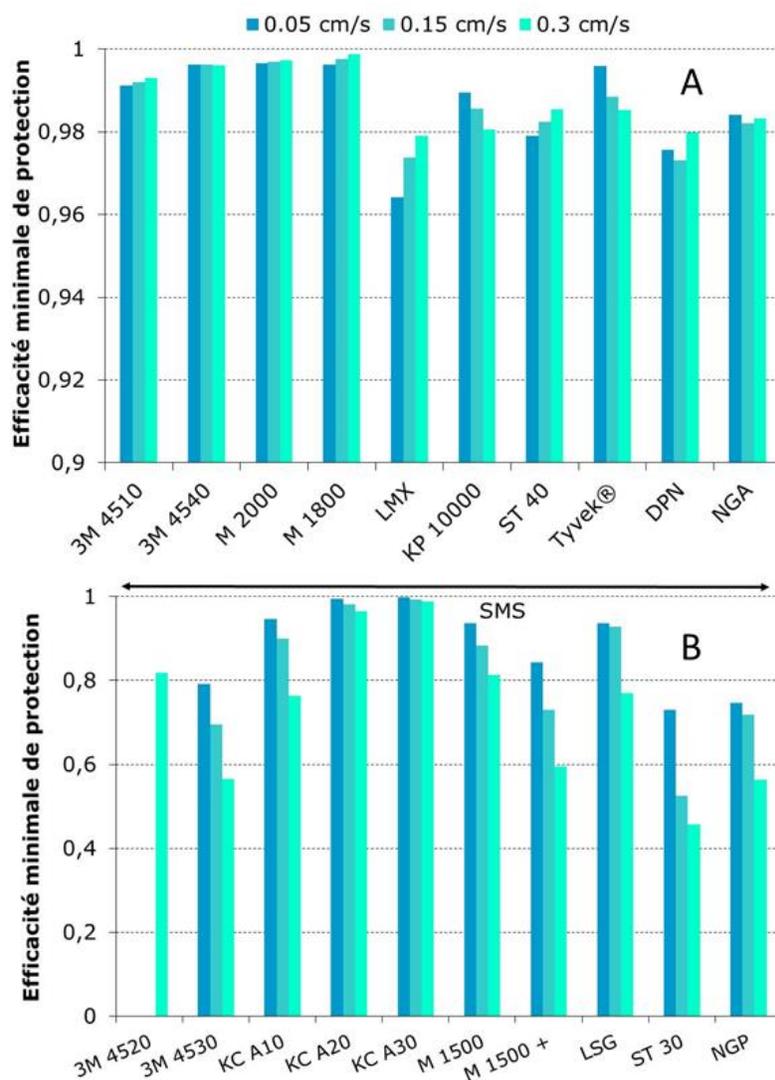


Figure 20. Effet de la vitesse de filtration sur l'efficacité pour la MPPS.

5.4.2.2 Discussion et analyse des efficacités de protection

5.4.2.2.1 Cas des matériaux microporeux et *flashspun*

Les matériaux inclus dans le groupe C défini plus tôt se caractérisent notamment par une très haute efficacité de protection. La couche filtrante des MP n'est pas constituée de fibres, mais d'une membrane procurant cette très haute efficacité de protection grâce à des pores de très faibles tailles. D'après la Figure 13, ces pores mesurent entre 1 et 2 μm de diamètre, mais il est probable que leur distribution s'étende à des niveaux inférieurs, ce qui n'a pu être vérifié à cause des limites expérimentales de la méthode utilisée pour les mesurer. En effet, la littérature fait plutôt mention pour ce type de films de pores en forme de fentes mesurant entre 20 nm et 40 nm de large et de 200 nm à 400 nm de long (Hutten, 2015). En plus de cette très faible taille

de pores, la plus faible porosité totale de ces textiles en comparaison de celle des matériaux de type SMS (Tableau 10) pourrait aussi contribuer aux très hauts niveaux de protection observés.

Ces pores de très faible taille peuvent également fournir une explication à la stagnation ou à la légère tendance à la baisse de l'efficacité de protection observée pour huit des neuf MP (à l'exception du KP 10000) avec la diminution de la vitesse superficielle (Figure 20). Les très importantes pertes de charge générées pourraient créer de fortes dépressions au sein des films microporeux. En effet, en utilisant la loi de Darcy (Équation 6) et les résistivités hydrauliques des MP (Figure 14), des pertes de charge pouvant atteindre 17 % de la pression atmosphérique normale (1013 hPa) ont pu être calculées pour une vitesse de 0,3 cm/s. Une telle augmentation de la pression différentielle pourrait transformer les parois internes des films microporeux en des impacteurs à basse pression du fait d'une augmentation du libre parcours moyen des particules dans l'air et augmenter ainsi, même pour des particules possédant une faible inertie, l'efficacité de collecte par impaction. Cela permettrait ainsi de compenser l'amoinissement de la diffusion brownienne due à l'augmentation de la vitesse superficielle. Du fait du faible diamètre des pores, la collecte par impaction pourrait également être assistée positivement par une vitesse interstitielle importante, mais aussi par les très courtes distances d'impaction au sein des films microporeux (de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres). Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que l'ampleur des pertes de charge des MP est cohérente avec l'hypothèse formulée jusqu'ici. Ainsi, les MP générant les pertes de charge les plus importantes (entre 10 % et 20 % de la pression atmosphérique normale pour les ST40, LMX, M1800, 3M 4510 et DPN) sont aussi ceux se comportant de la façon la plus inattendue avec une hausse de l'efficacité de protection avec la vitesse de filtration alors que le KP 10 000 montrant une évolution classique de l'efficacité est le textile microporeux générant le moins de perte de charge (environ 4 % de la pression atmosphérique normale). Les trois autres matériaux (M2000, NGA et 3M4540) dont l'efficacité est restée constante avec l'évolution de la vitesse présentent quant à eux des pertes de charge intermédiaires, c.-à-d., entre 5 % et 10 % de la pression atmosphérique normale. L'hypothèse d'une impaction à basse pression est également cohérente avec les faibles valeurs de MPPS croissantes avec la diminution de la vitesse. En effet, l'impaction à basse pression pourrait préférentiellement améliorer la collecte des particules entre 200 nm et 600 nm en comparaison de celle des particules ultrafines (inférieures à 100 nm). Finalement, un autre phénomène concourant à l'explication de ces basses valeurs de MPPS pourrait être l'effet tamis créé par les pores de très faible diamètre.

En comparaison des textiles de type SMS, les caractéristiques des MP sont par ailleurs cohérentes avec les résultats des mesures des propriétés indicatrices du confort. En effet, les MP possèdent des résistivités hydrauliques et des taux de transmission de vapeur d'eau environ 10 000 fois et 2 fois plus élevées, respectivement.

Un autre type de matériau appartenant au groupe C est le Tyvek®. Il possède la particularité d'être le seul matériau monocouche dont la totalité de l'épaisseur, 230 µm, participe à la collecte des particules. Puisque ce textile n'est pas constitué de fibres clairement définissables au microscope, seules une plus grande épaisseur utile de filtration, une taille intermédiaire de pores en comparaison des textiles de type SMS et MP et une des plus faibles porosités de couche filtrante (environ 76 %) peuvent expliquer le haut niveau de protection du Tyvek® (au-delà de 98,5 %) simultanément à des performances intermédiaires en matière de respirabilité (environ 10⁹ /m). Bien que cohérentes avec la plus faible perméabilité à la vapeur d'eau en

comparaison des textiles de type SMS, les différentes propriétés du Tyvek® n'expliquent en revanche pas l'absence de différence avec les MP.

5.4.2.2.2 Cas des SMS

Les matériaux SMS de l'étude constituent les groupes A (quatre SMS) et B (quatre SMS) à part entière, et deux d'entre eux sont inclus dans le groupe C. La Figure 21 présente les courbes d'efficacité de ces groupes à 0,3 cm/s.

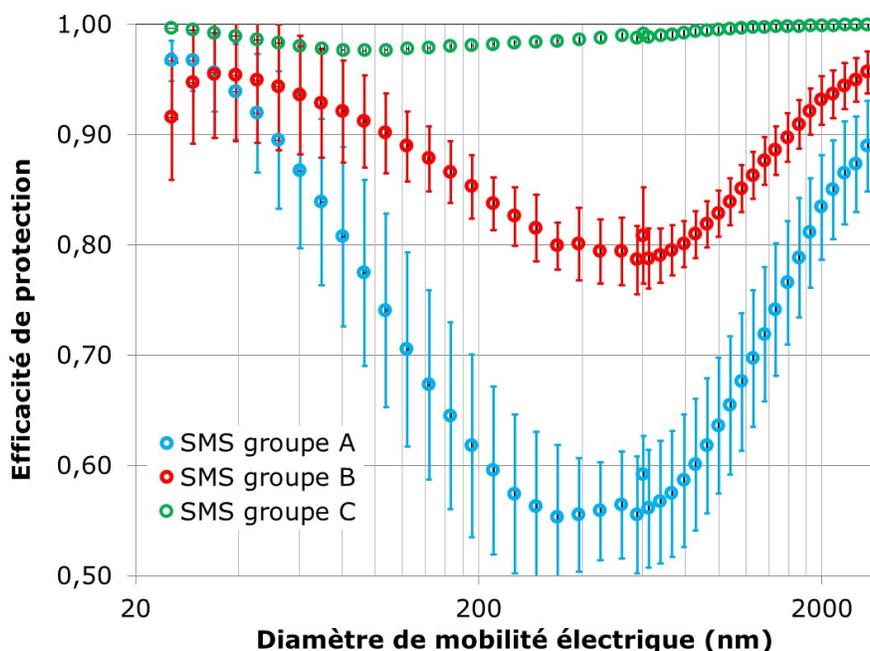


Figure 21. Groupes d'efficacité des SMS.

Afin d'expliquer ces différences d'efficacité des matériaux fibreux, les propriétés physiques des couches filtrantes M ont été comparées (Figure 22). De manière générale, aucune tendance nette ne se dégage a priori des données de caractérisation de la couche filtrante (couche M) des matériaux des groupes A, B et C. Ainsi pour ces trois groupes, le diamètre des fibres varie entre 2 μm et 3 μm (cadran B) sans afficher une claire décroissance du groupe A au groupe C qui aurait pour effet d'augmenter l'efficacité de collecte. La même absence de tendance a été observée concernant la porosité estimée des couches M, qui varie entre 0,7 et 0,85 (Cadran C) sans être systématiquement supérieure pour le groupe A regroupant les SMS les moins efficaces. Concernant la porosité des couches M, la Figure 22 (cadran C) montre également que les deux méthodes utilisées pour son calcul (cf 4.2.2.2) donnent des résultats similaires. Cela confirme l'apport négligeable des couches S à la résistance à l'écoulement des textiles de type SMS. Finalement, le cadran A montre que le seul paramètre variant selon le groupe est l'épaisseur de la couche M, qui pourrait provoquer une hausse de l'efficacité de collecte entre le groupe A et le groupe B (environ 11 μm pour le groupe A et 16 μm pour le groupe B). En moyenne, l'épaisseur de la couche M varie d'un facteur 1,5 d'un groupe à une autre.

Par contre, l'épaisseur moyenne de la couche M du groupe C reste plus faible que celle du groupe B. Les MPPS des KC A20 et KC A30 étant d'environ 100 nm, c'est-à-dire bien inférieures à celles observées pour les autres SMS, il est fort probable que les très hauts niveaux de protection observés soient le fait d'une amélioration de la collecte par interaction électrostatique. Cette hypothèse semble être confirmée par le manufacturier faisant état dans les spécifications techniques d'un traitement des fibres par un procédé nommé « MICROFORCE® ».

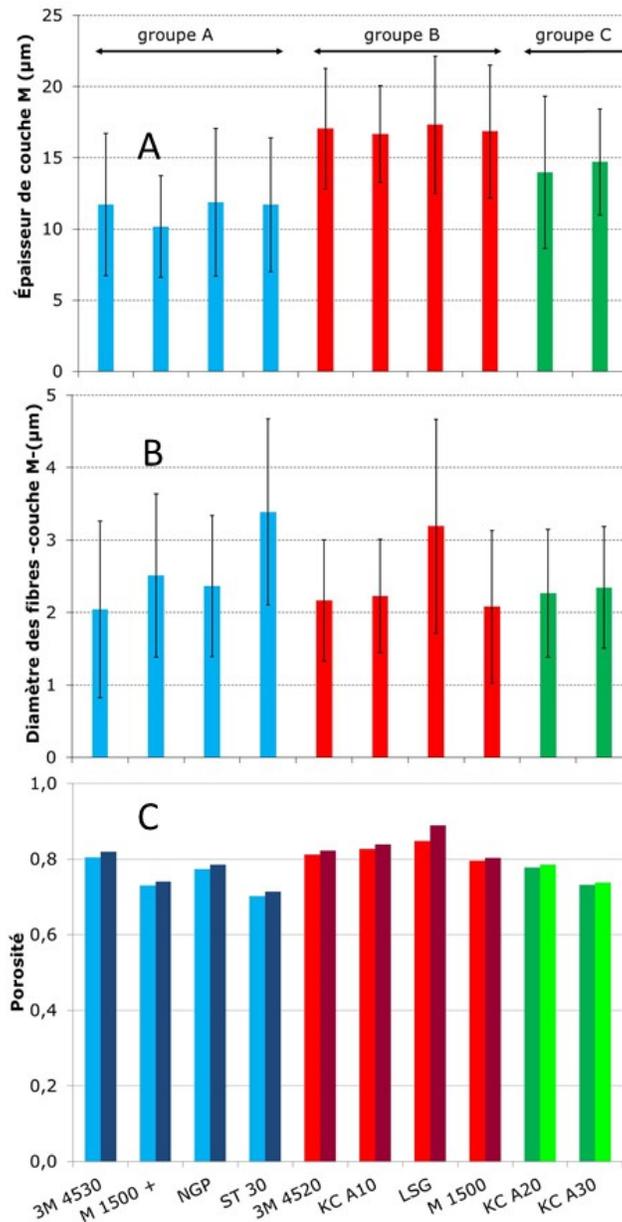


Figure 22. Propriétés de la couche M des SMS.

A : épaisseur de la couche ; B : diamètre des fibres ; C : porosité

Afin de vérifier si l'augmentation de l'épaisseur d'un facteur 1,5 entre les groupes A et B pourrait effectivement expliquer l'augmentation de l'efficacité entre ces groupes, l'efficacité de collecte d'un matériau virtuel de type SMS a été calculée sur la base des efficacités fractionnelles moyennes du groupe A en gardant toutes ses caractéristiques inchangées à l'exception de l'épaisseur de sa couche M. L'équation utilisée pour ce calcul est celle décrivant l'efficacité de collecte globale des médias fibreux classiques. Pour le groupe A, l'efficacité globale de protection, E_A , du matériau moyen est donnée par :

$$E_A = 1 - \exp\left(-4 \cdot e_f \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \cdot \frac{Z_{M,A}}{\pi \cdot d_f}\right) \quad \text{Équation 11}$$

Avec e_f l'efficacité unitaire de collecte, ϵ la porosité du medium, d_f le diamètre des fibres et $Z_{M,A}$ l'épaisseur de la couche M. La même équation a été utilisée pour calculer l'efficacité globale de protection du matériau virtuel, E_Y :

$$E_Y = 1 - \exp\left(-4 \cdot e_f \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \cdot \frac{Y \cdot Z_{M,A}}{\pi \cdot d_f}\right) \quad \text{Équation 12}$$

En combinant ces deux dernières équations, E_Y peut être exprimée de la façon suivante :

$$E_Y = 1 - (1 - E_A)^Y \quad \text{Équation 13}$$

La Figure 23 présente l'efficacité d'un matériau virtuel dont l'épaisseur serait 1,5 fois celle du groupe A à 0,3 cm/s. On remarque que l'écart relatif entre l'efficacité du textile virtuel et celle des SMS du groupe B est faible. Il n'excède pas 10 % à 0,3 cm/s (5 % à 0,15 cm/s et 0,05 cm/s, données non présentées). Sur cette figure, les courbes violettes (tirets) représentent l'efficacité du SMS virtuel en prenant en compte les écarts-types des mesures d'épaisseur des couches M, menant au minimum et au maximum à un facteur Y de 1,44 et de 1,59, respectivement. Cela semble donc indiquer que l'augmentation de l'efficacité entre les groupes A et B peut en grande partie être attribuée à une augmentation de l'épaisseur de la couche M.

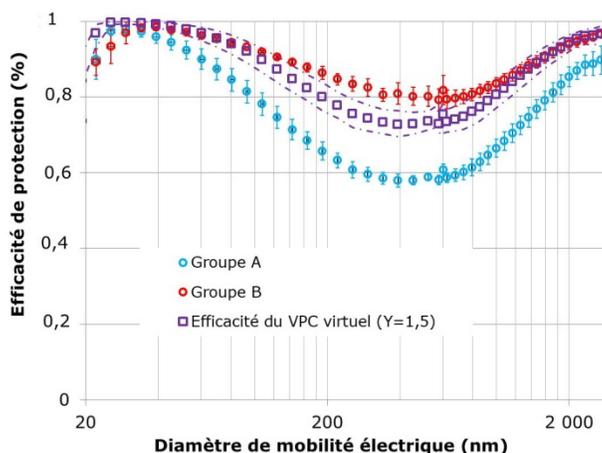


Figure 23. Effet simulé de l'augmentation de l'épaisseur d'une couche M sur l'efficacité de protection.

Parmi les SMS, le ST 30 et le LSG, appartenant respectivement aux groupes A et B, présentent des singularités et diffèrent du comportement général.

LSG

Le LSG montre effectivement un profil plat d'efficacité de collecte des particules ultrafines et submicroniques. Même si aucune explication définitive n'a pu être trouvée jusqu'à présent, la caractérisation des textiles a permis de mettre en évidence la structure unique du LSG. La différence avec les autres SMS est surtout notable pour les fibres composant les couches S et les couches M (Figure 22 et Figure 24).

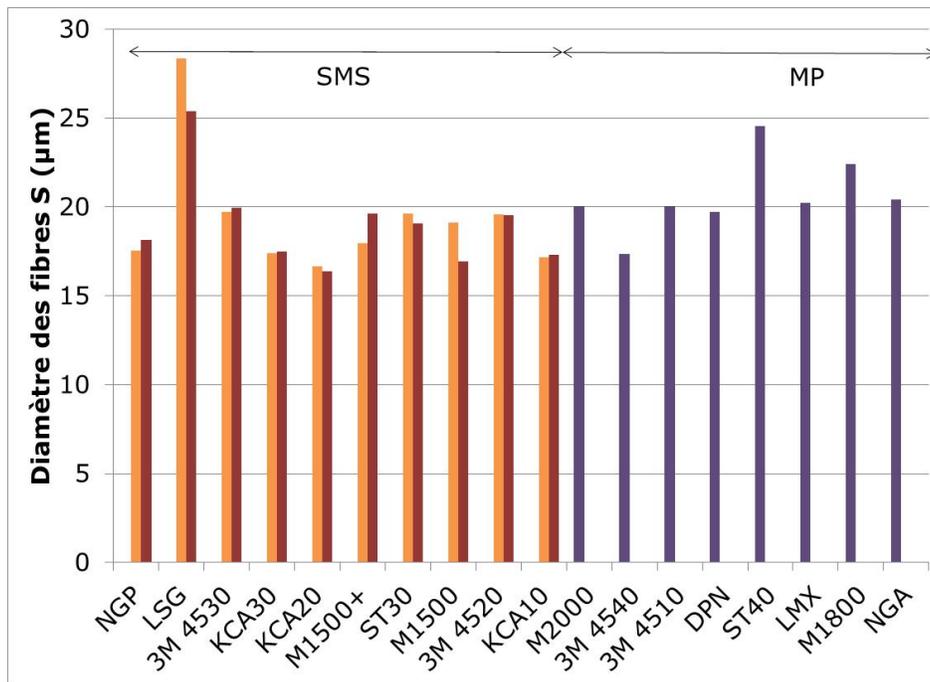


Figure 24. Diamètre moyen des fibres des couches S.

(Orange / brun : couche intérieure/extérieure S des SMS ; violet : couche S des MP)

En effet, le diamètre des fibres composant ses couches S est de 25 % à 50 % supérieur aux autres matériaux et celui des fibres composant sa couche M est environ 50 % plus élevé que celui des autres vêtements de type SMS (à l'exception du ST 30). Ces diamètres de fibres plus importants expliquent certainement la forte proportion de pores de grosses tailles dans la distribution présentée à la Figure 13. Conséquemment, il est noté une plus faible efficacité de collecte des particules browniennes (en comparaison des autres matériaux du groupe B) ainsi que la plus faible résistivité hydraulique du LSG parmi tous les autres textiles étudiés (Figure 14).

Ces pores de plus grand diamètre devraient également affecter l'efficacité du LSG pour les autres particules de taille supérieure, ce que la comparaison avec les autres SMS du groupe B ne montre pas. Le « puits » d'efficacité de l'ensemble des matériaux du groupe B se situe entre 75 % et 85 %, pour des particules de tailles comprises entre 300 nm et 500 nm. Une hypothèse

possible pour expliquer cette observation pourrait être l'effet positif d'un traitement de type électrostatique, non mentionné par le fabricant, qui compenserait l'effet négatif des pores de plus gros diamètres sur l'efficacité.

ST 30

Bien qu'inclus dans le groupe A, le ST 30 possède des efficacités de protection significativement plus faibles que celles des M 1500+, 3M 4530 et NGP (10 % à 20 % inférieures). Le ST 30 se distingue dans ce groupe par un diamètre de fibres de la couche M (Figure 21) plus important, diminuant l'efficacité relative, mais aussi par une porosité plus faible, susceptible de l'augmenter. Cependant, les pores du ST30 présentent une distribution de tailles très resserrée (Figure 13) sur des valeurs élevées (entre 9 et 12,5 µm), tout comme le LSG et le M1500.

5.4.2.3 Modélisation

Pour les quatre matériaux SMS du groupe A, qui présentent les efficacités les plus faibles, des travaux de modélisation des données ont été effectués pour compléter la description et la compréhension des efficacités mesurées (cf. sous-section 4.3.2.5. pour la description). Le Tableau 14 présente les nombres de fois où les modèles ont été sélectionnés sur la base de leur adéquation avec les efficacités de protection mesurées des matériaux. Par exemple, parmi les 120 choix possibles de modèles pour la diffusion (10 modèles×3 vitesses×4 SMS), le modèle St s'est avéré être le meilleur choix à 44 reprises.

Tableau 14. Classement des modèles de capture de particules retenus

Modèles	M1500 +	ST 30	3M 4530	NGP	Bilan	
Diffusion	St	14	6	12	12	44
	FST	12	6	10	12	40
	K	2	2	6	2	12
	Lr	2	4	2	-	8
	LI1	-	8	-	4	12
	LI2	-	4	-	-	4
Interception	K	20	24	22	26	92
	St	10	6	8	4	28
Interception/Diffusion	St	16	22	20	22	80
	Mg	12	6	10	8	36
	0	2	2	-	-	4
Impaction	Lan	15	15	15	15	60
	Lh	15	15	15	15	60

Sur la base de cette approche, c'est le modèle St-K-St-Lan qui présente le meilleur potentiel pour décrire les efficacités de protection de ces quatre matériaux. La Figure 25 présente ses performances pour les quatre SMS à 0,3 cm/s.

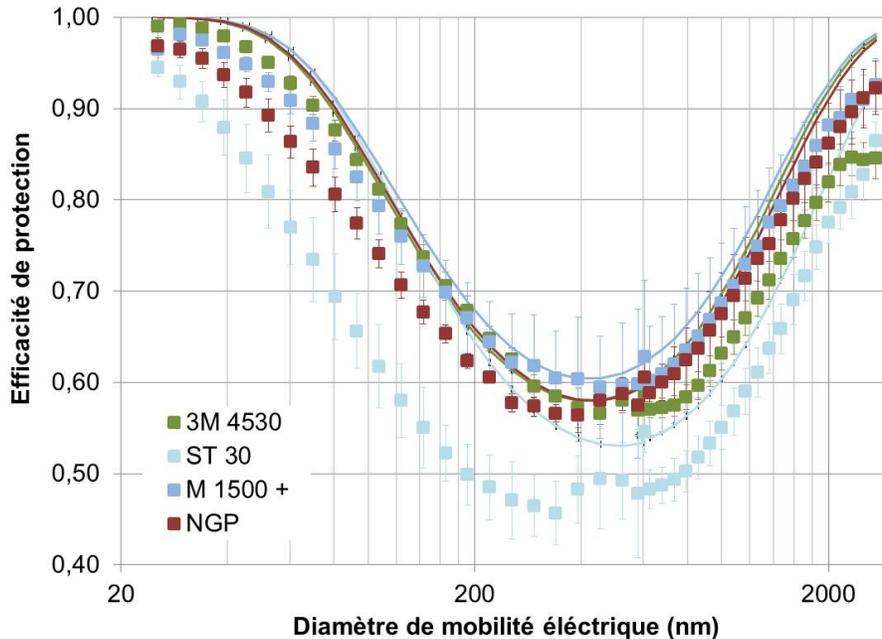


Figure 25. Modélisation des données expérimentales d'efficacité de quatre matériaux SMS avec le modèle St-K-St-Lan.

À l'exception du ST 30, le modèle sélectionné décrit relativement bien les données expérimentales. Cependant, l'efficacité du ST 30 est surestimée, particulièrement pour les particules de taille inférieure à 300 nm. Dans son cas, l'utilisation du modèle LI1-K-St-Lan aurait été préférable.

La Figure 26 présente les résultats de modélisation pour le matériau 3M 4530 aux trois vitesses expérimentales, ainsi qu'à des vitesses utilisées dans la littérature (Gao *et al.*, 2011). La bonne description des données expérimentales permet d'envisager l'extrapolation des résultats à des vitesses inférieures. Ainsi, même des matériaux SMS classés parmi les moins performants peuvent potentiellement atteindre un minimum d'efficacité autour de 80 %.

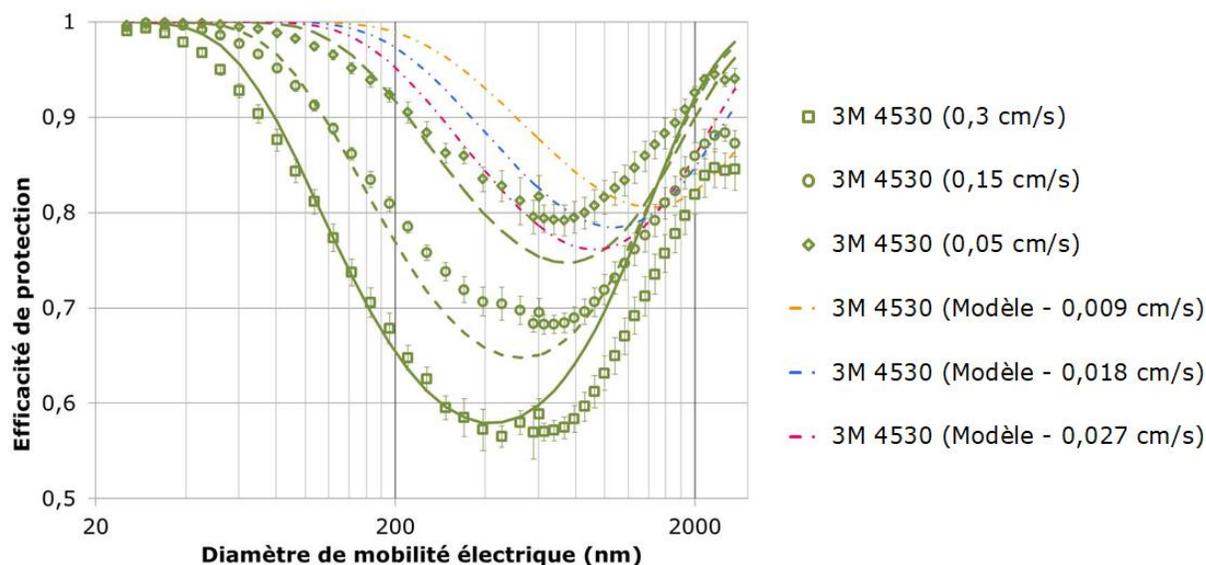


Figure 26. Modélisation et extrapolation de l'efficacité du matériau 3M 4530.

5.4.2.4 Effet des coutures sur l'efficacité de protection

La Figure 27 illustre l'effet de différents types de coutures⁴ par exemple sur l'efficacité de protection de quatre matériaux appartenant aux trois groupes A, B et C précédemment décrits à 0,3 cm/s. La longueur de couture exposée dans la petite cellule équivalait à un diamètre de cellule, soit 39 mm.

⁴ Les types de coutures peuvent par exemple être visualisés à l'adresse suivante :
https://cdn2.hubspot.net/hubfs/134559/Site_Pages/Resource/docs/qr_perf_selec1.pdf

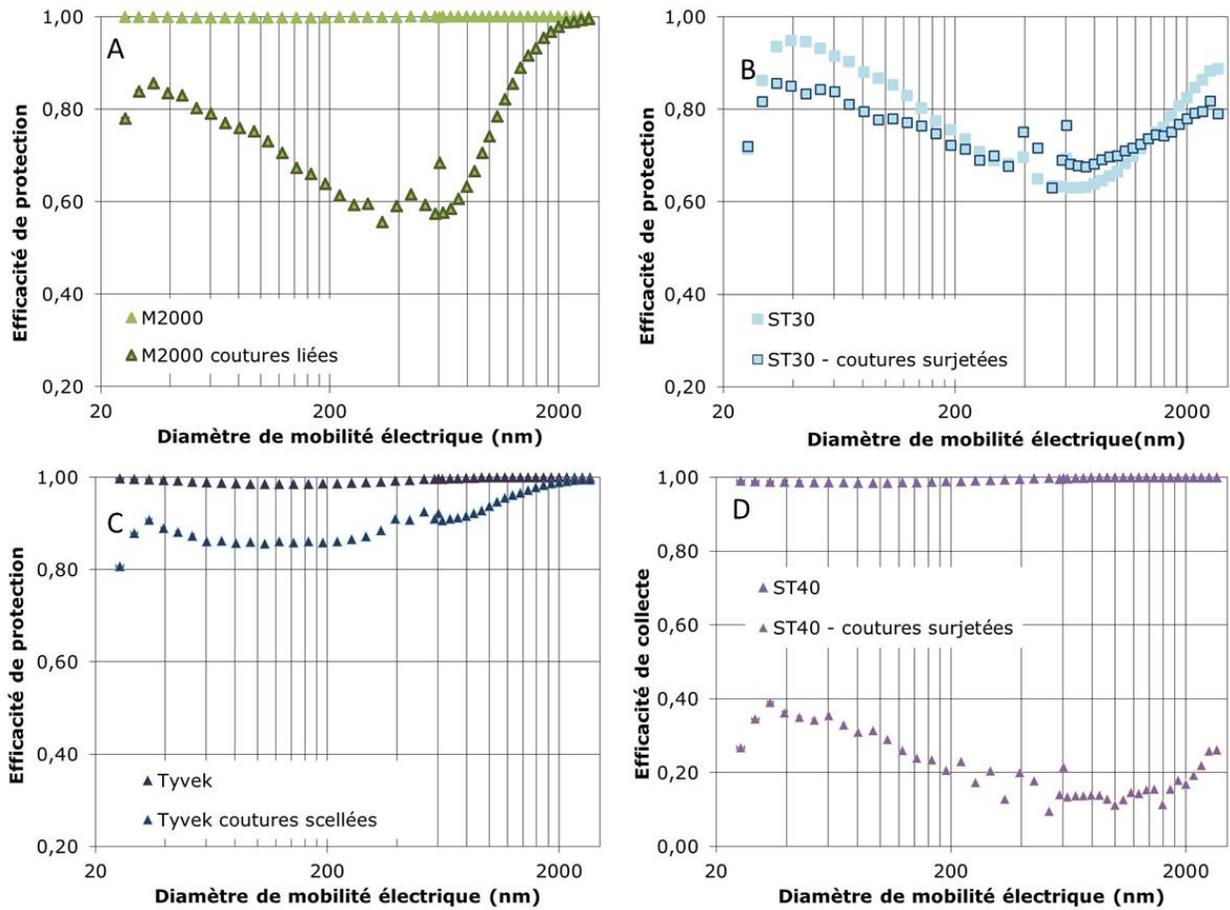


Figure 27. Effet des coutures sur l'efficacité de protection.

Globalement, il apparaît que les coutures sont une source de pénétration de particules à l'intérieur des VPC. En comparant les données des cadrans A, C et D pour des matériaux peu perméables à l'air et très efficaces, il apparaît de surcroît que les coutures surjetées sont moins efficaces que les coutures liées, elles-mêmes moins efficaces que les coutures scellées. Les données des cadrans B et D illustrent cependant que, selon la nature du matériau, et notamment sa résistivité hydraulique, les coutures surjetées n'ont pas le même impact sur l'efficacité globale. Ainsi, les coutures les moins résistantes n'affecteraient pas outre mesure l'efficacité des matériaux très perméables (déjà) moins efficaces. Cette hypothèse est confirmée par les rapports de perméabilité des 20 matériaux, avec et sans coutures (Figure 28).

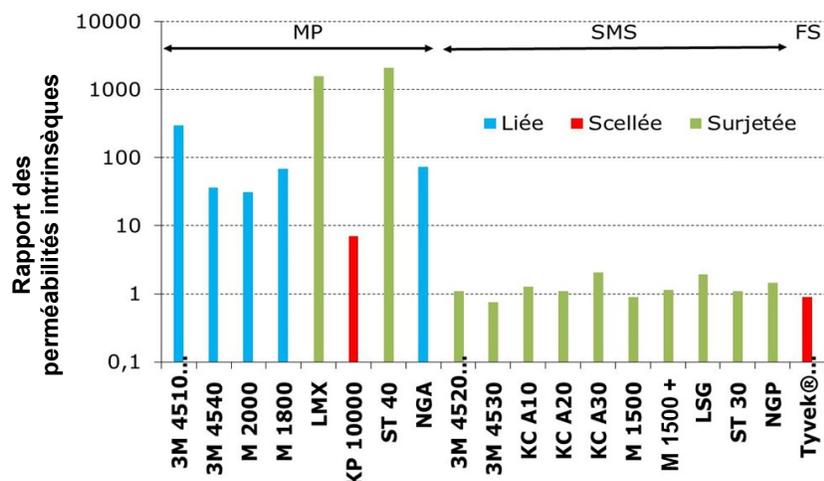


Figure 28. Effet des coutures sur la perméabilité des matériaux.

La présence de coutures surjetées sur les matériaux SMS, matériaux les plus perméables, les affecte peu (rapport entre les perméabilités du matériau et de la section avec couture proche de 1). Les rapports de perméabilité intrinsèques des MP et du FS évoluent selon l'ordre inverse établi pour l'efficacité des trois types de coutures : Plus une couture est perméable, moins elle est efficace.

5.4.2.5 Effet de l'usure sur l'efficacité de protection

La certification d'un ÉPI consiste in fine à garantir un certain niveau de performances à l'état neuf. Cependant, certains auteurs questionnent l'efficacité en milieu de travail réel, et d'autres simulent l'utilisation ou l'usure naturelle. Par exemple, Irzmanska et Stefko (2015) proposent un banc d'essai destiné à déterminer la durée de vie de gants soumis à l'action combinée des fluides de coupe et d'autres contraintes mécaniques. Phalen, Le et Wong (2014) étudient de leur côté l'effet d'un mouvement humain simulé en laboratoire sur le temps de perméation de l'éthanol à travers des gants jetables en nitrile. Finalement, Vinches *et al.* (2013), puis Ben Salah *et al.* (2016) ont étudié l'effet de certaines contraintes mécaniques sur la pénétration de nanoparticules en poudre, en solution colloïdale ou en aérosols à travers des matériaux de gants et de VPC.

Dans cette étude, les efficacités des trois types de matériaux neufs ont été comparées aux efficacités des mêmes matériaux après qu'ils aient été sollicités mécaniquement à l'aide de méthodes d'essais normalisées pour l'abrasion (ASTM international, 2012b) et la fissuration par flexion (ASTM international, 2011). Les niveaux de sollicitation imposés en abrasion (100, 1000 et 2000) et en flexion (2500, 15 000, 100 000) correspondent aux classes 2, 4 et 6 de résistance pour chacun des deux critères de la norme EN 14 325 (CEN, 2018). La Figure 29 illustre les résultats obtenus.

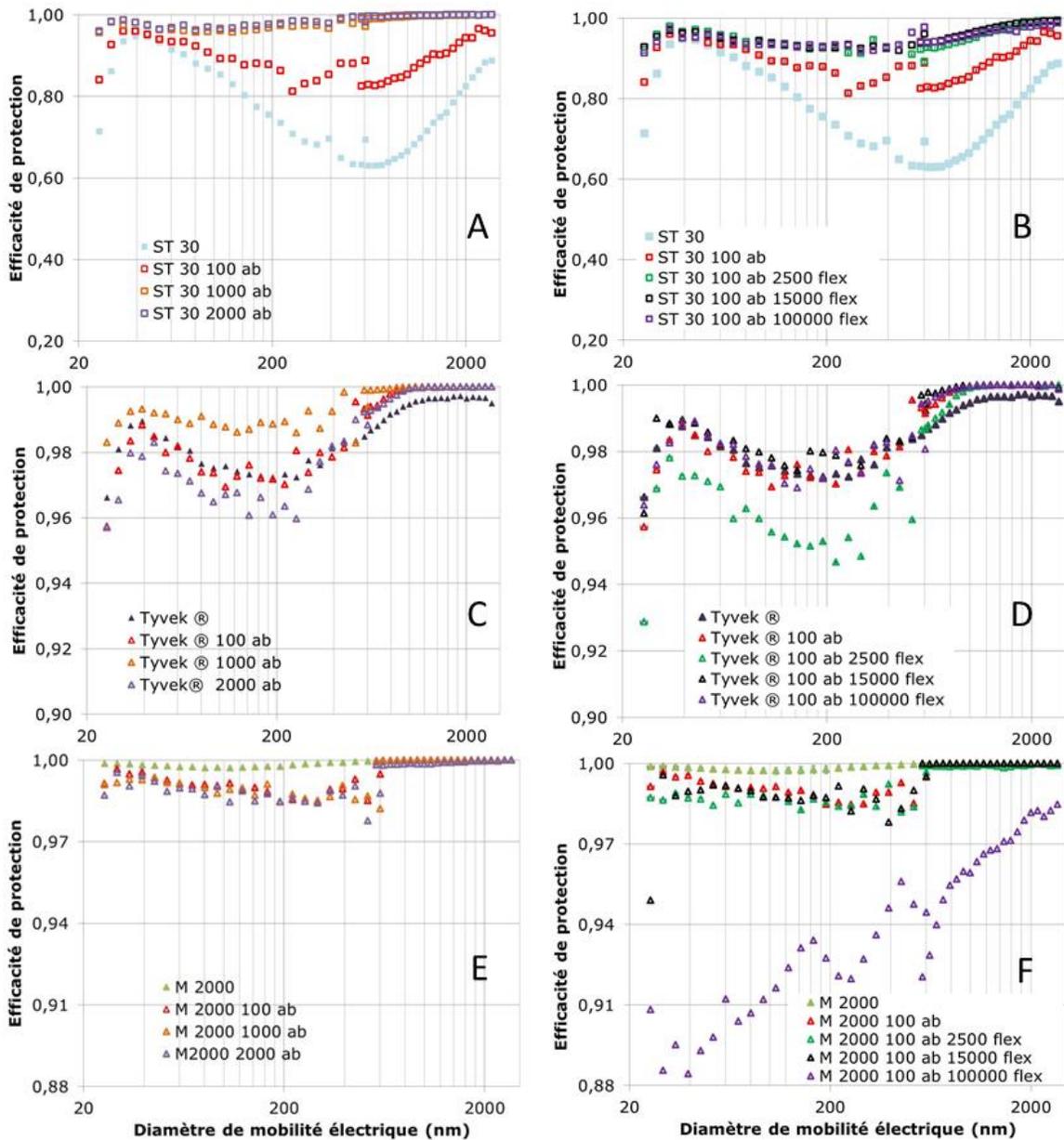


Figure 29. Effet de l'usure sur l'efficacité de protection.

La comparaison des cadrans A, C et E montre que les sollicitations des matériaux par abrasion n'ont pas ou peu d'effets significatifs sur l'efficacité de protection du matériau MP et du FS. En revanche, elles semblent positives pour l'efficacité du SMS.

L'observation des cadrans B, D et F montre que des cycles de flexion, appliqués après 100 cycles d'abrasion, ont peu ou pas d'influence sur l'efficacité. De son côté, le matériau MP semble montrer des problèmes d'intégrité dans la condition la plus sévère (M2000, 100 ab 100000 Flex).

5.5 Fouille de données et déterminants des performances

L'approche présentée jusqu'à maintenant pour tenter d'observer des différences ou des similarités entre les matériaux, ou d'expliquer les efficacités de protection mesurées a adopté une direction classique, déjà suivie par les études les plus récentes sur le sujet (Gao *et al.*, 2011 ; Jaques et Portnoff, 2017, Ben Salah *et al.*, 2016). Elle a consisté notamment en la mise en parallèle de certains paramètres pertinents concernant la caractérisation physique des matériaux et leur spectre d'efficacité de protection pour identifier les déterminants de ces performances. Bien que la présente étude se distingue des précédentes par un plus grand échantillon de matériaux, une caractérisation plus fine des matériaux, une gamme de tailles de particules étudiées plus importantes, et des essais de modélisation, il n'en reste pas moins que la multi dimensionnalité des observations représente une difficulté pour, in fine, produire des recommandations de matériaux de VPC de type 5 selon l'exposition.

L'objectif de cette section est donc d'évaluer l'intérêt des cartes de Kohonen pour fouiller les données déjà exploitées auparavant, et de voir dans quelle mesure cette approche pourrait être utile pour identifier des déterminants d'efficacité, c'est-à-dire des descripteurs discriminants entre matériaux. Les 20 matériaux ont donc été cartographiés sur la base de leurs propriétés physiques (sous-section 5.2), sur la base de leurs performances (sous-sections 4.3.1 et 5.4.2.1) et simultanément sur la base de leurs propriétés physiques et de leurs performances.

La carte de Kohonen construite à partir de la masse surfacique, de l'épaisseur et de la distribution de taille de pores est présentée en Figure 30.

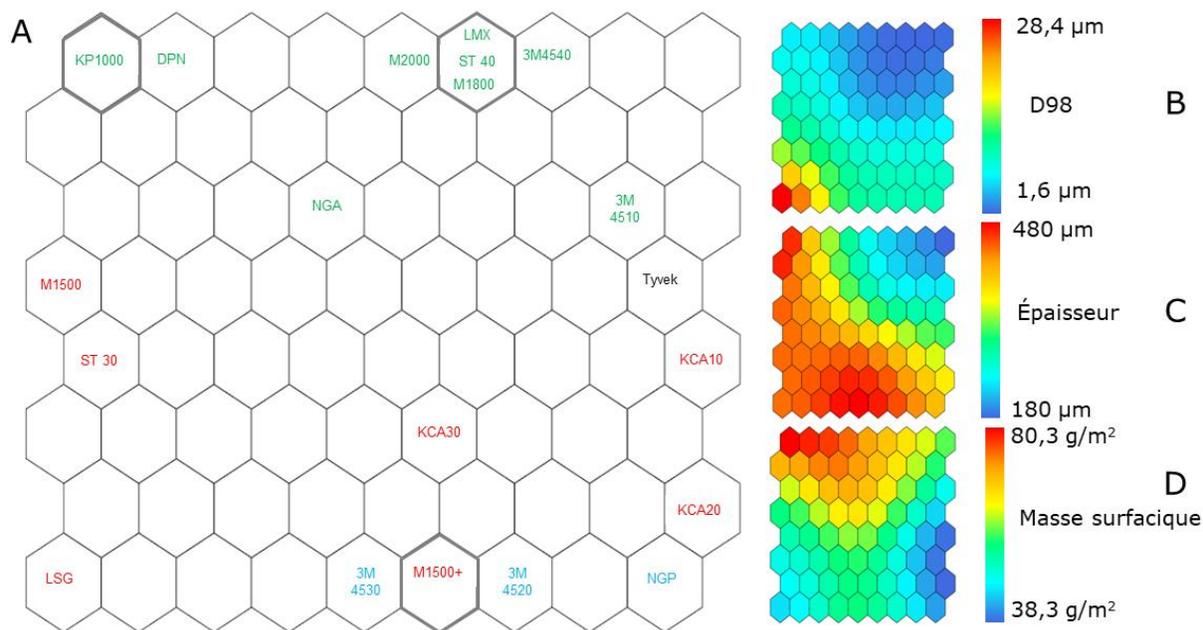


Figure 30. Ordination des matériaux obtenus selon leurs descripteurs physiques.

A) Ordination ; B) Gradient pour le descripteur « taille 98 % » des pores ; C) Gradient pour l'épaisseur ; D) gradient pour la masse surfacique

L'algorithme permet dans un premier temps de différencier objectivement les matériaux par famille sur une carte de 72 cases. Les matériaux MP, en vert, sont regroupés dans la partie supérieure de la carte alors que la famille des SMS (rouges et bleus) occupe plutôt la partie inférieure de la carte. On peut également noter que dans la famille des SMS, les matériaux à multiples couches M (3M 4520, 3M 4530 et NGP, en bleu sur la carte) ne sont pas distingués des SMS à couche M unique. Le Tyvek®, sur la base des descripteurs choisis, se situe dans la zone centrale de la carte et est proche d'un MP et d'un SMS. L'ordination obtenue prend en compte les descripteurs choisis : sur les panels B, C et D de la Figure 30, on peut également voir les gradients colorés des valeurs que prennent certains descripteurs. Les commentaires émis en 5.2 sur la masse surfacique et l'épaisseur sont bien mis en évidence sur cette carte : les MP ont une masse surfacique plus élevée que les SMS. On note aussi que l'épaisseur prend les valeurs les plus importantes dans le bas de la carte, correspondant aux SMS, mais prend tout de même en compte le cas du KP 1000, un MP particulièrement épais. Par ailleurs, on remarque que les valeurs les plus élevées de « D98 », la valeur de taille de pores pour laquelle 98 % des pores sont inférieurs à cette taille, sont dans la partie basse de la carte, qui accueille les SMS. On peut également penser que la spécificité dans la distribution des tailles de pores des matériaux M1500, ST 30 et LSG structure la carte en rassemblant ces trois matériaux dans le quart inférieur gauche de la carte.

La carte de Kohonen prend donc bien en compte les propriétés physiques des matériaux et au-delà des moyennes calculées en 5,2, illustre les différences entre matériaux.

La Figure 31 présente l'ordination des matériaux selon leurs performances.

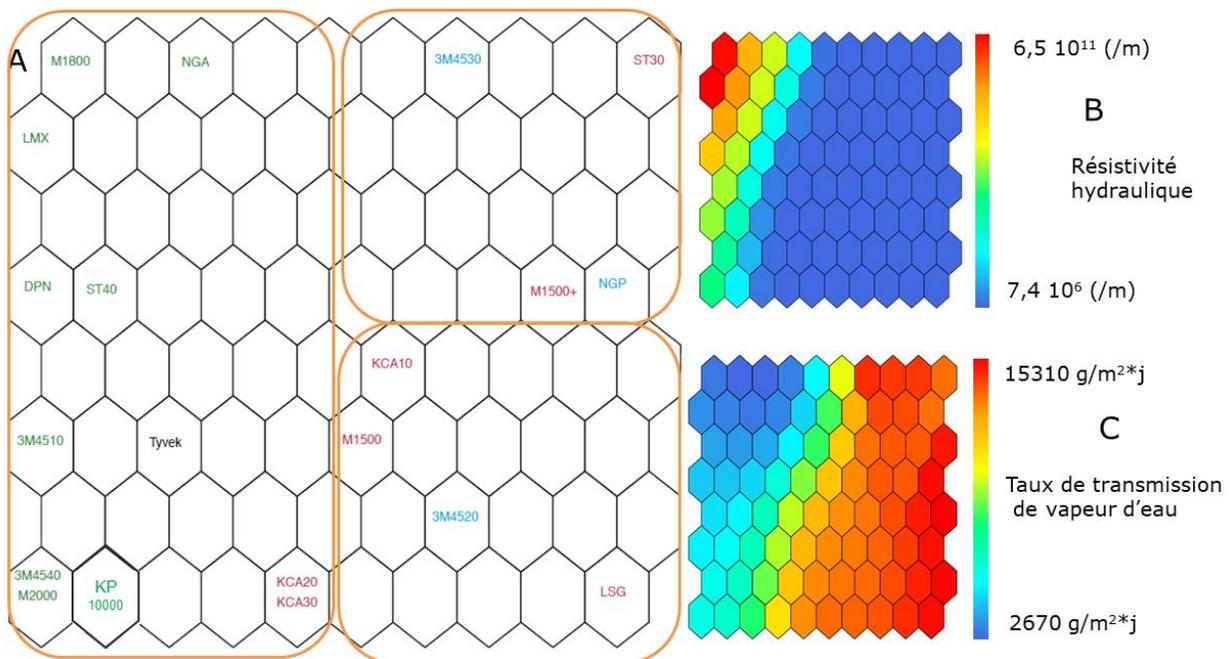


Figure 31. Ordination des matériaux selon leurs performances.

A) Ordination ; B) Gradient pour la résistivité hydraulique ; C) Gradient pour le taux de transmission de vapeurs d'eau

L'algorithme permet, comme pour les propriétés physiques, de différencier objectivement les matériaux par famille. Il a cependant fallu une carte de 80 cases (donc 80 VPC virtuels) pour classer 20 matériaux. Dans le cadran A, la carte permet de constater que les matériaux MP se retrouvent disséminés dans le tiers gauche de la carte. Le Tyvek®, matériau FS, est le plus proche des MP. Les SMS occupent les 2/3 restant de l'espace, qu'ils soient à couche M unique (en rouge) ou multiple (en bleu). Parmi les descripteurs structurant cette carte, les cadrans B et C présentent les gradients concernant les valeurs de résistivité hydraulique et de taux de transmission de vapeur d'eau. On retrouve les SMS dans les zones de la carte où les indicateurs de confort sont favorables. On observe peu de variation dans la résistivité hydraulique des SMS, alors qu'elle est perceptible pour le taux de transmission de vapeur d'eau. Les résistivités hydrauliques et les taux de transmission de vapeur d'eau évoluent en sens inverse. Les MP pour lesquels les indicateurs sont les moins favorables sont dans le coin supérieur gauche de la carte.

La Figure 32 présente les gradients d'efficacité pour quatre tailles de particules prises aux deux extrémités du spectre analysé, dans la zone où la MPPS se situe généralement. De manière globale, on identifie un découpage vertical de la carte avec les matériaux les plus efficaces sur la gauche, la zone des MP et du FS.

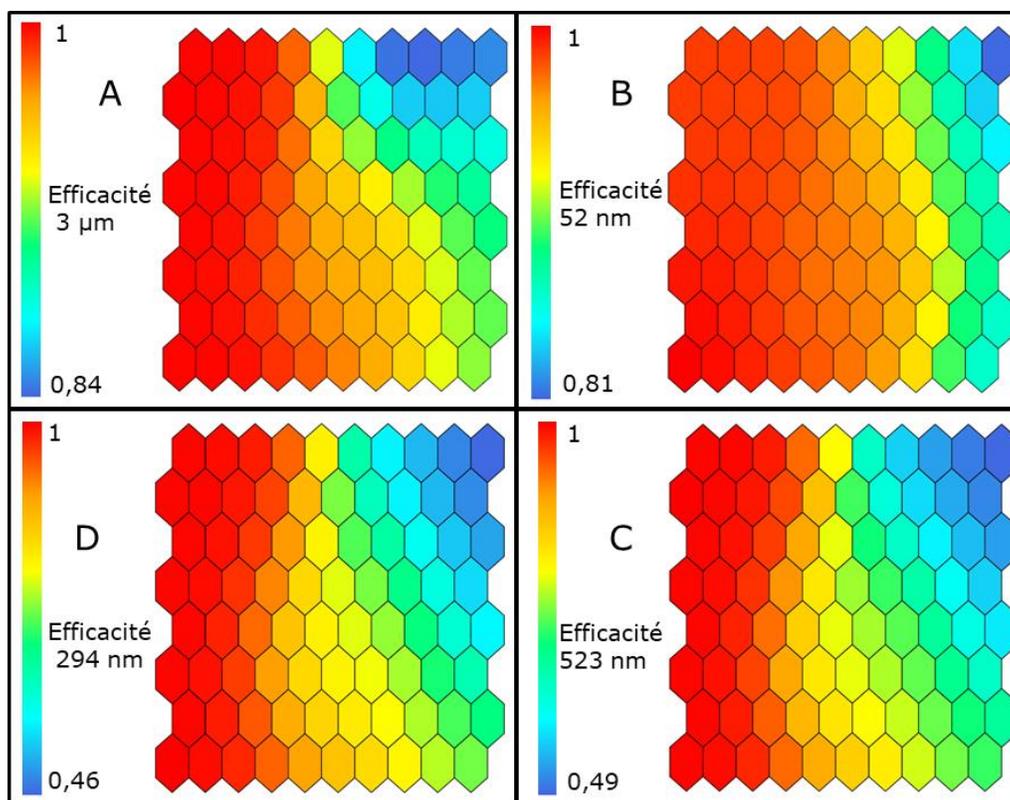


Figure 32. Gradients de certains indicateurs de performances.

À travers l'ordination obtenue, on retrouve les trois groupes identifiés dans la sous-section 5.4.2.1.1, les groupes A, B et C (cadre orange sur la Figure 31). Il est également possible de visualiser clairement que les MP les plus efficaces sont également ceux les moins perméables à l'air et à la vapeur d'eau. Sans égard au confort au porter ou à la nature des particules dont il faut se protéger, le compromis efficacité/confort semble être le meilleur pour les vêtements se situant en bas au centre de la carte, zone où se retrouvent les KCA20 et KCA30.

La Figure 33 présente enfin l'ordination obtenue sur une carte de 110 cases avec les données de performances et les descripteurs physiques des matériaux (cadran A). On y retrouve les trois groupes de performances encadrés en orange (groupe A à gauche, groupe B au centre et groupe C à droite).

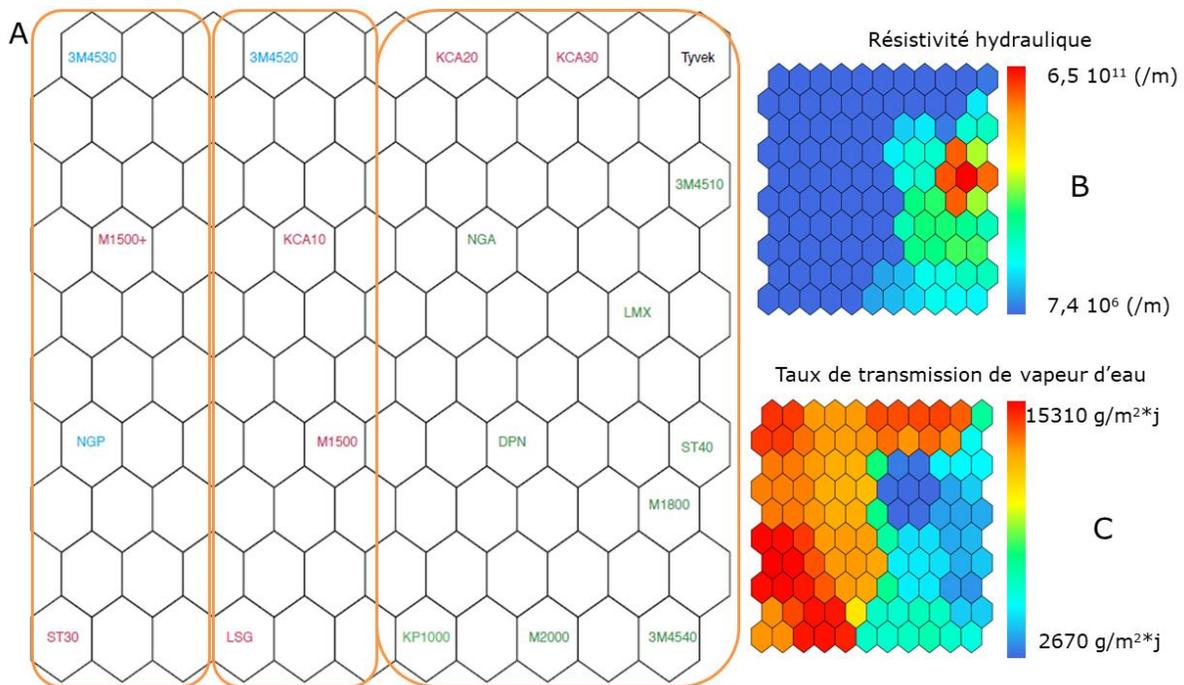


Figure 33. Ordination des matériaux selon leurs performances et leurs descripteurs physiques.

A) Ordination ; B) Gradient pour la résistivité hydraulique ; C) Gradient pour le taux de transmission de vapeurs d'eau

Il est toujours possible de voir une nette démarcation entre les MP et les autres matériaux pour la résistivité hydraulique et le taux de transmission de vapeur d'eau (cadran B et C). Par contre, au sein des MP, et contrairement à la Figure 31, les gradients pour ces deux descripteurs de performances ne suivent pas de direction ou de tendance particulières.

La Figure 34 présente d'autres gradients pour six descripteurs.

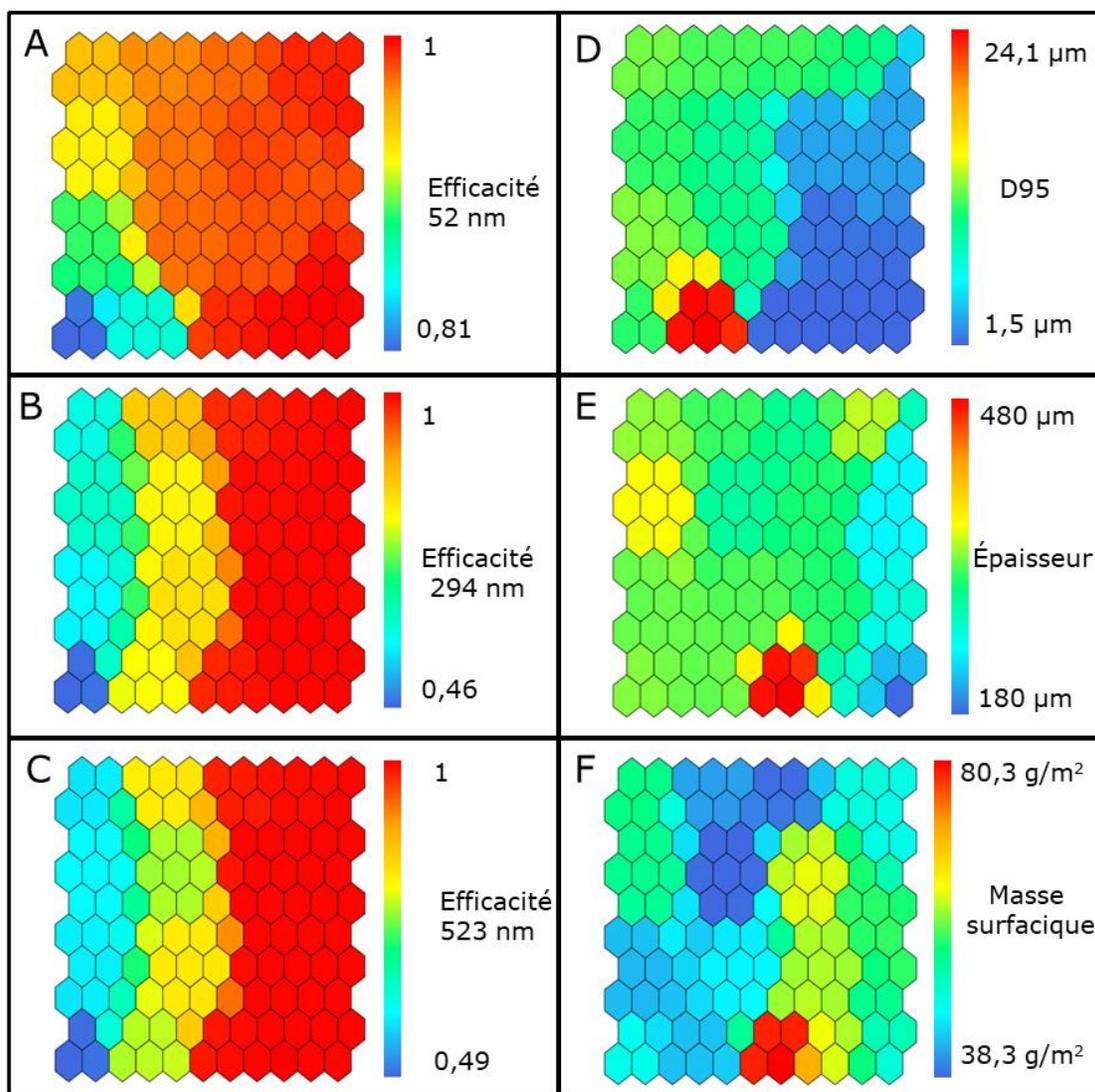


Figure 34. Gradients de descripteurs sélectionnés.

Les gradients d'efficacité (cadrans A, B et C) expliquent correctement le découpage vertical des matériaux en trois groupes, du plus efficace vers la droite (MP) au moins efficace à gauche (SMS du groupe A). Il ne semble y avoir aucune corrélation qualitative entre les efficacités et les descripteurs des cadrans E et F. Ainsi, ni la masse surfacique ni l'épaisseur totale ne semblent être des déterminants macroscopiques de l'efficacité. Cependant, les formes géométriques générées par le gradient « D 95 » (Figure 34, cadran D) sont relativement proches de celle de la résistivité hydraulique et du taux de transmission de vapeur d'eau (Figure 31, cadran B et C) : plus la taille de 95 % des pores est élevée, plus ces descripteurs évoluent dans le sens du confort. Cela est également vrai pour les variables « D 98 », « D 90 » et dans une moindre mesure le « D 85 » (Annexe C).

C'est donc, en première conclusion, du côté de la distribution de taille de pores et des facteurs qui y contribuent qu'il faudrait aller pour mieux comprendre les performances des matériaux contre les particules solides. Les descripteurs « macroscopiques » tels que la masse surfacique et l'épaisseur ne semblent pas suffisamment spécifiques. Cela questionne non pas la technique de visualisation, mais l'existence de variables simples, sur lesquelles baser des règles du pouce, pour orienter le choix d'un VPC plutôt qu'un autre.

5.6 Synthèse

L'approche retenue dans cette étude pour atteindre l'objectif général décrit dans la sous-section 3 a consisté notamment en la sélection de 20 matériaux représentatifs de ceux constituant les VPC de type 5 (ou assimilés), puis leur caractérisation physique et la mesure de leurs performances.

Sur la base des propriétés physiques mesurées et calculées, il a été possible de différencier les matériaux de type MP des SMS. Par contre, rien ne permet de distinguer, au sein de la famille des SMS, les matériaux à multiples couches M. Les MP sont généralement plus denses, moins épais, sans que cela n'explique leur efficacité. Le matériau FS, seul matériau monocouche, apparaît comme le moins dense, le moins épais et présente la plus faible porosité de tous les matériaux.

Du point de vue de la distribution de tailles de pores, il existe par ailleurs une réelle différence entre les MP d'un côté et les SMS et le FS de l'autre.

Celle-ci est certainement associée aux performances des matériaux qui traduisent le confort. Les SMS sont beaucoup plus perméables à l'air et à la vapeur d'eau que les MP. Le FS présente une spécificité, car il a une perméabilité à l'air intermédiaire entre les MP et les SMS, mais une perméabilité à la vapeur d'eau proche des MP. Cela reste inexpliqué pour l'instant.

La détermination des efficacités de protection expérimentales a permis d'affiner les différences entre les matériaux. Alors que les matériaux MP et le FS sont très résistants à la pénétration de particules, les dix matériaux SMS présentent des niveaux d'efficacité de collecte assez variables. Les propriétés physiques macroscopiques n'ont pas permis d'expliquer ces différences. Par contre, au sein de la famille des SMS, la caractérisation fine des couches M et l'analyse des courbes d'efficacité, permettent de soutenir l'idée que c'est l'épaisseur des couches M qui fait leur efficacité, plutôt que le diamètre des fibres *meltblown*. Dans notre échantillon de 20 matériaux, ces fibres présentent un diamètre assez similaire d'un matériau à l'autre. À l'image des pièces faciales filtrantes de type N95 ou P100, le traitement des fibres *meltblown* de certains SMS semble également responsable de l'amélioration de leurs performances.

Les premiers essais de modélisation des efficacités de protection pour les SMS les moins efficaces sont positifs, bien que les modèles de la littérature ne décrivent pas parfaitement l'ensemble des courbes. Ils permettent notamment de montrer que les matériaux SMS les moins efficaces peuvent malgré tout atteindre de bonnes performances à de faibles vitesses. Si les vitesses d'air en milieu de travail étaient telles que les vitesses de filtration étaient inférieures à 0,3 cm/s, alors il serait possible de privilégier des vêtements SMS parmi les moins

efficaces, qui offriraient une protection suffisante tout en procurant plus de confort. Il existe à notre connaissance peu de travaux publiés sur cette thématique, et sur une gamme de tailles de particules aussi étendue.

Les coutures semblent être un facteur contributif important de la fuite vers l'intérieur des VPC, mais elles auraient un impact potentiel différent selon la perméabilité à l'air des matériaux. Les mesures réalisées ne permettent pas d'évaluer ce facteur avec précision, car le choix de la « quantité de coutures » exposée a été fait de manière arbitraire, sans se soucier ni d'une quelconque représentativité avec la « quantité de couture » d'un VPC, ni du rapport entre la longueur de couture exposée et la surface de matériau disponible pour la filtration par exemple. Il reste que, dans les cas où la meilleure étanchéité est recherchée, les coutures scellées représentent le meilleur choix.

Les sollicitations mécaniques de certains matériaux sous forme d'abrasion et/ou de flexion aux plus hautes classes de résistance décrites dans la norme EN 14 325 peuvent modifier leur efficacité. L'abrasion semble améliorer l'efficacité des SMS, possiblement en réduisant le diamètre des fibres *spunbond* et meltblown et/ou la porosité, ou en réorganisant aléatoirement l'amas de fibres du matériau. La flexion ne semble pas avoir d'effet, positif ou négatif important, jusqu'à un niveau élevé où ce type de sollicitation peut altérer l'intégrité des matériaux MP et faire chuter l'efficacité. Dans l'ensemble, c'est le matériau FS qui semble le moins affecté par ces sollicitations mécaniques. Outre les essais rapportés, une cellule permettant de positionner les matériaux de VPC en tension biaxiale a été conçue lors de ce projet. Malheureusement, des problèmes d'étanchéité, en particulier avec les MP, se sont présentés et l'échéancier prévu pour le projet n'a pas permis de trouver une solution. La résistance mécanique et ses effets sur le niveau de pénétration restent des sujets d'intérêt pour de futures études.

6. DISCUSSION

6.1 Contexte québécois

Lorsque des discussions sur les vêtements de protection de diverses catégories de travailleurs sont menées au Québec par des groupes de professionnels concernés par la santé et la sécurité du travail (consultants, hygiénistes, techniciens en hygiène, conseillers ou professionnels scientifiques, etc.), il ressort que, pour la plupart des situations d'exposition chimique considérées, la solution de terrain consisterait à porter un « Tyvek® ». Ce raccourci linguistique, similaire au fait d'appeler un réfrigérateur par le nom d'une marque particulière, Frigidaire®, pourrait traduire une connaissance insuffisante des options de protection chimique corporelle disponibles, ou la difficulté de choisir parmi les options à disposition.

La simple consultation d'une brochure commerciale en ligne récente démontre que même le choix d'un Tyvek® peut effectivement être ardu : à ce jour au Québec, il existe entre cinq et dix vêtements de protection Tyvek® différents disponibles pour le public. Les termes employés dans le RSST pour désigner un vêtement de protection chimique (survêtement ou vêtement de travail) confirment le manque d'assurance dans la gestion de la protection chimique et corporelle au Québec. La sensibilisation accrue des acteurs de première ligne quant au choix judicieux de vêtements de protection chimique apparaît donc nécessaire.

L'adoption au Canada en 2014 de la norme ISO 16602 (ISO, 2007) sur le classement, l'étiquetage et les exigences de performances des vêtements de protection chimique par le Groupe CSA devrait permettre de mieux diffuser les informations clés afin de choisir la protection adéquate pour une panoplie de situations d'exposition, et ce même si cette norme reste d'application volontaire. La CNESST exige cependant des VPC de type 5 pour la protection des travailleurs québécois contre les particules les plus dangereuses. Ce projet de recherche avait pour vocation de contribuer à l'amélioration des connaissances sur ces vêtements. Il avait aussi pour horizon de mieux orienter le choix de VPC de type 5 pour les milieux de travail.

6.2 VPC de type 5 : Vers une amélioration des exigences de résistance chimique ?

Pour ces VPC, la mesure de la résistance chimique ne se fait que par la mesure de la fuite totale vers l'intérieur lorsqu'un sujet humain portant un VPC est exposé à un aérosol de chlorure de sodium. Alors que le résultat actuel net de cette mesure ne se résume qu'à un échec ou à un succès à la certification de type 5, il apparaît particulièrement important qu'on puisse disqualifier de manière la plus certaine possible les vêtements qui ne protégeront pas suffisamment en conditions de travail sans pour autant éliminer ceux qui pourraient convenir dans des milieux moins exposés.

6.2.1 La mesure des concentrations pour calculer la fuite vers l'intérieur

Actuellement, la quantification des concentrations en aérosol se fait sur une base massique, avec un photomètre de flamme. Cette méthode présente l'avantage de fournir un indicateur global de résistance, et de reposer sur de l'instrumentation peu dispendieuse. Ce choix expérimental est similaire à l'approche retenue lors d'essais de certification réalisés par le NIOSH pour les filtres de type N : au lieu de compter les particules et de déterminer des pénétrations par taille de particules, le détecteur employé lors de ces essais est un photomètre à diffusion de lumière qui permet de calculer un taux de pénétration globale, toutes particules confondues (NIOSH, 2016).

Nos données sur les matériaux ont montré que les performances étaient variables, tant pour les MPPS que pour les efficacités de protection. Parmi les matériaux les moins protecteurs étudiés, les SMS présentaient des MPPS qui oscillaient entre 300 et 400 nm (diamètre de mobilité électrique). De là, deux options d'amélioration de ces essais pourraient être mises en œuvre pour mieux caractériser les performances : changer la distribution de taille de l'aérosol d'exposition ou changer la méthode de quantification des particules.

6.2.1.1 Changer la distribution de taille de l'aérosol d'exposition

Il apparaît raisonnable que les conditions d'essais à retenir doivent assurer une présence maximale des particules dans le domaine MPPS. Dans la mesure où c'est la concentration massique qui est mesurée dans les essais de certification, le diamètre aérodynamique médian en masse de l'aérosol devrait donc être centré autour de 450 nm (valeur comprise entre 300 et 400 nm en diamètre de mobilité électrique) contre 600 nm actuellement. Ce choix de conditions représente un « pire cas », et il assure en plus de la robustesse à la mesure massique de fuite vers l'intérieur. À nombre égal de particules, les particules les plus grosses contribuent évidemment de manière plus importante à la réponse du photomètre de flamme. Les particules de 600 nm étant mieux filtrées que les 300-400 nm, leur rétention à l'extérieur du VPC a pour conséquence une baisse « artificielle » de la mesure de la concentration massique à l'intérieur du vêtement, et conduit donc à une fuite vers l'intérieur plus basse.

Il est à noter que cette discussion a déjà eu lieu dans la littérature sur la protection respiratoire. Alors que le diamètre aérodynamique médian en masse de l'aérosol des essais de certification de filtre de type N95 est d'environ 300 μm , la technologie des filtres « electret » génère des MPPS inférieures (50-80 nm environ). Avec le détecteur utilisé, les particules de tailles supérieures à 100 nm fournissent une réponse supérieure aux particules de tailles plus petites (Eninger, Honda, Reponen, McKay, Grinshpun, 2008), pouvant ainsi masquer une pénétration plus importante que le seuil de qualification (5 % pour un N95) des plus petites particules. Cela n'affecterait pas la robustesse du facteur de protection (mathématiquement l'inverse de la fuite totale vers l'intérieur) attribué aux pièces faciales de type N95 (Rengasamy, Verbofsky, King, Shaffer, 2007).

6.2.1.2 Changer la méthode de quantification des particules

L'intérêt ultime de connaître et vérifier les performances des VPC de type 5 en fonction du nombre et/ou de la taille des particules par le biais d'essais normalisés serait d'affiner les recommandations en fonction des conditions d'exposition de milieux de travail spécifiques, un peu à la manière de recommander un vêtement de type 4 résistant à un type de solvant en particulier, plutôt que de seulement recommander un vêtement de type 4.

L'implantation d'un test de certification type fuite vers l'intérieur-comptage de particules semble assez aisée à imaginer, même si cette solution pourrait présenter quelques problèmes expérimentaux. En effet, en mesurant de manière spécifique le chlorure de sodium avec la photométrie de flamme, on s'assure que les seules particules mesurées proviennent du système de génération de particules. En utilisant un SMPS par exemple, cette spécificité serait perdue, et sans précautions expérimentales, d'autres particules, comme des particules de peau ou des peluches de vêtements pourraient être comptabilisées à tort.

La véritable difficulté serait la conception même de vêtements répondant à des spécifications sur la taille des particules. Elle sous-entendrait un contrôle parfait des voies d'entrées des particules à l'intérieur des vêtements, et une maîtrise de leur importance et de leur contribution relative à la fuite totale vers l'intérieur. Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que cette piste s'avère encore laborieuse.

6.2.1.2.1 Les interfaces peau-VPC et la taille des particules

Les pratiques de scellage constatées sur le terrain et lors des essais de certification laissent penser que c'est une voie majeure d'entrée des particules à l'intérieur du VPC. Elles ne renseignent cependant pas sur la taille des particules susceptibles d'entrer préférentiellement. À notre connaissance, il n'existe pas de données dans la littérature scientifique relatives à ce phénomène pour les VPC. Une analogie peut cependant être faite avec les connaissances sur l'importance relative des fuites au niveau du visage et du média filtrant sur l'efficacité globale des appareils de protection respiratoire. Il apparaît que les particules de taille élevées rentrent plutôt par les fuites que par le média filtrant pour des tailles de particules comprises entre 40 nm et 1 µm (Grinshpun *et al.*, 2009), ou 8 nm et 400 nm (Rengasamy et Eimer, 2012). Des travaux effectués sur les nanoparticules de 3-30 nm (Mouret, Thomas, Chazelet, Appert-Collin et Bemer, 2009) montrent que, selon le média filtrant et la taille de la fuite, les effets peuvent différer : pour des médias très efficaces et des fuites suffisamment importantes, l'ensemble des nanoparticules étudiées sont affectées de la même manière. Il semble donc raisonnable de penser par extrapolation que les fuites aux interfaces VPC-peau, qualitativement caractérisées par leur surface d'échange importante, ne devraient pas discriminer les particules pour entrer à l'intérieur du vêtement.

Sans scellage, ou sans amélioration des jonctions entre VPC et peau, les spécifications de protection relative à une taille particulière de particules s'avèreraient certainement être un échec.

6.2.1.2.2 Les coutures et la taille des particules

Pour ce qui est des coutures, les résultats de la littérature (Vinchess et Hallé, 2017) et les nôtres ont montré (Figure 27) que cet élément du VPC pouvait être un point faible impactant le niveau de protection. Pour les matériaux présentant les résistivités hydrauliques les élevées et les plus faibles pénétrations, l'effet est particulièrement marqué.

Les coutures surjetées laissent passer l'ensemble de la gamme de tailles de particules étudiées dans des proportions similaires. Même si l'impact global des coutures surjetées sur le niveau de fuite vers l'intérieur est inconnu, il apparaît que cette fuite serait malgré tout composée de particules de diverses tailles, et que les spécifications de protection relative à une taille particulière de particules seraient difficiles à atteindre.

Par un raisonnement similaire à celui tenu pour les interfaces VPC-peau, c'est le scellage des coutures qui permettraient d'atteindre l'objectif. L'utilisation, entre autres, de coutures étanches (p. ex. scellées ou d'autres non testés dans ce travail) serait à encourager. En ce sens, il est observé dans certaines situations de travail, l'ajout sur les coutures et les fermetures éclair de ruban adhésif pour étanchéifier ces points d'entrées potentiels de particules.

6.2.1.2.3 Les matériaux et la taille des particules

Finalement, bien qu'on en sache peu sur le niveau de filtration des matériaux utilisés pour confectionner les VPC de type 5, il apparaît que c'est à travers eux qu'il semble le plus probable de maîtriser les entrées de particules à l'intérieur du vêtement. La maîtrise évoquée est de deux ordres ; le premier, associé à la quantité de particules toutes tailles confondues, n'est pas pertinent à ce point de la discussion, et sera plutôt traité dans la sous-section 6.2.2 de cette discussion. Le second, associé à la quantité relative de particules de différentes tailles, peut être discuté au regard de nos résultats et de la littérature. Les matériaux les plus performants (MP et FS) présentent d'excellentes efficacités de protection pour toutes les tailles de particules et plus spécifiquement pour les particules de diamètre supérieur à environ 400 nm une marge de manœuvre pour moduler l'efficacité de ces films microporeux pourrait exister ; la taille des microspores semble être la variable principale pour l'efficacité globale du matériau, mais le bilan net d'un changement apparaît difficile à prévoir, car elle pourrait agir sur différents processus de piégeage des particules (c.f. sous-section 5.4.2.2.1, impaction, effet tamis...).

En se penchant sur les VPC confectionnés à partir d'assemblages SMS, il est possible de constater que l'amplitude d'efficacité est plus importante que pour les MP. Cela laisserait penser que c'est du côté de ces matériaux qu'existe la marge de manœuvre pour optimiser la protection. Nos résultats ont montré que ce sont l'épaisseur de la couche filtrante et la distribution de tailles de pores qui changent le plus entre les différents matériaux. Le cas du LSG, appartenant au groupe B de moyenne efficacité, et dont le profil d'efficacité est relativement plat, permet de penser qu'il est possible de moduler les performances des matériaux avec un impact significativement différent selon la taille des particules. Les KC A20 et KC A30, dont les fibres ont été traitées, augmentent leur efficacité globale et réduisent la MPPS alors que leur diamètre des fibres M, leur épaisseur de la couche M et leur porosité sont sensiblement identiques à ceux des autres SMS.

L'utilisation des réseaux de neurones pour fouiller les données n'a pas permis de mettre en évidence des différences majeures entre les SMS, les SMMS et les SMMMS, certainement du fait que leur couche de filtration reste similaire (diamètre des fibres M, épaisseur globale de filtration, porosité). La fabrication de nouvelles couches filtrantes pourrait bénéficier de l'apport de l'électrofilage (Raza, Li, Sheng, Yu, et Ding, 2014). Cette technique, comparée aux technologies meltblown et spunbond, permet de fabriquer des fibres de diamètres submicroniques, dont la surface spécifique est plus importante que pour les fibres de dimensions micrométriques. Les matériaux constitués de telles fibres présentent une porosité élevée, mais des pores de faible taille. Ils permettraient le transport de l'humidité, malgré une perméabilité à l'air faible (Gibson, Schreuder-Gibson et Rivin, 2001). Les applications dans le domaine des VPC contre les particules sont encore rares, mais les résultats prometteurs (Schreuder-Gibson *et al.*, 2003 ; Huang, Zhang, Kotaki et Ramakrishna, 2003 ; Raza, Li, Sheng, Yu, et Ding, 2014). Facchini, Vaquero et Amantia (2012) présentent notamment l'efficacité contre des nanoparticules d'un mat en viscose recouvert de nanofibres de nylon en quantités différentes. Selon le temps choisi pour l'enrobage du mat, les efficacités pour les nanoparticules de tailles 15-300 nm oscillent entre 40 % et moins de 1 %, sans grandes différences à l'intérieur du domaine de tailles.

Ainsi, s'il était possible de confectionner des VPC pour qu'ils protègent selon une gamme de tailles de particules, la piste la plus prometteuse serait basée sur un assemblage de couches de filtration particulières dont les attributs spécifiques pourraient en moduler l'efficacité globale. Payen *et al.* (2012) mentionnent à cet effet que les modèles actuels de filtration ne décrivent pas bien les performances de filtres à base de mélanges de fibres.

6.2.2 Les classes de performances

Les classes de performances des VPC de type 5 n'existent pas pour l'instant. Le résultat de la méthode d'essai se résume à un succès, ou à un échec. Ainsi, selon la dangerosité, la taille des particules, ou les atmosphères de travail, il n'est pas possible de choisir un VPC de type 5 plutôt qu'un autre en se basant sur cette norme. Deux approches expérimentales apparaissent possibles pour établir des classes de performances pour les VPC de type 5.

6.2.2.1 Approche basée sur la fuite vers l'intérieur

La première approche pourrait être inspirée par la norme NF EN 1073-2 (CEN, 2002), qui, selon l'intensité de la fuite vers l'intérieur, distingue ces VPC en trois classes, de la moins protectrice, classe 1, à la plus protectrice, classe 3. Cela semble être l'approche retenue par l'INRS pour la recommandation de VPC de type 5 contre l'amiante (INRS, 2016). Alors qu'un des critères à remplir selon la norme ISO 13982-1 pour la certification est une fuite vers l'intérieur inférieure à 15 %, l'INRS recommande 5 % dans ce cas particulier. Il faut alors demander aux fabricants de VPC les performances de leur combinaison à ce test.

6.2.2.2 Approche basée sur la résistance des matériaux

La seconde approche pourrait résulter d'une analogie avec les VPC de type 6 selon la norme ISO 16602, contre les pulvérisations liquides légères, par exemple. Cette norme inclut des tests de pénétration qualitatifs sur le VPC au complet porté par un sujet humain, à l'aide de la norme ISO 17491-4 (ISO, 2008). En complément, les matériaux constituant les VPC sont également évalués pour leur résistance à la pénétration par certains agresseurs chimiques et pour leur

effet répulsif sur ces mêmes agresseurs, avec la méthode ISO 6530 (ISO, 2005c). Certains manufacturiers proposent ainsi dans leurs brochures commerciales sur les VPC protégeant contre les particules solides des résultats de tests sur la pénétration de particules à travers les matériaux⁵. Ces méthodes, non standardisées, ont été développées par *l'Institute of Occupational Medicine* (IOM) en Angleterre, ou le *Japan Synthetic Textile Inspection Institute Foundation* (devenu le Kaken entre-temps). La question de la vitesse de « filtration » à retenir pour les essais resterait à déterminer.

Cette seconde approche, bien que plus laborieuse que la première, pourrait permettre d'identifier à terme des classes de performances pour les VPC, quand bien même il serait possible de corréliser la fuite vers l'intérieur et l'efficacité des matériaux. Cela sous-entend cependant de mener des travaux de recherche complémentaires pour mieux comprendre les différentes voies de pénétration et leurs interactions. Les présents travaux posent les jalons d'une telle approche.

6.3 Le compromis protection confort

Tel qu'indiqué dans la sous-section 5.3, le confort est une notion multidimensionnelle. Il est donc vain, à travers un projet de recherche comme celui-ci, de penser couvrir parfaitement le compromis entre protection et confort. La portée de ce projet est donc modeste, mais permet cependant d'aborder la question du confort thermique par le biais des matériaux, et de leurs propriétés intrinsèques favorisant l'atteinte d'un équilibre thermique par les porteurs de VPC. Il convient également de mentionner qu'implicitement, un bon compromis efficacité/protection sous-entend de bien définir à la fois le niveau de protection requis et le niveau de confort visé. La méconnaissance de la toxicité intrinsèque des particules aéroportées ne permet pas à l'heure actuelle de moduler l'exigence de protection, et par conséquent de moduler le confort requis. En l'état actuel des choses, sachant que le niveau de fuite vers l'intérieur autorisé n'est pas basé sur des critères toxicologiques, la question qui se présente aux utilisateurs est surtout de savoir quel type de VPC de type 5 procurera le moins d'inconfort, tant thermique que physique, tant psychosocial que fonctionnel, pour un niveau de protection arbitraire fixé par une norme.

La norme NF EN 340 (CEN, 2004) traitant des exigences générales des vêtements de protection (incluant les VPC de type 5) mentionnait que « lorsque permis, les vêtements de protection devront être faits de matériaux avec une faible résistance à la vapeur d'eau et/ou une forte perméabilité à l'air et/ou devront être suffisamment ventilés pour minimiser l'inconfort et le stress thermique » (traduction libre). La norme NF EN ISO 13688 (ISO, 2013b) qui l'a remplacée mentionne maintenant que « Les vêtements de protection doivent offrir aux utilisateurs un niveau de confort compatible avec le niveau de protection prévu contre les dangers, les conditions ambiantes, le niveau d'activité de l'utilisateur et la durée prévue d'utilisation des vêtements de protection ». Elle poursuit en mentionnant: « En ce qui concerne les vêtements de protection qui, en raison de la nécessité d'apporter une protection adéquate, entraînent des gênes ergonomiques significatives comme un stress dû à la chaleur ou un manque de confort inhérent, les informations fournies par le fabricant doivent contenir des

⁵ (<https://www.ansell.com/ca/fr/products/microchem-by-alphatec-1500-model-100>);
(http://www2.dupont.com/Personal_Protection/ko_KR/assets/downloads/AP%20Tyvek/071%20Technical%20Handbook.pdf)

conseils ou des mises en garde spécifiques. Un conseil spécifique concernant la durée d'utilisation en continu appropriée du vêtement dans la (les) application(s) prévue(s) doit être donné. »

Nos résultats ont montré que ce sont les matériaux SMS qui présentent les indicateurs de confort physiologiques les plus favorables. Le matériau FS se rapproche des MP pour le taux de transmission de vapeur d'eau et présente des valeurs intermédiaires (entre SMS et MP) de résistivité hydraulique. D'après Schreuder-Gibson *et al.* (2003), la réduction du stress thermique des travailleurs sous-entend d'atteindre un taux de transmission de vapeur d'eau suffisant sans égard à la perméabilité à l'air. Ce sont donc, parmi les matériaux testés, les SMS qui seraient à privilégier. La littérature pointe également, comme pour la protection, vers les matériaux faits de nanofibres (Gibson, Schreuder-Gibson et Rivin, 2001) ou de membranes semi-perméables (Chapman, 2013) pour assurer une certaine respirabilité (bon taux de transmission de vapeur d'eau) sans compromettre la protection. In fine, l'effet du choix des matériaux sur le confort thermique devrait être confirmé soit par l'utilisation de normes faisant appel à des mannequins qui prennent en compte la contribution de l'évaporation sur le confort thermique (ISO, 2009; *ASTM international*, 2016b) soit par des essais au porter et des mesures physiologiques dans des conditions de travail réelles (Epstein *et al.*, 2013; Holmer, Nilsson, Rissanen, Hirata, et Smolander, 1992; Reneau, Bishop, et Ashley, 1999).

6.4 La résistance mécanique des matériaux et des coutures

La résistance mécanique des coutures et des matériaux est importante pour s'assurer du maintien de la protection chimique. La norme ISO 13982-1 prévoit des essais portant sur la résistance à l'abrasion, à la fissuration par flexion, au déchirement trapézoïdal ou à la perforation pour les matériaux. Pour les coutures, la résistance à la traction est privilégiée.

Des essais préliminaires ont été réalisés lors ce projet. Ils montrent que les sollicitations mécaniques imposées aux matériaux, calquées sur des exigences minimales à maximales de l'EN 14 325 (CEN, 2018) pour l'abrasion et la fissuration par flexion, affectent peu l'efficacité des matériaux testés. Le matériau le plus inerte de ce point de vue semble être le matériau FS, alors que l'efficacité du SMS bénéficierait de ces sollicitations. Le matériau MP semble avoir perdu un peu d'efficacité, tout en maintenant un niveau d'efficacité élevé. L'observation à l'œil nu des matériaux sollicités a notamment mis en évidence l'apparition de « bouloches » sur le SMS et une usure superficielle du film microporeux. Ces dégradations n'ont pas été suffisantes pour compromettre l'intégrité du matériau. Ces données préliminaires sont encourageantes, mais elles restent insuffisantes pour conclure sur une différenciation des effets sur les familles de matériaux testés. Un plus grand nombre de tests sur chacun des matériaux, et un plus grand nombre de matériaux devront être réalisés pour permettre la discrimination des matériaux.

Parmi les objectifs initiaux du projet figurait la mesure de l'efficacité de protection sur des matériaux soumis à une tension biaxiale, une solution identifiée comme plus réaliste que les déformations en tension uniaxiale imposées par Ben Salah, Hallé et Tuduri (2016). Un système de mise en tension a donc été conçu pour s'adapter à la cellule de 17 cm de diamètre. Partiellement fonctionnel, il n'a pu être utilisé, car des problèmes d'étanchéité ont été constatés pour les matériaux présentant les plus grandes résistivités hydrauliques. Une première analyse nous a indiqué que ce n'est pas le design de cette cellule qui posait problème, mais plutôt les matériaux choisis (fabriqué par impression 3D) pour maintenir le système en tension qui

n'étaient pas suffisamment rigides. Les tests de traction uniaxiale menés sur les 20 matériaux ont montré qu'il existait une grande disparité de performances dans l'allongement à la rupture, et la force appliquée à la rupture. L'allongement a varié de 40 % à 110 % et les forces appliquées de 18 à 84 N. Les profils de courbes de traction obtenus ont également montré une rupture séquentielle pour certains matériaux. Ces observations nous amènent à penser que la mise en tension pourrait altérer différemment les performances des différents matériaux, et que c'est donc un déterminant important pour le maintien de la résistance chimique.

La discussion menée dans ce rapport illustre la complexité des options s'ouvrant hypothétiquement au monde de la recherche pour proposer des améliorations pertinentes dans les performances des VPC de type 5. Elle souligne aussi le besoin réel d'une meilleure prise en compte du confort thermique pour, d'une certaine manière, adapter le travail à l'homme. Bien que considéré comme le dernier rempart de protection dans les stratégies de prévention, il n'en demeure pas moins que l'utilisation d'EPI reste incontournable dans de multiples situations d'exposition.

Dans ce contexte, les avancées les plus crédibles, en ne prenant plus simplement en compte les difficultés scientifiques ou technologiques, mais aussi le « marché » des VPC, pourraient voir le jour en concentrant les efforts sur les besoins de milieux de travail particuliers. Les activités de désamiantage, par exemple, sont suffisamment spécifiques et nombreuses pour espérer voir le développement d'EPI assurant, dès la conception, des jonctions peau-ÉPI plus étanches et des coutures moins perméables. Le cas des vêtements de protection contre les pesticides est assez éloquent à cet égard : alors qu'en Europe, des VPC de type 3 ou 4 pouvaient être recommandés lors de l'utilisation de pesticides en agriculture, leurs performances ont été fortement débattues dans la littérature (Garrigou, Baldi, Le Frious, Anselm et Vallier, 2011 ; AFSSET, 2010). De ces défaillances a émergé la norme ISO 27065 (ISO, 2017), spécifiquement conçue pour bâtir un cahier des charges d'essais et de niveaux de résistance pour des vêtements dédiés à la protection contre les pesticides. À ce jour, aucun VPC jetable de type 3 ou 4 déjà existant ne possède en parallèle la certification ISO 27065.

7. CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet était de mieux appréhender l'interaction entre les aérosols solides et les matériaux utilisés dans la conception des VPC de type 5. À l'aide d'un banc d'essai conçu spécifiquement pour cette étude, il a été possible de déterminer et mieux comprendre les efficacités de protection de ces matériaux.

Le choix d'un échantillon de vingt matériaux a montré que des VPC de type 5 étaient disponibles au Québec. Cependant, certains modèles de VPC, certifiés de type 5 et étiquetés comme tels dans d'autres zones commerciales, ne le sont pas nécessairement au Québec. L'échantillon de VPC retenus a été constitué des trois familles de non-tissés : neuf MP, dix SMS et un FS.

La caractérisation de certaines propriétés physiques des matériaux a permis la mise en évidence de différences objectives entre les familles de matériaux : la porosité, la distribution de tailles de pores, la masse surfacique et l'épaisseur. Les matériaux SMS sont les plus poreux et présentent une proportion de tailles de pores élevées supérieure aux MP et au FS. La caractérisation de la couche filtrante M des SMS a montré que le diamètre des fibres la constituant était compris entre 2 et 3 μm , et que son épaisseur variait entre 10 et 17 μm .

Les performances de ces familles de matériaux peuvent être extrêmement variables. Il existe de grandes différences entre les SMS, beaucoup plus perméables à l'air et à la vapeur d'eau que les MP. Le FS, structure monocouche, présente une perméabilité à l'air intermédiaire entre les SMS et les MP, mais une perméabilité à la vapeur d'eau qui se rapproche des MP. Si l'on considère ces variables comme des indicateurs de confort physiologique, les matériaux SMS seraient les plus à même de limiter le stress thermique des travailleurs.

Pour évaluer les efficacités de protection, un banc d'essai, composé d'une conduite ventilée et instrumentée a été développé. Il présente des dimensions compatibles avec un espace d'expérimentation limité et permet la mesure de faibles taux de pénétration à faible débit de filtration. Des cellules de pénétration d'un diamètre de 17 cm ont pu être insérées. Ce banc d'essai a été validé. Ses performances rencontrent certains paramètres de qualité communiqués par l'ASHRAE. Seule l'homogénéité des concentrations en particules pour des diamètres compris entre 500 et 800 nm selon la vitesse de l'air dépasse légèrement le critère de validation. La similitude des mesures d'efficacité de protection à partir de deux cellules de diamètres différents confirme que cette faiblesse n'altère en rien l'apport d'un tel système.

La mesure d'efficacité de protection à de faibles vitesses de filtration a mis de l'avant des différences notables entre les matériaux. D'un côté, les matériaux MP et le FS présentent des efficacités élevées pour l'ensemble de la gamme de tailles de particules étudiée. Seuls deux SMS, KC A20 et KC A30, présentent des efficacités comparables. Contrairement aux autres matériaux SMS, ceux-ci bénéficient d'un traitement spécial dont l'effet se rapprocherait de celui obtenu lorsqu'on active le mécanisme de piégeage électrostatique des médias filtrants : augmentation de l'efficacité et déplacement de la MPPS pour des tailles de particules de quelques dizaines de nanomètres. Les huit SMS restants se dissocient en deux groupes, d'efficacité moyenne et faible. La différence d'efficacité entre ces deux groupes serait associée à la différence d'épaisseur de la couche M plutôt qu'à la différence des tailles de fibres composant la couche M. Les cartes de Kohonen construites sur la base des performances

mesurées illustrent et confirment le groupage décrit entre les matériaux. Nos données, traitées d'une manière ou d'une autre, ne permettent pas de voir de différences dans la famille des SMS, entre les monocouches M et les multicouches M.

L'effet de la vitesse de filtration sur le profil d'efficacité est conforme aux attentes pour l'ensemble des matériaux, qui montre une diminution de la MPPs avec la vitesse de filtration qui augmente. L'efficacité des SMS augmente quand la vitesse décroît ; les résultats des MP sont moins systématiques, mais les efficacités restent à des niveaux très élevés dans l'ensemble des conditions testées. La nature non fibreuse de ce matériau laisse penser que l'importance relative des mécanismes de piégeage de particules, dans les conditions de test, pourrait différer des connaissances admises.

Les coutures apparaissent comme une faiblesse dans les VPC. En particulier, les coutures surjetées laissent passer sans discrimination l'ensemble des tailles de particules mesurées dans ce projet. Les coutures de type scellées sont les plus imperméables.

L'usure des matériaux, étudiée en appliquant aux matériaux de l'abrasion et de la fissuration par flexion, ne semble pas avoir d'effet majeur sur l'efficacité de protection. Aux niveaux envisagés, elle améliorerait l'efficacité des SMS. De forts niveaux de flexion pourraient endommager les matériaux MP.

Finalement, il a été démontré que les profils d'efficacité de matériaux SMS pouvaient être raisonnablement décrits par des modèles préexistants dans la littérature. Des ajustements demeurent nécessaires, mais, en l'état, il est possible par exemple de simuler l'effet de la vitesse de filtration sur les efficacités de protection. Cela est particulièrement important dans la mesure où les vitesses réelles de passage à travers les matériaux de VPC de type 5 en conditions réelles sont à l'heure actuelle inconnues.

Bien que ce projet ait pu être mené à terme et qu'il réponde aux objectifs qui étaient fixés, il reste encore de nombreuses choses à éclaircir. Parmi celles-ci, on peut notamment citer une meilleure caractérisation des matériaux, et notamment de leur couche filtrante: sa porosité et sa distribution de tailles de pores. La connaissance de sa tortuosité pourrait également permettre de mieux comprendre les différences observées entre les matériaux, mais sur de si faibles épaisseurs, cela apparaît compliqué. Par ailleurs, la conception même des matériaux est un frein à leur caractérisation : faire les mesures sur les matériaux filtrants non assemblés serait-il représentatif de ces mêmes matériaux ayant pu être modifiés par le procédé de fabrication ?

Le choix d'une ou de plusieurs vitesses de filtration pertinentes lors des essais reste également un défi. Alors qu'en laboratoire, tester la pénétration de différents matériaux à des vitesses de filtration identiques est parfaitement sensé, cela ne signifie pas pour autant que cela soit représentatif de conditions réelles. Il s'agirait donc, pour compléter les données, de mieux comprendre les relations entre les vitesses d'air en milieu de travail (qu'elle soit due à un système de ventilation, au vent ou à des mouvements du travailleur) et la vitesse de filtration à travers les matériaux. Une approche alternative pourrait consister à mesurer la perte de charge entre l'intérieur et l'extérieur de VPC différents dans des conditions d'exercice standardisées, puis d'imposer ces pertes de charge aux matériaux pour la filtration en banc d'essai. On

comparerait alors les efficacités de protection des matériaux à perte de charge constante, et non à vitesse constante.

Au-delà de la mesure de pénétration des particules à travers les matériaux, neufs ou usagés, avec ou sans coutures, le défi majeur et la perspective la plus importante dans cette thématique de recherche sur les VPC de type 5 sont de comprendre, dans différentes conditions expérimentales, l'importance et l'interaction entre les voies d'entrée à l'intérieur du VPC. Cela sous-entend l'acquisition de données sur chacune des voies d'entrée (les matériaux, les coutures, les fermetures) dans un premier temps, puis sur l'ensemble des voies d'entrée (incluant les jonctions peau-VPC) lors d'essais au porter par des sujets humains. Cette étude constitue à cet effet une première étape et aura permis de caractériser l'ampleur des différences entre les matériaux et les coutures, et donc de contribuer à un meilleur dimensionnement des futures recherches sur les déterminants des fuites vers l'intérieur.

BIBLIOGRAPHIE

- AFSSET. (2010). *Efficacité de protection chimique des combinaisons de protection chimique : constat de l'efficacité de protection chimique des combinaisons de type 3 et 4 au regard de la perméation*. Tiré de <https://www.anses.fr/fr/content/rapport-de-lafsset-relatif-%C3%A0-constat-de-l%E2%80%99efficacit%C3%A9-de-protection-chimique-des-combinaiso-0>
- ASHRAE. (2012). *Method of testing general ventilation air-cleaning devices for removal efficiency by particle size*. Norme ASHRAE 52.2. Atlanta, GA: ASHRAE.
- ASTM International. (2008). *Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement*. Norme ASTM D792-08. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2009). *Standard test methods for water vapor diffusion resistance and air flow resistance of clothing materials using the dynamic moisture permeation cell*. Norme ASTM F2298-03(2009)e1. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2011). *Standard practice for conditioning flexible barrier materials for flex durability*. Norme ASTM F392-11. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2012a). *Standard test method for permeation of liquids and gases through protective clothing materials under conditions of continuous contact*. Norme ASTM F739-12e1. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2012b). *Standard test method for abrasion resistance of textile fabrics (martindale abrasion tester method)*. Norme ASTM D4966-12. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2016a). *Standard Test method for pore size characteristics of geotextiles by capillary flow test*. Norme ASTM D6767-16. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2016b). *Standard test method for measuring the evaporative resistance of clothing using a sweating manikin*. Norme ASTM F2370 – 16. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Arts, J. H. E., Mommers, C. et de Heer, C. (2006). Dose-response relationships and threshold levels in skin and respiratory allergy. *Critical Reviews in Toxicology*, 36(3), 219-251. doi: 10.1080/10408440500534149
- Baldwin, P. E. J. et Maynard, A. D. (1998). A survey of wind speeds in indoor workplaces. *Annals of Occupational Hygiene*, 42(5), 303-313. doi: 10.1016/S0003-4878(98)00031-3
- Baert, C., Novack, L. et Lison D. (2013). Exposition professionnelle aux nanoparticules et protection cutanée. *Archives des maladies professionnelles et de l'environnement*, 74(5), 488-498. doi : 10.1016/j.admp.2013.05.003
- Ben Salah, M., Hallé, S. et Tuduri, L. (2016). Efficiency of five chemical protective clothing materials against nano and submicron aerosols when submitted to mechanical deformations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(6), 425-433, doi: 10.1080/15459624.2015.1125490
- Ben Salah, M. (2018). *Étude de l'efficacité des vêtements de protection contre la pénétration d'aérosols nano et submicroniques dans des conditions proches d'une exposition réelle*. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, QC).
- Boeniger, M. F. (2003). The significance of skin exposure. *Annals of Occupational Hygiene*, 47(8), 591-593. doi: 10.1093/annhyg/meg095

- Brasser, P. (2006). Theoretical and experimental study of airflow through clothing around body parts. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 52(11), 3688-3695. doi: 10.1002/aic.10999
- Brouwer, D. H., Aitken, R. J., Oppl., R. et Cherrie, J. W. (2005). Concepts of skin protection: Considerations for the evaluation and terminology of the performance of skin protective equipment. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2(9), 425-434. doi: 10.1080/15459620500220453
- Canadian Center for Occupational Health and Safety. (2010). Save your skin. *Health and Safety Report*, 8(10). Tiré de <https://www.anses.fr/fr/content/rapport-de-lafsset-relatif-%C3%A0-constat-de-1%E2%80%99efficacit%C3%A9-de-protection-chimique-des-combinaiso-0>
- CEN. (2002). *Vêtements de protection contre la contamination radioactive : partie 2 : exigences et méthodes d'essai des vêtements de protection non ventilés contre la contamination radioactive sous forme de particules*. Norme NF EN 1073-2. Bruxelles, Belgique: CEN.
- CEN. (2004). *Vêtements de protection : exigences générales*. Norme NF EN 340. Bruxelles, Belgique: CEN.
- CEN. (2012). *Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules : détermination des performances de filtration*. Norme NF EN 779. Bruxelles, Belgique: CEN.
- CEN. (2018). *Vêtements de protection contre les produits chimiques : méthodes d'essai et classification de performance des matériaux, coutures, jonctions et assemblages des vêtements de protection chimique*. Norme NF EN 14 325. Bruxelles, Belgique: CEN.
- Chapman, R. A. (2013). *Smart textile for protection* (1^e éd.). Cambridge, Angleterre: Woodhead Publishing.
- CNESST. (2014a). *Vestiaire double contigu à une zone de travail contaminée*. Tiré de https://www.cnesst.gouv.qc.ca/publications/900/Pages/dc_900_723.aspx
- CNESST. (2014 b). *Les vêtements de protection contre les particules solides*. Tiré de https://www.cnesst.gouv.qc.ca/publications/300/Pages/dc300_616.aspx
- CNESST. (2014). *Lettre aux distributeurs de vêtements de protection*.
- CNESST. (2018). Connaissez-vous la silice cristalline?. Tiré de https://www.cnesst.gouv.qc.ca/publications/100/Pages/dc_100_450_1.aspx
- Code de sécurité pour les travaux de construction*, RLRQ, c. S-2.1., r. 4.
- CSGB. (1997). *Perméabilité à l'air*. Norme CAN/CGSB-4.2 N° 36-M89. Ottawa, ON: Conseil Canadien des normes.
- CSGB. (2002). *Épaisseur des tissus*. Norme CAN/CGSB-4.2 N°37. Ottawa, ON : Conseil Canadien des normes.
- CSGB. (2013). *Méthodes pour épreuves textiles : masse des tissus*. Norme CAN/CGSB-4.2 N° 5.1-M90. Ottawa, ON: Conseil Canadien des normes.
- Davies, C. N. (1973). *Air filtration* (1^e éd.). New York, NY: Academic Press.
- Domat, M., Pla, J., Cadavid-Rodríguez, M. C. et Fito, C. (2017). Experimental evaluation of the effectiveness offered by different types of personal protective clothing against nanoaerosols. *Journal of Physics*, 838(1). doi: 10.1088/1742-6596/838/1/012021
- Eninger, R. M., Honda, T., Reponen, T., McKay, R. et Grinshpun, S. A. (2008). What does respirator certification tell us about filtration of ultrafine particles?. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5(5), 286-295. doi: 10.1080/15459620801960153
- Epstein, Y., Heled, Y., Ketko, I., Muginshtein, J., Yanovich, R., Druyan, A. et Moran, D. S. (2013). The effect of air permeability characteristics of protective garments on the

- induced physiological strain under exercise-heat stress. *Annals of Occupational Hygiene*, 57(7), 866-874. doi: 10.1093/annhyg/met00
- European Agency for Safety and Health at Work. (2009). *Expert forecast on emerging chemical risks related to occupational safety and health*. Tiré de https://osha.europa.eu/en/publications/reports/TE3008390ENC_chemical_risks
- Faccini, M., Vaquero, C. et Amantia, D. (2012). Development of protective clothing against nanoparticle based on electrospun nanofibers. *Journal of Nanomaterials*, 2012, 9. doi: 10.1155/2012/892894
- Gao, P., Jaques, P. A., Hsiao, T.-C., Shepherd, A., Eimer, B. C., Yang, M., . . . Shaffer, R. (2011). Evaluation of nano and submicron particle penetration through ten nonwoven fabrics using a wind-driven approach. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(1), 13-22. doi: 10.1080/15459624.2010.515554
- Garrigou, A., Baldi, I., Le Frious, P., Anselm, R. et Vallier, M. (2011). Ergonomics contribution to chemical risks prevention: An ergotoxicological investigation of the effectiveness of coverall against plant pest risk in viticulture. *Applied Ergonomics*, 42(2), 21-330. doi: 10.1016/j.apergo.2010.08.001
- Ghee, T. A. et Dhaniyala, S. (2014). *A method to estimate fabric particle penetration performance*. (Rapport n° NAWCADPAX/TIM-2014/43). Patuxent River, MD : NAWC. Tiré de <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a610303.pdf>
- Gibson, P., Schreuder-Gibson, H. et Rivin, D. (2001). Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 187-188, 469-481. doi: 10.1016/S0927-7757(01)00616-1
- Giraudel, J. L. et Lek, S. (2001). A comparison of self-organizing map algorithm and some conventional statistical methods for ecological community ordination. *Ecological Modelling*, 146(1-3), 329-339. doi: 10.1016/S0304-3800(01)00324-6
- Global Industry Analyst. (2014). *Personal protective equipment: A global strategic business report* (Rapport n° MCP-1171). San Jose, CA: GIA.
- Golanski, L., Guiot, A., Rouillon, F., Pocachard, J. et Tardif, F. (2009a). Experimental evaluation of personal protection devices against graphite nanoaerosols: Fibrous filter media, masks, protective clothing, and gloves. *Human and Experimental Toxicology*, 28(6-7), 353-359. doi: 10.1177/0960327109105157
- Golanski, L., Guiot, A. et Tardif F. (2009b). Experimental evaluation of individual protection devices against different types of nanoaerosols: Graphite, TiO₂ and Pt. *Journal of Physics: Conference Series*, 170. doi: 10.1088/1742-6596/170/1/012025
- Golanski, L., Guiot, A. et Tardif F. (2010). Experimental evaluation of individual protection devices against different types of nanoaerosols: Graphite, TiO₂, and Pt. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(1), 83–89. doi: 10.1007/s11051-009-9804-x
- Grinshpun, S. A., Haruta, H., Eninger, R. M., Reponen, T., McKay, R. T. et Lee, S.-A. (2009). Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: Two pathways for particle penetration. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(10), 593-603. doi: 10.1080/15459620903120086
- Groupe CSA. (1993). *Choix, entretien et utilisation des respirateurs*. Norme CSA Z94.4. 93. Toronto, ON: Groupe CSA.
- Groupe CSA. (2012). *Nanotechnologies-Exposure control program for engineered nanomaterials in occupational settings*. Norme CSA Z12885-12. Toronto, ON: Groupe CSA.

- Groupe CSA. (2014). *Vêtements de protection contre les produits chimiques : classification, étiquetage et exigences de performances*. Norme CAN/CGSB/CSA-Z16602 : F14. Toronto, ON: Groupe CSA.
- Hartsy, M. A., Reed, K. L. et Warheit, D. B. (2000). Assessment of the barrier effectiveness of protective clothing fabrics to aerosols of chrysotile asbestos fibre. Dans C. Nelson et N. Henry (Édit.), *Performance of protective clothing: Issues and priorities for the 21st century* (vol. 7, p. 141-154). West Conshohocken, PA: ASTM International. doi: 10.1520/STP14441S
- Hersh, S. P. et Tucker, P. A. (1993). *Design and evaluation of improved barrier fabrics for protection against toxic aerosols and biological agents*. (Rapport n° NAT1CK/TR-93/040). Tiré de <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a273385.pdf>
- Hill, M. A., Ghee, T. A., Kaufman, J. et Dhaniyala, S. (2013). Investigation of aerosol penetration through individual protective equipment in elevated wind conditions. *Aerosol Science and Technology*, 47(7), 705-713, doi: 10.1080/02786826.2013.783899
- Hinds, W. C. (1999). *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles* (2^e éd.). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Holmer, I., Nilsson, H., Rissanen S., Hirata, K. et Smolander, J. (1992). Quantification of heat balance during work in three types of asbestos-protective clothing. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 64(4), 243-249.
- Huang, Z.-H., Zhang, Y. Z., Kotaki, M. et Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technology*, 63(15), 2223-2253. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00178-7
- Hutten, I. M. (2015). *Handbook of nonwoven filter media* (2^e éd.). Oxford, Angleterre: Butterworth-Heinemann.
- INRS. (2006). *Béryllium et composés minéraux : fiche toxicologique FT 92*. Tiré de http://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_92
- INRS. (2016). *Protection contre les fibres d'amiante : performances des vêtements de type 5 à usage unique*. Tiré de <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206247>
- Irzmanska, E. et Stefko, A. (2015). Simulation method for assessing the end of service life of gloves used by workers exposed to mineral oils and mechanical factors. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 47, 61-71. doi: 10.1016/j.ergon.2015.02.007
- ISO. (2005a). *Vêtements de protection chimique à utiliser contre les particules solides : partie 1 : exigences de performances 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*. Norme ISO 13982-1. Genève, Suisse: ISO.
- ISO. (2005 b). *Vêtements de protection chimique à utiliser contre les particules solides : partie 2 : méthode d'essai pour la détermination de la fuite vers l'intérieur d'aérosols de fines particules dans des combinaisons*. Norme ISO 13982-2. Genève, Suisse: ISO.
- ISO. (2005c) *Vêtements de protection : protection contre les produits chimiques liquides : méthode d'essai pour la résistance des matériaux à la pénétration par des liquides*. Norme ISO 6530. Genève, Suisse: ISO.
- ISO. (2007). *Vêtements de protection contre les produits chimiques : classification, étiquetage et exigences de performances*. Norme ISO 16602. Genève, Suisse: ISO.
- ISO. (2008) *Vêtements de protection : méthodes d'essai pour les vêtements fournissant une protection contre les produits chimiques : partie 4 : détermination de la résistance à la pénétration par vaporisation de liquide : essai au brouillard*. Norme ISO 17491-4. Genève, Suisse: ISO.

- ISO. (2009). *Ergonomie des ambiances thermiques : détermination de l'isolement thermique et de la résistance à l'évaporation d'une tenue vestimentaire*. Norme NF EN ISO 9920. Genève, Suisse: ISO.
- ISO. (2013a). *Vêtements de protection : protection contre les produits chimiques : détermination de la résistance des matériaux utilisés pour la confection des vêtements de protection à la perméation par des liquides et des gaz*. Norme ISO 6529. Genève, Suisse: ISO.
- ISO. (2013 b). *Vêtements de protection : exigences générales*. Norme NF EN ISO 13688. Genève, Suisse: ISO.
- ISO. (2017). *Habillement de protection : exigences de performance pour les vêtements de protection portés par les opérateurs appliquant des pesticides et pour les travailleurs de rentrée*. Norme NF EN ISO 27065. Genève, Suisse: ISO.
- Jaques, P. A., Hsiao, T. C. et Gao, P. (2011). Recirculation aerosol wind tunnel for evaluating aerosol samplers and measuring particle penetration through protective clothing materials. *Annals of Occupational Hygiene*, 55(7), 784–796. doi: 10.1093/annhyg/mer062
- Jaques, P. A., Hopke, P. K. et Gao, P. (2012). Quantitative analysis of unique deposition pattern of submicron Fe₃O₄ particles using computer-controlled scanning electron microscopy. *Aerosol Science and Technology*, 46(8), 905-912. doi: 10.1080/02786826.2012.680985
- Jaques, P. A. et Portnoff, L. (2017). Evaluation of a passive method for determining particle penetration through protective clothing materials. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(12), 995-1002. doi: 10.1080/15459624.2017.1351614
- Jamriska, M. (2009). *Aerosol penetration through protective fabrics*. (Rapport n° DSTO-TR-2348). Fort Belvoir, VA: DTIC. Tiré de <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA516731>
- Kohonen, T. (2001). *Self-organizing maps* (3^e éd.). Berlin, Allemagne: Springer.
- Liden, C., Lundgren, C., Skare, L., Liden, G., Tornling, G. et Krantz S. (1998). A new whole body exposure chamber for human skin and lung challenge experiment: The generation of wheat flour aerosols. *Annals of Occupational Hygiene*, 42(8), 541-547. doi: 10.1093/annhyg/42.8.541
- Lidwell, O. M. et Mackintosh, C. A. (1978). The evaluation of fabrics in relation to their physical use as protective garments in nursing and surgery. I: Physical measurements and bench tests. *Journal of Hygiene*, 81(3), 433-452. doi: 10.1017/S0022172400025328
- Ling, Y., Wang, J. et Pui, D. Y. H. (2012). Numerical modeling of nanoparticles penetration through personal protective garments. *Separation and Purification Technology*, 98, 230-239. doi: 10.1016/j.seppur.2012.07.015
- Loi sur la santé et la sécurité du travail*, RLRQ, c. S-2.1.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C. et Overholt, K. (2018a). Fire dynamics simulator technical reference guide: Volume 1: Mathematical model. doi: 10.6028/NIST.SP.1018
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C. et Overholt, K. (2018b). Fire dynamics simulator technical reference guide: Volume 3: Validation. doi: 10.6028/NIST.SP.1018
- Maini, S. M., Hersch, S. P. et Tucker, P. A. (1995). Barrier fabrics for protection against aerosols. *Textile Progress*, 25(1), 1-41. doi: 10.1080/00405169508688864
- Makinen, M. et Linnainmaa, M. (2004). Dermal exposure to chromium in electroplating, *Annals of Occupational Hygiene*, 48(3), 277-283. doi: 10.1093/annhyg/meg072
- Michael, R., Jamriska, M., Skvortsov, A. et McCallum, R. (2009). Study on aerosol penetration through clothing and individual protective equipment. (Rapport n° DSTO-TR-2283). Victoria, Australie: DSTO. Tiré de <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a507622.pdf>

- Mouret, G., Thomas, D., Chazelet, S., Appert-Collin, J.-C. et Bemer, D. (2009). Penetration of nanoparticles through fibrous filters perforated with defined pinholes. *Aerosol Science*, 40(9), 762–775. doi: 10.1016/j.jaerosci.2009.04.010
- Nielsen, J. B. et Grandjean, P. (2004). Criteria for skin notation in different countries. *American Journal of Industrial Medicine*, 45(3), 275–280. doi: 10.1002/ajim.10340
- NIOSH. (2009). *Approaches to safe nanotechnology: Managing the health and safety concern associated with engineered nanomaterials*. Tiré de <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/>
- NIOSH. (2011). *Effect of skin contact with chemicals*. Tiré de <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2011-200/pdfs/2011-200.pdf>
- NIOSH. (2016). *Determination of particulate filter efficiency level for n95 series filters against solid particulates for non-powered, air-purifying respirators: Procédure TEB-APR-STP-0059-508*. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/stps/pdfs/TEB-APR-STP-0059-508.pdf>
- NIOSH. (2017). *A strategy for assigning new NIOSH skin notations*. Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-147/pdfs/2009-147-revised.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB2009147revised>
- NIOSH. Respiratory protective devices, 42 C.F.R pt. 84 (2018).
- Ostiguy, C., Roberge, B., Ménard, L. et Endo, C. A. (2008). *Guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques reliés aux nanoparticules de synthèse*. (Guide technique n° R -586). Montréal, QC : IRSST. Tiré de <https://www.irsst.gc.ca/media/documents/PubIRSST/R-586.pdf>
- Park, J., Kwak, B. K., Kim, Y. et Yi, J. (2011). Efficiency of protective dermal equipment against silver nanoparticles with water aerosol, *Journal of Nanoparticles Research*, 13(7), 3043-3049. doi: 10.1007/s11051-010-0201-2
- Payen, J., Vroman, P., Lewandowski, M., Perwuelz, A., Callé-Chazelet, S. et Thomas, D. (2012). Influence of fiber diameter, fiber combinations and solid volume fraction on air filtration properties in nonwovens. *Textile Research Journal*, 82(19), 1948–1959. doi: 10.1177/0040517512449066
- Phalen, R. N., Le, T. et Wong, W. K. (2014). Changes in chemical permeation of disposable latex, nitrile, and vinyl gloves exposed to simulated movement. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(11), 716-721, doi: 10.1080/15459624.2014.908259
- Pietrojusti, A. et Magrini, A. (2014). Engineered nanoparticles at the workplace: Current knowledge about workers' risk. *Occupational Medicine*, 64(5), 319–330. doi: 10.1093/occmed/kqu051
- Raza, A., Li, Y., Sheng, J., Yu, J. et Ding, B. (2014). Protective clothing based on electrospun nanofibrous membranes. Dans B. Ding et J. Yu (Édit.), *Electrospun nanofibers for energy and environmental applications* (1^e éd., p 355-370). Heidelberg, Allemagne: Springer. doi: 10.1007/978-3-642-54160-5
- Règlement sur la santé et la sécurité du travail*, RLRQ, c. S-2.1., r. 13.
- Reneau, P. D., Bishop, P. A. et Ashley, C. D. (1999). A comparison of physiological responses to two types of particle barrier, vapor permeable clothing ensembles. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 60(4), 495-501. doi: 10.1080/00028899908984470
- Rengasamy, S., Verbofsky, R., King, W. P. et Shaffer, R. E. (2007). Nanoparticle penetration through NIOSH-approved N95 filtering-facepiece respirators. *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 24, 49-59.

- Rengasamy, S. et Eimer, B. C. (2012). Nanoparticle penetration through filter media and leakage through face seal interface of N95 filtering facepiece respirators. *Annals of Occupational Hygiene*, 56(5), 568–580. doi: 10.1093/annhyg/mer122
- Saary, M. J., House, R. A. et Holness, D. L. (2001). Dermatitis in a particleboard manufacturing facility. *Contact Dermatitis*, 44(6), 325-330. doi: 10.1034/j.1600-0536.2001.044006325.x
- Santos, R. et Goossens, A. (2007). An update on airborne contact dermatitis: 2001-2006. *Contact Dermatitis*, 57(6), 353-360. doi: 10.1111/j.1600-0536.2007.01233.x
- Schneider, T., Cherrie, J. W., Vermeulen, R. et Kromhout, H. (2000). Dermal exposure assessment. *Annals of Occupational Hygiene*, 44(7), 493-499. doi: 10.1093/annhyg/44.7.493
- Schreuder-Gibson, H. L., Truong, Q., Walker, J. E., Owens, J. R., Wander, J. D. et Jones, W. E. (2003). Chemical and biological protection and detection in fabrics for protective clothing. *MRS Bulletin*, 28(8), 574-578. Tiré de <https://www.cambridge.org/core/journals/mrs-bulletin/issue/EAFCB5593D46899C922F8E11E6DDBA7>
- Shalev, I., Barker, R. L., Hersh, S. P., Maini, S. M., Scruggs, B. J., Sood, V. K., . . . Wu, G. (1996). Protective textile barrier systems and their comfort. Dans J. Johnson et S. Mansdorf (Édit.), *Performances of protective clothing* (vol. 5, p 347-359). West Conshohocken, PA: ASTM. doi: 10.1520/STP14079S
- Shalev, I., Barker, R. L., McCord, M. G., Tucker, P. A. et Lisk, B. R. (2000). Protective textile particulate penetration screening. Dans C. Nelson et N. Henry (Édit.), *Performance of protective clothing: Issues and priorities for the 21st century* (vol. 7, p 155-161). West Conshohocken, PA: ASTM. doi: 10.1520/STP14442S
- Slater, K. (1977). Comfort properties of textiles. *Textile Progress*, 9(4), 1-70. doi: 10.1080/00405167.1977.10750095
- Slater, K. (1986). The assessment of comfort. *Journal of the Textile Institute*, 77(3), 157-171. doi: 10.1080/00405008608658406
- Spurny, K. R., Shoermann, J. et Opiela, H. (1990). Aerosols and protective clothing. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 51(1), 36-43. doi: 10.1080/15298669091369303
- Stefaniak, A. B., Harvey, C. J., Virji, M. A. et Day, G. A. (2010). Dissolution of cemented carbide powders in artificial sweat: Implications for cobalt sensitization and contact dermatitis. *Journal of Environmental Monitoring*, 12(10), 1815-1822. doi:10.1039/C0EM00269K
- Swinnen, I. et Goossens, A. (2013). An update on airborne contact dermatitis: 2007-2011. *Contact Dermatitis*, 68(4), 232-238. doi: 10.1111/cod.12022
- Thomas, D., Charvet, A., Bardin-Monnier, N. et Appert-Colin, J.-C. (2017). *La filtration des aérosols* (1^e éd.). Londres, Angleterre: ISTE Éditions.
- Vinches, L., Testori, N., Dolez, P., Perron, G., Wilkinson, K. J. et Hallé S. (2013). Experimental evaluation of the penetration of TiO₂ nanoparticles through protective clothing and gloves under conditions simulating occupational use. *Nanoscience Methods*, 2(1), 1-15. doi: 10.1080/21642311.2013.771840
- Vinches, L. et Hallé, S. (2017). Resistance of Type 5 chemical protective clothing against nanometric airborne particles: Behavior of seams and zipper. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(12), 939-946, doi: 10.1080/15459624.2017.1368527
- Vinches, L., Tuduri, L. et Halle, S. (2018). Modeling airborne nanoparticle filtration through a complete structure of non-woven material used in protective apparel. *Textile Research Journal*. doi: 10.1177/0040517518805389
- Vokac, Z., K pke, V. et Ke l, P. (1973). Assessment and analysis of the bellows ventilation of clothing. *Textile Research Journal*, 43(8), 474482. doi: 10.1177/004051757304300806

- Wang, Q., Golshahi, L. et Chen, D.-R. (2017). Evaluation of respirator filter media under inhalation-only conditions. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(11), 2681–2690. doi: 10.4209/aaqr.2016.08.0375
- Wang, J., Chen, D. R. et Pui, D. Y. H. (2007). Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media. *Journal of Nanoparticle Research* 9(1), 109–115. doi: 10.1007/s11051-006-9155-9
- Warheit, D. B., Hartsky, M. A. et Reed, K. L. (2000). Development of an online direct method for assessing the barrier effectiveness of fabrics to particle penetration: Preliminary studies with aerosolized crystalline silica particles. Dans C. Nelson et N. Henry (Édit.), *Performance of protective clothing : Issues and priorities for the 21st century* (vol. 7, p. 130-140). West Conshohocken, PA: ASTM. doi: 10.1520/STP14440S
- Zelenyuk, A., Cai, Y. et Imre, D. (2006). From agglomerates of spheres to irregularly shaped particles: Determination of dynamic shape factors from measurements of mobility and vacuum aerodynamic diameters. *Aerosol Science and Technology*, 40(3), 197–217. doi: 10.1080/02786820500529406
- Zhao, B., Yang, C., Yang, X. et Liu, S. (2008). Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models. *Building and Environment*, 43(4), 388-397. doi: 10.1016/j.buildenv.2007.01.005

Annexe A : COMPARAISON ENTRE PETITE ET GRANDE CELLULE

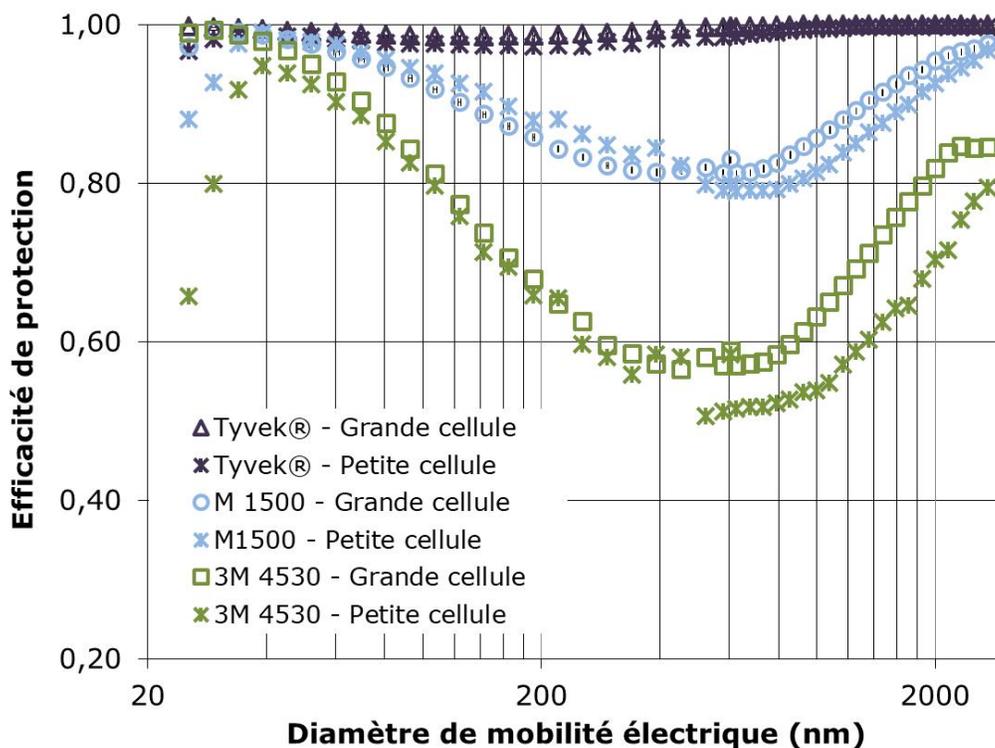


Figure 35. Comparabilité des résultats provenant des deux cellules.

Annexe B : MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT

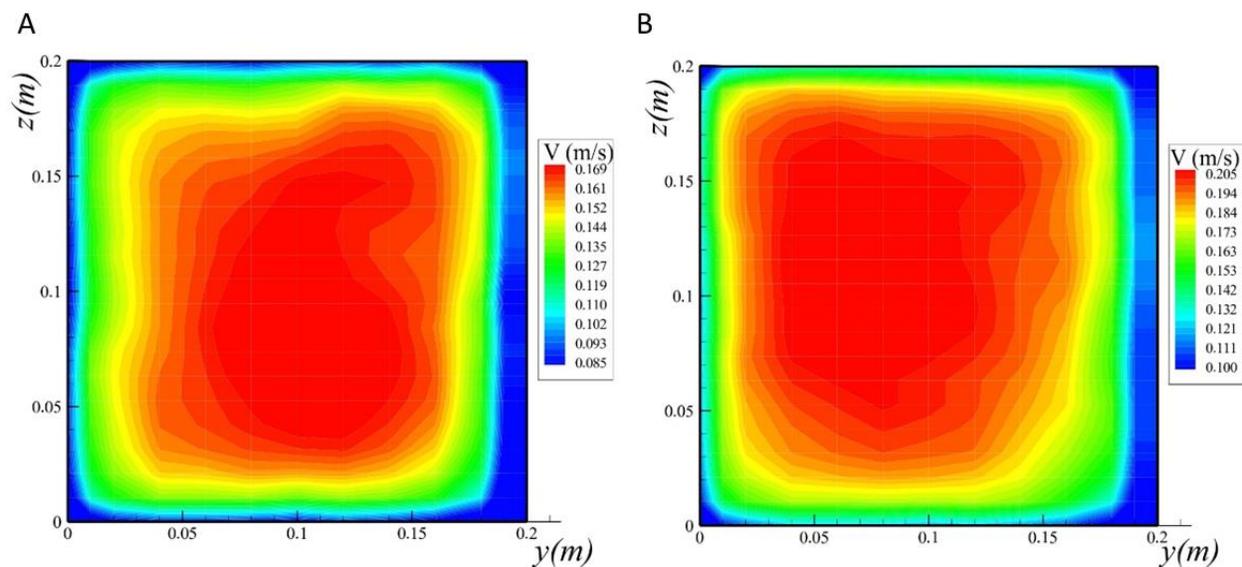


Figure 36. Champ de vitesse d'écoulement à 25 cm de la sortie pour des vitesses d'entrée de 80 cm/s (A) et 100 cm/s (B).

Annexe C : CARTES GRADIENTS

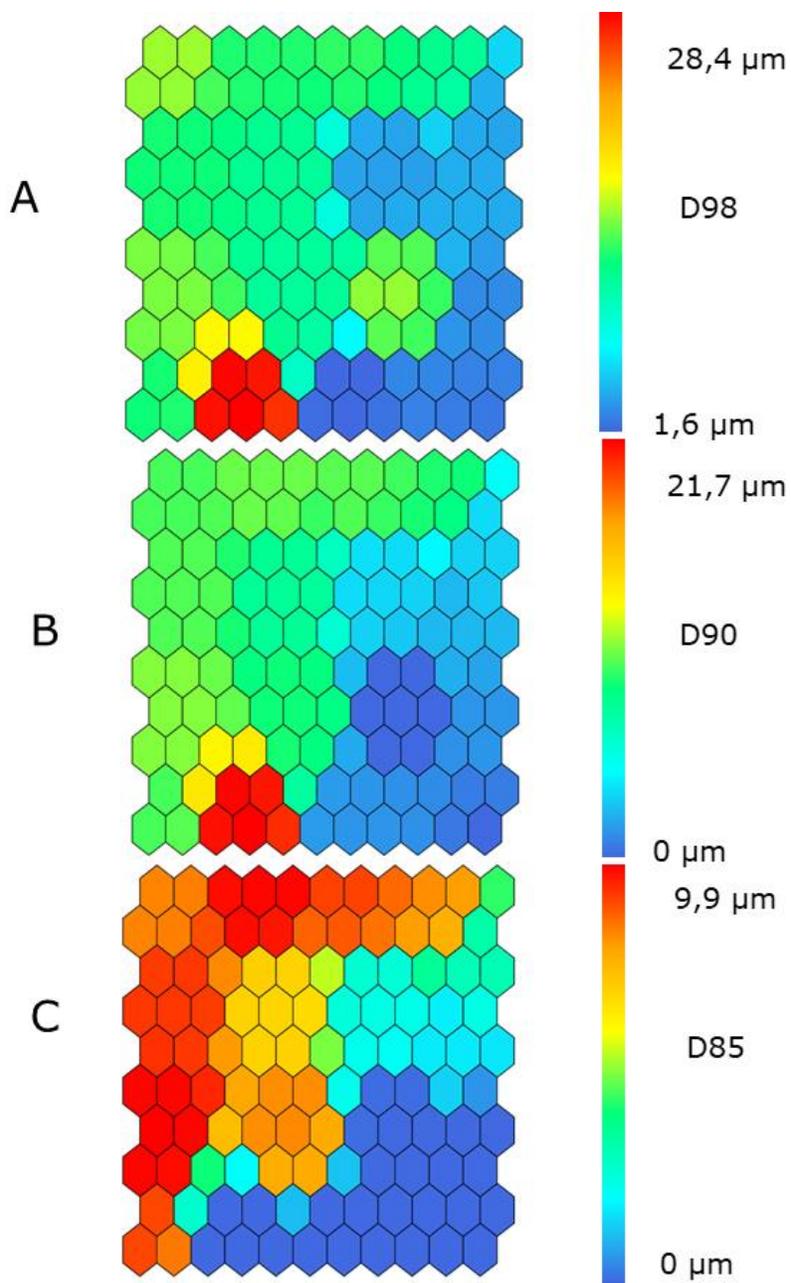


Figure 37. Gradients des descripteurs « D 98 » (A), « D 90 » (B) et « D 85 » (C).