École Doctorale Sciences et Ingénierie des Molécules Procédés Produits et Énergie

École Doctorale SIMPPÉ : Sciences et Ingénierie des Molécules Procédé Produits et Énergie

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE l'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : Génie des Procédés et des Produits et des Molécules

Par

Nassim KHIROUNI

Étude de la régénération par jet-pulsé des cartouches filtrantes colmatées par des particules ultrafines métalliques

Soutenue le 26/11/2021 devant le jury composé de :

Rapporteurs	**Laurence LE COQ**	Professeure, IMT Atlantique
	Benoit SAGOT	Maitre de conférences HDR, ESTACA
Examinateurs	**Evelyne GEHIN**	Professeure, Université Paris-Est Créteil
	Denis BEMER	Responsable d'études HDR, INRS (Co-directeur de thèse)
	Dominique THOMAS	Professeur, Université de Lorraine (Directeur de thèse)
	Augustin CHARVET	Maitre de conférences, Université de Lorraine (Co-encadrant de thèse)
Invité	**Alain GINESTET**	Chargé d'études, CETIAT

Institut National de Recherche et de Sécurité – 1 rue du Morvan – 54500 Vandœuvre-lès-Nancy

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés – 1 rue Grandville – 54000 Nancy

Remerciements

Je remercie tout d'abord mes encadrants Denis Bémer, Augustin Charvet et Dominique Thomas de m'avoir proposé ce travail de recherche, pour leurs encouragements, leur disponibilité et soutien durant ces trois années de thèse. Je les remercie particulièrement pour les échanges scientifiques que nous avons eus, qui ont fait de cette expérience une aventure mémorable et m'ont permis d'effectuer mes premiers pas dans le monde de la filtration des aérosols.

Je remercie également Jean-Pierre Leclerc, chef de département IP-INRS, et Eric Silvente, responsable du laboratoire PROCEP-INRS, qui ont assuré un déroulement de la thèse dans d'excellentes conditions.

Je remercie très sincèrement Laurence LE COQ, professeure à l'École des Mines de Nantes, et Benoit SAGOT, Maitre de conférences à l'ESTACA pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse. Merci également à Evelyne GEHIN, professeure à l'Université de Paris-Est Créteil, d'avoir accepté de prendre part au jury de thèse et de présider le jury.

Je remercie spécialement Alain GINESTET de la CETIAT, pour son support durant la thèse et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail. Son aide et sa participation ont contribué à l'avancement de l'étude.

Un grand merci à « la famille » PROCEP de l'INRS : Yves Morele, Mathieu Marchal, Sandrine Chazelet, Stéphanie Pacault, Armelle Orel, Stéphanie Marsteau, Julien Simard, Alain Masson, Fabien Gerardin, Marie-Thérèse Lecler, Hubert Monnier, Maxime Vaufleury et Florian Lorange qui m'ont accueilli chaleureusement au sein du laboratoire et qui ont participé au bon déroulement de la thèse.

Je remercie aussi les membres de l'équipe SAFE du LRGP, en particulier Olivier Dufaud, Léa Sigot, Nathalie Bardin-Monnier et Jean-Christophe Appert-Collin pour leurs encouragements et leur soutien.

Enfin, à mes parents qui m'ont toujours poussé à aller plus loin, et à toute ma famille pour leur soutien inconditionnel.

Table des matières

Liste des figures 5
Liste des tableaux 9
Nomenclature 10
Introduction générale 13
Chapitre 1 : Généralités 15
1.1. Émissions des procédés métallurgiques 15
1.1.1. Composition et risques pour la santé 15
1.1.2. Problème de régénération des filtres colmatés par des poussières métalliques 17
1.2. Filtration des particules par médias fibreux 18
1.2.1. Perte de charge 19
1.2.2. Efficacité de collecte 19
1.2.2.1. Mécanismes de collecte et efficacité unitaire 19
1.2.2.2. Efficacité d'un média fibreux 24
1.2.3. Procédés de décolmatage 25
1.2.3.1. Secouage mécanique 26
1.2.3.2. Inversion du courant d'air 27
1.2.3.3. Jet pulsé 27
Références 31
Chapitre 2 : Évaluation de l'efficacité de décolmatage d'un gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques 37
2.1. État de l'art sur l'adhésion des particules 37
2.2. Présentation du pilote expérimental 40
2.3. Caractérisation du système de décolmatage par jet pulsé 43
2.3.1. Mesure du volume d'air injecté 44
2.3.2. Mesure de l'accélération durant le jet pulsé 45
2.4. Décolmatage d'un gâteau de filtration composé de nanoparticules métalliques 48
2.4.1. Perte de charge du gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques 48
2.4.2. Évaluation de l'efficacité de décolmatage 49
2.4.3. Cycles colmatage/décolmatage 51
2.5. Influence du vieillissement atmosphérique 52
2.5.1. Évolution de la résistance du gâteau de filtration durant le vieillissement 53
2.5.2. Caractérisation physico-chimique 55
2.5.3. Mesure d'isotherme d'adsorption de l'eau des particules métalliques 57
2.5.4. Effet du vieillissement sur l'adhésion du gâteau de filtration 59
2.6. Influence du média filtrant 62
2.6.1. Caractéristiques des médias étudiés 63

2.6.2. Mesure de l'efficacité initiale de collecte 65
2.6.3. Performances vis-à-vis des nanoparticules métalliques 69
Conclusion 70
Références 71
Chapitre 3 : Application de la technique de précoating pour améliorer la régénération des filtres 75
3.1. Techniques d'amélioration des performances de filtration 75
3.1.1. Précoating (conditionnement du filtre) 75
3.1.2. Ajout d'additif (conditionnement du gaz) 80
3.2. Caractérisation expérimentale des performances de la technique de précoating 82
3.2.1. Évaluation de l'efficacité de collecte de la couche de précoating 82
3.2.2. Mesure de l'épaisseur du précoating et modélisation de l'efficacité de collecte 87
3.2.3. Évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules métalliques 90
3.2.4. Amélioration de l'efficacité de décolmatage avec précoating 94
Conclusion 98
Références 99
Chapitre 4 : Décolmatage des cartouches plissées par jet pulsé : Effet du plissage 101
4.1. État de l'art 101
4.2. Étude expérimentale du décolmatage de cartouches plissées 104
4.2.1. Montage expérimental 104
4.2.2. Mesure de l'accélération du média propre 107
4.2.3. Performances de décolmatage vis-à-vis de nanoparticules métalliques 110
4.2.4. Performances de décolmatage vis-à-vis du précoating seul 115
4.2.5. Application du précoating 117
4.2.5.1. Application pendant la filtration des nanoparticules 117
4.2.5.2. Application avant la filtration des nanoparticules 119
Conclusion 123
Références 124
Conclusion générale et perspectives 126
Annexe A : Quelques notions sur les aérosols 129
A.1. Définitions 129
A.2. Diamètres équivalents 131
A.3. Dimension fractale 132
A.4. Masse volumique effective 134

Liste des figures

Figure 1.1 : Déposition des particules dans le système respiratoire durant l'inhalation (Morawska et Buonanno, 2021). 16

Figure 1.2 : Comparaison des nanoparticules à des éléments biologiques. 17

Figure 1.3 : Photos de manches filtrantes après utilisation pour la filtration des particules ultrafines métalliques (Mugica et al., 2014). 17

Figure 1.4 : Modèle de la structure d'un média fibreux (Soltani et al., 2014). 18

Figure 1.5 : Schéma représentatif des mécanismes de collecte. 20

Figure 1.6 : Courbe de l'efficacité de collecte d'un filtre en fonction du diamètre de la particule en utilisant différentes associations de modèles d'efficacité unitaire (d_f = 20 µm, Z = 0,28 mm, U_G = 0,01 $m.s^{-1}$, α_f = 0,29). 25

Figure 1.7 : Allures de l'évolution de la perte de charge durant les cycles colmatage/décolmatage. ... 26

Figure 1.8 : Effet de la masse déposée sur l'efficacité de décolmatage par inversion de courant (Clift et Seville, 1993) 27

Figure 1.9 : Formes de buses d'injection ((a) : Hau and Leung, 2016; (b) : Shim et al., 2017; (c) : Chen and Chen, 2017). 28

Figure 2.1 : Effet de la rugosité de la surface sur l'adhésion de la particule (Ranade, 1987). 38

Figure 2.2 : Adhésion d'une particule sur une surface par force capillaire (Thomas et al., 2017). 39

Figure 2.3 : Schéma du pilote expérimental. 41

Figure 2.4 : Distribution en nombre de la taille des particules métalliques mesurée en aval du cyclone après une dilution d'un facteur 100. 41

Figure 2.5 : Images MEB des faces amont/aval du média étudié 43

Figure 2.6 : Schéma représentatif du porte filtre avec le système de décolmatage par jet pulsé. 44

Figure 2.7 : Etude paramétrique sur la buse d'injection et comparaison des volumes d'air injecté expérimentaux et calculés. 45

Figure 2.8 : Effet du diamètre de la buse sur le décolmatage par jet pulsé pour une pression d'air comprimé de 4 bars et un temps d'ouverture de 0,4 s pour trois diamètres de buses (1,2 et 3 mm). 46

Figure 2.9 : Effet du temps d'ouverture sur le décolmatage par jet pulsé pour une buse de 3 mm de diamètre et une pression d'air comprimé de 4 bars. 47

Figure 2.10 : Effet de la pression d'air comprimé sur le décolmatage par jet pulsé pour une buse de 3 mm de diamètre et un temps d'ouverture de 0,2 s. 47

Figure 2.11 : Évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules métalliques (F_C = 1,5 (cas des agrégats) ; d_{pp} = 12 nm ; ε = 0,97 ; ρ_p = 6000 $kg.m^{-3}$). 49

Figure 2.12 : Traitement par le logiciel ImageJ d'une image de filtre décolmaté (les zones bleues de l'image de gauche correspondent aux portions décolmatées). 50

Figure 2.13 : Résultats de l'efficacité de décolmatage d'un filtre colmaté avec des nanoparticules métalliques (pression de décolmatage de 4 bars, buse de 3 mm et temps d'ouverture de 0,2 s). 51

Figure 2.14 : Résultats des cycles colmatage/décolmatage réalisés online avec une buse de 3 mm de diamètre, 1 pulse, une pression de 4 bars et un temps d'ouverture de 0,2 s. 52

Figure 2.15 : Changement de couleur du gâteau de filtration après vieillissement sous 70% humidité pendant 15 jours à 15±5°C. 53

Figure 2.16 : Schéma du montage utilisé pour le conditionnement des gâteaux de filtration. 54

Figure 2.17 : Cinétique d'évolution de la résistance du gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques durant le vieillissement sous différentes conditions d'humidité à 15±2°C. 55

Figure 2.18 : Images MET d'un gâteau frais (a) d'un gâteau après vieillissement sous air sec pendant 1 mois (15±5°C) (b) et d'un gâteau après vieillissement sous air humide (RH= 70%; 15±5°C) pendant 1 mois (c). 56

Figure 2.19 : Types des isothermes d'adsorption des gaz (a) et des hystérésis (b) selon l'IUPAC (Thommes et al., 2015). 57

Figure 2.20 : Résultats d'isotherme d'adsorption de l'eau à 20°C des différentes particules métalliques à base de zinc. 58

Figure 2.21 : Schématisation de la mesure de la force d'adhésion par inversion de courant. 59

Figure 2.22 : Exemple de la mesure de la force d'adhésion par inversion de courant. 60

Figure 2.23 : Montage pour la détermination de la force d'adhésion par inversion de courant. 60

Figure 2.24 : Pertes de charge enregistrées durant l'inversion de courant à travers des gâteaux de filtration stockés sous différentes conditions d'humidité. 61

Figure 2.25 : Évolution de la force d'adhésion après vieillissement pendant 15 jours sous différentes conditions d'humidité à 15°C. 62

Figure 2.26 : Variation de l'efficacité de décolmatage après vieillissement sous différentes conditions d'humidité pendant 15 jours à une température de 15°C (décolmatage avec une pression de 4 bars, une buse de 3 mm de diamètre et un temps d'ouverture de 0,2 s). 62

Figure 2.27 : Banc d'essais pour la détermination de l'efficacité initiale de collecte des médias filtrants. 66

Figure 2.28 : Distribution en nombre de la taille des particules de sel mesurée après dilution d'un facteur 100. 67

Figure 2.29 : Résultats de l'efficacité initiale de collecte des différents médias pour une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$. 68

Figure 2.30 : Efficacité de collecte des membranes polyéthylène et leur supports fibreux pour une vitesse de filtration de 3 cm^{-1} (a) ; évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse de l'air des membranes polyéthylène seules (b). 68

Figure 2.31 : Évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules métalliques à une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$. 69

Figure 3.1 : Schéma représentatif du principe de précoating pour la filtration des particules ultrafines. 75

Figure 3.2 : Principe du post-coating (Zhang et Schmidt, 2012). 78

Figure 3.3 : Influence de l'introduction des particules de sel sur la perte de charge (Zhang, 2018). 81

Figure 3.4 : Banc expérimental utilisé pour mesurer l'efficacité initiale de collecte du précoating. 82

Figure 3.5 : Schéma représentatif de la chambre de génération du générateur GFG 1000. 83

Figure 3.6 : Distribution en nombre de la taille des particules de carbone générées par le générateur GFG1000. 83

Figure 3.7 : Principe de fonctionnement du générateur RBG 1000. 84

Figure 3.8 : Distribution granulométrique en nombre des particules de précoating générées par le générateur RBG 1000. 85

Figure 3.9 : Images MEB des poudres utilisées. 85

Figure 3.10 : Efficacité de collecte du précoating seul en utilisant les trois matériaux pour différentes masses surfaciques et pour une vitesse de filtration de 2,5 $cm.s^{-1}$. 86

Figure 3.11 : Schéma représentatif du banc expérimental utilisé pour la mesure de l'épaisseur de la couche de précoating. 87

Figure 3.12 : Comparaison de l'épaisseur mesurée avec le pied à coulisse et celle calculée par la méthode laser. 88

Figure 3.13 : Variation de l'épaisseur du gâteau avec la masse déposée pour les trois poudres et pour une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$. 89

Figure 3.14 : Modélisation de l'efficacité de collecte de la couche pour les trois poudres avec une vitesse de filtration de 2,5 $cm.s^{-1}$ (P1 : d_C= 1,11 µm, ε_g= 0,78 ; P2 : d_C= 0,95 µm, ε_g= 0,84; P3 : d_C= 1,02 µm, ε_g= 0,93). 90

Figure 3.15 : Banc expérimental pour l'application du précoating sur filtres plans. 91

Figure 3.16 : Perte de charge de la couche de précoating seul en fonction de la masse déposée. 92

Figure 3.17 : Évolution de la perte de charge durant le colmatage avec les nanoparticules métalliques en utilisant les trois matériaux et pour une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$. 93

Figure 3.18 : Schématisation de l'effet de l'augmentation de l'épaisseur du précoating sur la capacité de rétention de nanoparticules. 93

Figure 3.19 : Variation de l'efficacité de décolmatage avec l'épaisseur du précoating en utilisant les trois poudres pour différentes masses collectées de nanoparticules métalliques et différentes pressions de l'air de décolmatage. 95

Figure 3.20 : Photo de la monocouche de particules de précoating qui reste adhérée sur la surface du filtre après décolmatage 96

Figure 3.21 : Cycles colmatage/décolmatage après une unique application du précoating P1 avec une masse de 24 $g.m^{-2}$, une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$ et une pression de l'air de décolmatage de 4 bars. 96

Figure 3.22 : Cycles colmatage/décolmatage avec application du précoating P1 avec une masse de 24 $g.m^{-2}$, une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$ et une pression de l'air décolmatage de 4 bars. 97

Figure 3.23 : Variation du rapport de la perte de charge résiduelle sur la vitesse au cours des cycles pour différentes vitesses de filtration. 97

Figure 3.24 : Variation du temps de cycle par rapport au premier cycle au cours des cycles pour différentes vitesses de filtration. 98

Figure 4.1 : Caractéristiques d'un filtre plissé. 101

Figure 4.2 : Différentes formes de pli étudiées par Chen et al. (2017) 102

Figure 4.3 : Installation d'un cône à l'intérieur d'une cartouche plissée pour améliorer le décolmatage par jet pulsé (Li et al., 2015) 103

Figure 4.4 : Nouveaux dispositifs d'injection d'air comprimé pour le décolmatage des cartouches plissées (a : Cho et al., 2020) (b : S.Li et al., 2019b) (c : Bémer et al., 2015) 104

Figure 4.5 : Schéma du pilote expérimental pour évaluer les performances des cartouches plissées. 105

Figure 4.6 : Schéma représentatif d'un éjecteur venturi. 106

Figure 4.7 : Distribution granulométrique en masse de la taille des particules de précoating. 106

Figure 4.8 : Photos des cartouches plissées étudiées. 107

Figure 4.9 : Schéma représentatif de la mesure de l'accélération des cartouches plissées..... 107

Figure 4.10 : Mesure de l'accélération de la cartouche α=6 avec une pression de l'air comprimé de 6 bars à une distance de 20 cm de l'ouverture de la cartouche. 108

Figure 4.11 : Mesure de l'accélération de la cartouche α=6 en offline tout au long de la cartouche avec différentes pressions de l'air comprimé. 109

Figure 4.12 : Résultats de la mesure de l'accélération lors du décolmatage online des différentes cartouches pour différentes pressions de l'air de décolmatage à une distance de 20 cm de l'ouverture de la cartouche..... 110

Figure 4.13 : Évolution de la perte de charge et du débit durant les cycles colmatage/décolmatage pour les différentes cartouches (avec couche de nanofibres) pour une pression d'air comprimé de 6 bars et 4 pulses. 111

Figure 4.14 : Photos de la cartouche α=6 propre (bleu) et après les cycles colmatage/décolmatage.. 112

Figure 4.15 : Photo du décolmatage inefficace par plaques des cartouches colmatées par les nanoparticules métalliques. 112

Figure 4.16 : Schématisation de l'écoulement suite à un décolmatage par plaques. 113

Figure 4.17 : Résultats de l'efficacité de décolmatage au cours des cycles suite au colmatage par les nanoparticules métalliques, le décolmatage réalisé en offline avec 6 bars et 4 pulses. 115

Figure 4.18 : Résultats de l'efficacité de décolmatage des cartouches plissées sous différentes conditions suite à un colmatage avec le précoating seul. 116

Figure 4.19 : Cycles colmatage/décolmatage avec application du précoating durant la filtration des nanoparticules et un décolmatage online avec une pression de 6 bars, 1 pulse et pour différentes valeurs de α. 117

Figure 4.20 : Efficacité de décolmatage au cours des cycles pour une application du précoating durant la filtration des nanoparticules. 118

Figure 4.21 : Cycles colmatage/décolmatage avec application du précoating (SiO_2) avant la filtration des nanoparticules, décolmatage réalisé en offline avec 6 bars et 1 pulse. 119

Figure 4.22 : Effet de différents paramètres sur l'efficacité de décolmatage pour une cartouche avec α=3, une application du précoating avant la filtration des nanoparticules et un décolmatage en offline avec 6 bars et 1 pulse. 120

Figure 4.23 : Photo d'une cartouche plissée (α=3) après les cycles de décolmatage avec une application du précoating avant la filtration des nanoparticules. 121

Figure 4.24 : Distribution granulométrique en nombre des particules de $C_2H_6Cl_2Si$ générées. 121

Figure 4.25 : Cycles colmatage/décolmatage avec application de la poudre $C_2H_6Cl_2Si$. 122

Figure 4.26 : Photos de la cartouche lors du premier décolmatage en offline avec une pression de 6 bars après 1 pulse (a) et 4 pulses (b). 123

Figure A.1 : Ordre de grandeur de la taille de certaines particules selon leur origine (Hinds, 1999). 129

Figure A.2 : Images microscope des particules émises par le procédé de métallisation (a) et particules de suie (b) (Bémer et al., 2015; Zhao et al., 2016). 133

Figure A.3 : Variation de la structure d'agrégats avec la dimension fractale (Ouf, 2006). 133

Figure A.4 : Comparaison des différents diamètres équivalents avec la taille des agrégats (Ouf et al., 2005; Boldridge et al., 2020). 134

Figure A.5 : Variation de la masse volumique effective avec le diamètre équivalent en mobilité électrique pour les agrégats à base de Zn/Al issus de la métallisation (Charvet et al., 2015). 135

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Exemples de compositions chimiques élémentaires de certaines poussières émises par différents procédés métallurgiques exprimées en masse. 16

Tableau 1.2 : Quelques expressions de la fonction $f(\alpha_f)$. 19

Tableau 1.3 : Quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par impaction inertielle. 21

Tableau 1.4 : Quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par interception. 22

Tableau 1.5 : Quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par diffusion. 22

Tableau 1.6 : Quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par force coulombienne. 23

Tableau 1.7 : Corrélations pour prévoir la masse résiduelle après décolmatage en fonction de la pression maximale à l'intérieur de la cartouche (Li et al., 2015). 29

Tableau 1.8 : Valeurs des coefficients du modèle de Laminger et al. (2017) en fonction de la pression de l'air comprimé et le temps d'ouverture. 30

Tableau 2.1 : Quelques valeurs de la constante d'Hamaker (Mittal et Jaiswal, 2015). 38

Tableau 2.2 : Caractéristiques du média utilisé. 43

Tableau 2.3 : Valeurs de la force d'adhésion obtenues par la technique d'inversion de courant. 60

Tableau 2.4 : Caractéristiques des médias étudiés. 63

Tableau 2.5 : Images MEB de quelques médias. 63

Tableau 2.6 : Résultats de l'efficacité de décolmatage des médias après un colmatage avec les nanoparticules métalliques. 70

Tableau 3.1 : Caractéristiques des différents filtres étudiés par Schiller et Schmid (2014). 77

Tableau 3.2 : Quelques modèles de l'efficacité unitaire de collecte par les différents mécanismes pour les lits granulaires. 79

Tableau 3.3 : Modèles du facteur hydrodynamique pour les lits granulaires (Tardos et al., 1978). 80

Tableau 3.4 : Poudres de précoating utilisées. 84

Tableau 3.5 : Porosités des couches de précoating à 3 $cm.s^{-1}$. 89

Tableau 4.1 : Caractéristiques des cartouches étudiées. 107

Tableau A.1 : Valeurs des constantes pour l'estimation du coefficient de Cunningham. 130

Nomenclature

A_H	Constante d'Hamaker	J
a	Accélération	$m.s^{-2}$
A	Amplitude	m
a_{max}	Accélération maximale	$m.s^{-2}$
a_p	Surface spécifique de la particule	m^{-1}
C_{amont}	Concentration en amont	$particules.cm^{-3}$
C_{aval}	Concentration en aval	$particules.cm^{-3}$
Cu	Coefficient de Cunningham	-
d_A	Diamètre aérodynamique	m
d_B	Diamètre de buse	m
$D_{B\text{-}M}^{Opt}$	Distance optimale entre la buse d'injection et l'ouverture d'une manche filtrante	m
d_C	Diamètre de collecteur	m
D_{diff}	Coefficient de diffusion de la particule	$m^2.s^{-1}$
D_f	Dimension fractale	-
d_f	Diamètre de fibre	m
d_g	Diamètre de giration	m
d_i	Distance entre une particule primaire et le centre de l'agrégat	m
d_M	Diamètre équivalent en masse	m
D_M	Diamètre de la manche	m
d_{ME}	Diamètre équivalent en mobilité électrique	m
d_{mol}	Diamètre d'une molécule	m
d_p	Diamètre de particule	m
d_{pp}	Diamètre des particules primaires	m
d_{St}	Diamètre de Stokes	m
d_V	Diamètre équivalent en volume	m
e	Charge élémentaire	C
E	Efficacité de collecte	-
E_{filtre}	Efficacité de collecte du filtre seul	-
E_{PFV}	Efficacité de collecte du porte filtre vide	-
$E_{Précoating}$	Efficacité de collecte de la couche de précoating seule	-
E_{tot}	Efficacité de collecte du porte filtre avec le filtre	-
F	Force	$kg.m.s^{-2}$
f	Fréquence des vibrations	Hz
$F_{Adhésion}$	Force d'adhésion	$kg.m.s^{-2}$
F_{Ca}	Force capillaire	$kg.m.s^{-2}$
F_C	Facteur de correction	-
$F_{élect}$	Force coulombienne	$kg.m.s^{-2}$
F_r	Force de rupture d'un agglomérat	$kg.m.s^{-2}$
F_t	Force de trainée	$kg.m.s^{-2}$
F_{VdW}	Force de Van de Waals	$kg.m.s^{-2}$
g	Accélération de la pesanteur	$m.s^{-2}$
G	Grammage	$g.m^{-2}$
g(ε)	Facteur hydrodynamique	-
G_f	Module de flexibilité	$m^2.s^2.kg^{-1}$
H	Épaisseur de la couche	m

h	Distance de séparation	m
H_{Fan}	Facteur hydrodynamique de Fan	-
h_k	Constante de Kozeny	-
H_{Ku}	Facteur hydrodynamique de Kuwabara	-
h_p	Constante de Planck	-
k_2	Résistance spécifique du gâteau	s^{-1}
k_B	Constante de Boltzmann	$J.K^{-1}$
K_C	Paramètre de collecte par forces coulombiennes	-
K_{Di}	Paramètre de collecte par forces diélectrophorétiques	-
K_f	Préfacteur	-
Kn	Nombre de Knudsen	-
Kn_f	Nombre de Knudsen rapporté à la fibre	-
l	Hauteur du pli	m
m	Masse	kg
m_{ag}	Masse de l'agrégat	kg
Me	Module d'élasticité	$m^2.s^2.kg^{-1}$
m_i	Masse d'une particule primaire	kg
m_p	Masse de la particule	kg
n_c	Nombre de charge	-
n_{mol}	Nombre de molécules par unité de volume	$molécules.m^{-3}$
N_{pp}	Nombre de particules primaires	-
P	Pression	Pa
p	Longueur du pli	m
Pe	Nombre de Peclet	-
Q	Facteur qualité	-
q_m	Débit massique à travers une buse	$kg.s^{-1}$
$q_{m,sonique}$	Débit massique à travers une tuyère sonique	$kg.s^{-1}$
R	Paramètre d'interception	-
r	Constante des gaz parfaits	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Re	Nombre de Reynolds	-
R_f	Résistance du filtre	m^{-1}
R_G	Résistance du gâteau de filtration	m^{-1}
R_{G0}	Résistance d'un gâteau de filtration frais	m^{-1}
RH	Taux d'humidité	-
R_M	Efficacité de décolmatage par rapport à la masse détachée	-
R_P	Efficacité de décolmatage par rapport à la perte de charge résiduelle	-
R_S	Efficacité de décolmatage par rapport à la surface décolmatée	-
R_T	Efficacité de décolmatage par rapport au temps de cycle	-
St	Nombre de Stokes	-
T	Température	K
t_{ouv}	Temps d'ouverture de la buse d'injection	s
U_G	Vitesse superficielle du gaz	$m.s^{-1}$
U_s	Vitesse terminale de chute	$m.s^{-1}$
v_p	Volume de la particule	m^3
W	Masse surfacique	$kg.m^{-2}$
Z	Épaisseur du filtre	m
Z_e	Mobilité électrique	$m^2.V^{-1}.s^{-1}$
Z_G	Épaisseur du gâteau de filtration	m

Lettres grecs

μ	Viscosité	$Pa.s^{-1}$
η_C	Efficacité unitaire de collecte par forces coulombiennes	-
η_{CI}	Efficacité unitaire de collecte par forces colombiennes et par interception	-
η_{Di}	Efficacité unitaire de collecte par forces diélectrophorétiques	-
$\eta_{Diffusion}$	Efficacité unitaire de collecte par diffusion	-
η_i	Efficacité unitaire de collecte par le mécanisme i	-
$\eta_{Inertie}$	Efficacité unitaire de collecte par inertie	-
$\eta_{Interception}$	Efficacité unitaire de collecte par interception	-
η_T	Efficacité unitaire globale	-
α	Ratio du pli	-
α_f	Compacité du filtre	-
α_g	Compacité du gâteau de filtration	-
γ	Rapport des capacités thermiques du fluide	-
γ_L	Tension superficielle du liquide	$N.m^{-1}$
δ	Angle du mouillage de la moitié de la particule	°
ΔH	Variation de l'épaisseur de la couche	m
ΔL	Déplacement du laser	m
ΔP	Perte de charge	Pa
ΔP_0	Perte de charge du média propre	Pa
ΔP_C	Perte de charge au point critique	Pa
ΔP_G	Perte de charge du gâteau de filtration	Pa
ΔP_{Max}	Perte de charge maximale	Pa
ΔP_r	Perte de charge résiduelle	Pa
ε	Porosité	-
ϵ_0	Permittivité du vide	$kg^{-1}.m^{-3}.s^4.A^2$
ϵ_f	Constante diélectrique de la fibre	-
ε_g	Porosité du gâteau de filtration	-
ϵ_p	Constante diélectrique de la particule	-
θ	Angle de contact entre un liquide et une surface	°
λ	Libre parcours moyen	m
λ_0	Libre parcours moyen à pression atmosphérique et à 20 °C	m
μ_G	Viscosité du gaz	$Pa.s^{-1}$
ρ_0	Masse volumique standard	$kg.m^{-3}$
ρ_{eff}	Masse volumique effective	$kg.m^{-3}$
ρ_f	Masse volumique des fibres	$kg.m^{-3}$
ρ_G	Masse volumique du gaz	$kg.m^{-3}$
ρ_p	Masse volumique de la particule	$kg.m^{-3}$
σ	Densité de charge moyenne sur une fibre	$m^{-3}.s.A$
χ	Facteur de forme dynamique	-
Ψ	Angle entre le laser et la surface du filtre	°
Ω	Section du filtre	m^2

Introduction générale

La filtration des particules est une thématique qui attire beaucoup l'attention de la communauté scientifique, principalement à cause des effets négatifs de la pollution de l'air sur l'environnement et la santé humaine. Dans un récent rapport, la pollution atmosphérique a été classée comme la quatrième cause de décès dans le monde ("State of Global Air 2020", 2020). Il est estimé que près de 90% de la population mondiale est exposée à des concentrations élevées en particules fines (particules < 2,5 µm), des concentrations qui dépassent le seuil de 10 $\mu g.m^{-3}$ recommandé par l'organisation mondiale de santé pour la qualité de l'air. Le sujet des particules nanostructurées, dites aussi particules ultrafines (particules < 0,1 µm), soulève encore plus d'inquiétude. Malgré une toxicité de ces nanoparticules sur l'homme et l'environnement qui reste mal connue, les données toxicologiques disponibles indiquent un effet néfaste sur les organismes vivants.

Plusieurs procédés industriels génèrent des particules ultrafines comme la combustion, les procédés thermiques et mécaniques. De plus, avec le développement de la nanotechnologie, l'utilisation des nanomatériaux s'est généralisée dans la majorité des secteurs industriels comme l'électronique, l'industrie chimique, les produits pharmaceutiques et le domaine énergétique, ce qui implique que les travailleurs sont susceptibles d'être exposés à ces nanoparticules, et ces dernières peuvent également être rejetées dans l'environnement. Assurer la qualité de l'air intérieur est d'une importance majeure pour la protection de la santé des travailleurs dans les différents secteurs industriels. A noter qu'à l'heure actuelle aucune valeur limite d'exposition aux nanoparticules dans les milieux professionnels n'a été fixée. Afin de limiter les émissions des particules, les pays s'orientent vers l'imposition de réglementations plus strictes, d'où la nécessité de maitriser les procédés de séparation. Jusqu'à présent, la filtration par médias fibreux reste la technique la plus efficace et la plus utilisée à l'échelle industrielle.

Dans le cas des procédés métallurgiques comme la projection thermique, la découpe des métaux et la sidérurgie, les systèmes de filtration sont confrontés à un colmatage rapide et irréversible des filtres accompagné d'une augmentation significative de la perte de charge. Ces procédés génèrent des concentrations élevées en particules ultrafines métalliques. De plus, le décolmatage se révèle particulièrement difficile lorsque les filtres colmatés sont exposés à l'humidité pendant plusieurs jours, à cause d'une transformation du dépôt de poussière. Ne pas pouvoir assurer une régénération efficace des filtres après chaque colmatage, implique la nécessité de les remplacer régulièrement, engendrant de fait un coût supplémentaire. La filtration des particules métalliques est actuellement problématique, car lorsque les filtres sont colmatés, soit ils ne sont pas remplacés à cause du coût, ce qui implique la détérioration de la qualité de l'air intérieur, soit ils sont supprimés et donc les particules sont rejetées directement dans l'atmosphère. Apporter une solution pour améliorer la régénération des filtres est donc d'importance. L'utilisation du précoating fait partie des solutions proposées pour surmonter les difficultés de filtration. Cette opération consiste à protéger le filtre par une couche de particules grossières, sur laquelle se déposent les particules ultrafines. Cette couche permettra ainsi d'améliorer la régénération du média étant donné qu'elle est plus facile à détacher, et par conséquent d'augmenter la durée de vie du filtre. Il faut noter que peu de données existent dans littérature sur l'application de cette technique.

Ce travail rentre dans le cadre d'une étude commune entre l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité) et le LRGP (Laboratoire Réactions et Génie des Procédés) afin d'optimiser la filtration des particules ultrafines métalliques. Cette thèse porte un intérêt particulier sur la régénération des filtres fibreux par jet pulsé, sachant que c'est la technique de décolmatage la plus employée en industrie. Le but est d'identifier les paramètres qui contrôlent l'adhésion des gâteaux de filtration aux médias fibreux et de fixer les conditions optimales pour l'amélioration du décolmatage. La finalité sera de pouvoir

proposer des recommandations pour optimiser les performances des systèmes de filtration industriels. L'étude est purement expérimentale et les expériences sont menées sur un pilote qui permet de générer des particules ultrafines métalliques à partir d'un procédé de projection thermique à arc électrique, afin de se rapprocher des conditions réelles. Les expériences sont d'abord réalisées sur filtres plans et validés ensuite par des essais sur cartouches industrielles. Le document de thèse est divisé en quatre chapitres.

Le chapitre 1 introduit certains éléments bibliographiques nécessaires pour l'étude. Les émissions des procédés métallurgiques et leurs effets sur la santé sont présentés. Ensuite, le problème de régénération des filtres rencontré sur les sites d'activités métallurgiques est exposé pour une meilleure compréhension du contexte de l'étude. Ce chapitre se conclut par un rappel sur la théorie de la filtration des particules par médias fibreux et les procédés de décolmatage.

Dans le chapitre 2 nous nous intéressons à l'évaluation de l'efficacité de décolmatage d'un gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques sur filtres plans. L'influence de différents paramètres opératoires est étudiée, et nous discutons des critères appropriés pour caractériser l'efficacité de décolmatage. Une attention particulière est portée sur l'effet du vieillissement atmosphérique du gâteau de filtration sur sa résistance à l'écoulement et sur son adhésion à la surface du filtre. La force d'adhésion du gâteau de filtration est évaluée par une méthode d'inversion de courant d'air. Les performances de filtration en termes d'efficacité de collecte, de perte de charge et de régénération de différents médias, possédant différents traitements surfaciques, sont ainsi évaluées. Les résultats de cette partie permettront d'expliquer les difficultés de filtration rencontrées dans le secteur métallurgique.

Pour surmonter les problèmes de régénération, l'application de la technique de précoating sur filtres plans est étudiée au chapitre 3. Dans un premier temps, la contribution de la couche de précoating à l'efficacité de collecte et à la perte de charge est évaluée. L'épaisseur de cette couche est estimée par une méthode de trigonométrie laser et différents matériaux sont testés, afin de déterminer si le choix du précoating est prépondérant. Dans un second temps, l'efficacité de décolmatage avec précoating est mesurée en portant une attention particulière sur les conditions opératoires. Ces données vont constituer une base pour optimiser l'application de cette technique et comprendre l'effet des différents paramètres.

Finalement, des essais sur cartouches plissées industrielles sont réalisés dans le chapitre 4. L'objectif de ce chapitre est de valider les résultats obtenus sur filtres plans et vérifier l'applicabilité du précoating sur cartouches plissées. Parmi les différents paramètres étudiés, un intérêt est porté sur l'effet du plissage et du traitement surfacique des filtres sur les performances de décolmatage. A partir de ces expériences, des recommandations pour optimiser les performances des systèmes de filtration industriels sont déduites.

Chapitre 1 : Généralités

1.1. Émissions des procédés métallurgiques

1.1.1. Composition et risques pour la santé

Les procédés métallurgiques tels que la fonderie, la métallisation, le soudage et la découpe de métaux génèrent des quantités importantes de poussières. Dans les usines d'agglomération, la quantité de poussière est estimée de 4 kg/tonne de métal produit (Peng et al., 2008), elle est de 7 kg/ tonne de métal consommé pour les procédés de soudage (Singh, 2005) et ce chiffre s'élève à 20 kg/tonne de métal produit pour les fours à arc électrique (Sofilić et al., 2004). Tenant compte de la taille de l'industrie métallurgique dans le monde, certains auteurs rapportent que des millions de tonnes de poussières sont générées chaque année (Liu et al., 2021). D'ailleurs au vu de leurs quantités, un intérêt s'est développé pour la valorisation de ces poussières métalliques en matière première (Scharf et Ditze, 2013; Stubbe et al., 2016).

Souvent, l'activité métallurgique est exercée sous ventilation et la collecte des poussières est assurée par des systèmes de filtration (cyclones, médias fibreux ou précipitateurs électrostatiques) pour la protection de la santé des travailleurs et maintenir l'hygiène des sites industriels. Puisque l'inhalation des particules a des effets néfastes sur la santé, liée à des maladies respiratoires et cardiovasculaires, les travailleurs doivent en plus porter des équipements de protection individuelle (masques ou cagoules ventilés). Effectivement, la nature chimique des particules soulève également des risques de toxicité. Le tableau 1.1 donne la composition élémentaire de certaines poussières émises par quelques procédés métallurgiques. Il peut être remarqué la présence de métaux lourds, tels que le Chrome (Cr), le Nickel (Ni), le Magnésium (Mg), le Cuivre (Cu), le Zinc (Zn) et le Plomb (Pb), connus pour être cancérogènes et associés à des maladies respiratoires (Persoons et al., 2014). Le Manganèse (Mn), souvent présent dans les fumées métallurgiques, est quant à lui considéré comme une neurotoxine liée à des maladie du système nerveux (Antonini et al., 2006). L'exposition des travailleurs aux fumées métallurgiques fait actuellement l'objet de plusieurs travaux (Falcone et al., 2018; Michalek et al., 2019; Bakri et al., 2019), surtout depuis la classification des fumées de soudage comme « cancérogène pour les humains » par l'Agence Internationale pour la Recherche sur le Cancer (Guha et al., 2017). Il est estimé que des millions de travailleurs à travers le monde sont exposés à ce type d'émission (Zeidler-Erdely et al., 2019). Non seulement ces poussières présentent un danger dans les milieux professionnels, mais des recherches ont aussi montré un risque de contamination des milieux urbains proches des sites de production. En effet, des poussières contenant des éléments comme le Cr, Ni et Zn ont été détectées sur un rayon de 20 km autour de sites industriels (Muszer, 2004; Park et al., 2008; Teran et al., 2020).

La distribution granulométrique des émissions métallurgiques a la particularité de présenter une fraction fine (<1 µm) très importante (Machado et al., 2006; Bémer et al., 2010; Ennan et al., 2013). D'un point de vue toxicologique, toute particule d'un diamètre inférieur à 10 µm peut potentiellement contaminer l'organisme (Heyder, 2004). En effet, selon leur taille, la pénétration des particules dans le corps humain se fait sur trois niveaux du système respiratoire : bouche, poumons et voie alvéolaire, comme le montre la figure 1.1. Pour les particules nanométriques, les risques d'exposition pour les êtres humains sont toujours en cours d'étude. Cependant, certaines recherches ont fait le lien entre l'exposition aux nanoparticules et un grand nombre de maladies inflammatoires (Schraufnagel, 2020; Chen et al., 2020). Vu leur taille, les nanoparticules peuvent interagir avec les organismes vivants au niveau cellulaire et perturber leurs processus (Mahana et al., 2021). La figure 1.2 permet de faire la comparaison entre la taille des nanoparticules et des éléments biologiques.

Tableau 1.1 : Exemples de compositions chimiques élémentaires de certaines poussières émises par différents procédés métallurgiques exprimées en masse.

Élément	Composition (%) - Usine d'agglomération métallurgique (Peng et al., 2008)	Composition (%) - Four à arc électrique (Sofilić et al., 2004)	Composition (%) - Soudage par arc électrique (Kohyama et Shinohara, 2006)
K	11,5	1,13	0,99
Na	1,48	0,65	0,75
Ca	6,71	4,10	10,67
Mg	1,002	2,83	1,52
Zn	0,2	5,08	1,13
Pb	0,885	1,15	/
Fe	21,73	44,11	60,46
C	2,76	0,29	/
Si	1,762	2	6,21
S	1,21	0,62	1,46
Al	4,56	0,25	6,81
Cu	0,041	0,29	0,55
Mn	0,132	5,48	4,27
Ti	0,060	/	1,28
P	0,065	/	0,17
Ni	/	0,016	1,72
Cr	/	0,21	0,81
Cl	/	/	1,20

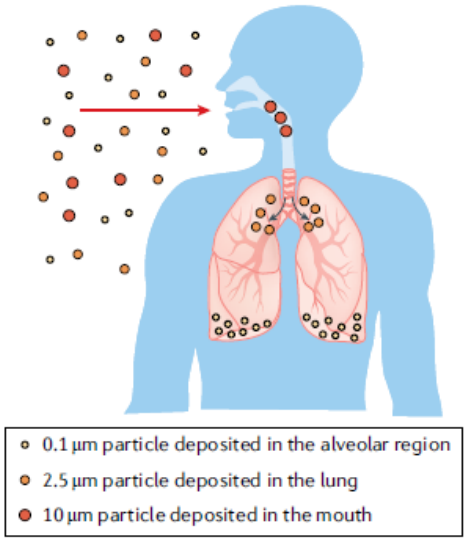


Figure 1.1 : Déposition des particules dans le système respiratoire durant l'inhalation (Morawska et Buonanno, 2021).

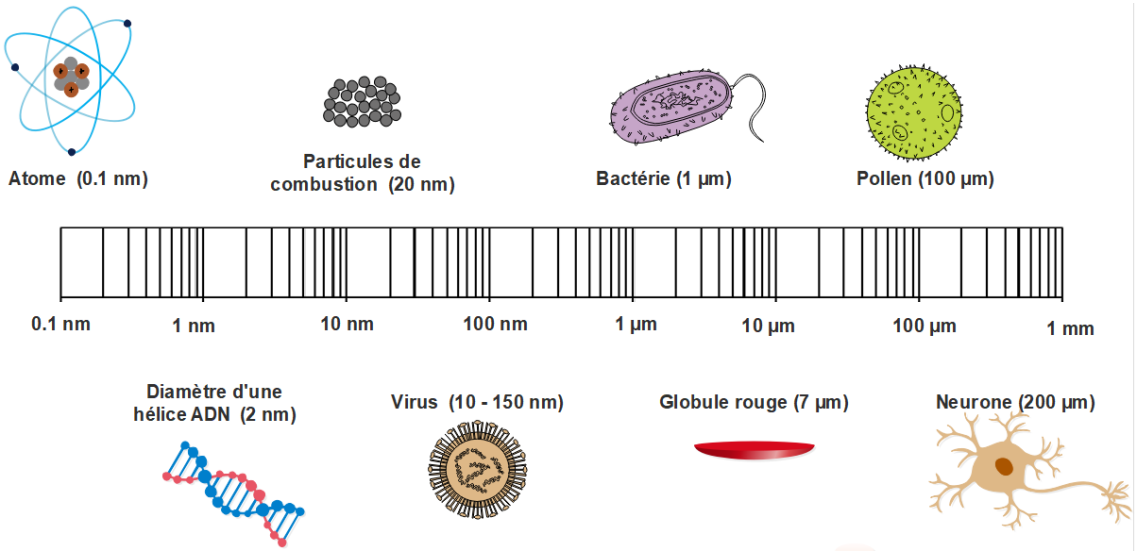


Figure 1.2 : Comparaison des nanoparticules à des éléments biologiques.

1.1.2. Problème de régénération des filtres colmatés par des poussières métalliques

Tous les éléments cités précédemment montrent bien l'importance d'assurer le bon fonctionnement des systèmes de filtration dans les sites métallurgiques pour la protection des opérateurs et de l'environnement. Plusieurs sources ont rapporté que les filtres fibreux soumis aux particules ultrafines métalliques peuvent être confrontés à un problème de colmatage irréversible. Ne pas pouvoir régénérer la surface des éléments filtrants après colmatage signifie que ces deniers doivent être remplacés régulièrement, ce qui implique des coûts de maintenance plus élevés. Mugica et al. (2014) ont noté que les émissions des procédés des fours à arc électrique présentent une fraction submicronique très importante (60-800 nm) ce qui engendre une réduction significative de la durée de vie des filtres à manches utilisés. Lors de l'évaluation des performances des médias sur une durée de plus d'un an, les auteurs ont trouvé que les filtres avec membrane PTFE possèdent de meilleures performances en termes d'efficacité et de perte de charge. La figure 1.3 permet de visualiser la capacité de ces particules ultrafines à pénétrer à travers le média au cours du temps. Bémer et al. (2015) et Cho et al. (2020) ont aussi observé un décolmatage inefficace des cartouches plissées soumises aux fumées de métallisation.



Figure 1.3 : Photos de manches filtrantes après utilisation pour la filtration des particules ultrafines métalliques (Mugica et al., 2014).

Au-delà des coûts de maintenance élevés, le décolmatage inefficace des éléments filtrants peut conduire à des risques d'explosion, à cause de l'accumulation des poussières métalliques sur la surface du filtre. En 2014, le Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (ministère de transition écologique) a rapporté un accident industriel causé par le colmatage des cartouches filtrantes dans une entreprise de

fabrication de poudre d'étain. Une explosion suivie par un feu du système de filtration s'est produite. L'exploitant a estimé qu'un phénomène électrostatique a causé l'ignition, sachant que les filtres étaient chargés en poussières malgré le décolmatage automatique. L'exploitant a aussi noté que l'exposition des filtres colmatés à l'humidité de l'air extérieur a rendu le dépôt de poussière plus adhérent aux filtres (https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/44893/). Danzi et Marmo (2019) ont indiqué que le risque d'explosion dans les systèmes de collecte de particules métalliques est très élevé. Cela est dû à la concentration importante en particules ultrafines et à la nature chimique.

1.2. Filtration des particules par médias fibreux

La filtration par filtres fibreux représente le procédé le plus utilisé pour la séparation gaz/solide du fait d'une bonne efficacité associée à un coût opérationnel avantageux. Un média fibreux est défini comme un empilement de fibres, orientées de manière aléatoire, donnant naissance à un réseau poreux tridimensionnel d'une porosité de 75% à 99%. Le diamètre moyen des fibres est de l'ordre de 0,1 à 30 µm (Brown, 1993). Les fibres peuvent être produites à partir de différents matériaux (cellulose, verre, polymère, céramique ou métal). La figure 1.4 montre une structure typique d'un média fibreux.

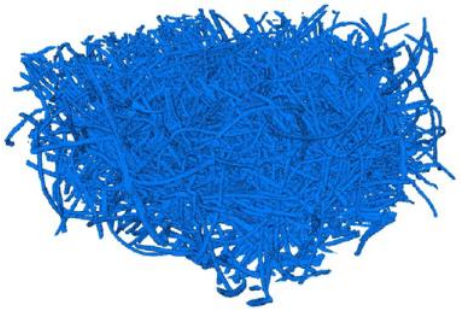


Figure 1.4 : Modèle de la structure d'un média fibreux (Soltani et al., 2014).

Les principaux paramètres utilisés pour caractériser un média fibreux sont :

- Le grammage G, défini comme la masse du média par unité de surface exprimé en $g.m^{-2}$.
- L'épaisseur Z, souvent inférieure à 1 mm.
- Le diamètre de fibre d_f.
- La compacité α_f qui caractérise la proportion de fibres dans le média. Elle peut être estimée à partir de la masse volumique des fibres ρ_f par la relation suivante :

$$\alpha_f = \frac{G}{\rho_f Z} \tag{1.1}$$

Les filtres sont commercialisés sous différentes formes : filtres plans, cartouches plissées ou filtres à manches; les deux derniers étant les plus utilisés industriellement. L'évaluation des performances des filtres est généralement basée sur deux critères : la perte de charge et l'efficacité de collecte. L'optimum correspond à une perte de charge minimale et une efficacité maximale. Souvent, un facteur qualité Q est employé pour comparer les différents médias (Brown, 1993), donné par :

$$Q = \frac{-\ln(1-E)}{\Delta P} \tag{1.2}$$

où E est l'efficacité de collecte et ΔP la perte de charge.

1.2.1. Perte de charge

La perte de charge à travers le filtre est un critère de majeure importance puisqu'elle détermine la consommation énergétique. Elle traduit la résistance du filtre à l'écoulement du fluide. La perte de charge est liée à la structure, l'épaisseur et même le traitement surfacique du filtre. Pour un filtre plan, où l'écoulement est généralement laminaire, elle est estimée par la loi de Darcy comme suit :

$$\frac{\Delta P}{Z} = \frac{4\, f(\alpha_f)}{d_f^2}\, \mu_G\, U_G \qquad (1.3)$$

où ΔP est la perte de charge, Z l'épaisseur du filtre, d_f le diamètre de fibre, μ_G la viscosité du gaz, U_G la vitesse superficielle du fluide et $f(\alpha_f)$ une fonction calculée à partir de la force de trainée. Cette fonction est déterminée selon l'arrangement des fibres par rapport à l'écoulement du fluide. Le tableau 1.2 donne quelques expressions de la fonction $f(\alpha_f)$ selon le type d'écoulement. À noter que l'expression de Davies (1973) est la plus utilisée.

Tableau 1.2 : Quelques expressions de la fonction $f(\alpha_f)$.

Type de l'écoulement	**Expressions de $f(\alpha_f)$**	
Parallèle aux fibres	$\frac{4\,\alpha_f}{-\ln\alpha_f - \frac{3}{2} + 2\alpha_f - \frac{\alpha_f^2}{2}}$	(Happel, 1959)
	$\frac{4\,\alpha_f}{-\ln\alpha_f - 1{,}498 + 2\alpha_f - \frac{\alpha_f^2}{2} + O\,\alpha_f^4}$	(Drummond et Tahir, 1984)
Perpendiculaire aux fibres	$\frac{8\,\alpha_f}{-\ln\alpha + \frac{\alpha_f^2 - 1}{\alpha_f^2 + 1}}$	(Happel, 1959)
	$\frac{8\,\alpha_f}{-\ln\alpha_f - \frac{3}{2} + 2\alpha_f}$	(Kuwabara, 1959)
A travers un empilement aléatoire de fibres	$16\,\alpha_f^{\frac{3}{2}}\,(1 + 56\,\alpha_f^3)$	(Davies, 1973)
	$2{,}446\alpha_f + 38{,}16\alpha_f^2 + 138{,}9\alpha_f^3$	(Henry et Ariman, 1983)
	$\frac{20\,\alpha_f}{3\,(-\ln(\alpha_f) - 0{,}931 + (O\,\ln(\alpha_f))^{-1})}$	(Jackson et James, 1986)

1.2.2. Efficacité de collecte

1.2.2.1. Mécanismes de collecte et efficacité unitaire

Lorsqu'un flux gazeux contenant des particules en suspension (aérosols) se rapproche d'une fibre, ces dernières peuvent, selon leur taille, être collectées à la surface de la fibre par différents mécanismes : impaction inertielle, interception, diffusion ou effets électrostatiques. La figure 1.5 permet de schématiser la collecte des particules par une seule fibre. Quelques définitions nécessaires pour l'étude des aérosols, utilisées à travers ce document, sont résumées dans l'annexe A.

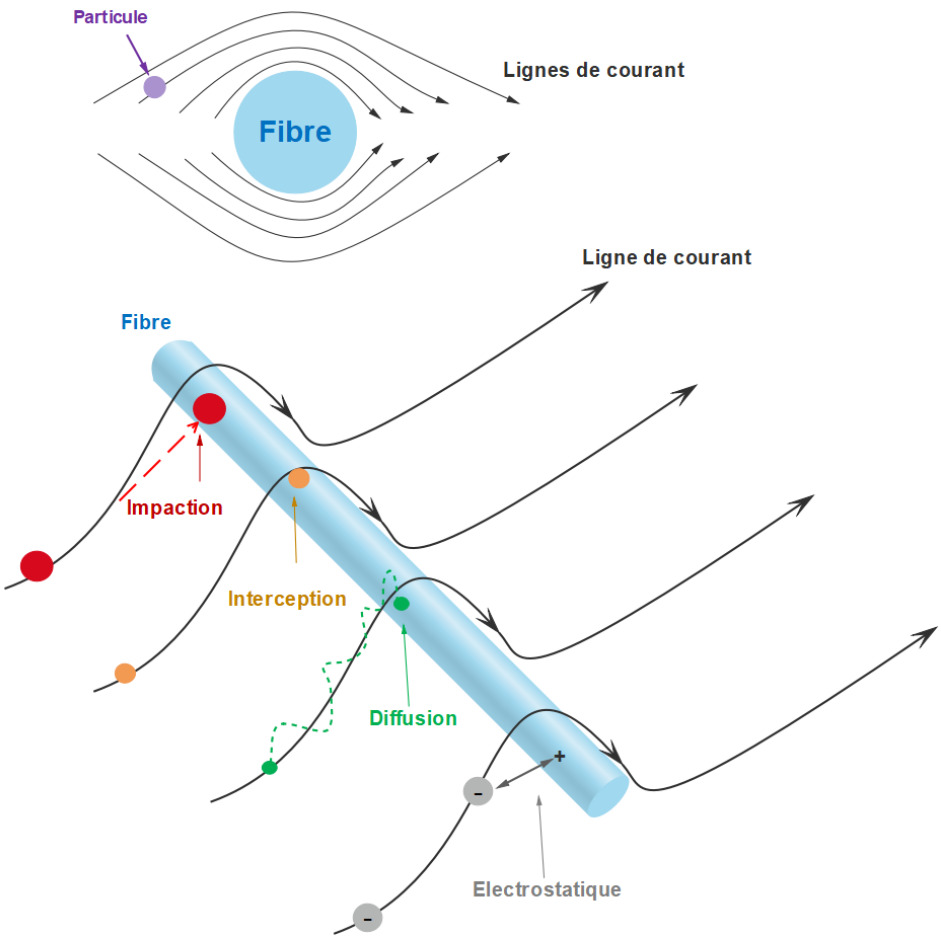


Figure 1.5 : Schéma représentatif des mécanismes de collecte.

La théorie de la filtration est basée sur le champ d'écoulement autour des fibres. A cause de la complexité de la structure des filtres, les modèles font généralement l'hypothèse que le filtre est un milieu uniforme et idéal. Le champ d'écoulement de Kuwabara suppose que le filtre est constitué de cylindres, de même diamètre, parallèles entre eux et perpendiculaires au fluide. Ce modèle est nommé modèle de cellule car il suppose que chaque cylindre est enrobé par une certaine quantité de fluide. La représentation de l'écoulement dans un filtre fibreux par le modèle Kuwabara est souvent jugée satisfaisante (Wang et Otani, 2013), donnée par le facteur hydrodynamique H_{Ku} qui est fonction de la compacité α_f :

$$H_{Ku} = -\frac{\ln(\alpha_f)}{2} - \frac{3}{4} + \alpha_f - \frac{\alpha_f^2}{4} \qquad (1.4)$$

La nature de l'écoulement autour d'une fibre dépend du nombre de Knudsen rapporté à la fibre Kn_f, défini comme suit :

$$Kn_f = \frac{2\lambda}{d_f} \qquad (1.5)$$

où λ représente le libre parcours moyen du gaz et d_f le diamètre de fibre.

Selon la valeur du nombre de Knudsen, le régime est dit :

- Continu : $Kn_f < 0{,}001$
- Régime de glissement : $0{,}001 < Kn_f < 0{,}25$
- Régime transitoire : $0{,}25 < Kn_f < 10$
- Régime moléculaire : $Kn_f > 10$

Afin de dépasser les limitations des modèles basés sur les cylindres parallèles, un autre modèle a été développé, appelé modèle de Fan, en combinant des résultats expérimentaux et théoriques, où le filtre est représenté par un système de rangées orientées de manière aléatoire, chaque rangée étant composée de cylindres parallèles. L'expression du facteur hydrodynamique du modèle de Fan est donnée par:

$$H_{Fan} = -\frac{\ln(\alpha_f)}{2} - 0{,}52 + 0{,}64\,\alpha_f + 1{,}43\,(1-\alpha_f)\,Kn_f \qquad (1.6)$$

a) Mécanisme de collecte par impaction inertielle

Ce mécanisme concerne généralement les particules dont le diamètre est supérieur à 1 µm. A cause de leur inertie, ces particules ne peuvent pas suivre les lignes de courant lorsqu'elles changent de direction autour des fibres et elles vont s'impacter à leur surface. Ce mécanisme est caractérisé par le nombre de Stokes défini par l'équation 1.7. Le tableau 1.3 regroupe quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par impaction inertielle.

$$St = \frac{Cu\,\rho_p\,d_p^2\,U_G}{9\,\mu_G\,d_f} \qquad (1.7)$$

où Cu est le coefficient de Cunningham, ρ_p et d_p sont la masse volumique et le diamètre de la particule respectivement, d_f le diamètre de fibre, μ_G la viscosité du gaz et U_G la vitesse superficielle du gaz.

Tableau 1.3 : Quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par impaction inertielle.

Référence	Expressions de l'efficacité unitaire par inertie
(Landahl et Herrmann, 1949)	$\eta_{Inertie} = \frac{St^3}{St^3 + 0{,}77\,St^2 + 0{,}22}$
(Friedlander, 1967)	$\eta_{Inertie} = 0{,}075\,St^{1{,}2}$
(Stechkina et al., 1969)	$\eta_{Inertie} = \frac{St}{2\,H_{Ku}^2}\,[(29{,}6 - 28\,\alpha^{0{,}62})R^2 - 27{,}5\,R^{2{,}8}]$ $0{,}01 < R = \frac{d_p}{d_f} < 0{,}4$
(Gougeon, 1994)	$\eta_{Inertie} = 0{,}0334\,St^{1{,}5}$

b) Mécanisme de collecte par interception

Les particules de faible diamètre suivent les lignes de courant mais lorsque la distance entre la fibre et la particule est inférieure au rayon de la particule, cette dernière est interceptée. Ce mécanisme est caractérisé par le rapport R donné par l'équation suivante :

$$R = \frac{d_p}{d_f} \qquad (1.8)$$

avec d_p le diamètre de la particule et d_f le diamètre de fibre.

Les expressions de l'efficacité unitaire de collecte par interception sont données dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par interception.

Référence	Expressions de l'efficacité unitaire par interception
(Kuwabara, 1959)	$\eta_{Interception} = 2{,}9\ \alpha_f^{\frac{1}{3}}\ R^{1{,}75}$
(Yeh et Liu, 1974)	$\eta_{Interception} = \frac{1}{2\ H_{Ku}}\left[2\ (1+R)\ln(1+R) - (1+R) + \frac{1}{1+R}\right]$
(Lee et Liu, 1982)	$\eta_{Interception} = \frac{1-\alpha_f}{H_{Ku}}\frac{R^2}{1+R}$
(Liu et Rubow, 1990)	$\eta_{Interception} = 0{,}6\frac{1-\alpha_f}{H_{Ku}}\frac{R^2}{1+R}\ (1+\frac{1{,}996\ Kn_f}{R})$

c) Mécanisme de collecte par diffusion

La collecte par diffusion brownienne concerne les particules nanométriques, pour lesquelles le diamètre est proche du libre parcours moyen des molécules de gaz (66,4 nm pour l'air à 20°C et sous pression atmosphérique). Ces particules vont se retrouver en collision avec les molécules de gaz, donnant lieu à un mouvement aléatoire des particules, ce qui augmentera la probabilité d'impact avec les fibres. Ce mécanisme est fonction du nombre de Peclet donné par l'équation 1.9 :

$$Pe = \frac{U_G\ d_f}{D_{diff}} \tag{1.9}$$

où U_G est la vitesse superficielle du gaz, d_f le diamètre de fibre et D_{diff} est le coefficient de diffusion donné par l'équation 1.10.

$$D_{diff} = \frac{k_B\ T\ Cu}{3\ \pi\ \mu_G\ d_p} \tag{1.10}$$

avec k_B la constante de Boltzmann, T la température, Cu le coefficient de Cunningham, μ_G la viscosité du gaz et d_p le diamètre de la particule.

L'efficacité unitaire de collecte par diffusion peut être estimée par l'une des expressions du tableau 1.5.

Tableau 1.5 : Quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par diffusion.

Référence	Expressions de l'efficacité unitaire par diffusion
(Stechkina et Fuchs, 1966)	$\eta_{Diffusion} = 2{,}9\ H_{Ku}^{-\frac{1}{3}}\ Pe^{-\frac{2}{3}} + 0{,}624\ Pe^{-1}$
(Lee et Liu, 1982)	$\eta_{Diffusion} = 2{,}6\ \left(\frac{1-\alpha_f}{H_{Ku}}\right)^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}}$
(Liu et Rubow, 1990)	$\eta_{Diffusion} = 1{,}6\ \left(\frac{1-\alpha_f}{H_{Ku}}\right)^{\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}}\ Cd$ $Cd = 1 + 0{,}388\ Kn_f\left((1-\alpha_f)\ \frac{Pe}{H_{Ku}}\right)^{\frac{1}{3}}$
(Wang et al., 2007)	$\eta_{Diffusion} = 0{,}84\ Pe^{-0{,}43}$

d) Mécanisme de collecte par effets électrostatiques

Les particules d'aérosols et les fibres du filtre portent souvent des charges. Un champ électrique extérieur peut être imposé afin de favoriser la collecte par les forces électrostatiques. Les forces responsables de la collecte sont les forces coulombiennes, lorsqu'il s'agit d'interaction entre particule chargée et fibre chargée, et les forces diélectrophorétiques lorsqu'il s'agit d'une particule neutre.

Le paramètre qui caractérise la collecte par forces coulombiennes est donné par K_C, le tableau 1.6 donne quelques corrélations pour l'estimation de l'efficacité unitaire.

$$K_C = \frac{Cu\ n_c\ e\ \sigma}{6\ \epsilon_0\ (1+\epsilon_f)\mu_G\ d_p\ U_G} \tag{1.11}$$

où Cu est le coefficient de Cunningham, n_c le nombre de charges, e la charge élémentaire, σ la densité de charge moyenne sur une fibre, ϵ_0 la permittivité du vide, ϵ_f la constante diélectrique de la fibre, d_p le diamètre de la particule, μ_G la viscosité du gaz et U_G la vitesse superficielle du gaz.

Tableau 1.6 : Quelques expressions de l'efficacité unitaire de collecte par force coulombienne.

Référence	Expressions de l'efficacité unitaire
(Lundgren et Whitby, 1965)	$\eta_C = 1{,}5\ (K_C)^{0,5}$
(Pich et al., 1987)	$\eta_{CI} = \eta_{Interception} + K_C \left[\frac{1}{1+R} - \frac{\eta_{Interception}}{(1+R)\ \eta_{Interception} + K_C}\right]$ avec η_{CI} l'efficacité unitaire par forces colombiennes et par interception, $\eta_{Interception}$ l'efficacité unitaire par interception, R le paramètre d'interception et K_C donnée par l'équation 1.11.
(Otani et al., 1993)	Pour $R < 0{,}66\ (K_C\ H_{Ku})^{0,64}$ et $10^{-3} < K_C < 10^{-1}$: $\eta_{CI} = 0{,}78\ K_C$; Pour $R < 0{,}66\ (K_C\ H_{Ku})^{0,64}$ et $10^{-1} < K_C < 10$: $\eta_{CI} = 0{,}59\ H_{Ku}^{-0,17}\ K_C^{0,83}$ où H_{Ku} est le facteur hydrodynamique de Kuwabara, R le paramètre d'interception et K_C la paramètre qui caractérise la collecte par forces coulombiennes.

Le paramètre qui caractérise la collecte par forces diélectrophorétiques est donné par K_{Di} :

$$K_{Di} = \frac{(\epsilon_p - 1)Cu\ \pi^2\sigma^2\ d_p^2}{6\ \epsilon_0\ (\epsilon_p + 2)(\epsilon_f + 1)^2\ \mu_G\ d_f\ U_G} \tag{1.12}$$

avec Cu le coefficient de Cunningham, σ la densité de charge moyenne sur une fibre, ϵ_p la constante diélectrique de la particule, ϵ_f la constante diélectrique de la fibre, d_p le diamètre de la particule, d_f le diamètre de fibre, μ_G la viscosité du gaz et U_G la vitesse superficielle du gaz.

Pour l'efficacité unitaire de collecte par forces diélectrophorétiques Otani et al. (1993) proposent les expressions suivantes :

pour $10^{-4} < K_{Di} < 10^{-2}$ $\eta_{Di} = 1{,}48\ K_{Di}^{-0{,}93}$ (1.13)

pour $10^{-4} < K_{Di} < 10^{-2}$ $\eta_{Di} = 0{,}51\ H_{Ku}^{-0{,}35}\ K_{Di}^{0{,}73}$ (1.14)

pour $10^{-2} < K_{Di} < 10$ $\eta_{Di} = 0{,}54\ H_{Ku}^{-0{,}6}\ K_{Di}^{0{,}4}$ (1.15)

où H_{Ku} est le facteur hydrodynamique de Kuwabara et K_{Di} le paramètre qui caractérise la collecte par forces diélectrophorétiques.

1.2.2.2. Efficacité d'un média fibreux

L'efficacité de collecte d'un média fibreux E, obtenue par bilan de matière, en fonction des caractéristiques du média est exprimée comme suit :

$$E = 1 - \exp(-4\frac{\alpha_f}{1-\alpha_f}\ \frac{Z}{\pi\ d_f}\ \eta_T) \quad (1.16)$$

avec Z l'épaisseur du filtre, d_f le diamètre de fibre, α_f la compacité et η_T l'efficacité unitaire globale d'une seule fibre donnée par l'équation 1.17. Certains auteurs utilisent une expression qui ne tient pas compte de la vitesse interstitielle, dans ce cas le terme $(1-\alpha_f)$ de l'équation 1.16 disparait.

$$\eta_T = 1 - \prod_i (1 - \eta_i) \quad (1.17)$$

avec η_i l'efficacité unitaire de collecte par le mécanisme i (impaction inertielle, interception, diffusion ou effets électrostatiques).

La figure 1.6 présente l'allure de l'efficacité globale de collecte d'un filtre en fonction du diamètre de la particule pour différentes associations de modèles d'efficacité unitaire (modèle 1 et 2). Le choix des corrélations des efficacités unitaires par les différents mécanismes a un impact significatif sur l'efficacité globale calculée par la relation 1.16. En effet, un écart est observé entre les deux modèles, ce qui augmente l'erreur associée à l'estimation de l'efficacité. La courbe obtenue présente un minimum pour les particules de diamètres autour de 300 nm. Cette zone nommée MPPS (Most Penetrating Particle Size) représente les particules les plus difficiles à collecter. Vu leur taille, elles sont trop grosses pour être collectées par diffusion et trop petites pour l'être par impaction ou interception.

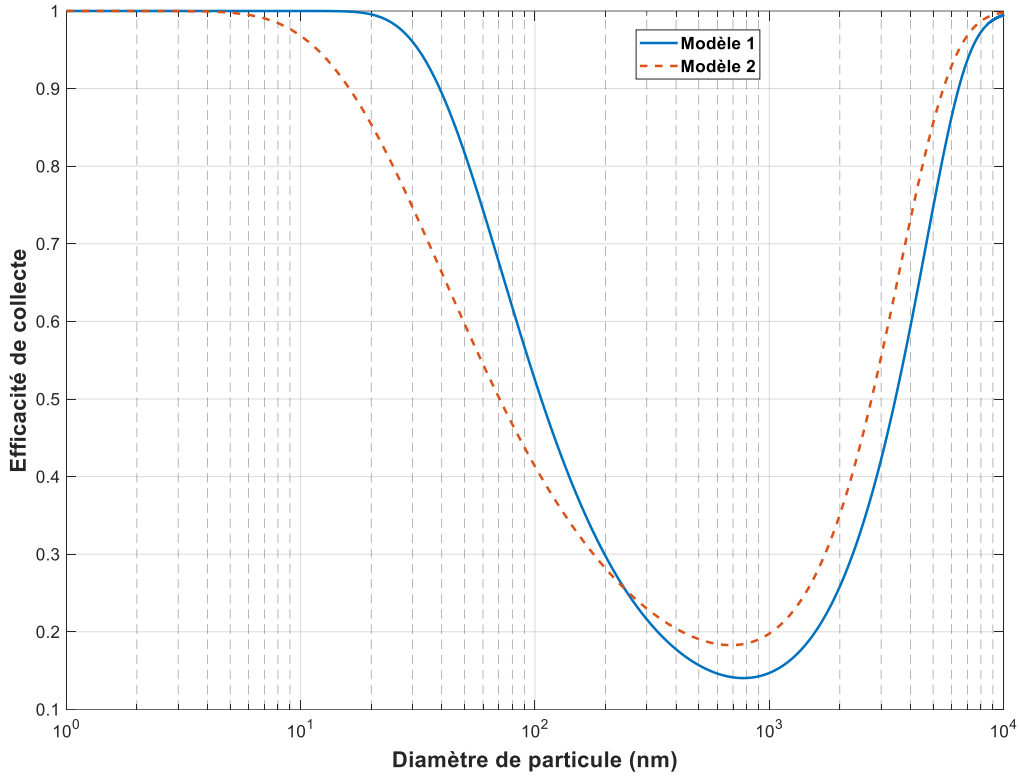


Figure 1.6 : Courbe de l'efficacité de collecte d'un filtre en fonction du diamètre de la particule en utilisant différentes associations de modèles d'efficacité unitaire (d_f = 20 µm, Z = 0,28 mm, U_G = 0,01 m.s^{-1}, α_f = 0,29).

La zone MPPS est très influencée par les conditions opératoires, surtout la vitesse du gaz. Plus la vitesse est importante plus elle est décalée vers les faibles diamètres. Lee et Liu (1980) proposent la relation suivante pour estimer le diamètre de particule pour lequel l'efficacité atteint le minimum :

$$d_p(\text{MPPS}) = 0{,}885 \left[\frac{H_{Ku}}{(1-\alpha_f)}\left(\frac{\lambda^{0,5}\, k_B\, T}{\mu_G}\right)\left(\frac{d_f^2}{U_G}\right)\right]^{\frac{2}{9}} \qquad (1.18)$$

avec d_p (MPPS) le diamètre de particule à la MPPS, H_{Ku} est le facteur hydrodynamique de Kuwabara, α_f la compacité, d_f le diamètre de fibre, λ le libre parcours moyen des molécules de gaz, k_B la constante de Boltzmann, T la température, μ_G la viscosité du gaz et U_G la vitesse superficielle du gaz.

1.2.3. Procédés de décolmatage

Au cours de la filtration, un dépôt de particules, nommé gâteau de filtration, se forme sur la surface du filtre et qui contribue à la résistance à l'écoulement. Une augmentation de la perte de charge en découle et, lorsque cette dernière atteint une valeur limite, un décolmatage du filtre est réalisé. Le but étant de détacher le gâteau de filtration et régénérer la surface de filtration. En pratique, l'opération de filtration est réalisée en des cycles de colmatage/décolmatage. Le processus de filtration est dit stable si lors de chaque décolmatage, une régénération quasi-totale de la surface de filtration est observée. Les indicateurs de stabilité sont la perte de charge enregistrée après le décolmatage, dite perte de charge résiduelle, et le temps du cycle. Dans un cas idéal (détachement total du gâteau) le temps de cycle reste inchangé et les valeurs des pertes de charge résiduelles restent constantes et proches de la perte de charge initiale. La figure 1.7 donne une représentation de l'évolution de la perte de charge durant les cycles colmatage/décolmatage.

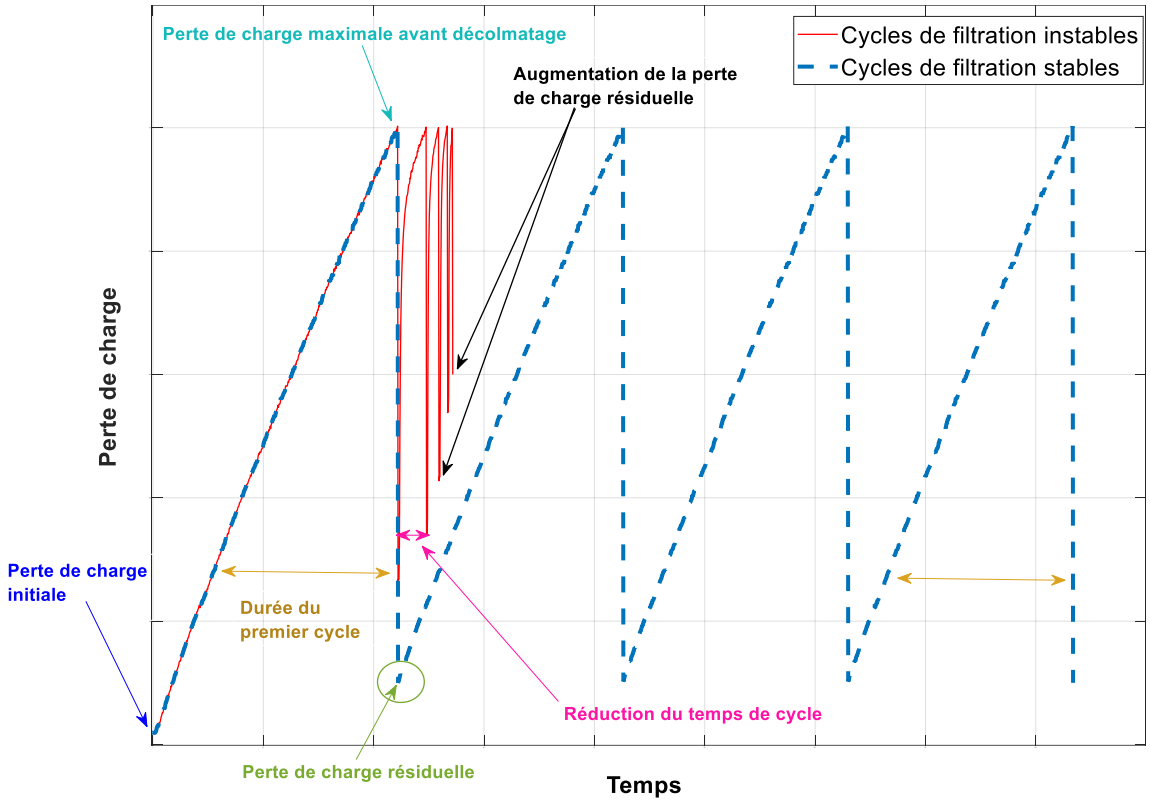


Figure 1.7 : Allures de l'évolution de la perte de charge durant les cycles colmatage/décolmatage.

Le décolmatage des filtres fibreux peut être réalisé par secouage mécanique, inversion du courant d'air ou par injection d'air comprimé (jet pulsé), la dernière méthode étant la plus employée. Le principe est d'appliquer une force supérieure à la force d'adhésion entre le gâteau de filtration et le filtre. Il existe deux modes de décolmatage :

- Décolmatage par rapport à une perte de charge maximale « Clean on demand » : le décolmatage est déclenché lorsque la perte de charge atteint une valeur limite (ΔP_{Max}).
- Décolmatage par rapport à un intervalle de temps « Clean on time » : le décolmatage est réalisé chaque intervalle de temps (Δt).

1.2.3.1. Secouage mécanique

Ce procédé consiste à faire vibrer l'élément filtrant, l'accélération résultante du média permettra de détacher le gâteau de filtration. Cette méthode est employée pour les filtres à manches, souvent en offline (c.-à-d. arrêt de filtration). Le décolmatage par vibrations est caractérisé par la fréquence de secouage, l'amplitude et le nombre de secouages. 200 secouages, une amplitude comprise entre 0 et 5,08 cm et une fréquence comprise entre 4 et 8 Hz résulte en un optimum en termes de nettoyage, sans toutefois atteindre une efficacité de nettoyage supérieure à 50%. La durée du secouage est entre 15 à 30 s (Wang et al., 2004; Cao et Orrù, 2014). En plus de son efficacité limitée, ce processus est moins utilisé car il entraine des problèmes d'étanchéité du filtre du fait des efforts mécaniques violents exercés sur le média. L'accélération d'une manche filtrante causée par les vibrations est exprimée comme suit (Tien, 2012) :

$$a = 4\,\pi\,f^2\,A \qquad (1.19)$$

où a est l'accélération, f la fréquence des vibrations et A l'amplitude (déplacement).

1.2.3.2. Inversion du courant d'air

Le principe de ce procédé consiste à injecter un courant gazeux dans le sens opposé de la filtration afin de détacher le gâteau formé. Ce système est peu efficace mais il est moins violent, et donc les filtres auront une longue durée de vie. La vitesse de nettoyage utilisée est souvent proche de la vitesse de filtration, appliquée en offline (c'est-à-dire arrêt de la filtration) (Liu et al., 2000).

Sievert et Löffler (1987) ont observé, lors de l'utilisation de cette méthode, que l'efficacité de nettoyage augmente avec l'augmentation de la masse déposée. En effet, pour de faibles masses déposées, des plaques dans le gâteau vont se former à travers lesquels l'air peut passer préférentiellement. Un débit plus important est donc nécessaire pour les gâteaux de faible épaisseur. Dans l'étude, les masses des gâteaux étaient entre 50 et 1000 $g.m^{-2}$ et la vitesse d'air entre 0 et 0,25 $m.s^{-1}$. Les auteurs ont aussi mis en évidence une meilleure efficacité de nettoyage des filtres avec une couche PTFE et ceux qui ont une grande flexibilité. Clift et Seville (1993) ont aussi rapporté que lorsque la masse déposée est importante le décolmatage est meilleur (figure 1.8). Les auteurs ont observé que l'effet de la masse déposée n'est pas significatif pour les gâteaux de masses importantes qui dépassent 500 $g.m^{-2}$. Le décolmatage par plaques a été attribué à une distribution non uniforme des forces d'adhésion et de cohésion.

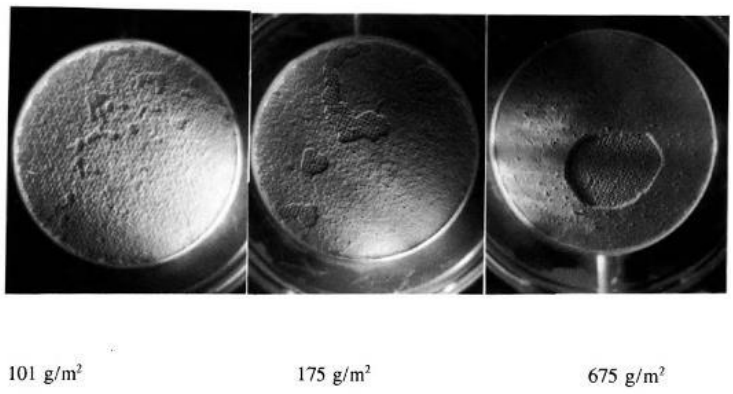


Figure 1.8 : Effet de la masse déposée sur l'efficacité de décolmatage par inversion de courant (Clift et Seville, 1993).

1.2.3.3. Jet pulsé

Le décolmatage est effectué par un coup d'air comprimé (jusqu'à 7 bars), réalisé en online ou offline. Ne pas devoir interrompre la filtration constitue un réel avantage et fait que cette méthode est très utilisée industriellement. L'efficacité de décolmatage par jet pulsé est associée à de nombreux paramètres opératoires : pression de l'air comprimé, la forme et la taille de la buse d'injection, la distance entre la buse et le filtre, le temps d'injection, le média utilisé et la nature de la poussière. Lors de l'étude de décolmatage des manches filtrantes, Dennis et al. (1981) ont trouvé que le détachement du gâteau est dû à l'accélération du média filtrant suite au choc de l'air pulsé. L'accélération maximale du média, a_{max}, a été exprimée comme suit :

$$a_{max} = \frac{G_f}{\sqrt{Me\,W}} \frac{d(\Delta P)}{dt} \qquad (1.20)$$

avec G_f le module de flexibilité du média, Me le module d'élasticité, W la masse surfacique du (média + gâteau de filtration), et $d(\Delta P)/dt$ la variation de pression lors du décolmatage.

Cette expression permet de prendre en considération la flexibilité, l'élasticité et la variation de la perte de charge sur l'efficacité de décolmatage. La force de séparation augmente lorsque le filtre est flexible et rigide. Une variation importante de la perte de charge favorise la séparation, cette variation doit dépasser 2,5 bar.s^{-1}. Sievert et Löffler (1987) ont ainsi trouvé que l'efficacité de décolmatage est d'autant meilleure que la masse déposée est importante.

Perry et Green (1989) donnent la corrélation suivante pour estimer la distance optimale, $D_{B\text{-}M}^{Opt}$, entre la buse d'injection et l'ouverture d'une manche filtrante :

$$D_{B-M}^{Opt} = \frac{D_M - d_B}{2\ tg\left(\frac{\psi}{2}\right)} \quad (1.21)$$

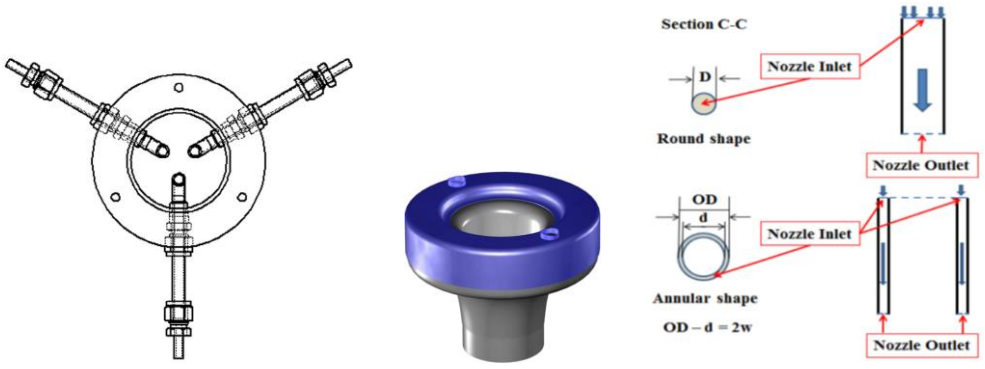
avec D_M le diamètre de la manche, d_B le diamètre de la buse et ψ l'angle du jet d'air comprimé.

Une relation proposée par Qian et al. (2014) permet de calculer la distance optimale entre la buse et une cartouche plissée :

$$D_{B-C}^{Opt} = \left(\frac{D - d_B}{2}\right) \tan\left(\frac{22{,}43 - 0{,}87\ d_B + 0{,}11 d_B^2}{2}\right) \quad (1.22)$$

où D_{B-C}^{Opt} est la distance optimale entre la buse et l'ouverture de la cartouche (mm), D le diamètre de la cartouche (mm), d_B le diamètre de la buse (mm).

La forme de la buse d'injection a fait l'objet de plusieurs recherches. Hau et Leung (2016) ont développé une tri-buse qui permet d'assurer une distribution uniforme du jet sur toute la surface du filtre. Les résultats ont montré que l'augmentation de la durée d'ouverture (0,1, 0,3 et 0,5 s) et la pression d'air comprimé (3, 4 et 5 bar) favorisent le décolmatage. Shim et al. (2017) ont étudié l'utilisation d'une buse avec double ouverture qui a donné de bonnes performances avec réduction de la pression de l'air comprimé. Finalement, une buse de forme annulaire a été étudié par Chen et Chen (2017). Les résultats ont montré une amélioration de la distribution du jet à l'intérieur de l'élément filtrant. La figure 1.9 montre les différentes formes des buses développées.



(a) **(b)** **(c)**

Figure 1.9 : Formes de buses d'injection ((a) : Hau and Leung, 2016; (b) : Shim et al., 2017; (c) : Chen and Chen, 2017).

Une évaluation expérimentale de l'efficacité de décolmatage par jet-pulsé des cartouches plissées a été réalisée par Li et al., (2015). 3 différents diamètres de buses ont été utilisés : 25, 28 et 30 mm et la distance entre la buse et la cartouche était de 0,2 m. Les pressions de l'air comprimé utilisées sont 3, 4, 5 et 6 bar et le temps d'ouverture était de 0,1 s. Un meilleur décolmatage a été favorisé par l'augmentation du diamètre de la buse et la pression du réservoir. Les auteurs ont ainsi évalué l'effet de la vitesse de filtration (1, 1,3 et 1,6 cm.s^{-1}). Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse de

filtration engendre une augmentation de la résistance du gâteau de filtration et une augmentation de la masse résiduelle après décolmatage. Les auteurs ont développé des corrélations entre la masse résiduelle et la valeur de la pression maximale à l'intérieur de la cartouche (P_{Max}^{int}) lors de l'injection de l'air comprimé, données par le tableau 1.7.

Tableau 1.7 : Corrélations pour prévoir la masse résiduelle après décolmatage en fonction de la pression maximale à l'intérieur de la cartouche (Li et al., 2015).

Vitesse de filtration ($cm.s^{-1}$)	Corrélation
1	$M_{résiduelle} = 1{,}0715 \exp(-0{,}0004\ P_{Max}^{int})$
1,33	$M_{résiduelle} = 1{,}4043 \exp(-0{,}0005\ P_{Max}^{int})$
1,67	$M_{résiduelle} = 1{,}5476 \exp(-0{,}0005\ P_{Max}^{int})$

Plusieurs auteurs ont essayé de décrire l'évolution de la perte de charge au cours des cycles colmatage/décolmatage. Les modèles développés font le lien entre la perte de charge après régénération et les conditions de décolmatage. Billings (1974) propose la corrélation suivante pour décrire la perte de charge résiduelle, ΔP_r, après le décolmatage par jet pulsé d'un filtre à manches :

$$\Delta P_r = a_1 + a_2 C^{a_3}\ P^{-a_4}\ N^{-a_5} \tag{1.23}$$

où C est la concentration en poussière, P la pression de l'air comprimé, N le nombre de pulses et les coefficients a_i sont des coefficients de régression.

Une relation empirique similaire a été proposée par Leith et First (1977):

$$\Delta P_r = b_1\ \Delta W^{b_2}\ P^{-b_3}\ U^{b_4} \tag{1.24}$$

avec ΔW la masse déposée par unité de surface, P la pression de l'air comprimé, U la vitesse superficielle du gaz et les coefficients b_i sont des coefficients de régression.

Laminger et al. (2017) ont développé un modèle pour estimer la perte de charge résiduelle au cours des cycles de décolmatage par jet pulsé. La perte de charge résiduelle, ΔP_r, pour un cycle de filtration numéro N est donnée par :

$$\Delta P_r(N) = \Delta P_{Max} - j_0 \frac{Q^2\ (N+1)^{j_1}}{((N+1-N_x)^2+j_2)^2} \tag{1.25}$$

où ΔP_{Max} est la perte de charge maximale, Q le débit d'air, N le numéro du cycle de filtration, N_x est le numéro de cycle de filtration pour lequel on passe de la filtration en profondeur au décolmatage par plaques, j_2 et j_1 sont des coefficients de régression et j_0 est une constante spécifique au procédé donnée par :

$$j_0 = \frac{\mu_G\ k_2\ C\ t_1}{A_0^2} \tag{1.26}$$

avec μ_G la viscosité du gaz, k_2 la résistance spécifique du gâteau de filtration, C la concentration en poussière, t_1 la durée du premier cycle de filtration et A_0 est la surface filtrante. Une étude expérimentale a été menée par les mêmes auteurs pour valider le modèle, sachant que le modèle dépend de trois coefficients de régression (j_1, j_2 et N_x). Ces coefficients sont dépendant de la pression de l'air comprimé et du temps d'ouverture (tableau 1.8).

Tableau 1.8 : Valeurs des coefficients du modèle de Laminger et al. (2017) en fonction de la pression de l'air comprimé et le temps d'ouverture.

Variables	**Constantes**				
Pression de l'air comprimé/ temps d'injection	t_1	j_1	j_0	N_x	j_2
1 bar / 150 ms	728	2,82	$9,8\ 10^{13}$	5	$3,0\ 10^{6}$
2 bar / 60 ms	711	2,56	$1,1\ 10^{14}$	5	$2,9\ 10^{6}$
2 bar / 100 ms	670	1,53	$1,1\ 10^{14}$	5	$2,6\ 10^{6}$
2 bar / 150 ms	652	1,34	$1,0\ 10^{14}$	5	$2,5\ 10^{6}$
3 bar / 60 ms	660	1,42	$3,1\ 10^{6}$	2	$6,0\ 10^{2}$
3 bar / 100 ms	609	0,96	$1,1\ 10^{14}$	5	$2,4\ 10^{6}$
3 bar / 150 ms	515	0,68	$1,9\ 10^{12}$	50	$3,3\ 10^{5}$
4 bar / 60 ms	584	0,82	$1,1\ 10^{14}$	5	$2,6\ 10^{6}$
4 bar / 100 ms	574	0,60	$1,0\ 10^{13}$	50	$7,8\ 10^{5}$
4 bar / 150 ms	502	0,52	$3,7\ 10^{13}$	50	$1,7\ 10^{6}$
5 bar / 60 ms	496	0,53	$2,5\ 10^{12}$	5	$4,2\ 10^{5}$
5 bar / 100 ms	568	0,50	$1,8\ 10^{14}$	50	$3,7\ 10^{6}$
5 bar / 150 ms	464	0,47	$1,1\ 10^{14}$	50	$2,9\ 10^{6}$
6 bar / 60 ms	521	0,54	$5,7\ 10^{11}$	50	$2,1\ 10^{5}$
6 bar / 100 ms	593	0,46	$5,2\ 10^{14}$	50	$5,9\ 10^{6}$
6 bar / 150 ms	591	0,44	$8,7\ 10^{14}$	50	$8,2\ 10^{6}$

On peut remarquer à travers les modèles donnés par les équations 1.23, 1.24 et 1.25 la difficulté de décrire les performances de décolmatage. En effet, ces modèles sont purement empiriques et ne se basent pas sur des éléments théoriques, et donc restent limités aux conditions opératoires étudiées. Cependant, ils permettent d'identifier les paramètres qui ont une influence sur l'efficacité de décolmatage par jet pulsé comme la masse déposée, la vitesse de filtration et la pression de l'air de décolmatage. A noter que pour les systèmes de décolmatage par jet pulsé l'emplacement et la forme de la buse d'injection semblent être des critères très importants pour optimiser la régénération des filtres.

La revue bibliographique de ce chapitre a permis de présenter le contexte de l'étude. Les risques posés par les émissions des procédés métallurgiques sur la santé humaine et l'environnement justifient la nécessité d'assurer le bon fonctionnement des systèmes de filtration industriels. La régénération des filtres fibreux reste un sujet d'intérêt, et peut conduire à des problèmes de maintenance et de sécurité. Pour cela, le travail expérimental de cette étude, présenté à travers les prochains chapitres, a pour but d'enrichir les connaissances sur l'optimisation des performances de décolmatage.

Références

Agranovski, I., 2010. Aerosols - Science and Technology. Wiley. https://doi.org/10.1002/9783527630134

Allen, M.D., Raabe, O.G., 1985. Slip correction measurements of spherical solid aerosol particles in an improved millikan apparatus. Aerosol Sci. Technol. 4, 269–286. https://doi.org/10.1080/02786828508959055

Allen, M.D., Raabe, O.G., 1982. Re-evaluation of millikan's oil drop data for the motion of small particles in air. J. Aerosol Sci. 13, 537–547. https://doi.org/10.1016/0021-8502(82)90019-2

Antonini, J.M., Santamaria, A.B., Jenkins, N.T., Albini, E., Lucchini, R., 2006. Fate of manganese associated with the inhalation of welding fumes: Potential neurological effects. Neurotoxicology 27, 304–310. https://doi.org/10.1016/j.neuro.2005.09.001

Bakri, S.F.Z., Hariri, A., Ismail, M., 2019. Metal fumes toxicity and its association with lung health problems among welders in automotive industry. J. Phys. Conf. Ser. 1150. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1150/1/012001

Bémer, D., Morele, Y., Régnier, R., 2015. Filtration of ultrafine metallic particles in industry. Environ. Technol. (United Kingdom) 36, 2374–2380. https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1028471

Bémer, D., Régnier, R., Subra, I., Sutter, B., Lecler, M.T., Morele, Y., 2010. Ultrafine particles emitted by flame and electric arc guns for thermal spraying of metals. Ann. Occup. Hyg. 54, 607–614. https://doi.org/10.1093/annhyg/meq052

Billings, C.., 1974. Aerosol Filtration Technology for Source Emission Control. AIChE Symp. Ser. 70, 341–350.

Boldridge, D., Kamiti, M., Remsen, E.E., 2020. Avoiding the Spherical Particle Assumption: Fractal Particle Density, Size, and Structure Characterization through Combined Sedimentation and Viscometry Measurements. Anal. Chem. 92, 15034–15041. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c02983

Brown, R.., 1993. Air Filtration. Pergamon.

Buckley, R.L., Loyalka, S.K., 1989. Cunningham correction factor and accommodation coefficient: Interpretation of Millikan's data. J. Aerosol Sci. 20, 347–349. https://doi.org/10.1016/0021-8502(89)90009-8

Cao, G., Orrù, R. (Eds.), 2014. Current Environmental Issues and Challenges. Springer Netherlands, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8777-2

Charvet, A., Bau, S., Bémer, D., Thomas, D., 2015. On the importance of density in ELPI data post-treatment. Aerosol Sci. Technol. 49, 1263–1270. https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1117568

Charvet, A., Bau, S., Paez Coy, N.E., Bémer, D., Thomas, D., 2014. Characterizing the effective density and primary particle diameter of airborne nanoparticles produced by spark discharge using mobility and mass measurements (tandem DMA/APM). J. Nanoparticle Res. 16. https://doi.org/10.1007/s11051-014-2418-y

Chen, S., Chen, D.R., 2017. Annular-slit nozzles for reverse flow cleaning of pleated filter cartridges. Sep. Purif. Technol. 177, 182–191. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.050

Chen, Z., Han, S., Zheng, P., Zhou, D., Zhou, S., Jia, G., 2020. Effect of oral exposure to titanium dioxide nanoparticles on lipid metabolism in Sprague-Dawley rats. Nanoscale 12, 5973–5986. https://doi.org/10.1039/C9NR10947A

Cho, H., Youn, J.-S., Oh, I., Jung, Y.-W., Jeon, K.-J., 2020. A new air-washing method to clean fabric filters clogged with submicron fume particles: A pilot-scale study. J. Hazard. Mater. 383, 121186. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121186

Clift, R., Seville, J.P.K., 1993. Gas Cleaning at High Temperatures, Springer. Springer Netherlands, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2172-9

Couture, L., Zitoun, R., 2000. Statistical Thermodynamics and Properties of Matter. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780367807795

Danzi, E., Marmo, L., 2019. Dust explosion risk in metal workings. J. Loss Prev. Process Ind. 61, 195–205. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.06.005

Davies, C.N., 1973. Air Filtration. Academic Press.

Dennis, R., Wilder, J.E., Harmon, D.L., 1981. Predicting pressure loss for pulse jet filters. J. Air Pollut. Control Assoc. 31, 987–992. https://doi.org/10.1080/00022470.1981.10465316

Drummond, J.E., Tahir, M.., 1984. Laminar viscous flow through regular arrays of parallel solid cylinders. Int. J. Multiph. Flow 10, 515–540. https://doi.org/10.1016/0301-9322(84)90079-X

Ennan, A.A., Kiro, S.A., Oprya, M. V., Vishnyakov, V.I., 2013. Particle size distribution of welding fume and its dependency on conditions of shielded metal arc welding. J. Aerosol Sci. 64, 103–110. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2013.06.006

Falcone, L.M., Erdely, A., Kodali, V., Salmen, R., Battelli, L.A., Dodd, T., McKinney, W., Stone, S., Donlin, M., Leonard, H.D., Cumpston, J.L., Cumpston, J.B., Andrews, R.N., Kashon, M.L., Antonini, J.M., Zeidler-Erdely, P.C., 2018. Inhalation of iron-abundant gas metal arc welding-mild steel fume promotes lung tumors in mice. Toxicology 409, 24–32. https://doi.org/10.1016/j.tox.2018.07.007

Forrest, S.R., Witten, T.A., 1979. Long-range correlations in smoke-particle aggregates. J. Phys. A. Math. Gen. 12, 109–117.

Friedlander, S.K., 1967. Biochemical and Biological Engineering. Academic Press, London.

Gougeon, R., 1994. Filtration des aérosols liquides par les filtres à fibres en régime d'interception et d'inertie. Université Paris XII.

Guha, N., Loomis, D., Guyton, K.Z., Grosse, Y., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Vilahur, N., Muller, K., Straif, K., 2017. Carcinogenicity of welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide. Lancet Oncol. 581–582. https://doi.org/10.1016/S1470-2045(17)30255-3

Happel, J., 1959. Viscous flow relative to arrays of cylinders. AIChE J. 5, 174–177. https://doi.org/10.1002/aic.690050211

Hau, C.W.Y., Leung, W.W.F., 2016. Experimental investigation of backpulse and backblow cleaning of nanofiber filter loaded with nano-aerosols. Sep. Purif. Technol. 163, 30–38. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.02.041

Henry, F.S., Ariman, T., 1983. An evaluation of the kuwabara model. Part. Sci. Technol. 1, 1–20.

https://doi.org/10.1080/02726358308906350

Heyder, J., 2004. Deposition of inhaled particles in the human respiratory tract and consequences for regional targeting in respiratory drug delivery. Proc. Am. Thorac. Soc. 1, 315–320. https://doi.org/10.1513/pats.200409-046TA

Hinds, W.C., 1999. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. Wiley.

Hutchins, D.R., Harper, M.H., Felder, R.L., 1995. Slip correction measurements for solid spherical particles by modulated dynamic light scattering. Aerosol Sci. Technol. 22, 202–218. https://doi.org/10.1080/02786829408959741

Jackson, G.W., James, D.F., 1986. The permeability of fibrous porous media. Can. J. Chem. Eng. 64, 364–374. https://doi.org/10.1002/cjce.5450640302

Kim, J.H., Mulholland, G.W., Kukuck, S.R., Pui, D.Y.H., 2005. Slip correction measurements of certified PSL nanoparticles using a nanometer differential mobility analyzer (Nano-DMA) for knudsen number from 0.5 to 83. J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 110, 31–54. https://doi.org/10.6028/jres.110.005

Kohyama, N., Shinohara, Y., 2006. Characteristics of Welding Fumes: (1) Ultrafine Particles of Manganese Oxide. J. Toyo Univ. Nat. Sci. 50, 57–67.

Kuwabara, S., 1959. The Forces experienced by Randomly Distributed Parallel Circular Cylinders or Spheres in a Viscous Flow at Small Reynolds Numbers. J. Phys. Soc. Japan 14, 527–532. https://doi.org/10.1143/JPSJ.14.527

Laminger, T., Stecher, M., Mauschitz, G., Höflinger, W., 2017. Modeling the pressure drop behavior of cleanable dust filters during pressure-controlled operation. Sep. Sci. Technol. 52, 2786–2792. https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1331244

Landahl, H.D., Herrmann, R.G., 1949. Sampling of liquid aerosols by wires, cylinders, and slides, and the efficiency of impaction of the droplets. J. Colloid Sci. 4, 103–136. https://doi.org/10.1016/0095-8522(49)90038-0

Lee, K.W., Liu, B.Y.H., 1982. Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters. Aerosol Sci. Technol. 1, 147–161. https://doi.org/10.1080/02786828208958584

Lee, K.W., Liu, B.Y.H., 1980. On the Minimum Efficiency and the Most Penetrating Particle Size for Fibrous Filters. J. Air Pollut. Control Assoc. 30, 377–381. https://doi.org/10.1080/00022470.1980.10464592

Leith, D., First, M.., 1977. Pressure Drop in a Pulse-Jet Fabric Filter. Filtr. Sep. 14, 473–474.

Li, Q., Zhang, M., Qian, Y., Geng, F., Song, J., Chen, H., 2015. The relationship between peak pressure and residual dust of a pulse-jet cartridge filter. Powder Technol. 283, 302–307. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.038

Liu, B.Y.., Rubow, K.., 1990. Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter medias, in: 5th World Filtration Congress. Nice, FRANCE, pp. 112–119.

Liu, D.H.F., Lipták, B.G., Bouis, P.A. (Eds.), 2000. Air Pollution. CRC Press.

Liu, P., Liu, Z., Chu, M., Tang, J., Gao, L., Yan, R., 2021. Green and efficient utilization of stainless

steel dust by direct reduction and self-pulverization. J. Hazard. Mater. 413, 125403. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125403

Lundgren, D.A., Whitby, K.T., 1965. Effect of Particle Electrostatic Charge on Filtration by Fibrous Filters. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 4, 345–349. https://doi.org/10.1021/i260016a001

Machado, J.G.M.S., Brehm, F.A., Moraes, C.A.M., Santos, C.A. dos, Vilela, A.C.F., Cunha, J.B.M. da, 2006. Chemical, physical, structural and morphological characterization of the electric arc furnace dust. J. Hazard. Mater. 136, 953–960. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.01.044

Mahana, A., Guliy, O.I., Mehta, S.K., 2021. Accumulation and cellular toxicity of engineered metallic nanoparticle in freshwater microalgae: Current status and future challenges. Ecotoxicol. Environ. Saf. 208, 111662. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111662

Michalek, I.M., Martinsen, J.I., Weiderpass, E., Hansen, J., Sparen, P., Tryggvadottir, L., Pukkala, E., 2019. Heavy metals, welding fumes, and other occupational exposures, and the risk of kidney cancer: A population-based nested case-control study in three Nordic countries. Environ. Res. 173, 117–123. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.023

Morawska, L., Buonanno, G., 2021. The physics of particle formation and deposition during breathing. Nat. Rev. Phys. 3, 300–301. https://doi.org/10.1038/s42254-021-00307-4

Mugica, I., Tucho, R., Vergniory, F., Aragon, G., Gutierrez-Canas, C., Larrion, M., 2014. Lifetime and performance of filter media challenged by ultrafine metallic aerosols: An experimental study in a 160 t steel/heat EAF meltshop. Conf. Aerosol Technol.

Muszer, A., 2004. Mineralogy characteristics of metallurgical dust in the vicinity of Glogow. Physicochem. Probl. Miner. Process. 38, 329–340.

Otani, Y., Emi, H., Mori, J., 1993. Initial Collection Efficiency of Electret Filter and Its Durability for Solid and Liquid Particles [Translated]†. KONA Powder Part. J. 11, 207–214. https://doi.org/10.14356/kona.1993023

Ouf, F.-X., 2006. Caracterisation des aérosols émis lors d'un incendie. Thèse Université de Rouen.

Ouf, X., Coursil, C., Géhin, E., Vendel, J., 2005. Comparaison de differentes methodes de determination des caracteristiques fractales d'agregats de suie, in: Congrès Français Sur Les Aérosols.

Park, K., Heo, Y., Putra, H.E., 2008. Ultrafine metal concentration in atmospheric aerosols in Urban Gwangju, Korea. Aerosol Air Qual. Res. 8, 411–422. https://doi.org/10.4209/aaqr.2008.09.0037

Peng, C., Guo, Z., Zhang, F., 2008. Discovery of potassium chloride in the sintering dust by chemical and physical characterization. ISIJ Int. 48, 1398–1403. https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.1398

Perry, R., Green, D., 1989. Perry's Chemical Engineer's Handbook, 6th editio. ed. Mc Graw-Hill Editions.

Persoons, R., Arnoux, D., Monssu, T., Culié, O., Roche, G., Duffaud, B., Chalaye, D., Maitre, A., 2014. Determinants of occupational exposure to metals by gas metal arc welding and risk management measures: A biomonitoring study. Toxicol. Lett. 231, 135–141. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.09.008

Pich, J., Emi, H., Kanaoka, C., 1987. Coulombic deposition mechanism in electret filters. J. Aerosol Sci. 18, 29–35. https://doi.org/10.1016/0021-8502(87)90006-1

Qian, Y., Bi, Y., Zhang, Q., Chen, H., 2014. The optimized relationship between jet distance and nozzle diameter of a pulse-jet cartridge filter. Powder Technol. 266, 191–195. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.004

R. A. Millikan, 1923. Coefficients of Slip in Gases and the Law of Reflection of Molecules from the Surfaces of Solids and Liquids. Phys. Rev. 21, 217.

Rader, D.J., 1990. Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases. J. Aerosol Sci. 21, 161–168. https://doi.org/10.1016/0021-8502(90)90001-E

Scharf, C., Ditze, A., 2013. Processing of agglomerated red filter dust in the converter operation from metallurgical point of view. Steel Res. Int. 84, 917–925. https://doi.org/10.1002/srin.201300126

Schraufnagel, D.E., 2020. The health effects of ultrafine particles. Exp. Mol. Med. 52, 311–317. https://doi.org/10.1038/s12276-020-0403-3

Shim, J., Joe, Y.H., Park, H.S., 2017. Influence of air injection nozzles on filter cleaning performance of pulse-jet bag filter. Powder Technol. 322, 250–257. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.09.016

Sievert, J., Löffler, F., 1987. Dust cake release from non woven fabrics. Filtr. Sep. 424–427.

Singh, V.P., 2005. Toxic Metals and Environmental Issues. Surap & Sons.

Sofilić, T., Rastovčan-Mioč, A., Cerjan-Stefanović, Š., Novosel-Radović, V., Jenko, M., 2004. Characterization of steel mill electric-arc furnace dust. J. Hazard. Mater. 109, 59–70. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.032

Soltani, P., Johari, M.S., Zarrebini, M., 2014. Effect of 3D fiber orientation on permeability of realistic fibrous porous networks. Powder Technol. 254, 44–56. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.001

State of Global Air 2020, 2020. https://www.stateofglobalair.org/

Stechkina, I.B., Fuchs, N.A., 1966. Studies on Fibrous Aerosol Filters—I. Calculation of Diffusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters. Ann. Occup. Hyg. 9, 59–64. https://doi.org/10.1093/annhyg/9.2.59

Stechkina, I.B., Kirsch, A.A., Fuchs, N.A., 1969. Studies on fibrous aerosol filters-iv calculation of aerosol deposition in model filters in the range of maximum penetration. Ann. Occup. Hyg. 12, 1–8. https://doi.org/10.1093/annhyg/12.1.1

Stubbe, G., Hillmann, C., Wolf, C., 2016. Zinc and iron recovery from filter dust by melt bath injection into an induction furnace. World Metall. - ERZMETALL 69, 161–168.

Teran, K., Žibret, G., Fanetti, M., 2020. Impact of urbanization and steel mill emissions on elemental composition of street dust and corresponding particle characterization. J. Hazard. Mater. 384, 120963. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120963

Tien, C., 2012. Principles of Filtration. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2011-0-05332-2

Wang, J., Chen, D.R., Pui, D.Y.H., 2007. Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media. J. Nanoparticle Res. 9, 109–115. https://doi.org/10.1007/s11051-006-9155-9

Wang, L.K., Pereira, N.C., Hung, Y.-T. (Eds.), 2004. Air Pollution Control Engineering. Humana Press,

Totowa, NJ. https://doi.org/10.1007/978-1-59259-778-9

Wang, C. Sen, Otani, Y., 2013. Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: A review. Ind. Eng. Chem. Res. 52, 5–17. https://doi.org/10.1021/ie300574m

Willeke, K., 1976. Temperature dependence of particle slip in a gaseous medium. J. Aerosol Sci. 7, 381–387. https://doi.org/10.1016/0021-8502(76)90024-0

Yeh, H.C., Liu, B.Y.H., 1974. Aerosol filtration by fibrous filters-II. experimental. J. Aerosol Sci. 5, 205–217. https://doi.org/10.1016/0021-8502(74)90050-0

Zeidler-Erdely, P.C., Falcone, L.M., Antonini, J.M., 2019. Influence of Welding Fume Metal Composition on Lung Toxicity and Tumor Formation in Experimental Animal Models. J. Occup. Environ. Hyg. 16, 372–377. https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1587172.040

Zhao, Y., Ma, Q., Liu, Y., He, H., 2016. Influence of sulfur in fuel on the properties of diffusion flame soot. Atmos. Environ. 142, 383–392. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.001

Chapitre 2 : Évaluation de l'efficacité de décolmatage d'un gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques

Les problèmes de régénération de filtres fibreux rencontrés sur les sites d'activités métallurgiques engendrent des coûts élevés de maintenance. Afin de développer une compréhension de cette problématique, ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale du colmatage/décolmatage de filtres plans utilisés pour la filtration des particules ultrafines métalliques. Un état de l'art sur l'adhésion des particules permettra de donner un aperçu des interactions qui interviennent dans l'adhésion et la cohésion des gâteaux de filtration. Le travail expérimental amené a pour but de quantifier l'efficacité de décolmatage par jet pulsé et d'identifier les paramètres d'influence. En particulier, le vieillissement atmosphérique du gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques est d'intérêt. En effet, des retours industriels semblent montrer une transformation du gâteau de particules suite à l'exposition à l'humidité, rendant ainsi son détachement encore plus difficile. Les résultats expérimentaux de ce chapitre permettront ensuite de proposer les solutions adéquates à cette problématique.

2.1. État de l'art sur l'adhésion des particules

La force d'adhésion du gâteau de filtration à la surface du filtre est un paramètre important pour déterminer la force nécessaire à appliquer pour le détachement de ce dernier. S'y ajoutent les forces de cohésion entre les particules au sein du gâteau, qui auront un effet sur l'efficacité de décolmatage. Les forces d'interactions entre surface-particule et particule-particule sont de trois types : forces de Van der Waals, forces capillaires et forces électrostatiques.

Les forces de Van de Waals résultent des interactions intermoléculaires causées par le mouvement aléatoire des électrons. Ce mouvement donne naissance à des dipôles, et ces moments dipolaires sont responsables de forces d'attraction. L'énergie de liaison des forces de Van der Waals est proportionnelle à « x^{-6} » où x est la distance intermoléculaire, et donc la force d'attraction diminue significativement lorsque la distance de séparation augmente. Il existe trois types d'interactions Van der Waals (Rimai et al., 1995) :

- Interaction de Keesom : type dipôle permanent-dipôle permanent qui intervient dans le cas des molécules polaires.
- Interaction de Debye : type dipôle permanent-dipôle induit, dans le cas d'une molécule polaire et une molécule apolaire polarisée par le champ électrique de la molécule polaire.
- Interaction de London : type dipôle induit-dipôle induit qui a lieu entre deux molécules apolaires.

Deux approches ont été utilisées pour le calcul de la force de type Van der Waals : une approche microscopique et une approche macroscopique (Masuda et al., 2006). L'approche microscopique est basée sur les interactions des atomes de même nature et la force d'adhésion entre deux sphères est exprimée comme suit :

$$F_{VdW} = \frac{A_H \, d_{pc}}{24 \, h^2} \tag{2.1}$$

avec A_H la constante d'Hamaker, h la distance de séparation entre les deux sphères et d_{pc} donné par l'équation 2.2 :

$$\frac{1}{d_{pc}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{d_{p1}} + \frac{1}{d_{p2}}\right) \tag{2.2}$$

où d_{p1} et d_{p2} sont les diamètres des deux sphères. Dans le cas d'une sphère et une plaque il suffit de faire tendre d_{p1} à l'infini. Pour deux matériaux 1 et 2 séparés par un milieu 3, la constante A_H s'exprime par :

$$A_H = A_{132} = A_{12} + A_{33} - A_{13} - A_{23} \quad (2.3)$$

avec $A_{ij} = \sqrt{A_{ii}\, A_{jj}}$ où A_{ii} représente la valeur de la constante pour le matériau lui-même séparé par le vide. Pour simplifier, on peut approximer la constante A comme suit :

$$A_H = A_{132} \approx \sqrt{A_{131}\ A_{232}} \quad (2.4)$$

L'approche macroscopique décrit les interactions entre deux corps séparés par un milieu. Obtenue par la résolution de l'équation de Maxwell, la constante d'Hamaker dépend de la partie imaginaire des constantes diélectriques des deux corps en interaction :

$$A_{132} = \frac{\bar{h}\,\bar{\omega}}{4\,\pi} \quad (2.5)$$

où $\bar{h} = \frac{h_p}{2\pi}$, h_p est la constante de Planck et $\bar{\omega}$ est la fréquence d'absorption du spectre. Le tableau 2.1 donne quelques valeurs de la constante d'Hamaker.

Tableau 2.1 : Quelques valeurs de la constante d'Hamaker (Mittal et Jaiswal, 2015).

Corps considérés	**A_{132} (J)**
SiO_2-vide- SiO_2	$5\ 10^{-20}$
Al_2O_3-eau-Al_2O_3	$6{,}7\ 10^{-20}$
Polymère-air-polymère	$6{,}4\ 10^{-20}$
Métal-air-Métal	$20\text{-}50\ 10^{-20}$

La rugosité de la surface de contact due à des déformations influe sur l'adhésion. Lorsque les irrégularités de la surface sont plus petites que la particule, la surface de contact devient moins importante et donc l'adhésion diminue. A l'inverse, l'adhésion est favorisée en cas de fortes irrégularités, comme le montre la figure 2.1 (Morris et al., 1987; Ranade, 1987). Ce point est particulièrement important sachant que les filtres sont souvent soumis à des traitements surfaciques comme le calandrage thermique et la déposition d'une membrane PTFE. Cirqueira et al. (2017) ont évalué le décolmatage par jet pulsé de différents filtres de polyester (sans traitement et avec calandrage thermique). Les résultats ont ainsi montré que le média sans traitement a une meilleure efficacité de régénération que celui avec calandrage thermique, mais avec une efficacité de collecte qui est inférieure.

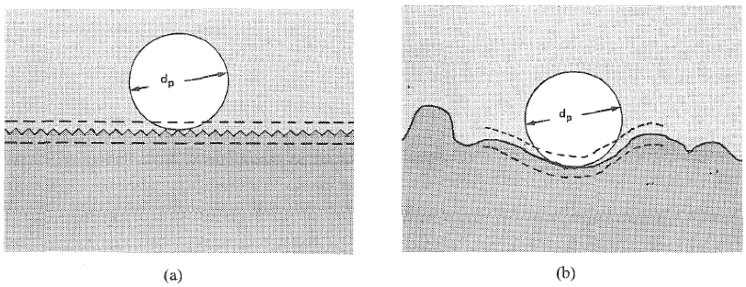


Figure 2.1 : Effet de la rugosité de la surface sur l'adhésion de la particule (Ranade, 1987).

Afin de tenir compte de la surface de contact, la force d'adhésion type Van der Waals entre une sphère et une surface déformée peut s'écrire sous la forme suivante (Morris et al., 1987) :

$$F_{VdW} = \frac{A_H\, d_p}{12\, h^2} + \frac{A_H}{6\, h^3} r^2 \quad (2.6)$$

où A_H est la constante d'Hamaker, d_p le diamètre de la sphère, h la distance de séparation et r le rayon de la surface de contact.

Lorsque l'humidité de l'air est élevée (> 60 %) les molécules d'eau peuvent se condenser aux points de contact entre particules ce qui va donner naissance à des liaisons capillaires suite à la formation d'un ménisque. La force capillaire entre une particule et une surface est exprimée comme suit :

$$F_{Ca} = 2\,\pi\, d_p\, \gamma_L \sin(\delta) \sin(\theta + \delta) + 2\,\pi\, d_p\, \gamma_L \cos(\theta) \quad (2.7)$$

où d_p est le diamètre de la particule, γ_L la tension superficielle du liquide, θ l'angle de contact entre le liquide et la surface et δ l'angle du mouillage de la moitié de la particule (figure 2.2).

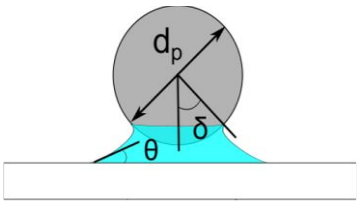


Figure 2.2 : Adhésion d'une particule sur une surface par force capillaire (Thomas et al., 2017).

L'augmentation de l'humidité favorise l'adhésion par forces capillaires. Hinds (1999) a corrélé l'élévation de la force d'adhésion d'une particule de diamètre d_p avec l'humidité relative :

$$F_{Adhésion} = 0{,}063\, d_p\big(1 + 0{,}009\, RH(\%)\big) \quad (2.8)$$

avec d_p le diamètre de la particule et RH l'humidité relative en pourcentage. Plusieurs auteurs ont également rapporté une adhésion plus importante des particules pour une humidité relative supérieure à 50% (Busnaina et Elsawy, 2000). Boudhan et al. (2019) ont observé, lors de l'étude de la filtration des nanoparticules de carbone à 150°C, une détérioration des performances de décolmatage par jet pulsé lorsque le flux gazeux contient de l'humidité. Cela a été attribué à l'augmentation des forces d'adhésion suite à la condensation capillaire de l'eau à la surface des particules.

Pour des particules et une surface qui portent des charges opposées les attractions et répulsions sont traduites par la force coulombienne donnée par :

$$F_{élect} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\, \epsilon_0\, h^2} \quad (2.9)$$

avec q_1 et q_2 les charges des deux corps en interaction, ϵ_0 la permittivité du vide et h la distance entre les deux corps.

En considérant une agglomération de particules de diamètre d_p, Rumpf (1962) a exprimé la force nécessaire pour la rupture d'un agglomérat, F_r (équation 2.10), en supposant que la rupture aura lieu si cette force est supérieure aux forces de cohésion :

$$F_r = n\, F_{Adhésion} \quad (2.10)$$

où $F_{Adhésion}$ est la force d'adhésion entre les points de contact et n est le nombre de contacts particule-particule par unité de surface donné par l'équation 2.11:

$$n = 1{,}1\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon\, d_p^2} \tag{2.11}$$

avec ε la porosité de l'agglomérat et d_p le diamètre de particule.

En considérant des forces d'adhésion de type Van der Waals et à partir de l'équation 2.10, la force de rupture peut s'écrire sous la forme suivante :

$$F_r = K\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\frac{1}{d_p} \tag{2.12}$$

où K est une constante liée au matériau qui constitue l'agglomérat. Cette dernière expression a été utilisée pour estimer la force d'adhésion d'un gâteau de filtration à la surface d'un filtre (Aguiar et Coury, 1992; Silva et al., 1999). Ceci suppose que la séparation du gâteau de filtration est due à la rupture des liaisons entre les particules et qu'une monocouche de particules reste attachée à la surface du filtre après décolmatage. De cette relation, on peut conclure que la force d'adhésion d'un gâteau de filtration diminue avec l'augmentation du diamètre des particules. Expérimentalement, l'influence de la taille des particules sur l'efficacité de décolmatage par jet pulsé a bien été rapporté. En effet, la diminution de la taille des particules est souvent associée à des difficultés de régénération, qui se traduisent par des valeurs de pertes de charge résiduelles importantes et la réduction du temps de cycle (Boudhan et al., 2018; Li et al., 2019).

Cette étude expérimentale s'intéresse à la régénération des filtres colmatés par les nanoparticules métalliques et à l'influence des différents paramètres opératoires. Ceci est d'importance car il n'existe pas de données dans la littérature sur l'adhésion des gâteaux de filtration constitués de nanoparticules. De plus, il est encore difficile de prédire l'efficacité de décolmatage à partir des caractéristiques du dépôt de particules et du filtre.

2.2. Présentation du pilote expérimental

Les expériences ont été réalisées avec un procédé de projection thermique à arc électrique. Le pilote, présenté par la figure 2.3, permet de reproduire les conditions réelles rencontrées dans l'industrie. Le pistolet (M25 Margarido®) est alimenté par des fils d'alliage Zn/Al (85/15 %) de 2 mm de diamètre, ces derniers sont fondus par arc électrique suite à l'application d'une différence de potentiel. Le métal fondu est projeté avec de l'air comprimé sous une pression de 7 bars sur un cylindre en rotation. Le pistolet effectue un mouvement vertical pour simuler l'activité de métallisation. A noter que le zinc et ses alliages sont les matériaux les plus utilisés industriellement. Les fumées générées sont aspirées avec un débit de 2000 $m^3.h^{-1}$ vers un dépoussiéreur industriel, composé d'un cyclone de diamètre de coupure de 2,4 µm et d'un dépoussiéreur à cartouches (12 cartouches plissées). Le diamètre de la canalisation principale est de 20 cm et le débit est mesuré en continu à l'aide d'un débitmètre à ultrasons. Le principe de mesure repose sur le temps de parcours d'ondes ultrasons entre deux sondes à travers le fluide en écoulement (Çengel et Cimbala, 2017).

La distribution granulométrique en nombre, donnée par la figure 2.4, a été déterminée en aval du cyclone avec un SMPS (Scaning Mobility Particle Sizer) (5.403 Grimm®) après une dilution d'un facteur 100 (VKL 100, Palas®). La distribution présente un diamètre modal, équivalent en mobilité électrique, de 80 nm. Le SMPS permet de classer les particules selon leur mobilité électrique, propriété liée à leur diamètre. Un SMPS est composé d'un analyseur différentiel de mobilité (DMA) et d'un compteur à

noyau de condensation (CNC). Le principe de fonctionnement repose sur l'application d'un champ électrique sur l'échantillon d'aérosol préalablement chargé pour classer les particules chargées selon leur mobilité électrique. Le comptage est réalisé avec un CNC, au sein duquel le diamètre des particules est augmenté par condensation d'une vapeur d'alcool ou d'eau pour qu'elles deviennent optiquement détectables (Kulkarni et al., 2011).

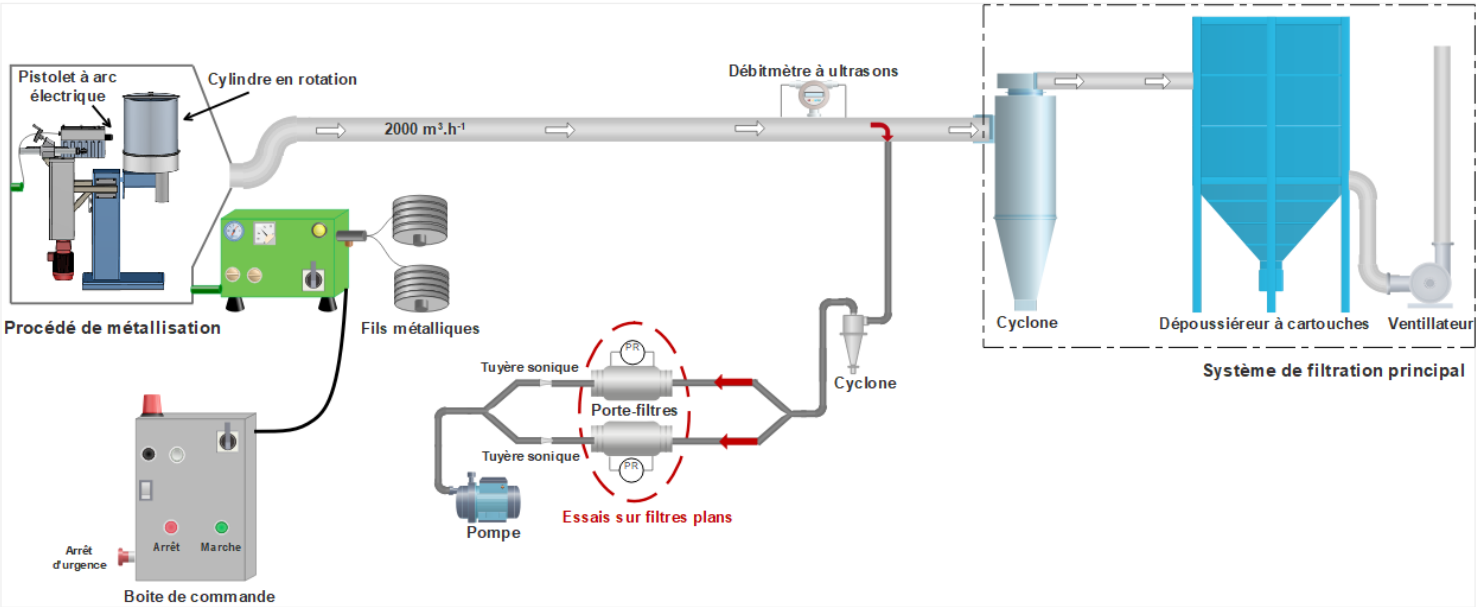


Figure 2.3 : Schéma du pilote expérimental.

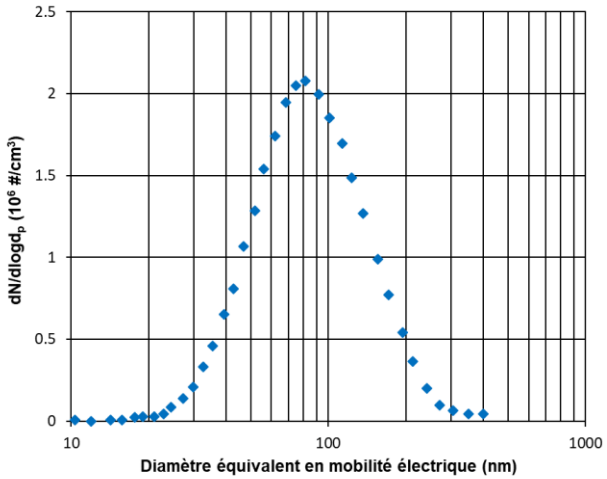


Figure 2.4 : Distribution en nombre de la taille des particules métalliques mesurée en aval du cyclone après une dilution d'un facteur 100.

L'aérosol généré par ce procédé a été caractérisé dans une étude précédente (Bémer et al., 2013). Les fumées sont composées de deux populations de particules : d'une part des particules nanostructurées formées à partir de l'agglomération de particules primaires d'environ 12 nm de diamètre et d'autre part, une fraction micronique avec un diamètre médian en masse de 9 µm, mesuré avec un DLPI (Dekati® Low Pressure Impactor). Le principe est de faire passer l'aérosol, à des vitesses différentes, à travers une série de 14 impacteurs en série. Selon leur taille, les particules s'impactent sur des plateaux d'impaction variables lorsque leur inertie est suffisante. Chaque impacteur va ainsi retenir une masse de

particule qui correspond à un diamètre aérodynamique donné. La distribution en nombre mesurée avec un ELPI (Electrical Low Pressure Impactor) a montré que 90% des particules présentent un diamètre inférieur à 100 nm. Le principe de fonctionnement de l'ELPI consiste à charger préalablement les particules, et au niveau de chaque plateau les particules chargées vont induire un courant qui permettra d'estimer le nombre de particules. La masse volumique effective des particules a été estimée de 0,6 $g.cm^{-3}$ en utilisant le diamètre modal de la distribution (Charvet et al., 2015), et la charge électrique de 10^{-3} charge élémentaire/particules. La surface spécifique des particules a été mesurée par la méthode BET (isotherme d'adsorption d'azote) et est de 78 $m^2.g^{-1}$.

Dans cette partie de l'étude, une fraction du débit d'aérosol généré est by-passée vers deux porte-filtres de 14 cm de diamètre placés en parallèle et destinés à l'évaluation du colmatage et décolmatage des médias plans. Un cyclone avec un diamètre de coupure de 2,5 µm (URG-2000-30EC®) est placé en amont des deux porte-filtres pour éliminer la fraction micronique de l'aérosol. Le débit de filtration est contrôlé par des tuyères soniques et la vitesse de filtration est fixée à 3 $cm.s^{-1}$. Des capteurs de pression différentielle (Keller®) permettent d'enregistrer l'évolution de la perte de charge des filtres durant le colmatage. Un système de décolmatage par injection d'air comprimé à contre-courant est intégré aux deux porte-filtres.

L'utilisation des tuyères soniques, appelées aussi tuyères de Laval, permet d'assurer un prélèvement à débit constant (Hinds, 1999). Cela consiste à faire passer le fluide à travers un orifice suffisamment étroit pour que la vitesse à travers ce dernier soit égale à la vitesse du son. Dans ces conditions l'écoulement est dit sonique et la densité du fluide diminue. L'avantage des tuyères soniques est que le débit prélevé n'est influencé que par la section de la tuyère, la pression en amont et la température. Pour un écoulement compressible et isentropique le débit massique $q_{m,sonique}$ à travers une tuyère sonique est exprimé comme suit (Sellier, 2001; Rathakrishnan, 2010):

$$q_{m,sonique} = S\sqrt{\frac{\gamma}{r}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)}}\frac{P}{\sqrt{T}} \tag{2.13}$$

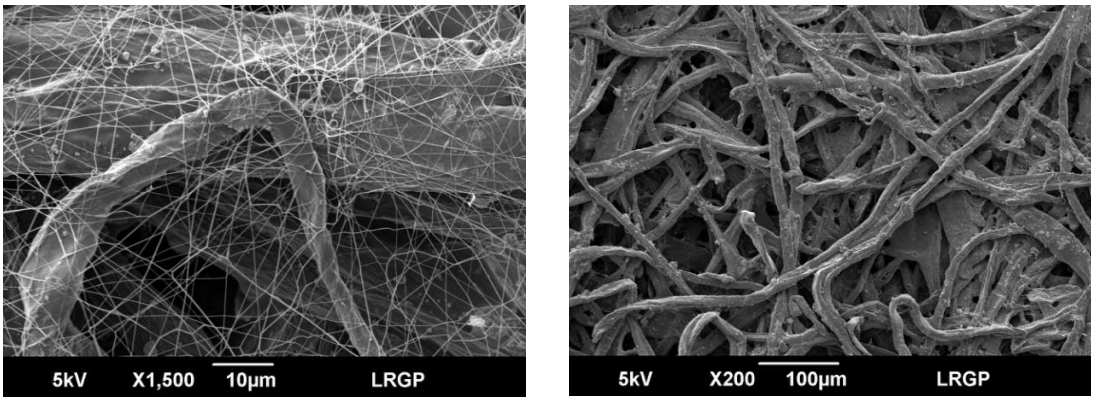
avec S la section de la tuyère, P et T la pression (Pa) et la température (K) en amont, r la constante des gaz parfaits ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) et γ le rapport des capacités thermiques du fluide (capacité thermique à pression constante/capacité thermique à volume constant).

Le filtre employé durant les expériences de filtration, très utilisé industriellement pour la filtration des poussières métallurgiques, est un média ondulé à base de cellulose avec un traitement surfacique qui consiste en une couche de nanofibres. La figure 2.5 présente des images de Microscope Électronique à Balayage (MEB) des faces amont et aval, et le tableau 2.2 regroupe les caractéristiques du média.

L'ondulation des médias (en anglais : « corrugated filters »), est une technique très utilisée pour les cartouches plissées qui présente les avantages suivants (Irwin, 2007) :

- augmentation de la surface de filtration pour un volume de cartouche donné,
- meilleure séparation entre les plis,
- formation des canaux qui assurent l'utilisation de la totalité de la surface du filtre,
- augmentation de la rigidité du filtre,
- stabilité du pli et limitation de sa déformation sous pression.

Becker et Waldenmaier (2001) ont montré qu'une cartouche avec un média ondulé présente de meilleures performances de filtration.



Face amont traitée **Face aval sans traitement**

Figure 2.5 : Images MEB des faces amont/aval du média étudié.

Tableau 2.2 : Caractéristiques du média utilisé.

Composition	Cellulose
Traitement surfacique	Couche de nanofibres
Diamètre moyen des fibres-Davies (µm)	23±1
Diamètre moyen des nanofibres (nm)	212±74
Grammage (g.m^{-2})	138±2
Épaisseur (mm)	0,28±0,02
Porosité	0,70±0,06
Perméabilité (m^2)	3,62±0,18 10^{-11}

2.3. Caractérisation du système de décolmatage par jet pulsé

Le système de décolmatage des filtres plans, présenté par la figure 2.6, est composé d'une buse d'injection et d'une électrovanne (230 V ac, RSPRO®). Cette dernière est commandée par un boitier qui permet d'injecter l'air pulsé et de régler le temps d'injection. L'ensemble est connecté au réseau d'air comprimé et un détendeur permet de fixer la pression de l'air de décolmatage. La distance entre la buse d'injection et le filtre plan est de 10 cm. Différents diamètres de buse ont été testés : 1 mm, 2 mm et 3 mm. Le temps d'ouverture de la vanne d'injection a été fixé entre 0,2 et 0,4 s. Finalement l'influence de la pression de l'air comprimé a été étudiée entre 2 et 6 bars, ce qui correspond aux valeurs utilisées industriellement.

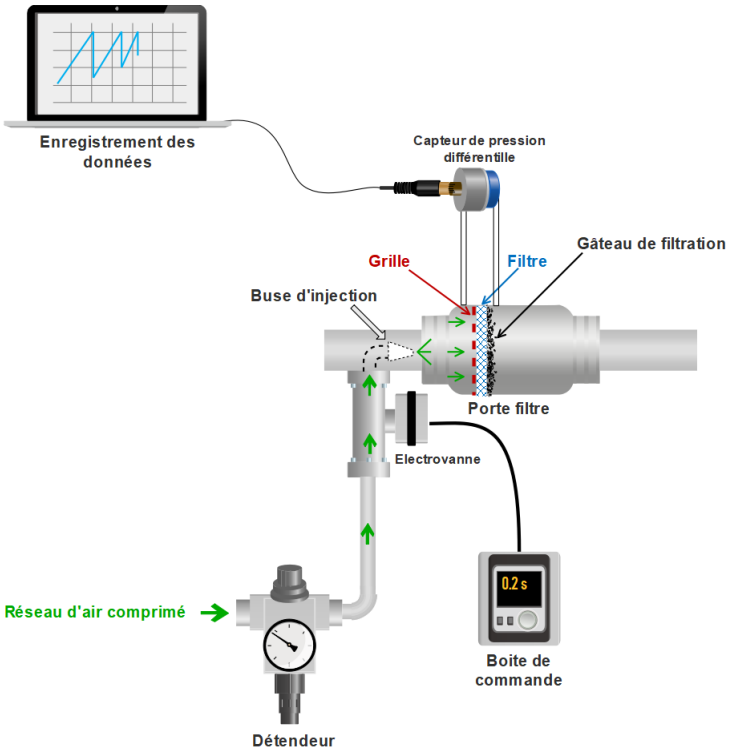


Figure 2.6 : Schéma représentatif du porte filtre avec le système de décolmatage par jet pulsé.

2.3.1. Mesure du volume d'air injecté

Le débit massique de l'air injecté (q_m) à travers la buse peut être calculé à partir de la relation suivante, en supposant l'écoulement isentropique d'un fluide parfait à travers une section (Ramnarace, 2015) :

$$q_m = S\frac{P}{\sqrt{r\,T}}\sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1}\right)\left(\frac{P_{atm}}{P}\right)^{\left(\frac{2}{\gamma}\right)}\left(1-\left(\frac{P_{atm}}{P}\right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)}\right)} \qquad (2.14)$$

où S est la section de la buse, P la pression d'air comprimé (Pa), P_{atm} la pression atmosphérique (Pa), T la température de l'air (K), r la constante des gaz parfaits ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) et γ le rapport des capacités thermiques du fluide. Le volume injecté est alors obtenu par :

$$V_{injecté} = \frac{q_m}{\rho}\,t_{ouv} \qquad (2.15)$$

avec t_{ouv} le temps d'ouverture de la buse d'injection et ρ la masse volumique de l'air.

Le volume injecté a été expérimentalement mesuré, en réalisant plusieurs injections dans un sac plastique étanche pour différentes pressions de l'air comprimé, temps d'ouverture de la vanne d'injection et diamètres de buse. Une fois rempli d'air, le sac est vidé par une pompe avec un débit de 2,16 $L.min^{-1}$ et le temps nécessaire pour vider le sac permet de calculer le volume injecté.

Conformément aux attentes, le volume d'air injecté augmente avec le diamètre de la buse d'injection, la pression de l'air comprimé et le temps d'injection (figure 2.7). Ces trois paramètres sont d'importance pour optimiser les performances des systèmes de jet pulsé. En considérant les erreurs expérimentales, la comparaison avec les valeurs calculées par la relation 2.14 est satisfaisante avec une marge d'erreur de 30%. Il faut garder à l'esprit, que de point de vue économique, il est nécessaire de limiter la

consommation de l'air comprimé, c'est-à-dire de réaliser un bon décolmatage avec une quantité minimale d'air.

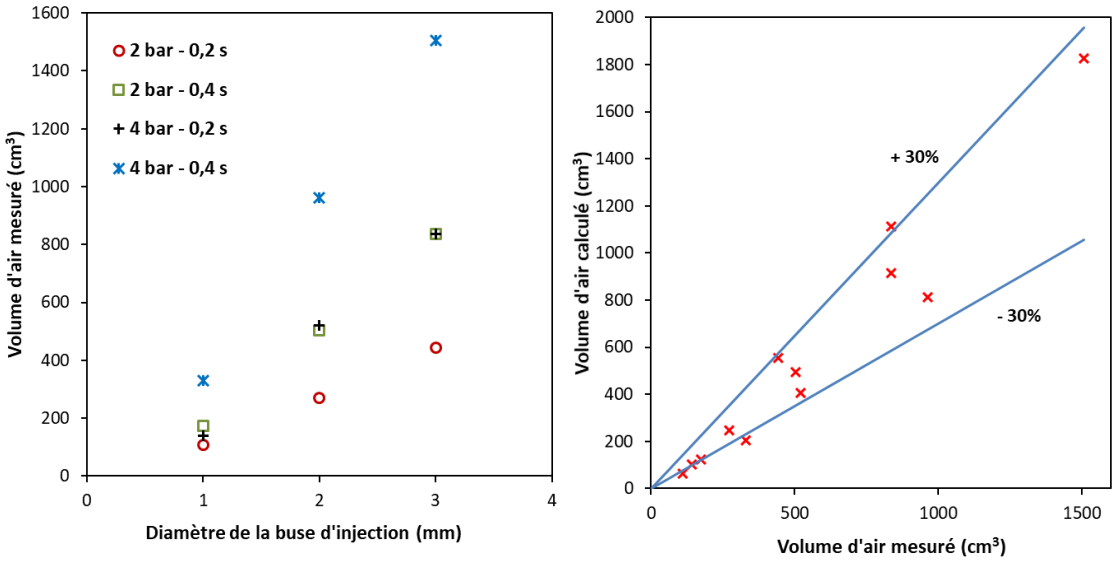


Figure 2.7 : Etude paramétrique sur la buse d'injection et comparaison des volumes d'air injecté expérimentaux et calculés.

2.3.2. Mesure de l'accélération durant le jet pulsé

Afin d'évaluer les performances du système de décolmatage étudié, une mesure de l'accélération du média et un suivi de la perte de charge lors de l'injection de l'air comprimé ont été réalisés sur filtres propres (sans gâteau de filtration). Ces deux paramètres influent sur l'efficacité de détachement d'un gâteau de filtration formé sur des manches filtrantes et il est légitime de penser qu'ils seront aussi prépondérants pour le décolmatage de filtres plans.

Un accéléromètre (352A73, PCB Piezotronics ®) a ainsi été disposé à la surface du filtre plan. Il faut noter que les résultats obtenus sont relatifs au système étudié et sont loin de représenter les systèmes industriels à cause des différences de géométrie. Ces essais permettront néanmoins d'évaluer, qualitativement, l'influence des différentes conditions opératoires.

Généralement, l'accélération des manches filtrantes varie entre 0 et 200 g (1 g = 9,81 $m.s^{-2}$) avec une variation de la perte de charge ($d\Delta P/dt$) comprise entre 0,5 et 2,5 10^5 $Pa.s^{-1}$ (Dennis et al., 1981; Simon et al., 2007). Pour une pression d'air comprimé (4 bars) et un temps d'ouverture (0,4 s) constants, la figure 2.8 montre l'effet de la taille de la buse d'injection sur l'accélération du média et la variation de la perte de charge. Le signal enregistré en absence d'excitation présente une faible amplitude probablement induite par des interférences provenant d'autres appareils présents sur le banc d'essais. Cela ne devrait pas influencer les résultats comme le but est de comparer l'effet des différents paramètres. Il peut être remarqué qu'en augmentant le diamètre de la buse d'injection de 1 mm à 3 mm l'accélération passe d'environ 20 g à 100 g avec une variation plus importante de la perte de charge. Expérimentalement, l'augmentation de la taille de la buse est souvent associée à un meilleur décolmatage (Qian et al., 2014; Li et al., 2015), mais avec une consommation d'air plus importante.

La figure 2.9 présente l'effet du temps d'ouverture pour un diamètre de buse de 3 mm et une pression de l'air comprimé de 4 bars. Il est clairement visible que l'augmentation du temps d'ouverture n'a pas d'effet sur l'accélération ni sur la variation de la perte de charge. Plusieurs auteurs dans la littérature ont fait la même observation (Schildermans et al., 2004; Lo et al., 2010). Il n'y a ainsi pas d'intérêt de

réaliser le décolmatage avec un temps d'ouverture important puisque cela conduit à une consommation plus importante d'air comprimé.

L'influence de la pression d'air comprimé en utilisant une buse de 3 mm de diamètre et un temps d'ouverture de 0,2 s est représentée par la figure 2.10. L'augmentation de la pression permet d'augmenter significativement l'accélération de 40 g (2 bars) à 150 g avec (6 bars) et d'obtenir une variation plus importante de la perte de charge. La pression de l'air de décolmatage est le paramètre qui a le plus d'effet sur les performances de décolmatage. Cependant, augmenter la pression de décolmatage engendre une consommation importante d'air comprimé, et des contraintes mécaniques plus importantes pouvant détériorer le média ou/et affecter sa tenue mécanique.

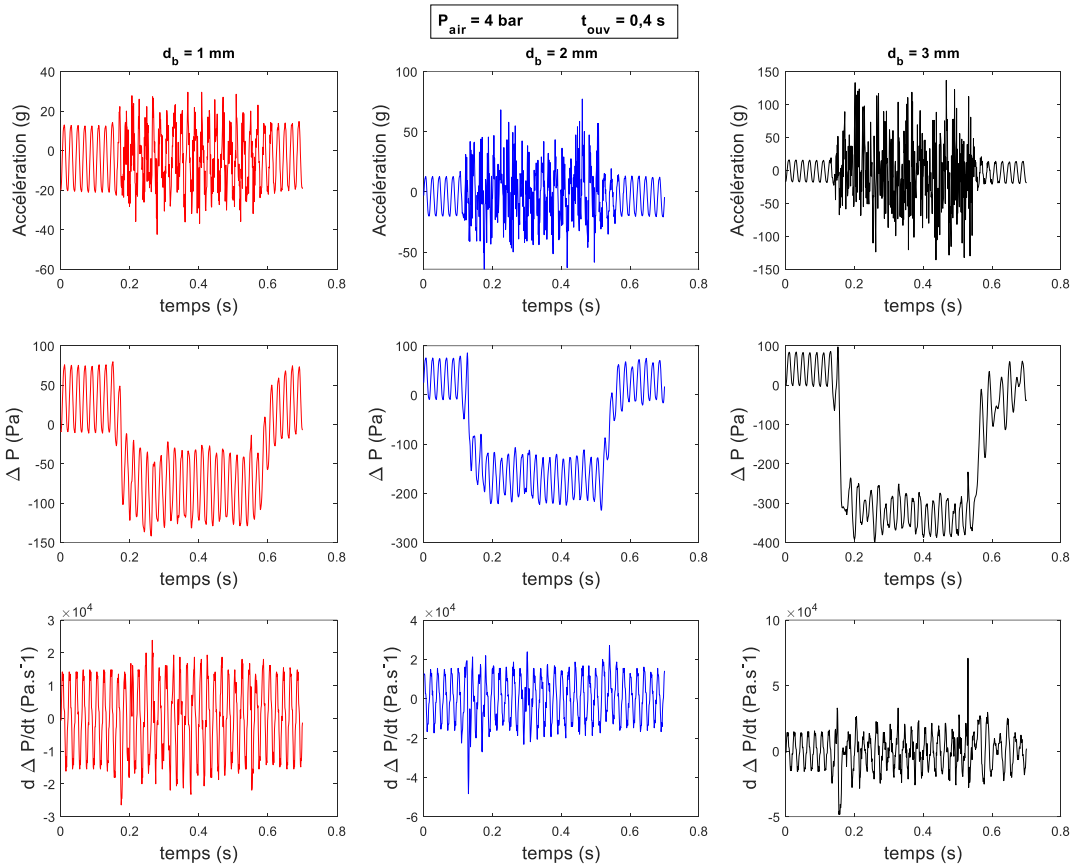


Figure 2.8 : Effet du diamètre de la buse sur le décolmatage par jet pulsé pour une pression d'air comprimé de 4 bars et un temps d'ouverture de 0,4 s pour trois diamètres de buses (1,2 et 3 mm).

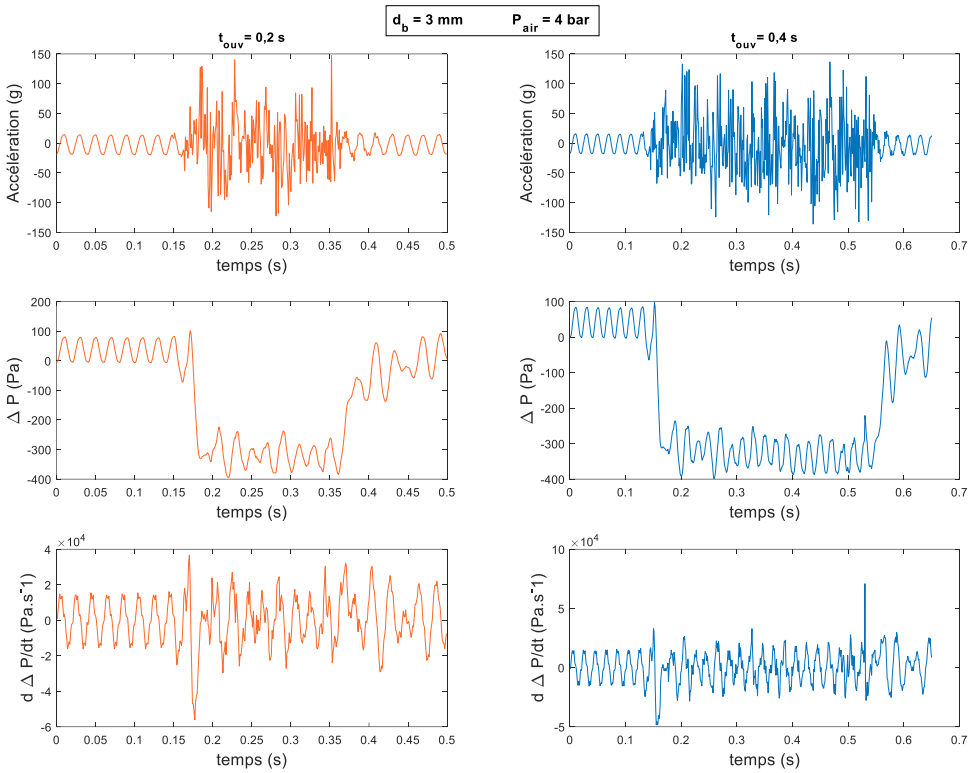


Figure 2.9 : Effet du temps d'ouverture sur le décolmatage par jet pulsé pour une buse de 3 mm de diamètre et une pression d'air comprimé de 4 bars.

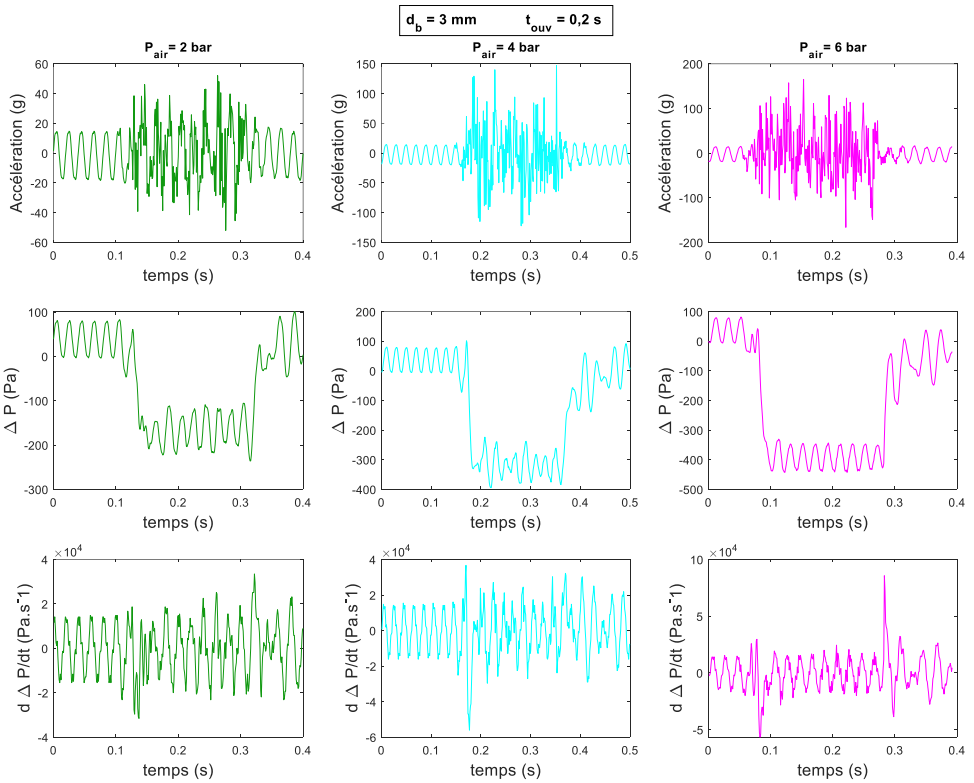


Figure 2.10 : Effet de la pression d'air comprimé sur le décolmatage par jet pulsé pour une buse de 3 mm de diamètre et un temps d'ouverture de 0,2 s.

2.4. Décolmatage d'un gâteau de filtration composé de nanoparticules métalliques

2.4.1. Perte de charge du gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques

L'évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules métalliques est quasi linéaire (figure 2.11). Généralement, le début du colmatage est caractérisé par une phase de filtration en profondeur qui donne une lente évolution de la perte de charge avant la formation du gâteau de filtration (Thomas et al., 2001). La présence de la couche de nanofibres semble avoir favorisé le colmatage de la surface et la formation d'un gâteau de filtration. Ce dépôt surfacique, composé de nanoparticules, présente une grande résistance à l'écoulement. En effet, pour une faible masse déposée de 2 $g.m^{-2}$, on a une perte de charge autour de 1000 Pa pour une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$.

Sans la phase de filtration en profondeur, la perte de charge totale, ΔP, se résume à l'addition des pertes de charge du média, ΔP_0, et du gâteau, ΔP_G :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_G \tag{2.16}$$

Pour un gâteau nanostructuré, Thomas et al. (2019) donnent la corrélation suivante pour estimer la perte de charge du gâteau :

$$\Delta P_G = 64\, F_C \frac{(1-\varepsilon)^{\frac{3}{2}}}{d_{pp}^2\, Cu_{pp}}\, \mu_G\, Z_G\, U_G \tag{2.17}$$

avec F_C un facteur de correction, compris entre 1 et 1,5, qui tient compte de la fusion partielle des particules primaires, d_{pp} le diamètre des particules primaires, Cu_{pp} le coefficient de Cunningham calculé avec le diamètre des particules primaires, μ_G la viscosité du gaz, U_G la vitesse de filtration, ε la porosité du gâteau donnée par l'équation 2.18 et Z_G l'épaisseur du gâteau calculée par la relation 2.19.

$$\varepsilon = \frac{1 + 0{,}438\ Pe}{1{,}019 + 0{,}464\ Pe} \tag{2.18}$$

Dans l'équation 2.18 le nombre de Peclet (Pe) est calculé avec le diamètre moyen de la distribution en nombre des particules.

$$Z_G = \frac{W}{\rho_p\,(1-\varepsilon)} \tag{2.19}$$

où W représente la masse déposée par unité de surface et ρ_p la masse volumique des particules.

Les résultats expérimentaux sont très bien décrits par le modèle de Thomas et al. (2019). Le modèle donne une porosité de 0,97 et une épaisseur du gâteau de l'ordre de 40 µm pour une masse déposée de 4,9 $g.m^{-2}$. La résistance spécifique du gâteau à l'écoulement est de 1,08 10^{12} $m.kg^{-1}$.

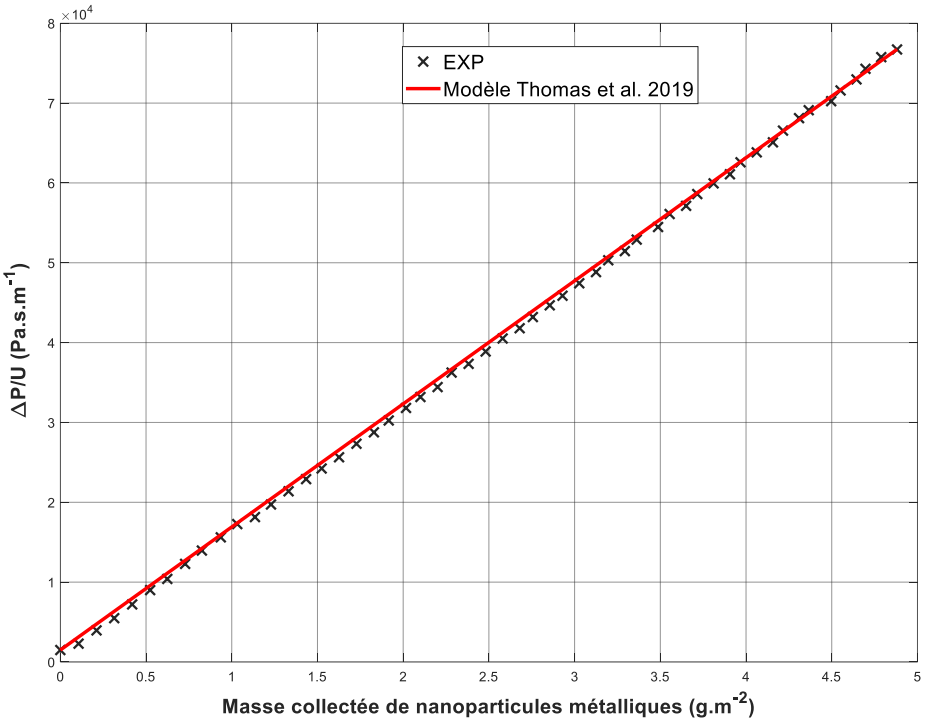


Figure 2.11 : Évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules métalliques (F_C = 1,5 (cas des agrégats) ; d_{pp} = 12 nm ; ε = 0,97 ; ρ_p = 6000 kg.m^{-3}).

2.4.2. Évaluation de l'efficacité de décolmatage

Le décolmatage par jet-pulsé a été effectué avec une buse de 3 mm de diamètre, une pression d'air comprimé de 4 bars, un nombre de pulses variable entre 1 et 10 et un temps d'ouverture de la buse d'injection de 0,2 s. Le décolmatage offline (avec arrêt de filtration) a été réalisé pour des gâteaux d'épaisseurs différentes et donc de masse variable, en fixant une valeur de la perte de charge maximale avant décolmatage pour une vitesse de filtration de 3 cm.s^{-1}. L'efficacité de décolmatage a été évaluée par rapport à différents critères.

Une première efficacité de décolmatage est évaluée par rapport à la perte de charge résiduelle R_p obtenue après le jet pulsé. Elle traduit la fraction de l'épaisseur détachée, calculée comme suit à l'aide de la loi de Darcy :

$$R_P = 1 - \frac{\text{Épaisseur du gâteau résiduel}}{\text{Épaisseur initiale du gâteau}} = \frac{\Delta P_{Max} - \Delta P_r}{\Delta P_{Max} - \Delta P_0} \qquad (2.20)$$

avec ΔP_{Max} la perte de charge maximale avant décolmatage, ΔP_r la perte de charge résiduelle (après décolmatage) et ΔP_0 la perte de charge du filtre propre.

L'efficacité de décolmatage peut également se baser sur un critère massique en évaluant la masse du gâteau détachée par pesée du filtre avant et après décolmatage :

$$R_M = \frac{\text{Masse détachée}}{\text{Masse initiale du gâteau}} \qquad (2.21)$$

L'efficacité de décolmatage peut enfin s'évaluer selon la portion de la surface décolmatée :

$$R_S = \frac{\text{Surface décolmatée}}{\text{Surface totale}} \tag{2.22}$$

Dans ce cas, la surface décolmatée est estimée par analyse d'images du filtre après le décolmatage en utilisant le logiciel « ImageJ », comme le montre la figure 2.12. Une binarisation de l'image permet de calculer la surface décolmatée. Dans cette optique, une caméra-endoscope a été intégrée dans le porte-filtre afin de faciliter la prise de photos.

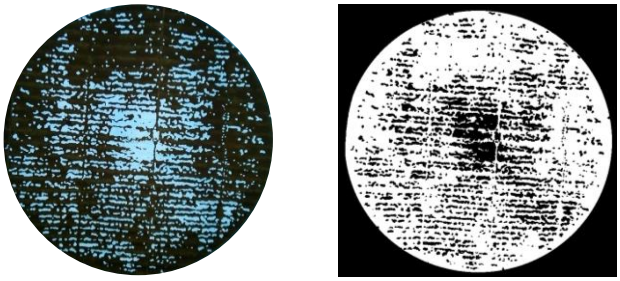


Figure 2.12 : Traitement par le logiciel ImageJ d'une image de filtre décolmaté (les zones bleues de l'image de gauche correspondent aux portions décolmatées).

L'analyse des données de décolmatage met en évidence un écart important entre l'efficacité exprimée par rapport à la perte de charge résiduelle et celles par rapport à la masse et la surface décolmatée (figure 2.13). Le cliché de microscopie (figure 2.12) montre bien que le décolmatage s'effectue par plaques et explique pourquoi les efficacités par rapport à la masse ou la surface ne dépassent pas 30% malgré la réalisation successive de 10 injections d'air comprimé. Le gâteau de filtration composé de nanoparticules métalliques est donc extrêmement adhérent à la surface du filtre. Cependant, l'efficacité de décolmatage par rapport à la perte de charge résiduelle atteint des valeurs au-delà de 80%. En effet, lorsque des portions du gâteau sont détachées l'air passe de façon préférentielle à travers ces zones de faible résistance, ce qui résulte en une chute de la perte de charge. La perte de charge résiduelle n'est donc pas un critère adéquat pour évaluer un décolmatage inefficace par plaques.

L'augmentation de la masse déposée est associée à une augmentation de l'efficacité de décolmatage. Ce phénomène a été déjà observé dans la littérature et s'explique par une augmentation des forces de cohésion au sein du gâteau, ce qui facilite son détachement (Sievert et Löffler, 1987; Clift et Seville, 1993). L'effet de la masse peut s'avérer utile pour définir une valeur optimale de la perte de charge maximale avant décolmatage. Une légère amélioration du décolmatage est également notée en augmentant le nombre de pulses de 1 à 10, mais cette solution n'est pas envisageable en industrie à cause de la consommation importante d'air comprimé.

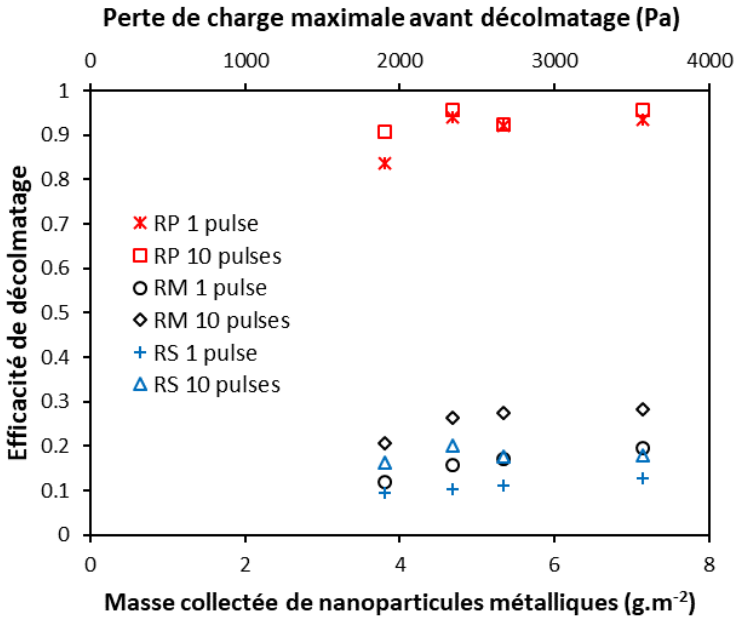


Figure 2.13 : Résultats de l'efficacité de décolmatage d'un filtre colmaté avec des nanoparticules métalliques (pression de décolmatage de 4 bars, buse de 3 mm et temps d'ouverture de 0,2 s).

2.4.3. Cycles colmatage/décolmatage

Des cycles colmatage/décolmatage ont également été réalisés sur filtre plan en effectuant le décolmatage online, c'est-à-dire sans arrêter la génération des nanoparticules métalliques durant le décolmatage. Deux valeurs de la perte de charge maximale avant décolmatage ont été utilisées : 1500 et 3000 Pa, correspondants respectivement à des masses surfaciques de l'ordre de 3 et 6 $g.m^{-2}$. L'objectif est de voir si l'augmentation de la masse déposée permettra d'avoir un processus plus stable. Le décolmatage a été réalisé avec une buse de 3 mm de diamètre, une pression de l'air comprimé de 4 bars, 1 seul pulse et un temps d'ouverture de 0,2 s. Les résultats présentés par la figure 2.14 montrent, dans les deux cas, un processus de filtration très instable, ce qui se traduit par l'augmentation progressive des pertes de charge résiduelles et la réduction des temps de cycle. Augmenter la valeur de la perte de charge maximale avant décolmatage permet de sensiblement améliorer les performances, ce qui est en accord avec les résultats d'efficacité de décolmatage (figure 2.13). L'allure de l'évolution de la perte de charge après le premier décolmatage est caractéristique d'un décolmatage partiel par plaques. En effet, l'augmentation très rapide de la perte de charge correspond à la formation d'un gâteau dans les zones préalablement décolmatées.

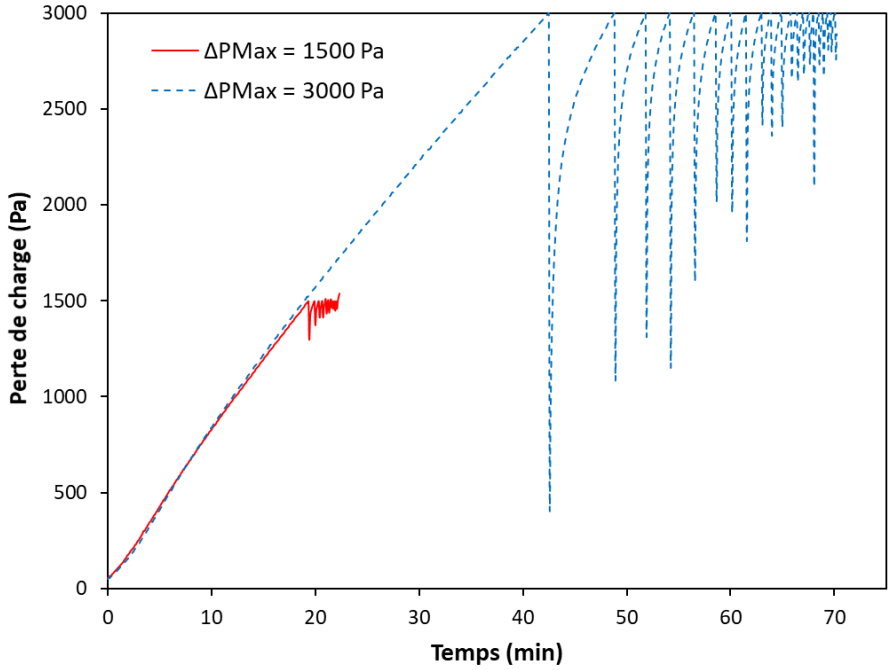


Figure 2.14 : Résultats des cycles colmatage/décolmatage réalisés online avec une buse de 3 mm de diamètre, 1 pulse, une pression de 4 bars et un temps d'ouverture de 0,2 s.

2.5. Influence du vieillissement atmosphérique

Comme énoncé précédemment, il a été rapporté que lorsqu'un gâteau de filtration composé de poussières métalliques est exposé à l'humidité, il devient plus adhérent à la surface du filtre et difficile à détacher. First et Silverman (1963) ont noté qu'un dépôt de poussière métallique tend à avoir une résistance importante à l'écoulement et est extrêmement adhérent. Ils ont également rapporté que le vieillissement du gâteau de filtration, pendant un certain temps, est une pratique commune pour rendre le détachement plus facile. Les raisons avancées par les auteurs sont l'agglomération des particules, l'adsorption de l'humidité ou la décharge électrique des particules. Cependant, aucune précision sur les conditions opératoires n'a été donnée.

L'exposition de gâteaux de filtration à l'humidité est une thématique qui a déjà été abordée par diverses équipes de recherche et il en ressort que l'influence de l'humidité de l'air dépend essentiellement de l'affinité des particules aux molécules d'eau. Par conséquent, deux situations peuvent être distinguées en fonction de l'hygroscopicité des particules (Kim et al., 2006; Horst et al., 2019) :

- Les particules hygroscopiques ont la capacité d'absorber l'humidité de l'air à partir d'une certaine humidité relative appelée point de déliquescence (DRH). Au-delà de ce point, la particule est dissoute dans le volume d'eau absorbé et forme une gouttelette. Si l'humidité diminue, l'eau s'évapore jusqu'à un taux d'humidité pour lequel le soluté se cristallise, ce point est appelé efflorescence (ERH).
- Les particules non hygroscopiques n'ont pas d'affinité avec l'eau. Cependant, pour des humidités relatives supérieures à 80% la formation de ponts liquides par condensation entre les particules peut apparaitre et accroitre les forces de cohésion entre particules.

Montgomery et al. (2015) ont fait passer de l'air humide sur des gâteaux formés sous des faibles taux d'humidité. Pour des particules hygroscopiques (NaCl) et pour des humidités inférieures au point de déliquescence, une diminution de la perte de charge a été observée. Au-delà du point de déliquescence, les particules passent en phase liquide, ce qui conduit à une augmentation de la perte de charge, similaire

à celle observée pour des aérosols liquides (Joubert et al., 2010). Pour des particules non hygroscopiques (Al_2O_3) aucune variation n'a été enregistrée. Les auteurs ont observé que l'effet de l'humidité sur les particules hygroscopiques était irréversible à cause d'une restructuration du dépôt. Ces résultats impliquent que l'exposition à l'humidité peut modifier le comportement et la structure du gâteau de filtration. Ribeyre et al. (2017) ont étudié l'influence de l'humidité sur la perte de charge de gâteaux de nanoparticules non hygroscopiques (zinc-aluminium, carbone et silice). Pour des taux d'humidité supérieurs à 85% le rapport entre la perte de charge mesurée sous air humide et la perte de charge sous air sec peut atteindre 1,4. Les auteurs ont mis en évidence que l'adsorption de l'eau et les ponts liquides entre particules formés par condensation étaient responsables de la modification de la structure du gâteau.

Durant nos expériences, le vieillissement atmosphérique d'un gâteau de filtration composé de nanoparticules métalliques (particules non hygroscopiques) sous 70% d'humidité pendant 15 jours à 15±5°C a été accompagné par un changement de couleur comme le montre la figure 2.15. Ce changement de couleur indique une transformation du dépôt, qui va sans doute affecter sa structure et son adhésion à la surface du filtre.

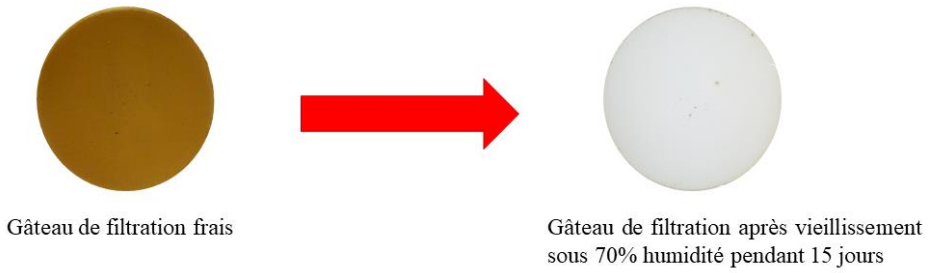


Figure 2.15 : Changement de couleur du gâteau de filtration après vieillissement sous 70% humidité pendant 15 jours à 15±5°C.

2.5.1. Évolution de la résistance du gâteau de filtration durant le vieillissement

Afin d'évaluer l'effet du vieillissement sous atmosphère humide sur la résistance du gâteau de filtration, des filtres en PVC (GLA 5000, Pall®) de diamètre 47 mm ont été colmatés avec les nanoparticules métalliques (Zn/Al). Ces filtres ont été choisis à cause de leur efficacité élevée pour favoriser la filtration en surface (formation d'un dépôt). Tout changement de résistance enregistré sera donc lié à la modification du dépôt. La masse déposée, déterminée par pesée, était de 5±0,6 $g.m^{-2}$. Les filtres colmatés ont ensuite été stockés dans leurs porte-filtres (pour éviter toute manipulation du filtre et fissure du gâteau) dans différentes conditions : sous air sec et sous air humide (avec une humidité relative de 77%, 65% et 30%). L'humidité a été contrôlée en utilisant des solutions saturées en sel (Young, 1967). Cette méthode est basée sur l'équilibre de la pression de vapeur de l'eau entre la phase gaz et la solution saturée dans une enceinte fermée. La pression de vapeur de l'eau est inférieure à celle obtenue avec de l'eau pure à cause de l'attraction des molécules d'eau par les ions de sel dans la solution. Les expériences ont été menées sous une température de 15±2°C. Une solution saturée est placée dans la partie inférieure d'un dessiccateur et un capteur humidité/température est placé à l'intérieur pour suivre l'humidité dans l'enceinte. Le porte filtre a été placé au-dessus de la solution comme le montre la figure 2.16. Une solution saturée de NaCl permet d'avoir une humidité de 77% et une solution saturée de NaBr permet d'atteindre une humidité relative de 65%. Une atmosphère sèche est obtenue en remplaçant la solution saline par du silica gel (adsorbant). Un vieillissement sous 30% d'humidité a été réalisé en stockant le porte-filtre dans le laboratoire.

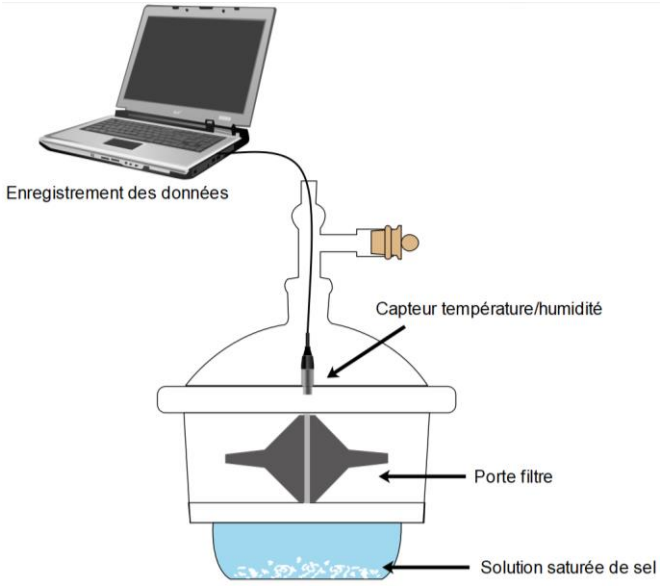


Figure 2.16 : Schéma du montage utilisé pour le conditionnement des gâteaux de filtration.

Une mesure de la perte de charge en fonction de la vitesse de l'air est effectuée à différents temps de stockage pour déterminer la résistance du gâteau en utilisant la loi de Darcy :

$$\Delta P = R_f \mu_G U_G + R_G \mu_G U_G \qquad (2.23)$$

où ΔP est la perte de charge mesurée, μ_G la viscosité de l'air, U_G la vitesse de perméation, R_f la résistance du filtre et R_G la résistance du gâteau. Des expériences menées sur filtres propres ont permis de s'assurer au préalable que la résistance du filtre reste constante quelles que soient la durée et les conditions de stockage. Pour une masse déposée de 5±0,6 $g.m^{-2}$, la résistance initiale du gâteau frais était de R_{G0}= 6,7 10^9 m^{-1}. Les perméations ont été effectuées avec 8 différentes vitesses d'air entre 0,9 et 5 $cm.s^{-1}$. La résistance du gâteau, R_G, est déterminée à partir de la pente du tracé (ΔP- ΔP_f) = f(U), avec ΔP_f la perte de charge du filtre propre.

L'évolution du rapport entre la résistance du gâteau R_G et la résistance initiale du gâteau frais R_{G0} au cours du temps sous différentes conditions de stockage est donnée par la figure 2.17. L'expérience a été réalisée sur une durée de 22 jours. Pour tous les cas étudiés, une diminution du rapport de résistance est notée durant les premières heures. L'arrêt de l'écoulement et le démontage du porte-filtre pour le stockage, peuvent induire des changements de structure du gâteau à l'origine de ce phénomène. Pour un taux d'humidité de 30% et sous air sec, aucune variation significative de la résistance n'a été enregistrée au cours du vieillissement. Durant la période de stockage étudiée, la résistance reste constante, ce qui indique une stabilité de la structure du gâteau. Le vieillissement sous une humidité de 65% est associé à une chute marquée de la résistance, qui devient plus rapide en augmentant l'humidité relative à 77%. A noter que la résistance du gâteau est une fonction de la porosité, du diamètre des particules, de la masse déposée et de la densité des particules (voir équation 2.17). Une transformation du gâteau semble donc s'être produite suite à l'exposition à l'humidité. A la fin du stockage (après 22 jours), le balayage des gâteaux par de l'air sec n'a pas eu de conséquences sur les résistances, signifiant une transformation irréversible du gâteau. Ces résultats mettent donc en évidence une modification du gâteau en présence d'humidité mais ils ne renseignent pas sur la nature de la transformation (physique ou chimique).

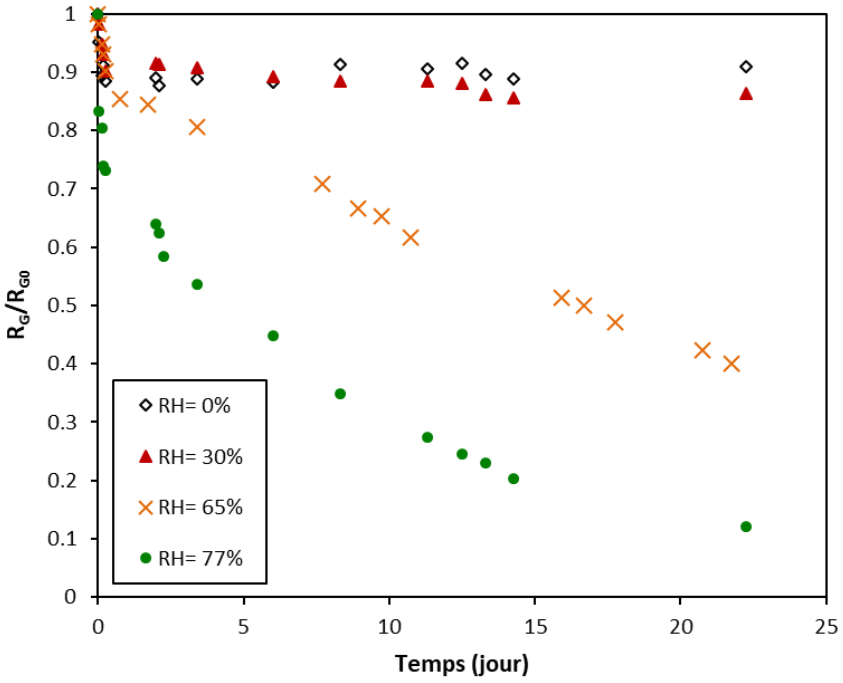
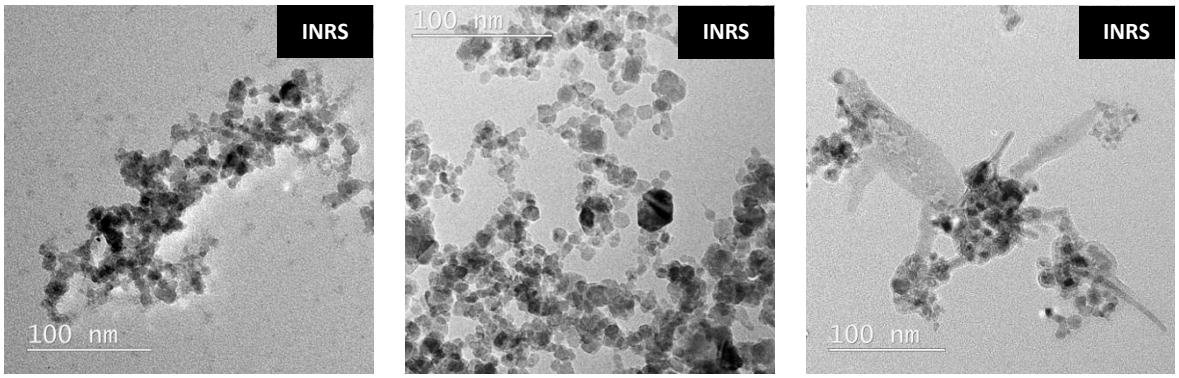


Figure 2.17 : Cinétique d'évolution de la résistance du gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques durant le vieillissement sous différentes conditions d'humidité à 15±2°C.

2.5.2. Caractérisation physico-chimique

Des images de Microscope Électronique à Transmission (MET) (JSM-2100 F, Jeol®) ont été réalisées sur un gâteau de filtration frais constitué de nanoparticules métalliques, un gâteau soumis à 30 jours de vieillissement sous air sec et un gâteau après vieillissement sous 70% d'humidité pendant 1 mois. Ce vieillissement a été réalisé sous une température de 15±5°C. La figure 2.18 présentent les différents clichés.

Aucune différence majeure de morphologie n'est observée entre les agglomérats métalliques frais (figure 2.18.a) et ceux vieillis sous air sec (figure 2.18.b). Cela confirme les résultats de la cinétique où aucun changement de résistance n'avait été mis en évidence. En présence d'humidité il est clairement visible qu'une nouvelle phase cristalline est formée. Les aiguilles observées peuvent indiquer une transformation chimique. Le changement de la morphologie et du diamètre des particules aura ainsi un effet direct sur la porosité et la structure du gâteau. Ces observations peuvent donc expliquer le changement de résistance mesuré après vieillissement sous air humide.



(a) **(b)** **(c)**

Figure 2.18 : Images MET d'un gâteau frais (a) d'un gâteau après vieillissement sous air sec pendant 1 mois (15±5°C) (b) et d'un gâteau après vieillissement sous air humide (RH= 70%; 15±5°C) pendant 1 mois (c).

Une caractérisation chimique des gâteaux de filtration après vieillissement par diffraction des rayons X (DRX) (Empyrea, Panalytical®) a montré la présence de différentes espèces chimiques. Pour rappel, les nanoparticules sont issues de la métallisation de fils d'alliage Zn/Al (85%/15%) :

- Gâteau stocké sous air sec : Zincite (ZnO); Zinc ; Aluminium
- Gâteau stocké sous air humide : Zincite (ZnO); Zinc ; Hydrozincite ($Zn_5(CO_3)_2(OH)_6$); Aluminium

Ainsi, en présence d'humidité une nouvelle phase minérale, l'hydrozincite, s'est formée. L'hydrocarbonate de zinc est un produit classique de la corrosion atmosphérique du zinc qui se forme en présence d'eau et de CO_2 (Graedel, 1989; Almeida et al., 2000). Il est caractérisé par une couleur blanche, tel qu'observé durant nos expériences (figure 2.15). Le mécanisme de formation de l'hydrozincite est donné par les réactions suivantes :

$$Zn\ (s) \rightarrow Zn^{2+}\ (aq) + 2\ e^- \qquad (2.24)$$

$$O_2\ (g) + 2\ H_2O\ (l) + 4\ e^- \rightarrow 4\ OH^-\ (aq) \qquad (2.25)$$

$$H_2O\ (l) + CO_2\ (g) \rightleftarrows CO_3^{2-}\ (aq) + 2\ H^+\ (aq) \qquad (2.26)$$

$$2\ Zn\ (s) + O_2\ (g) + 2\ H_2O\ (l) \rightarrow 2\ Zn(OH)_2\ (s) \qquad (2.27)$$

$$Zn(OH)_2\ (s) + 4\ Zn^{2+}\ (aq) + 4\ OH^-\ (aq) + 2\ CO_3^{2-}\ (aq) \rightarrow Zn_5(CO_3)_2(OH)_6\ (s) \qquad (2.28)$$

A des taux d'humidité élevés, une couche d'eau s'adsorbe à la surface des particules métalliques et va faciliter la formation de cations métalliques, d'hydroxydes et d'ions de carbonate qui vont former l'hydrozincite. Il faut noter que la présence d'autres contaminants dans l'air comme les sulfures et les chlorures, qui peuvent être présents dans les milieux industriels, peut conduire à la formation d'autres produits (Falk et al., 1998). L'oxyde de zinc, détecté dans l'analyse DRX, provient de l'oxydation du métal durant la projection thermique (température de l'arc de 6000 °C) et de l'exposition à l'oxygène atmosphérique.

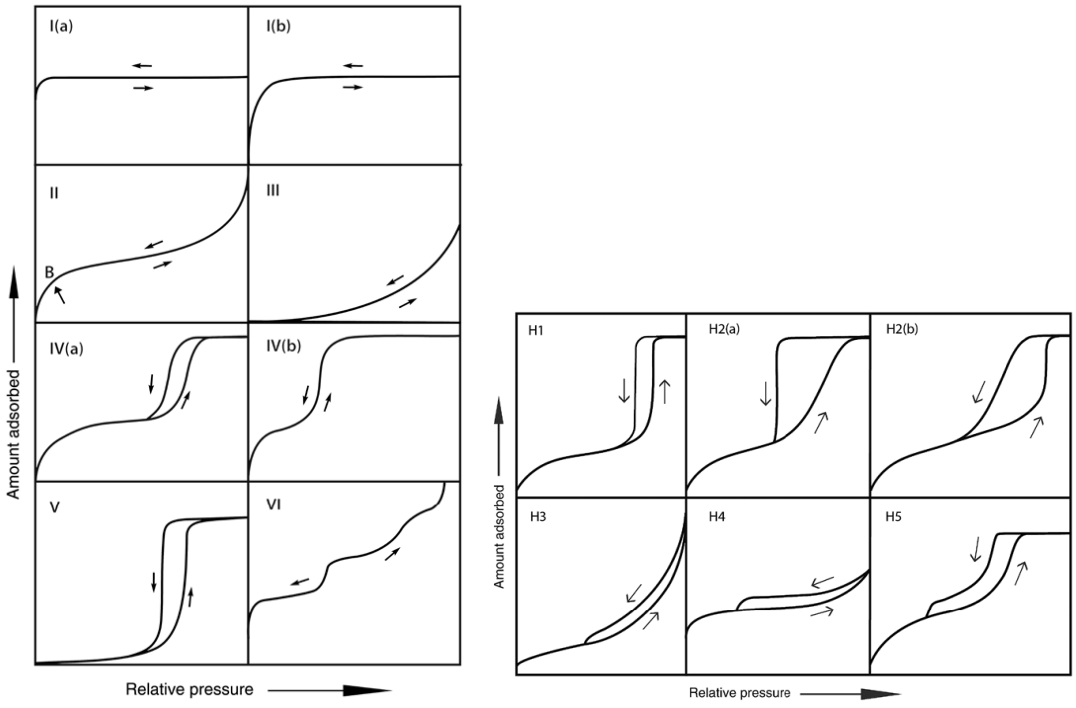
Gankanda et al. (2016) ont étudié le vieillissement atmosphérique des nanoparticules d'oxyde de zinc (ZnO). Ils ont trouvé que l'hydrozincite se forme sous l'action du CO_2 atmosphérique et de l'humidité selon le mécanisme décrit précédemment. En effet, en présence d'eau la formation des cations métalliques et des hydroxydes est favorisée. Leurs observations par microscopie de l'hydrozincite ont montré une phase cristalline sous forme d'aiguilles, similaire à nos résultats (figure 2.18.c). La réaction chimique justifie l'irréversibilité de la transformation du gâteau de filtration.

2.5.3. Mesure d'isotherme d'adsorption de l'eau des particules métalliques

Des mesures d'isotherme d'adsorption de l'eau sur trois échantillons de particules métalliques, de différents diamètres, ont été réalisées. Le but est de comparer la capacité d'adsorption d'eau en fonction de la taille des particules et donc leur réactivité, tenant compte des résultats de la section précédente. Les échantillons étudiés sont :

- Particules microniques de zinc récupérées dans la trémie du petit cyclone (cf. figure 2.3) suite à la métallisation de fils de zinc pur,
- Nanoparticules de zinc récupérées en grattant un filtre PVC colmaté,
- Particules microniques métalliques oxydées récupérées dans la trémie du grand cyclone (cf. figure 2.3) qui ont subi un vieillissement atmosphérique pendant une durée inconnue.

Une isotherme d'adsorption de la vapeur d'eau consiste à mesurer la quantité d'eau adsorbée en fonction de la pression partielle d'eau pour une température constante. La désorption, obtenue en baissant la pression partielle d'eau, peut ne pas suivre le chemin de l'adsorption, c'est le phénomène d'hystérésis. La forme de l'isotherme nous renseigne sur la structure poreuse de l'adsorbant (solide) et sur les interactions entre adsorbant-adsorbat. (Thommes et al., 2015; Brunauer et al., 1940). Les formes des isothermes et des hystérésis, selon la classification de l'IUPAC, sont données par la figure 2.19.



(a) **(b)**

Figure 2.19 : Types des isothermes d'adsorption des gaz (a) et des hystérésis (b) selon l'IUPAC (Thommes et al., 2015).

Les résultats des isothermes d'adsorption de l'eau à 20°C sont donnés par la figure 2.20. Il est remarqué que la quantité d'eau adsorbée par les nanoparticules est plus importante que pour les particules microniques de par leur surface spécifique nettement plus importante. Tenant compte du mécanisme de formation de l'hydrozincite (équations 2.24 à 2.28), on peut supposer qu'un gâteau de filtration constitué de nanoparticules est ainsi susceptible de se transformer plus rapidement qu'un gâteau composé de particules microniques. A partir des allures obtenues on peut tirer les remarques suivantes :

- Particules microniques de zinc : isotherme de type III avec un hystérésis H1. Ce type d'isotherme est observé lorsque le solide a une faible porosité et les interactions entre adsorbant et adsorbat sont faibles. Des clusters d'eau peuvent se former sur certains sites préférentiels de la surface du solide. La forme de l'hystérésis concerne les solides avec des méso-pores étroits.
- Nanoparticules de zinc : isotherme de type III avec un hystérésis H3. Ce type d'allure est observé lorsque le solide est composé d'agglomérats de particules, ce qui est exactement le cas de l'échantillon testé (voir figure 2.18.a).
- Particules microniques métalliques oxydées : isotherme de type II avec un hystérésis H4. Une telle isotherme est observée en cas de physisorption sur des solides de faible porosité. L'allure de l'hystérésis caractérise les agrégats de cristaux avec des micros et méso-pores. Dans ce cas, les cristaux peuvent être le produit du vieillissement atmosphérique des particules métalliques comme observé sur la figure 2.18.c.

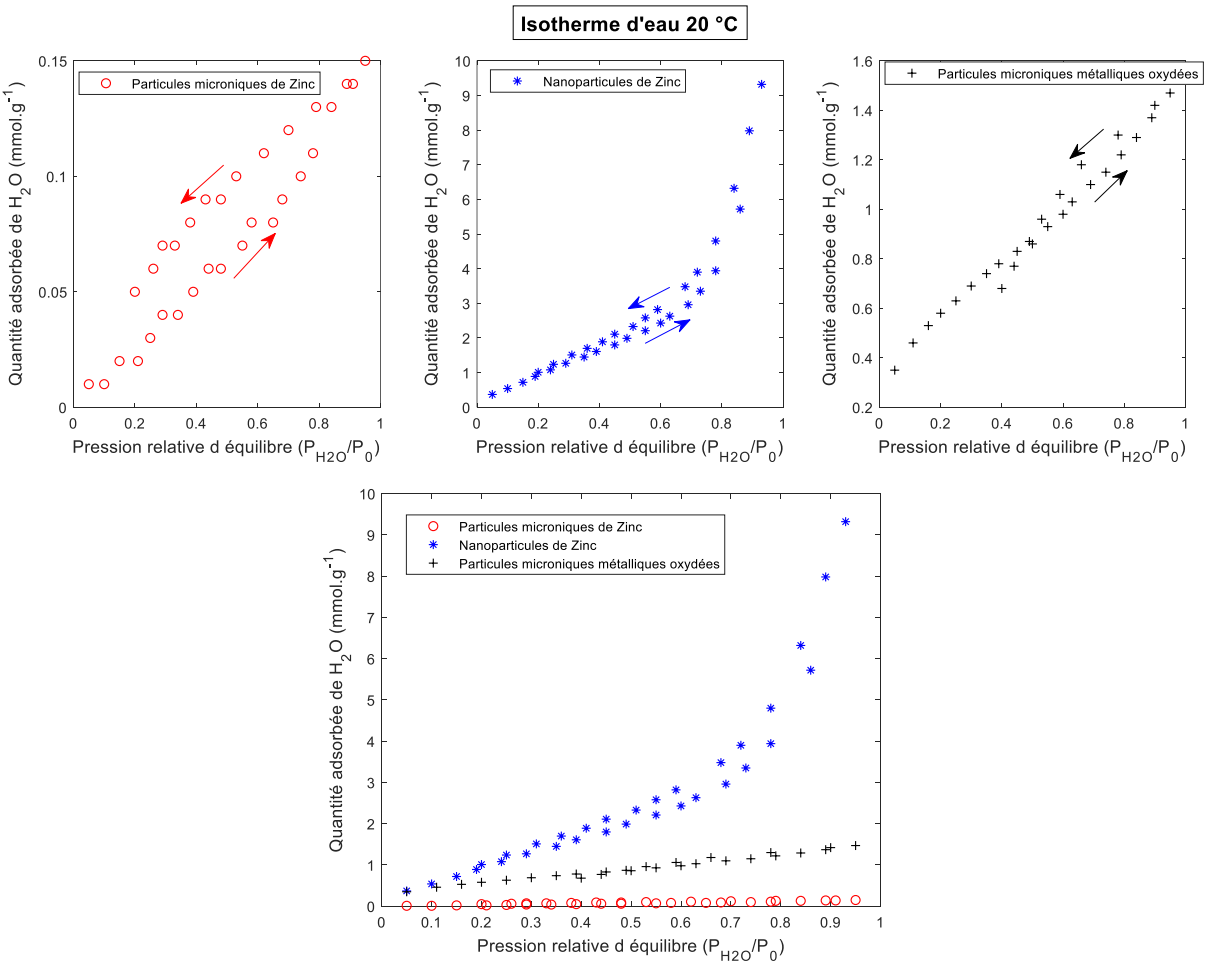


Figure 2.20 : Résultats d'isotherme d'adsorption de l'eau à 20°C des différentes particules métalliques à base de zinc.

2.5.4. Effet du vieillissement sur l'adhésion du gâteau de filtration

Les expériences précédentes ont mis en évidence une transformation chimique du gâteau de filtration suite à l'exposition à l'humidité, on peut s'interroger sur les conséquences en termes d'adhésion du gâteau de filtration à la surface du filtre. Pour cela, une méthode de mesure de la force d'adhésion des gâteaux de filtration par inversion de courant a été utilisée. Cette technique est très employée dans la littérature et donne une estimation acceptable de la force d'adhésion (Seville et al., 1989; Coury et Aguiar, 1995; Silva et al., 1999; Tanabe et al., 2011; Li et al., 2019a; Xie et al., 2020). Elle consiste à faire s'écouler de l'air à différentes vitesses à travers le gâteau de filtration dans le sens contraire de la filtration tout en enregistrant la perte de charge. Pour les faibles vitesses, la perte de charge enregistrée correspond à la résistance du filtre et du gâteau. En augmentant la vitesse de l'air et lorsque cette dernière atteint une valeur critique, une partie du gâteau se détache, comme le montre la figures 2.21. Au point critique la perte de charge mesurée correspond ainsi à la force nécessaire à appliquer pour vaincre la force d'adhésion, soit :

$$\Delta P_C = R_f \, \mu_G \, U_{air} + \left(\frac{F_{Adhésion}}{\Omega}\right) \tag{2.29}$$

avec ΔP_C la perte de charge au point critique, R_f la résistance du filtre, μ_G la viscosité de l'air, U_{air} la vitesse de l'air, $F_{Adhésion}$ la force d'adhésion et Ω la section du filtre.

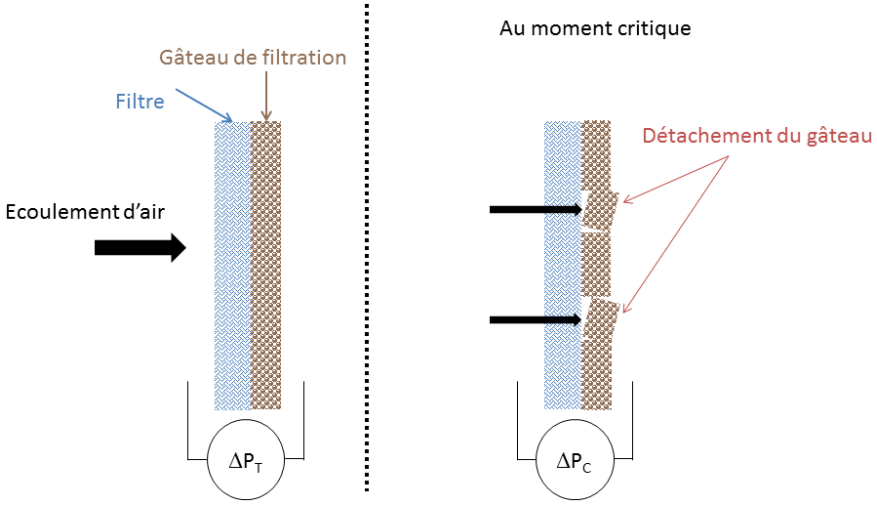


Figure 2.21 : Schématisation de la mesure de la force d'adhésion par inversion de courant.

Pour déterminer la force d'adhésion, il est nécessaire de tracer la perte de charge mesurée en fonction de différentes vitesses d'air (valeurs supérieures à la vitesse critique) et l'interception de la droite $\Delta P = f(U_{air})$ avec l'axe des ordonnées détermine la valeur de la force d'adhésion (figure 2.22). Un montage expérimental a été développé pour mesurer la force d'adhésion par cette technique (figure 2.23).

Le tableau 2.3 donne quelques valeurs de la force d'adhésion des gâteaux de filtration mesurées par cette méthode. Les vitesses d'air inversé utilisées varient entre 0,005 et 0,15 $m.s^{-1}$. Pour un gâteau constitué de particules microniques, la force d'adhésion obtenue par différents auteurs est au plus 250 $N.m^{-2}$.

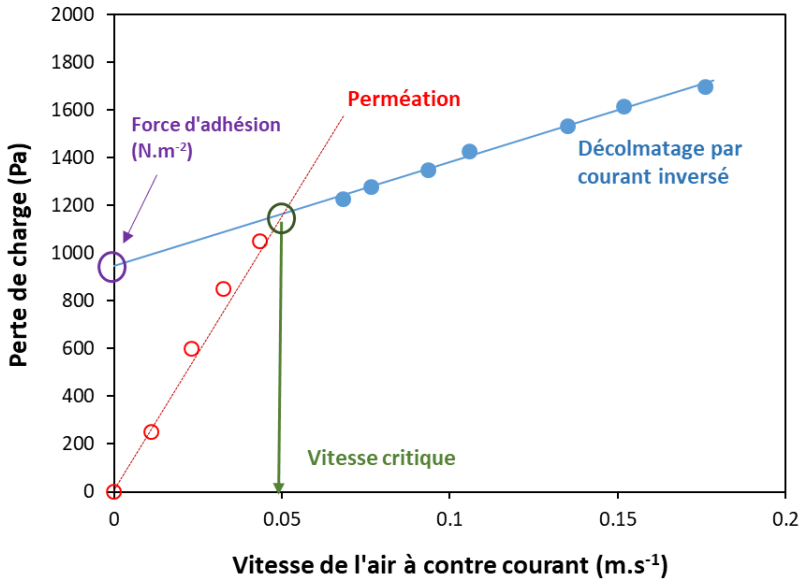


Figure 2.22 : Exemple de la mesure de la force d'adhésion par inversion de courant.

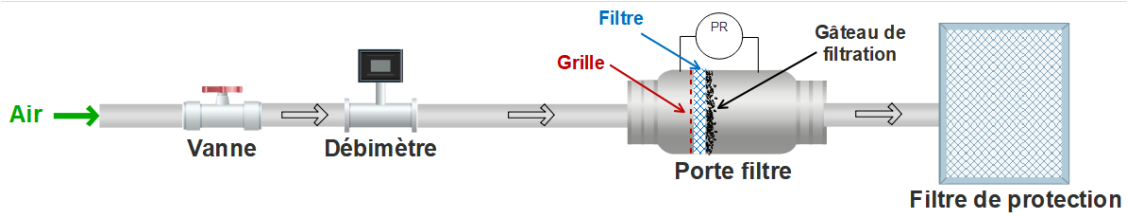


Figure 2.23 : Montage pour la détermination de la force d'adhésion par inversion de courant.

Tableau 2.3 : Valeurs de la force d'adhésion obtenues par la technique d'inversion de courant.

Référence	Poudre	Filtre	Vitesse de filtration ($m.s^{-1}$)	Force d'adhésion ($N.m^{-2}$)
(Seville et al., 1989)	Calcaire Diamètre médian en masse = 4,5 µm	Polyester	/	57,7
(Coury et Aguiar, 1995)	Pierres phosphatées Diamètre médian = 2,3 µm	Polyester	0,03	67,7
(Silva et al., 1999)	Pierres phosphatées Diamètre médian = 20 µm	Polyester	0,048	62
			0,067	84
			0,074	88,3
			0,089	97
(Tanabe et al., 2011)	Pierres phosphatées Diamètre médian en volume = 4,8 µm	Acrylique	0,1	182,6
		Polypropylène		235,9
		Polyester		150,2
(Li et al., 2019a)	Poussières de pierre Diamètre médian = 12µm	Polyester	0,071	200,8

Pour évaluer l'effet du vieillissement sur l'adhésion du gâteau de filtration, des gâteaux avec une masse surfacique de 5±0,5 $g.m^{-2}$ ont été stockés dans une enceinte climatique (Excal, Climats®) pour une durée de 15 jours sous différents taux d'humidité relative à 15°C. Après stockage, la force d'adhésion par la

méthode d'inversion de courant ainsi que l'efficacité de décolmatage par jet pulsé ont été mesurées. Les pertes de charge enregistrées lors de l'inversion du courant sont données par la figure 2.24.

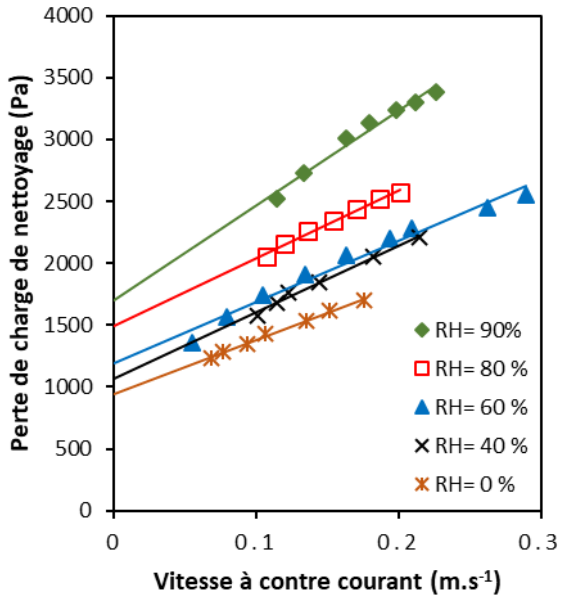


Figure 2.24 : Pertes de charge enregistrées durant l'inversion de courant à travers des gâteaux de filtration stockés sous différentes conditions d'humidité.

La figure 2.25 présente l'évolution de la force d'adhésion en fonction du taux d'humidité durant le stockage. Sous air sec, la force d'adhésion est de 946 $N.m^{-2}$, soit très supérieure aux valeurs enregistrées pour des particules microniques (tableau 2.3). Cela montre la forte adhésion du gâteau de filtration à la surface du filtre et explique les difficultés de décolmatage observées précédemment. La force d'adhésion d'un gâteau frais a été mesurée de 1024 $N.m^{-2}$. Ce qui confirme qu'aucun changement significatif n'est noté après vieillissement sous air sec. L'augmentation du taux d'humidité durant le stockage est accompagnée par une augmentation de la force d'adhésion, jusqu'à 1705 $N.m^{-2}$ après stockage sous 90% d'humidité, soit presque le double que pour un gâteau stocké sous air sec. La transformation chimique du dépôt, sous l'action de l'humidité, le rend donc encore plus adhérent. Malgré tout, pour des taux d'humidité inférieurs à 50%, l'augmentation n'est pas significative. Ces résultats sont d'une extrême importance pour l'exploitation des systèmes de filtration industriels. L'exposition de ces derniers à l'humidité peut en effet engendrer des difficultés de décolmatage suite à des transformations des dépôts de particules.

L'efficacité de décolmatage par jet pulsé des gâteaux après vieillissement est donnée par la figure 2.26. Les résultats montrent bien que le décolmatage devient moins efficace avec l'augmentation du taux d'humidité, qui accélère la transformation du gâteau. L'efficacité de décolmatage par rapport à la masse (R_M) passe ainsi de 30% après stockage sous air sec à 10% après stockage sous 90% d'humidité. Ce résultat vient confirmer que plus le gâteau est adhérent moins le décolmatage est efficace.

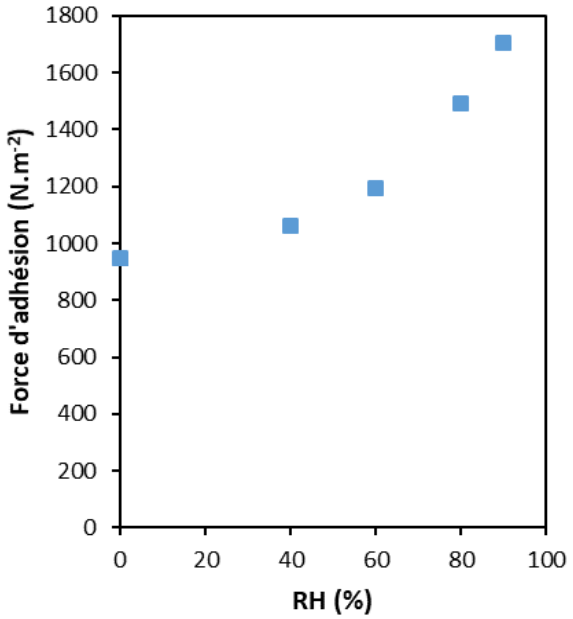


Figure 2.25 : Évolution de la force d'adhésion après vieillissement pendant 15 jours sous différentes conditions d'humidité à 15°C.

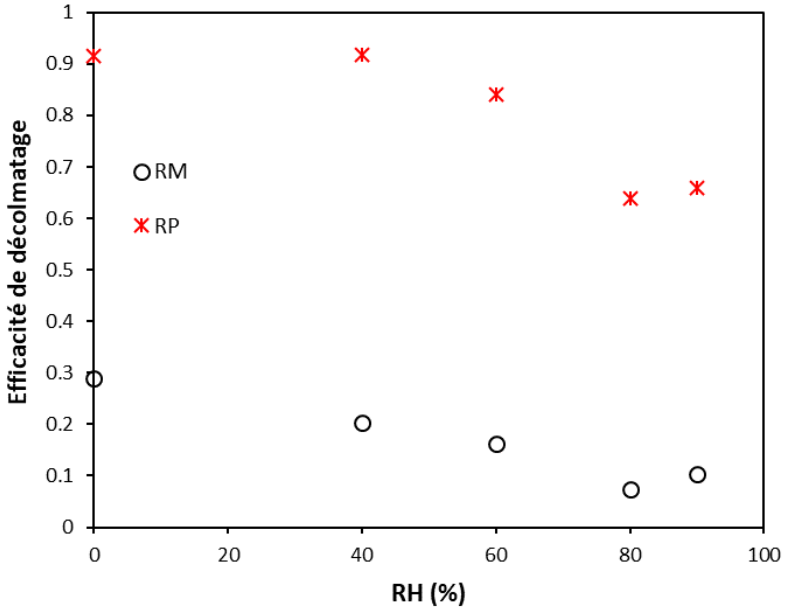


Figure 2.26 : Variation de l'efficacité de décolmatage après vieillissement sous différentes conditions d'humidité pendant 15 jours à une température de 15°C (décolmatage avec une pression de 4 bars, une buse de 3 mm de diamètre et un temps d'ouverture de 0,2 s).

2.6. Influence du média filtrant

L'objectif de cette partie est d'évaluer différents médias ayant subis des traitements surfaciques en termes de performances de filtration des nanoparticules métalliques ainsi que de décolmatage. Les traitements surfaciques peuvent permettre de réduire la force d'adhésion entre le gâteau de filtration et le filtre. Par conséquent, le choix du filtre est un paramètre important pour optimiser les performances.

2.6.1. Caractéristiques des médias étudiés

Les caractéristiques des médias, fournis par des industriels et commercialisés spécialement pour la filtration des poussières métallurgiques, sont résumées dans le tableau 2.4. Les quatre types de traitements surfaciques employés sont la présence d'une couche de nanofibres, le traitement thermique, l'ajout d'une membrane polyéthylène et le traitement antistatique. Actuellement, la couche de nanofibres représente le traitement le plus utilisé par les fournisseurs de médias et de cartouches filtrantes.

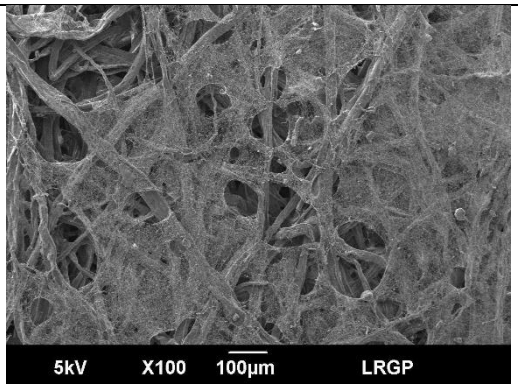
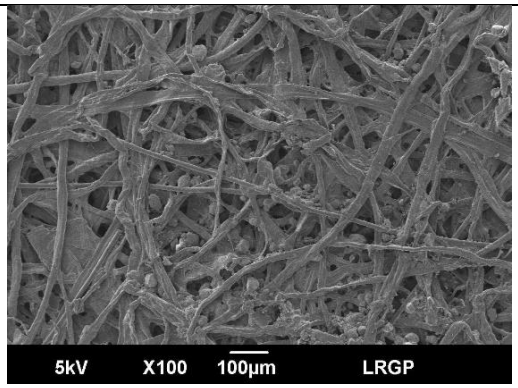
Des images de Microscope Électronique à Balayage (MEB) des faces amont et aval des filtres ont été réalisées et sont récapitulées dans le tableau 2.5. Il peut être remarqué que la couche de nanofibres n'est pas homogène sur toute la surface (médias F2, F3, F11 et F12). La présence des zones de faible résistance risque ainsi de créer des passages préférentiels.

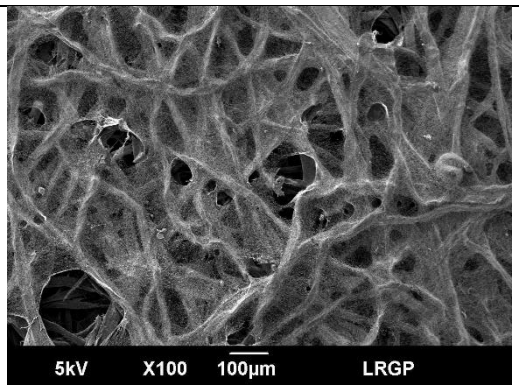
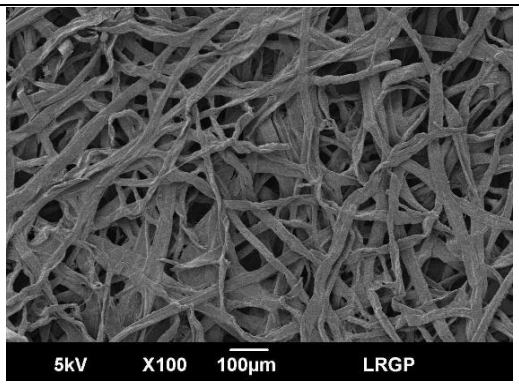
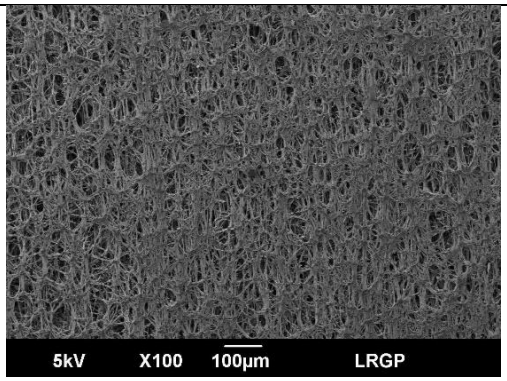
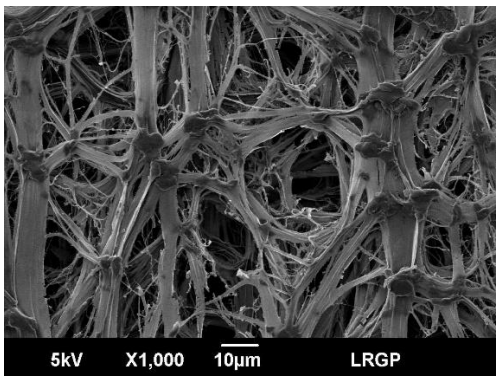
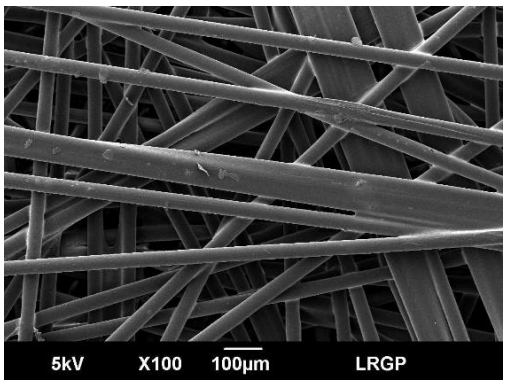
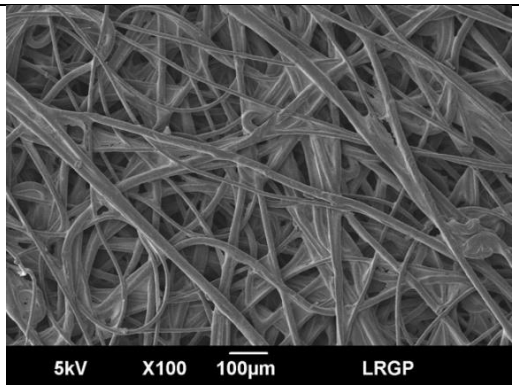
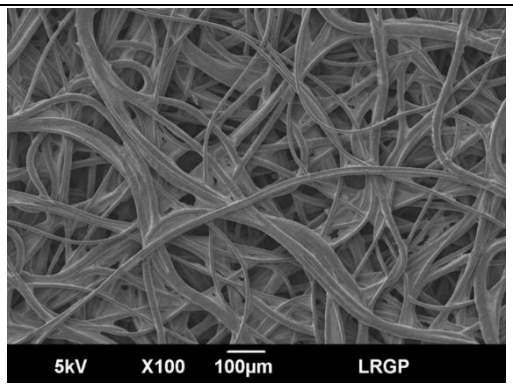
Tableau 2.4 : Caractéristiques des médias étudiés.

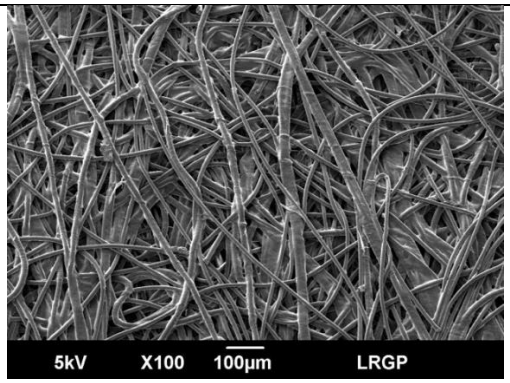
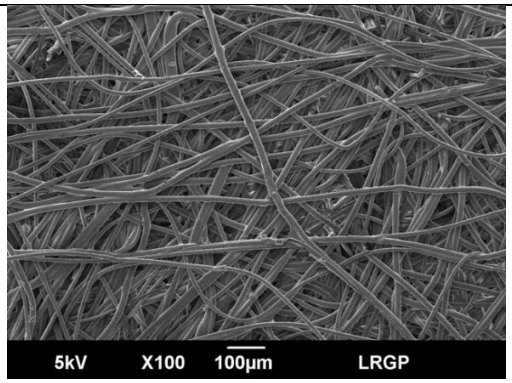
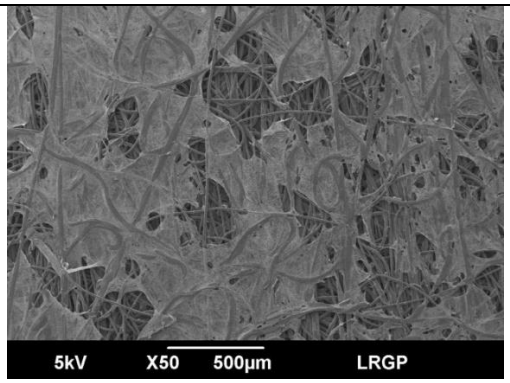
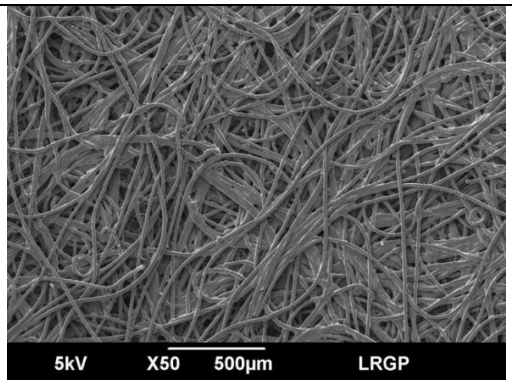
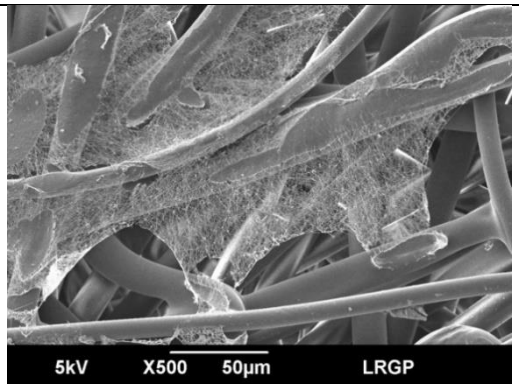
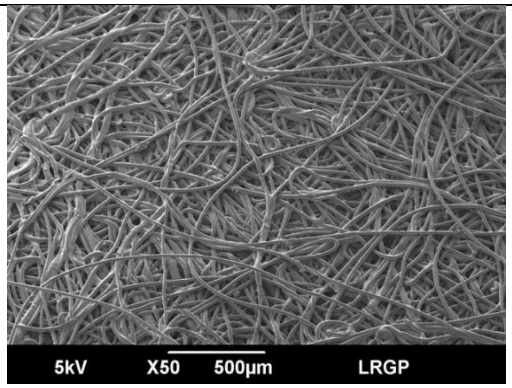
Filtre	Traitement surfacique	Composition	Grammage ($g.m^{-2}$)	Épaisseur (mm)	Masse volumique des fibres ($kg.m^{-3}$)	Compacité	d_f- Analyse d'image de la face non traitée (µm)	Diamètre moyen des nanofibres (nm)
F1	Couche nanofibres	Cellulose	137,91	0,28	1659	0,30	17±5	212±74
F2	Couche nanofibres + antistatique	Cellulose/polyester	128,2	0,54	1619,21	0,15	28,8±5	110±20
F3	Couche nanofibres	Cellulose/polyester	118,75	0,35	1616,15	0,21	19,5±3	184±40
F4	Membrane polyéthylène	Polyester	205,92	1,04	1255,11	0,16	36,6±2	/
F5	Membrane polyéthylène	Polyester	218,75	1,1	1234,91	0,16	38,4±3	/
F6	Membrane polyéthylène	Polyester	206,25	1,19	1225,82	0,14	37,4±4	/
F7	Membrane polyéthylène	Polyester	87,5	0,8	1327,53	0,08	25,9±2	/
F8	Membrane polyéthylène	Polyester	97,56	0,88	1323,87	0,08	27,9±2	/
F9	Thermique + antistatique	Polyester	243,75	0,4	/	/	14,3±4	/
F10	Thermique	Polyester	231,98	0,4	/	/	14,3±3	
F11	Antistatique+ couche nanofibres	Polyester	239,26	0,45	/	/	19±3	75±17
F12	Thermique + couche nanofibres	Polyester	232,65	0,45	/	/	18,6±3	99±20

Grammage : par pesée.
Épaisseur : pied à coulisse numérique.
Masse volumique des fibres : pycnomètre.
Compacité : mesure de la perte de charge du filtre propre (équation 1.3).
Diamètre moyen des fibres et nanofibres : analyse des images MEB.

Tableau 2.5 : Images MEB de quelques médias.

Filtre	Face amont (avec traitement surfacique)	Face aval
F2		

F3	5kV X100 100µm LRGP	5kV X100 100µm LRGP
F4	5kV X100 100µm LRGP 5kV X1,000 10µm LRGP	5kV X100 100µm LRGP
F9	5kV X100 100µm LRGP	5kV X100 100µm LRGP

F10		
F11		
F12		

2.6.2. Mesure de l'efficacité initiale de collecte

L'efficacité initiale de collecte des différents médias a été mesurée sur le banc d'essais schématisé par la figure 2.27. Les expériences ont été réalisées avec des nanoparticules de NaCl, générées avec un générateur (AGK 2000, Palas®) en utilisant une solution saline à 1% en masse. Le principe de fonctionnement de ce générateur consiste à nébuliser une solution saline avec de l'air comprimé, l'aérosol généré passe ensuite par un cyclone pour éliminer les grosses gouttelettes. La distribution en nombre de la taille des particules de sel, mesurée par un SMPS (Grimm, 5.09®) couplé à un diluteur (VKL 100, Palas®), est donnée par la figure 2.28. La distribution présente un diamètre modal, équivalent en mobilité électrique, d'environ 80 nm. Les essais ont été réalisés avec des filtres plans de 8,4 cm de diamètre. Afin d'avoir une mesure précise de l'efficacité de collecte, l'aérosol est neutralisé pour éliminer les effets de charges électriques. En effet, les particules et les fibres des filtres portent souvent des charges, la collecte par effets électrostatiques peut ainsi conduire à une surestimation de l'efficacité de collecte. Pour cela, l'aérosol généré passe par un neutraliseur de charge (EAN 581, Topas®) où il entre en contact avec de l'air ionisé. Puis, un précipitateur électrostatique alimenté par une tension

continue (≈ 7,5 kV) permet de retenir les particules chargées ; seules les particules neutres peuvent ainsi quitter ce dispositif. Ces particules neutres passent ensuite par un sécheur par diffusion pour éliminer la vapeur d'eau des aérosols.

L'efficacité initiale de collecte est évaluée en réalisant des prélèvements successifs en amont et en aval du filtre testé sur la base de la norme EN 779. Les essais ont été réalisés pour une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$. L'efficacité de collecte E est calculée par la relation suivante :

$$E = 1 - \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \tag{2.30}$$

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

L'efficacité de collecte du filtre seul est obtenue en tenant compte de l'efficacité du porte filtre vide. Par bilan de matière et en considérant le porte filtre en série avec le média, elle est calculée ainsi :

$$E_{filtre} = \frac{E_{tot} - E_{PFV}}{1 - E_{PFV}} \tag{2.31}$$

avec E_{filtre} l'efficacité du filtre seul, E_{tot} est l'efficacité du porte filtre avec le filtre, E_{PFV} l'efficacité du porte filtre vide.

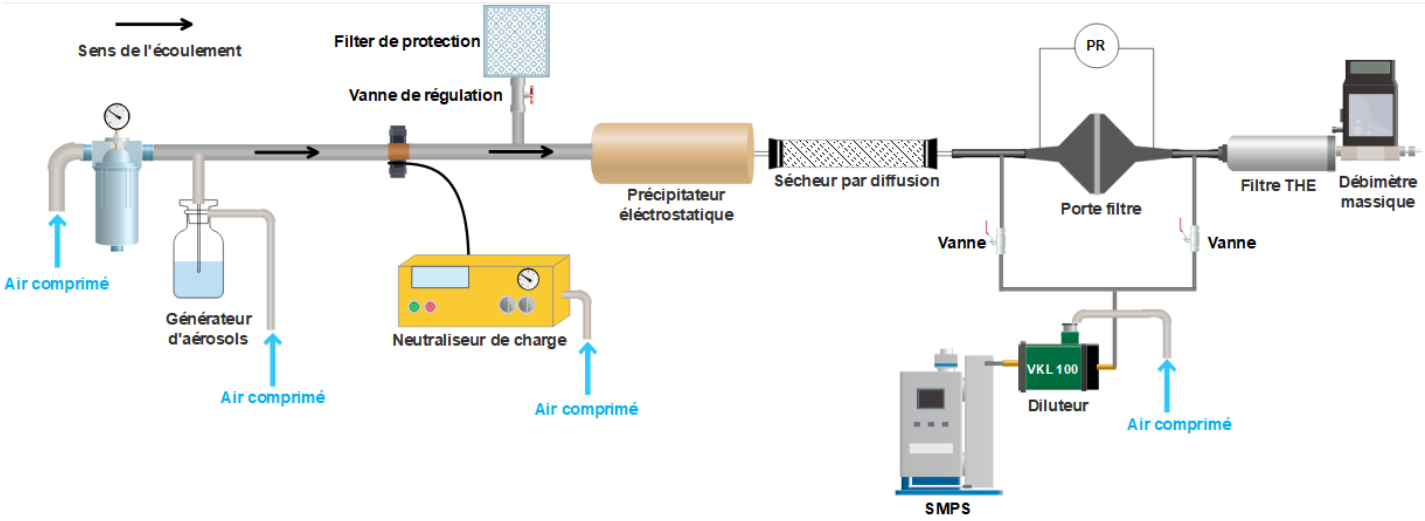


Figure 2.27 : Banc d'essais pour la détermination de l'efficacité initiale de collecte des médias filtrants.

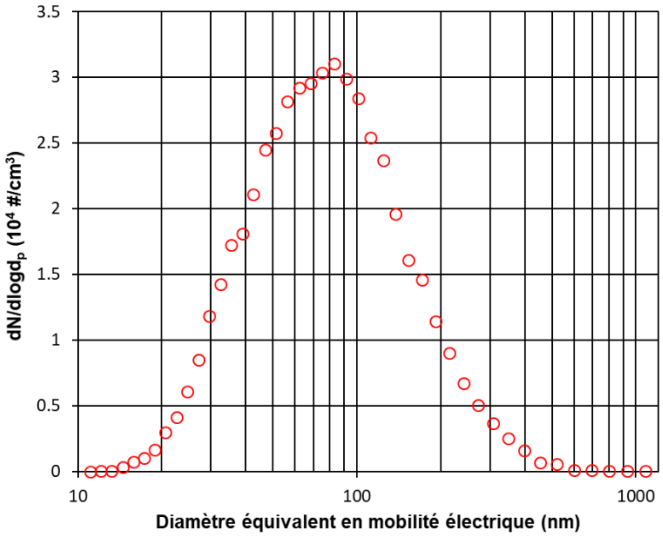


Figure 2.28 : Distribution en nombre de la taille des particules de sel mesurée après dilution d'un facteur 100.

Les résultats de l'efficacité initiale de collecte des différents médias sont présentés sur la figure 2.29. Les filtres F4 à F8 (médias avec membrane polyéthylène) possèdent des efficacités de collecte qui dépassent 85% quelle que soit la taille des particules. Les médias avec nanofibres F1, F2, F3 et F11 présentent la même efficacité initiale minimale autour de 70%. Tandis que les filtres F9, F10 et F12, qui ont subi un traitement thermique présentent une efficacité plus faible que les autres médias.

Afin d'évaluer la contribution de la membrane polyéthylène à l'efficacité de collecte, des mesures de l'efficacité de collecte des membranes seules et des supports fibreux ont été réalisés. La séparation des membranes des supports a été réalisée manuellement et l'épaisseur des membranes a été estimée de l'ordre de 0,1±0,03 mm. La figure (2.30.a) montre assez clairement que la membrane assure l'immense majorité de la collecte des particules, alors que le support fibreux a uniquement pour fonction la tenue mécanique. Jiang et al. (2008) ont rapporté des résultats similaires lors de l'évaluation de l'efficacité de collecte d'une membrane PTFE (épaisseur de 40 µm et une porosité de 76%) où des efficacités de 99,99% ont été enregistrées pour la collecte des particules microniques de $CaCO_3$. Une mesure de la perte de charge des membranes seules en fonction de la vitesse de l'air, U_G, est donnée par la figure (2.30.b). Les membranes F4 et F8 présentent des pertes de charges plus importantes et donc sont moins perméables, c'est-à-dire de faible porosité, ce qui peut expliquer leur efficacité élevée.

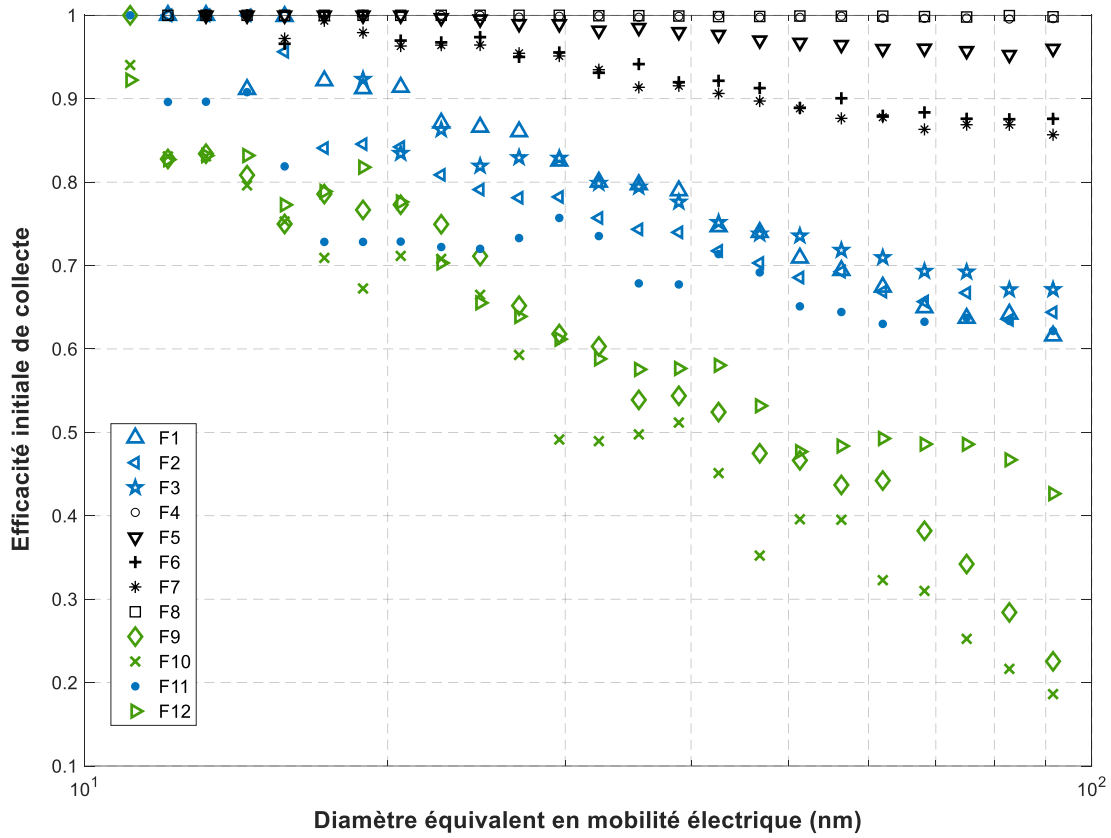


Figure 2.29 : Résultats de l'efficacité initiale de collecte des différents médias pour une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$.

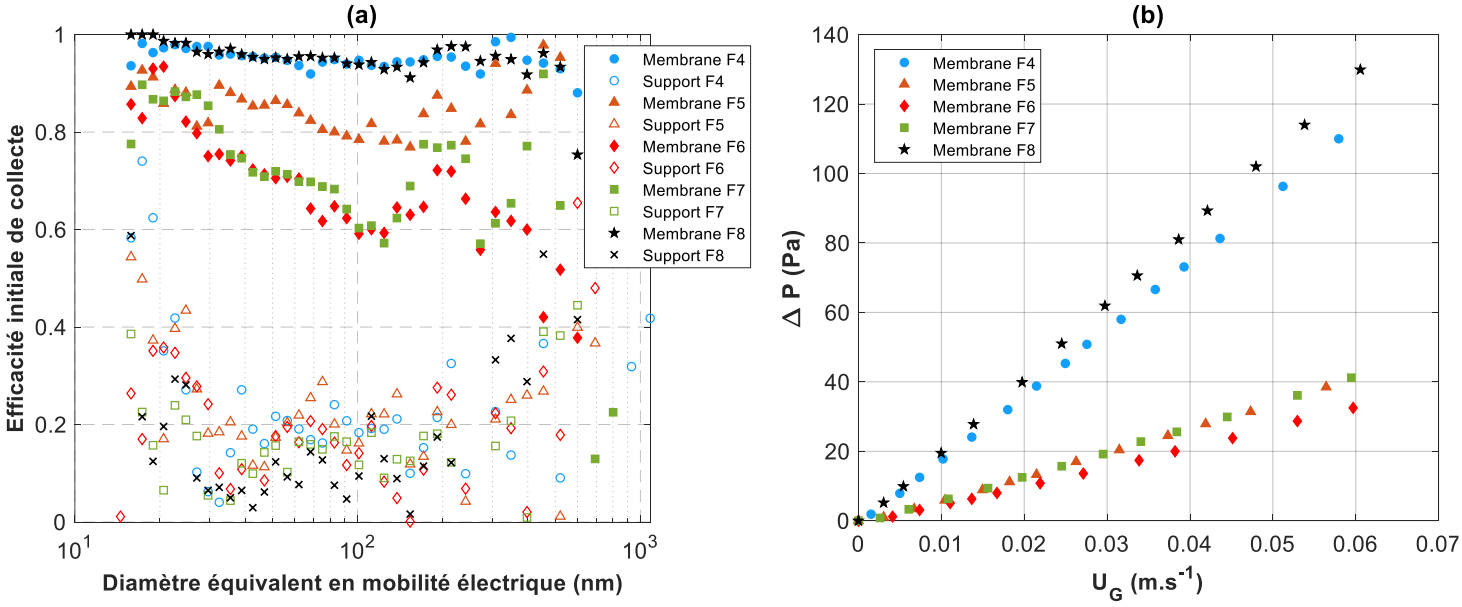


Figure 2.30 : Efficacité de collecte des membranes polyéthylène et leurs supports fibreux pour une vitesse de filtration de 3 cm^{-1} (a) ; évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse de l'air des membranes polyéthylène seules (b).

2.6.3. Performances vis-à-vis des nanoparticules métalliques

La figure 2.31 présente l'évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules métalliques des différents médias. Pour les médias avec nanofibres (F1, F2, F3, F11 et F12) une tendance linéaire avec une pente quasi identique est observée, indiquant la formation quasi-instantanée d'un gâteau de filtration en surface. En effet, à cause de leur taille, les nanofibres ont une efficacité de collecte proche de l'unité ce qui implique la formation rapide du dépôt surfacique de particules. A noter qu'en plus de la couche de nanofibres, le média F12 a subi aussi un traitement thermique. En revanche, l'évolution n'est pas linéaire pour les filtres avec membrane en polyéthylène (F4 à F8) et est moins importante comparativement aux autres filtres. Ce comportement particulier peut s'expliquer par un colmatage en profondeur des membranes. A noter que le colmatage en profondeur est irréversible. Les filtres F9 et F10, qui ont subi un traitement thermique, présentent des pertes de charges plus importantes du fait de la non homogénéité de la surface. En effet, les images MEB montrent des zones non perméables suite à la fusion des fibres sous la chaleur. Pour F9 une tendance linéaire est observée à partir d'une masse de 3 $g.m^{-2}$, ce qui indique la fin de la filtration en profondeur et la formation d'un gâteau en surface.

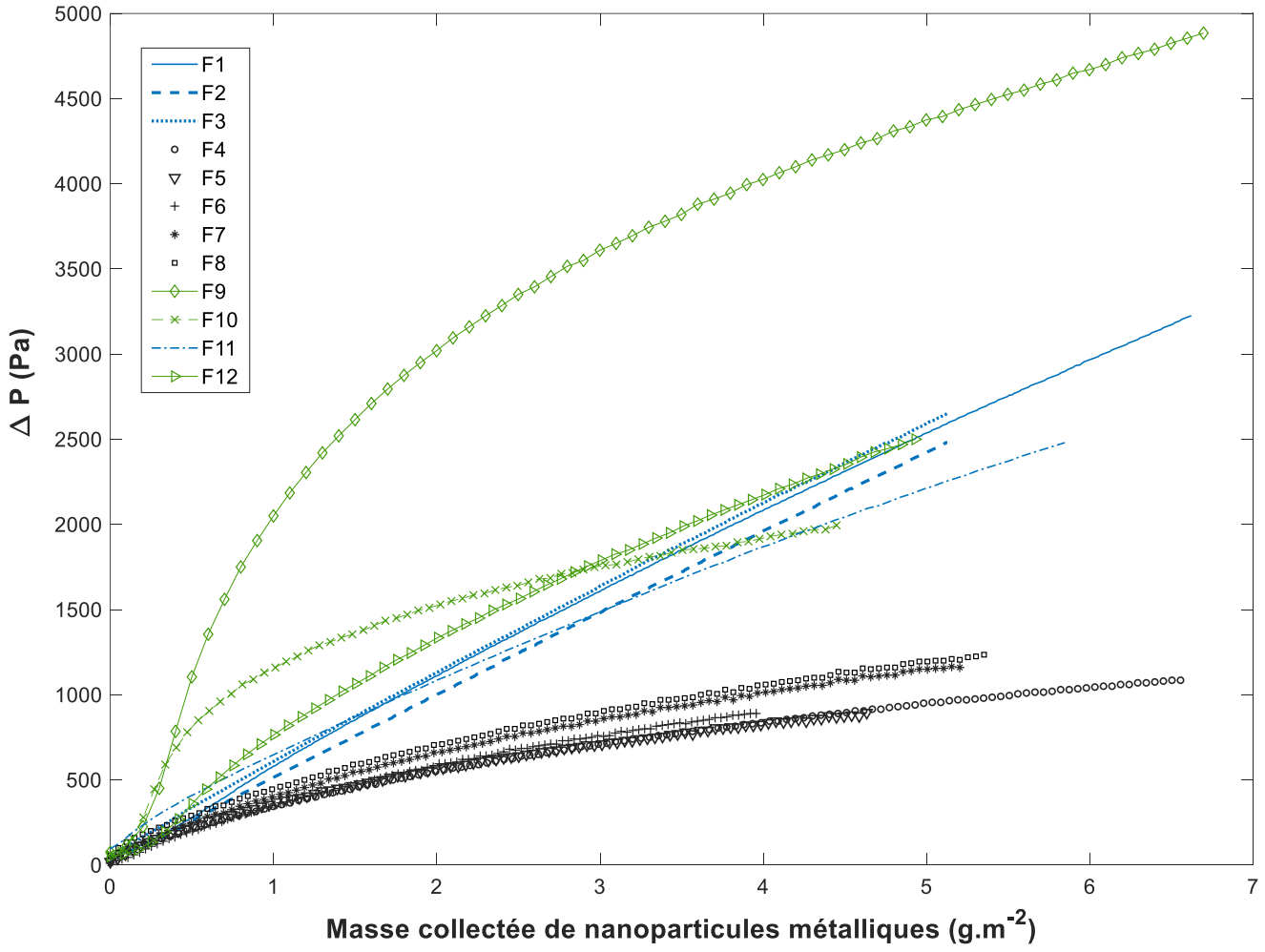


Figure 2.31 : Évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules métalliques à une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$.

Finalement, l'efficacité de décolmatage par jet pulsé des médias colmatés par les nanoparticules métalliques a été mesurée pour une masse déposée de 5±0,5 $g.m^{-2}$. Le décolmatage a été réalisé avec

une buse de 3 mm de diamètre, une pression de l'air comprimé de 4 bars et un temps d'ouverture de 0,2 s (tableau 2.6). La masse détachée après décolmatage ne dépasse jamais 15%, ce qui reflète la forte adhésion du gâteau de filtration. L'utilisation des différents traitements surfaciques ne permet donc pas de réduire considérablement la force d'adhésion entre le gâteau de filtration et la surface du filtre.

Tableau 2.6 : Résultats de l'efficacité de décolmatage des médias après un colmatage avec les nanoparticules métalliques.

Filtre	Efficacité de décolmatage R_M (%)
F1	12,6
F2	14,2
F3	6,9
F4	3,9
F5	7,6
F6	5,6
F7	5,6
F8	4,6
F9	7,3
F10	1,6
F11	5,4
F12	7,1

Conclusion

Les expériences réalisées dans cette partie de l'étude ont permis de quantifier et d'expliquer les problèmes de décolmatage rencontrés dans l'industrie. En effet, même en réalisant le décolmatage sous des conditions extrêmes, en augmentant la pression de l'air, le nombre de pulses et la masse déposée, aucune amélioration importante de l'efficacité de régénération n'a été notée. Cette dernière ne dépasse pas 30%. Les résultats ont aussi montré que dans le cas d'un décolmatage inefficace par plaques, la perte de charge résiduelle n'est pas le critère adéquat pour évaluer l'efficacité de décolmatage. Le gâteau de filtration composé de nanoparticules métalliques présente une force d'adhésion très importante, de l'ordre de 1000 $N.m^{-2}$, qui est cinq fois plus importante que celle d'un gâteau composé de particules microniques. Les expériences ont par ailleurs mis en évidence que le vieillissement atmosphérique du gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques entraine une transformation chimique aboutissant à la formation d'hydrocarbonates. Cette transformation s'accompagne par une augmentation de la force d'adhésion du gâteau et une diminution de l'efficacité de décolmatage. En effet, l'efficacité de décolmatage passe de 30% pour un gâteau frais à 10% après vieillissement sous 90% d'humidité pendant 15 jours. Ces résultats sont extrêmement importants pour la compréhension de l'inefficacité du décolmatage sur les systèmes de filtration industriels.

Il est évident que l'amélioration du décolmatage passe par une réduction de la force d'adhésion entre le gâteau de filtration et le filtre. Le type de filtre peut permettre de diminuer cette force. Cependant les médias étudiés, possédant différents traitements surfaciques censés faciliter le décolmatage, n'ont pas permis d'améliorer la régénération. Dans cette optique, le prochain chapitre sera consacré à l'étude de l'application de la technique de précoating pour surmonter les problèmes de régénération. Cette méthode consiste à protéger la surface du filtre par une couche de particules microniques, théoriquement moins adhésive et donc plus facilement décolmatable.

Références

Aguiar, M.L., Coury, J.R., 1992. Air filtration in fabric filters: Cake-cloth adhesion force. Fluid Part. Sep. J. 5.

Almeida, E., Morcillo, M., Rosales, B., 2000. Atmospheric corrosion of zinc Part 1: Rural and urban atmospheres. Br. Corros. J. 35, 284–288. https://doi.org/10.1179/000705900101501353

Becker, J., Waldenmaier, M., 2001. New cleanable, corrugated filter medium viledon FE 2507-sine: initial performance. Filtr. Sep. 38, 22–24. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(01)80580-2

Bémer, D., Régnier, R., Morele, Y., Grippari, F., Appert-Collin, J.C., Thomas, D., 2013. Study of clogging and cleaning cycles of a pleated cartridge filter used in a thermal spraying process to filter ultrafine particles. Powder Technol. 234, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.035

Boudhan, R., Joubert, A., Durécu, S., Gueraoui, K., Le Coq, L., 2019. Influence of air humidity on particle filtration performance of a pulse-jet bag filter. J. Aerosol Sci. 130, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2019.01.002

Boudhan, R., Joubert, A., Gueraoui, K., Durécu, S., Venditti, D., Tran, D.T., Le Coq, L., 2018. Pulse-Jet Bag Filter Performances for Treatment of Submicronic and Nanosized Particles from Waste Incineration. Waste and Biomass Valorization 9, 731–737. https://doi.org/10.1007/s12649-017-9858-4

Brunauer, S., Deming, L.S., Deming, W.E., Teller, E., 1940. On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases. J. Am. Chem. Soc. 62, 1723–1732. https://doi.org/10.1021/ja01864a025

Busnaina, A.A., Elsawy, T., 2000. The Effect of Relative Humidity on Particle Adhesion and Removal. J. Adhes. 74, 391–409. https://doi.org/10.1080/00218460008034538

Çengel, Y.., Cimbala, J.., 2017. Mécanique des fluides. De Boeck Supérieur.

Charvet, A., Bau, S., Bémer, D., Thomas, D., 2015. On the importance of density in ELPI data post-treatment. Aerosol Sci. Technol. 49, 1263–1270. https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1117568

Cirqueira, S.S.R., Tanabe, E.H., Aguiar, M.L., 2017. Evaluation of operating conditions during the pulse jet cleaning filtration using different surface treated fibrous filters. Process Saf. Environ. Prot. 105, 69–78. https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.010

Clift, R., Seville, J.P.K., 1993. Gas Cleaning at High Temperatures, Springer. Springer Netherlands, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-2172-9

Coury, J.R., Aguiar, M.L., 1995. Rupture of dry agglomerates. Powder Technol. 85, 37–43. https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)03000-Y

Dennis, R., Wilder, J.E., Harmon, D.L., 1981. Predicting pressure loss for pulse jet filters. J. Air Pollut. Control Assoc. 31, 987–992. https://doi.org/10.1080/00022470.1981.10465316

EN779, 2012. En 779 :2012 european test method for air filters.

Falk, T., Svensson, J., Johansson, L., 1998. The role of carbon dioxide in the atmospheric corrosion of zinc. J. Electrochem. Soc. 145, 39–44.

First, M.W., Silverman, L., 1963. Predicting the performance of cleanable industrial fabric filters. J. Air Pollut. Control Assoc. 13, 581–586. https://doi.org/10.1080/00022470.1963.10468223

Gankanda, A., Cwiertny, D.M., Grassian, V.H., 2016. Role of Atmospheric CO2 and H2O Adsorption on ZnO and CuO Nanoparticle Aging: Formation of New Surface Phases and the Impact on Nanoparticle Dissolution. J. Phys. Chem. C 120, 19195–19203. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b05931

Graedel, T.E., 1989. Corrosion mechanisms for zinc exposed to the atmosphere. J. Electrochem. Soc. 136, 139–203.

Hinds, W.C., 1999. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. Wiley.

Horst, D., Zhang, Q., Schmidt, E., 2019. Deliquescence and efflorescence of hygroscopic salt particles in dust cakes on surface filters. Chem. Eng. Technol. 1–22. https://doi.org/10.1002/ceat.201800754

Irwin, M.., 2007. Handbook of Nonwoven Filter Media. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-441-1.X5015-X

Jiang, D., Zhang, W., Liu, J., Geng, W., Ren, Z., 2008. Filtration and regeneration behavior of polytetrafluoroethylene membrane for dusty gas treatment. Korean J. Chem. Eng. 25, 744–753. https://doi.org/10.1007/s11814-008-0122-2

Joubert, A., Laborde, J.C., Bouilloux, L., Callé-Chazelet, S., Thomas, D., 2010. Influence of humidity on clogging of flat and pleated HEPA filters. Aerosol Sci. Technol. 44, 1065–1076. https://doi.org/10.1080/02786826.2010.510154

Kim, C.S., Bao, L., Okuyama, K., Shimada, M., Niinuma, H., 2006. Filtration efficiency of a fibrous filter for nanoparticles. J. Nanoparticle Res. 8, 215–221. https://doi.org/10.1007/s11051-005-9017-x

Kulkarni, P., Baron, P.A., Willeke, K., 2011. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications.

Li, Q., Zhang, M., Qian, Y., Geng, F., Song, J., Chen, H., 2015. The relationship between peak pressure and residual dust of a pulse-jet cartridge filter. Powder Technol. 283, 302–307. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.038

Li, S., Hu, S., Xie, B., Jin, H., Xin, J., Wang, F., Zhou, F., 2019a. Influence of pleat geometry on the filtration and cleaning characteristics of filter media. Sep. Purif. Technol. 210, 38–47. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.002

Li, S., Wang, F., Xin, J., Xie, B., Hu, S., Jin, H., Zhou, F., 2019b. Study on effects of particle size and maximum pressure drop on the filtration and pulse-jet cleaning performance of pleated cartridge filter. Process Saf. Environ. Prot. 123, 99–104. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.002

Lo, L.M., Chen, D.R., Pui, D.Y.H., 2010. Experimental study of pleated fabric cartridges in a pulse-jet cleaned dust collector. Powder Technol. 197, 141–149. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.09.007

Masuda, H., Higashitani, K., Yoshida, H. (Eds.), 2006. Powder Technology. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420044119

Mittal, K.L., Jaiswal, R. (Eds.), 2015. Particle Adhesion and Removal. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. https://doi.org/10.1002/9781118831571

Montgomery, J.F., Green, S.I., Rogak, S.N., 2015. Impact of relative humidity on HVAC filters loaded with hygroscopic and non-hygroscopic particles. Aerosol Sci. Technol. 49, 322–331. https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1026433

Morris, K., Allen, R.W.K., Clift, R., 1987. Adhesion of cakes to filter media. Filtr. Sep.

Qian, Y., Bi, Y., Zhang, Q., Chen, H., 2014. The optimized relationship between jet distance and nozzle diameter of a pulse-jet cartridge filter. Powder Technol. 266, 191–195. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.004

Ramnarace, J., 2015. Rocket Propellant Technology. Page Publishing, Incorporated.

Ranade, M.B., 1987. Adhesion and removal of fine particles on surfaces. Aerosol Sci. Technol. 7, 161–176. https://doi.org/10.1080/02786828708959155

Rathakrishnan, E., 2010. Applied Gas Dynamics.

Ribeyre, Q., Charvet, A., Vallières, C., Thomas, D., 2017. Impact of relative humidity on a nanostructured filter cake – Experimental and modelling approaches. Chem. Eng. Sci. 161, 109–116. https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.12.013

Rimai, D.., DeMejo, L.., Mittal, K.., 1995. Fundamentals of Adhesion and Interfaces. De Gruyter. https://doi.org/10.1515/9783112318515

Rumpf, H., 1962. Agglomeration. Wiley-Interscience 379–418.

Schildermans, I., Baeyens, J., Smolders, K., 2004. Pulse jet cleaning of rigid filters: a literature review and introduction to process modelling. Filtr. Sep. 41, 26–33. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(04)00234-4

Sellier, A., 2001. Introduction aux écoulements compressibles et aux fluides hétérogènes. Ecole Polytechnique.

Seville, J.P.K., Cheung, W., Clift, R., 1989. A patchy-cleaning interpretation of dust cake release from non-woven fabrics. Filtr. Sep. May/June, 187–190.

Sievert, J., Löffler, F., 1987. Dust cake release from non woven fabrics. Filtr. Sep. 424–427.

Silva, C.R.N., Negrini, V.S., Aguiar, M.L., Coury, J.R., 1999. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. Powder Technol. 101, 165–172. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(98)00168-5

Simon, X., Chazelet, S., Thomas, D., Bémer, D., Régnier, R., 2007. Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings. Powder Technol. 172, 67–81. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.10.005

Tanabe, E.H., Barros, P.M., Rodrigues, K.B., Aguiar, M.L., 2011. Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters. Sep. Purif. Technol. 80, 187–195. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.031

Thomas, D., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Appert-Collin, J.C., 2017. Aerosol Filtration, Elsevier. Elsevier. https://doi.org/10.1615/atoz.a.aerosfil

Thomas, D., Pacault, S., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Appert-Collin, J.C., 2019. Composite fibrous filters for nano-aerosol filtration: Pressure drop and efficiency model. Sep. Purif. Technol. 215,

557–564. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.043

Thomas, D., Penicot, P., Contal, P., Leclerc, D., Vendel, J., 2001. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study. Chem. Eng. Sci. 56, 3549–3561. https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00041-0

Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., Sing, K.S.W., 2015. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). Pure Appl. Chem. 87, 1051–1069. https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117

Xie, B., Li, S., Chu, W., Liu, C., Hu, S., Jin, H., Zhou, F., 2020. Improving filtration and pulse-jet cleaning performance of metal web filter media by coating with polytetrafluoroethylene microporous membrane. Process Saf. Environ. Prot. 136, 105–114. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.01.002

Young, J.F., 1967. Humidity control in the laboratory using salt solutions-a review. J. Appl. Chem. 17, 241–245. https://doi.org/10.1002/jctb.5010170901

Chapitre 3 : Application de la technique de précoating pour améliorer la régénération des filtres

Face aux problèmes de filtration causés par des particules ultrafines et adhésives (perte de charge importante, faible efficacité de collecte et décolmatage inefficace), des adaptations sont nécessaires pour améliorer les performances. Les résultats du chapitre précédent ont mis en évidence la forte adhésion du gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques et les difficultés de décolmatage associées. En pratique, cela se traduit par un colmatage irréversible des filtres et donc un surcoût associé à la nécessité de leur remplacement régulier. Cette partie de l'étude s'intéresse ainsi à l'application de la technique de précoating dans le but d'améliorer l'efficacité de décolmatage et de protéger les filtres d'un colmatage irréversible. Le choix de cette solution s'explique par sa facilité de mise en œuvre, cette technique ne nécessitant pas de modifier de façon significative les installations de filtration industrielles.

3.1. Techniques d'amélioration des performances de filtration

3.1.1. Précoating (conditionnement du filtre)

L'application du précoating est une pratique bien connue dans le domaine de la filtration. Pour les fumées métallurgiques, Goodfellow et al. (1978) ont rapporté que l'utilisation de cette technique permet d'opérer à haute vitesse de filtration et d'éviter le colmatage irréversible des médias. Le précoating consiste à protéger la surface du filtre par une couche de particules microniques, facilement décolmatable, sur laquelle les particules ultrafines vont se déposer. L'idée est de former un gâteau de filtration, poreux et perméable, qui sert ainsi de préfiltre. Le matériau utilisé doit être chimiquement inerte, non toxique, non inflammable et peu coûteux. Généralement, le précoating est recommandé pour les cas suivants : filtration des particules ultrafines qui ont une forte adhésion, lorsque l'humidité est importante, pour protéger le filtre des hydrocarbures ou des contaminants visqueux ou comme un retardateur de flamme (Peukert et Wadenpohl, 2001). La figure 3.1 donne une schématisation du principe de précoating pour la filtration des particules ultrafines.

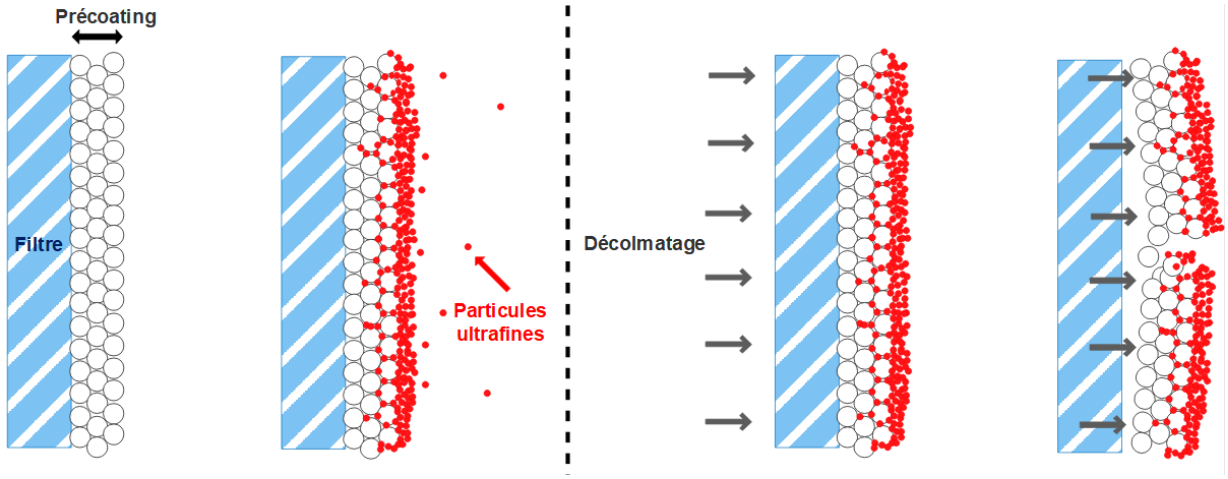


Figure 3.1 : Schéma représentatif du principe de précoating pour la filtration des particules ultrafines.

Pour une application industrielle, Ravert (2005) précise que la précouche doit être appliquée avant de commencer le processus de filtration et avec un faible débit volumique. L'auteur indique que la quantité nécessaire de précoating pour un filtre à manche est approximativement cinq fois plus importante que pour une cartouche plissée. Ceci est en accord avec les recommandations rencontrées en pratique, généralement pour un filtre à manches la quantité varie entre 150 à 250 $g.m^{-2}$, tandis que pour une

cartouche plissée elle se situe entre 20 et 50 $g.m^{-2}$. L'inconvénient majeur de la technique de précoating est la nécessité de réappliquer la précouche après chaque décolmatage, et donc une filtration en continu n'est possible que par le biais de plusieurs chambres de filtration fonctionnant en parallèle. De plus, pour une application industrielle la quantité de déchet à gérer (dépôts de poussières détachés après décolmatage) peut être importante.

La distribution granulométrique des particules de précoating est considérée comme un critère important de sélection. En effet, si les particules sont trop grosses des dépôts indésirables peuvent se former entre la buse d'injection et le filtre, et si elles sont trop fines des difficultés de génération peuvent être rencontrées et le gâteau sera difficile à détacher. Pour l'épaisseur de la couche, une épaisseur minimale de 1 mm a été jugée nécessaire pour protéger les filtres contre les particules ultrafines qui ont une forte adhésion (Schmidt et Löffler, 1990; Schmidt et Pilz, 1996). Cependant, l'effet de l'épaisseur du précoating sur l'efficacité de décolmatage n'a pas été étudié. Les matériaux les plus utilisés comme précoating pour la séparation gaz/solide sont le carbonate de calcium ($CaCO_3$) et la perlite (roche volcanique composée majoritairement de dioxyde de silicium SiO_2). Pour les cartouches plissées, certains fabricants commercialisent une poudre à base de diméthyldichlorosilane ($C_2H_6Cl_2Si$) qui ne nécessite qu'une seule application, sans besoin de la réappliquer après décolmatage. Cette poudre sert ainsi pour pré-colmater le filtre, formant un préfiltre permanent. La quantité recommandée est de 10 $g.m^{-2}$, sans qu'il n'existe néanmoins de données expérimentales quantitatives dans la littérature sur l'application de ce type de poudre. Le matériau choisi peut présenter d'autres avantages comme l'adsorption de l'humidité. Hajar et al. (2015) ont ainsi réalisé un mélange d'une poudre de précoating avec du charbon actif, ce qui a conféré à la couche de précoating la capacité d'adsorber les polluants organiques présents dans le flux gazeux.

Schmidt (2004) a présenté des résultats sur l'influence du précoating (carbonate de calcium) sur le décolmatage des filtres à manches par jet pulsé, utilisés pour la filtration des émissions des fours de fabrication de carbures. Avec précoating la perte de charge résiduelle a diminué considérablement et s'est stabilisée au cours des cycles colmatage/décolmatage. Par ailleurs, la concentration en particules en aval du filtre est passée de 2 $mg.m^{-3}$ sans précoating à 0,5 $mg.m^{-3}$ avec précoating, ce qui montre l'effet bénéfique de la couche sur l'efficacité de filtration. Bémer et al. (2013) ont utilisé une masse de 23,5 $g.m^{-2}$ de carbonate de calcium pour améliorer le décolmatage des cartouches plissées par jet pulsé, soumises aux fumées de métallisation. La distribution granulométrique en masse du précoating présentait un diamètre médian de 3,6 µm. Schiller et Schmid (2014) ont étudié la technique de précoating en utilisant 11 filtres (médias plans) de caractéristiques différentes, données par le tableau 3.1, et trois poudres différentes ($CaCO_3$, $Ca(OH)_2$ et SiO_2). Le diamètre médian en nombre, pour les trois poudres, était inférieur à 1 µm.

Tableau 3.1 : Caractéristiques des différents filtres étudiés par Schiller et Schmid (2014).

Filtre	Matériau	Grammage ($g.m^{-2}$)	Épaisseur (mm)	Porosité	Masse volumique ($g.cm^{-3}$)
1	PTFE	700	1,3	0,74	0,54
2	PTFE+PI	630	1,4	0,75	0,45
3	Aramide	500	2,4	0,85	0,21
4	PTFE	745	1,2	-	0,62
5	Fibre de verre	339	0,36	-	0,94
6	P84	550	2,8	0,86	0,2
7	Aramide + P84	600	2,6	0,85	0 ,21
8	PTFE + P84	630	1,8	0,78	0,35
9	PPS + P84	600	2	0,78	0,3
10	Tissu métallique	246	0,036	-	6,83
11	PTFE + PI	650	1,6	0,81	0,41

PTFE : PolyTétraFluoroEthylène
PI : PolyImide
P84 : Polyimide 84
PPS : Polysulfure de phénylène

Les auteurs ont défini les critères de sélection suivants :

- Sélection du filtre : de basse efficacité vis-à-vis des particules ultrafines et de très haute efficacité (99%) vis-à-vis des particules de précoating. Le filtre sert essentiellement de support pour la précouche.
- Sélection du précoating : de haute efficacité vis-à-vis des particules ultrafines avec une perte de charge en fonction de la masse déposée (pour une couche d'épaisseur donnée) minimale, c'est-à-dire une perméabilité élevée.

Les auteurs ont examiné l'efficacité de collecte de la couche de précoating pour la filtration de particules ultrafines de sel (diamètre modal équivalent en mobilité électrique de 60 nm) et pour différentes épaisseurs : 0,5, 1 et 2 mm. Logiquement, plus l'épaisseur est importante, plus l'efficacité est importante. Bien évidemment, l'augmentation de l'épaisseur est accompagnée par une augmentation de la perte de charge. La poudre qui a engendré la perte de charge minimale est celle qui possède une densité très faible et une grande porosité (SiO_2). En fonction du filtre et du matériau de précoating, la perte de charge d'une couche de 1 mm d'épaisseur est variable et la masse nécessaire à déposer dépend du matériau (différence de porosité et de masse volumique). Le choix du couple filtre-poudre est d'importance pour optimiser les performances de filtration en termes de perte de charge, efficacité de collecte et efficacité de décolmatage. Schiller et Schmid (2015) ont ensuite testé le précoating sur des filtres à manches pour la filtration d'émissions d'un chauffage fonctionnant par combustion de biomasse. Un processus de filtration stable a été obtenu sur plusieurs cycles de colmatage/décolmatage. Ils ont également montré qu'il est possible de réutiliser le précoating jusqu'à trois fois ce qui permet de réduire le coût de fonctionnement. Malgré une variation de la distribution granulométrique de la poudre lors de la réutilisation, ceci n'a pas eu d'incidence significative ni sur l'efficacité de filtration ni sur la perte de charge. Les auteurs annoncent une économie de 67% en masse de poudre. L'analyse du précoating après décolmatage par microscope électronique à balayage, a montré que les particules poreuses de précoating sont capables de collecter davantage de particules ultrafines.

Zhang et Schmidt (2012) ont étudié l'application d'un post-coating. Le principe consiste à déposer une couche de particules plus fines sur un gâteau déjà formé avant le décolmatage, comme le montre la figure 3.2. Selon les auteurs le post-coating permet d'augmenter les forces de cohésion entre les particules, engendrant une augmentation de la résistance du dépôt, ce qui va favoriser son détachement. Dans leur étude, les particules du gâteau principal, composées de $CaCO_3$, ont un diamètre modal de 2 µm, tandis que les poudres du post-coating étudiés, cire de carnauba et NaCl, ont un diamètre modal de 0,4 et 0,6 µm respectivement. Les masses déposées de post-coating étaient comprises entre 2,5 et 5,4 $g.m^{-2}$. Les résultats ont montré que le post-coating permet d'éviter le décolmatage inefficace par plaques, et le gâteau se détache plus facilement.

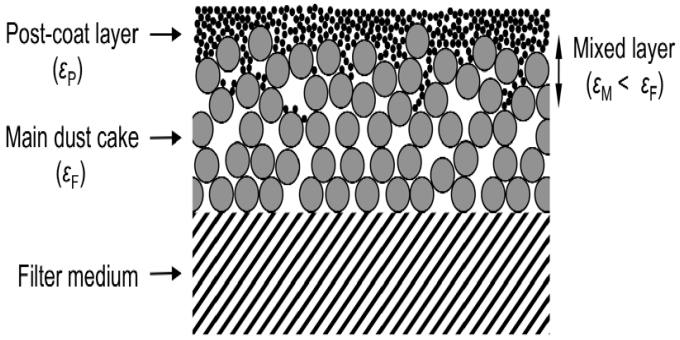


Figure 3.2 : Principe du post-coating (Zhang et Schmidt, 2012).

Förster et al. (2016) ont porté une attention particulière à l'efficacité de collecte de la couche de précoating pour la filtration de nanoparticules de cuivre, avec une taille comprise entre 5 et 40 nm. La couche de précoating étudiée était composée de particules d'alumine avec un diamètre médian de 4 µm. Les résultats ont montré une augmentation de l'efficacité de collecte avec l'épaisseur de la couche. Cependant, l'augmentation de la vitesse de filtration est associée à une diminution de l'efficacité. Comme le mécanisme dominant pour la collecte des nanoparticules est la diffusion brownienne, l'augmentation de la vitesse engendre une diminution du temps de résidence, ce qui cause la diminution de l'efficacité de collecte par ce mécanisme. Les auteurs ont aussi noté une augmentation de l'efficacité avec l'augmentation de la température à cause de l'augmentation du coefficient de diffusion.

Pour aller plus loin et essayer de prédire les performances de filtration de la couche de précoating, le gâteau de particules microniques pourrait être assimilé à un lit granulaire. La perte de charge de la couche, ΔP_G , peut ainsi être décrite par le modèle de Novick et al. (1990) :

$$\Delta P_G = h_k \frac{a_p^2 \ \alpha_g \ \mu_G}{Cu \left(1 - \alpha_g\right)^3 \rho_p} U_G \, W \qquad (3.1)$$

avec U_G la vitesse du gaz, W la masse déposée par unité de surface, h_k la constante de Kozeny ($h_k \approx 4{,}5$-5), a_p la surface spécifique de la particule, Cu le coefficient de Cunningham, μ_G la viscosité du gaz, ρ_p la masse volumique de la particule et α_g la compacité du gâteau.

L'efficacité de filtration des particules ultrafines par la couche de précoating peut être calculée par la relation 3.2 (Mann and Goren, 1984). Une expression tenant compte de la vitesse interstitielle basée sur le modèle de la sphère isolée (Gal et al., 1985; Tien and Ramarao, 2007) peut être aussi employée ; elle est obtenue en ajoutant la porosité au dénominateur dans l'équation 3.2 :

$$E = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2}\frac{(1-\varepsilon_g)\,H}{d_C}\,\eta_T\right) \tag{3.2}$$

où E est l'efficacité de collecte, ε_g la porosité de la couche, H l'épaisseur de la couche, d_C le diamètre des collecteurs (particules de précoating) et η_T est l'efficacité totale d'une seule particule de précoating, exprimée comme suit :

$$\eta_T = 1 - \prod(1-\eta_i) \tag{3.3}$$

avec η_i l'efficacité unitaire de collecte par le mécanisme i. Les mécanismes de collecte sont, comme pour les médias fibreux et en l'absence de forces électrostatiques : la sédimentation, l'impaction inertielle, l'interception et la diffusion brownienne. Le tableau 3.2 donne des corrélations pour les différents mécanismes. Le tableau 3.3 regroupe les expressions du facteur hydrodynamique g(ε) les plus souvent employées.

Tableau 3.2 : Quelques modèles de l'efficacité unitaire de collecte par les différents mécanismes pour les lits granulaires.

Mécanisme	Paramètre	Modèle
Diffusion	$Pe = \frac{U_G\, d_C}{D_{diff}}$ $D_{diff} = \frac{k_B\, T\, Cu}{3\,\pi\,\mu_G\, d_p}$	$\eta_{Diffusion} = 4\ g(\varepsilon)\ Pe^{-2/3}$ (Tardos et al., 1978)
Interception	$R = \frac{d_p}{d_C}$	$\eta_{Interception} = 1{,}5\ g(\varepsilon)^3\ R^2$ (Mann et Goren, 1984)
		$\eta_{Interception} = 16\ R^{2-\frac{Re}{(Re^{1/3}+1)^3}}$ avec $Re = \frac{\rho_G\ U_G\, d_C}{\mu_G}$ (Otani et al., 1989)
Inertie	$St = \frac{Cu\ \rho_p\, d_p^2\ U_G}{9\ \mu_G\, d_C}$	$\eta_{Inertie} = 3{,}79\ St$ (Schmidt et al., 1978)
		$\eta_{Inertie} = \frac{St_{eff}^3}{0.014 + St_{eff}^3}$ avec $St_{eff} = St\left(1 + \frac{1{,}75\ Re\ \varepsilon}{150\ (1-\varepsilon)}\right)$ et $Re = \frac{\rho_G\ U_G\, d_C}{\mu_G}$ (Otani et al., 1989)
Sédimentation	$Gr = \frac{Cu\,(\rho_p - \rho_G)\, d_p^2\, g}{18\ \mu_G\, U_G}$	$\eta_{Sédimentation} = \frac{Gr}{1+Gr}$ (Lee, 1981)

Tableau 3.3 : Modèles du facteur hydrodynamique pour les lits granulaires (Tardos et al., 1978).

Champ d'écoulement utilisé	g(ε)
Happel	$g(\varepsilon) = \left[\frac{2\,(1-(1-\varepsilon)^{\frac{5}{3}})}{2-3(1-\varepsilon)^{\frac{1}{3}}+3\,(1-\varepsilon)^{\frac{5}{3}}-2\,(1-\varepsilon)^{2}}\right]^{\frac{1}{3}}$
Tam	$g(\varepsilon) = \left[\frac{2+1{,}5\,(1-\varepsilon)+1{,}5\,[8(1-\varepsilon)-3(1-\varepsilon)^{2}]^{0{,}5}}{\varepsilon\,[2-3(1-\varepsilon)]}\right]^{\frac{1}{3}}$
Kuwabara	$g(\varepsilon) = 1{,}07 + 3{,}43\,(1-\varepsilon)$
Wilson	$g(\varepsilon) = \frac{1{,}09}{\varepsilon}$

3.1.2. Ajout d'additif (conditionnement du gaz)

Un additif de filtration est un composé solide, liquide ou gazeux qui est injecté dans le flux gazeux à traiter en continu ayant pour but de former un gâteau de filtration plus perméable et plus facile à détacher. La technique d'ajout d'additif est très utilisée lors de la séparation des particules par précipitateurs électrostatiques. L'ajout de différents composés (vapeur d'eau, NaCl, SO_3, NH_3) a pour but de réduire la résistivité des poussières qui est un paramètre important pour ce type de séparateur (Shanthakumar et al., 2008). Un critère important lors de l'utilisation d'un additif est d'assurer une distribution uniforme dans le flux gazeux (Schmidt et Pilz, 1996). Miller et Laudal (1992) ont étudié la filtration des cendres volantes (particules microniques), issues de la combustion du charbon, avec des filtres à manches et en injectant des additifs gazeux (SO_3 et NH_3), avec des vitesses de filtration de 0,02-0,03 $m.s^{-1}$. Les concentrations gazeuses varient entre 6 et 24 ppm. L'ajout de ces additifs a permis d'améliorer l'efficacité de filtration, de diminuer la perte de charge et d'améliorer le décolmatage par jet pulsé. Cela a favorisé la formation d'un gâteau de filtration plus poreux avec une résistance spécifique moins importante. Les auteurs expliquent ces résultats par une meilleure cohésion entre les particules suite à l'adsorption des gaz sur leur surface.

Afin d'améliorer l'efficacité de filtration des particules ultrafines et diminuer la perte de charge associée, Zhang et al. (2016) ont étudié l'influence de l'humidification sur les performances de filtration en utilisant un filtre plan. L'humidification a été réalisée par deux méthodes : par l'injection de gouttelettes d'eau dans le flux gazeux (à l'aide d'un atomiseur ultrasonique) et par l'augmentation de l'humidité du gaz (ajout de vapeur). Le but est de favoriser la formation de ponts liquides entre les particules, à l'origine d'une restructuration du gâteau et d'une augmentation de la perméabilité. Les résultats montrent que pour les deux techniques utilisées une diminution importante de la perte de charge est observée. Cette diminution permet ainsi de réduire la fréquence de régénération de 50 à 78%. Les auteurs ont aussi optimisé les conditions de l'humidification avec un rapport particule/eau de 0,0282 $g.g^{-1}$ pour l'ajout de la vapeur et 1,53 $g.g^{-1}$ pour la méthode de l'injection des gouttelettes. La méthode de l'ajout de la vapeur, plus économe en eau, aboutit également à de meilleurs résultats, attribués à une humidification plus uniforme. Li et al. (2017) ont aussi étudié l'ajout de gouttelettes liquides (de diamètre compris entre 1 et 5 µm) en utilisant un filtre à manche. Ils ont observé que l'ajout de gouttelettes liquides permet de former un gâteau plus poreux avec une perte de charge moins importante, mais sans conséquence significative sur l'efficacité de collecte. De plus, la durée du cycle de filtration devient plus stable au cours des cycles colmatage/décolmatage. Par contre, lorsque la génération des

gouttelettes liquides se fait à un débit élevé la perte de charge augmente de façon considérable. Il y a donc un débit optimal (de 2,2 L.min^{-1} dans cette étude) à ne pas dépasser.

Zhang (2018) a étudié l'influence de l'ajout de particules de sel (particules hygroscopiques) sur la filtration des poussières avec un filtre plan. Les particules de sel ont deux propriétés qui sont liées à l'humidité : déliquescence et efflorescence. La déliquescence correspond au passage des particules à l'état liquide suite à l'augmentation de l'humidité par absorption d'eau. L'efflorescence a lieu lorsque l'humidité diminue ce qui provoque une évaporation de l'eau et une cristallisation du sel. Le but est de former des ponts solides entre les particules du gâteau de filtration afin de favoriser la cohésion. La méthode repose sur l'introduction des particules de NaCl dans le gâteau de filtration puis l'humidité de l'air est successivement augmentée et diminuée afin de causer la déliquescence et l'efflorescence. L'expérience a été effectuée avec du carbonate de calcium (diamètre modal de 3,1 µm) pour former le gâteau principal, suivie par la filtration des particules de sel qui sont plus fines (diamètre modal de 0,35 µm). La figure 3.3 montre l'influence sur la perte de charge de la mise en œuvre de ce protocole. Après la filtration des particules de sel, la succession entre déliquescence et l'efflorescence a permis de baisser la perte de charge du dépôt de particules. De plus, la régénération des filtres a mis en évidence un meilleur détachement du gâteau avec la mise en œuvre de cette technique.

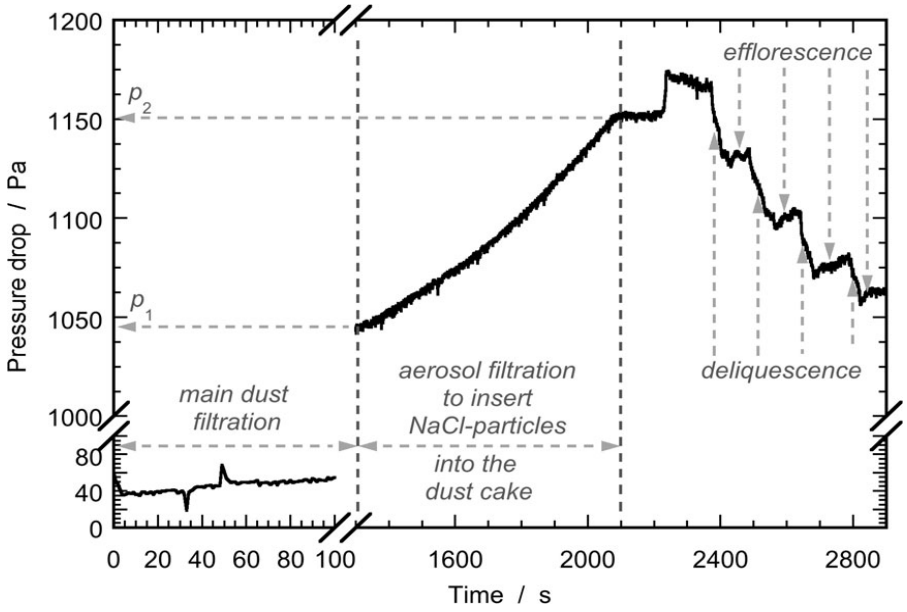


Figure 3.3 : Influence de l'introduction des particules de sel sur la perte de charge (Zhang, 2018).

Le conditionnement du filtre ou du gaz représente une solution pratique pour améliorer les performances de filtration. Cependant, il manque encore de données expérimentales afin d'optimiser l'utilisation de ces techniques et arriver à modéliser les performances. De plus, l'impact sur la régénération des filtres reste mal étudié. En effet, la variation de l'efficacité de décolmatage avec les différentes conditions opératoires est un point crucial pour le choix et l'optimisation de la technique. Dans cette partie expérimentale, seule la technique de précoating sera étudiée car elle représente la solution la plus simple à mettre en œuvre dans les sites d'activités métallurgiques.

3.2. Caractérisation expérimentale des performances de la technique de précoating

Le but de cette partie est d'évaluer l'influence de la couche de précoating sur les performances de filtration en termes de perte de charge, d'efficacité de collecte et d'efficacité de décolmatage. L'étude portera ainsi sur l'influence de différents paramètres tels que la nature de la poudre de précoating, l'épaisseur du précoating et les conditions opératoires.

3.2.1. Évaluation de l'efficacité de collecte de la couche de précoating

Afin d'évaluer l'efficacité initiale de collecte de la couche de précoating vis-à-vis des nanoparticules, le banc expérimental schématisé par la figure 3.4 a été développé. Pour cette section de l'étude la nature chimique des particules n'est pas d'importance comme le but est de déterminer l'efficacité initiale de collecte. Des nanoparticules de graphite sont générées par le générateur GFG 1000 (Palas®) par décharge électrique entre deux électrodes du matériau étudié dans une chambre en polyamide et en présence d'un courant d'azote sous pression. La distance entre les électrodes est de 2 mm et est maintenue constante au fur et à mesure que les électrodes sont consommées. Le matériau vaporisé par l'étincelle est ensuite évacué de la chambre par un courant d'azote et condensé en de très petites particules qui vont, selon leur concentration, s'agglomérer en des agglomérats de taille plus ou moins importante. Cette concentration est contrôlée par dilution de l'aérosol obtenu au moyen du courant d'air comprimé. Le débit massique de particules est ajusté par la variation de la fréquence d'étincelle. La figure 3.5 donne une schématisation de la chambre de génération. Le matériau utilisé durant les expériences est le graphite, les pressions de l'air et de l'azote ont été fixées à 1,5 et 1 bar respectivement et la fréquence d'étincelle à 100 Hz. Sous ces conditions, la distribution granulométrique en nombre des particules générées, mesurée par SMPS, est donnée par la figure 3.6.

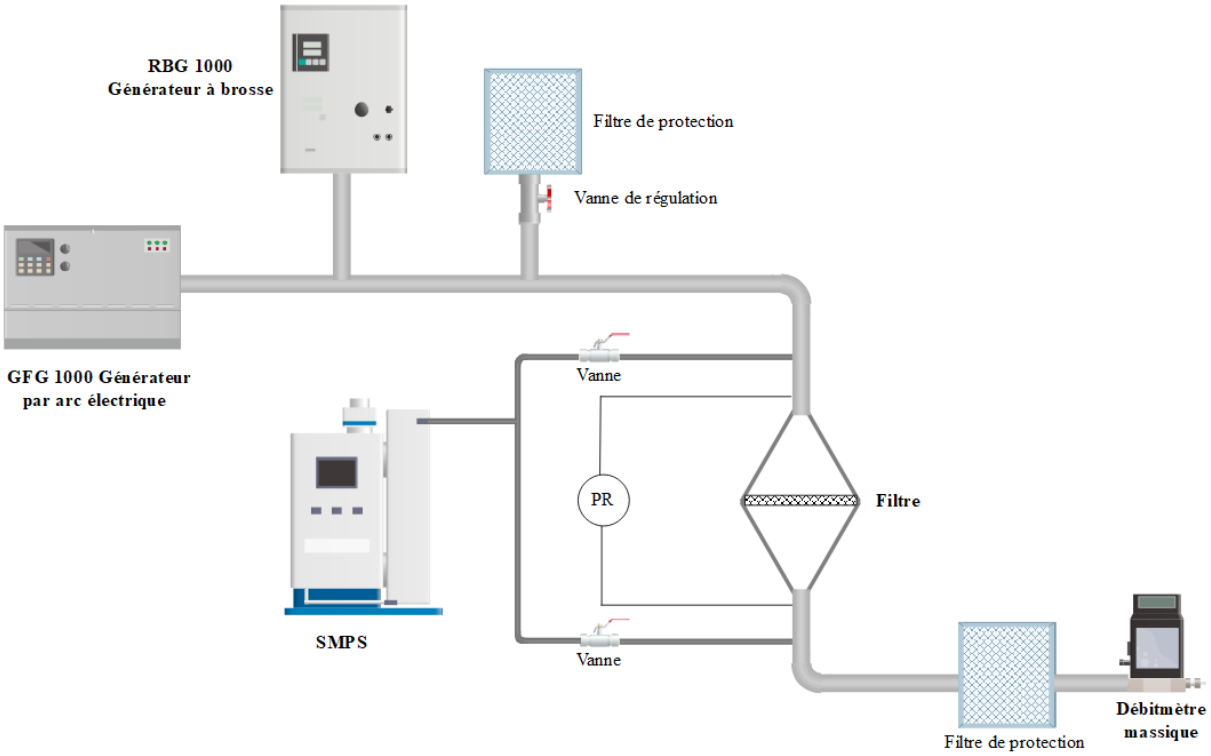


Figure 3.4 : Banc expérimental utilisé pour mesurer l'efficacité initiale de collecte du précoating.

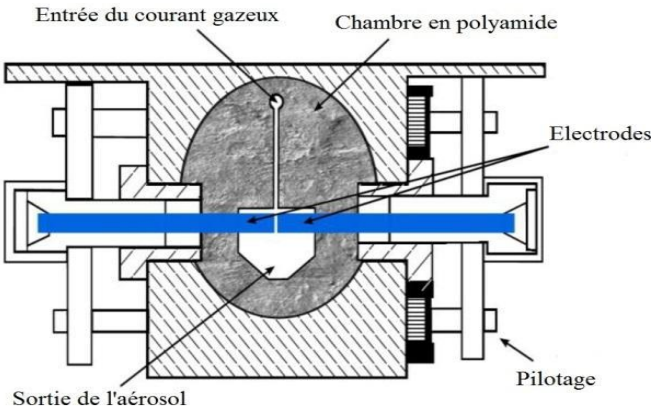


Figure 3.5 : Schéma représentatif de la chambre de génération du générateur GFG 1000.

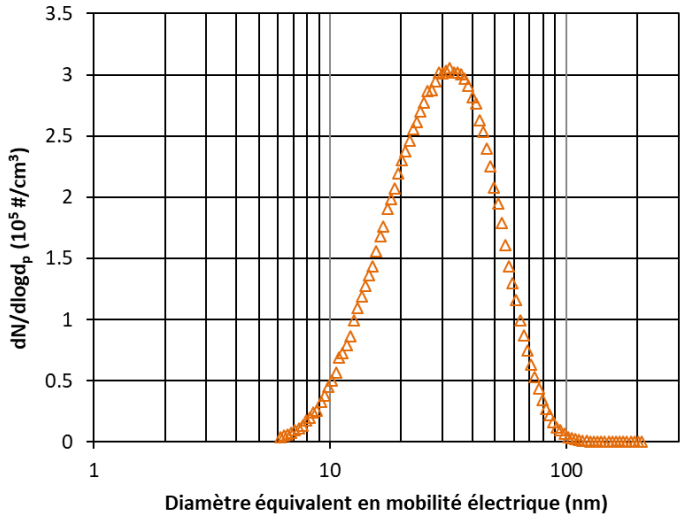


Figure 3.6 : Distribution en nombre de la taille des particules de carbone générées par le générateur GFG1000.

Le précoating est généré par un générateur à brosse tournante RBG 1000 (Palas®). La poudre mise dans un réservoir cylindrique est poussée par un piston vers une brosse en rotation. La vitesse de montée du piston d'alimentation permet d'ajuster le débit massique généré. La poudre est dispersée par de l'air comprimé qui balaie la surface de la brosse. L'aérosol généré est ensuite évacué à travers la tête de dispersion. La pression de l'air comprimé permet de régler le débit volumique injecté. Le principe de fonctionnement du générateur est schématisé par la figure 3.7. La pression d'air comprimé utilisée était de 2 bars avec une vitesse de montée du piston de 30 mm.h^{-1}. Différentes poudres de précoating, dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 3.4, ont été utilisées. Les poudres P1 et P2 sont des poudres commercialisées spécialement pour le précoating, tandis que la poudre P3 est une poudre métallique à base de zinc récupérée dans la trémie d'un cyclone présent sur l'installation. L'idée est de pouvoir valoriser le gâteau détaché après décolmatage vu qu'il ne sera constitué que de particules métalliques. En effet, des travaux dans la littérature ont démontré la faisabilité de réutiliser les poussières métalliques comme matières premières, après être passées par des procédés de traitement (Raupenstrauch et al., 2019; Liu et al., 2021).

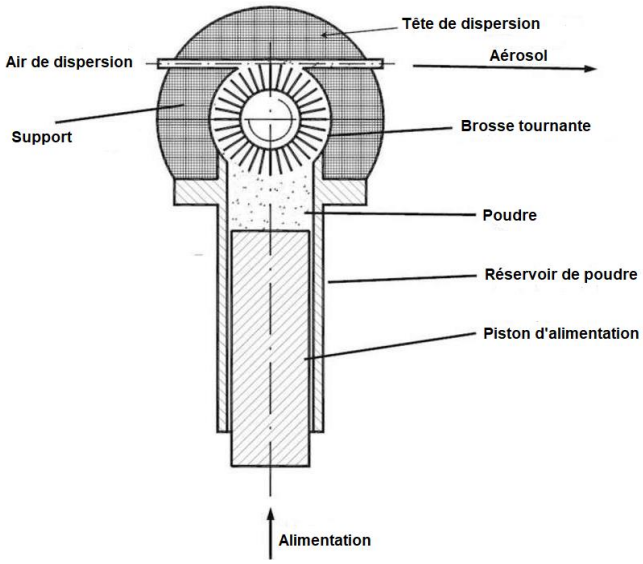


Figure 3.7 : Principe de fonctionnement du générateur RBG 1000.

Tableau 3.4 : Poudres de précoating utilisées.

Poudre	Composition	Masse volumique du matériau ($kg.m^{-3}$)
P1	SiO_2	2001
P2	$CaCO_3$	2669
P3	Zn	5093

Les distributions granulométriques en nombre des particules de précoating générées, mesurées par un Aerosol Particle Sizer (APS 3321, TSI®), sont données par la figure 3.8. Les distributions présentent un diamètre modal aérodynamique autour de 1 µm. Pour le précoating P3, la distribution est bimodale avec un autre mode autour de 3 µm. Un APS est un analyseur aérodynamique qui permet de classer les particules selon leur inertie. L'échantillon d'aérosol est accéléré en passant par un orifice, et en fonction de leur taille les particules auront des vitesses différentes. A la sortie de l'orifice, les particules passent par deux faisceaux laser et la lumière diffusée suite au passage d'une particule à travers chaque faisceau est captée par des photo-détecteurs. Le temps de vol nécessaire pour passer d'un faisceau à un autre permet de calculer la vitesse qui est liée au diamètre aérodynamique de la particule.

Quelques clichés des poudres par microscope électronique à balayage (MEB) sont présentés sur la figure 3.9. Les images montrent bien une différence de morphologie et de taille des particules. Les particules de la poudres P2 ont une forme sphérique, tandis que les particules de la poudre P1 ont des formes irrégulières.

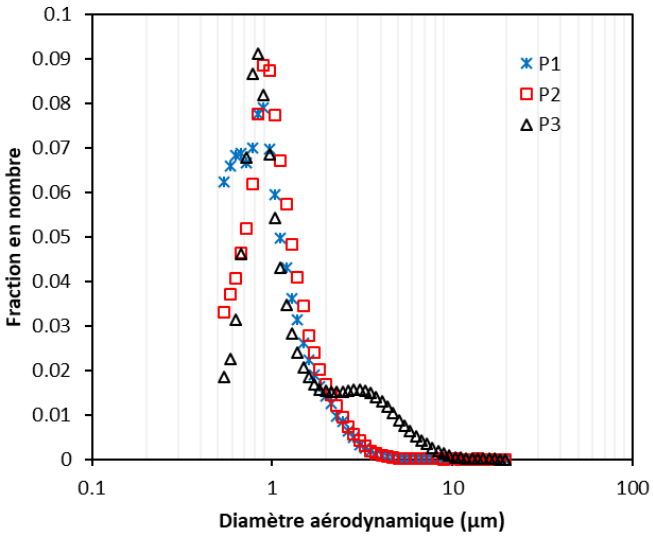


Figure 3.8 : Distribution granulométrique en nombre des particules de précoating générées par le générateur RBG 1000.

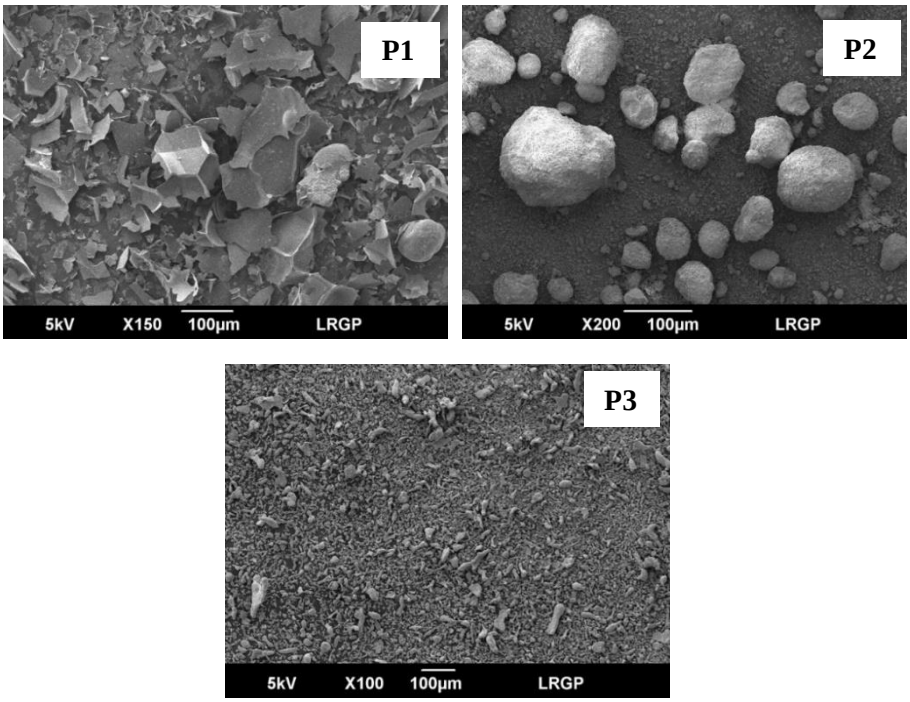


Figure 3.9 : Images MEB des poudres utilisées.

L'efficacité de collecte est déterminée par la relation suivante :

$$E = 1 - \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \tag{3.4}$$

où E est l'efficacité de collecte, C_{aval} et C_{amont} sont les concentrations en nombre en aval et en amont du filtre.

Les efficacités du filtre propre et du filtre avec précoating ont été déterminées. Cela a permis de calculer l'efficacité de collecte de la couche de précoating seule vis-à-vis des nanoparticules comme suit, en supposant deux filtres en série :

$$E_{Précoating} = 1 - \frac{1 - E_{tot}}{1 - E_{filtre}} \quad (3.5)$$

avec $E_{Précoating}$ l'efficacité de la couche de précoating seule, E_{tot} l'efficacité globale de collecte (couche+ filtre) et E_{filtre} l'efficacité du filtre propre. Cette efficacité a été mesurée pour différentes masses déposées de précoating et avec une vitesse de filtration de 2,5 cm.s^{-1}. La masse déposée a été déterminée en pesant le filtre à la fin de l'expérience avec une erreur qui ne dépasse pas 10%.

Les résultats obtenus avec les différents matériaux sont donnés sur la figure 3.10. L'efficacité de collecte pour les nanoparticules est assurée principalement par le mécanisme de diffusion brownienne. Ainsi, l'efficacité diminue avec l'augmentation de la taille des particules et atteint un minimum pour les particules d'un diamètre autour de 100 nm (région MPPS). La même tendance est observée sur toutes les figures, à savoir que l'augmentation de la masse déposée du précoating, c'est-à-dire l'augmentation de l'épaisseur, est associée à une amélioration de l'efficacité de collecte. Ceci est dû au fait que la couche de précoating représente un lit granulaire pour la collecte des particules ultrafines. Plus l'épaisseur est importante plus la probabilité de collecte des nanoparticules est accrue. La masse nécessaire pour assurer une efficacité proche de l'unité varie avec le matériau utilisé ce qui est lié aux différences de masse volumique et de porosité des dépôts formés. Les résultats montrent bien que l'application de précoating permet d'améliorer l'efficacité initiale de collecte.

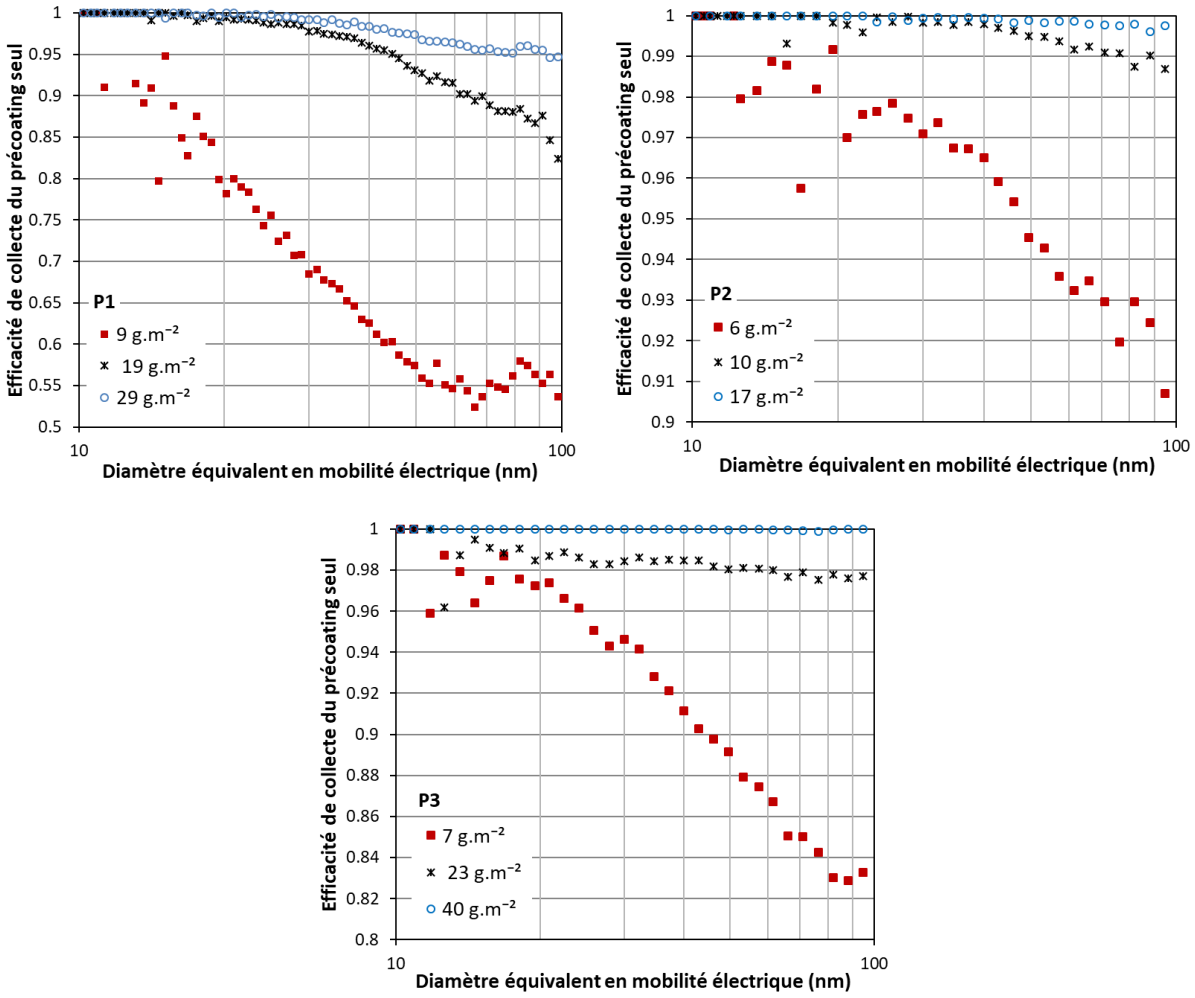


Figure 3.10 : Efficacité de collecte du précoating seul en utilisant les trois matériaux pour différentes masses surfaciques et pour une vitesse de filtration de 2,5 cm.s^{-1}.

3.2.2. Mesure de l'épaisseur du précoating et modélisation de l'efficacité de collecte

Avoir une estimation de l'épaisseur de la couche de précoating est d'importance afin de pouvoir prédire ses performances en termes de perte de charge et efficacité de collecte (voir équations 3.1 et 3.2). L'épaisseur de la couche de précoating a été déterminée en utilisant une méthode de trigonométrie laser. Cette méthode consiste à mesurer le déplacement d'un spot laser sur une surface dont l'épaisseur varie. Afin d'accroître la précision, le spot laser a été remplacé par une nappe laser qui forme une ligne lumineuse à la surface du gâteau. Le déplacement de cette ligne permet de moyenner l'épaisseur sur une longueur donnée car la surface du gâteau est généralement rugueuse. La prise de photos au cours de la filtration permet d'accéder à l'évolution de l'épaisseur en fonction du temps de filtration. Un logiciel spécifiquement développé dans une étude précédente (Ribeyre, 2015) pour analyser les images permet de déterminer le déplacement ΔL du laser suite à la croissance du gâteau. Le laser impacte la surface du gâteau avec un angle Ψ de 8,05° et la variation d'épaisseur du gâteau ΔH est obtenue comme suit :

$$\Delta H = \Delta L \tan(\Psi) \tag{3.6}$$

Le précoating a été généré avec le générateur à brosse tournante RBG 1000 (Palas®), avec une pression de l'air comprimé de 2 bars et une vitesse de montée du piston de 200 $mm.h^{-1}$. Une partie de l'aérosol généré est aspirée par une pompe vers le dispositif. Les particules se déposent à la surface d'une membrane à haute efficacité ce qui permet d'éviter la filtration en profondeur. Toute variation enregistrée sera ainsi liée à la croissance du gâteau de filtration. La vitesse de filtration a été fixée, à l'aide d'une tuyère sonique, à 3 $cm.s^{-1}$. La figure 3.11 permet de schématiser le banc expérimental utilisé. La mesure a été réalisée en utilisant les 3 poudres données par le tableau 3.4.

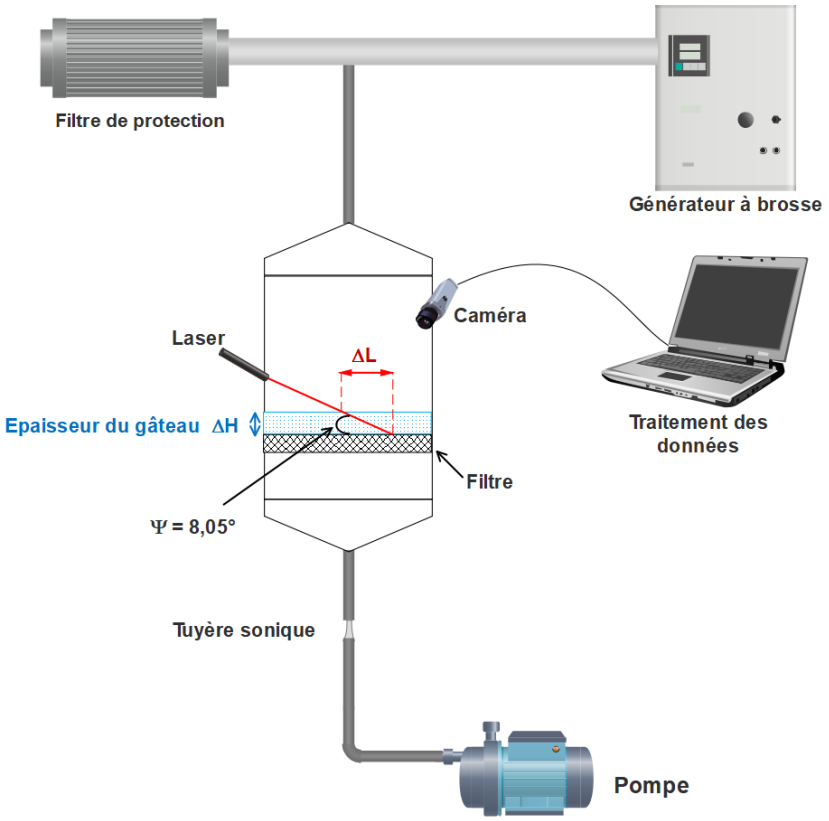


Figure 3.11 : Schéma représentatif du banc expérimental utilisé pour la mesure de l'épaisseur de la couche de précoating.

Avant de procéder à la mesure de l'épaisseur du gâteau de filtration, une vérification de la fiabilité de la méthode a été réalisée. Pour cela des étalons de différentes épaisseurs ont été préparés (couches successives de ruban adhésif) et leurs épaisseurs ont été mesurées avec un pied à coulisse numérique. La figure 3.12 permet de comparer l'épaisseur mesurée avec le pied à coulisse et celle calculée par le logiciel en utilisant la méthode trigonométrique. Les résultats montrent que cette méthode donne une bonne estimation avec une erreur de 10 % pour les épaisseurs importantes et une erreur de 20 % pour les épaisseurs inférieures à 500 µm. Des étalons avec des épaisseurs inférieures à 100 µm n'ont pas pu être obtenus.

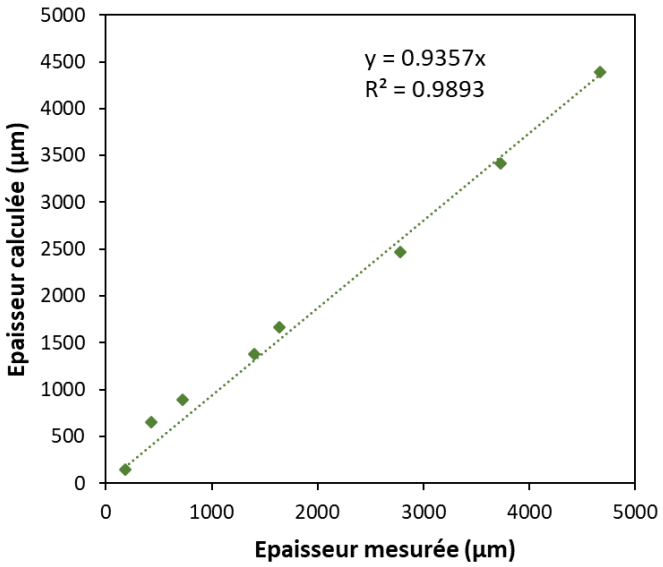


Figure 3.12 : Comparaison de l'épaisseur mesurée avec le pied à coulisse et celle calculée par la méthode laser.

Les résultats de la variation de l'épaisseur du gâteau de filtration en fonction de la masse déposée en utilisant les 3 poudres sont donnés par la figure 3.13. La masse déposée a été déterminée par pesée, avec une marge d'erreur inférieure à 10%. La tendance linéaire enregistrée permet d'obtenir l'équation qui traduit l'augmentation de l'épaisseur du gâteau de filtration avec la masse déposée. Il est important de noter que pour les poudres P1 et P2, il était difficile d'obtenir des points cohérents avec des masses déposées inférieures à 20 $g.m^{-2}$. Le gâteau n'est pas parfaitement uniforme pour de faible épaisseur ce qui rend en effet l'analyse d'images moins sensible. De plus, la couleur blanche des poudres (identique à celle de la membrane) crée une source d'erreur additionnelle. L'épaisseur obtenue avec la poudre P3 pour une masse déposée donnée est plus importante que les autres, malgré une masse volumique plus élevée. Le gâteau formé est donc plus poreux ce qui est cohérent avec la nature de la poudre issue de l'agglomération de particules ultrafines.

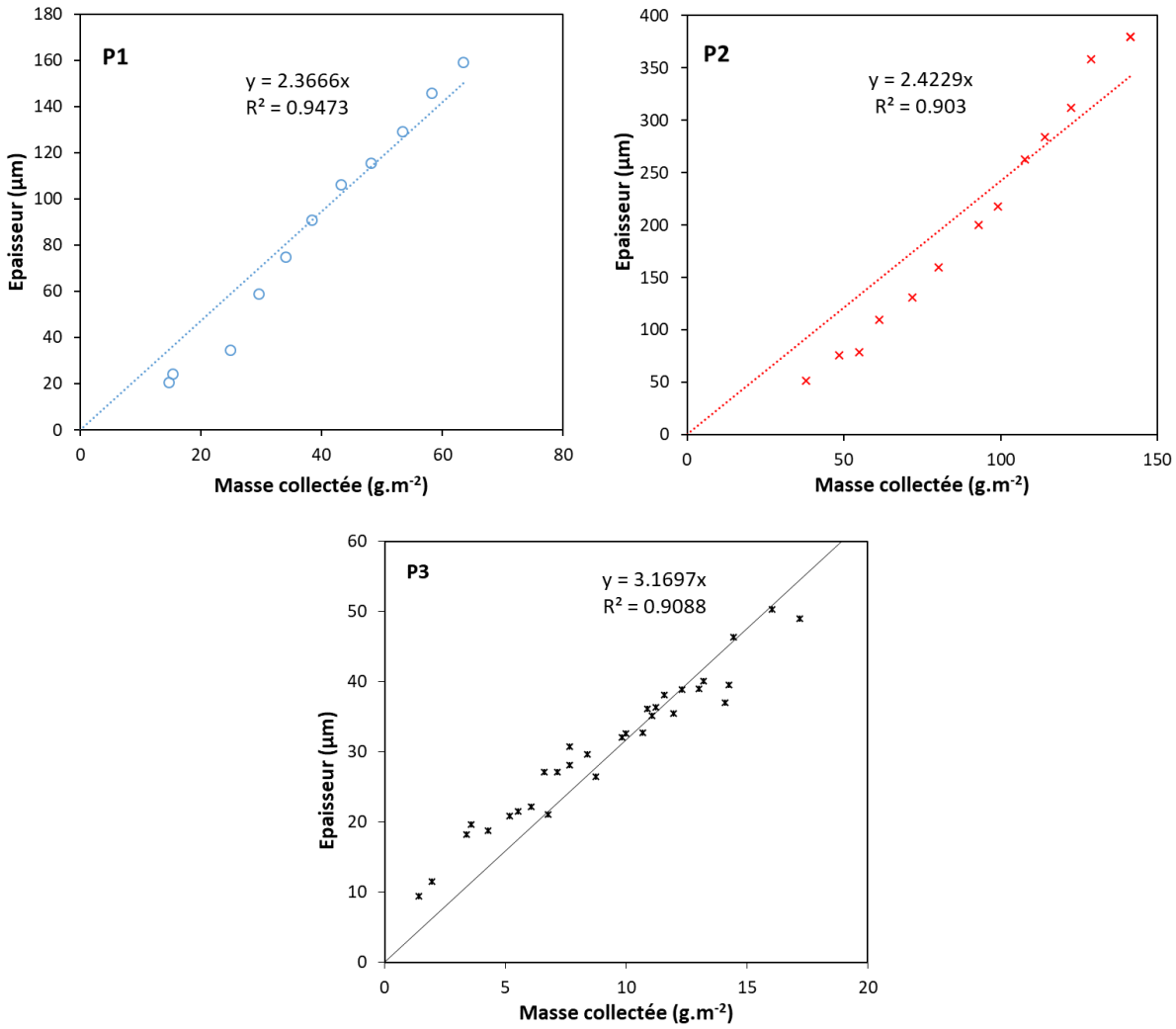


Figure 3.13 : Variation de l'épaisseur du gâteau avec la masse déposée pour les trois poudres et pour une vitesse de filtration de 3 cm.s^{-1}.

La détermination de l'épaisseur de la couche de précoating permet de calculer la porosité comme suit :

$$\varepsilon = 1 - \frac{W}{\rho_p \, \Delta H} \tag{3.7}$$

où ε est la porosité, W la masse collectée par unité de surface, ρ_p la masse volumique de la particule et ΔH l'épaisseur de la couche. A partir des résultats précédents, les porosités des couches de précoating sont données par le tableau 3.5.

Tableau 3.5 : Porosités des couches de précoating à 3 cm.s^{-1}.

Poudre	Masse volumique du matériau (kg.m^{-3})	Porosité
P1	2001	0,78
P2	2669	0,84
P3	5093	0,93

Connaissant la distribution granulométrique en nombre du précoating et la porosité des couches formées, il est possible d'utiliser le modèle du lit granulaire (équation 3.2) pour estimer l'efficacité de collecte de la couche. Pour la collecte de nanoparticules, seuls les mécanismes d'interception et de diffusion brownienne sont considérés. Les modèles utilisés pour estimer l'efficacité unitaire par diffusion

brownienne et par interception sont respectivement ceux de Tardos et al. (1978) et celui de Mann et Goren (1984) (voir tableau 3.2). Le facteur hydrodynamique employé correspond au champ d'écoulement de Wilson (voir tableau 3.3). Le diamètre des collecteurs (d_C) est le diamètre médian en nombre de la distribution granulométrique du précoating.

Les résultats de la modélisation sont donnés par la figure 3.14. Pour la poudre P1, la prédiction n'est pas satisfaisante, notamment pour les faibles masses pour le gâteau est moins homogène. Pour les poudres P2 et P3 la modélisation permet d'estimer l'efficacité avec une erreur qui ne dépasse pas 5 %. Cela est remarquable tenant compte des incertitudes de mesures sur l'épaisseur de la couche, la porosité et le diamètre des collecteurs. Cette relation théorique peut donc être employée pour déterminer, a priori, la masse de précoating nécessaire (c.-à-d. l'épaisseur) afin d'obtenir une efficacité proche de l'unité.

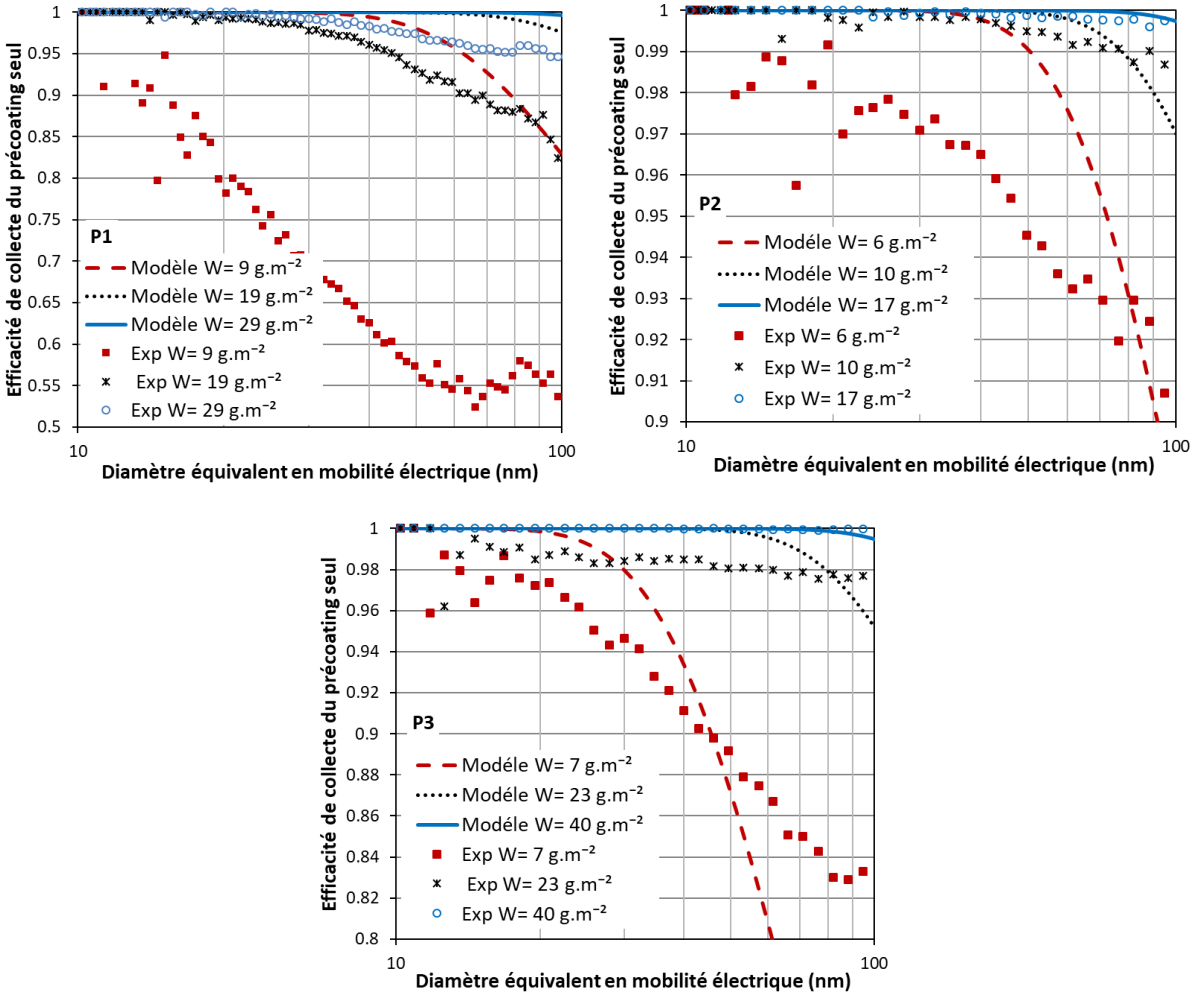


Figure 3.14 : Modélisation de l'efficacité de collecte de la couche pour les trois poudres avec une vitesse de filtration de 2,5 cm.s^{-1} (P1 : d_C= 1,11 µm, ε_g= 0,78 ; P2 : d_C= 0,95 µm, ε_g= 0,84; P3 : d_C= 1,02 µm, ε_g= 0,93).

3.2.3. Évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules métalliques

L'évolution de la perte de charge durant le colmatage avec les nanoparticules métalliques a été enregistrée sans et avec précoating, le banc expérimental utilisé est donné par la figure 3.15. Le précoating a été appliqué avant la filtration des nanoparticules métalliques avec le générateur à brosse tournante (RBG 1000, Palas®), en utilisant une pression de l'air comprimé de 2 bars et une vitesse de montée du piston de 200 mm.h^{-1}. Le précoating généré est envoyé vers un filtre de protection, et une

partie de l'aérosol généré est aspirée par une pompe vers le filtre plan de 14 cm de diamètre. Le débit est établi au moyen d'une tuyère sonique et la vitesse de filtration a été fixée à 3 $cm.s^{-1}$. Le précoating n'a pas été directement injecté à partir du générateur dans le porte-filtre afin d'éviter les dépôts indésirables dans la canalisation et d'assurer la formation d'un gâteau homogène. Les nanoparticules métalliques sont générées avec le procédé de métallisation à arc électrique, comme présenté dans le chapitre 2. La masse de précoating déposée, ainsi que la masse de nanoparticules métalliques collectées sont déterminées par pesée avec une erreur qui ne dépasse pas 10%. La perte de charge est enregistrée avec un capteur de pression différentielle (0-5000 Pa) (Keller®).

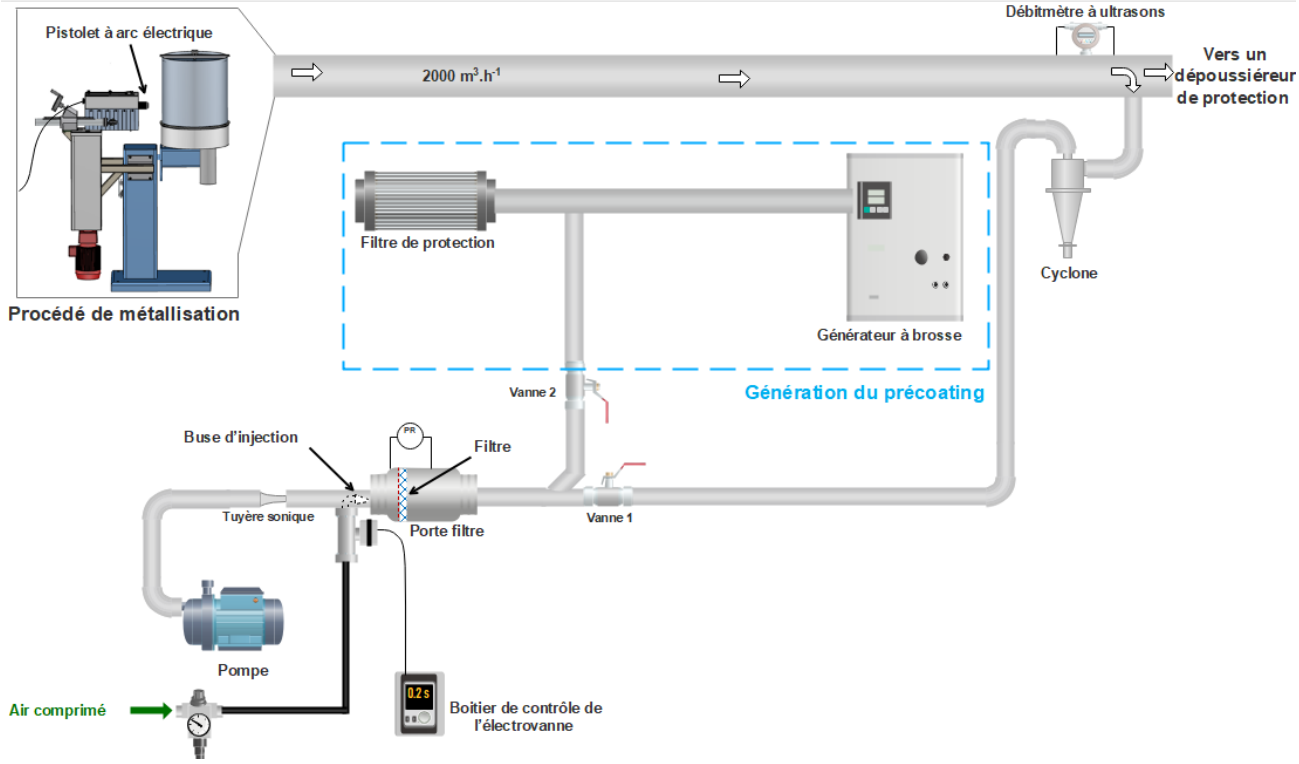


Figure 3.15 : Banc expérimental pour l'application du précoating sur filtres plans.

La perte de charge du précoating seul en fonction de la masse déposée, pour les trois matériaux, est représentée en figure 3.16. Cette perte de charge a été obtenu en soustrayant la perte de charge du filtre propre à la perte de charge enregistrée. Il apparait clairement que le matériau qui engendre le plus de perte de charge est la poudre P2 alors que la poudre P3 possède une perte de charge moins importante. En effet, la couche de précoating formée avec la poudre P3 présente une porosité élevée (tableau 3.5), indiquant une perméabilité plus importante. De plus, la différence des tailles, formes et densités des particules explique les écarts observés. En générale, pour une couche de précoating d'une masse surfacique de 30 $g.m^{-2}$ la perte de charge de la couche est inférieure à 200 Pa.

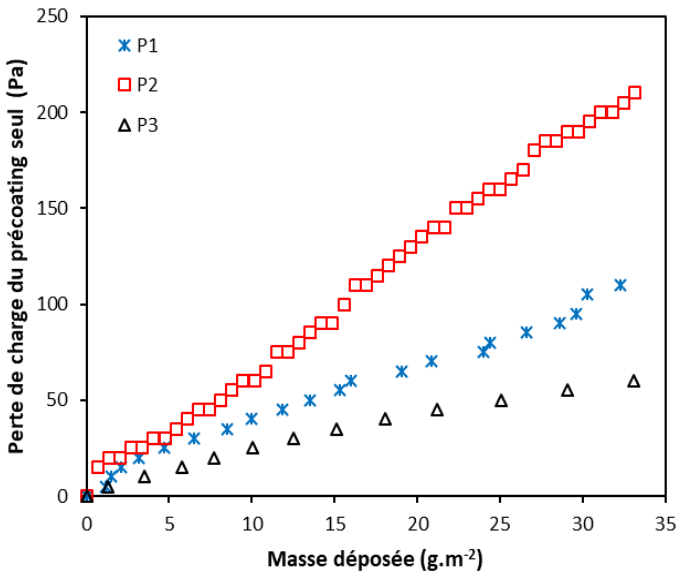


Figure 3.16 : Perte de charge de la couche de précoating seul en fonction de la masse déposée.

L'évolution de la perte de charge en fonction de la masse collectée de nanoparticules métalliques et pour différentes masses de précoating avec les trois matériaux est donnée par la figure 3.17. Sans précoating, l'évolution de la perte de charge est linéaire indiquant la formation d'un gâteau de filtration en surface. La même tendance est observée avec les trois matériaux, à savoir qu'une augmentation de l'épaisseur du précoating est associée à une diminution de l'évolution de la perte de charge. En effet, le précoating constitue un élément filtrant additionnel pour la collecte des nanoparticules, augmentant ainsi la capacité de rétention. Il peut être observé que pour une même perte de charge finale, la masse collectée devient jusqu'à trois fois plus importante que celle sans précoating. Des résultats similaires ont été observés par Charvet et al. (2018) lors de l'étude de l'association d'un filtre de moyenne efficacité avec un filtre à très haute efficacité (THE). Les auteurs ont noté une diminution de la résistance à l'écoulement grâce à la filtration en profondeur dans le média à moyenne efficacité qui a permis de retarder la filtration en surface dans le filtre THE. La couche de précoating, considérée comme un lit granulaire, collecte les nanoparticules en profondeur. Plus l'épaisseur est importante, plus la probabilité pour les nanoparticules d'atteindre la surface du filtre diminue et plus le volume disponible pour la collecte des nanoparticules en profondeur augmente, comme schématisé dans la figure 2.18. Ce phénomène explique les évolutions de la perte de charge avec précoating.

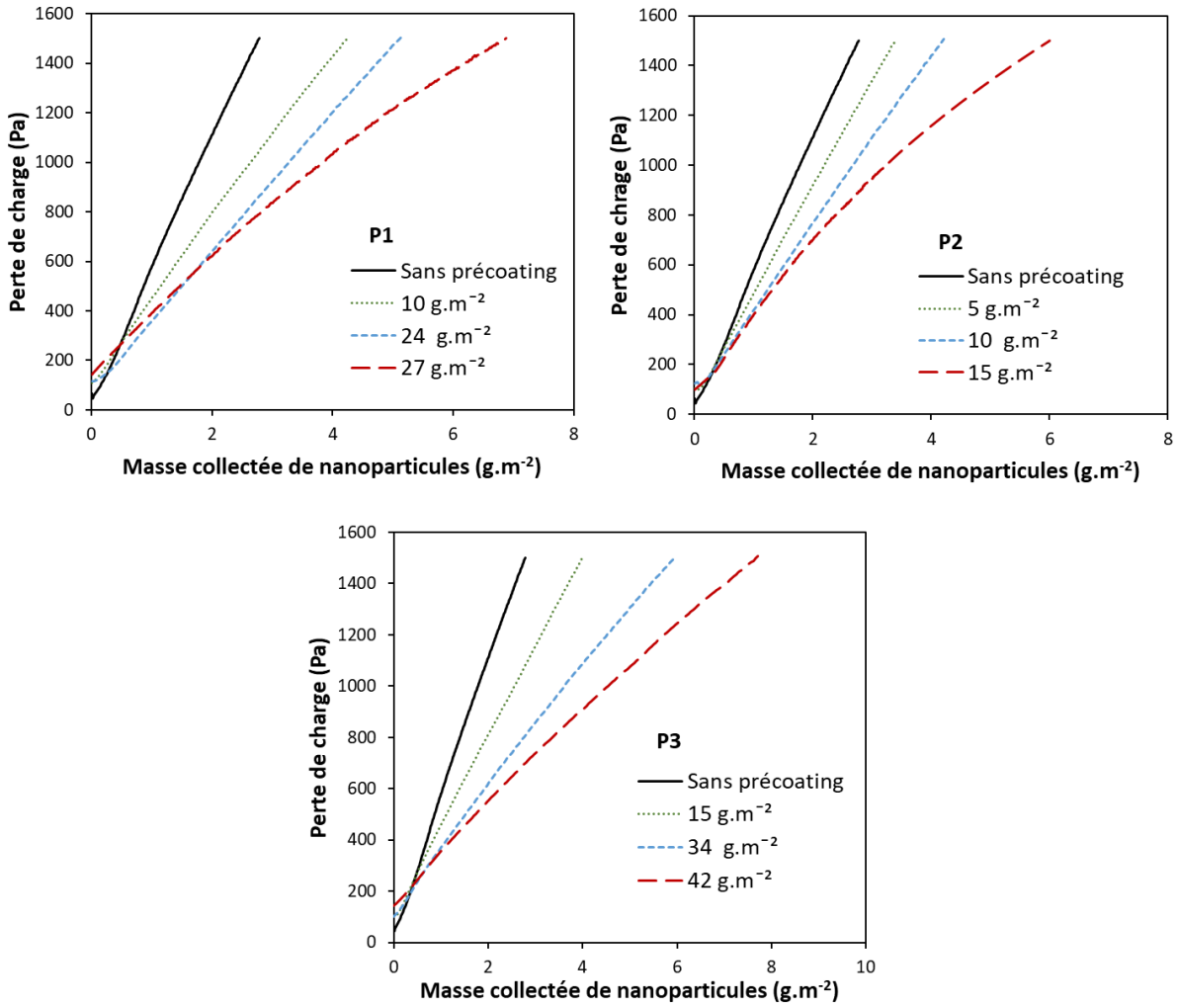


Figure 3.17 : Évolution de la perte de charge durant le colmatage avec les nanoparticules métalliques en utilisant les trois matériaux et pour une vitesse de filtration de 3 cm.s^{-1}.

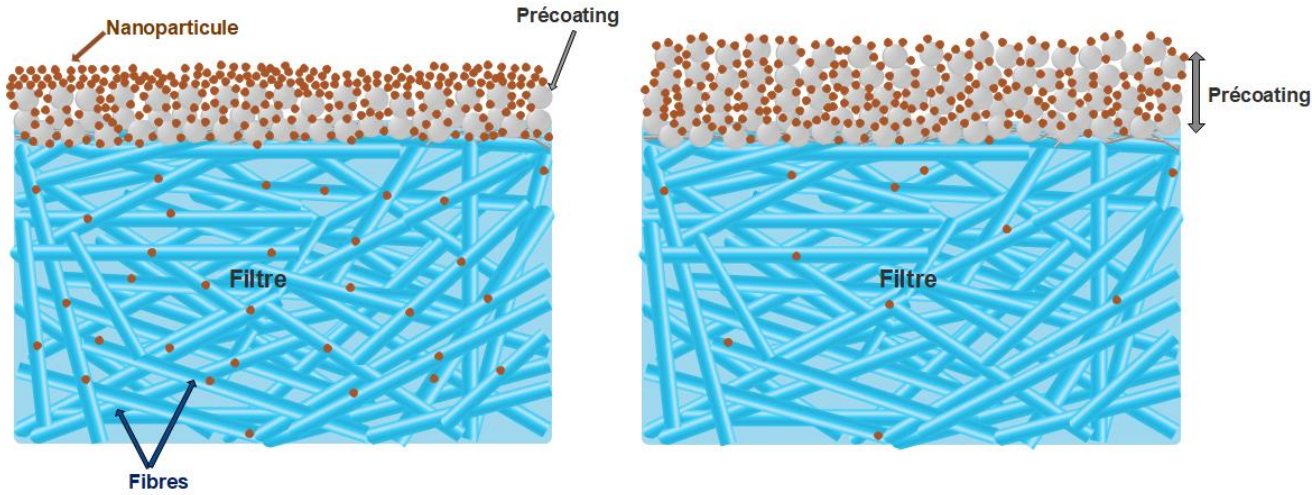


Figure 3.18 : Schématisation de l'effet de l'augmentation de l'épaisseur du précoating sur la capacité de rétention de nanoparticules.

3.2.4. Amélioration de l'efficacité de décolmatage avec précoating

Les essais d'efficacité de décolmatage ont été réalisés sur filtres plans de 14 cm de diamètre avec le banc présenté par la figure 3.15. Comme pour les expériences précédentes, le précoating a été appliqué avant la filtration des nanoparticules métalliques et la vitesse de filtration a été fixée à 3 $cm.s^{-1}$. Le décolmatage est réalisé par jet pulsé avec une buse de 3 mm de diamètre et pour différentes pressions d'air comprimé : 2 et 4 bars. Le temps d'ouverture de la buse d'injection a été fixé à 0,2 s. L'efficacité de décolmatage a été évaluée par rapport à la masse détachée R_M en pesant le filtre avant et après décolmatage :

$$R_M = \frac{\text{Masse détachée}}{\text{Masse initiale du gâteau}} \tag{3.8}$$

Le décolmatage a été réalisé pour différentes valeurs de la perte de charge maximale avant décolmatage, c'est-à-dire pour différentes masses collectées de nanoparticules métalliques, qui peuvent être déduites à partir de la figure 3.17.

Pour les 3 poudres, les résultats montrent que de faibles épaisseurs de précoating, par exemple avec un dépôt de 5 $g.m^{-2}$ avec le précoating P2, ne sont pas suffisantes pour assurer un décolmatage efficace (figure 3.19). La précouche doit être d'une épaisseur suffisante afin d'empêcher les nanoparticules de pénétrer au sein du filtre. Ainsi, une épaisseur qui possède une efficacité initiale de collecte proche de l'unité semble être adéquate. Les résultats montrent aussi l'effet bénéfique de la masse collectée de nanoparticules métalliques. Il est clair qu'en augmentant la perte de charge maximale avant décolmatage, l'efficacité de décolmatage devient meilleure. Zhang et Schmidt (2012) ont rapporté des résultats similaires lorsqu'ils ont étudié l'application d'un post-coating. Les auteurs avaient étudié la filtration de particules plus fines sur un gâteau de filtration composé de particules grossières. Ces particules fines permettent d'augmenter les forces de cohésion au sein du gâteau, favorisant ainsi son détachement.

Les résultats expérimentaux montrent aussi qu'il est possible de réduire la pression de l'air de décolmatage de 4 à 2 bars en augmentant sensiblement la masse de précoating. Ceci peut être d'intérêt pour réduire la consommation d'air comprimé. La seule différence observée entre les différents matériaux est la masse nécessaire à appliquer qui s'explique par les caractéristiques du gâteau formé (porosité) et la masse volumique du matériau. Une amélioration significative de l'efficacité de décolmatage est observée puisque celle-ci passe de 15% sans précoating à 90% avec précoating. Les résultats obtenus avec la poudre P3 sont extrêmement intéressants, étant donné que la poudre a été récupérée dans une trémie de cyclone et le dépôt détaché est formé uniquement de particules métalliques. Pour la poudre P1 la masse idéale semble proche de 25 $g.m^{-2}$ et dépasse 15 $g.m^{-2}$ pour P2, tandis que pour la poudre P3 elle est de 40 $g.m^{-2}$.

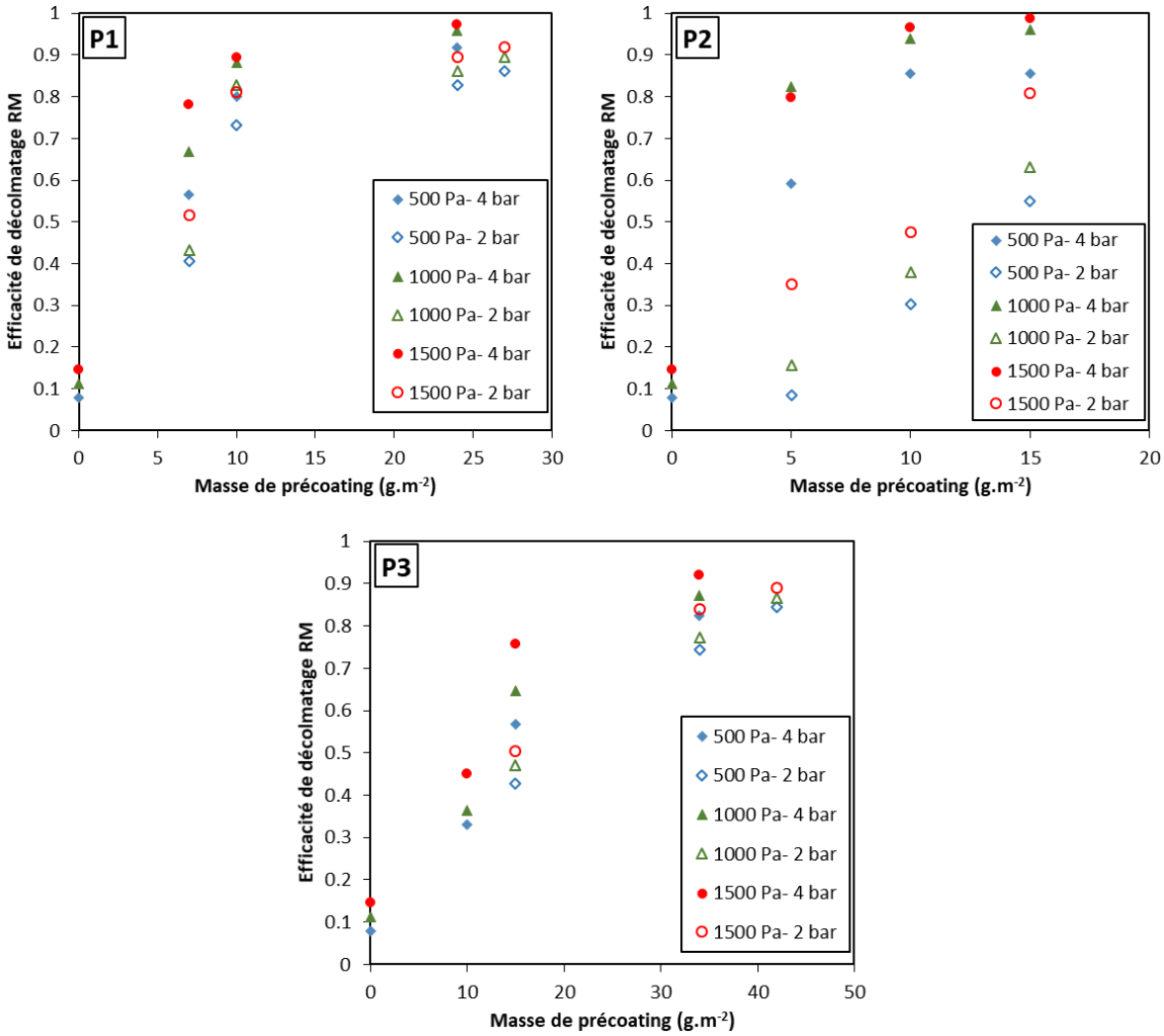


Figure 3.19 : Variation de l'efficacité de décolmatage avec l'épaisseur du précoating en utilisant les trois poudres pour différentes masses collectées de nanoparticules métalliques et différentes pressions de l'air de décolmatage.

Au vu de la faible influence du type de précoating, des cycles colmatage/décolmatage ont été réalisés uniquement avec la poudre P1 pour une masse de 24 g.m^{-2}. La perte de charge maximale avant décolmatage a été fixée à 1500 Pa. Dans une première expérience, les cycles colmatage/décolmatage ont été réalisés avec une application initiale de précoating, i.e. sans ré-application de la précouche après décolmatage et sans arrêter la génération de nanoparticules durant le décolmatage. En effet, après décolmatage, une monocouche de particules de précoating reste toujours sur la surface du filtre, comme le montre la figure 3.20, ce qui nous a mené à nous poser la question sur sa capacité à stabiliser le processus de filtration.

Les résultats de la figure 3.21 montrent bien la nécessité de renouveler la précouche après chaque décolmatage. Les résultats sont cependant nettement meilleurs que ceux sans précoating, où les valeurs de la perte de charge résiduelle sont très importantes indiquant un décolmatage inefficace par plaques.

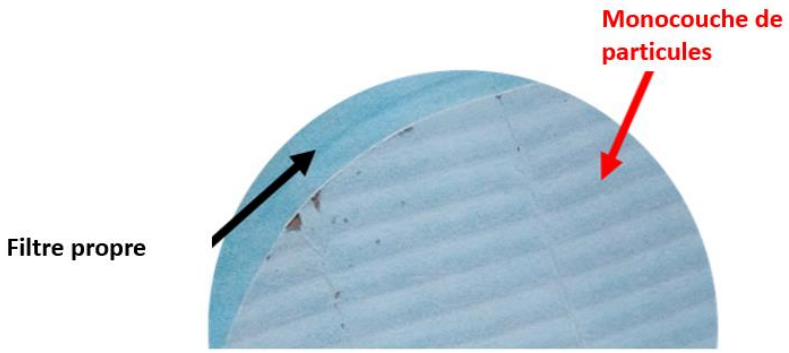


Figure 3.20 : Photo de la monocouche de particules de précoating qui reste adhérée sur la surface du filtre après décolmatage.

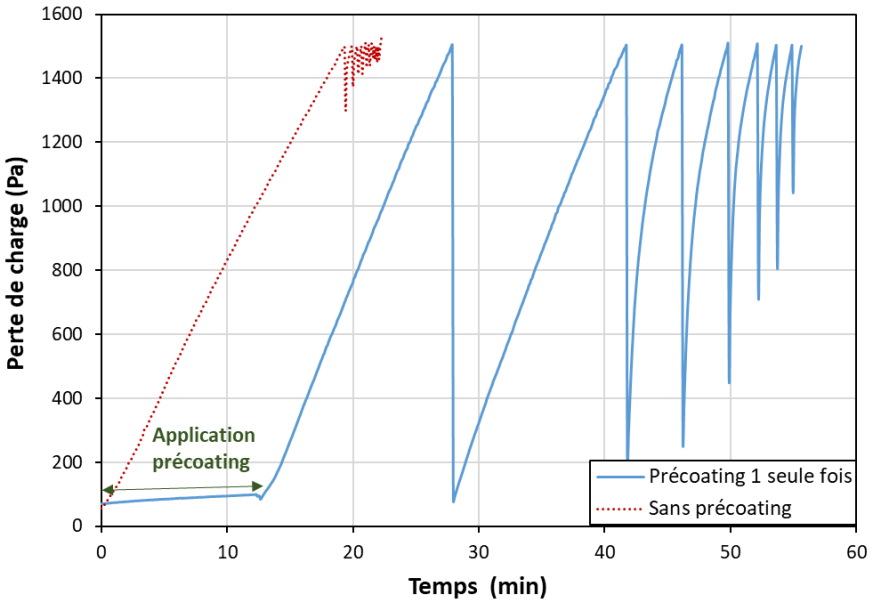


Figure 3.21 : Cycles colmatage/décolmatage après une unique application du précoating P1 avec une masse de 24 $g.m^{-2}$, une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$ et une pression de l'air de décolmatage de 4 bars.

La même expérience a été réalisée en réappliquant le précoating après chaque décolmatage et en arrêtant la génération des nanoparticules durant le décolmatage. Les résultats, présentés sur la figure 3.22, montrent une stabilisation du processus de filtration grâce au précoating. Un décolmatage efficace est obtenu durant chaque cycle. Une légère augmentation de la perte de charge résiduelle au cours des cycles peut néanmoins être observée ce qui peut être dû à l'accumulation des masses non détachées sur le filtre.

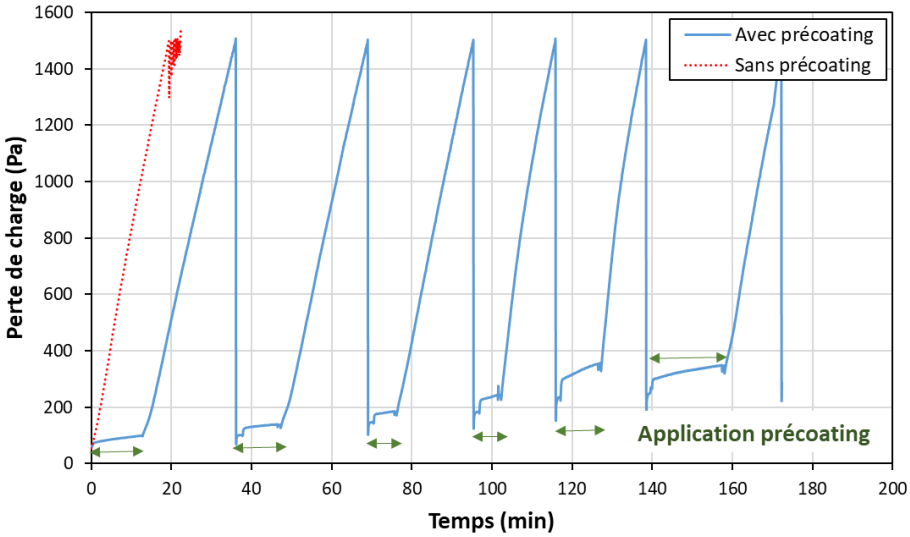


Figure 3.22 : Cycles colmatage/décolmatage avec application du précoating P1 avec une masse de 24 $g.m^{-2}$, une vitesse de filtration de 3 $cm.s^{-1}$ et une pression de l'air décolmatage de 4 bars.

Opérer avec des systèmes de filtration à haute vitesse est intéressant en industrie car implique la réduction de la surface de filtration, et par conséquent une réduction des coûts d'investissement. La même expérience que la précédente a ainsi été réalisée à une vitesse de filtration de 8 $cm.s^{-1}$. La perte de charge maximale avant décolmatage a été fixée à 2000 Pa. Pour pouvoir comparer les expériences réalisées à des vitesses différentes, les résultats, figures 3.23 et 3.24, sont représentés comme le rapport de la perte de charge résiduelle (ΔP_r) sur la vitesse (U_G) en fonction du nombre de cycles et le rapport entre le temps de cycle et la durée du premier cycle en fonction du nombre de cycles. Les données mettent en évidence qu'il est possible d'augmenter la vitesse de filtration sans influencer la stabilité du processus de filtration. Aucune différence significative des performances de décolmatage n'a été enregistrée entre 3 $cm.s^{-1}$ et 8 $cm.s^{-1}$. Il faut noter que l'augmentation de la vitesse sera associée à une diminution de l'efficacité de collecte puisque pour les nanoparticules le mécanisme dominant reste la diffusion brownienne, où l'efficacité unitaire est inversement proportionnelle à la vitesse.

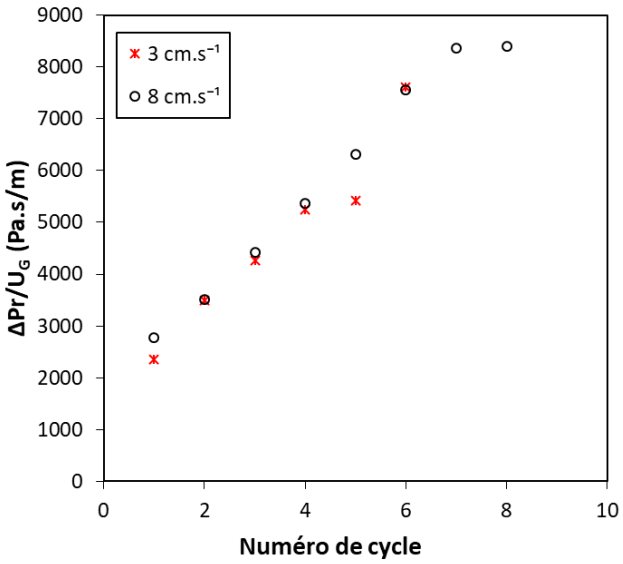


Figure 3.23 : Variation du rapport de la perte de charge résiduelle sur la vitesse au cours des cycles pour différentes vitesses de filtration.

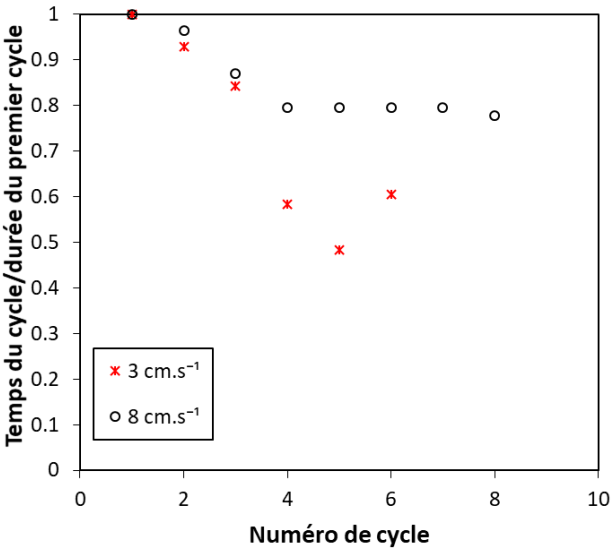


Figure 3.24 : Variation du temps de cycle par rapport au premier cycle au cours des cycles pour différentes vitesses de filtration.

Conclusion

Les résultats de cette section de l'étude constituent une évaluation complète des performances de filtration de la couche de précoating en termes d'efficacité de collecte, de perte de charge et d'efficacité de décolmatage. En effet, cette couche peut être assimilée à un lit granulaire, permettant de collecter les nanoparticules en profondeur. Plus l'épaisseur de la couche est importante, plus l'efficacité de collecte augmente. Cela a ainsi un effet bénéfique sur l'évolution de la perte de charge durant le colmatage par les nanoparticules. La collecte en profondeur permet de retarder la formation d'un dépôt en surface, ce qui se traduit par une évolution plus lente de la perte de charge, associée à une augmentation de la capacité de rétention des nanoparticules. Quant à l'efficacité de décolmatage, les expériences ont montré une amélioration significative de l'efficacité de décolmatage par jet pulsé, avec un passage de 15 % sans précoating à 90% avec précoating. L'épaisseur de la couche est là encore un paramètre important afin d'assurer un bon décolmatage, cette dernière doit être suffisamment épaisse pour empêcher les nanoparticules de pénétrer à la surface du filtre et éviter un colmatage irréversible. Les essais ont aussi révélé que le choix du matériau de précoating n'a pas une influence significative sur les performances de filtration, mais affecte les caractéristiques de la couche formée en termes de porosité et d'épaisseur. L'optimisation des conditions de décolmatage, avec application de précoating, peut rendre cette technique plus intéressante pour une application industrielle. En effet, les résultats ont montré qu'il est possible de réduire la pression de l'air de décolmatage avec l'augmentation de la masse déposée de précoating et la masse collectée de nanoparticules. De plus, l'augmentation de la vitesse de filtration n'affecte pas les performances de décolmatage.

Finalement, les cycles colmatage/décolmatage réalisés sur filtres plans ont mis en évidence que l'application de précoating permet de stabiliser le processus de filtration, à condition de réappliquer la couche de précoating après chaque décolmatage. La prochaine étape sera de valider les résultats obtenus en réalisant des essais sur cartouches industrielles, afin de vérifier l'applicabilité de cette solution dans des conditions réelles.

Références

Bémer, D., Régnier, R., Morele, Y., Grippari, F., Appert-Collin, J.C., Thomas, D., 2013. Study of clogging and cleaning cycles of a pleated cartridge filter used in a thermal spraying process to filter ultrafine particles. Powder Technol. 234, 1–6. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.09.035

Charvet, A., Pacault, S., Bourrous, S., Thomas, D., 2018. Association of fibrous filters for aerosol filtration in predominant Brownian diffusion conditions. Sep. Purif. Technol. 207, 420–426. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.045

Förster, H., Thajudeen, T., Funk, C., Peukert, W., 2016. Separation of nanoparticles: Filtration and scavenging from waste incineration plants. Waste Manag. 52, 346–352. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.050

Gal, E., Tardos, G., Pfeffer, R., 1985. A study of inertial effects in granular bed filtration. AIChE J. 31, 1093–1104. https://doi.org/10.1002/aic.690310707

Goodfellow, H.D., Geren, R.J., Foord, E.F.C., 1978. Application of fabric filters at high air-to-cloth ratios on metallurgical fumes, in: The User and Fabric Filtration Equipment III, APCA Speciality Conference Proceedings. Buffalo, NY.

Hajar, S., Rashid, M., Nurnadia, A., Ammar, M.R., 2015. The characteristics of a formulated filter aids for fabric filters. Powder Technol. 283, 315–320. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.035

Lee, K.W., 1981. Maximum penetration of aerosol particles in granular bed filters. J. Aerosol Sci. 12, 79–87. https://doi.org/10.1016/0021-8502(81)90014-8

Li, J., Zhou, F., Li, S., 2017. Experimental study on the dust filtration performance with participation of water mist. Process Saf. Environ. Prot. 109, 357–364. https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.04.006

Liu, P., Liu, Z., Chu, M., Tang, J., Gao, L., Yan, R., 2021. Green and efficient utilization of stainless steel dust by direct reduction and self-pulverization. J. Hazard. Mater. 413, 125403. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125403

Mann, L.A., Goren, S.L., 1984. Aerosol capture in granular beds in the sedimentation and diffusion dominated regimes. Aerosol Sci. Technol. 3, 195–213. https://doi.org/10.1080/02786828408959008

Miller, S.., Laudal, D.., 1992. Pulse-jet baghouse performance improvement with flue gas conditioning.

Novick, V.., Higgins, P.., Dierkschiede, B., Abrahamson, C., Richardson, W.B., Monson, P.R., Ellison, P.G., 1990. Efficiency and Mass Loading Characteristics of a Typical HEPA Filter Media Material, in: Proceedings of the 21st DOE/NRC Nuclear Air Cleaning Conference. San Diego, pp. 782–798.

Otani, Y., Kanaoka, C., Emi, H., 1989. Experimental study of aerosol filtration by the granular bed over a wide range of reynolds numbers. Aerosol Sci. Technol. 10, 463–474. https://doi.org/10.1080/02786828908959286

Peukert, W., Wadenpohl, C., 2001. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties. Powder Technol. 118, 136–148. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00304-7

Raupenstrauch, H., Doschek-Held, K., Rieger, J., Reiter, W., 2019. RecoDust—An Efficient Way of Processing Steel Mill Dusts. J. Sustain. Metall. 5, 310–318. https://doi.org/10.1007/s40831-019-00216-y

Ravert, E., 2005. Precoating new filters for better airflow, longer filter life. Powder Bulk Eng.

Ribeyre, Q., 2015. Influence de l'humidité de l'air sur la perte de charge d'un dépôt nanostructuré. Univ. Lorraine.

Schiller, S., Schmid, H.J., 2015. Highly efficient filtration of ultrafine dust in baghouse filters using precoat materials. Powder Technol. 279, 96–105. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.03.048

Schiller, S., Schmid, H.J., 2014. Ultrafine dust filtration using precoat materials considering the influence of filter media. Chem. Eng. Technol. 37, 1009–1020. https://doi.org/10.1002/ceat.201300856

Schmidt, E., 2004. Raw Gas Conditioning for Improving Particle Separation. Fluid Partice Sep. 16, 193–199.

Schmidt, E., Löffler, F., 1990. Collection of fine adhesive and cohesive dusts with pluse-jet fabric filers. Chem. Eng. Technol. 13, 402–410. https://doi.org/10.1002/ceat.270130155

Schmidt, E., Pilz, T., 1996. Raw gas conditioning and other additional techniques for improving surface filter performance. Filtr. Sep. 33, 409–415. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(97)84301-7

Schmidt, E.W., Gieseke, J.A., Gelfand, P., Lugar, T.W., Furlong, D.A., 1978. Filtration Theory for Granular Beds. J. Air Pollut. Control Assoc. 28, 143–146. https://doi.org/10.1080/00022470.1978.10470582

Shanthakumar, S., Singh, D.N., Phadke, R.C., 2008. Flue gas conditioning for reducing suspended particulate matter from thermal power stations. Prog. Energy Combust. Sci. 34, 685–695. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.04.001

Tardos, G.I., Abuaf, N., Gutfinger, C., 1978. Dust Deposition in Granular Bed Filters: Theories and Experiments. J. Air Pollut. Control Assoc. 28, 354–363. https://doi.org/10.1080/00022470.1978.10470610

Tien, C., Ramarao, B.., 2007. Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols. Elsevier.

Zhang, Q., 2018. Influence of an Added Fraction of Hygroscopic Salt Particles on the Operating Behavior of Surface Filters for Dust Separation. Chem. Eng. Technol. 41, 90–95. https://doi.org/10.1002/ceat.201700112

Zhang, Q., Schmidt, E., 2012. Effects of Post-Coating By Generating a Thin Secondary Particle Layer. 11th World Filtr. Congr.

Zhang, Y., Zhang, W., Yang, Z., Liu, J., Yang, F., Li, N., Du, L., 2016. Enhancement of fine particle filtration with efficient humidification. Chinese J. Chem. Eng. 24, 453–459. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.11.023

Chapitre 4 : Décolmatage des cartouches plissées par jet pulsé : Effet du plissage

Le décolmatage des cartouches plissées par jet pulsé est la technique de régénération la plus employée industriellement. Les recherches sur le sujet restent toujours d'actualité à cause de l'impact du décolmatage sur les performances des systèmes de filtration et sur les coûts de maintenance. Les résultats du chapitre précédent, obtenus sur filtres plans, ont permis d'établir que le précoating représente une solution viable pour améliorer l'efficacité de décolmatage, en plus d'être facile à mettre en œuvre. Cependant, les conclusions des essais réalisés sur des filtres plans ne sont pas nécessairement extrapolables à des cartouches plissées, à cause de différences de géométrie et d'écoulement. L'objectif de ce chapitre est de vérifier l'applicabilité du précoating pour les cartouches plissées, et d'étudier les paramètres qui peuvent être d'influence sur l'efficacité de décolmatage.

4.1. État de l'art

Les cartouches plissées présentent l'avantage d'avoir une surface importante dans un volume réduit, ce qui fait qu'elles sont très utilisées pour la séparation gaz/solide. Le plissage d'un média est caractérisé par la hauteur et la longueur du pli (dite aussi pas du pli), comme le montre la figure 4.1.

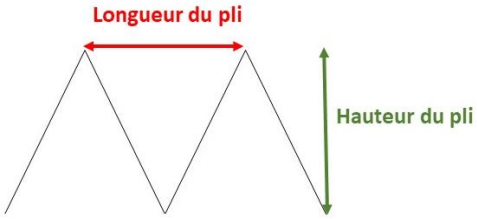


Figure 4.1 : Caractéristiques d'un filtre plissé.

Le ratio α est défini comme suit :

$$\alpha = \frac{\text{hauteur de pli}}{\text{longueur de pli}} \tag{4.1}$$

Plus la valeur de α augmente, plus le nombre de pli augmente, ce qui implique une surface de filtration importante. Le plissage du filtre est accompagné par une augmentation de la résistance à l'écoulement, surtout lorsque la longueur du pli diminue. La perte de charge d'un filtre plissé propre peut être calculée par le modèle de Del Fabbro et al. (2002) :

$$\log\left(\frac{\Delta P}{Z\, R_f\, U_G}\right) = \left(\frac{\mu_G}{Z^2\, R_f}\right)^{0,7}\left(460\log\left(1+\frac{l}{p^2}Z\right)+\frac{0,7\left(\frac{l}{p}\right)^2}{\log\left(1+\frac{l}{Z}\frac{1}{Re}\right)}\right) \tag{4.2}$$

avec ΔP la perte de charge du média plissé, l la hauteur du pli, p la longueur du pli, Z l'épaisseur du média, R_f la résistance du média à l'écoulement ($kg.m^{-2}.s^{-1}$), U_G la vitesse de filtration, μ_G la viscosité du fluide, Re le nombre de Reynolds calculé avec la longueur du pli.

Lo et al. (2010) ont étudié le décolmatage des cartouches plissées par jet pulsé. Les expériences ont été menées en utilisant 6 cartouches avec différents plissages, les valeurs de α étant comprises entre 2,83 et 11,39. Deux traitements surfaciques ont été testés : membrane PTFE et couche de nanofibres. La poussière utilisée était de l'hydrate d'alumine ($AlOH_3$) avec un diamètre modal en nombre de 0,898 µm. La vitesse de filtration était de l'ordre de 4 $cm.s^{-1}$. Les auteurs ont évalué deux modes de décolmatage :

- décolmatage par rapport à une perte de charge maximale « Clean on demand », la perte de charge maximale étant fixée à 1000 Pa,
- décolmatage par rapport à un intervalle de temps « Clean on time ».

Les performances ont été évaluées par la mesure de la perte de charge résiduelle et la concentration de poussière en aval. Les auteurs ont montré que le choix du mode de décolmatage dépendait du ratio α. Pour des ratios élevés (α > 4), le mode de décolmatage par rapport à un intervalle de temps est plus adéquat, alors que pour des valeurs faibles (α < 4) le décolmatage par rapport à une perte de charge maximale est plus efficace. Ils mentionnent également que l'augmentation du ratio α est associée à une diminution de l'efficacité de décolmatage du fait de plis plus fermés. Les résultats ont montré que l'augmentation de la pression du réservoir permet d'améliorer le décolmatage, tandis que le temps d'ouverture n'a pas une grande influence. Enfin, les filtres avec une couche de nanofibres ont présenté de meilleures performances par rapport aux filtres avec une membrane PTFE.

Des observations similaires ont été rapportées par Kim et Lee (2019), qui ont évalué l'efficacité de décolmatage par jet pulsé de différentes cartouches plissées avec un α compris entre 0 (média non plissé) et 2,21. Les expériences ont été réalisées avec de la cendre volante, présentant un diamètre médian en nombre de 1,07 µm. Le décolmatage a été réalisé sans arrêter la génération des particules (online) avec une pression de l'air comprimé de 4 bars et la vitesse de filtration a été fixée à 1,6 $cm.s^{-1}$. Les résultats ont montré une détérioration des performances de décolmatage au cours des cycles en augmentant la valeur de α. S.Li et al. (2019a) ont aussi obtenu des résultats équivalents, en évaluant l'influence de la géométrie du pli sur la régénération. Les auteurs ont étudié des médias plissés avec différentes valeurs de α entre 0 et 3,3. L'efficacité de régénération a été évaluée par rapport à la perte de charge résiduelle pour une vitesse de filtration comprise entre1 et 10 $cm.s^{-1}$. Les résultats ont révélé une augmentation de la force d'adhésion du gâteau (évaluée par la technique d'inversion de courant) avec l'augmentation du ratio α, ce qui a été associé à un mauvais décolmatage.

Chen et al. (2017) ont étudié l'effet de la forme du pli sur l'efficacité de décolmatage, en se basant sur la valeur de la pression statique. Les auteurs ont pris la différence de pression entre la surface interne et la surface externe comme indicateur de l'efficacité de décolmatage (perte de pression statique). L'étude a été réalisée par simulation et a montré que les formes carrées du plissage (figure 4.2 : formes 2,3 et 4) permettent d'avoir moins de perte de pression statique (c.à.d. un meilleur décolmatage). Dans les études récentes (Li et al., 2015 ; Chen et Chen, 2017; Li et al., 2019; Chen et al., 2020; Kang et al., 2020), la mesure de la pression statique au niveau de la face interne de la cartouche lors de l'injection de l'air comprimé est utilisée pour évaluer l'efficacité de décolmatage. Plus la valeur du pic de pression est importante, meilleur est supposé le décolmatage.

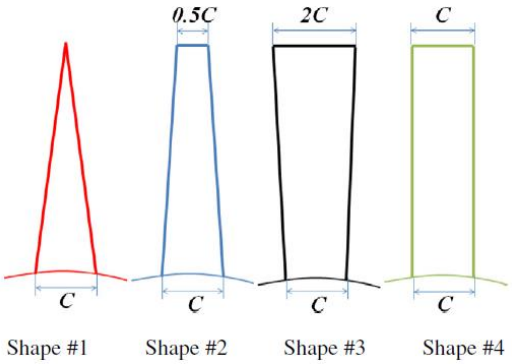


Figure 4.2 : Différentes formes de pli étudiées par Chen et al. (2017).

L'effet de l'installation d'un cône à l'intérieur d'une cartouche plissée pour améliorer le décolmatage a été étudié par Li et al. (2015). Deux formes de cônes ont été testées, comme le montre la figure 4.3. L'efficacité de décolmatage a été évaluée par rapport à la pression maximale à l'intérieur du filtre. Les résultats ont montré que l'intensité du décolmatage est améliorée avec l'augmentation de la pression du réservoir. L'ajout d'un cône cylindrique assure une distribution uniforme de la pression tout au long du filtre. Les cycles colmatage/décolmatage ont validé l'effet bénéfique du cône cylindrique, en notant une stabilisation de la durée du cycle de filtration et de la perte de charge résiduelle. Qiu et al. (2021) ont obtenu des résultats similaires en étudiant l'effet du cône.

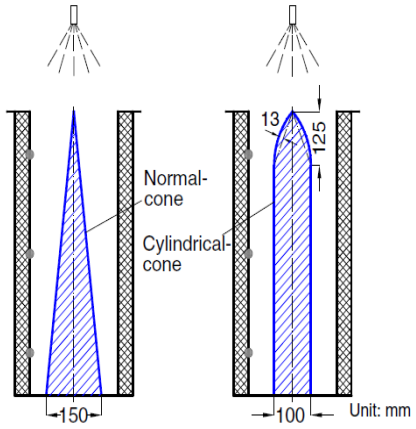
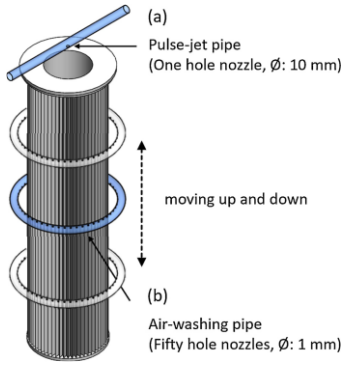


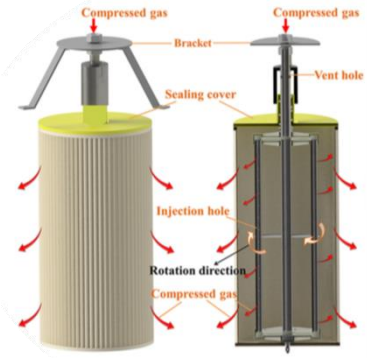
Figure 4.3 : Installation d'un cône à l'intérieur d'une cartouche plissée pour améliorer le décolmatage par jet pulsé (Li et al., 2015).

L'un des paramètres qui reste mal étudié est l'influence de la nature chimique des particules. En effet, cela affecte l'adhésion entre le gâteau de filtration et la surface du filtre. Par exemple, Yan et al. (2015) ont rencontré un colmatage irréversible causé par des particules de pesticides. He et al. (2021) ont trouvé que l'utilisation de l'azote pour réaliser le décolmatage des cartouches plissées colmatées par des particules de polyacrylamide (polymère hygroscopique) permet d'assurer un meilleur décolmatage. Des études supplémentaires sont cependant nécessaires pour identifier et comprendre les paramètres qui influent le détachement des gâteaux de filtration.

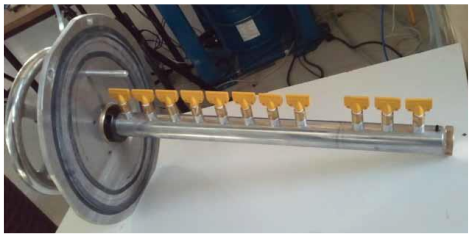
Afin de surmonter les problèmes de décolmatage rencontrés avec les cartouches plissées, plusieurs auteurs (Bémer et al., 2015 ; S. Li et al., 2019b; Cho et al., 2020) se sont intéressés à des dispositifs qui injectent l'air comprimé tout au long des cartouches, comme le montre la figure 4.4. Certains l'injectent sur la surface externe et d'autres à l'intérieur de la cartouche. Les résultats montrent une régénération totale de la surface de filtration avec ces dispositifs. Cependant, ces méthodes impliquent une consommation plus importante d'air comprimé.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.4 : Nouveaux dispositifs d'injection d'air comprimé pour le décolmatage des cartouches plissées (a : Cho et al., 2020) (b : S.Li et al., 2019b) (c : Bémer et al., 2015).

4.2. Étude expérimentale du décolmatage de cartouches plissées

Dans cette dernière partie expérimentale, l'intérêt se portera sur la régénération des cartouches plissées. Comme identifié dans la littérature, le plissage des cartouches peut affecter l'efficacité de décolmatage, ce qui soulève la question sur son influence lors de l'application du précoating. Les paramètres clés à étudier sont nombreux, à savoir le plissage, la taille des particules, le traitement surfacique, la pression d'air de décolmatage, le mode de décolmatage et l'application du précoating. La finalité de cette étude sera de pouvoir proposer des recommandations pour améliorer la régénération des cartouches industrielles.

4.2.1. Montage expérimental

Les expériences ont été réalisées avec le montage présenté par la figure 4.5. Les particules métalliques sont générées avec le procédé de métallisation en utilisant des fils de zinc, comme expliqué dans les chapitres 2 et 3. Les poussières générées sont aspirées vers le système de filtration principal composé d'un cyclone, avec un diamètre de coupure de 2,4 µm, et un dépoussiéreur à cartouches. Une fraction du débit sortant du cyclone est dirigée vers un pilote qui permet de réaliser des essais sur une cartouche plissée par le biais d'une canalisation de 10 cm de diamètre. Le pilote peut accueillir une cartouche de forme ovale d'une longueur de 66 cm, la section elliptique présente un petit diamètre externe de 29 cm et un grand diamètre externe de 36,6 cm. Un déflecteur de flux, placé à l'entrée de l'air à traiter, permet d'assurer une distribution homogène de l'air empoussiéré autour de la surface de la cartouche. Les poussières sont aspirées à travers la cartouche au moyen d'un ventilateur et le débit en aval de la cartouche plissée est mesuré avec un débitmètre à turbine. Le flux d'air sortant de la cartouche est redirigé vers le système principal de filtration. Le principe de fonctionnement du débitmètre consiste à mesurer la vitesse de rotation d'une turbine suite à l'écoulement d'un fluide, qui est proportionnelle à la vitesse de ce dernier (Asch et al., 2017). Le débitmètre permet ainsi de suivre la variation du débit durant le colmatage de la cartouche, le débit initial a été fixé à environ 400 $m^3.h^{-1}$. La perte de charge durant

les expériences est enregistrée avec un capteur de pression différentielle (FDA602S6K, Almemo®). Un prélèvement sur un filtre de 47 mm de diamètre, à l'aide d'une pompe, est effectué afin de mesurer la concentration massique totale en amont de la cartouche plissée.

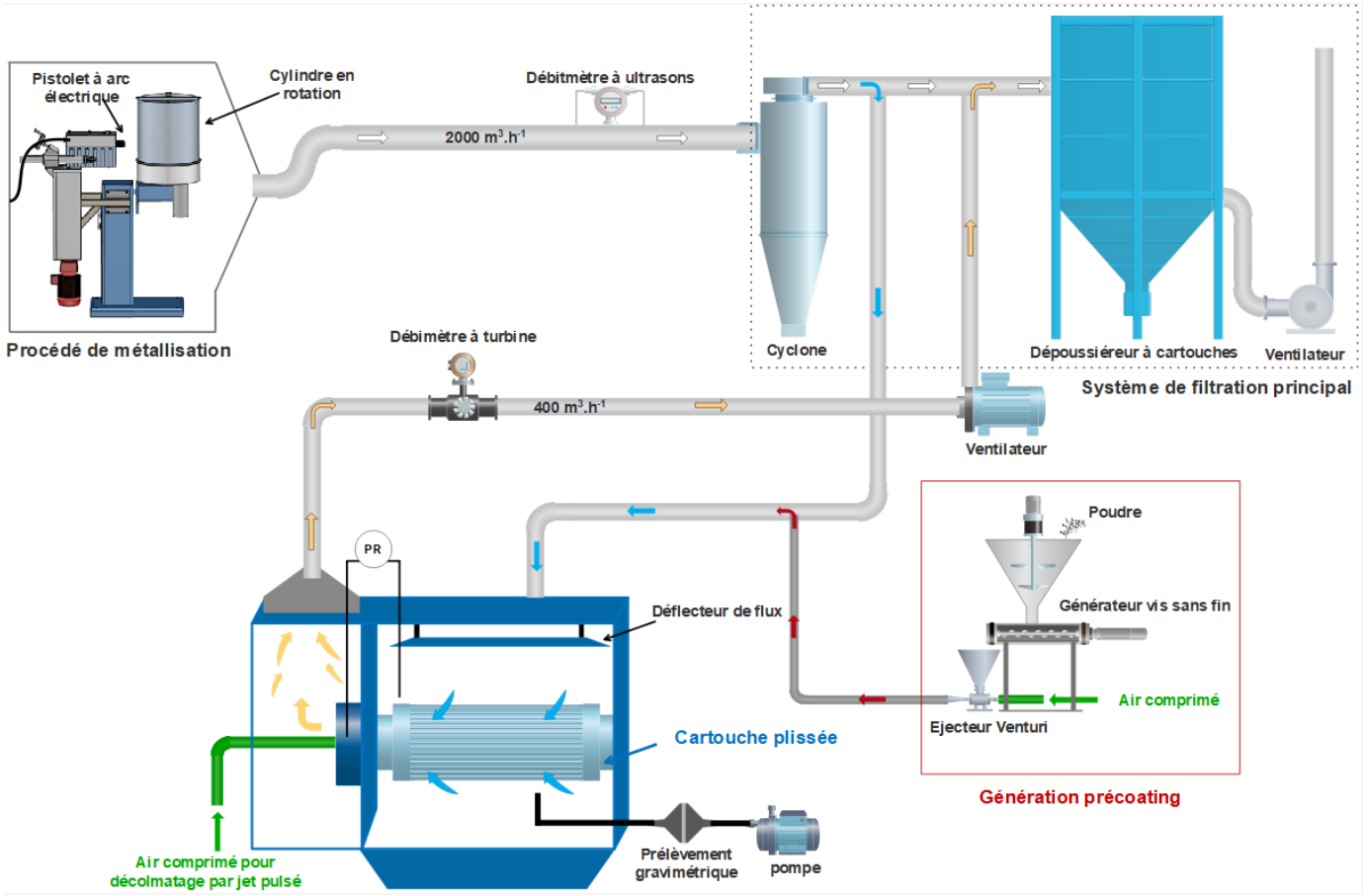


Figure 4.5 : Schéma du pilote expérimental pour évaluer les performances des cartouches plissées.

La distribution granulométrique en nombre de la taille des particules métalliques est la même que celle présentée dans la figure 2.3 du chapitre 2, avec un diamètre modal équivalent en mobilité électrique de 80 nm. La concentration massique en particules métalliques, mesurée en amont de la cartouche, est de l'ordre de 90 $mg.m^{-3}$.

Le précoating utilisé durant cette partie expérimentale est à base de SiO_2, les autres matériaux n'ont pas été testés puisqu'aucune différence significative n'a été observée durant les essais sur filtres plans. Le précoating est généré avec un générateur à vis-sans-fin couplé à un éjecteur venturi qui permet d'injecter le précoating dans la canalisation à l'aide d'air comprimé à 4 bars. Le principe de l'éjecteur venturi consiste à accélérer un fluide moteur (air comprimé) par passage au travers d'une buse, créant un effet de dépression permettant l'aspiration de la poudre venant du générateur à vis-sans-fin, comme le montre la figure 4.6. Au vu de la forte concentration massique du précoating, de l'ordre de 1 $g.m^{-3}$, la distribution granulométrique en masse a été déterminée par un impacteur en cascade (Marple Andersen 298). L'échantillon d'aérosol est prélevé à 2 $L.min^{-1}$, et passe par une succession d'étages d'impaction où les particules, selon leur taille, vont se déposer sur des supports préalablement graissés. Les supports sont pesés ce qui permet d'établir la distribution granulométrique en masse en fonction du diamètre aérodynamique des particules (figure 4.7).

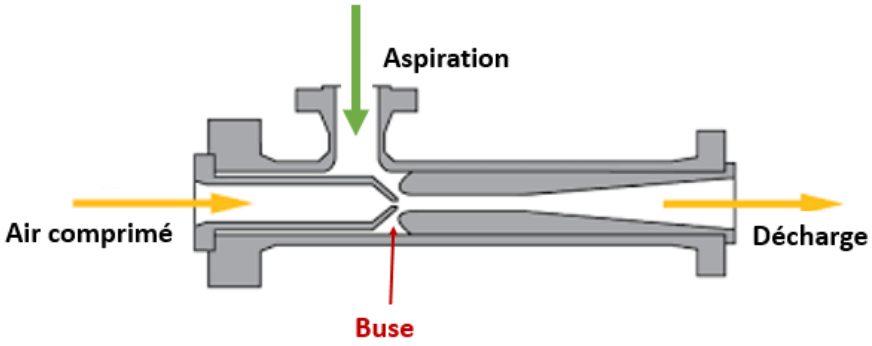


Figure 4.6 : Schéma représentatif d'un éjecteur venturi.

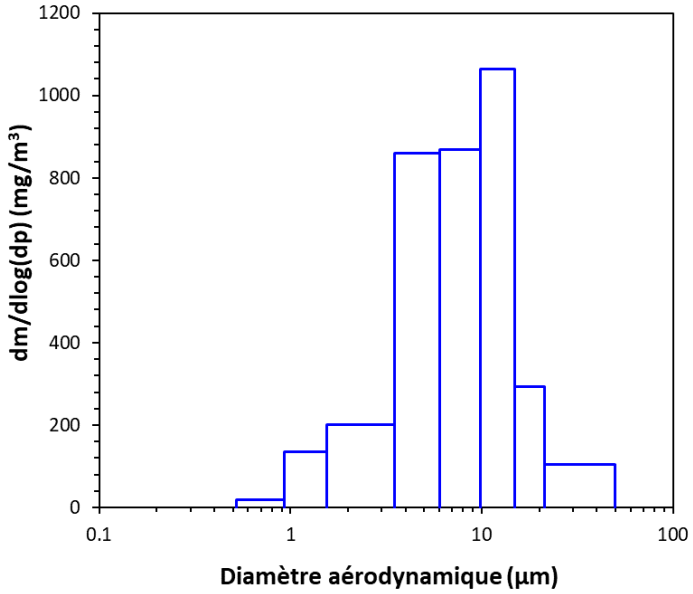


Figure 4.7 : Distribution granulométrique en masse de la taille des particules de précoating.

Le pilote possède un système de décolmatage par jet pulsé. La buse d'injection de diamètre 27 mm est placée à une distance de 30 cm de l'ouverture de la cartouche. Le temps d'ouverture de la vanne d'injection a été fixé à 0,1 s, avec une pression d'air comprimé variable entre 2 et 6 bars. Le décolmatage a été initié lorsqu'une valeur définie de la perte de charge maximale (ΔP_{Max}) est atteinte. Deux modes de décolmatage ont été étudiés :

- Décolmatage offline : le décolmatage est réalisé en arrêtant la génération des nanoparticules et la ventilation.
- Décolmatage online : le décolmatage est réalisé sans arrêt de la génération des particules et sans arrêt de la ventilation.

Différentes cartouches de plissages variables ont été étudiées, leurs caractéristiques sont données par le tableau 4.1. Le ratio α varie entre 1 et 6, et comme le débit initial est constant la vitesse de filtration change pour chaque cartouche. Une photo des cartouches est donnée par la figure 4.8. Les filtres utilisés sont les mêmes que précédemment, dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2.2 du chapitre 2. Pour chaque α, deux types de filtre ont été testés :

- Avec nanofibres : filtres avec une couche de nanofibres.
- Sans nanofibres : filtres sans aucun traitement surfacique.

Tableau 4.1 : Caractéristiques des cartouches étudiées.

α	Nombre de plis	Surface (m^2)	Vitesse de filtration ($cm.s^{-1}$)
6	170	8,5	1,3
3	83	4,2	2,6
2	56	2,8	3,9
1	30	1,5	7,4

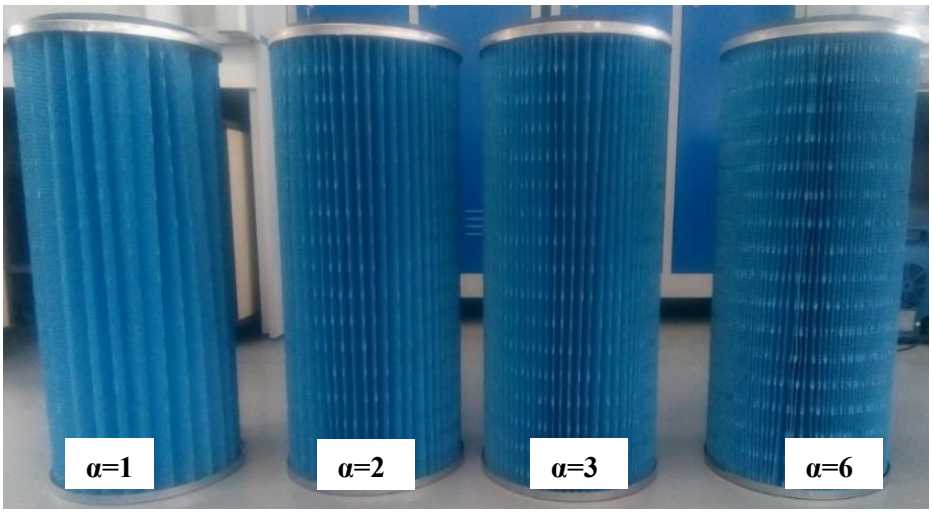


Figure 4.8 : Photos des cartouches plissées étudiées.

4.2.2. Mesure de l'accélération du média propre

Des mesures de l'accélération du média propre (sans dépôt de particules) constituant la cartouche plissée ont été réalisées en plaçant un accéléromètre (352A73, PCB Piezotronics®) sur la face externe du filtre (surface où se dépose le gâteau de filtration) à une distance connue de l'ouverture de la cartouche, comme le montre la figure 4.9. Le but est de comparer les résultats avec les manches filtrantes, où l'accélération du média est le mécanisme principal à l'origine du détachement du gâteau de filtration. Les expériences ont été réalisées sur des cartouches propres (sans gâteau de filtration), en testant les deux modes de décolmatage : online et offline. Les résultats de l'accélération sont donnés en « g » (1 g = 9,81 $m.s^{-2}$).

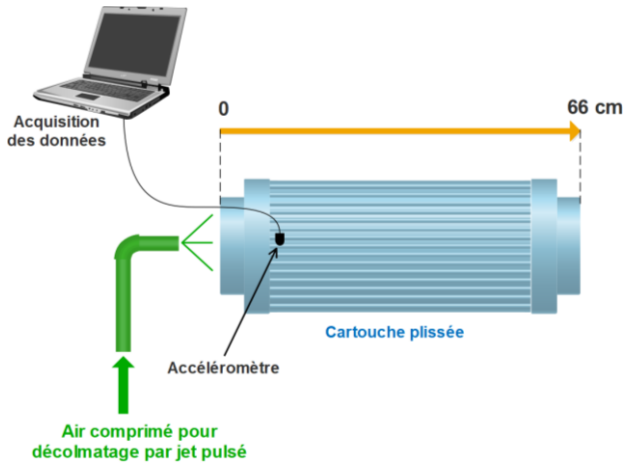


Figure 4.9 : Schéma représentatif de la mesure de l'accélération des cartouches plissées.

Dans un premier temps, la mesure a été réalisée avec la cartouche possédant un ratio de α=6, en utilisant une pression de l'air comprimé de 6 bars et en plaçant l'accéléromètre à une distance de 20 cm de l'ouverture de la cartouche. Les résultats, donnés par la figure 4.10, n'ont pas mis en évidence une différence significative entre les deux modes de décolmatage en termes d'accélération du média propre. Les valeurs d'accélération relevées sont faibles comparativement aux filtres à manches. En effet, pour ces derniers l'accélération atteint des valeurs de 200 g (Simon et al., 2007), tandis que pour la cartouche plissée une valeur maximale autour de 16 g a été enregistrée. Ceci peut s'expliquer par le fait que les médias sont plus rigides et bien fixés aux extrémités de leur support avec en plus une colle sur la face interne pour bien figer le filtre. Par conséquent, lors de l'injection du pulse d'air comprimé, l'accélération du média est limitée. La différence est également notable comparativement aux résultats obtenus avec les essais sur filtres plans dans le chapitre 2, où des accélérations de l'ordre de 150 g ont été enregistrées.

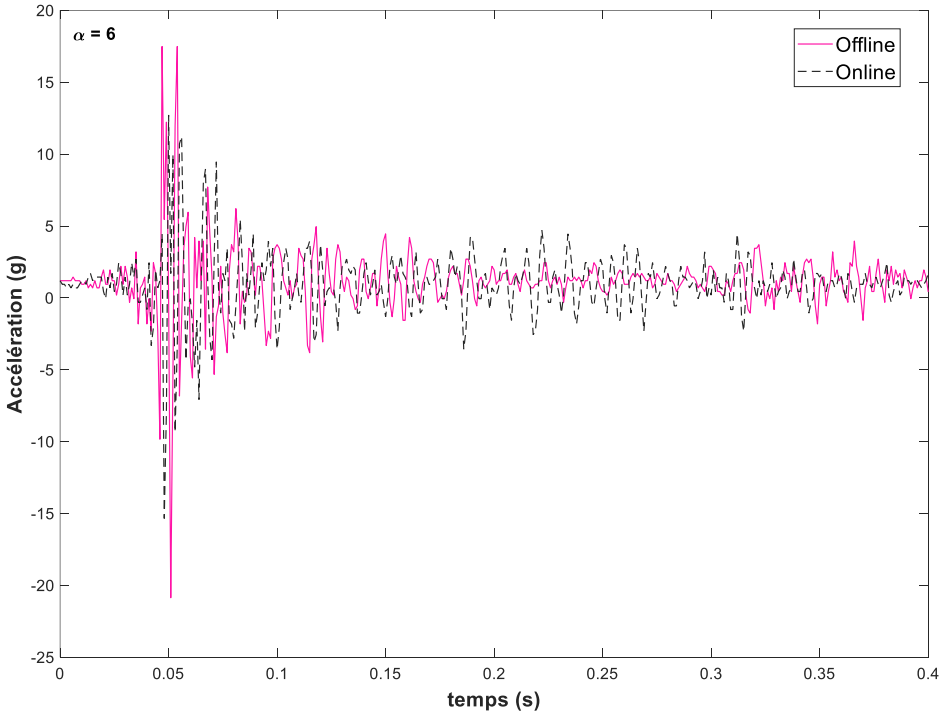


Figure 4.10 : Mesure de l'accélération de la cartouche α=6 avec une pression de l'air comprimé de 6 bars à une distance de 20 cm de l'ouverture de la cartouche.

La mesure de l'accélération tout au long de la cartouche et pour différentes pressions d'air comprimé (2, 4 et 6 bars) a été effectuée avec la cartouche α=6 offline. La figure 4.11 présente les résultats comme la variation de l'accélération maximale enregistrée (en valeur absolue) en fonction de la distance de l'ouverture de la cartouche. Sous toutes les conditions testées, l'accélération ne dépasse pas 25 g. L'augmentation de la pression de décolmatage est associée à une augmentation de l'accélération du média. Cependant, l'accélération diminue légèrement lorsqu'on s'éloigne de l'ouverture, ce qui est cohérent à cause de l'augmentation de la distance de la buse d'injection.

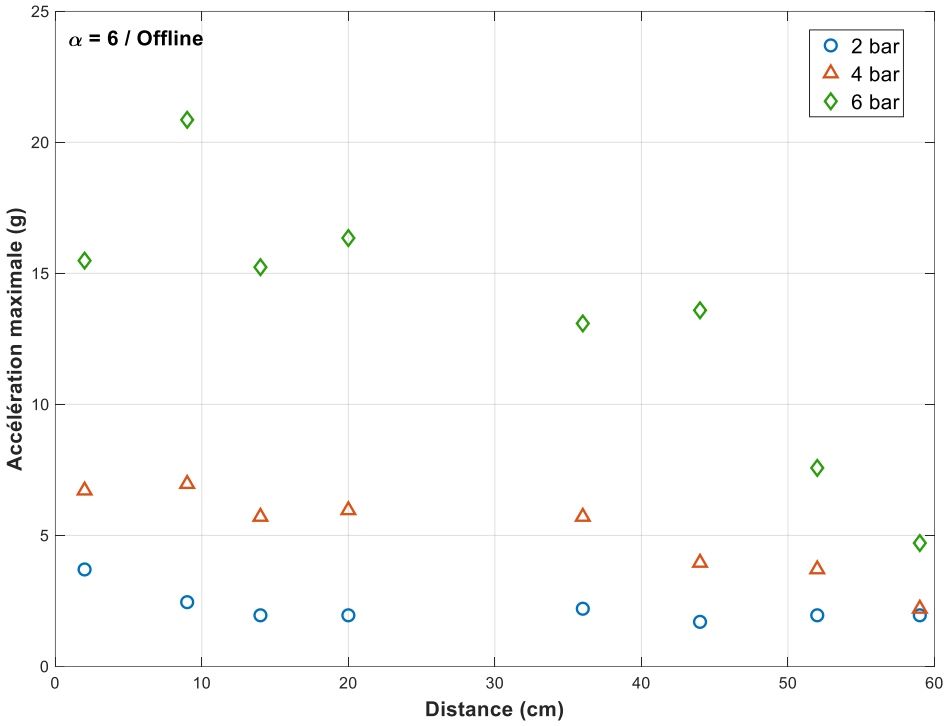


Figure 4.11 : Mesure de l'accélération de la cartouche α=6 en offline tout au long de la cartouche avec différentes pressions de l'air comprimé.

Afin d'étudier l'effet du plissage sur l'accélération du média, la même expérience a été effectuée pour toutes les cartouches, en variant la pression de l'air de décolmatage (2, 4 et 6 bars), en fixant l'accéléromètre à une distance de 20 cm de l'ouverture et en réalisant le décolmatage online. Les résultats présentés par la figure 4.12, ne montrent pas une tendance claire, surtout pour les données obtenues pour α=2, α=3 et α=6. Cependant, les résultats pour α=1 montrent une amélioration de l'accélération à 6 bars mais ces résultats sont à prendre avec précaution. En effet, cette cartouche a été conçue spécialement à des fins de recherche. La fixation du média au support n'a pas été réalisée correctement, ce qui peut expliquer l'accélération plus importante. De façon générale, on peut conclure que l'accélération n'est pas le mécanisme principal de détachement du gâteau de filtration, contrairement aux filtres à manches où le décolmatage est assuré par l'accélération et le déplacement du média.

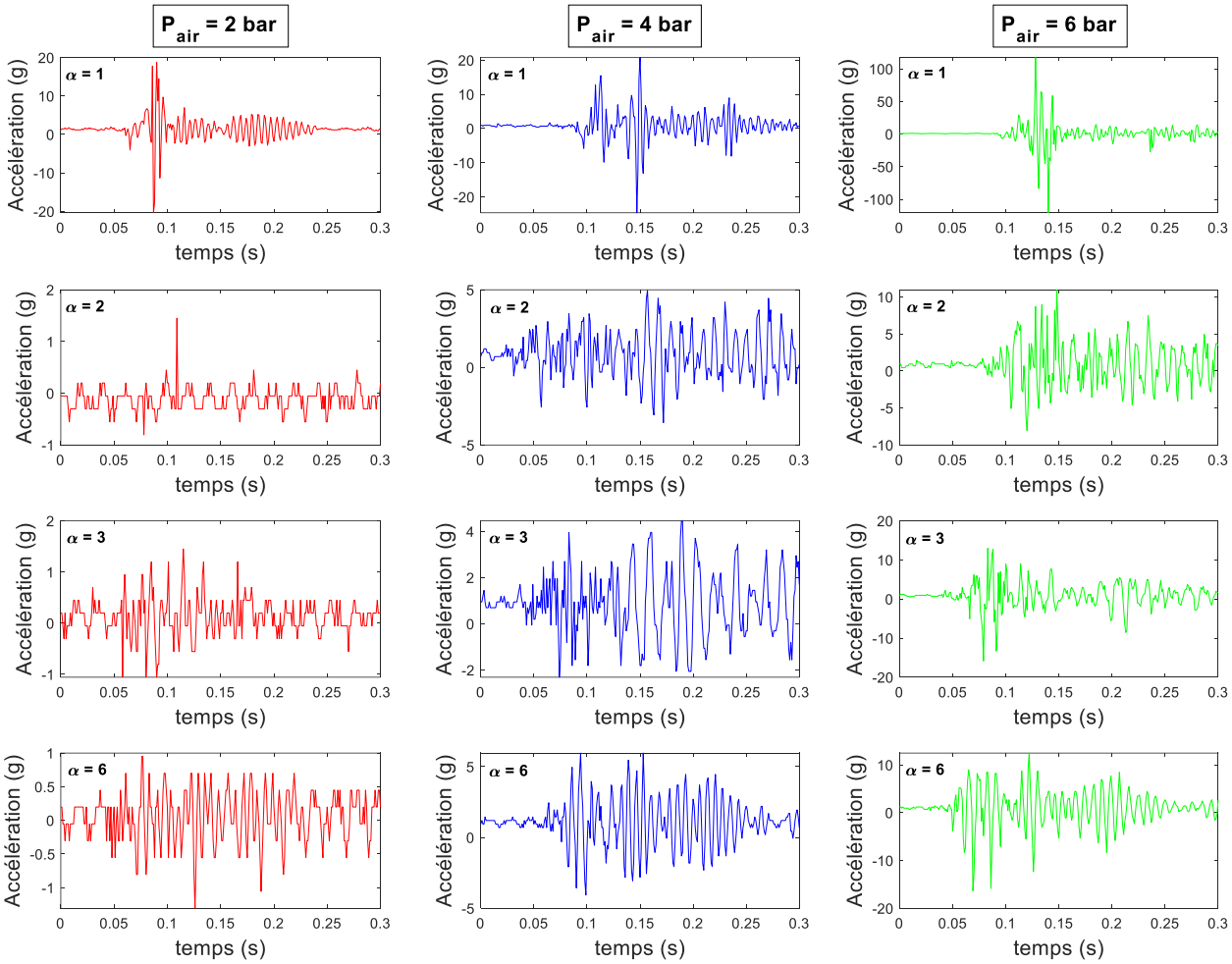


Figure 4.12 : Résultats de la mesure de l'accélération lors du décolmatage online des différentes cartouches pour différentes pressions de l'air de décolmatage à une distance de 20 cm de l'ouverture de la cartouche.

4.2.3. Performances de décolmatage vis-à-vis de nanoparticules métalliques

Les cycles colmatage/décolmatage des différentes cartouches, recouvertes d'une couche de nanofibres, par les nanoparticules métalliques ont été étudiés. Le décolmatage a été effectué en offline avec une pression de l'air comprimé de 6 bars et avec 4 pulses. Ces conditions de décolmatage ont été choisies car elles représentent le cas extrême, c'est-à-dire un décolmatage intense. Les résultats sont présentés par la figure 4.13, où des cycles de filtration extrêmement instables ont été observés. Quelle que soit la valeur de α, le premier cycle est caractérisé par une augmentation importante de la perte de charge, accompagnée par une chute de débit. Cela est dû à la résistance importante du gâteau de filtration, comme déjà observé au chapitre 2. Il faut noter que les différents α sont associés à différentes vitesses de filtration (voir tableau 4.1). Comme l'augmentation de la vitesse engendre une augmentation de la perte de charge, les valeurs des pertes de charge maximales avant décolmatage ne sont pas les mêmes. Par ailleurs, fixer la même valeur du rapport de la perte de charge et la vitesse n'était pas possible à cause de la chute du débit durant le colmatage. Pour α=1, le débit à la fin de chaque cycle atteint presque la moitié du débit initial. Cela reflète les difficultés rencontrées dans l'industrie pour la filtration des particules ultrafines, où cette chute du débit d'aspiration implique une diminution de la protection dans le milieu industriel. Par conséquent, opérer à des vitesses qui dépassent 4 $cm.s^{-1}$ n'est pas pratique, puisqu'elles peuvent induire des pertes de charge élevées. Les résultats montrent que le décolmatage est

inefficace étant donnée la réduction significative du temps de cycle et l'augmentation de la perte de charge résiduelle au cours des cycles. L'allure de l'augmentation de la perte de charge après chaque décolmatage est caractéristique d'un décolmatage inefficace par plaques, qui correspond au remplissage des zones décolmatées (cf. figures 4.14 et 4.15). Les conditions de décolmatage utilisées sont considérées comme extrêmes, ce qui révèle la forte adhésion du gâteau de filtration formé et ce quel que soit le nombre de plis de la cartouche.

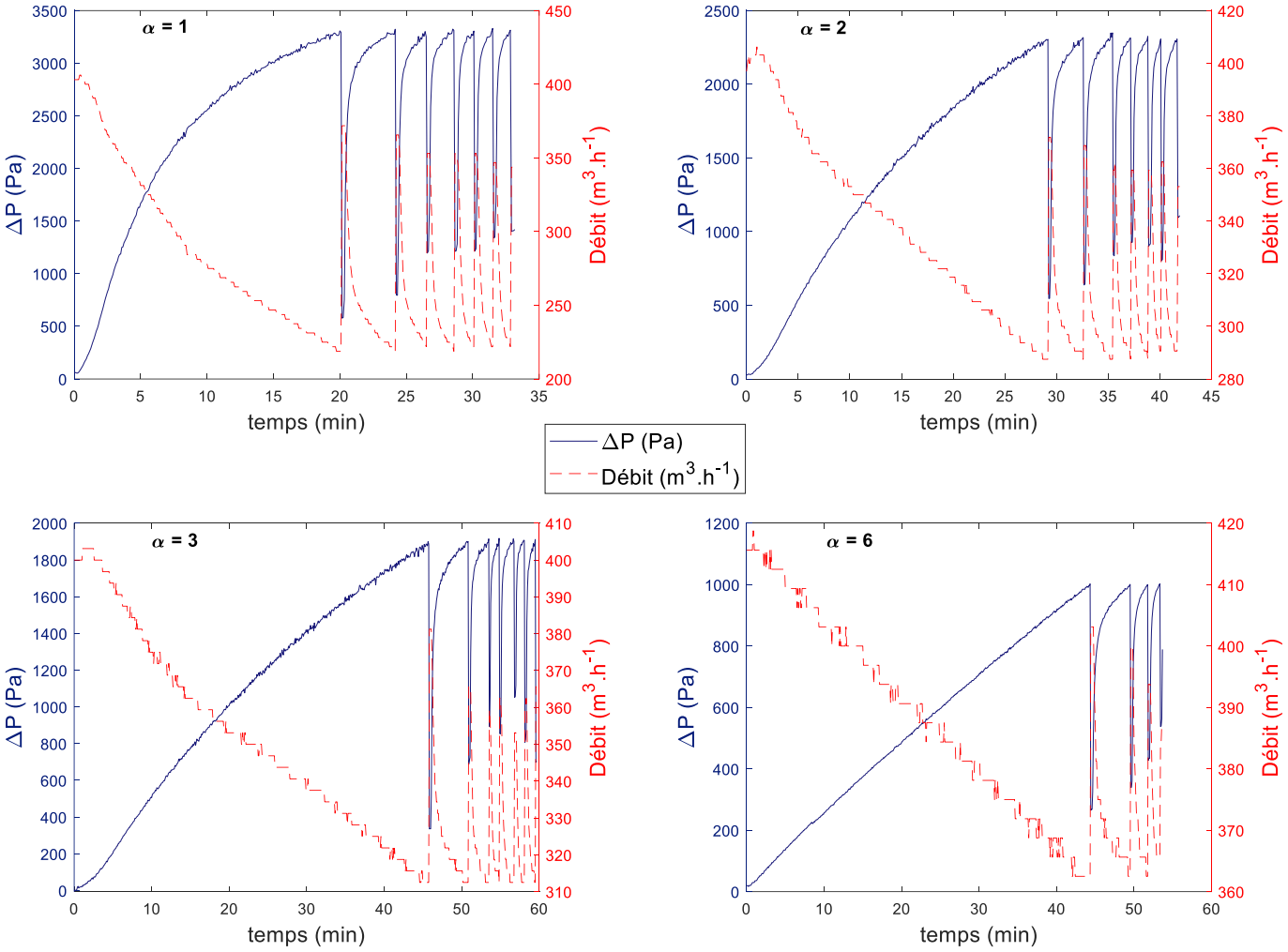


Figure 4.13 : Évolution de la perte de charge et du débit durant les cycles colmatage/décolmatage pour les différentes cartouches (avec couche de nanofibres) pour une pression d'air comprimé de 6 bars et 4 pulses.



Figure 4.14 : Photos de la cartouche α=6 propre (bleu) et après les cycles colmatage/décolmatage.

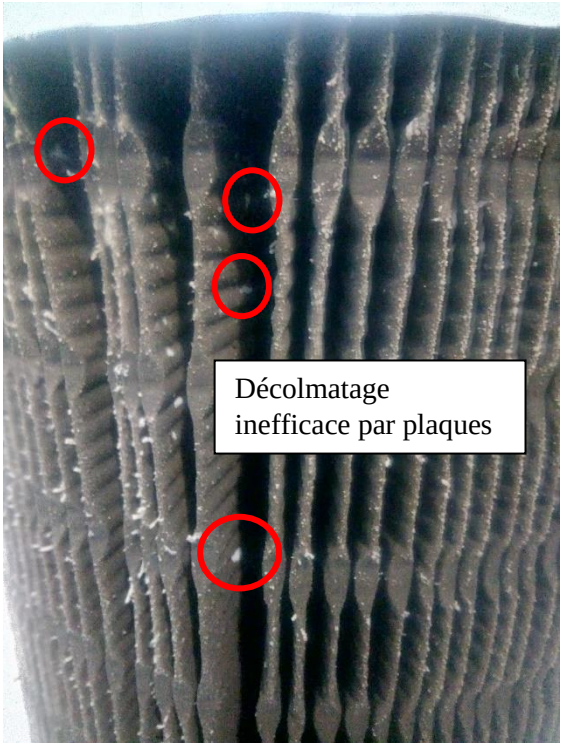


Figure 4.15 : Photo du décolmatage inefficace par plaques des cartouches colmatées par les nanoparticules métalliques.

L'efficacité de décolmatage au cours des cycles peut être exprimée par rapport aux différents critères :

- **Par rapport à l'épaisseur détachée R_P:** (en utilisant la loi de Darcy)

$$R_P = 1 - \frac{\text{Épaisseur du gâteau résiduel}}{\text{Épaisseur initiale du gâteau}} = \left(\frac{\Delta P_{Max} - \Delta P_r}{\Delta P_{Max} - \Delta P_0}\right) \quad (4.3)$$

avec ΔP_{Max} la perte de charge maximale avant décolmatage, ΔP_r la perte de charge résiduelle (après décolmatage) et ΔP_0 la perte de charge du filtre propre.

- **Par rapport au temps de cycle R_T :** cela est obtenu en comparant le temps de cycle après décolmatage au temps du premier cycle, c.à.d. le temps nécessaire pour colmater le filtre propre.

$$R_T = \frac{\text{Temps du cycle}}{\text{Durée du premier cycle}} \tag{4.4}$$

- **Par rapport à la surface décolmatée R_S :** en supposant un décolmatage par plaques (ce qui est le cas dans notre étude), on peut exprimer le rapport de la surface décolmatée par rapport à la surface totale en tenant compte de l'égalité des pertes de charge à travers les zones colmatées et décolmatées. La figure 4.16 donne une schématisation de l'écoulement à travers un gâteau partiellement décolmaté. La perte de charge résiduelle enregistrée après décolmatage est égale à :

$$\Delta P_r = \Delta P_{\text{zone colmatée}} = \Delta P_{\text{zone décolmatée}} \tag{4.5}$$

avec ΔP_r la perte de charge résiduelle, $\Delta P_{\text{zone colmatée}}$ et $\Delta P_{\text{zone décolmatée}}$ les pertes de charge des zones colmatées et décolmatées respectivement.

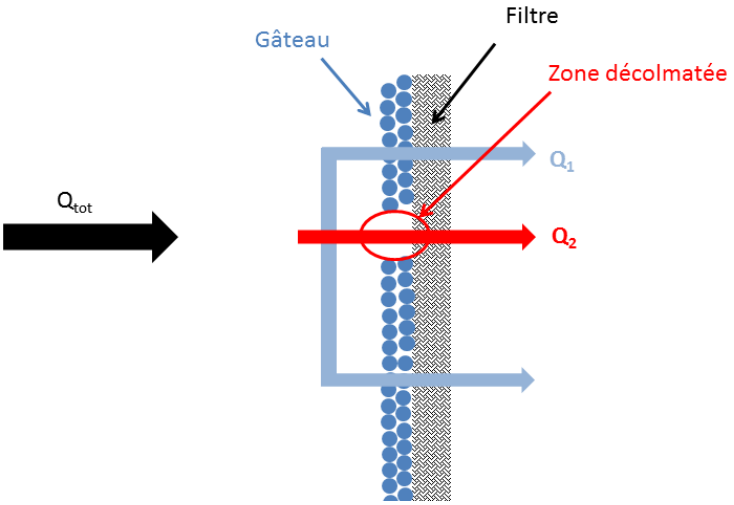


Figure 4.16 : Schématisation de l'écoulement suite à un décolmatage par plaques.

Le débit total Q_{tot} traversant le filtre partiellement décolmaté, selon la figure 4.16, est exprimé comme suit :

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 \tag{4.6}$$

où Q_1 est le débit passant par les zones colmatées et Q_2 le débit traversant les zones décolmatées. La surface totale, S_{tot}, est aussi exprimée comme suit :

$$S_{tot} = S_{\text{Colmatée}} + S_{\text{Décolmatée}} \tag{4.7}$$

Selon la loi de Darcy, les pertes de charge à travers les zones colmatées et décolmatées sont données par :

$$\Delta P_{\text{zone colmatée}} = (R_f + R_G)\frac{Q_1}{S_{\text{Colmatée}}} \tag{4.8}$$

avec R_f et R_G les résistances du filtre propre et du gâteau respectivement en ($kg.m^{-2}.s^{-1}$).

$$\Delta P_{\text{zone décolmatée}} = R_f \frac{Q_2}{S_{\text{Décolmatée}}} \tag{4.9}$$

En utilisant les relations 4.5, 4.6 et 4.9, on obtient :

$$\Delta P_r = R_f \frac{Q_{tot} - Q_1}{S_{\text{Décolmatée}}} \tag{4.10}$$

Le débit passant par les zones colmatées Q_1 est exprimé en fonction de ΔP_r et $S_{\text{Colmatée}}$ (équation 4.8) et réinjecté dans l'équation 4.10 :

$$\Delta P_r = R_f \frac{Q_{tot} - \left(\frac{\Delta P_r \, S_{\text{Colmatée}}}{R_f + R_G}\right)}{S_{\text{Décolmatée}}} \tag{4.11}$$

A partir de la relation 4.7, on remplace l'expression de $S_{\text{Colmatée}}$ dans 4.11 :

$$\Delta P_r = R_f \frac{Q_{tot} - \left(\frac{\Delta P_r \, (S_{tot} - S_{\text{Décolmatée}})}{R_f + R_G}\right)}{S_{\text{Décolmatée}}} \tag{4.12}$$

La surface décolmatée est alors égale à :

$$S_{\text{Décolmatée}} = \frac{(R_G + R_f)\, Q_{tot} \; - \; \Delta P_r \, S_{tot}}{\Delta P_r \left(\frac{R_G + R_f}{R_f} - 1\right)} \tag{4.13}$$

Sachant que la perte de charge du filtre + gâteau, ΔP_{Max}, est exprimée comme suit :

$$\Delta P_{Max} = (R_G + R_f)\frac{Q_{tot}}{S_{tot}} \tag{4.14}$$

Et la perte de charge du filtre propre ΔP_0 :

$$\Delta P_0 = R_f \frac{Q_{tot}}{S_{tot}} \tag{4.15}$$

Le rapport des résistances au dénominateur de l'équation 4.13 s'écrit alors :

$$\left(\frac{R_G + R_f}{R_f} - 1\right) = \frac{\Delta P_{Max} - \Delta P_0}{\Delta P_0} \tag{4.16}$$

L'efficacité par rapport à la surface décolmatée est finalement calculée comme suit :

$$R_S = \frac{\text{Surafce décolmatée}}{\text{Surface totale}} = \left(\frac{\Delta P_{Max} - \Delta P_r}{\Delta P_{Max} - \Delta P_0}\right)\left(\frac{\Delta P_0}{\Delta P_r}\right) \tag{4.17}$$

avec ΔP_{Max} la perte de charge maximale avant décolmatage (surface complétement colmatée), ΔP_r la perte de charge résiduelle (après décolmatage) et ΔP_0 la perte de charge du filtre propre.

Les résultats des cycles colmatage/décolmatage ont été exprimés en termes d'évolution de l'efficacité de décolmatage (R_P, R_T et R_S) au cours des cycles et sont donnés par la figure 4.17. Il peut être remarqué, comme pour les essais sur filtres plans, que le critère R_P donne des efficacités de régénération qui dépassent les 60% ce qui n'est pas en accord avec les observations visuelles du décolmatage. L'efficacité de décolmatage par rapport au temps de cycle, R_T, est considérée comme la référence car la variation de la durée de cycle reflète directement l'efficacité de décolmatage. En effet, le temps de cycle est un paramètre qui est directement lié à la capacité de rétention de poussière. Pour un décolmatage efficace, le temps de cycle doit être proche du temps nécessaire pour colmater un filtre propre. Comparé à R_T, le paramètre R_S calculé permet de bien décrire les résultats expérimentaux. Effectivement, il s'agit bien d'un décolmatage par plaques et les hypothèses utilisées pour établir la relation 4.17 sont valides. Avec des nanoparticules métalliques, l'efficacité de décolmatage ne dépasse ainsi pas 15 % malgré les conditions extrêmes de la régénération.

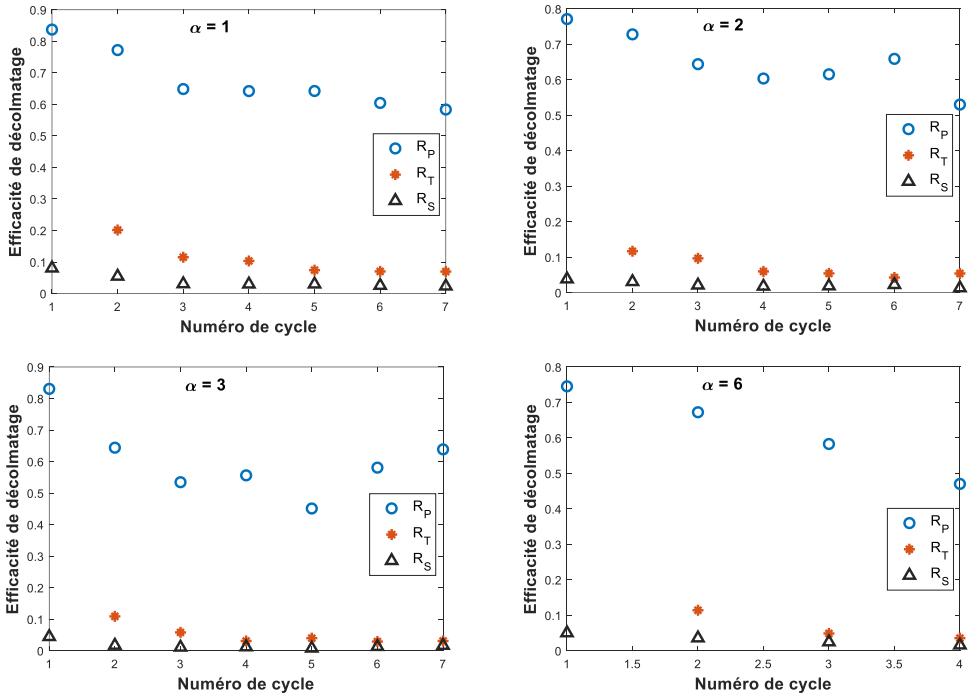


Figure 4.17 : Résultats de l'efficacité de décolmatage au cours des cycles suite au colmatage par les nanoparticules métalliques, le décolmatage réalisé en offline avec 6 bars et 4 pulses.

4.2.4. Performances de décolmatage vis-à-vis du précoating seul

Afin d'évaluer l'effet de la taille des particules, les performances de décolmatage des cartouches vis-à-vis des particules microniques de précoating seul ont été évaluées. A cause de la différence de vitesse de filtration pour les différents α (voir tableau 4.1), la perte de charge maximale avant décolmatage a été fixée pour avoir le même rapport $\Delta P_{Max}/U = 10000$ Pa.s.m^{-1}, ce qui correspond à une masse déposée proche de 60 g.m^{-2}. Les décolmatages des cartouches ont été réalisés en online, offline, avec et sans traitement surfacique de nanofibres, pour différentes pressions de l'air de décolmatage et 1 seul et unique pulse. L'efficacité de décolmatage a été évaluée sur 7 cycles de colmatage/décolmatage et par rapport au temps de cycle R_T, qui semble être l'indicateur le plus pertinent (cf. figure 4.18). Sous les conditions étudiées, la chute du débit durant le colmatage n'est pas importante.

Comme on peut le constater, l'augmentation de la pression d'air de décolmatage permet d'améliorer l'efficacité de décolmatage, car elle est associée à une augmentation de la pression exercée sur la surface

du média lors du pulse. Cependant, le mode de décolmatage semble également être un facteur influent. En effet, une différence importante est observée entre les résultats en offline et en online. Cela peut être expliqué par le fait qu'en online le débit d'aspiration représente une force qui agit dans le sens contraire de la force de détachement. De plus, garder la génération durant le décolmatage peut certainement causer une redéposition immédiate des particules remises en suspension dans les régions décolmatées. Le mode offline est fortement recommandé si l'application industrielle le permet, puisqu'il permet d'assurer des efficacités de décolmatage élevées. Le traitement surfacique qui consiste en une couche de nanofibres a également un effet bénéfique marqué sur l'efficacité de décolmatage. Sans le traitement surfacique l'efficacité de décolmatage diminue considérablement. La couche de nanofibres permet de diminuer la force d'adhésion entre le gâteau et la surface du filtre favorisant ainsi son détachement. Aucune influence significative du plissage n'a été observée sur l'efficacité de décolmatage pour des α inférieurs à 6. Pour un décolmatage offline à 6 bars et avec traitement surfacique, une augmentation de l'efficacité de décolmatage est notée au cours des cycles. Cela peut être imputé à une augmentation de la cohésion entre le gâteau formée et les masses résiduelles sur la surface du filtre des cycles précédents. Les efficacités de décolmatage enregistrées à 2 bars sont faibles comparativement aux autres pressions de décolmatage, ce qui confirme que cette valeur est insuffisante pour le détachement du gâteau. Par ailleurs, ces essais confirment également qu'un gâteau de filtration composé de particules microniques est plus facilement décolmatable que celui composé de nanoparticules.

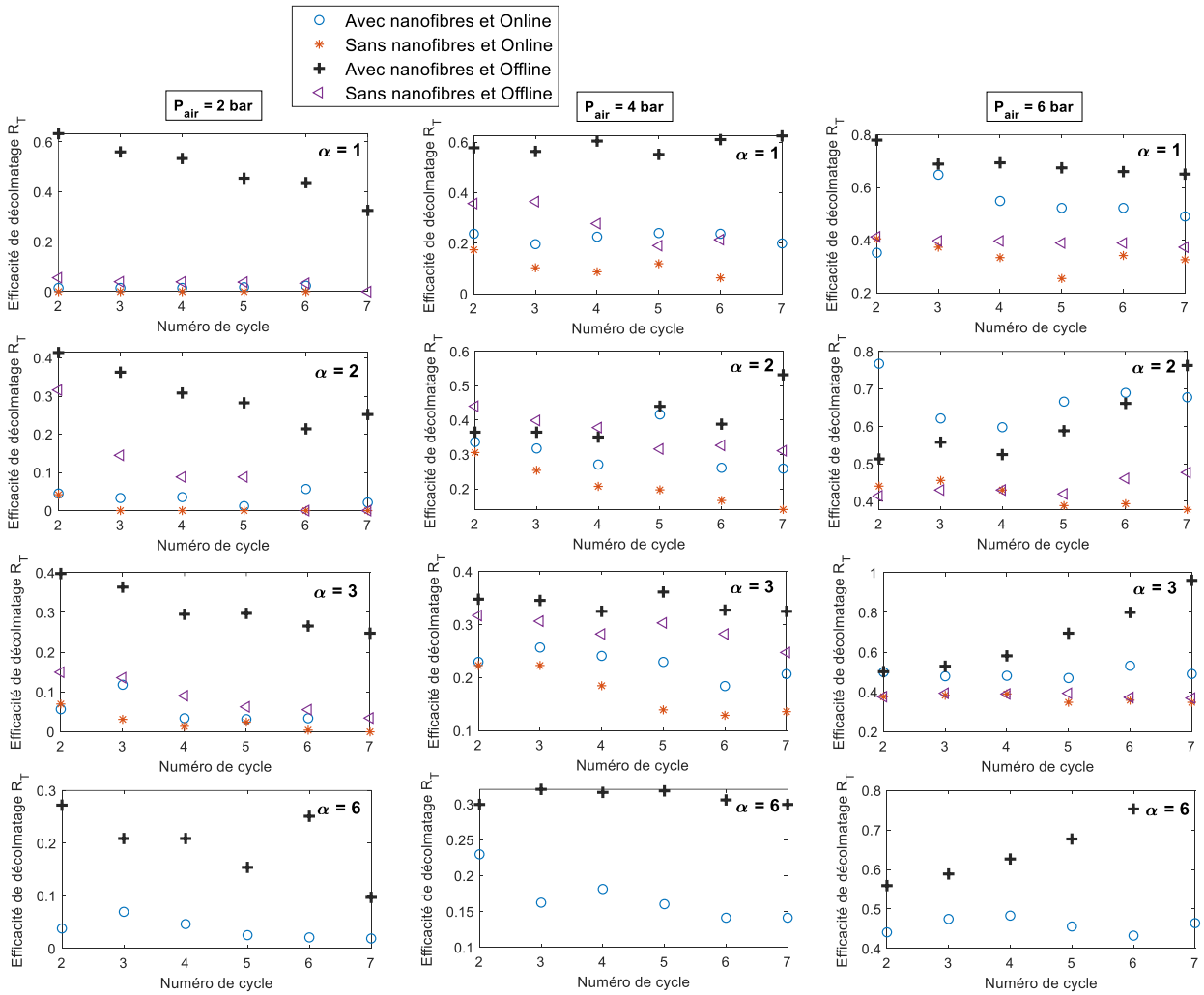


Figure 4.18 : Résultats de l'efficacité de décolmatage des cartouches plissées sous différentes conditions suite à un colmatage avec le précoating seul.

4.2.5. Application du précoating

Le mode d'application du précoating est un point qui n'a pas été étudié dans la littérature. Le mode classique consiste à déposer la couche de précoating avant la filtration des particules ultrafines avec une ré-application après chaque décolmatage, ce qui nécessite un arrêt de la génération des particules. Ce mode peut ne pas être pratique pour certaines applications industrielles, et la possibilité d'injecter le précoating pendant la filtration peut être plus adaptée.

4.2.5.1. Application pendant la filtration des nanoparticules

Dans un premier temps, l'injection du précoating pendant la filtration des nanoparticules a été étudiée. Ce mode opératoire est plus intéressant car il permet d'assurer un processus de filtration continu sans besoin d'arrêter la génération des particules pour le décolmatage et la ré-application de la couche de précoating. Les expériences ont été réalisées en injectant le précoating, durant la filtration des nanoparticules, pendant une durée de 10 min, puis la filtration des nanoparticules se poursuit jusqu'à atteindre la valeur de la perte de charge maximale avant décolmatage. Le décolmatage a été effectué online avec une pression de l'air comprimé de 6 bars et un seul pulse. Les résultats sont présentés sur la figure 4.19. L'injection du précoating semble avoir un effet bénéfique sur le processus de filtration en comparaison des résultats de la figure 4.13. La résistance à l'écoulement du mélange (précoating + nanoparticules) reste importante, avec une chute significative du débit.

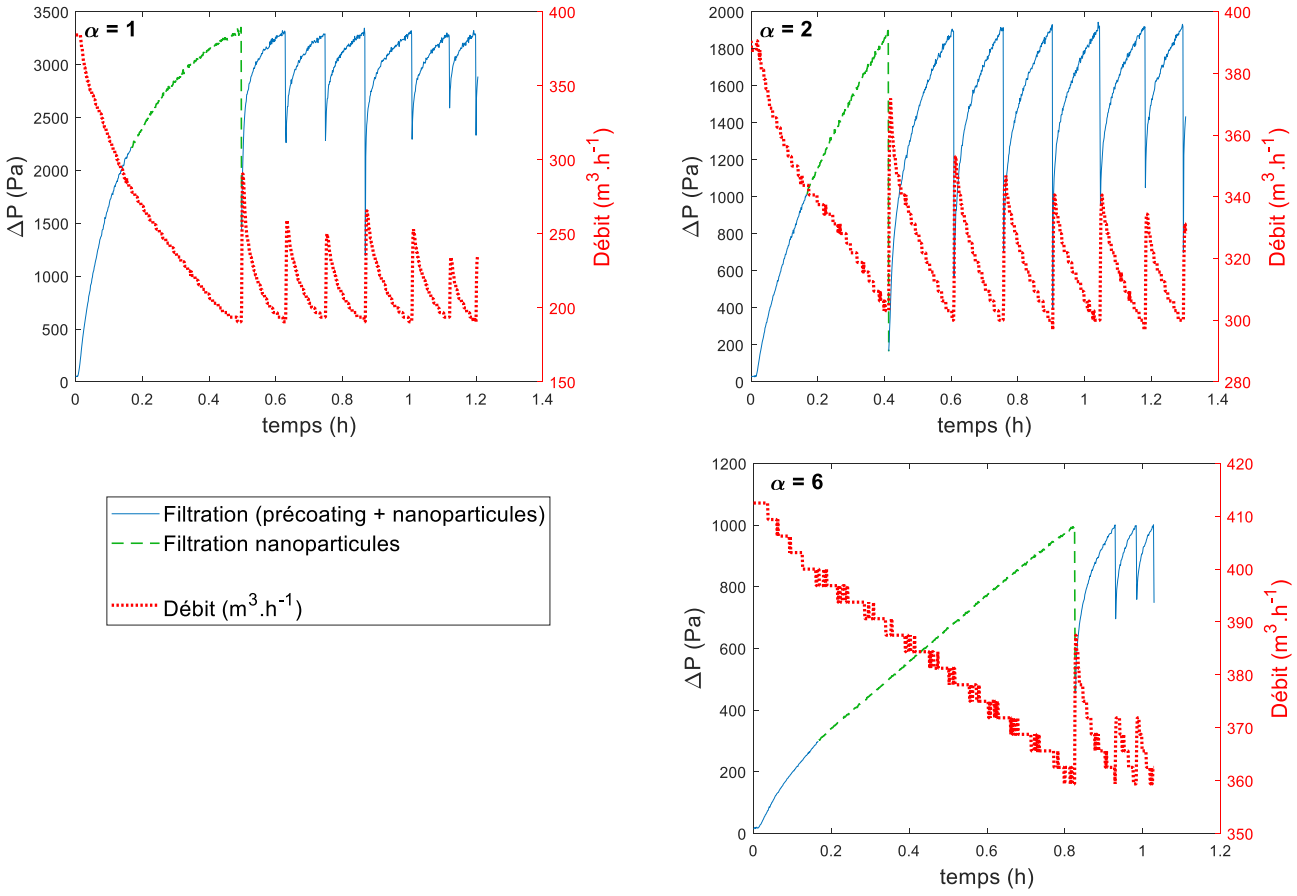


Figure 4.19 : Cycles colmatage/décolmatage avec application du précoating durant la filtration des nanoparticules et un décolmatage online avec une pression de 6 bars, 1 pulse et pour différentes valeurs de α.

Il peut être remarqué qu'après le premier décolmatage, l'injection du précoating s'est fait sans interruption à cause de la réduction du temps de cycle. Il n'était pas possible d'étudier l'effet du débit massique de précoating injecté à cause de limitations liées au générateur utilisé. En effet, injecter une masse importante de précoating durant un temps relativement bref peut permettre d'optimiser les conditions et réaliser la filtration online.

Les résultats exprimés en termes d'efficacité de décolmatage sont présentés par la figure 4.20. Sous ces conditions, le critère calculé R_S ne représente pas les résultats expérimentaux R_T et le critère R_P donne une estimation plus proche. Cela semble indiquer que le décolmatage n'a plus lieu par plaques, d'où l'intérêt dans l'avenir d'étudier plus en profondeur ce mode d'application. Malgré une pseudo-stabilisation de la valeur de l'efficacité de décolmatage au cours des cycles (< 40%), on est loin d'un décolmatage efficace. Pour α=6, c'est-à-dire plus des plis plus fermés, le décolmatage se montre moins efficace.

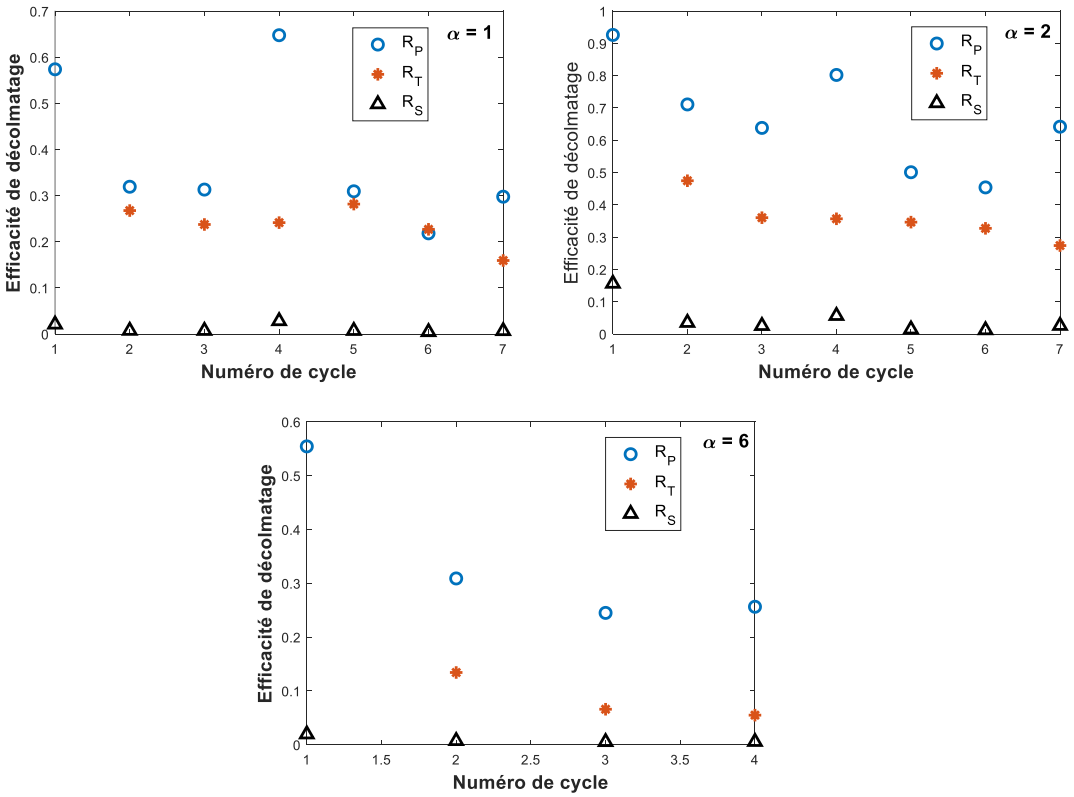


Figure 4.20 : Efficacité de décolmatage au cours des cycles pour une application du précoating durant la filtration des nanoparticules.

4.2.5.2. Application avant la filtration des nanoparticules

Dans cette section le précoating a été appliqué avant la filtration des nanoparticules, et le décolmatage a été réalisé en offline. Deux matériaux ont été utilisé comme précoating : SiO_2 et $C_2H_6Cl_2Si$. Le dernier est destiné spécifiquement aux cartouches plissées avec une unique application selon le fabricant, c'est-à-dire sans besoin de réappliquer la couche après chaque décolmatage.

4.2.5.2.1. Utilisation de la poudre à base de SiO_2

Les essais ont été réalisés avec les cartouches α=3 et α=6, la masse de précoating déposée était de 30 $g.m^{-2}$. Le décolmatage offline a été effectué avec 1 pulse et une pression d'air comprimé de 6 bars suivi par la ré-application de la couche de précoating. Les résultats sont donnés par la figure 4.21, où des processus de filtration très stables ont été obtenus. En effet, la perte de charge résiduelle et le temps de cycle sont quasi-constants au cours des cycles.

L'application du précoating avant la filtration des nanoparticules a permis d'assurer un décolmatage efficace et protéger la surface du filtre. Aucune différence significative n'est observée entre α=3 et α=6, ce qui implique que le plissage n'a pas eu d'influence sur les performances de décolmatage lors de l'application du précoating. Cela est intéressant pour optimiser les dépoussiéreurs industriels, car les résultats montrent qu'il est possible d'augmenter la vitesse de filtration et réduire la surface de filtration (réduire les coûts) sans affecter l'efficacité de décolmatage. Cependant, le mode d'application du précoating avant la filtration des nanoparticules peut ne pas être toujours faisable en pratique.

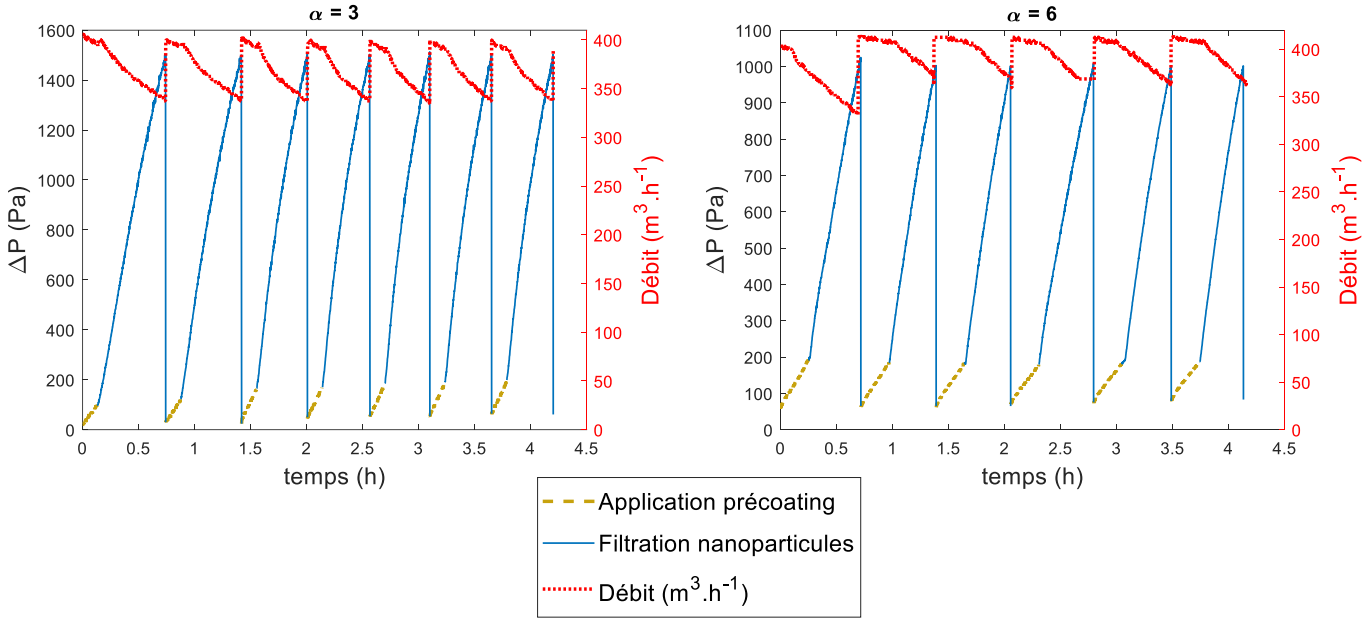


Figure 4.21 : Cycles colmatage/décolmatage avec application du précoating (SiO_2) avant la filtration des nanoparticules, décolmatage réalisé en offline avec 6 bars et 1 pulse.

Pour une valeur de α = 3, les effets de l'épaisseur du précoating, de la valeur de la perte de charge maximale avant décolmatage (c.-à-d. la masse collectée de nanoparticules) et du traitement surfacique sur l'efficacité de décolmatage au cours des cycles ont été étudiés. Les conditions testées sont :

- Masses déposées de précoating : W_1 = 30 $g.m^{-2}$ et W_2 = 10 $g.m^{-2}$. Selon les résultats sur filtres plans la masse W_1 représente la masse nécessaire pour assurer une protection efficace du filtre.
- Valeurs de perte de charge maximale avant décolmatage : ΔP_{Max1} = 1500 Pa et ΔP_{Max2} = 750 Pa.
- Sans et avec traitement surfacique de nanofibres.

Les résultats de l'efficacité de décolmatage sont présentés par la figure 4.22. On peut voir que l'effet de la masse déposée de précoating sur l'efficacité de décolmatage est très sensible en l'absence de traitement surfacique par nanofibres ($R_T > 0,9$ et $R_T \approx 0,3$ pour resp. W_1 et W_2) alors que l'effet est quasi absent avec la couche de nanofibres ($R_T \approx 0,7$ pour W_1 et W_2). En effet, lorsque la masse déposée est suffisante pour empêcher les nanoparticules de pénétrer à la surface (W_1= 30 g.m^{-2}) les performances de décolmatage sans et avec traitement surfacique sont équivalentes. Cependant, le traitement surfacique est bénéfique pour optimiser les conditions, puisque la masse de précoating peut être réduite sans affecter les performances de décolmatage. L'effet de la masse collectée de nanoparticules (ΔP_{Max1} et ΔP_{Max2}) pour les conditions étudiées n'est pas tranché comme cela a pu être observé lors des essais sur filtres plans au chapitre 3. La pression d'air de décolmatage utilisée est peut-être trop importante et masque les éventuels écarts. Des études complémentaires sur l'effet de la pression de l'air de décolmatage, non réalisées par manque de temps et de cartouches disponibles, mériteraient d'être menées pour éclaircir ce point et permettre une optimisation des conditions opératoires de la régénération.

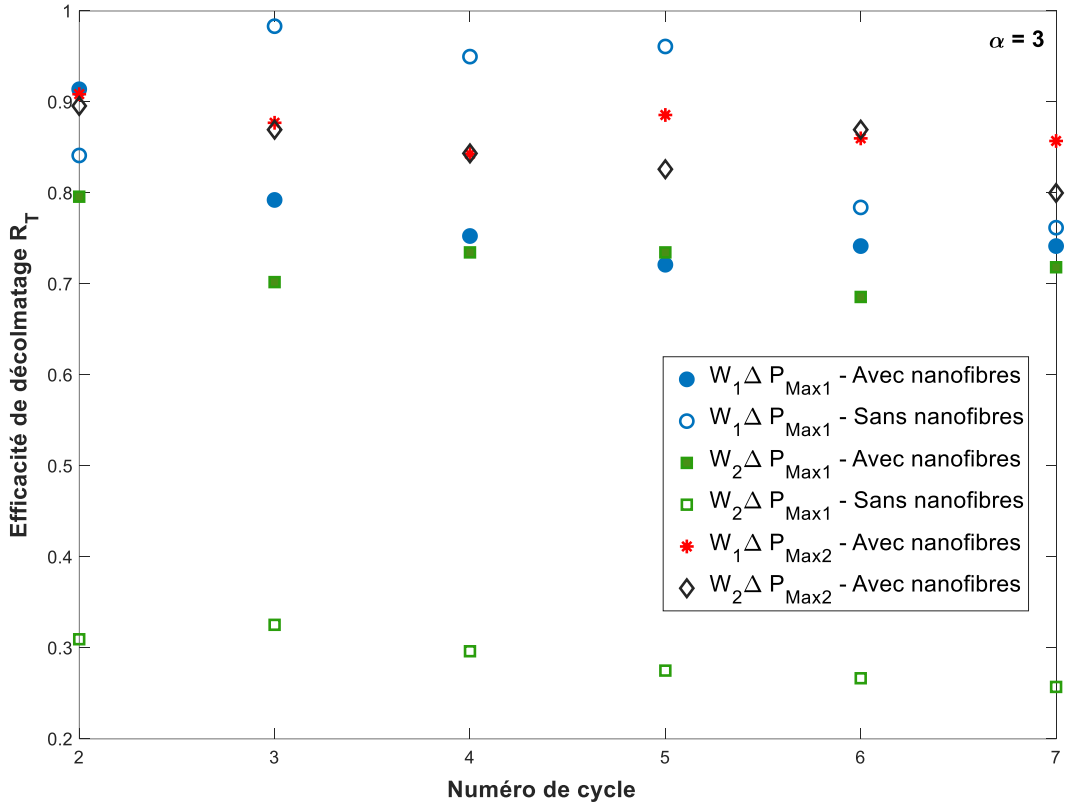


Figure 4.22 : Effet de différents paramètres sur l'efficacité de décolmatage pour une cartouche avec α=3, une application du précoating avant la filtration des nanoparticules et un décolmatage en offline avec 6 bars et 1 pulse.

Une photo (figure 4.23) de la cartouche plissée (α=3 avec traitement surfacique) après les cycles colmatage/décolmatage avec application du précoating avant la filtration des nanoparticules montre un filtre relativement propre, impliquant l'augmentation de sa durée de vie, comparativement à celle obtenue après colmatage par les nanoparticules seules (voir figure 4.13).



Figure 4.23 : Photo d'une cartouche plissée (α=3) après les cycles de décolmatage avec une application du précoating avant la filtration des nanoparticules.

4.2.5.2.2. Utilisation de la poudre à base de $C_2H_6Cl_2Si$

Une autre série d'essais a porté sur la poudre commercialisée spécialement pour les cartouches plissées. Cette poudre, à base de $C_2H_6Cl_2Si$, de très faible densité est censée pré-colmater le filtre de manière permanente en une seule application. Selon le fabricant la masse déposée à appliquer est de 10 $g.m^{-2}$. La poudre a été générée avec le générateur à vis-sans-fin couplé à un éjecteur venturi. La distribution granulométrique en nombre de la taille des particules a été mesurée avec un compteur optique Laser Aerosol Spectrometer (3340, TSI®) après une dilution d'un facteur 1000 (VKL 10+100, Palas®) (voir figure 4.24). Le spectromètre laser est un appareil optique de haute résolution pour la mesure de la distribution des particules. Son principe de fonctionnement repose sur la mesure de l'intensité de la lumière diffusée suite au passage des particules au travers d'un faisceau laser ; cette intensité est corrélée à la taille des particules. La distribution en nombre présente un diamètre optique modal entre 100 et 200 nm.

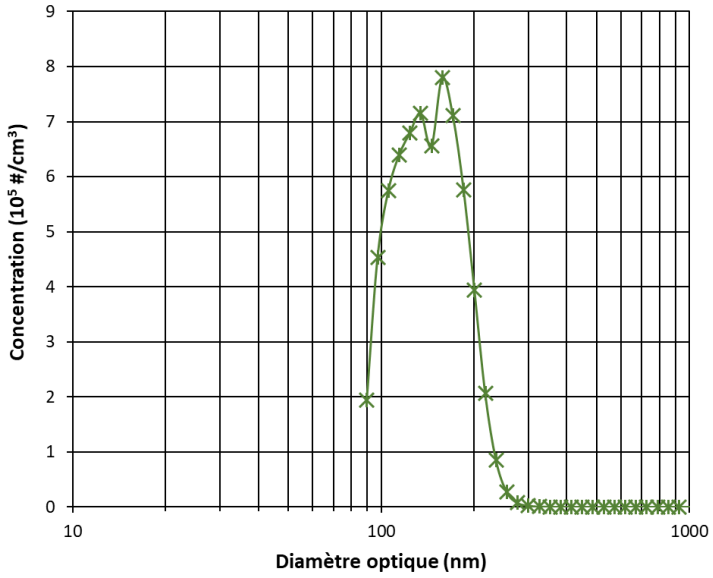


Figure 4.24 : Distribution granulométrique en nombre des particules de $C_2H_6Cl_2Si$ générées.

La couche de précoating a été appliquée une unique fois avant la filtration des nanoparticules et le décolmatage offline a été réalisé à 6 bars et suite à 4 pulses. Les résultats de l'application de cette poudre sont donnés par la figure 4.25. La phase d'application de la couche montre que le gâteau formé possède une résistance importante à l'écoulement, qui se traduit par une augmentation significative de la perte de charge, ce qui est attendu compte tenu de la distribution de taille des particules de précoating. La génération des nanoparticules est ensuite initiée et la première valeur de la perte de charge maximale avant décolmatage a été fixée à 2000 Pa. Le choix de cette valeur vient du fait que la couche de précoating seule, d'une masse de 10 $g.m^{-2}$, présente déjà une perte de charge élevée de l'ordre de 1200 Pa.

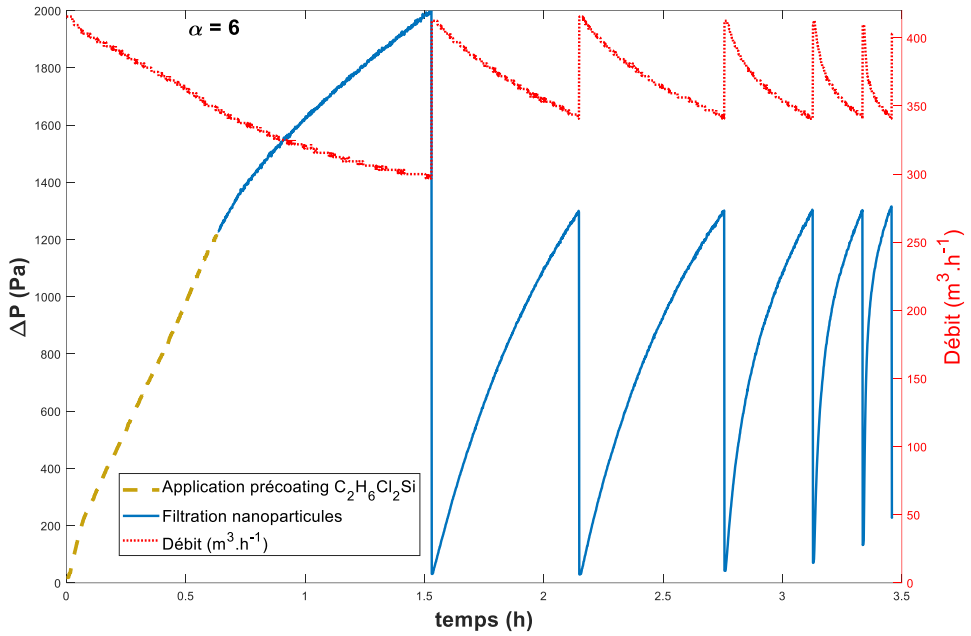
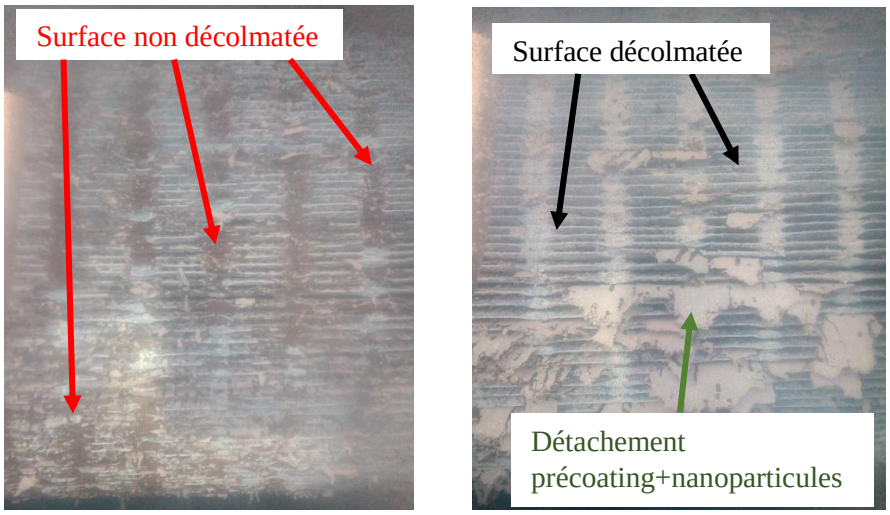


Figure 4.25 : Cycles colmatage/décolmatage avec application de la poudre $C_2H_6Cl_2Si$.

Lors du premier décolmatage un détachement du gâteau est observé visuellement, comme le montre la figure 4.26. L'efficacité de décolmatage augmente avec le nombre de pulses, car après 4 pulses, une partie plus importante de la surface semble être régénérée. Il semble que la cohésion entre les particules de précoating et les nanoparticules métalliques a permis de faciliter le détachement du gâteau. Après le troisième cycle de filtration, une détérioration des performances de régénération peut être observée. Effectivement, une réduction du temps de cycle et une augmentation de la perte de charge résiduelle sont notées. Dans le cas étudié, il serait peut-être mieux de renouveler la couche. Cependant, cette dernière engendre une perte de charge très importante. Cette poudre n'est peut-être pas adaptée pour cette application. Néanmoins, ces résultats soulignent l'importance de la cohésion du dépôt, qui semble être un paramètre déterminant pour améliorer l'efficacité de décolmatage. En effet, comme dans les résultats de Zhang et Schmidt (2012) dans l'étude de l'application du post-coating et dans les résultats présentés dans les chapitres 2 et 3 sur l'effet de la masse déposée, plus la cohésion du gâteau de particules augmente plus son détachement sera facile.



(a) **(b)**

Figure 4.26 : Photos de la cartouche lors du premier décolmatage en offline avec une pression de 6 bars après 1 pulse (a) et 4 pulses (b).

Conclusion

Cette étude expérimentale a permis d'étudier et d'identifier les paramètres qui influent sur l'efficacité de décolmatage des cartouches plissées par jet pulsé. Différents paramètres ont été étudiés : plissage des cartouches, taille des particules, mode de décolmatage, pression de l'air de décolmatage, traitement surfacique des filtres et mode d'application du précoating. La mesure de l'accélération du média a aussi montré, qu'au contraire des manches filtrantes, l'accélération ne joue pas un rôle important dans le détachement du gâteau de filtration pour les cartouches plissées.

Face aux nanoparticules métalliques, le colmatage des cartouches plissées semble être irréversible, malgré les conditions extrêmes de décolmatage. Cela s'explique par la forte adhésion du gâteau de filtration formé, qui présente une résistance importante à l'écoulement. Les résultats reflètent les difficultés de filtration des émissions métallurgiques rencontrées dans la pratique. En effet, une augmentation rapide de la perte de charge se traduit par une consommation énergétique plus importante et le colmatage irréversible implique une nécessité de changer les filtres après chaque colmatage. Tout cela fait augmenter les coûts opérationnels.

Les cycles colmatage/décolmatage réalisés avec des particules microniques (précoating seul) ont permis de montrer l'effet de la taille des particules. Un gâteau de filtration composé de particules microniques est plus facilement décolmatable. Les essais ont confirmé l'effet bénéfique du traitement surfacique (couche de nanofibres) et de la pression de l'air de décolmatage sur l'efficacité de décolmatage. Les expériences ont aussi révélé que le mode de décolmatage (online ou offline) avait une influence très marquée sur l'efficacité de décolmatage. Le mode de décolmatage offline est fortement recommandé si l'application industrielle le permet. Cependant, le plissage n'a pas eu un effet significatif sur les performances de décolmatage. Finalement, l'applicabilité du précoating pour les cartouches plissées a été validée. Des processus de filtration très stables ont été obtenus, et la masse de précoating à utiliser peut-être optimisée avec la présence du traitement surfacique. Par contre, Le mode d'application du précoating reste à étudier de manière à pouvoir réaliser la filtration en continu sans arrêt. La réduction de la pression de l'air de décolmatage avec précoating est un autre paramètre qui n'a pas été testé. Cela est intéressant industriellement car permettrait de réduire la quantité d'air comprimé consommée.

Références

Asch, G., Blum, L., Fouletier, J., Desgoutte, P., Crétinon, B., Piquet, A., Marty, J.-L., Poussery, B., 2017. Les capteurs en instrumentation industrielle.

Bémer, D., Morele, Y., Régnier, R., 2015. Filtration of ultrafine metallic particles in industry. Environ. Technol. (United Kingdom) 36, 2374–2380. https://doi.org/10.1080/09593330.2015.1028471

Chen, L., Ye, M., Liu, Z., Qian, F., Wei, M., Han, Y., Lu, J., 2020. Experimental investigation on low-pressure pulse dust cleaning performance of plate-frame microporous membrane filter media. Powder Technol. 375, 352–359. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.003

Chen, S., Chen, D.R., 2017. Annular-slit nozzles for reverse flow cleaning of pleated filter cartridges. Sep. Purif. Technol. 177, 182–191. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.10.050

Chen, S., Wang, Q., Chen, D.R., 2017. Effect of pleat shape on reverse pulsed-jet cleaning of filter cartridges. Powder Technol. 305, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.013

Cho, H., Youn, J.-S., Oh, I., Jung, Y.-W., Jeon, K.-J., 2020. A new air-washing method to clean fabric filters clogged with submicron fume particles: A pilot-scale study. J. Hazard. Mater. 383, 121186. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121186

Del Fabbro, L., Laborde, J., Merlin, P., Ricciardi, L., 2002. Air flows and pressure drop modelling for different pleated industrial filters. Filtr. Sep. 39, 34–40. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(02)80055-6

He, C., Yan, C., Tang, C., Huang, M., Ren, L., Zhang, M., 2021. Nitrogen pulse jet cleaning of the pleated filter cartridge clogged with adhesive hygroscopic dusts. Process Saf. Environ. Prot. 147, 430–438. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.045

Kang, F., Cheng, H., Leng, H., Zen, S., Xu, Z., Li, X., Lǖ, J., Lin, L., Chen, H., 2020. Performance optimization of rectangular flat pleated filter with slit nozzle for dust cleaning. Powder Technol. 376, 320–331. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.035

Kim, J.S., Lee, M.H., 2019. Measurement of effective filtration area of pleated bag filter for pulse-jet cleaning. Powder Technol. 343, 662–670. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.080

Li, J., Li, S., Zhou, F., 2015. Effect of cone installation in a pleated filter cartridge during pulse-jet cleaning. Powder Technol. 284, 245–252. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.06.071

Li, J., Wu, D., Wu, Q., Luo, M., Li, Jiangsheng, 2019. Design and performance evaluation of novel colliding pulse jet for dust filter cleaning. Sep. Purif. Technol. 213, 101–113. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.12.022

Li, S., Hu, S., Xie, B., Jin, H., Xin, J., Wang, F., Zhou, F., 2019a. Influence of pleat geometry on the filtration and cleaning characteristics of filter media. Sep. Purif. Technol. 210, 38–47. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.002

Li, S., Jin, H., Hu, S., Tan, X., Liu, H., Xie, B., Kang, J., Zhou, F., 2019b. Effect of novel built-in rotator on the performance of pleated cartridge filter. Powder Technol. 356, 1001–1007. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.052

Lo, L.M., Chen, D.R., Pui, D.Y.H., 2010. Experimental study of pleated fabric cartridges in a pulse-jet cleaned dust collector. Powder Technol. 197, 141–149.

https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.09.007

Qiu, J., Wu, D., Chen, D.R., Li, J., 2021. Reverse pulsed-flow cleaning of pleated filter cartridges having an inner pleated filter cone. Process Saf. Environ. Prot. 146, 481–489. https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.11.025

Simon, X., Chazelet, S., Thomas, D., Bémer, D., Régnier, R., 2007. Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings. Powder Technol. 172, 67–81. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.10.005

Yan, C., Zhang, M., Lin, L., 2015. On-line pulse-jet cleaning of pleated fabric cartridge filters for collecting pesticides. RSC Adv. 5, 48086–48093. https://doi.org/10.1039/c5ra04738b

Zhang, Q., Schmidt, E., 2012. Effects of Post-Coating By Generating a Thin Secondary Particle Layer. 11th World Filtr. Congr.

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de cette thèse était d'évaluer l'efficacité de décolmatage des filtres fibreux colmatés par des nanoparticules métalliques et d'étudier l'application de la technique de précoating comme solution pour améliorer la régénération. Ce travail a été réalisé dans l'optique de pouvoir proposer au final des recommandations pour optimiser les performances des systèmes de filtration industriels. Pour atteindre cette finalité, il y avait notamment un besoin de comprendre l'influence de différents paramètres sur le détachement des gâteaux de filtration.

Pour cela, une étude expérimentale a été menée avec un pilote de projection thermique à arc électrique qui permet de reproduire les conditions réelles rencontrées sur le terrain. Les expériences ont été réalisées à deux échelles :

- Essais sur filtres plans avec pour but d'évaluer l'efficacité de décolmatage d'un gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques, sans et avec précoating, et d'étudier l'effet des conditions opératoires.
- Essais sur cartouches plissées pour valider les résultats obtenus sur filtres plans et vérifier l'applicabilité du précoating sur des cartouches industrielles.

Dans un premier temps, les résultats ont permis de confirmer les difficultés liées à la filtration des émissions métallurgiques. Une perte de charge très importante a été enregistrée lors de la formation d'un gâteau de filtration constitué de nanoparticules métalliques, avec une résistance spécifique à l'écoulement de l'ordre de 10^{12} $m.kg^{-1}$. De plus, la force d'adhésion du gâteau à la surface du filtre a été estimée de 1000 $N.m^{-2}$, qui est cinq fois plus importante que celle d'un gâteau composé de particules microniques, associée à un décolmatage inefficace. Les essais ont montré que même avec l'augmentation de la masse déposée et la variation des conditions opératoires, l'efficacité de décolmatage par jet pulsé ne dépasse pas 30%. Il s'agit d'un décolmatage inefficace par plaques où la valeur de la perte de charge résiduelle ne permet pas d'évaluer l'efficacité de régénération. En effet, lorsque les plaques se détachent, l'air passe de manière préférentielle à travers les zones de faibles résistances, ce qui fait diminuer la perte de charge. Dans une première tentative pour améliorer l'efficacité de décolmatage, différents médias avec différents traitements surfaciques (couche de nanofibres, traitement thermique et membrane polyéthylène) ont été testés. Effectivement, la nature du média filtrant influe sur la force d'adhésion du gâteau de filtration, d'autant que les traitements surfaciques étudiés sont censés faciliter la régénération. Cependant, aucune amélioration de l'efficacité de décolmatage n'a été notée, ce qui est lié à la forte adhésion du dépôt formé.

Les expériences ont aussi mis en évidence que le vieillissement atmosphérique d'un gâteau de filtration composé de nanoparticules métalliques entrainait une transformation chimique aboutissant à la formation d'hydrocarbonates. La formation de ces espèces est favorisée par l'augmentation du taux d'humidité. La caractérisation du dépôt après vieillissement a montré un changement de la morphologie des particules et une diminution de la résistance à l'écoulement. En parallèle, cette transformation a été accompagnée par une augmentation de la force d'adhésion du gâteau et une diminution de l'efficacité de décolmatage. Cela explique les observations des industriels après l'exposition de gâteaux de filtration à l'humidité pendant plusieurs jours. Le vieillissement du gâteau de filtration peut donc affecter les performances des systèmes de filtration, et reste un sujet qui est très peu étudié dans la littérature.

Tous ces éléments montrent la nécessité d'apporter une solution adaptable au niveau industriel. Dans cette optique, l'étude de l'application du précoating sur filtres plans a montré une amélioration significative de l'efficacité de décolmatage par jet pulsé, avec un passage de 15 % sans précoating à 90% avec précoating. Les résultats ont aussi révélé l'effet bénéfique de la couche de précoating sur

l'efficacité de collecte, la capacité de rétention de nanoparticules et l'efficacité de décolmatage. En réalité, la couche de précoating représente un média filtrant additionnel qui permet de collecter les nanoparticules en profondeur de la couche. Plus l'épaisseur de la couche augmente, meilleure est la protection de la surface du filtre. Les données ont montré qu'il est possible d'estimer les performances de filtration de cette couche avec les modèles du lit granulaire. Ainsi, l'application de précoating peut permettre d'optimiser les conditions de décolmatage. En effet, avec l'augmentation de la masse déposée de précoating et la masse collectée de nanoparticules métalliques, il est possible de réaliser un décolmatage efficace en réduisant la pression de l'air de décolmatage. Ceci peut être intéressant à l'échelle industrielle car permettra de réduire la quantité consommée d'air comprimé. Les cycles colmatage/décolmatage ont démontré que l'application de précoating permet de stabiliser le processus de filtration, à condition de réappliquer la couche après chaque décolmatage.

Finalement, les essais sur cartouches plissées ont validé les résultats obtenus avec filtres plans, à savoir un colmatage rapide et irréversible des filtres par les nanoparticules métalliques. L'augmentation de la perte de charge après colmatage a été associée à une chute importante du débit de filtration, qui devient plus marquée avec l'augmentation de la vitesse de filtration. A travers les résultats des cycles colmatage/décolmatage, le temps de cycle a été jugé comme un critère pertinent pour évaluer l'efficacité de décolmatage, car il reflète directement la variation de la capacité de rétention. La comparaison des performances suite au colmatage par des particules microniques (précoating seul) et par des nanoparticules métalliques, a permis de montrer l'effet de la taille des particules. La diminution de diamètre des particules est associée à une perte de charge plus importante et un mauvais décolmatage. Les expériences ont montré que le traitement surfacique (couche de nanofibres) et la pression de l'air comprimé ont un effet bénéfique sur la régénération des filtres. Le mode de décolmatage (online ou offline) a également une influence très marquée sur l'efficacité de décolmatage, le mode offline étant meilleur. Par contre, les plissages testés ($\alpha < 6$) n'ont pas eu un effet significatif sur les performances de décolmatage. Enfin, l'applicabilité du précoating pour les cartouches plissées a été validée, des processus de filtration très stables ont été obtenus. Les résultats ont ainsi montré que le traitement surfacique peut permettre d'optimiser la masse de précoating à utiliser.

En se basant sur les résultats de cette thèse, nous pouvons proposer les recommandations suivantes pour les systèmes de filtration industriels :

- Éviter le vieillissement des dépôts de poussières, pour éviter une transformation chimique de ces derniers ;
- Le mode de décolmatage offline est fortement recommandé ;
- La valeur de la perte de charge maximale avant décolmatage doit être fixée à la plus haute valeur tolérable sur le réseau aéraulique ;
- Face aux problèmes de régénération, le précoating représente une solution viable et facile à mettre en œuvre pour améliorer à la fois les performances de filtration et de décolmatage ;
- Le traitement surfacique qui consiste en une couche de nanofibres a un effet bénéfique sur les performances de décolmatage, même avec application de précoating ;
- La valeur de la pression de l'air de décolmatage a un effet déterminant sur l'efficacité de décolmatage et doit être ajustée à la plus haute valeur possible ;
- Le plissage (pour $\alpha < 6$) n'a pas d'effet significatif sur les performances de décolmatage et n'influe pas sur l'application du précoating ;
- Opérer à haute vitesse de filtration (> 4 cm.s^{-1}) est problématique à cause de la perte de charge importante, associée à une chute marquée du débit de filtration.

Ce travail expérimental nécessite encore d'être complété par d'autres expériences pour arriver à mieux optimiser les conditions opératoires, il s'agit de :

- Étudier l'effet de la pression de l'air comprimé sur le décolmatage avec application du précoating sur cartouches plissées. En effet, les résultats sur filtres plans ont montré qu'il est possible de réduire la pression de l'air comprimé, mais cela reste à vérifier sur cartouches plissées. Cette information est extrêmement importante, car réduire la pression de l'air de décolmatage limite la consommation d'air comprimé, ce qui permet de réduire les coûts opératoires. Cela peut rendre l'utilisation du précoating plus attirante en industrie.
- Étudier le mode d'application du précoating durant la filtration. Cela est d'intérêt pour les applications où la filtration ne peut être arrêter pour appliquer la couche de précoating. L'effet de l'injection d'un débit massique important durant une courte période de temps au début de la filtration est à tester sur cartouches plissées.

Ainsi, pour approfondir notre compréhension sur le décolmatage des gâteaux de filtration, la cohésion des particules au sein du gâteau de filtration semble être primordiale. Certaines études dans la littérature (Zhang et Schmidt, 2012; Horst et al., 2019) et nos résultats (effet de la mase déposée et utilisation de la poudre $C_2H_6Cl_2Si$) ont montré que plus la cohésion du gâteau augmente meilleur est le décolmatage. Cela peut permettre de développer de nouvelles techniques pour améliorer le détachement des gâteaux de filtration.

Annexe A : Quelques notions sur les aérosols

A.1. Définitions

Un aérosol est défini comme une suspension de particules solides ou liquides dans un gaz. Le terme est apparu vers les années 1920 par analogie au terme « hydrosol », qui lui désigne une suspension de particules solides dans un liquide. Les aérosols peuvent être de sources naturelles (comme les volcans et les sels de mer) ou de sources anthropiques (activités industrielles ou combustion). La figure A.1 permet de donner un ordre de grandeur de la taille des particules selon leur origine (Hinds, 1999). Actuellement, les recherches sur les aérosols attirent beaucoup d'attention. En effet, ces derniers ont une influence déterminante sur la santé humaine, le climat et les activités biologiques des êtres vivants.

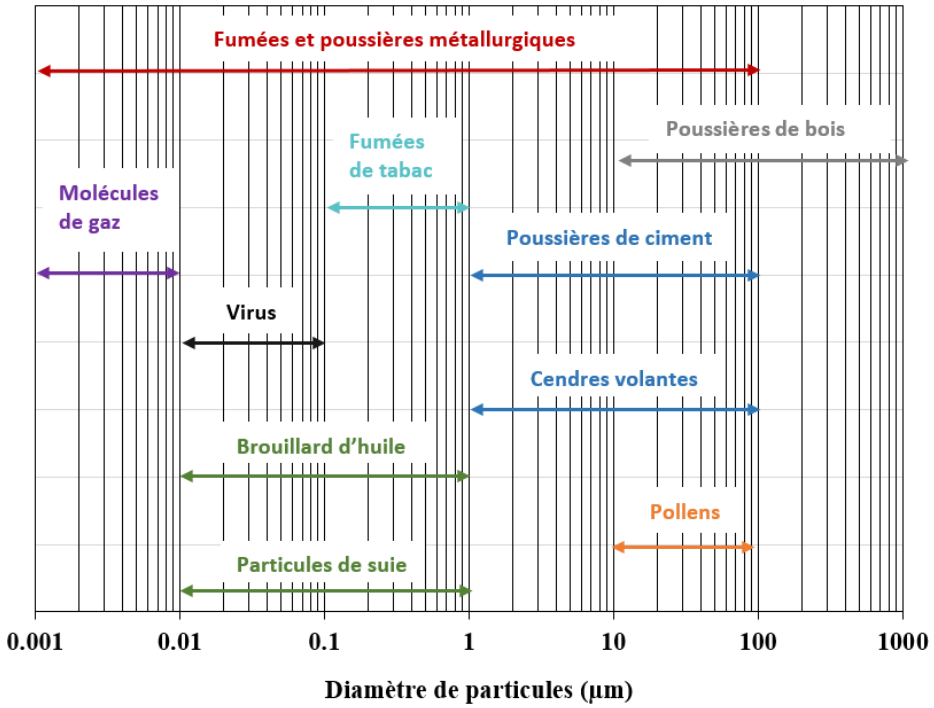


Figure A.1 : Ordre de grandeur de la taille de certaines particules selon leur origine (Hinds, 1999).

La science des aérosols s'intéresse à l'étude des propriétés et comportements physiques des particules pour des fins de caractérisation et de quantification. Comme les particules en suspension possèdent parfois des diamètres comparables à celui des molécules de gaz, ils peuvent entrer en collision avec ces derniers. Afin de comprendre ces interactions, la théorie cinétique des gaz est utilisée. Cette théorie est basée sur l'hypothèse que le gaz est composé d'un grand nombre de molécules en mouvement aléatoire et en permanente collision, la collision étant la seule forme d'interaction. Sur la base de cette théorie, une notion importante a été introduite par Clausius en 1858, le libre parcours moyen, noté λ, qui représente la distance parcourue par une molécule entre deux collisions successives, exprimé comme suit (Couture et Zitoun, 2000):

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\, n_{mol}\, \pi\, d_{mol}^2} \qquad (A.1)$$

avec n_{mol} le nombre de molécules par unité de volume et d_{mol} le diamètre de la molécule.

Le libre parcours moyen est fonction de la température et la pression, vu que ces deux paramètres influent sur l'agitation des molécules. Il peut être calculé à différentes températures et pressions par la relation de Willeke (1976):

$$\lambda = \lambda_0 \frac{T}{293} \frac{101}{P} \frac{1 + \frac{110,4}{293}}{1 + \frac{110,4}{T}} \quad (A.2)$$

où λ_0 est le libre parcours moyen du gaz à pression atmosphérique et à 20 °C (pour l'air λ_0 = 66,4 nm), P est la pression exprimée en en kPa et T la température en Kelvin.

Le nombre de Knudsen Kn est souvent employé pour caractériser la continuité du milieu, il compare le libre parcours moyen des molécules de gaz λ au rayon de la particule en suspension r_p :

$$Kn = \frac{\lambda}{r_p} \quad (A.3)$$

Selon la valeur de ce nombre adimensionnel, le milieu est dit continu si la valeur du Kn est inférieure à 1, pour un nombre de Knudsen autour de 1 le milieu est intermédiaire, et lorsque la valeur est très supérieure à 1 on est dans le régime moléculaire, où la probabilité de chocs entre molécules de gaz et particules devient importante. Lorsque le diamètre des particules a le même ordre de grandeur que le libre parcours moyen, le mouvement des particules est décrit par le mouvement brownien, qui est un mouvement aléatoire dû aux collisions entre les particules et les molécules de gaz. Dans ce cas la résistance du fluide au mouvement de la particule diminue et un facteur de correction est introduit, qui est le coefficient de Cunningham Cu donné par l'équation A.4 (Rader, 1990), qui est fonction du nombre de Knudsen (Kn). Les valeurs des constantes A, B et C de l'équation sont regroupées dans le tableau A.1.

$$Cu = 1 + Kn \left[A + B \exp\left(\frac{-C}{Kn}\right)\right] \quad (A.4)$$

Tableau A.1 : Valeurs des constantes pour l'estimation du coefficient de Cunningham.

A	B	C	d_p (µm)	Référence
1,250	0,420	0,870	0,35-2,5	(Millikan, 1923)
1,155	0,471	0,590	0,35-2,5	(Allen et Raabe, 1982)
1,142	0,558	0,999	0,8-5	(Allen et Raabe, 1985)
1,099	0,518	0,425	0,35-2,5	(Buckley et Loyalka, 1989)
1,207	0,440	0,780	0,35-2,5	(Rader, 1990)
1,231	0,470	1,178	1-2,2	(Hutchins et al., 1995)
1,65	0,483	0,997	0,02-0,27	(Kim et al., 2005)

La force de frottement globale du fluide sur une particule en mouvement dans ce dernier (résistance) est appelée force de trainée F_t, exprimée comme suit pour un écoulement laminaire :

$$F_t = \frac{3 \pi \mu U d_p}{Cu} \quad (A.5)$$

avec U la vitesse de la particule, d_p diamètre de la particule, µ la viscosité du fluide et Cu le coefficient de Cunningham.

La sédimentation d'une particule dépend de la pesanteur et de la force de trainée qui s'oppose au mouvement de la particule. Après un certain temps de chute, la particule atteint une vitesse limite de

sédimentation, dite aussi vitesse terminale de chute, exprimée comme suit pour un écoulement laminaire autour de la particule :

$$U_s = \frac{\rho_p \, Cu \, g \, d_p^2}{18 \, \mu} \tag{A.6}$$

où U_s est la vitesse limite de sédimentation, ρ_p la masse volumique de la particule, Cu le coefficient de Cunningham, g l'accélération de la pesanteur, d_p le diamètre de la particule et μ la viscosité du fluide.

A.2. Diamètres équivalents

En réalité, les particules en suspension se présentent sous une forme géométrique irrégulière. Afin de définir la taille des particules on utilise la notion de diamètre équivalent, c'est-à-dire le diamètre de la sphère équivalente qui possède une même propriété que la particule considérée. Avoir une estimation de la taille des particules est d'importance afin d'obtenir la distribution granulométrique, qui décrit un ensemble de population de particules en un diamètre équivalent représentatif (diamètre modal ou médian) (Agranovski, 2010). Selon cette propriété, on distingue plusieurs diamètres équivalents :

- **Diamètre équivalent en volume d_V :** le diamètre de la sphère équivalente ayant le même volume que la particule v_p, défini comme suit :

$$d_V = \left(\frac{6 \, v_p}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{A.7}$$

- **Diamètre équivalent en masse d_M :** le diamètre de la sphère équivalente ayant la même masse que la particule m_p, exprimé par :

$$d_M = \left(\frac{6 \, m_p}{\pi \, \rho_p}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{A.8}$$

- **Diamètre de Stokes d_{St} :** le diamètre de la sphère équivalente ayant la même vitesse limite de sédimentation que la particule et la même masse volumique, donné par :

$$d_{St} = \left(\frac{18 \, \mu \, U_s}{\rho_p \, Cu(d_{St}) \, g}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{A.9}$$

- **Diamètre aérodynamique d_A :** le diamètre de la sphère équivalente ayant la même vitesse limite de sédimentation que la particule et une masse volumique standard ρ_0=1000 kg.m^{-3}, donné par :

$$d_A = \left(\frac{18 \, \mu \, U_s}{\rho_0 \, Cu(d_A) \, g}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{A.10}$$

- **Diamètre équivalent en mobilité électrique d_{ME} :** le diamètre de la sphère équivalente ayant la même mobilité électrique que la particule et portant une seule charge électrique. La mobilité électrique Z_e représente le rapport entre la vitesse que prend une particule de charge q dans un champ électrique E et ce même champ électrique. Le diamètre équivalent en mobilité électrique est exprimé par :

$$d_{ME} = \frac{q \, Cu(d_{ME})}{3 \, \pi \, \mu \, Z_e} \tag{A.11}$$

Afin de tenir compte de l'effet de la forme de la particule sur la trainée, le facteur de forme dynamique χ est utilisé. Il est défini comme le rapport entre la force de trainée que subit la particule et celle exercée sur une particule sphérique ayant le même volume et se déplaçant à la même vitesse que la particule considérée. Le facteur prend une valeur de 1 dans le cas d'une sphère :

$$\chi = \frac{F_t(d_p)}{F_t(d_V)} = \frac{d_p\, Cu(d_V)}{d_V\, Cu(d_p)} \tag{A.12}$$

Cette relation permet d'exprimer le diamètre de la particule d_p en fonction du diamètre équivalent en volume d_V et le facteur de forme dynamique χ :

$$d_p = \chi \frac{Cu(d_p)}{Cu(d_V)}\, d_V \tag{A.13}$$

En considérant l'égalité des mobilités électriques entre une particule avec un diamètre équivalent en volume d_V et une particule sphérique avec un diamètre équivalent en mobilité électrique :

$$Z_e(d_V) = Z_e\,(d_{ME}) \Leftrightarrow \frac{Cu\,(d_V)}{\chi\, d_V} = \frac{Cu(d_{ME})}{d_{ME}} \tag{A.14}$$

On peut déduire la relation entre le diamètre équivalent en mobilité électrique et le diamètre équivalent en volume:

$$d_{ME} = \chi\, d_V\ \frac{Cu(d_{ME})}{Cu\,(d_V)} \tag{A.15}$$

De la même manière, en considérant l'égalité des vitesses limites de sédimentation entre une particule de diamètre équivalent en volume d_V et une particule sphérique de diamètre aérodynamique d_A et de masse volumique $\rho_0 = 1000$ kg.m^{-3} :

$$U_s(d_V) = U_s(d_A) \Leftrightarrow \frac{Cu(d_V) d_V^2\, \rho_p}{\chi} = Cu(d_A) d_A^2\, \rho_0 \tag{A.16}$$

La relation entre le diamètre équivalent aérodynamique et le diamètre équivalent en volume est obtenue :

$$d_A = \left(\frac{\rho_p\ Cu(d_V)}{\chi\ \rho_0\, Cu\,(d_A)}\right)^{\frac{1}{2}}\ d_V \tag{A.17}$$

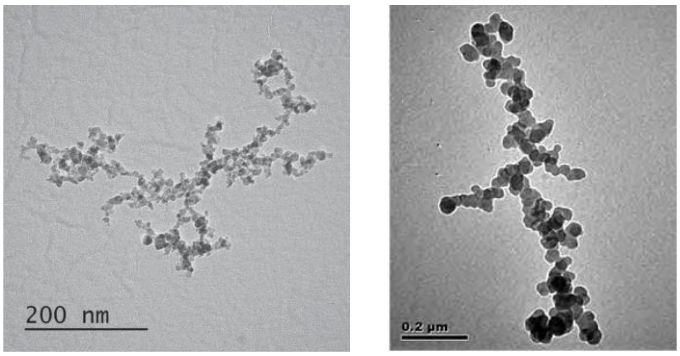
A partir des relations A.15 et A.17 on peut exprimer le rapport entre le diamètre équivalent en mobilité électrique et le diamètre aérodynamique comme suit :

$$\frac{d_{ME}}{d_A} = \left(\frac{\rho_0\ Cu(d_A)}{\rho_p}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\chi}{Cu(d_V)}\right)^{\frac{3}{2}} Cu(d_{ME}) \tag{A.18}$$

Cette relation est importante car ces deux diamètres (d_{ME} et d_A) sont très utilisés pour la caractérisation des aérosols.

A.3. Dimension fractale

Parfois, selon leur source et mécanisme de formation, les aérosols se présentent sous forme d'agrégats ou d'agglomérats de structure complexe, composés de particules de petites tailles dites particules primaires. La distinction entre agrégats et agglomérats réside dans l'intensité des forces de liaison entre les particules primaires, celles-ci étant plus importantes pour les agrégats. C'est le cas par exemple des particules émises par le procédé de métallisation ou des particules de suie issues de combustion, qui sont produites par vaporisation/condensation, comme le montre la figure A.2.



(a) **(b)**

Figure A.2 : Images microscope des particules émises par le procédé de métallisation (a) et particules de suie (b) (Bémer et al., 2015; Zhao et al., 2016).

Afin d'étudier la morphologie des agrégats il est important de déterminer les paramètres suivants, souvent par des méthodes microscopiques :

- Diamètre des particules primaires (d_{pp}): c'est le diamètre des petites particules formant l'agrégat.
- Nombre de particules primaires formant l'agrégat (N_{pp}).
- Diamètre de giration (d_g) : ce dernier caractérise la position des particules primaires par rapport au centre de l'agrégat donné par la relation suivante :

$$d_g = \sqrt{\frac{\sum m_i \, d_i^2}{\sum m_i}} \tag{A.19}$$

Avec m_i la masse de la particule primaire et d_i la distance entre les particules primaires et le centre de l'agrégat.

Ces paramètres permettent d'avoir la relation fractale (dite aussi la loi fractale) qui caractérise l'agrégat (Forrest et Witten, 1979):

$$N_{pp} = K_f \left(\frac{d_g}{d_{pp}}\right)^{D_f} \tag{A.20}$$

où K_f est un préfacteur et D_f représente la dimension fractale qui permet de quantifier la compacité de l'objet et qui est comprise entre 1 et 3, la valeur de 3 signifie que le cluster est dense. La dimension fractale est obtenue par analyse d'images et en traçant le logarithme de l'équation A.20. La figure A.3 montre la variation de la structure de l'agrégat pour différentes dimensions fractales.

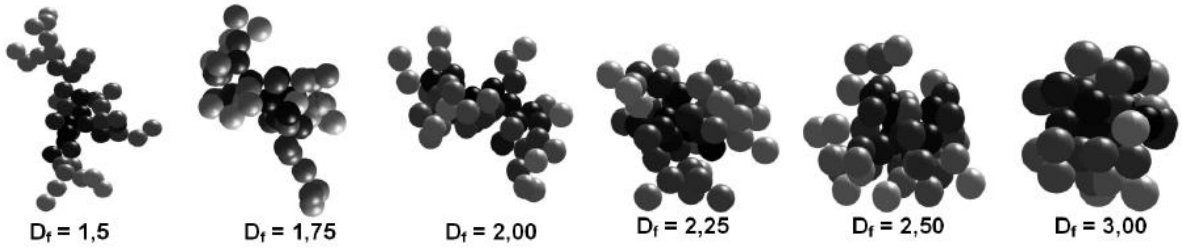


Figure A.3 : Variation de la structure d'agrégats avec la dimension fractale (Ouf, 2006).

A cause de la structure compliquée des agrégats, les diamètres équivalents donnent des valeurs différentes selon la propriété considérée. La figure A.4 permet de visualiser l'écart entre ces différents diamètres et la taille réelle de l'agrégat.

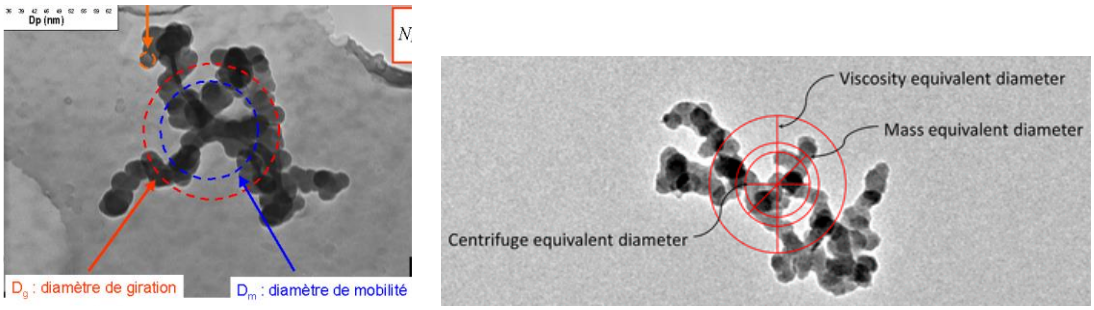


Figure A.4 : Comparaison des différents diamètres équivalents avec la taille des agrégats (Ouf et al., 2005; Boldridge et al., 2020).

A.4. Masse volumique effective

Pour les agrégats, la complexité de la forme de la particule mène à l'utilisation de la notion de masse volumique effective. Cette dernière est définie comme le rapport de la masse de l'agrégat et du volume de la sphère calculé à partir du diamètre équivalent en mobilité électrique :

$$\rho_{eff} = \frac{6\, m_{ag}}{\pi\, d_{ME}^3} \tag{A.21}$$

avec ρ_{eff} la masse volumique effective, m_{ag} la masse de l'agrégat et d_{ME} le diamètre équivalent en mobilité électrique. Pour une particule sphérique non poreuse cette densité est égale à la densité du matériau.

Connaissant la relation entre le diamètre équivalent en mobilité électrique et le diamètre équivalent en volume (équation A.15), la masse volumique effective peut être exprimée comme suit :

$$\rho_{eff} = \rho_p \left(\frac{Cu(d_V)}{\chi\ Cu(d_{ME})}\right)^3 \tag{A.22}$$

Cette dernière relation permet aussi de faciliter la conversion entre le diamètre équivalent en mobilité électrique et le diamètre aérodynamique. En exprimant la masse volumique de la particule ρ_p à partir de l'expression A.22 et en l'injectant dans l'équation A.18, on obtient au final :

$$\frac{d_{ME}}{d_A} = \left(\frac{\rho_0}{\rho_{eff}}\ \frac{Cu(d_A)}{Cu(d_{ME})}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{A.23}$$

Charvet et al. (2014) ont mesuré la variation de la masse volumique effective d'agrégats composés de différents matériaux (fer, cuivre, carbone, argent…) avec le diamètre équivalent en mobilité électrique. La figure A.5 montre les résultats obtenus avec des particules métalliques, à base de l'alliage Zn/Al, issues de la métallisation par arc électrique (Charvet et al., 2015). La masse volumique effective des agrégats est bien inférieure à celle du matériau, et diminue avec l'augmentation du diamètre équivalent en mobilité électrique. Pour les particules métalliques la relation A.24 a été développée, valable pour un diamètre équivalent en mobilité électrique compris entre 40 et 400 nm. L'intersection de la courbe avec la valeur de la densité du matériau permet aussi d'avoir une estimation du diamètre des particules primaires.

$$\rho_{eff-Zn/Al} = 40{,}24\ d_{ME}^{-0{,}91} \tag{A.24}$$

où $\rho_{eff\text{-}Zn/Al}$ est la masse volumique effective des agrégats à base de l'alliage Zn/Al et d_{ME} le diamètre équivalent en mobilité électrique de l'agrégat.

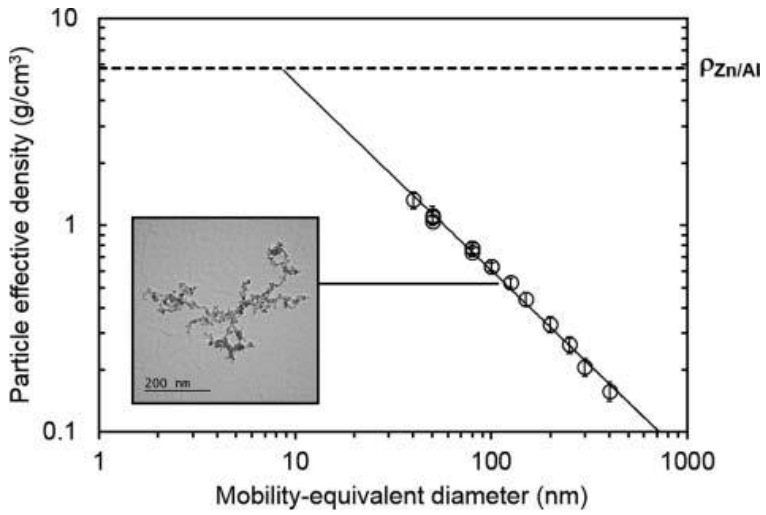


Figure A.5 : Variation de la masse volumique effective avec le diamètre équivalent en mobilité électrique pour les agrégats à base de Zn/Al issus de la métallisation (Charvet et al., 2015).

Etude de la régénération par jet-pulsé des cartouches filtrantes colmatées par des particules ultrafines métalliques

Résumé : Les procédés métallurgiques comme la projection thermique, la découpe des métaux et la sidérurgie génèrent des concentrations élevées en particules ultrafines métalliques de l'ordre de 10^8 particules.cm^{-3} avec des particules de diamètre inférieur à 100 nm. Ces particules représentent une menace pour la santé des travailleurs dans les milieux professionnels et ne peuvent pas être rejetées dans l'environnement à cause de leur toxicité. La filtration des particules ultrafines métalliques est actuellement problématique. Des observations du terrain ont révélé un colmatage rapide et irréversible des filtres. Ceci implique que les filtres doivent être remplacés régulièrement, ce qui engendre un coût supplémentaire pour les industriels. Afin d'apporter une solution à la problématique posée, cette thèse s'intéresse à évaluer l'efficacité de décolmatage par jet pulsé et améliorer la régénération des filtres en utilisant la technique de précoating, qui consiste à protéger la surface des filtres par une couche de particules microniques facilement décolmatable. Les expériences ont été réalisées sur un pilote de projection thermique à arc électrique, qui permet de reproduire les conditions réelles rencontrées en industrie, sur filtres plans et cartouches plissées. L'influence de différents paramètres sur l'efficacité de décolmatage par jet pulsé a été étudiée : masse déposée, pression de l'air de décolmatage, vieillissement du gâteau de filtration, traitement surfacique du filtre, application du précoating, plissage des cartouches et le mode de décolmatage. Les résultats ont montré la forte adhésion du gâteau de filtration composé de nanoparticules métalliques à la surface du filtre, l'efficacité de décolmatage ne dépasse pas 30 %. L'application du précoating a permis d'améliorer l'efficacité de décolmatage pour atteindre 90 % et de stabiliser le processus de filtration. L'applicabilité de cette technique sur cartouches plissées a été validée.

Mots clés : Filtration, nanoparticules métalliques, décolmatage, précoating, cartouches plissées.

Pulse-jet cleaning of filter cartridges clogged with ultrafine metallic particles

Abstract: Metallurgical processes such as thermal spraying, metal cutting and arc welding emit high concentrations of ultrafine metallic particles, number concentrations that can reach 10^8 particles.cm^{-3} with diameters less than 100 nm. The efficient removal of these particles is of importance to ensure air quality in work places and to prevent their release into the environment due to their toxicity. Filtration of ultrafine metallic particles is currently problematic. Negative feedbacks have been made about the inefficient cleaning and the rapid clogging of filters. Failing to clean the filters surface implies that a recurrent replacement is required, which can be very expensive. This study is focused on evaluating the pulse jet cleaning efficiency and improving the regeneration of filters by the use of the precoating technique, which consists of protecting the filter surface with a layer of micron-sized particles that is easily discharged. Experiences are conducted using a pilot thermal metal spraying process by electric arc that allows reproducing the real conditions encountered at an industrial scale, on flat and pleated filters. The influence of different parameters on the cleaning efficiency is studied : deposited mass, air cleaning pressure, aging of the filter cake, filter surface treatment, precoating application, the pleat number and the cleaning mode. Results revealed the strong adhesion of the nanostructured filter cake to the filter surface, the cleaning efficiency does not surpass 30 %. The application of precoating allowed to significantly improve the cleaning efficiency to reach 90 % and to stabilize the filtration process. The use of this technic was validated using pleated filter cartridges.

Keywords: Filtration, metallic nanoparticles, cleaning, precoating, pleated filter cartridges.