



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



Laboratoire des Sciences du Génie Chimique
CNRS
1 rue Grand ville BP 451
54001 Nancy Cédex



Institut National de Recherche et de Sécurité
Département Ingénierie des Procédés
Avenue de Bourgogne BP 27
54501 Vandoeuvre-lès-Nancy Cédex

Institut National Polytechnique de Lorraine

Ecole Doctorale
Ressource Procédés Produits Environnement (RP2E)

THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de
Docteur de l'INPL

Spécialité
Génie des Procédés et des Produits

Etude du décolmatage pneumatique des dépoussiéreurs à manches

par
Xavier SIMON

Soutenue publiquement le 28 novembre 2005 devant le jury composé de :

Président	Noël MIDOUX	Professeur à l'ENSIC, INPL
Rapporteurs	Alain BERNIS Jean-Francis BLOCH	Professeur à l'ESIGEC, Université de Savoie Maître de Conférences à l'EFPG, INPG
Examineurs	Denis BEMER Dominique THOMAS	Responsable d'études à l'INRS Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy 1

Avant-propos

Les travaux présentés dans ce rapport ont été effectués au sein du Laboratoire des Sciences du Génie Chimique (UPR – CNRS 6811) et au sein du Département Ingénierie des Procédés de l'Institut National de Recherche et de Sécurité.

J'adresse tout d'abord mes remerciements à mon directeur de thèse, M. Dominique THOMAS, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche au LSGC et pour la confiance et le soutien qu'il m'a accordé.

Ma reconnaissance va également à mes deux co-directeurs de thèse, M^{me} Sandrine CHAZELET et M. Denis BEMER, qui par leur disponibilité, leurs conseils et leur enthousiasme ont largement contribué à la réalisation de cette étude.

Je tiens à remercier également MM. Michel POURQUET et Jean-Michel DESSAGNE pour les nombreux moyens mis à ma disposition à l'INRS.

Je suis très reconnaissant à MM. Alain BERNIS et Jean-François BLOCH pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse ainsi qu'à M. Noël MIDOUX qui m'a fait l'honneur d'être Président du Jury.

Mes remerciements vont également à Roland REGNIER pour son importante contribution à la réalisation et à l'instrumentation du dépoussiéreur pilote ainsi qu'à tous les agents de l'INRS qui m'ont aidé dans cette tâche.

Il faut associer à cette étude trois stagiaires de DUT pour leur contribution : Hugues BILDE, Vincent LANGENFELD et Loïc CLESSE.

Je ne saurais oublier tous mes collègues du Laboratoire PROCEP pour leur accueil chaleureux et pour l'ambiance conviviale qu'ils ont su créer tout au long de ces trois années.

Merci à la région Lorraine qui a participé au financement de ma bourse de thèse.

Mes pensées vont enfin à tous les membres de ma famille ; famille qui s'est d'ailleurs agrandie, pour mon plus grand bonheur, au cours de cette thèse.

A Anne.
A France et Jean-François.

Table des matières

INTRODUCTION

BIBLIOGRAPHIE

I.1. INTRODUCTION	1
I.1.1. Les poussières et leurs effets sur la santé	1
I.1.2. La réglementation française	1
I.1.3. Cas spécifique du bois	2
I.2. LES DEPOUSSIÈREURS A MEDIA FILTRANTS	3
I.2.1. Présentation et fonctionnement des dépoussiéreurs à media filtrants	3
I.2.2. Perte de charge	4
<i>I.2.2.1. Perte de charge d'un medium filtrant neuf</i>	5
<i>I.2.2.2. Evolution de la perte de charge avec le colmatage</i>	5
<i>I.2.2.3. Perte de charge lors du colmatage du medium en surface et considérations sur le gâteau de filtration</i>	6
I.2.3. Efficacité de filtration	7
<i>I.2.3.1. Définition</i>	7
<i>I.2.3.2. Evolution de l'efficacité avec le colmatage</i>	8
I.3. LE DECOLMATAGE PNEUMATIQUE	9
I.3.1. Introduction sur le décolmatage des media filtrants	9
I.3.2. Mécanismes liés au détachement du gâteau lors d'un décolmatage pneumatique	10
<i>I.3.2.1. Accélération-décélération du medium</i>	10
<i>I.3.2.2. Flux d'air à contre-courant</i>	13
<i>I.3.2.3. Zones d'action des mécanismes de décolmatage le long d'une manche filtrante</i>	13
<i>I.3.2.4. Profils de masse surfacique du gâteau résiduel le long d'une manche</i>	14
<i>I.3.2.5. Conclusions</i>	15
I.3.3. Indicateurs de performance d'un décolmatage pneumatique	17
<i>I.3.3.1. Perte de charge résiduelle</i>	17
<i>I.3.3.2. Fraction décolmatée</i>	17
I.3.4. Paramètres conditionnant les performances du décolmatage pneumatique	18
<i>I.3.4.1. Influence des conditions opératoires de filtration</i>	18
<i>I.3.4.2. Influence des paramètres de décolmatage</i>	18
<i>I.3.4.3. Influence des propriétés de la manche filtrante</i>	20
<i>I.3.4.4. Forces d'adhésion et de cohésion des particules du gâteau de filtration</i>	21
<i>I.3.4.5. Conclusions</i>	22
I.4. PROBLEMES CLASSIQUES RENCONTRES SUR LES DEPOUSSIÈREURS A DECOLMATAGE PNEUMATIQUE	23
I.4.1. Décolmatage par plaques	23
I.4.2. Compression du gâteau de particules	25
I.4.3. Augmentation progressive de la perte de charge résiduelle	26
I.4.4. Inhomogénéité dans la répartition des débits sur l'ensemble des éléments filtrants	28
I.4.5. Usure des éléments filtrants	29
I.4.6. Emission particulaire à l'aval des éléments filtrants	30
I.4.7. Redéposition des poussières décolmatées	33
I.5. CONCLUSIONS	35

MATERIEL ET METHODES

II.1. PRESENTATION GENERALE DU DEPOUSSIEREUR PILOTE A MANCHES	37
II.2. MATERIEL ADDITIONNEL POUR L'ETUDE D'UNE MANCHE EN PHASE DE DECOLMATAGE (Chapitre IV)	42
II.3. MATERIEL ADDITIONNEL POUR L'ETUDE DE LA REPARTITION DES DEBITS (Chapitre V)	44
II.4. METHODES DE PRELEVEMENTS ET PRESENTATION DES AEROSOLS TESTS	45
II.4.1. Prélèvements en conduit	45
II.4.2. Caractérisation des aérosols tests	46
II.5. DESCRIPTION DU MEDIUM FILTRANT A L'ETAT NEUF	47
II.5.1. Propriétés physiques	47
II.5.2. Propriétés aérauliques	48
II.5.3. Efficacité initiale de filtration	50
II.6. INFORMATIONS LIEES AUX UTILISATIONS PONCTUELLES D'AUTRES BANCS D'ESSAIS	51

DESCRIPTION DES CYCLES DE FILTRATION

III.1. INTRODUCTION	54
III.2. EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE AU COURS DES CYCLES	55
III.2.1. Description pour les premiers cycles	55
III.2.2. Evolution de la perte de charge résiduelle et des durées de cycle	56
III.2.3. Conclusions	58
III.3. EVOLUTION DE LA CONCENTRATION NUMERIQUE EN PARTICULES A L'AVAL AU COURS DES CYCLES	59
III.3.1. Description pour les premiers cycles	59
III.3.2. Evolutions des pics de concentration numérique en particules au cours des cycles	60
III.4. CONCLUSIONS	62

ETUDE DES EFFETS D'UN DECOLMATAGE PNEUMATIQUE SUR LES MANCHES D'UN DEPOUSSIEREUR

IV.1. INTRODUCTION	64
IV.2. DESCRIPTION DES EXPERIENCES	64
IV.3. RESULTATS POUR DES MANCHES NEUVES	66
IV.3.1. Description des phénomènes observés lors du décolmatage	66
IV.3.1.1. Comportement aéraulique d'une manche neuve	66
IV.3.1.2. Comportement mécanique d'une manche neuve	67
IV.3.2. Influence des paramètres sur une manche en phase de décolmatage	68
IV.3.2.1. Géométrie de la buse d'injection	68
IV.3.2.2. Paramètres de décolmatage	70
IV.3.2.3. Conditions opératoires de filtration	77
IV.4. RESULTATS POUR DES MANCHES COLMATEES AVEC PRESENCE DU GATEAU EN SURFACE	77
IV.4.1. Description des phénomènes observés lors du décolmatage	78
IV.4.1.1. Comportement aéraulique d'une manche colmatée avec présence du gâteau en surface	78
IV.4.1.2. Comportement mécanique d'une manche colmatée	79

IV.4.2. Influence des paramètres sur une manche en phase de décolmatage	81
<i>IV.4.2.1. Géométrie de la buse d'injection</i>	81
<i>IV.4.2.2. Paramètres de décolmatage</i>	81
<i>IV.4.2.3. Conditions opératoires de filtration</i>	85
IV.5. PROFILS DE MASSE SURFACIQUE RESIDUELLE SUR LE MEDIUM	86
IV.6. INFLUENCE DES PROPRIETES DES PARTICULES FILTRES	88
IV.7. CONCLUSIONS	90

REPARTITION DU DEBIT D'AIR FILTRE DANS UN DEPOUSSIÈREUR A MANCHES

V.1. INTRODUCTION	93
V.2. DESCRIPTION DES EXPERIENCES	93
V.3. REPARTITION DU DEBIT TOTAL SUR DES MANCHES NEUVES	95
V.4. REPARTITION DES DEBITS PAR MANCHE LORS DES CYCLES DE FILTRATION	97
V.4.1. Dépendance de la répartition des débits avec la séquence de décolmatage imposée	97
V.4.2. Origines probables de l'inhomogénéité de la répartition des débits constatée après un décolmatage	99
<i>V.4.2.1. Evolution dynamique des débits au cours d'un décolmatage pneumatique</i>	99
<i>V.4.2.2. Mise en évidence des influences de la redéposition d'une partie des poussières décolmatées et des forts débits transitoires lors du décolmatage</i>	100
<i>V.4.2.3. Inhomogénéité des débits filtrés par les manches d'un même rail</i>	103
V.4.3. Etude des influences des conditions opératoires sur la répartition des débits	105
<i>V.4.3.1. Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé</i>	105
<i>V.4.3.2. Influence du temps de décolmatage</i>	106
<i>V.4.3.3. Influence de la perte de charge maximale avant décolmatage</i>	108
<i>V.4.3.4. Influence de la nature des particules</i>	109
V.5. EVOLUTION DE LA REPARTITION DES DEBITS PAR MANCHE AU COURS DU COLMATAGE	111
V.6. CONCLUSIONS	116
V.7. MODELISATION DE LA PERTE DE CHARGE ET DE LA REPARTITION DES DEBITS AU COURS DES CYCLES	118
V.7.1. Hypothèses préliminaires	118
V.7.2. Mise en équation et procédure de calcul	120
<i>V.7.2.1. Phase de décolmatage séquentiel rail par rail</i>	121
<i>V.7.2.2. Phase de colmatage</i>	127
V.7.3. Résultats de la modélisation	128
<i>V.7.3.1. Aérosol d'alumine²</i>	128
<i>V.7.3.2. Aérosol de bois²</i>	132
V.7.4. Conclusions	135

ETUDE DES BOUFFEES DE CONCENTRATION EN PARTICULES EMISES A L'AVAL D'UN DEPOUSSIÉREUR CONSECUTIVEMENT A DES DECOLMATAGES PNEUMATIQUES

VI.1. INTRODUCTION	137
VI.2. ETUDE DES ORIGINES DE LA CREATION DES BOUFFEES DE CONCENTRATION EN PARTICULES	137
VI.2.1. Présentation des mécanismes et des sources de particules responsables des bouffées de concentration	139
VI.2.2. Méthode pour quantifier les contributions des sources à l'origine de la formation d'une bouffée de particules	141
VI.2.3. Etude de l'influence de certaines conditions opératoires	145
<i>VI.2.3.1. Influence des propriétés de l'aérosol filtré</i>	145
<i>VI.2.3.2. Influence de la perte de charge maximale avant décolmatage</i>	146
<i>VI.2.3.3. Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé de décolmatage</i>	148
<i>VI.2.3.4. Influence de la vitesse de filtration</i>	149
<i>VI.2.3.5. Influence du traitement de surface</i>	150
<i>VI.2.3.6. Influence du nombre de cycles effectués (vieillessement du medium)</i>	151
VI.3. QUANTIFICATION DES BOUFFEES DE CONCENTRATION EN PARTICULES GLOBALES A L'AVAL	155
VI.3.1. Résultats obtenus sur le dépoussiéreur pilote à manches	155
<i>VI.3.1.1. Concentrations moyennes en particules relevées à l'aval</i>	155
<i>VI.3.1.2. Influence des conditions opératoires de décolmatage sur la concentration en particules à l'aval</i>	162
VI.3.2. Résultats obtenus sur d'autres dépoussiéreurs	168
VI.4. CONCLUSIONS	171

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

REFERENCES

ANNEXES

LEXIQUE

NOMENCLATURE

Table des figures

Figure I.1 :	Schémas de différents types de dépoussiéreurs à media filtrants avec décolmatage pneumatique	3
Figure I.2 :	Schémas des différentes étapes du mouvement d'une manche lors d'un décolmatage pneumatique	11
Figure I.3 :	Profils de dépôt de poussières typiques après un décolmatage pneumatique	15
Figure I.4 :	Schéma représentatif d'un décolmatage par plaques	24
Figure I.5 :	Evolution de la perte de charge après un décolmatage par plaques	25
Figure I.6 :	Représentation schématique de la couche filtrante	27
Figure I.7 :	Evolution de la perte de charge au cours des cycles	28
Figure I.8 :	Profil de concentration à l'aval le long d'une manche filtrante	32
Figure I.9 :	Comparaison de l'efficacité de filtres à entrée d'air à traiter en bas et en haut de caisson	34
Figure II.1 :	Schémas et photographie du dépoussiéreur pilote à manches	37
Figure II.2 :	Schéma de l'installation du banc d'essais « dépoussiéreur pilote à manches »	38
Figure II.3 :	Photographie de la passerelle intérieure du banc d'essais	39
Figure II.4 :	Installation des manches filtrantes	39
Figure II.5 :	Schéma d'une manche filtrante et de la buse d'injection de l'air comprimé de décolmatage qui lui est associé	40
Figure II.6 :	Schémas de positionnement des capteurs	43
Figure II.7 :	Présentation des différentes buses d'injection étudiées	44
Figure II.8 :	Installation des débitmètres Venturi dans la coiffe du dépoussiéreur	45
Figure II.9 :	Observations de la surface filtrante du medium T12T56320 Traitement par calandrage thermique	48
Figure II.10 :	Perméations aérauliques sur le dépoussiéreur avec et sans les manches filtrantes	49
Figure II.11 :	Evolution de la perte de charge du medium filtrant à l'état neuf en fonction de la vitesse de filtration pour les manches du dépoussiéreur pilote et pour un échantillon de medium plan	49
Figure II.12 :	Efficacité fractionnelle du medium à l'état neuf	50
Figure II.13 :	Observations au MEB de la surface du medium doté d'une membrane PTFE	52
Figure III.1 :	Evolution de la perte de charge en fonction de la masse surfacique générée de particules pour les 5 premiers cycles de colmatage et de décolmatage Alumine1 ($d_{pm} = 2,5 \mu m$) , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{max} = 15.\Delta P_0$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,72 \text{ g.m}^{-3}$	56
Figure III.2 :	Evolution de la concentration numérique en particules en fonction de la masse surfacique générée de particules pour les 10 premiers cycles de colmatage et de décolmatage Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu m$) , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{max} = 9.\Delta P_0$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$	60

Figure IV.1 :	Signaux de ΔP , U et V pendant un à-coup de pression en fonction de la position sur la manche $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bars}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	66
Figure IV.2 :	Profil d'accélération du medium le long d'une manche filtrante neuve pendant un à-coup de pression à contre-courant $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	68
Figure IV.3 :	Influence du diamètre de la buse d'injection sur la différence de pression et l'accélération Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	69
Figure IV.4 :	Influence de la position de la buse d'injection sur la différence de pression et l'accélération le long d'une manche Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	70
Figure IV.5 :	Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la différence de pression et l'accélération le long d'une manche Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	71
Figure IV.6 :	Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la vitesse frontale mesurée à la surface d'une manche Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	72
Figure IV.7 :	Influence de la durée d'impulsion sur la différence de pression, la vitesse frontale et l'accélération du medium le long d'une manche Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	73
Figure IV.8 :	Influence du nombre de manches décolmatées simultanément sur la différence de pression et sur l'accélération du medium le long d'une manche Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $t_d = 100 \text{ ms}$, $T = 0 \text{ kg.m}$	74
Figure IV.9 :	Evolutions de P_e et $P_{int,i}$ pendant un à-coup de pression Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, Position 1, $T = 0 \text{ kg.m}$	75
Figure IV.10 :	Influence du nombre de manches décolmatées simultanément et du temps de décolmatage sur la pression du réservoir d'air comprimé $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$ - $P_r = 7 \text{ bar}$ - $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $T = 0 \text{ kg.m}$	76
Figure IV.11 :	Influence de la vitesse de filtration sur la différence de pression et la vitesse frontale à contre-courant dans la zone 4 $t_d = 100 \text{ ms}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	77
Figure IV.12 :	Influence du gâteau sur les signaux de différence de pression et de vitesse axiale le long d'une manche pendant un décolmatage pneumatique (medium colmaté = après 150 cycles, $\Delta P_{max} = 13.\Delta P_0$) $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	78

Figure IV.13 : Profil d'accélération du medium le long d'une manche pendant un à-coup de pression à contre-courant en fonction de l'état de colmatage du medium	79
$U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	
Figure IV.14 : Compréhension du mouvement initial du medium filtrant en réaction à un-coup de pression à contre-courant	80
Figure IV.15 : Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la différence de pression et l'accélération du medium le long d'une manche	82
Manche colmatée à $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	
Figure IV.16 : Influence de la durée d'impulsion sur la différence de pression, sur l'accélération du médium le long d'une manche et sur la vitesse axiale	83
Manche colmatée à $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$	
Figure IV.17 : Influence du nombre de manches décolmatées simultanément sur la différence de pression et sur l'accélération du médium le long d'une manche	84
Manche colmatée à $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $T = 0 \text{ kg.m}$	
Figure IV.18 : Influence de la perte de charge maximale avant décolmatage sur la différence de pression et sur l'accélération du médium le long d'une manche	85
Manche colmatée , $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $N = 1$, position 1, $T = 0 \text{ kg.m}$	
Figure IV.19 : Profil de masse surfacique le long d'une manche filtrante après un décolmatage classique et après différentes séries d'à-coups de pression successifs	86
Après plus de 200 cycles, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $T = 0 \text{ kg.m}$	
Figure IV.20 : Photographies de l'état de surface d'une manche à l'état décolmaté	88
(a) Alumine pour tout $P_r > 1,5 \text{ bar}$ – (b) Bois pour $P_r < 3 \text{ bar}$	
Figure IV.21 : Schéma de synthèse des différents mécanismes de décolmatage d'un point de vue mécanique et aéraulique, pour une manche neuve et pour une manche colmatée	91
Figure V.1 : Schéma de compréhension de la méthode de calcul des débits moyens par manche	95
Figure V.2 : Représentation de la coiffe et présentation des résultats des débits moyens par manches	96
Figure V.3 : Présentation des différentes configurations de décolmatage étudiées	97
Figure V.4 : Perte de charge des manches à l'état décolmaté en fonction de la vitesse de perméation	102
Alumine2 , $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} = 10.\Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$ lors du colmatage	
Figure V.5 : Perte de charge des manches à l'état décolmaté en fonction de la vitesse de perméation	102
Bois2 , $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$ lors du colmatage	

Figure V.6 :	Evolutions de $P_r(t)$ au cours de séquences de décolmatage pour différentes pression initiale Alumine2 , $t_d = 100$ ms , $d_b = 10$ mm , $\Delta P_{\max} = 10.\Delta P_0$, $U_f = 4,7$ cm.s ⁻¹ , Configuration 1	104
Figure V.7 :	Evolution de la perte de charge, des débits moyens des manches par rail et de l'écart-type des 24 valeurs de débits au cours de 5 cycles de colmatage et de décolmatage Alumine2 , $U_f = 4,7$ cm.s ⁻¹ , $P_r = 7$ bar , $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$, $t_d = 100$ ms , $d_b = 10$ mm , configuration 1	112
Figure V.8:	Evolution de la perte de charge, des débits moyens des manches par rail et de l'écart-type des 24 valeurs de débits au cours de 5 cycles de colmatage et de décolmatage Bois2 , $U_f = 4,7$ cm.s ⁻¹ , $P_r = 1,5$ bar , $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0$, $t_d = 100$ ms , $d_b = 10$ mm , configuration 1	113
Figure V.9 :	Procédure de calcul permettant d'atteindre les débits transitoires et la perte de charge résiduelle intermédiaire après le décolmatage des manches du rail I	122
Figure V.10 :	Procédure de calcul permettant d'atteindre les débits transitoires et la perte de charge résiduelle intermédiaire après le décolmatage des manches du rail II	124
Figure V.11 :	Présentation de la boucle itérative de calcul permettant de modéliser les évolutions de la perte de charge et des débits de perméation dans les manches au cours d'un colmatage	128
Figure V.12 :	Comparaison des évolutions de la perte de charge et des débits moyens par manche entre les valeurs expérimentales et les valeurs modélisées - $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0 = 1210$ Pa	130
Figure V.13 :	Comparaison des évolutions de la perte de charge et des débits moyens par manche entre les valeurs expérimentales et les valeurs modélisées Bois2 ($d_{pm} = 33,8$ μ m) , $U_f = 4,7$ cm.s ⁻¹ , $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0 = 700$ Pa , $P_r = 3$ bar , $t_d = 100$ ms , $C_p = 3,9$ g.m ⁻³	133
Figure VI.1 :	Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval du dépoussiéreur pendant un décolmatage - Mise en évidence de la formation d'une bouffée de particules Alumine2 , $U_f = 4,7$ cm.s ⁻¹ , $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $P_r = 7$ bar , $t_d = 100$ ms , $d_b = 10$ mm , configuration 1	138
Figure VI.2 :	Synthèse des origines possibles pour le passage de particules vers l'aval	140
Figure VI.3 :	Méthode de séparation des sources à l'origine d'une bouffée de particules à l'aval Bois1 , $U_f = 3,7$ cm.s ⁻¹ , $\Delta P_{\max} = 420$ Pa , $P_r = 3$ bar , $t_d = 100$ ms , $d_b = 10$ mm , dépoussiéreur à poches	142
Figure VI.4 :	Evolutions des pics de concentration correspondant aux bouffées G et P	143
Figure VI.5 :	Détermination des contributions massiques de chacun des deux groupes de sources formatrices de bouffées de concentration en particules à l'aval à partir des masses de particules $M(G)$ et $M(P)$ relevées à l'aval	144
Figure VI.6 :	Efficacités fractionnelles des manches du dépoussiéreur pilote en Fonction du diamètre des particules pour l'état neuf et pour l'état décolmaté après 125 cycles Dépoussiéreur pilote à manches, Alumine2, $\Delta P_{\max} = 600$ Pa, $P_r = 7$ bar, $t_d = 100$ ms, $U_f = 4,7$ cm.s ⁻¹	153

Figure VI.7 :	Efficacités fractionnelles du dépoussiéreur à poches en fonction du diamètre des particules pour l'état neuf et pour l'état décolmaté après 20 cycles	154
	Dépoussiéreur à poches, Bois1, $\Delta P_{\max} = 400 \text{ Pa}$, $P_r = 5 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $U_f = 3,7 \text{ cm.s}^{-1}$	
Figure VI.8 :	Exemple de détermination des trois types de concentrations moyennes sur un cycle de filtration	157
Figure VI.9 :	Exemple de distributions granulométriques en nombre de l'aérosol d'alumine2 à l'amont et à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches	161
	Alumine2, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$	
Figure VI.10 :	Exemple de distributions granulométriques en nombre de l'aérosol de bois2 à l'amont et à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches	161
	Bois2, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$	
Figure VI.11 :	Exemple de distributions granulométriques en nombre et en masse des particules émises à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches	162
	Bois2, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$	
Figure VI.12 :	Evolutions de la perte de charge totale et de la concentration en particules à l'aval des 24 manches pendant une perméation aéraulique entre $U_p = 2 \text{ cm.s}^{-1}$ et 7 cm.s^{-1} à l'état décolmaté	165
	Alumine2, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $C_p = 500 \text{ mg.m}^{-3}$	
Figure VI.13 :	Suivi de la concentration en particules à l'aval en fonction du rail de manches décolmaté.	167
	Alumine1, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} \approx 30.\Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, décolmatage en air propre	
Figure VI.14 :	Variations de la concentration mesurée par un détecteur à « effet triboélectrique* » au cours d'une journée de travail dans le conduit aval du dépoussiéreur 4.	170

Table des tableaux

Tableau I.1 :	Influences des conditions opératoires sur la résistance spécifique du gâteau de filtration	7
Tableau I.2 :	Synthèse des valeurs de surpression et d'accélération du medium pendant un décolmatage pneumatique (compilation de la littérature)	16
Tableau I.3 :	Synthèse de certaines définitions et relations pour la fraction décolmatée	17
Tableau I.4 :	Synthèse des influences de certaines conditions opératoires sur le décolmatage des manches	18
Tableau I.5 :	Synthèse des influences de certains paramètres de décolmatage sur les performances de régénération des manches	19
Tableau I.6 :	Masses surfaciques résiduelles moyennes déposées pour chaque position de manches dans le dépoussiéreur	28
Tableau I.7 :	Synthèse des influences de certaines conditions opératoires sur les valeurs de concentration en particules relevées à l'aval ($C_{p,aval}$)	32
Tableau I.8 :	Synthèse des influences de paramètres étudiés dans la littérature sur la décélération maximale du medium pendant le décolmatage (a_{max}), sur la perte de charge résiduelle (ΔP_{res}) et sur la concentration en particules à l'aval ($C_{p,aval}$)	36
Tableau II.1 :	Caractéristiques des différentes particules générées pendant les essais sur le dépoussiéreur pilote	47
Tableau II.2 :	Propriétés à l'état neuf du medium filtrant testé	47
Tableau II.3 :	Propriétés à l'état neuf des media filtrants testés sur échantillons plans	52
Tableau III.1 :	Récapitulatif des cycles de filtration menées sur le dépoussiéreur à manches pilote	54
	décolmatage pneumatique séquentiel, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$	
Tableau III.2 :	Evolution de la perte de charge résiduelle pour les trois séries d'essais en fonction du nombre de cycles effectué	56
Tableau III.3 :	Valeurs moyennes de la perte de charge résiduelle (ΔP_{res}) et de la durée d'un cycle de colmatage et de décolmatage (T_c) en fonction des conditions opératoires imposées aux manches	58
	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1	
Tableau III.4 :	Valeurs moyennes des concentrations maximales des pics de concentrations en particules à l'aval en fonction des conditions opératoires imposées aux manches	61
	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1	63
Tableau III.5 :	Influence de paramètres de filtration et de décolmatage sur ΔP_{res} , T et $\overline{C}_{n,max}$	
Tableau IV.1 :	Valeurs des accélérations maximales du medium enregistrées sur une manche neuve en fonction de la position considérée sur la hauteur de la manche et en fonction du temps de décolmatage	73
	$U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, N = 1, T = 0 kg.m	
Tableau IV.2 :	Récapitulatif des influences des paramètres étudiés sur les valeurs crêtes des signaux d'accélération du medium (a_{max}), sur l'effet de la vitesse d'air à contre-courant dans la manche (U_d) et sur la perte de charge résiduelle des manches après décolmatage (ΔP_{res})	92

Tableau V.1 : Récapitulatif des essais menés pour l'étude de la répartition du débit sur les manches	94
Tableau V.2 : Répartition des débits sur les 24 manches neuves en fonction de la vitesse de filtration	96
Tableau V.3 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur avant et après décolmatage. Alumine1 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} = 15.\Delta P_0$	98
Tableau V.4 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur avant, pendant et après un décolmatage Alumine 1 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} = 30.\Delta P_0$, configuration 3	99
Tableau V.5 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après des décolmatages « on-line » et en air propre Alumine1 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1	101
Tableau V.6 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après un décolmatage complet des 5 rails, en fonction de la pression du réservoir d'air comprimé Alumine2 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1	105
Tableau V.7 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après décolmatage, en fonction du temps de décolmatage Alumine2 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1	107
Tableau V.8 : Diminution de la pression du réservoir d'air comprimé après le décolmatage d'un rail en fonction de la pression initiale du réservoir, du temps de décolmatage et du nombre de manches sur le rail décolmaté	107
Tableau V.9 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après décolmatage en fonction de la perte de charge maximale Alumine2 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1	108
Tableau V.10 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après décolmatage, en fonction de la nature des particules et d'autres conditions opératoires $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1	110
Tableau V.11 : Paramètres permettant de décrire l'évolution de la répartition des débits par manche au cours du colmatage en fonction des conditions opératoires imposées aux manches $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1	115
Tableau V.12 : Récapitulatif des influences des paramètres étudiés sur l'écart-type associé à la série des 24 valeurs de débit ($\sigma(\overline{Q_{v_r}})$), sur les écarts-types associés aux valeurs de débits pour chaque rail ($\sigma(\overline{Q_{v_m}}, \text{rail}_r)$) et sur le pourcentage de temps pendant lequel la répartition des débits reste inhomogène après le décolmatage (%)	117
Tableau V.13 : Présentation des valeurs de ΔP_{\max} et ΔP_{res} en régime stationnaire pour les différents essais qui ont fait l'objet d'une modélisation	118
Tableau V.14 : Présentation de la structure du tableau de résultats obtenus pour la modélisation de la phase de décolmatage séquentiel	126

Tableau V.15 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage et comparaison avec les valeurs expérimentales $\Delta P_{\max} = 9.\Delta P_0 = 580 \text{ Pa}$	129
Tableau V.16 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage et comparaison avec les valeurs expérimentales $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0 = 820 \text{ Pa}$	129
Tableau V.17 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage et comparaison avec les valeurs expérimentales $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0 = 1210 \text{ Pa}$	129
Tableau V.18 : Synthèse des paramètres utilisés pour la modélisation des essais sur l'alumine ²	131
Tableau V.19 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage et comparaison avec les valeurs expérimentales $\Delta P_{\max} = 10.\Delta P_0 = 700 \text{ Pa}$	132
Tableau V.20 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage et comparaison avec les valeurs expérimentales $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0 = 700 \text{ Pa}$	132
Tableau V.21 : Synthèse des paramètres utilisés pour la modélisation des essais sur le bois ²	134
Tableau V.22 : Evolutions des paramètres d'ajustement du modèle lors des essais	136
Tableau VI.1 : Contributions des groupes de sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, pour différentes tailles de particules	145
Tableau VI.2 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, pour différentes valeurs de ΔP_{\max}	147
Tableau VI.3 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, pour différentes valeurs de P_r	148
Tableau VI.4 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, pour différentes valeurs de U_f	150
Tableau VI.5 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, en fonction de différents traitements de surface pour le medium	151
Tableau VI.6 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, en fonction du nombre de cycles précédemment effectués par le medium	152
Tableau VI.7 : Synthèse des concentrations massiques moyennes en particules à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches en fonction des conditions opératoires de fonctionnement et du type d'aérosol filtré	156
Tableau VI.8 : Synthèse des concentrations massiques moyennes en particules à l'aval de quinze dépoussiéreurs à manches, mesurées par comptage optique ou par prélèvement et pesée (selon norme NFX44-052)	169
Tableau VI.9 : Influence de paramètres de filtration et de décolmatage sur les bouffées de concentration	172

INTRODUCTION

Le dépoussiéreur à media filtrants est le système de filtration le plus utilisé dans l'industrie pour éliminer les particules solides présentes dans les effluents gazeux avant leur rejet dans l'atmosphère ou un recyclage dans les ateliers de travail.

Un dépoussiéreur est constitué de media filtrants se présentant généralement sous la forme de manches. Le fonctionnement cyclique de ces dépoussiéreurs consiste en une alternance de cycles de colmatage et de décolmatage. Les poussières filtrées entraînent un colmatage du medium présentant deux régimes : un colmatage en profondeur (irréversible) et un colmatage de surface (réversible) au cours duquel les particules se déposent en une couche appelée gâteau de filtration. La seconde phase de fonctionnement d'un dépoussiéreur industriel est le décolmatage dont l'objectif principal est de décoller les particules collectées en surface du medium filtrant pendant l'étape de colmatage. Cela permet de diminuer la résistance à l'écoulement du filtre et d'éviter à l'utilisateur de s'exposer à une chute du débit de filtration ou d'augmenter la consommation d'énergie pour maintenir le débit de filtration initial.

L'à-coup de pression d'air comprimé à contre-courant ou décolmatage pneumatique est la technique de régénération des media filtrants la plus fréquemment rencontrée en milieu industriel. Son efficacité et le fait que sa mise en œuvre ne nécessite pas un arrêt du procédé de filtration (décolmatage « on-line ») sont des atouts majeurs. Le décollement du dépôt est obtenu en déformant très brusquement le medium par envoi d'air sous pression à l'intérieur de la manche, à contre-courant du sens de filtration et pendant un temps très court (décolmatage pneumatique).

Le décolmatage pneumatique est l'étape de la filtration sur media fibreux qui reste la moins bien maîtrisée. Cette méthode de décolmatage conduit à une baisse de l'efficacité de filtration et peut également entraîner, à terme, une dégradation des éléments filtrants ou une augmentation trop importante de la perte de charge résiduelle. Les utilisateurs de dépoussiéreurs à manches manquent encore de connaissances pour déterminer les stratégies de décolmatage les plus adaptées et optimiser le fonctionnement des dépoussiéreurs afin de minimiser les rejets particuliers à l'aval. Seules les connaissances empiriques et l'expérience du terrain rassemblées par les constructeurs de dépoussiéreurs industriels permettent actuellement d'orienter les choix de techniques de filtration et de décolmatage pour une application donnée.

Ce travail s'inscrit dans une volonté de l'INRS de rassembler des données scientifiques concrètes sur le dépoussiérage industriel par manches filtrantes afin de conduire à l'amélioration des performances de filtration, d'envisager une optimisation du décolmatage pneumatique et de diffuser de nouvelles connaissances aux acteurs de la prévention et aux utilisateurs. Le principal secteur d'application de ce travail étant les dépoussiéreurs utilisés dans l'industrie de la deuxième transformation du bois (ameublement, portes, fenêtres, planchers ...) pour l'élimination des poussières à l'origine d'un certain nombre de pathologies dont certaines graves. Compte tenu de la dangerosité de ces poussières et de la valeur faible de la concentration limite recommandée dans les conduits de recyclage ($\leq 0,2 \text{ mg.m}^{-3}$), il est nécessaire de s'assurer des performances des installations de dépoussiérage et de tout mettre en œuvre pour optimiser leur fonctionnement.

Le contenu de cette thèse s'inscrit également dans la continuité des travaux du Laboratoire de Filtration des Aérosols sur la caractérisation des performances des unités de dépolluage industriel sur media filtrants. De précédents travaux sur un banc d'essais pour échantillons de media plans et sur un dépolluage commercial ont en effet permis d'effectuer des avancées significatives dans le domaine de la filtration des aérosols solides et ont montré que les efforts de recherche devaient désormais être portés sur l'étude du décolmatage.

Ce mémoire comporte six chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique du fonctionnement des dépollueurs à media filtrants et de leur décolmatage pneumatique. Les mécanismes de détachement du gâteau et les influences de certaines conditions opératoires sont présentés. Ce bilan des connaissances disponibles sur le décolmatage pneumatique permet également de situer précisément le contexte des travaux de recherche.

Le deuxième chapitre regroupe la description des bancs d'essais et du matériel qui ont été utilisés au cours de cette étude, notamment le dépollueur pilote à manches sur lequel repose une grande partie de l'originalité des travaux.

Le troisième partie se présente comme un court chapitre de transition. Les évolutions de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval au cours des nombreux cycles de filtration effectués sont présentés et commentés. En plus de valider le fonctionnement du dépollueur pilote à manches, ces travaux permettent également d'introduire des notions et des résultats qui seront utiles dans les chapitres suivants.

Le quatrième chapitre expose l'étude des effets d'un décolmatage pneumatique sur le comportement d'une manche filtrante. Les performances d'une manche en phase de décolmatage y sont évaluées suivant des critères mécaniques et aérodynamiques. Les mécanismes qui provoquent le détachement du gâteau de particules sont présentés pour la première fois sur des manches avec anneaux de renforts et les zones où le décolmatage est le plus efficace sont identifiées. Une étude paramétrique permet de tester le comportement des manches suivant un grand nombre de situations.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude de la répartition du débit d'air filtré sur le réseau de manches d'un dépollueur. Pour ce faire, des cartographies des débits traversant chacune des manches vont être établies au cours des phases de décolmatage et de colmatage. L'importance des débits transitoires s'établissant sur les premières manches à être décollmatées y sera discutée.

Le sixième et dernier chapitre présente une étude des bouffées de concentration en particules qui sont émises à l'aval des manches filtrantes consécutivement aux décolmatages pneumatiques. Dans un premier temps, les mécanismes de formation des bouffées ainsi que les sources de particules qui en sont à l'origine sont étudiés. Puis, une quantification de l'émission particulaire au cours des cycles de colmatage et de décolmatage est menée afin d'évaluer les rejets de ce type de dépollueurs. Leur utilisation dans un cadre de recyclage de l'air traité dans les ateliers de deuxième transformation du bois fait également l'objet d'une analyse.

Enfin, une conclusion où sont récapitulés les principaux apports de ces travaux et les perspectives qui peuvent être envisagées clôture ce mémoire.

CHAPITRE I
BIBLIOGRAPHIE

I.1. INTRODUCTION

I.1.1. Les poussières et leurs effets sur la santé

Est considérée comme "poussière" toute particule solide dont le diamètre aérodynamique* est au plus égal à 100 µm ou dont la vitesse limite de chute, dans les conditions normales de température, est au plus égale à 0,25 m.s⁻¹. Les poussières ainsi définies sont appelées "poussières totales". Le terme "aérosols", tel qu'il est défini par la norme NF X 44-001 (1981), englobe quant à lui les poussières (aérosols solides) ainsi que des brumes et brouillards (aérosols liquides).

De nombreuses études convergent pour attribuer aux poussières fines une part de responsabilité dans une vaste gamme de pathologies (pneumoconioses, cancers, intoxications, lésions pulmonaires, allergies) dont certaines sont graves.

Les particules de diamètre aérodynamique supérieur à 10 µm sont stoppées par le système ciliaire du nez et ne pénètrent pas dans l'appareil respiratoire. Leur absorption par voie digestive peut néanmoins provoquer des maladies extra-pulmonaires. Les particules comprises entre 3 et 10 µm se déposent au niveau de l'arbre respiratoire et sont expulsées par des phénomènes naturels tels que toux, éternuements ou élimination mucociliaire. Ce sont les particules les plus fines, de diamètre inférieur à 3 µm qui sont les plus dangereuses pour l'homme car elles sont inhalables par les voies respiratoires et peuvent atteindre les alvéoles des poumons. Les polluants véhiculés par les particules peuvent alors pénétrer dans le système sanguin et atteindre des organes vitaux tels que les reins, le foie ou le cerveau. La dimension d'une particule ne permet pas de déduire tous les effets biologiques résultant de son inhalation ; des propriétés physiques telles que la forme, la porosité ou la rugosité peuvent aussi déterminer en partie l'effet produit.

L'une des conséquences de la pollution particulaire des ateliers de travail, mis à part l'inconfort résultant d'une exposition à un empoussièrement trop important, est l'apparition de maladies professionnelles. La prévention des maladies d'origine professionnelle demande donc que l'exposition des personnes aux polluants présents dans l'air des lieux de travail soit évitée ou réduite aux niveaux les plus faibles possibles.

I.1.2. La réglementation française

Le décret du 7 décembre 1984 (article R.232-5-5 du Code du Travail) stipule que dans les locaux à pollution spécifique, les concentrations moyennes en poussières inhalables* et alvéolaires* de l'atmosphère inhalée par une personne, évaluées sur une période de huit heures, ne doivent pas dépasser respectivement 10 et 5 mg.m⁻³ d'air. La circulaire du ministère du travail du 9 mai 1985 précise que ces valeurs concernent les poussières réputées sans effet spécifique, c'est-à-dire qui ne sont pas en mesure de provoquer seules sur les poumons ou tout autre organe du corps humain d'autre effet que celui de surcharge. D'autres poussières font l'objet de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP*) particulières, dont notamment : les silices cristallines, les amiantes, les poussières de plomb, le bois et toutes les poussières fines telles que celles dues au soudage ou au décapage thermique, par exemple. Un récapitulatif de ces valeurs limites d'exposition professionnelle en France est disponible dans la note documentaire 2098 de l'INRS (ND 2098 (2005)).

* désigne un terme dont la définition est donnée dans le lexique

I.1.3. Cas spécifique du bois

Les effets sur la santé de l'exposition aux poussières de bois ont fait l'objet de nombreuses études épidémiologiques (ICOH-NIOSH (1987), Goldsmith et Shy (1988), Flechsig et Nedo (1990), IARC (1995)). La prévalence des risques est très variable parmi les populations exposées (Rosenberg et Gervais (1987)); elle serait en partie liée aux taux d'empoussièrément, à la dureté et à la nature des bois, au type de manipulation et à la nature des produits chimiques associés (Holness et al. (1985), Carosso et al. (1987), Crepy et al. (1988), Shamssain (1992), Parkes (1994)).

L'association entre exposition professionnelle aux poussières de bois et survenue d'un cancer nasosinusal, tout particulièrement au niveau de l'ethmoïde, est désormais un fait clairement établi. Le Centre International de Recherche contre le Cancer (CIRC) classe les poussières de bois parmi les cancérogènes avérés pour l'homme. De nombreuses études montrent que la majorité des adénocarcinomes de l'ethmoïde survient chez les salariés ayant été exposés aux poussières de bois, notamment les menuisiers et les ébénistes, même si la maladie se manifeste 15 à 40 ans après l'exposition. Dans ce cas, et à défaut de pouvoir appliquer la démarche de substitution des poussières par un autre produit non cancérogène, la prévention du risque consiste à limiter au maximum l'exposition des salariés.

Les données épidémiologiques actuellement disponibles suggèrent un effet dose dans la survenue du cancer de l'ethmoïde. Le risque demeurerait important même pour des durées d'exposition inférieures à 5 ans dès lors que le niveau d'exposition est élevé. Les lésions eczématiformes, la conjonctivite, la rhinite, l'asthme et la fibrose pulmonaire apparaissent aussi dans la liste des pathologies provoquées par les poussières de bois et reconnues par la branche Accidents du Travail et Maladies Professionnelles (ATMP) de l'assurance maladie. Le phénomène irritant est lié à la dose de poussières de bois respirée, ce qui n'est pas le cas de l'allergie, qui peut se manifester même à de très petites doses chez les personnes sensibilisées. Les pathologies respiratoires bénignes peuvent survenir pour des niveaux d'exposition faibles (0,5 à 1 mg.m⁻³), certains asthmes ont même été décrits à des concentrations inférieures à 0,5 mg.m⁻³. Le rôle des poussières de bois dans l'apparition d'autres cancers, en particulier ceux du naso-pharynx et des poumons, est évoqué mais non confirmé, notamment à cause de l'existence de nombreux facteurs de confusion (autres irritants respiratoires, tabac).

Pour toutes ces raisons la valeur limite d'exposition professionnelle est fixée en France à 1 mg.m⁻³ pour la fraction inhalable* au sens de la norme NF X 43-257 (1988); c'est une valeur limite réglementaire (VR) depuis le 1^{er} juillet 2005. Une valeur limite recommandée égale au cinquième de la VLEP, soit 0,2 mg.m⁻³, est fixée pour la concentration dans les conduits de recyclage de l'air à l'aval du dispositif de dépoussiérage. Ces concentrations très faibles et très restrictives justifient les démarches de contrôle des performances et le souci de perfectionnement des dispositifs de dépoussiérage.

En France, plus de 300 000 salariés sont exposés aux poussières de bois, ce qui représente 60% de la population active du secteur bois. Or les mesures effectuées par les laboratoires des Caisses Régionales d'Assurance Maladie (CRAM) et archivées dans la base de données Colchic de l'INRS montrent que l'exposition dépasse la valeur limite réglementaire en France, à savoir 1 mg.m⁻³ pour plus de 50% des cas (Travail et Sécurité (2004)).

I.2. LES DEPOUSSIÈREURS A MEDIA FILTRANTS

L'opération de dépeussierage se définit comme la séparation mécanique entre une phase continue gazeuse d'une part (de l'air par exemple) et un solide d'autre part (des poussières par exemple). Parmi les différentes techniques de dépeussierage, les séparateurs sur medium fibreux sont les dispositifs les mieux adaptés aux poussières fines. C'est pourquoi ils constituent le mode de traitement de l'air le plus répandu au niveau du dépeussierage industriel, notamment dans l'industrie de la deuxième transformation du bois.

I.2.1. Présentation et fonctionnement des dépeussierageurs à media filtrants

Un dépeussierageur à media filtrants se compose de trois parties (figure I.1) :

- une enceinte de filtration dans laquelle sont suspendues des manches ou des poches ;
- une partie supérieure comprenant le système de nettoyage des manches et l'accès aux éléments filtrants (coiffe du dépeussierageur)
- une partie inférieure constituée d'une trémie conique de récupération des poussières.

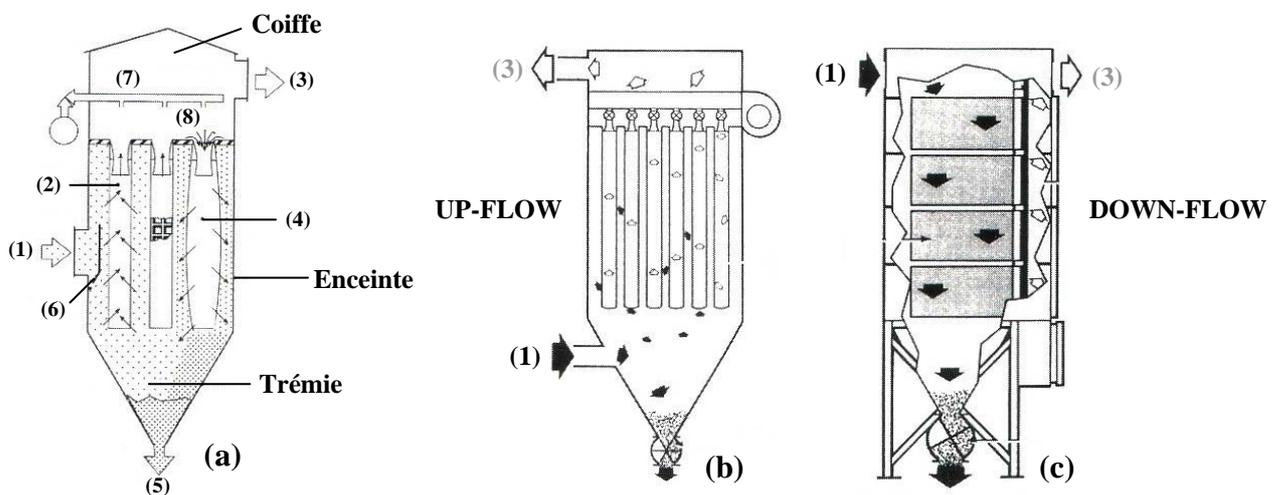


Figure I.1 : Schémas de différents types de dépeussierageurs à media filtrants avec décolmatage pneumatique.

(1): Air + poussières – (2): Manche en colmatage – (3): Air dépeussieré – (4): Manche en décolmatage – (5): Poussières sédimentées – (6): Déflecteur – (7): Rampe de distribution – (8): Injection d'air comprimé.

(a, b): Dépeussierageurs à manches « up-flow » - (c): Dépeussierageur à poches « down-flow ».

Après captage dans un atelier, l'air chargé en poussières pénètre dans le caisson de filtration et rencontre généralement un déflecteur sur lequel s'impactent les plus grosses particules. L'air empoussiéré peut pénétrer dans le caisson de filtration soit par le bas (technologie « up-flow » - figure I.1b), soit par le haut (technologie « down-flow » - figure I.1c).

L'air traverse les manches de l'extérieur vers l'intérieur. Pendant la phase de colmatage, les poussières sont retenues sur la surface externe des manches et s'accumulent sous forme d'une couche appelée gâteau de filtration. L'air filtré remonte à l'intérieur des manches et est évacué par la partie supérieure du caisson, la coiffe. La filtration d'air empoussiéré s'accompagne inévitablement d'une augmentation de la perte de charge consécutive à la formation du gâteau. Les éléments filtrants doivent donc être périodiquement régénérés par décolmatage, l'objectif étant de récupérer des propriétés aérauliques voisines de celles du filtre neuf. Le système de régénération le plus fréquemment utilisé est le décolmatage pneumatique. L'injection d'air comprimé à l'intérieur des manches provoque le détachement du gâteau de particules qui tombe sous forme d'agglomérats de différentes tailles dans la trémie constituant

la partie basse du caisson et qui sont ensuite évacués par une écluse rotative. Ce fonctionnement basé sur une succession de cycles de colmatage et de décolmatage conditionne les performances des dépoussiéreurs à media filtrants.

Suivant les applications et les besoins, ces équipements peuvent être configurés différemment. Il existe des dépoussiéreurs à manches et des dépoussiéreurs à poches. Les manches sont cylindriques et disposées verticalement (figures I.1a et b). Les poches sont des éléments rectangulaires et disposées horizontalement (figure I.1c).

A surface filtrante égale, les poches occupent un volume moindre que les manches et occasionnent un encombrement et un poids plus faibles. Les manches sont cependant plus faciles à confectionner et cela se traduit par un prix au mètre carré plus faible et une plus large utilisation. La littérature concernant les dépoussiéreurs à poches est d'ailleurs inexistante.

Le dépoussiéreur peut être ou non divisé en plusieurs cellules indépendantes associées en parallèle, de sorte qu'un compartiment puisse être isolé pendant le décolmatage ou la maintenance. Les cellules peuvent alors être mises hors service et nettoyées les unes après les autres pendant que d'autres restent en fonctionnement. On parle alors de décolmatage « off-line », c'est-à-dire avec arrêt du débit d'air à épurer dans le compartiment en nettoyage. Cette configuration permet également d'intervenir dans un compartiment (par exemple pour changer des manches) sans arrêter le fonctionnement d'autres compartiments. Les dépoussiéreurs compartimentés sont équipés d'une surface de filtration plus importante de sorte à pouvoir traiter le même débit de gaz lorsqu'une cellule est isolée. Leur coût augmente en conséquence. Lorsque le filtre n'est pas compartimenté, les manches sont nettoyées sans arrêt du débit d'air. On parle dans ce cas de décolmatage « on-line ». Ce type de dépoussiéreur est moins coûteux car il est constitué d'un seul caisson et met en œuvre une surface de filtration plus faible.

Cette technique de dépoussiérage peut atteindre de hauts niveaux de séparation tout en étant capable de s'adapter à de grandes variabilités de la charge en particules. Ainsi, les media fibreux sont fréquemment utilisés pour séparer les particules de l'air pour des concentrations allant de quelques g.m^{-3} à plusieurs centaines de g.m^{-3} . Les performances d'un dépoussiéreur à media filtrants sont liées à ses caractéristiques de construction, à ses capacités de décolmatage, à ses conditions opératoires de fonctionnement et principalement au choix du medium filtrant.

Les media filtrants diffèrent par leur mode de confection (tissé ou non-tissé), par la nature des fibres employées (polypropylène, polyamide, fibre de verre, polyester ...), par le traitement de surface dont ils ont bénéficié, par leur efficacité propre et surtout par leur coût. Cette diversité dans les produits a largement contribué au développement des dépoussiéreurs à media filtrants. De plus nombreuses informations concernant la structure des media et le traitement de surface dont ils peuvent bénéficier sont disponibles dans l'annexe I.

I.2.2. Perte de charge

La perte de charge ΔP d'un dépoussiéreur à media filtrants est un critère d'exploitation primordial (dépense énergétique) qui se définit comme la différence de pression statique entre l'amont et l'aval du medium filtrant, notées respectivement P_{amont} et P_{aval} . Elle traduit la résistance de l'élément filtrant à l'écoulement de l'air.

$$\Delta P = P_{\text{amont}} - P_{\text{aval}} \quad (\text{I.1})$$

1.2.2.1. Perte de charge d'un medium filtrant neuf

En régime laminaire (régime toujours rencontré puisque les vitesses de filtration sont souvent de l'ordre de 2 à 10 cm.s⁻¹), la perte de charge étant proportionnelle à la vitesse du fluide traversant le milieu poreux constitué par le medium, Darcy propose la relation suivante pour la perte de charge d'un medium filtrant vierge :

$$\Delta P_f = \mu \cdot R_f \cdot U_f \quad (I.2)$$

avec μ la viscosité dynamique du fluide (Pa.s) ;
 U_f la vitesse de filtration (m.s⁻¹) ;

R_f la résistance du medium à l'écoulement définie par $R_f = \frac{4 \cdot f(\alpha_f)}{d_f^2} \cdot Z$ (m⁻¹) ;

avec α_f la compacité du medium (-) ;
 Z l'épaisseur du medium (m) ;
 d_f le diamètre moyen des fibres du medium (m) ;

Davies (1973) propose une relation expérimentale pour $f(\alpha_f)$: $16 \cdot \alpha_f^{3/2} \cdot (1 + 56 \cdot \alpha_f^3)$.

La perte de charge d'un medium neuf peut être obtenue par le modèle de Davies :

$$\Delta P_f = 64 \cdot \mu \cdot U_f \cdot Z \cdot \frac{\alpha_f^{3/2} \cdot (1 + 56 \cdot \alpha_f^3)}{d_f^2} \quad (I.3)$$

Ce modèle, largement utilisé dans le domaine de filtration des gaz, donne des résultats satisfaisants pour une compacité comprise entre 0,005 et 0,4 (gamme habituelle de la compacité des media utilisés en dépoussiérage industriel).

1.2.2.2. Evolution de la perte de charge avec le colmatage

L'augmentation de la perte de charge au cours du colmatage se décompose en trois étapes. Au cours de la première, les particules sont collectées sur les fibres à l'intérieur du medium (filtration en profondeur) et la perte de charge évolue lentement. La seconde, appelée zone de transition, correspond à la formation d'un dépôt de particules en surface et est caractérisée par une évolution exponentielle de la perte de charge. La troisième étape correspond à une filtration qui se fait essentiellement en surface et non plus en profondeur ; elle est décrite par la formation d'un gâteau de particules et une évolution linéaire de la perte de charge.

Cette allure particulière convexe de l'évolution de la perte de charge est valable pour des media fibreux moyenne efficacité et très haute efficacité (THE) ; elle est décrite de manière approfondie par certains auteurs (Stenhouse et Trottier (1991), Japuntich et al. (1994), Walsh (1996) et Pénicot (1998)).

Différents modèles existent dans la littérature pour décrire l'évolution de la perte de charge lors de la filtration en profondeur (Juda et Chrosciel (1970), Davies (1973), Payatakes (1976), Bergman et al. (1978), Letourneau et al. (1990), Kanaoka et Hiragi (1990), Thomas et al. (2001)). Ils se différencient principalement par le mode de dépôt (de type dendrites ou agglomérats) et par le mode de répartition des particules sur la totalité de l'épaisseur du medium (homogène ou avec prise en considération d'un profil de pénétration au sein du filtre). L'approche homogène est discutable, essentiellement pour les particules microniques qui ne forment pas de dendrites. Les modèles tenant compte du profil de pénétration sont plus réalistes mais restent très peu exploitables du fait de leur complexité d'utilisation.

I.2.2.3. Perte de charge lors du colmatage du medium en surface et considérations sur le gâteau de filtration

Le colmatage de surface correspond à la collecte des particules sur la face amont du medium et la formation d'une couche de particule appelée gâteau de filtration. Il conditionne majoritairement l'évolution de la perte de charge et de l'efficacité de filtration. En milieu industriel, les media filtrants sont généralement colmatés par des particules largement polydispersées et le colmatage en surface est très rapidement atteint.

L'écoulement restant laminaire à travers le medium et son gâteau de filtration, la perte de charge de l'ensemble est proportionnelle à la vitesse de filtration. Novick et al. (1992) donnent une expression de la perte de charge du medium filtrant colmaté égale à la somme des contributions de deux systèmes en série :

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_g \quad (I.4)$$

où ΔP_f est la perte de charge du filtre neuf (Pa) ;

ΔP_g est la perte de charge du gâteau de particules donnée par le modèle de Kozeny :

$$\Delta P_g = \mu \cdot h_k \cdot \frac{\alpha_g}{(1 - \alpha_g)^3} \cdot \frac{a_g^2}{\rho_p \cdot Cu} \cdot U_f \cdot W_g \quad (I.5)$$

avec h_k la constante empirique de Kozeny et Carman, comprise entre 4 et 5 pour un empilement de sphères (-) ;

α_g la compacité du gâteau (-) définie par : $\alpha_g = \frac{W_g}{\rho_p \cdot Z_g} \quad (I.6)$

avec W_g la masse surfacique* de particules déposée à la surface du medium ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Z_g l'épaisseur du gâteau de filtration (m) ;

(validité de l'équation I.5 pour $\alpha_g > 0,2$ – Leith et Allen (1986))

a_g la surface spécifique des particules (m^{-1}) ;

ρ_p est la masse volumique des particules ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

Cu le coefficient correcteur de Cunningham* (-).

La perte de charge d'un medium colmaté peut donc être donnée par la formule suivante :

$$\Delta P = \mu \cdot Z \cdot \frac{16 \cdot \alpha_f^{3/2} \cdot (1 + 56 \cdot \alpha_f^3)}{r_f^2} \cdot U_f + \mu \cdot h_k \cdot \frac{\alpha_g}{(1 - \alpha_g)^3} \cdot \frac{a_g^2}{\rho_p \cdot Cu} \cdot U_f \cdot W_g \quad (I.7)$$

$$\Delta P = \mu \cdot (R_f + K_2 \cdot W_g) \cdot U_f \quad (I.8)$$

avec R_f la résistance du filtre à l'écoulement (m^{-1}) ;

K_2 la résistance spécifique du gâteau de particules ($\text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$), donnée par la relation de

Kozeny et Carman : $K_2 = h_k \cdot \frac{a_g^2}{\rho_p \cdot Cu} \cdot \frac{\alpha_g}{(1 - \alpha_g)^3} \quad (I.9)$

A noter que ce modèle ne prend pas en compte les variations de compacité du gâteau en fonction de l'épaisseur du gâteau de filtration (Holland et Rothwell (1977)). Il s'applique à des particules microniques mais n'est pas valable pour des particules submicroniques, organisées en dendrites et présentant des compacités plus faibles.

La compacité du gâteau augmente avec le diamètre des particules filtrées (Aguilar et Coury (1992), Pénicot (1998)). Après confrontation de nombreux résultats expérimentaux (plusieurs auteurs et plusieurs méthodes de détermination), Pénicot (1998) établit une corrélation reliant la compacité du gâteau avec la taille des particules :

$$\alpha_g = 0,58 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{d_p}{0,53}\right) \right] \quad \text{pour } 0 \leq d_p \leq 3 \mu\text{m} \quad (\text{I.10})$$

avec d_p le diamètre des particules exprimé en μm .

La courbe $\alpha_g = f(d_p)$ décrit l'augmentation de la compacité avec le diamètre des particules sur la plage granulométrique 0 – 3 μm , jusqu'à une limite asymptotique se rapprochant d'un empilement de sphères sur une surface plane ($\approx 0,6$).

Dans le cas d'un aérosol poly-dispersé, l'expérience montre que la compacité du gâteau est plus petite si les poussières comprennent des particules de plus de 100 μm et inversement, elle diminue si le spectre granulométrique est peu dispersé (par exemple, 100% de particules comprises entre 0,1 et 10 μm).

K_2 dépend fortement de la compacité du gâteau de filtration, α_g . Ce paramètre est difficile à obtenir par mesure directe. Une détermination expérimentale de K_2 consiste à collecter des particules sur un filtre et à calculer la pente de la droite décrivant l'augmentation de la perte de charge en fonction de la masse surfacique collectée ($P[\Delta P=f(W_g)]$).

Pénicot (1998 – particules submicroniques) et Callé (2000 – particules microniques) ont étudié les influences de certaines conditions opératoires du colmatage sur l'évolution de la résistance spécifique du gâteau (tableau I.1):

Paramètre	Evolution du paramètre	Evolution de ΔP	Evolutions de K_2
C_p	↗	→	→
d_p	↗	↘	↘
Propriétés du medium	modifiées	→	→
U_f	↗	↗	→

↗ : Augmentation ↘ : Diminution → : Stabilité

Tableau I.1 : Influences des conditions opératoires sur la résistance spécifique du gâteau de filtration.

En pratique, la perte de charge entraînée par le gâteau de particules est de loin la plus importante devant la perte de charge entraînée par le medium. Il n'est pas inhabituel que le gâteau provoque 90 à 95 % de la perte de charge du medium colmaté.

I.2.3. Efficacité de filtration

I.2.3.1. Définition

L'efficacité de filtration est le critère de performance essentiel des dépoussiéreurs à media filtrants. Elle conditionne la concentration en particules à l'aval des éléments filtrants et permet ou non le respect de la norme de rejet. L'efficacité de filtration E peut se définir de la manière suivante, si le débit total de filtration est constant :

$$E = 1 - \frac{C_{p,aval}}{C_{p,amont}} \quad (\text{I.11})$$

avec $C_{p,amont}$ la concentration massique (ou numérique) de particules à l'amont du medium ;
 $C_{p,aval}$ la concentration massique (ou numérique) de particules à l'aval du medium.

1.2.3.2. Evolution de l'efficacité avec le colmatage

L'efficacité de filtration d'un medium filtrant fibreux est fonction des efficacités unitaires de collecte correspondant à chacun des mécanismes de capture suivants :

- diffusion Brownienne ($d_p < 0,1 \mu\text{m}$) ;
- interception ($d_p > 0,1 \mu\text{m}$) ;
- impaction inertielle ($d_p > 1 \mu\text{m}$) ;
- sédimentation ($d_p > 10 \mu\text{m}$) ;
- effet électrostatique (toutes tailles de particules).

Ces différents mécanismes de capture des particules entrent en compétition lors de la filtration. Leurs importances respectives varient en fonction de la taille et de la masse volumique des particules, de la vitesse de filtration, des propriétés du gaz vecteur et des caractéristiques physiques du medium filtrant (Brown (1992)). Les très nombreux modèles d'efficacité unitaire de collection existant dans la littérature et donnant lieu au calcul de l'efficacité globale d'un medium fibreux sont répertoriés par Callé (2000) et Thomas (2001).

L'efficacité de filtration à l'état neuf d'un medium fibreux utilisé en filtration des poussières présente un minimum pour des diamètres de particules généralement compris entre 0,1 et 0,5 μm . Ce domaine correspond à des particules trop grosses pour que l'effet de diffusion soit efficace et trop petites pour que les mécanismes d'interception et d'impaction jouent un rôle important. Ce minimum représente une caractéristique essentielle des filtres à fibres classiquement employés en dépoussiérage industriel.

L'efficacité initiale des media non-tissés à moyenne efficacité est faible ($E < 30 \%$). Seuls, ils ne suffiraient pas à assurer une efficacité suffisante pour répondre aux exigences normatives. Cependant, il se produit une augmentation de l'efficacité de filtration au cours du colmatage. Cette évolution de l'efficacité est à rapprocher de celle de la perte de charge. On observe tout d'abord une croissance lente de l'efficacité pendant la phase de colmatage en profondeur. En effet, les particules collectées par le medium constituent autant de nouveaux collecteurs et améliorent progressivement les mécanismes de capture (Stenhouse et Trottier (1991), Rembor et al. (1998)). Puis, pendant la zone de transition, lorsque le gâteau de particules apparaît en surface du medium une augmentation plus rapide de l'efficacité de filtration est observée (Pénicot (1998) pour des particules submicroniques et Callé (2000) pour des particules microniques). Dès lors que la compacité du filtre a suffisamment augmenté et que le dépôt de particules en surface se construit, l'efficacité atteint des valeurs proches de 100%. Rapidement, on constate que le medium fibreux ne joue plus qu'un rôle de support pour le gâteau de filtration, devenu le principal collecteur de particules et contrôlant majoritairement l'efficacité de collecte.

Le fonctionnement des dépoussiéreurs à media filtrants repose sur un effet d'auto-filtration des particules, c'est-à-dire que la filtration de la poussière s'effectue par elle-même sur un support qui est le filtre. Le détachement du gâteau lors du décolmatage doit donc être suffisamment important pour faire baisser la perte de charge mais il ne doit pas être total afin de préserver les bénéfices apportés par la présence de cette couche de particules.

I.3. LE DECOLMATAGE PNEUMATIQUE

I.3.1. Introduction sur le décolmatage des media filtrants

Le décolmatage des éléments filtrants est une phase cruciale qui a pour objectif de détacher le gâteau de particules formé en surface des media filtrants. Ce dernier occasionne une perte de charge croissante au fur et à mesure du colmatage et nécessite une régénération périodique du medium. Si la perte de charge atteint des valeurs trop élevées, la résistance à l'écoulement devient telle qu'il se produit une chute du débit de filtration qui provoque soit une baisse de l'efficacité de captage, soit une augmentation de la dépense énergétique pour maintenir le débit initial. Plusieurs techniques de décolmatage existent (Contal (1994)) :

- ultrasons (vibrations acoustiques);
- secouage (vibrations mécaniques) ;
- contre-courant (injection d'un grand volume d'air à contre-courant sous faible pression) ;
- pneumatique (injection d'un petit volume d'air à contre-courant sous haute pression).

Le décolmatage sonore provoque des nuisances auditives souvent gênantes et ne conduit pas à des performances suffisantes. Le décolmatage par secouage est aujourd'hui pratiquement abandonné. Le décolmatage à contre-courant est un nettoyage « off-line », c'est-à-dire avec arrêt du débit d'air à traiter il favorise la décantation des poussières les plus fines et les plus légères vers la trémie, mais détruit momentanément la capacité de filtration de la couche filtrante car cette dernière est éliminée en trop grande partie.

La technique la plus largement employée dans l'industrie du dépoussiérage est le décolmatage par injection d'air sous haute pression à contre-courant à l'intérieur des manches ou décolmatage pneumatique. L'efficacité de ce décolmatage et le fait que sa mise en œuvre ne nécessite pas un arrêt du procédé de filtration (décolmatage « on-line ») sont des atouts majeurs. Ainsi, le fonctionnement « on-line » préserve au mieux la capacité de filtration du dépoussiéreur puisque le gâteau n'est jamais complètement détruit. Il permet également de maintenir la perte de charge plus stable, ce qui est toujours préférable, notamment pour l'efficacité de séparation des poussières et pour éviter les perturbations de pression dans les circuits à l'amont. Les vitesses de filtration sont 3 à 4 fois supérieures à celles de dépoussiéreurs équipés de systèmes de décolmatage différents.

Le décolmatage pneumatique est obtenu en déformant très brusquement le tissu filtrant par envoi d'un fort débit d'air sur la surface propre du filtre, à contre courant sous haute pression (2 à 6 bars) pendant un temps très court (quelques centaines de millisecondes). Cet à-coup de pression stoppe également le mécanisme de filtration pendant un court instant, et provoque une inversion du sens de passage de l'air, du fait de l'introduction d'un volume d'air de décolmatage à l'intérieur de la manche (figure I.1 – (4)). Pendant la phase de décolmatage, l'air circule donc de la surface propre du medium (intérieur de la manche) vers la surface externe de la manche sur laquelle est venu se former le gâteau. Le nettoyage pneumatique s'applique individuellement à chaque élément filtrant par un jet axial d'air comprimé qui assure à la fois l'isolement du circuit d'aspiration de l'élément en nettoyage et le décollement de la couche de particules de son support.

Le décolmatage peut être réalisé suivant un intervalle de temps prédéfini ou avec une fréquence asservie à une perte de charge maximale prédéfinie. En conséquence, la durée entre chaque impulsion est très variable et peut être comprise entre quelques minutes et plusieurs heures.

Le décolmatage pneumatique a connu un véritable essor avec l'apparition et le développement des media non-tissés aiguilletés. Ce procédé exclut l'emploi des media tissés car la capacité de nettoyage est trop grande et se traduit par une baisse de l'efficacité de filtration. De plus, les tissés soumis à ce régime de nettoyage brutal subissent des usures trop rapides car ils ne présentent pas une assez bonne résistance mécanique.

Les mécanismes de détachement du gâteau liés au décolmatage pneumatique ne sont pas encore bien compris. Le dimensionnement des installations de dépoussiérage, le choix des media et des paramètres du décolmatage, sont encore très dépendants de données empiriques. Bien souvent, les constructeurs de dépoussiéreurs et les manufacturiers de filtres répondent aux demandes en puisant dans leur expérience du métier plutôt qu'en s'appuyant sur des connaissances scientifiques précises des mécanismes et des comportements.

I.3.2. Mécanismes liés au détachement du gâteau lors d'un décolmatage pneumatique

La force de détachement exercée par les mécanismes de décolmatage lors de l'à-coup de pression à contre-courant permet le détachement du dépôt de particules seulement si elle est supérieure aux forces d'adhésion globales qui retiennent le gâteau au medium (Dennis et Klemm (1980), Ferer et Smith (1998)). Les effets du décolmatage pneumatique proviendraient d'une combinaison entre un choc brutal subit par le medium et une courte perméation d'air à contre-courant (Denis et Wilder (1975), Théodore et al. (1975), Morris (1984), Sievert et Löffler (1986), Lu et Tsai (1999)). Des études ont montré que les deux mécanismes possèdent leur importance propre et seraient indissociables pour obtenir un décolmatage efficace. Cependant, d'autres auteurs (Ellenbecker et Leith (1981), Humphries et Madden (1983)) concluent que l'accélération du medium est le principal mécanisme de décolmatage et que l'effet du flux d'air à contre-courant ne joue qu'un rôle mineur dans le détachement du gâteau.

I.3.2.1. Accélération-décélération du medium

L'augmentation instantanée de la pression à l'intérieur de l'élément filtrant lors d'un décolmatage pneumatique provoque un mouvement initial brutal du medium qui constitue un des mécanismes de détachement du gâteau. S'appuyant sur des mesures de perte de charge et d'accélération de l'élément filtrant, certains auteurs décrivent le mouvement initial du medium soumis à un à-coup de pression à contre-courant et montrent que c'est la décélération brusque du medium lors de son déplacement qui produit les forces de tension nécessaires au détachement du gâteau en surface (Dennis et al. (1981), Morris (1984), Allen et al. (1999)). Allen et al. (1999) décrivent la mise en mouvement radial du medium pendant le décolmatage. La figure I.2 illustre le comportement de la section d'une manche (vu de dessus) lors d'un à-coup de pression d'air comprimé à contre-courant.

(1) de l'immobilité à l'arrivée de la vague ($P_{ext} > P_{int}$) :

Lors de la filtration, le medium et son gâteau restent immobiles : ils sont plaqués vers l'intérieur de la manche par l'écoulement d'air s'effectuant de l'amont vers l'aval.

(2) de l'arrivée de la vague au commencement du mouvement du medium ($P_{ext} \geq P_{int}$) :

L'injection d'air comprimé provoque une soudaine augmentation de la pression à l'intérieur de la manche et une réduction du flux de filtration à travers le medium. Tant que la pression à l'intérieur du filtre est plus faible que la pression à l'extérieur, le medium reste immobile. Dès lors que la pression intérieure est suffisamment grande, le medium filtrant entre en mouvement. Si les forces de cohésion du gâteau ne sont pas trop grandes, cela se produit lorsque la pression interne est tout juste supérieure à la pression externe.

- (3) *du début du mouvement du medium à l'apparition des forces de détachement ($P_{ext} < P_{int}$)* :
 Le mouvement du medium est la conséquence du soudain excès de pression à l'intérieur de la manche comparativement à l'extérieur. Une manche possède une structure souple et élastique qui ne s'oppose pas au déplacement du medium. La seule résistance au mouvement et à l'accélération du medium provient de l'inertie du filtre et du gâteau. Lors de la montée en pression interne, l'accélération vers l'extérieur provoque un plaquage du gâteau de filtration contre le medium et il ne se produit pas encore de détachement. Au cours du gonflement de la manche, le medium devient de plus en plus tendu : des contraintes mécaniques apparaissent entraînant une décélération du medium et des forces de détachement se créent.
- (4) *de l'apparition des forces de détachement au déplacement maximum ($P_{int} \leq P_{int, max}$)* :
 Lorsque le medium est tendu, les contraintes résultantes s'opposent alors au déplacement vers l'extérieur. Les contraintes contribuent alors à diminuer la vitesse du déplacement jusqu'à atteindre l'amplitude maximale de la manche. Le medium subit une décélération qui a pour conséquence la création d'une force de détachement entre le filtre et le gâteau, ce dernier continuant à être entraîné vers l'extérieur sous l'effet de sa propre masse. Si cette force de tension est supérieure à la force d'adhésion globale du gâteau, ce dernier se détachera pour continuer son déplacement vers l'extérieur. Enfin, le medium, libéré de son gâteau, vient se replacer sur sa cage support et une oscillation s'installe, contrôlée par l'élasticité et l'inertie du medium, jusqu'au retour à l'immobilité et à la phase de filtration.

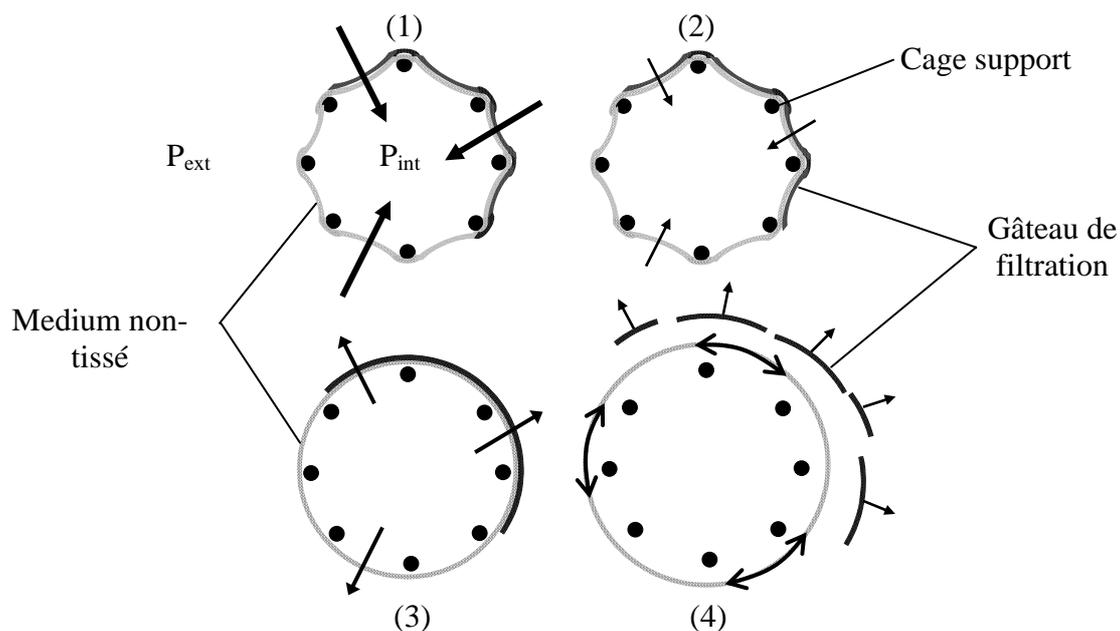


Figure I.2 : Schémas des différentes étapes du mouvement d'une manche lors d'un décolmatage pneumatique
 - P_{int} : pression intérieure, P_{ext} : pression extérieure - (Allen et al. (1999)) -

Il se produit une première accélération du medium vers l'extérieur au tout début de l'impulsion. Celle-ci est immédiatement suivie d'une importante décélération avant que le medium n'atteigne son expansion maximale. L'accélération enregistrée en tout début d'impulsion est généralement la plus importante et entraîne la plus grande force de détachement. L'efficacité de décolmatage par ce mécanisme dépend donc du premier mouvement de la manche et du comportement du medium dans les premières dizaines de millisecondes après le déclenchement de l'à-coup de pression.

L'accélération du medium est corrélée avec la montée en pression interne de la manche pendant le décolmatage pneumatique, mais les conditions exactes de cette dépendance sont encore incertaines. Des auteurs (Dennis et al. (1981), Klingel et Löffler (1983), De Ravin et al. (1988), Plassart (1994), Allen et al. (1999)) stipulent qu'une vague de pression est à l'origine du mouvement initial de la manche. De Ravin et al. évoquent le déplacement longitudinal d'une onde de pression le long de la manche à une vitesse d'environ 35 m.s^{-1} et qui ralentirait au fur et à mesure de son éloignement de la buse d'injection. Pour une buse d'injection située en haut d'une manche de deux mètres ou plus, le temps de montée en pression pour le front de cette vague est multiplié par un facteur supérieur à 5 entre le bas et le haut de la manche (Humphries et Madden (1983), De Ravin et al. (1988)). De nombreux auteurs ont étudié les relations entre le décolmatage du gâteau de particules, la surpression dans la manche et l'accélération du medium.

Dennis et al. (1981), Humphries (1981) et Morris (1984) avaient déjà présenté une description identique du mouvement radial du medium lors d'un décolmatage pneumatique. Selon Dennis et al., les mouvements du medium filtrant sont principalement gouvernés par deux paramètres : les modules d'élasticité (M_e) et de flexibilité (M_f) du medium. Ils ont mis à profit la notion de décélération du medium pour définir la force de séparation qui est créée lors d'un décolmatage :

$$F_s = (W_{\text{res}} + W_c) \cdot a_{\text{max}} \quad (\text{I.12})$$

avec F_s la force de séparation par unité de surface et a_{max} la décélération maximale du medium. W_{res} et W_c sont respectivement la masse surfacique résiduelle après décolmatage et la masse surfacique additionnelle pendant un colmatage.

Dennis et al. (1981) proposent également une équation permettant d'accéder à la décélération maximale subie par le medium :

$$a_{\text{max}} = \frac{M_f}{(M_e \cdot (W_{\text{res}} + W_c))^{\frac{1}{2}}} \cdot \left(\frac{d(\Delta P)}{dt} \right)_{\text{max}} \quad (\text{I.13})$$

avec $\left(\frac{d(\Delta P)}{dt} \right)_{\text{max}}$ la variation de perte de charge maximale pendant le décolmatage.

L'équation I.13 traduit correctement des observations expérimentales (Dennis et Wilder (1975), Dennis et al. (1981), Humphries et Madden (1983), Morris (1984), De Ravin et al. (1988), Allen et al. (1999)) : l'efficacité de décolmatage est améliorée par l'utilisation de media de faible élasticité (Module M_e petit) et très flexibles (Module M_f grand) ; par contre, plus le grammage d'un medium ou la masse de particules déposées sont grandes, plus l'accélération subie par le medium pendant un à-coup de pression de décolmatage est petite. Dennis et al. montrent par ailleurs que pour avoir une action efficace, le décolmatage doit présenter une variation de la perte de charge $\frac{d(\Delta P)}{dt} > 6.10^5 \text{ Pa.s}^{-1}$.

L'inconvénient de la modélisation de Dennis et al. est qu'elle ne présente pas de couplage entre le mouvement radial et le mouvement axial. Les changements de comportement vis à vis du décolmatage le long d'une manche, dus en particulier aux gradients de dépôt et de puissance de décolmatage sur la hauteur de la manche (Ellenbecker et Leith (1979), Sievert et Löffler (1986)), ne sont donc pas pris en compte.

Il est à noter que d'autres tentatives de modélisation du mouvement du medium pendant un décolmatage pneumatique ont été réalisées par Allen et al. (1999) et Humphries et Madden (1983). Ces approches reposent cependant sur certaines données physiques et géométriques

parfois difficiles à obtenir. De même que pour celui de Dennis et al. (1981), ces modèles font ressortir que les paramètres qui conditionnent la force de détachement du gâteau sont : la masse de gâteau déposée, les propriétés intrinsèques du medium et les caractéristiques du pic initial d'impulsion de la pression intérieure.

1.3.2.2. Flux d'air à contre-courant

Les effets d'un à-coup de pression d'air comprimé à contre-courant dans une manche filtrante ne se résument pas uniquement à la mise en mouvement du medium et au phénomène d'accélération-décélération qui vient d'être évoqué. Il est accompagné par une perméation d'air à contre-courant qui se diffuse de l'intérieur vers l'extérieur de la manche pendant le décolmatage (Theodore et al. (1975), Dennis et Wilder (1975), Morris (1984), Sievert et Löffler (1986, 1987)).

Le débit d'air de décolmatage qui traverse l'élément filtrant à contre-courant possède deux origines. Un premier apport provient du jet d'air primaire issu du réservoir d'air comprimé et éjecté sous haute vitesse par la buse de décolmatage. Ce jet turbulent initial crée une dépression locale et entraîne l'aspiration d'un flux d'air secondaire par induction, provenant cette fois du compartiment aval du dépoussiéreur (Theodore et al. (1975), Morris (1984)). Le volume d'air secondaire entraîné est 3 à 12 fois plus important, selon les auteurs, que le volume initial d'air comprimé injecté (qui est de quelques dizaines de litres tout au plus). Les effets combinés des flux d'air primaire et secondaire provoquent une surpression à l'intérieur des manches qui est à l'origine du flux d'air à contre-courant.

Peu de travaux fournissent des données quantitatives concernant la vitesse du flux d'air à contre-courant. Dennis et Wilder (1975) estiment, par exemple, que la vitesse d'air à contre-courant obtenue sur la surface interne d'un filtre durant l'à-coup de pression de décolmatage est de $0,19 \text{ m.s}^{-1}$, et peut atteindre des valeurs supérieures à $0,55 \text{ m.s}^{-1}$ en bas de la manche. Ellenbecker et Leith (1981) ont mesuré, quant à eux, des valeurs ne dépassant pas $3 \text{ à } 5 \text{ cm.s}^{-1}$. Pour d'autres auteurs (Dennis et al. (1981), Sievert et Löffler (1987), Klimczack et Applewhite (1997)), la vitesse de perméation de l'air comprimé de décolmatage à travers les zones décolmatées du medium est généralement comprise entre 10 et 100 fois la vitesse de filtration.

L'influence du flux d'air à contre-courant lors d'un décolmatage pneumatique n'est pas encore bien déterminée. Si l'importance de ce mécanisme est appuyée par certains travaux (Theodore et al. (1975), Dennis et Wilder (1975), Morris (1984), Sievert et Löffler (1986), Lu et Tsai (1999)), d'autres suggèrent qu'il ne peut pas être considéré comme un facteur de séparation à part entière (Ellenbecker et Leith (1981), Humphries et Madden (1983)). Tous s'accordent cependant pour admettre que cette perméation d'air à contre-courant ne peut que favoriser l'éloignement des particules détachées de la manche décolmatée avant que le régime de filtration ne recommence.

1.3.2.3. Zones d'action des mécanismes de décolmatage le long d'une manche filtrante

Des profils de perte de charge et/ou d'accélération le long d'une manche de filtration ont été enregistrés (Dennis et Wilder (1975), Ellenbecker et Leith (1981), Klingel et Löffler (1983), Humphries et Madden (1983), Sievert et Löffler (1986), De Ravin et al. (1988), Lu et Tsai (1996, 1998, 1999)). Cependant, les résultats découlant de l'établissement de ces profils le long d'une manche diffèrent grandement d'un auteur à l'autre et d'une installation à l'autre.

Klingel et Löffler (1983) ont, par exemple, observé un profil de pression uniforme sur la manche (surpression d'environ 1000 Pa) alors que la plupart des autres auteurs constatent que le profil de pression évolue suivant la hauteur sur une manche. Ainsi, Lu et Tsai (1998) et Sievert et Löffler (1986) montrent qu'il se produit en haut de manche une alternance rapide de pics de dépressions et de surpressions, dont l'amplitude est particulièrement grande. Ces oscillations sont d'autant plus importantes que le point de mesure est proche de la buse d'injection. Dans la zone supérieure de la manche, le medium est donc secoué et vient heurter de manière répétée sa cage support : dans cette zone, il existe d'importantes forces de tension entre le gâteau et le medium. Humphries et Madden (1983) ou Lu et Tsai (1999), quant à eux, observent une dépression dans la partie haute de la manche, au plus près de la buse d'injection, qui provoque dans cette partie une aspiration du medium vers sa cage support. Pour le haut de la manche, les résultats diffèrent donc d'une étude à l'autre, alors même que parfois, les conditions opératoires sont similaires.

Sur le reste de la hauteur d'une manche filtrante, la plupart des auteurs montrent que la surpression intérieure grandit en s'éloignant de la buse d'injection, du fait de la réflexion probable de l'air de décolmatage sur la coupelle du fond de la manche (Ellenbecker et Leith (1979), Sievert et Löffler (1986)).

Cette disparité dans les allures des signaux de pression, notamment dans la partie supérieure d'un élément filtrant (au plus près de la buse de décolmatage), est également observable dans les travaux sur les bougies filtrantes céramiques (Bebner et Löffler (1994), Stephen et al. (1996), Mai et al. (1996), Ito et al. (1998), Hata et al. (2003), Chuah et al. (2004), Schildermans et al. (2004)). Les bougies filtrantes céramiques ont été développées pour la filtration des particules véhiculées par des gaz à hautes températures. De même que les manches filtrantes fibreuses, elles sont également soumises périodiquement à des décolmatages pneumatiques. Certains travaux effectués sur les filtres rigides, comme l'étude des profils de surpression intérieure, sont donc intéressants pour la compréhension de phénomènes similaires sur les manches filtrantes.

Une synthèse des différents résultats sur les manches filtrantes montre que l'accélération provoquée par le mouvement brutal du medium est le mécanisme de décolmatage prédominant dans la partie supérieure de la manche alors que le flux d'air à contre-courant, créé par une forte surpression interne, est majoritaire en bas de la manche. Le haut et le bas d'une manche filtrante décolmatée constituent les zones nettoyées le plus efficacement mais les mécanismes mis en jeu pour déloger le gâteau de particules sont différents. En effet, lorsque le point de mesure de l'accélération s'éloigne de la buse d'injection d'air comprimé, la valeur des pics d'accélération décroît rapidement pour être finalement proche de zéro en bas de manche. Dans la zone basse de la manche, aucun mouvement dynamique brutal n'est observé (sauf par De Ravin et al. (1988) et par Lu et Tsai (1999) qui sont les seuls à enregistrer de faibles accélérations d'environ 25 à 40 g en bas de manche). C'est dans le bas de la manche que sont par contre mesurées les plus importantes valeurs de surpression et donc qu'il se produit les plus grands flux d'air à contre-courant.

1.3.2.4. Profils de masse surfacique du gâteau résiduel le long d'une manche

Ellenbecker et Leith (1979) et Sievert et Löffler (1986) ont établi des profils de dépôt de particules le long de manches filtrantes soumises à un décolmatage pneumatique (il n'est pas fait mention de la présence ou non d'une cage support). La masse surfacique de particules résiduelles encore accrochées à la surface du medium varie en fonction de la position sur la

hauteur de la manche. La figure I.3 illustre le fait que la quantité de particules résiduelles est plus importante dans le milieu de la manche que dans le haut ou le bas.

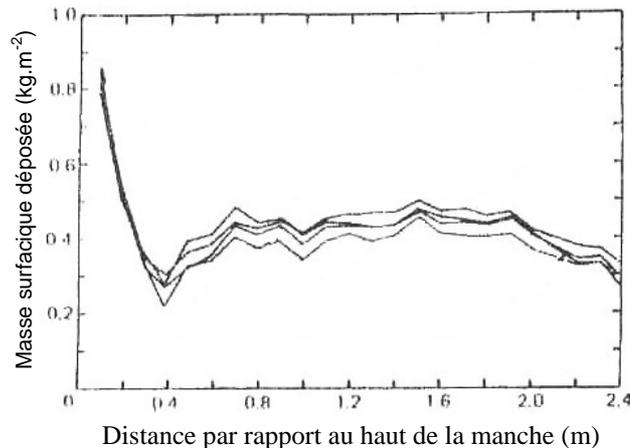


Figure I.3 : Profils de dépôt de poussières typiques après un décolmatage pneumatique (Ellenbecker et Leith (1979) – Dépoussiéreur 3 manches, L = 2,44 m, D = 0,114 m, polyester non-tissé, $P_r = 6,9$ bar).

Ces résultats sont en accord avec l'emplacement des zones d'action privilégiées des mécanismes d'accélération – décélération du medium (haut de manche) et de flux d'air à contre-courant (bas de manche) illustrées au paragraphe précédent.

Il est à noter qu'une « zone morte », caractérisée par un mince anneau de poussières jamais décolmaté, a été observée par Ellenbecker et Leith (1979) sur des manches filtrantes et par Stephen et al. (1996), Hata et al. (2003) sur des bougies céramiques. Ce phénomène d'accumulation se produit uniquement sur les premiers centimètres tout en haut de la manche et il provient certainement d'un effet de succion d'air en partie haute de la manche, du manque de degré de liberté du medium à proximité de son point d'attache ou de la présence, éventuelle, d'un Venturi de décolmatage intrusif.

1.3.2.5. Conclusions

Les valeurs des paramètres clefs rendant compte de l'efficacité d'un décolmatage varient de la manière suivante, suivant les auteurs :

- de 30 à 500 g pour l'accélération du medium ;
- de 300 à 5000 Pa pour la surpression à l'intérieur de la manche ;
- de 0,03 à 0,55 m.s⁻¹ pour la vitesse d'air frontale à contre courant.

La très large étendue des valeurs rencontrées dans la littérature (cf. tableau I.2 page suivante) confirme qu'il est difficile de se forger une opinion claire et définitive sur les effets d'un à-coup de pression d'air comprimé sur une manche filtrante tant la masse d'informations est grande et variée.

Le long d'une manche filtrante, les mécanismes responsables du décolmatage du gâteau sont différents suivant la zone considérée. Le décolmatage pneumatique est probablement la combinaison entre un brutal mouvement du medium et une courte perméation d'air à contre-courant, mais chacun de ces deux mécanismes possède une zone d'action qui lui est propre.

Enfin, certaines études (Sievert et Löffler (1989), Lu et Tsai (1998), Tsai et al. (2000)) évoquent l'existence de seuils critiques pour les valeurs de surpression et d'accélération du medium. Au delà de ces valeurs la quantité de particules décolmatées n'augmente plus et l'utilisateur ne fait que gaspiller de l'énergie et soumettre les manches à des forces de tension plus importantes que nécessaires.

Auteurs	Manches filtrantes	Cage support	Venturi de décolmatage	Conditions de décolmatage	Conditions opératoires	Surpression DP (Pa)	Accélération a (g)	Vitesse maximale du média (m.s ⁻¹)	Remarques	
Dennis et Wilder (1975)	1 manche (L = 1,22 m - D = 0,114) Dacron non-tissé (G = 610 g.m ⁻² - Z = 17 mm)	oui	oui	t _d = 100 ms d _b = 63 mm	cendres volantes	/	250	1,7		
Dennis et al. (1977)	/	/	/	/	/	/	50 à 250	/	Cités par Dennis et Klemm (1980)	
Dennis et al. (1981)	1 manche (L = 1,22 m - D = 0,114 m) Dacron tissé (G + Wg _{max} = 1,26 kg.m ⁻²)	oui	oui	t _d = 60 ms P _r = 4,8 bar	U _i = 4,3 cm.s ⁻¹ - C _p = 25 g.m ⁻³ G + Wg _{max} = 1,26 kg.m ⁻² cendres volantes (d _{pm} = 9,2 µm)	/	200 à 300	2		
Humphries et Madden (1983)	1 manche (L = 2,44 m - D = 0,11 m) Acrylique non-tissé	oui	oui	d _b = 5,5 à 12,5 mm P _r = 2,7 à 8,3 bar	C _p = 30 g.m ⁻³ cendres volantes	300 -1000 / 500	/	/	Minimum pour déloger 60% du gâteau Haut / Bas de la manche	
Klinger et Löffler (1983)	1 manche polyester non-tissé (L = 2,5 m - G = 600 g.m ⁻²)	/	oui	P _r = 5 bar	U _i = 4,2 cm.s ⁻¹ - C _p = 5 g.m ⁻³ poussières de pierre (d _{pm} = 5 µm) ΔP _{max} = 2500 Pa	1000	/	/	Sur l'ensemble de la hauteur de la manche	
	Manche à l'état neuf			/	pas de particules					- 500 / 600
Morris (1984)	9 manches polyester non-tissé (colmatage interne effectué) (L = 2 m - G = 400 g.m ⁻²)	oui	oui	t _d = 300 ms P _r = 7,6 bar	U _i = 1,5 cm.s ⁻¹ - C _p = 2 g.m ⁻³ dioxyde de titane (d _{pm} = 0,2 µm)	/	30 à 60	/		
Rothwell (1986)	1 manche térylène (G = 650 g.m ⁻² - L = 1,4 m - D = 0,125 m)	oui	oui	t _d = 20 à 500 ms P _r = 5 bar d _b = 8 mm	U _i = 0 à 6,7 cm.s ⁻¹	2000 à 6000	/	/		
Sievert et Löffler (1986)	1 manche polyester non-tissé (L = 2,44 m - D = 0,115 m)	/	oui	t _d = 200 ms P _r = 6 bar	U _i = 5 cm.s ⁻¹ - C _p = 5 g.m ⁻³ poussières de pierre (d _{pm} = 4,5 µm) ΔP _{max} = 1500 Pa	1800 / 600	330 / 0	/	Haut / Bas de la manche	
Sievert et Löffler (1987)	Média plan (S _i = 0,015 m ²)	non	non	/	U _i = 5 cm.s ⁻¹ - C _p = 5 g.m ⁻³ poussières de pierre (d _{pm} = 4,5 µm) - RH = 45 - 65 %	/	200 à 500	/	Média peu flexible	
							350			a _{max} en partie haute de la manche
							30 à 60			Média flexible
De Ravin et al. (1988)	Polyster non-tissé (L = 2,44 m - D = 0,1 m)	oui	oui	P _r = 6,9 bar d _b = 5,5 mm	ΔP _{max} = 200 à 1500 Pa alumine (d _{pm} = 19 µm) cendres (d _{pm} = 9,6 µm)	2400 / 1000	20 à 100	/	Haut / Bas de la manche	
Sievert et Löffler (1989)	/	/	/	/	/	400 à 500	/	/	Surpression minimum	
Bustard et al. (1992)	/	/	/	/	/	/	100 à 200	/	Cités par Lu et Tsai (1999)	
Lu et Tsai (1996)	1 manche à l'état neuf (L = 6 m - D = 0,129 m)	/	non	t _d = 300 ms P _r = 2,9 bar d _b = 26 mm	U _i = 0 cm.s ⁻¹ pas de particules	1750 / 250	/	/	Haut / Bas de la manche	
Lu et Tsai (1998)	2 manches (L = 1,5 m - D = 0,127 m) polyester + membrane acrylique (colmatage interne effectué)	oui	oui	t _d = 150 ms P _r = 2 bar d _b = 13 mm	U _i = 2 cm.s ⁻¹ - C _p = 9,5 à 11,8 g.m ⁻³ ΔP _{max} = 1495 Pa cendres volantes (d _{pm} = 6 µm)	+/- 2500 / 1800	50 / 10	/	Haut / Bas de la manche	
Allen et al. (1999)	16 manches (L = 2,5 m - D = 0,126 m) Térylène tissé (G = 500 g.m ⁻² - Z = 19 mm)	oui	oui	t _d = 100 ms P _r = 9 bar	U _i = 2 cm.s ⁻¹ - C _p = 10 g.m ⁻³ Wg _{max} = 0,24 kg.m ⁻² cendres volantes	700	30	0,4	Manche propre	
							150	2	Manche colmatée	
Lu et Tsai (1999)	1 manche à l'état neuf (L = 1,5 m - D = 0,127 m)	/	oui	t _d = 150 ms P _r = 2,9 bar d _b = 8 à 20 mm	U _i = 0 cm.s ⁻¹ pas de particules	-1000 à 200 / 900 à 4600	10 à 70 / 5 à 25	/	Haut / Bas de la manche	
Tsai et al. (2000)	2 manches (L = 1,5 m - D = 0,127 m) polyester + membrane acrylique (colmatage interne effectué)	oui	non	t _d = 150 ms P _r = 3 bar d _b = 13 mm	U _i = 4 cm.s ⁻¹ - C _p = 9,5 à 11,8 g.m ⁻³ ΔP _{max} = 1500 Pa cendres volantes (d _{pm} = 6 µm)	500 à 600	/	/	Surpression moyenne minimum	
						1200	30	Valeurs crêtes		

Tableau I.2 : Synthèse des valeurs de surpression et d'accélération du medium pendant un décolmatage pneumatique (compilation de la littérature).

I.3.3. Indicateurs de performance d'un décolmatage pneumatique

L'état décolmaté peut être caractérisé soit par la perte de charge résiduelle, soit par la fraction décolmatée.

I.3.3.1. Perte de charge résiduelle

Après un décolmatage, le détachement d'une partie du gâteau de particules entraîne une chute de la perte de charge jusqu'à une valeur qui est qualifiée de résiduelle (ΔP_{res}). Cet état résiduel caractérise la résistance aéraulique engendrée par le medium filtrant colmaté en profondeur et les résidus de gâteau pouvant se présenter sous forme de plaques non détachées (décolmatage par plaques) ou d'une fine couche uniforme en surface. Plus un décolmatage est capable de déloger une grande quantité de particules en surface, plus la perte de charge résiduelle résultante est basse. Inversement, si un utilisateur désire garder constamment une couche de particules minimale en surface, il s'efforcera d'adapter le décolmatage pour ne pas descendre en dessous d'une certaine valeur de perte de charge résiduelle judicieusement déterminée, ce qui lui assurera la présence du gâteau. La perte de charge résiduelle croît avec les cycles avant de tendre vers une valeur limite.

I.3.3.2. Fraction décolmatée

La fraction décolmatée γ permet de traduire les disparités du dépôt de particules résiduelles et d'estimer quantitativement les conséquences du décolmatage d'un medium. Elle se définit généralement comme un rapport de masse.

Auteurs	Définition	Relation empirique
Dennis et Klemm (1979)	$\gamma = 1 - \frac{\overline{W_{res}} - W_{res,min}}{W_{g,max} - W_{res,min}} \quad (I.14)$ <p> $\overline{W_{res}}$: masse surfacique résiduelle moyenne, $W_{res,min}$: masse surfacique résiduelle dans les zones décolmatées $W_{g,max}$: masse surfacique du gâteau juste avant décolmatage </p>	$\gamma = a \cdot W_{g,max}^b$ <p>a et b : constantes empiriques dépendant de la nature des poussières et des conditions de filtration et de décolmatage</p>
Ellenbecker et Leith (1979)	$\gamma = \frac{m_{dec}}{m_{total}} \quad (I.15)$ <p> m_{dec} : masse détachée lors d'un décolmatage m_{total} : masse totale de gâteau présente avant décolmatage </p>	$\gamma = 0,05 \cdot (V_{max})^{2,05} \cdot (W_{g,max})^{0,49} \cdot (U_f)^{-0,20}$ <p>V_{max} : vitesse maximale atteinte par le medium lors du décolmatage</p>
		$\gamma = 0,22 \cdot E_c^{1,00}$ <p>E_c : énergie cinétique liée à la masse surfacique de particules déposées</p> $E_c = \frac{1}{2} \cdot W_{g,max} \cdot (V_{max})^2$
De Ravin et al. (1988)	$\gamma = \frac{m_{dep}}{m_{total}} = \frac{m_{det}}{m_{total}} \quad (I.16)$ <p>m_{dep} : masse déposée lors du colmatage suivant</p>	/
Callé (2000)	$\gamma = 1 - \frac{m_d - m_f}{m_c - m_f} \quad (I.17)$ <p> m_c : masse du medium à l'état colmaté m_d : masse du medium à l'état décolmaté m_f : masse du medium à l'état neuf </p>	/

Tableau I.3 : Synthèse de certaines définitions et relations pour la fraction décolmatée.

Lorsque le régime stationnaire est atteint, un pourcentage relativement petit de la masse totale de poussières est décrochée à chaque décolmatage. Selon ces auteurs, la fraction décolmatée varie entre 2-5 % pour des décolmatages de faibles intensités et 20-35 % pour des décolmatages de fortes intensités. Ellenbecker et Leith (1981) observent que la fraction décolmatée baisse au fur et à mesure des cycles de colmatage et de décolmatage.

I.3.4. Paramètres conditionnant les performances du décolmatage pneumatique

I.3.4.1. Influence des conditions opératoires de filtration

Les influences de certaines conditions opératoires de filtration sont synthétisées dans le tableau suivant :

Résultats et constats		Auteurs	Commentaires
Vitesse de filtration U_f			
$U_f \nearrow$	Redéposition \nearrow $\Delta P_{res} \nearrow$	Leith et al. (1977) Ellenbcker et Leith (1981) Klingel et Löffler (1983)	Décolmatage du gâteau moins efficace lorsque $U_f \nearrow$
$U_f \nearrow$	$\Delta P_{res} \rightarrow$	Dennis et Klemm (1980)	γ est uniquement définie par les forces d'adhésion globale entre le gâteau et le medium
U_f varie	Variation de la surpression interne dans la manche lors du décolmatage	Rothwell (1986)	/
$U_f \nearrow$	$a_{max} \searrow$	Morris (1984) Allen et al. (1999)	La pression du réservoir P_r doit alors être augmentée pour compenser l'effet contraignant de U_f
Perte de charge maximale (ΔP_{max}) ou Masse surfacique de gâteau ($W_{g max}$) avant décolmatage			
$\Delta P_{max} \nearrow$	$a_{max} \searrow$	De Ravin et al. (1988)	 Contradictoire
$W_{g max} \nearrow$	$\gamma \nearrow$	Ellenbecker et Leith (1981) Siefert et Löffler (1987) Aguir et Coury (1992) Koch et al. (1996)	
Nombre de cycles de filtration N_c			
$N_c \nearrow$	$a_{max} \nearrow$	Allen et al. (1999)	Régime stabilisé au bout de 25 cycles, caractérisé par des accélérations centripètes de 50 g et des accélérations centrifuges de 150 g. Hypothèse avancée : augmentation progressive du colmatage interne et de surface

Tableau I.4 : Synthèse des influences de certaines conditions opératoires sur le décolmatage des manches.

Il est difficile de savoir sur quel facteur une augmentation de la vitesse de filtration provoque le plus de modification. La moins bonne efficacité de décolmatage qui en résulte provient-elle d'une redéposition plus importante des particules décolmatées sur les manches, d'une capacité moindre de l'à-coup de pression à créer de grandes forces de détachement ou d'une augmentation des forces d'adhésion globales entre le gâteau et le medium ?

I.3.4.2. Influence des paramètres de décolmatage

Les influences de certains paramètres de décolmatage sont synthétisées dans le tableau I.5 :

Résultats et constats		Auteurs	Commentaires
Pression du réservoir d'air comprimé P_r			
$P_r \nearrow$	$\gamma \nearrow$ $\Delta P_{res} \searrow$	Dennis et Wilder (1975) Klingel et Löffler (1983) Sievert et Löffler (1986) De Ravin et al. (1988) Morris et al. (1991) Lu et Tsai (1998) Tsai et al. (2000) Hata et al. (2003)	Les capacités de décolmatage du gâteau sont améliorées lorsque $P_r \nearrow$ Existence d'une plage optimale pour $2 \leq P_r \leq 5$ bar (Klingel et Löffler (1983)) Existence d'une P_r minimale égale à 2,8 bar (Dennis et Wilder (1975))
Temps de décolmatage t_d			
$t_d \nearrow$	$\Delta P_{res} \nearrow$	Morris (1984)	/
$t_d \nearrow$	$\Delta P_{res} \rightarrow$ $a_{max} \rightarrow$	Schildermans et al. (2004)	
Diamètre de la buse d'injection d_b			
$d_b \nearrow$	$\Delta P_{res} \searrow$	Morris (1984) De Ravin et al. (1988) Lu et Tsai (1999)	Lorsque $d_b \nearrow$, u n volume d'air plus important est déversé dans la manche et conduit à des valeurs de surpressions plus élevées.

Tableau I.5 : Synthèse des influences de certains paramètres de décolmatage sur les performances de régénération des manches.

Sont listés par la suite quelques compléments d'informations au tableau I.5 :

Pression du réservoir d'air comprimé P_r

Lu et Tsai (1996) observent que des conditions optimales pour une combinaison 'diamètre de buse – pression du réservoir' peuvent être établies en fonction de la force critique de décolmatage du gâteau de filtration. Les deux paramètres diamètre de buse et pression initiale du réservoir d'air comprimé sont intrinsèquement liés.

Morris (1984) montre qu'une diminution de 10% de la pression du réservoir d'alimentation de l'air comprimé (de 7 à 6,4 bar) fait évoluer la perte de charge moyenne des filtres d'environ 500 Pa à environ 2000 Pa en seulement trois heures : le décolmatage n'arrive plus à gérer la montée de la perte de charge résiduelle du medium.

Choi et al. (2001) observent, d'une part, que la pression dans le réservoir d'air comprimé n'est pas maintenue constante au cours du décolmatage et que, d'autre part, la pression enregistrée au niveau de la buse d'injection est plus basse que dans le réservoir. Le premier constat provient d'un mauvais dimensionnement du volume du réservoir alors que le second constat provient du fait que la majorité de la pression de l'air comprimé se transforme en énergie cinétique lors de son passage à travers le réseau d'acheminement de l'air comprimé.

Diamètre et localisation de la buse d'injection

Lu et Tsai (1996, 1999) évoquent l'existence d'un diamètre optimal, dépendant des conditions opératoires imposées, au delà duquel les forces de décolmatage retombent et une partie de l'énergie mise en œuvre est dissipée inutilement. Choi et al. (2001) expliquent en effet que la quantité d'air secondaire entraînée par induction est susceptible de fortement chuter lorsque le diamètre de la buse est trop augmenté.

Dans le cas d'un décolmatage pour lequel la buse d'injection est introduite à l'intérieur de la manche, la surpression enregistrée est moins conséquente que lorsque la buse est externe (Rothwell (1986)). De plus, lorsque le système d'injection n'est pas intrusif et qu'il est placé

au dessus de l'ouverture de la manche, la surpression est d'autant plus grande que la buse est éloignée de l'entrée de la manche. L'action de l'air comprimé semble alors plus efficace : le gonflement de la manche est plus brutal et la surface de filtration sollicitée par l'action de l'air comprimé de décolmatage est plus importante. Humphries et Madden (1981), Schildermans et al. (2004) observent que si la buse est trop rapprochée de l'ouverture supérieure de l'élément filtrant, le jet primaire d'air comprimé sera encore en phase d'expansion quand il passera en partie haute et il provoquera un entraînement d'air empoussiéré en provenance de l'amont.

Perry et Green (1984) proposent une relation pour déterminer la distance optimale, h , de placement d'une buse d'injection par rapport à l'ouverture de l'élément filtrant :

$$h = \frac{(D - d_b)}{2 \cdot \text{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (\text{I.18})$$

avec D le diamètre de la manche
 d_b le diamètre de la buse

α = angle du jet d'air comprimé ($\approx 20^\circ$ pour $\frac{h}{d_b} \leq 100$).

I.3.4.3. Influence des propriétés de la manche filtrante

Flexibilité du medium filtrant

Sievert et Löffler (1987) ont étudié l'influence de la flexibilité d'un medium filtrant sur le mécanisme d'accélération et de décélération du medium. Les résultats montrent que la rupture des forces d'adhésion du gâteau est d'autant plus facile que le medium est flexible. Les forces d'inertie qui s'exercent sur le gâteau dépendent à la fois de sa masse et de l'accélération qu'il subit. Plus la masse et l'épaisseur de gâteau déposé sont importantes, meilleure est l'efficacité de décolmatage.

Comme le montre le modèle développé par Dennis et *al.* (1981) (équation I.13), plus la flexibilité du medium est grande et plus sa décélération lors du gonflement provoqué par l'à-coup de pression est rapide et donc meilleure est l'efficacité de décolmatage. Des difficultés de décolmatage peuvent ainsi se présenter lorsqu'un medium présente de moins bonnes aptitudes à la flexibilité (rigidité plus grande) et que sa valeur de décélération s'en trouve amoindrie. L'augmentation de la rigidité peut également provenir de la couche de particules déposées qui freine alors le mouvement du medium. La structure interne du medium et notamment l'enchevêtrement de fibres qui le constitue, représente également un paramètre à prendre en compte pour l'évaluation de sa flexibilité. Dennis et *al.* soulignent le fait qu'au delà de l'accélération du medium, les paramètres flexibilité et élasticité conditionnent aussi la propagation de l'onde de pression le long de la manche.

Traitement de surface du medium

Morris (1984) montre que les media filtrants bénéficiant d'un traitement de surface capable de minimiser les forces d'adhésion à l'interface avec le gâteau sont avantagés du point de vue de leur décolmatage. Ce résultat est en contradiction avec les conclusions apportées par Sievert et Löffler (1987), qui ne constatent qu'une influence mineure de la présence d'un traitement de surface.

Plus encore que les propriétés de l'un ou de l'autre, c'est la combinaison entre les propriétés du medium et celles des particules qui entrent en ligne de compte lors d'un décolmatage puisque la nature et/ou la structure de chacun des deux influent sur le décolmatage.

Environnement proche du medium

Morris (1984) montre que les mouvements du medium sont influencés par la proximité d'éléments extérieurs ou constitutifs de la manche (présence d'une cage support ou proximité de points de couture ou présence d'anneaux à distance régulière). Ainsi, le medium possède plus de liberté de mouvement lorsqu'il est placé au milieu de deux éléments porteurs d'une cage support, plutôt que s'il est placé directement de vis à vis avec une tige. Les accélérations du medium sont donc d'autant plus importantes que la zone considérée est éloignée d'un quelconque élément qui entraverait le mouvement du medium.

I.3.4.4. Forces d'adhésion et de cohésion des particules du gâteau de filtration

Les particules collectées en surface sont retenues par des forces d'adhésion globales qui agissent à l'interface surface / particule. Les propriétés des corps en interaction fournissent des renseignements utiles pour l'adhésion de particules isolées sur les fibres constitutives du medium mais ne suffisent pas pour caractériser les forces d'adhésion globales d'un gâteau de particules sur un medium fibreux. Il est plus judicieux dans le cas de la filtration sur medium de s'intéresser à la surface de contact entre le gâteau de particules et le filtre support. Cette dernière étant beaucoup plus importante et complexe que dans le cas d'une particule isolée, une approche plus globale doit d'être menée pour la détermination des forces d'adhésion. D'autre part, les forces de cohésion entre particules jouent également un rôle dans l'adhésion du gâteau de filtration et influenceront son détachement lors du décolmatage. Enfin, la détermination des forces d'adhésion globale est d'autant plus difficile que ces dernières ne dépendent pas uniquement des propriétés du medium et de l'aérosol colmatant mais également de la manière par laquelle le gâteau s'est construit. La détermination des forces d'adhésion est un sujet difficile, composé de connaissances qui restent, pour le moment, fragmentaires. Néanmoins, l'importance de ce sujet reste primordiale dans la prise en compte du décolmatage d'un medium filtrant.

Le lecteur particulièrement intéressé par ce sujet peut consulter dans un premier temps l'annexe II, puis éventuellement le document de synthèse (Simon (2003)) beaucoup plus complet sur les forces d'adhésion, rédigé pendant cette thèse en vue d'instruire des travaux futurs pour le laboratoire. Seules les données utiles à l'étude apparaissent dans ce document.

L'étude des forces d'adhésion des couches de particules conduit aux conclusions suivantes :

- L'augmentation de la taille des particules constituant le gâteau entraîne une diminution de ses forces d'adhésion sur la surface fibreuse.
- L'augmentation de l'humidité relative fait considérablement croître les forces d'adhésion, principalement pour $RH > 60\%$.
- L'augmentation de la masse (ou de l'épaisseur) de gâteau déposé en surface du medium conduit à une diminution des forces d'adhésion et à un détachement d'une plus grande surface. Ce constat semble néanmoins dépendre de la technologie de décolmatage (Leith et Allen (1986), Koch et al. (1996)) et du type de traitement de surface (Xu et al. (1993)).
- L'augmentation de la compacité de la couche de particules entraîne une plus grande force d'adhésion vis à vis de la surface fibreuse. En conséquence, l'augmentation de la vitesse de filtration provoque également une augmentation des forces d'adhésion puisqu'elle conduit à un gâteau plus dense, le rapport d'accroissement étant linéaire pour $U_f < 10 \text{ cm.s}^{-1}$ (Silva et al. (1999)). Ce résultat est néanmoins discutable puisque Xu et al. (1993) n'observent aucune influence de l'augmentation de U_f (l'effet d'augmentation de la taille des particules compenserait l'effet d'augmentation de la vitesse de filtration).

- La présence d'un traitement de surface réduit les valeurs de force d'adhésion par rapport à un medium non traité (Muller et al. (1987), Xu et al. (1993)). D'autre part, la présence d'une surface lisse entraînera la constitution d'une couche de particules plus homogène que dans le cas d'une surface rugueuse. A l'inverse, De Ravin et al. (1988) observent que la nature du traitement de surface ne possède pas toujours une influence avérée sur les forces d'adhésion entre le gâteau et le medium ; selon eux, c'est le type de poussière constitutive du gâteau qui est à prendre en compte.
- La séparation d'un agglomérat de particules d'un medium filtrant semble s'effectuer principalement par la rupture de liaisons particules-particules. En effet, une fine couche uniforme de particules résiduelles est souvent observée à la surface des filtres décolmatés, démontrant ainsi la nature inter-particulaire du décrochement du gâteau. Une ambiguïté existe donc entre les résultats de certains auteurs qui prônent la prédominance des forces de cohésion et les observations expérimentales qui montrent que la liaison 'particules-fibres' semble plus forte que la liaison particules-particules. Bien que la séparation se fasse à l'interface medium-gâteau, il n'y aurait donc pas rupture 'surface fibreuse – gâteau' mais plutôt une rupture du type 'fine couche de particules indécolposables – restant du gâteau'.

Le décollement d'une couche de particules ne dépend pas uniquement des propriétés de la surface fibreuse, mais également du mode de constitution de ce gâteau de particules. En plus des forces d'adhésion entre les particules collectées à la surface du medium et les fibres du medium, les forces de cohésion au sein du gâteau lui-même influencent le décollement d'une couche de particules. Ainsi, l'adhésion d'une couche de particules à un medium dépend donc fortement de sa structure, c'est-à-dire des paramètres de filtration (vitesse et temps de filtration, humidité, concentration de l'air en particules, pression) et de la nature des particules (diamètre) et du medium filtrant (flexibilité, état de surface, nature et dureté des fibres).

1.3.4.5. Conclusions

Les différents paramètres influençant l'efficacité de décolmatage et qui viennent d'être évoqués ne sont pas exhaustifs ; ce sont ceux qui sont les plus étudiés. Cependant, d'autres paramètres interviennent : le type de poussières et ses propriétés, la géométrie de la manche, le volume d'air injecté, le taux de variation de la perte de charge, la taille des agglomérats qui sont décrochés lors du décolmatage et leur vitesse d'éjection, l'espacement entre les manches ou encore la distribution des tailles de pores du medium.

Les mécanismes physiques qui conduisent au détachement du gâteau de filtration dépendent d'un grand nombre de paramètres. Bien que des travaux aient déjà été effectués concernant ce sujet, le lecteur est bien souvent confronté à des difficultés de compréhension, dès lors qu'il tente d'intégrer l'ensemble des contributions. Deux remarques majeures peuvent être formulées. Premièrement, les résultats proviennent quasi-exclusivement d'installations pilotes comportant peu de manches (souvent une seule), par conséquent éloignées du fonctionnement réel d'un dépoussiéreur industriel. L'influence du nombre de manches décolmatées et les éventuelles interactions qui peuvent se produire dans un dépoussiéreur comportant un grand nombre d'éléments filtrants n'ont jamais été étudiées. En second lieu, l'ensemble des paramètres importants qui influencent l'à-coup de pression n'a jamais été étudié sur une seule et même installation et/ou avec des conditions de filtration et de décolmatage identiques. La comparaison de certains résultats bibliographiques contradictoires et la détermination de l'influence des paramètres restent donc délicates.

I.4. PROBLEMES CLASSIQUES RENCONTRES SUR LES DEPOUSSIERS A DECOLMATAGE PNEUMATIQUE

Le décolmatage est la source principale de problèmes sur les dépoussiériers à manches. Il peut notamment entraîner des inhomogénéités locales de la vitesse de filtration sur la surface d'une manche (décolmatage par plaques), une progression du colmatage interne d'un medium, un vieillissement et une usure prématurés de la structure fibreuse, ou une forte augmentation de la concentration en particules à l'aval des manches. D'autres problèmes, tels qu'une compression du gâteau, une augmentation progressive de la perte de charge résiduelle ou encore l'apparition de disparités dans les résistances à l'écoulement entre les manches, peuvent également être constatés et nuire au bon fonctionnement d'un dépoussiérier.

I.4.1. Décolmatage par plaques

Lors d'un décolmatage pneumatique, les zones de gâteau présentant les plus faibles forces d'adhésion sont préférentiellement décolmatées et il peut se produire, dans certains cas, un décolmatage par plaques. Ce phénomène, qui reste un cas particulier, est la résultante directe de l'inhomogénéité des forces d'adhésion au niveau de l'interface entre le dépôt de particules et le medium (Dennis et Klemm (1980)). Les surfaces des fragments de gâteau détachés sont d'autant plus grandes que les forces de cohésion au sein de la couche de particules sont grandes. Ainsi, la nature de la couche de poussières formée à la surface des manches joue un rôle déterminant dans le comportement du filtre. Les poussières agglomérantes forment généralement des couches de poussières poreuses qui se détachent sous forme de plaques qui décantent dans les trémies. Par contre, les poussières non agglomérantes se détachent sous forme de particules élémentaires qui sont en partie dispersées par l'air à contre-courant pour finalement se fixer à nouveau sur les éléments filtrants en activité (cf. paragraphe I.4.7).

Lors d'un décolmatage par plaques, Xu et *al.* (1992) observent que des trous, crevasses et autres fissures présents au sein du gâteau favorisent le craquelage et le détachement par plaques. Ces défauts dans le dépôt de particules jouent, selon eux, le rôle d'initiateur dans le mécanisme de fissuration du gâteau. Des fractures apparaissent et/ou se propagent au sein du gâteau sous l'effet des forces de détachement et viennent rompre les forces de cohésion entre particules, déjà fragilisées à certains endroits précis.

Pour Koch (1993), ce sont les différences de propriétés entre un medium et une couche de particules qui sont impliquées dans le décolmatage par plaques, bien plus que ne peuvent l'être les propriétés particulières de l'une ou de l'autre. De ces différences de structure (notamment porosité) naissent des points de plus faible compacité dans le gâteau, à partir desquels peuvent se propager des fissures lors d'application de forces extérieures.

Lehnert-Batar et *al.* (1998) supposent que le détachement par plaques peut être interprété en terme de mécanismes de fractures élastiques au sein du gâteau et définissent un paramètre indicateur critique à partir de données accessibles juste avant le décolmatage. C'est un indicateur de la robustesse du gâteau qui pourrait conduire à une méthode de caractérisation des propriétés des poussières afin de prédire leurs comportements lors du détachement avec le medium. Comme Koch (1993) et d'autres auteurs, ils observent que le diamètre des plaques formées lors du décolmatage est proportionnel à la masse surfacique de gâteau déposé. L'augmentation de la taille des plaques en fonction de la masse surfacique de gâteau dépend de la nature, du diamètre moyen de la poudre considérée et de la vitesse de filtration. Une augmentation de la compacité du gâteau (par diminution de la taille des particules ou par augmentation de la vitesse de filtration) conduit à une augmentation de la taille des plaques de décolmatage.

Deux zones apparaissent après un décolmatage par plaques : celles qui sont décolmatées et celles qui ne le sont pas. Lorsque la filtration reprend, dans les premiers instants qui suivent le décolmatage, le flux d'air se divise entre ces deux zones, chacune possédant sa propre vitesse de filtration de telle sorte que la perte de charge soit la même dans les deux régions du medium. L'état décolmaté peut alors être représenté par le schéma suivant :

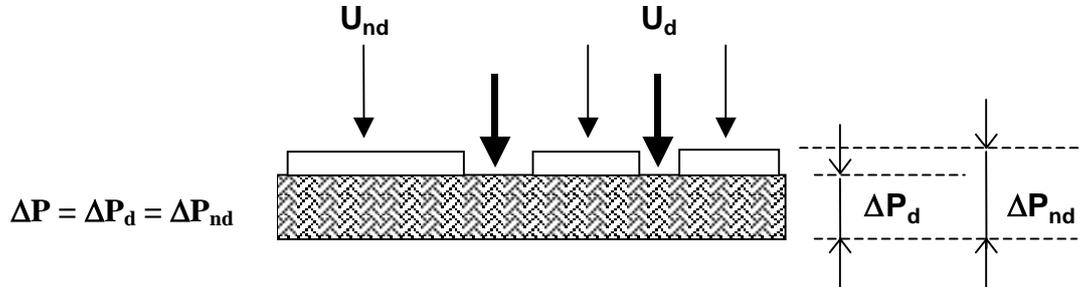


Figure I.4 : Schéma représentatif d'un décolmatage par plaques.

La résistance résiduelle de l'ensemble (filtre + particules résiduelles) peut être calculée de la manière suivante (Dennis et *al.* (1978), De Ravin et *al.* (1988)) :

$$\frac{1}{R_{res}} = \frac{\gamma}{R_d} + \frac{1-\gamma}{R_{nd}} \quad (I.19)$$

avec R_{res} la résistance à l'écoulement globale du filtre après décolmatage
 R_d et R_{nd} les résistances à l'écoulement dans les zones décolmatées et non décolmatées
 γ la fraction décolmatée (rapport de surfaces)

La mise en équation de cet équilibre aéraulique après décolmatage donne les résultats suivants (en considérant que le décolmatage est parfait dans les zones décolmatées et que le colmatage interne n'existe pas) (Callé (2000)) :

$$\Delta P_d = \mu \cdot R_f \cdot U_d \quad (I.33) \quad \Delta P_{nd} = \mu \cdot (R_f + K_2 \cdot W_g) U_{nd} \quad (I.20)$$

La répartition des flux pour une fraction décolmatée donnée s'exprime par :

$$U_f = \gamma \cdot U_d + (1 - \gamma) \cdot U_{nd} \quad (I.21)$$

La vitesse dans les zones décolmatées est donc fourni par la formule développée suivante :

$$U_d = U_f \cdot \frac{\mu \cdot Z \cdot \frac{16 \cdot \alpha_f^{\frac{3}{2}} \cdot (1 + 56 \cdot \alpha_f^3)}{r_f^2} + \mu \cdot K_{ck} \cdot \frac{\alpha_g}{(1 - \alpha_g)^3} \cdot \frac{a_g^2}{\rho_p \cdot Cu} \cdot W_g}{\mu \cdot Z \cdot \frac{16 \cdot \alpha_f^{\frac{3}{2}} \cdot (1 + 56 \cdot \alpha_f^3)}{r_f^2} + \gamma \cdot \mu \cdot K_{ck} \cdot \frac{\alpha_g}{(1 - \alpha_g)^3} \cdot \frac{a_g^2}{\rho_p \cdot Cu} \cdot W_g} \quad (I.22)$$

Les vitesses sont très élevées dans les zones décolmatées et elles le sont d'autant plus que la vitesse de filtration est grande. A noter que d'autres auteurs se sont penchés sur la modélisation du décolmatage par plaques (Ellenbecker et Leith (1979), Kavouras et Krammer (2002), Callé (2002)).

Après un décolmatage par plaques, l'évolution de la perte de charge lors du colmatage suivant peut être schématisée de la manière présentée sur la figure I.5.

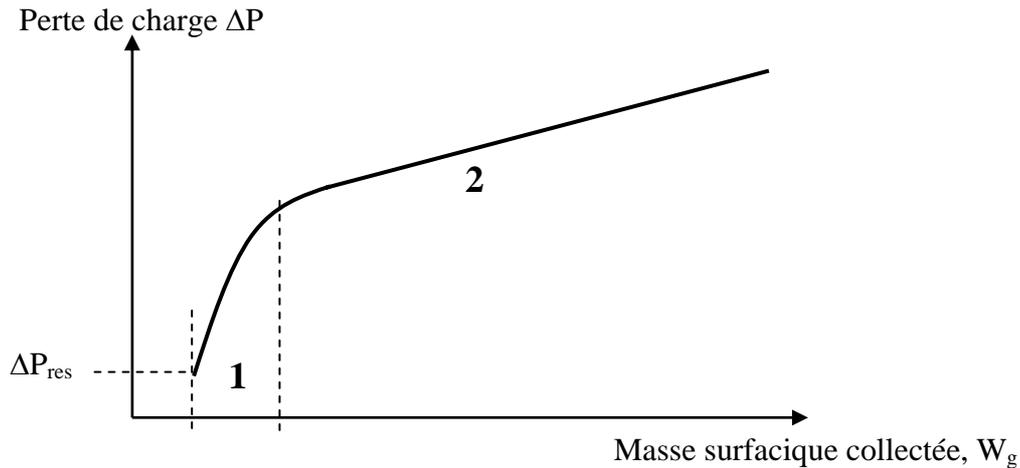


Figure I.5 : Evolution de la perte de charge après un décolmatage par plaques.
 Zone 1 : croissance rapide – Zone 2 : croissance du gâteau gouvernée par la résistance spécifique K_2

L'évolution de la perte de charge présente alors deux zones. La zone 1 correspond à une croissance très rapide de ΔP durant la phase de reconstruction du gâteau sur l'état décolmaté par plaques. En effet, la vitesse de construction du gâteau dans les zones de plus faibles résistances aérauliques est d'autant plus rapide que la vitesse de filtration, U_d , dans ces zones décolmatées est grande. Cependant, la vitesse U_d décroît au fur et à mesure de la formation de ce nouveau gâteau et la pente de la courbe $\Delta P = f(W_g)$ diminue progressivement et explique l'évolution concave de la perte de charge observée sur la figure I.5. La zone 1 est donc caractérisée par une valeur de résistance spécifique évolutive du gâteau, qui diminue avec le colmatage en partant d'une valeur initiale élevée jusqu'à retomber à la valeur de résistance spécifique du gâteau de particules pour la vitesse de filtration U_f considérée. Dès que la couche de particules en surface redevient homogène, la croissance de la perte de charge suit de nouveau une évolution linéaire caractéristique du colmatage en surface classique (zone 2).

Un tel comportement est fréquemment observé pour des media présentant un décolmatage par plaques (Dennis et al. (1978), Duo et al. (1997), Dittler et al. (1998), Callé (2000), Ju et al. (2001), Kavouras et Krammer (2002)). Il est gênant car il conduit à des inhomogénéités dans la répartition de la vitesse de filtration et à une diminution de la durée des cycles de filtration.

I.4.2. Compression du gâteau de particules

Un décolmatage par plaques ou une compressibilité du gâteau sont problématiques car elles provoquent toutes deux une augmentation plus rapide de la perte de charge. L'augmentation de perte de charge pendant la phase de filtration est une donnée importante car elle conditionne la fréquence de décolmatage et détermine donc la durée de vie des éléments filtrants (Jeon et Jung (2004)). Plus la fréquence de décolmatage augmente, plus les coûts de remplacement des manches défectueuses augmentent car la probabilité de dommages liés aux chocs pneumatiques sur les manches et à leur vieillissement prématuré grandit.

Kavouras et Krammer (2003) précisent que certaines imperfections caractérisant le fonctionnement des dépoussiéreurs à manches peuvent être décelées en observant la forme de la courbe de montée en perte de charge en fonction du temps. Selon eux, une courbe de perte de charge convexe est caractéristique d'une compression du gâteau de particules.

Aguiar et Coury (1996) montrent que la compacité d'un gâteau, formé à vitesse de filtration constante, augmente en se rapprochant de la surface du medium. Ce profil de compacité en fonction de la profondeur dans le gâteau suggère une compression du gâteau. Ils précisent aussi qu'une compression du gâteau à vitesse de filtration constante est identifiée par une courbe de perte de charge convexe.

Schmidt (1995) observe également que la montée en perte de charge n'est généralement pas linéaire mais est caractérisée par des augmentations soudaines. Ces sauts dans la perte de charge exigent une plus grande fréquence de nettoyage qui est dans la plupart des cas désavantageuse pour les performances du filtre (relargage, vieillissement prématuré ...). Des compressions locales du gâteau de poussières pourraient être responsables de l'augmentation progressive de la perte de charge au cours du temps.

De nombreux auteurs (Schmidt (1993, 1995, 1997), Höflinger et al. (1994), Aguiar et Coury (1996), Palica (1996), Duo et al. (1997) Endo et al. (1998), Höflinger (1998), Pénicot (1998), Callé (2000), Ju et al. (2001), Kavouras et Krammer (2002, 2003), Choi et al. (2004), Jeon et Jung (2004)) observent que les propriétés du gâteau de particules varient au cours du colmatage. Cette modification de la structure du gâteau résulte d'un réarrangement des particules et d'une compression de la couche de particules au cours du colmatage. La compression du gâteau découle des forces de pression (perte de charge) qui sont imposées à cet agglomérat de particules par le flux d'air qui le traverse. La compressibilité du gâteau de filtration est décrite de manière plus approfondie dans l'annexe III.

L'étude de la compressibilité des gâteaux de filtration n'est pas seulement utile pour le calcul de la résistance à l'écoulement de l'air ; elle permet également de déterminer la structure de la couche de particules en surface du medium avant son décolmatage. La compression du gâteau affecte le décolmatage du medium principalement de deux manières :

- la force de séparation requise pour déloger la couche de particules de la surface du medium filtrant est modifiée car les forces de cohésion entre particules sont plus élevées (Ellenbecker et Leith (1981)) ;
- la fréquence de décolmatage augmente car l'augmentation de ΔP est plus rapide.

I.4.3. Augmentation progressive de la perte de charge résiduelle

Dès que la perte de charge résiduelle atteint une valeur limite trop élevée, le procédé n'est plus économiquement rentable du fait de la forte perte de charge du système et des temps de cycles qui deviennent trop courts : le medium doit alors être remplacé.

La perte de charge résiduelle, ΔP_{res} , augmente au cours des cycles de colmatage et de décolmatage. Deux raisons peuvent être invoquées : d'une part, du fait du colmatage interne évolutif et irréversible du medium et d'autre part, du fait de la formation d'une couche résiduelle de particules, qui adhère à la surface de manière définitive malgré les tentatives de décolmatages successifs. En général, cette mince couche piégée à la surface du medium est constituée de particules possédant une distribution granulométrique et/ou une compacité différente du reste du gâteau de filtration. La montée progressive de la perte de charge résiduelle peut majoritairement s'expliquer par une incapacité du système de décolmatage à décrocher correctement la totalité du gâteau ou par un vieillissement du medium. Morris (1984) estime par exemple qu'un jeu de manches acquiert environ 45% de masse supplémentaire en douze heures de fonctionnement, par rapport à son grammage initial à l'état neuf, ce qui témoigne de l'augmentation du colmatage interne.

Stöcklmayer et Höflinger (1998) offrent une interprétation originale pour expliquer l'augmentation de la perte de charge résiduelle au cours du temps. Selon eux, la compressibilité d'un gâteau de particules interne au medium filtrant est déterminante pour la valeur de perte de charge résiduelle après de nombreux cycles de colmatage et décolmatage.

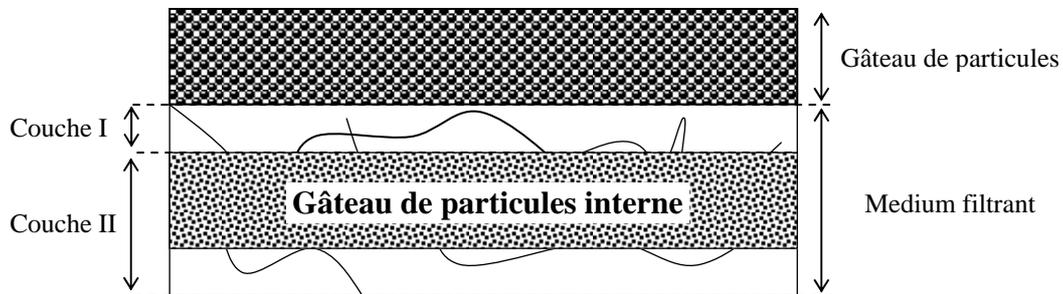


Figure I.6 : Représentation schématique de la couche filtrante selon Stöcklmayer et Höflinger (1998).

La figure I.6 illustre le mécanisme général de l'augmentation de la perte de charge résiduelle. Le medium filtrant est schématiquement divisé en deux couches. La couche I représente la zone du medium pour laquelle les particules piégées peuvent être détachées par l'à-coup de pression de décolmatage. La couche II représente la zone dans laquelle les particules ne peuvent plus être détachées et sont définitivement piégées au sein de la structure fibreuse interne du medium. Ce sont ces dernières particules qui seraient responsables de l'augmentation de la perte de charge résiduelle.

Juste après un décolmatage, la couche I est vide et de nouvelles particules peuvent pénétrer dans la couche II, où elles sont capturées en partie haute de cette zone et forment un « gâteau de particules interne ». La perte de charge résiduelle dépend majoritairement de la compression de cette couche de particules interne au medium. Ainsi, si le gâteau interne est proche de l'incompressibilité, les particules piégées dans la couche I ne pourront pas évoluer au sein du medium et seront éjectées au décolmatage suivant : l'augmentation de la perte de charge résiduelle sera lente (figure I.7a). Par contre, si le gâteau interne est compressible, il va continuer de grossir au sein du medium et la perte de charge résiduelle augmentera fortement avec les cycles (figure I.7b). Tout ceci dépend largement de la taille et de la nature des particules filtrées.

Carr et Smith (1984) constatent que la perte de charge résiduelle augmente au fur et à mesure que la quantité de particules résiduelles augmente et ne se stabilise probablement pas complètement avant une année de fonctionnement après sa mise en service.

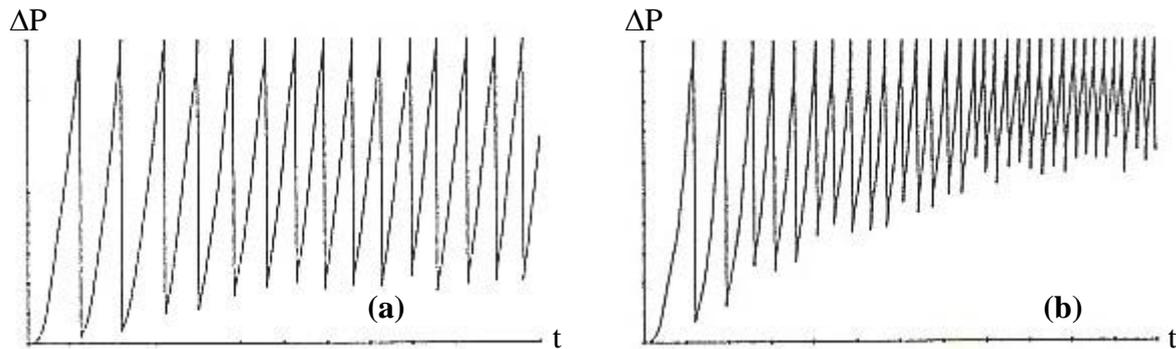


Figure I.7 : Evolution de la perte de charge au cours des cycles de colmatage et de décolmatage
(a) : Augmentation lente de ΔP_{res} – (b) : Augmentation rapide de ΔP_{res}

I.4.4. Inhomogénéité dans la répartition des débits sur l'ensemble des éléments filtrants

Une inhomogénéité dans la répartition des débits sur les manches d'un dépoussiéreur peut entraîner des vitesses de filtration différentes suivant les manches ; les conséquences sur la formation du gâteau lors du colmatage, sur son décolmatage et sur la concentration en particules à l'aval sont encore mal comprises.

Ellenbecker et Leith (1979) montrent que l'homogénéité dans la répartition de la masse surfacique collectée sur les différentes manches d'un dépoussiéreur n'est pas toujours assurée. Les masses surfaciques résiduelles moyennes déposées dans un dépoussiéreur comportant 3 manches sont récapitulées dans le tableau I.6. Le tableau illustre les variations dans les mesures de dépôt de particules sur la manche la plus proche de l'entrée d'air empoussiéré (A), sur la manche intermédiaire (B) et sur la manche la plus éloignée de l'entrée (C).

La manche la plus proche de l'entrée de poussières (A) possède la plus grande masse surfacique moyenne alors que la manche la plus éloignée (C) possède la plus faible. Cette différence était statistiquement significative, mais relativement peu importante quantitativement : la manche A possède 8 % de plus de masse de poussières par rapport à la manche C, sur l'ensemble de 15 expériences moyennées. Ce comportement est d'autant plus surprenant que l'air empoussiéré aura tendance à passer préférentiellement à travers les manches les moins colmatées (résistances aérauliques plus faibles) et donc à gommer les différences de masses déposées.

Expériences	Manche considérée			Moyenne
	A	B	C	
Avant décolmatage $U_f < 15 \text{ cm.s}^{-1}$	648	613	580	614
Après décolmatage $U_f > 15 \text{ cm.s}^{-1}$	435	438	402	425
Avant décolmatage $U_f = 15 \text{ cm.s}^{-1}$	821	747	717	762
Après décolmatage $U_f = 15 \text{ cm.s}^{-1}$	826	800	795	807

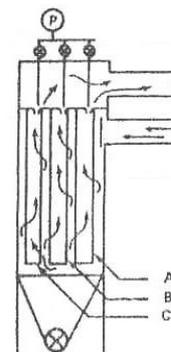


Tableau I.6 : Masses surfaciques résiduelles moyennes déposées pour chaque position de manches dans le dépoussiéreur (Ellenbecker et Leith (1979)).

Le tableau I.6 montre également que les différences pour les masses surfaciques moyenne d'une manche à une autre sont plus importantes avant décolmatage qu'après. Cela indique que les différences observées dans les résistances aérauliques des masses déposées augmenteraient

avec le temps de colmatage des manches, au fur et à mesure que les plus grosses particules sont captées par la manche la plus proche de l'entrée d'air empoussiéré.

Kanaoka et Amornkitbamrung (2001) observent que dès lors que le filtre n'est pas soumis à un colmatage homogène sur l'ensemble de sa surface, les vitesses de filtration deviennent localement différentes. Les inhomogénéités peuvent se produire entre deux zones d'une même manche (décolmatage par plaques), entre deux manches distinctes ou entre plusieurs groupes de manches. Or la vitesse de filtration pendant la formation d'une couche de particules peut influencer la résistance du gâteau. Alors qu'une augmentation de la résistance du medium filtrant et du gâteau de particules résultent en une distribution plus uniforme du gâteau, des décolmatages déficients provoquent une distribution inhomogène du gâteau dont les irrégularités se creusent de plus avec le temps.

Théodore et al. (1975) décrivent le fonctionnement d'un dépoussiéreur comportant plusieurs rangées de manches décolmatées les unes après les autres par injection d'air comprimé à contre-courant (séquence de décolmatage pneumatique classique). Ils modélisent également la répartition transitoire des débits dans les manches au fur et à mesure des décolmatages par groupe de manches et des résistances aérauliques qui en découlent. Bien que le débit volumique total soit maintenu constant par régulation, les débits individuels par rangée de manches sont fonction du temps. D'importantes différences de débit traité sont enregistrées dans les manches pendant la période transitoire du décolmatage.

I.4.5. Usure des éléments filtrants

L'usure des éléments filtrants constitue un problème financier du fait du coût de fonctionnement lors de l'exploitation du dépoussiéreur (remplacement des éléments filtrants) et un problème d'hygiène car la dégradation des éléments filtrants peut conduire à des baisses d'efficacité de filtration significative.

Pour des raisons de coût d'investissement et de concurrence, un grand nombre de constructeurs travaillent en effet avec des conditions opératoires trop proches du point limite d'utilisation des media. Une vitesse de filtration trop importante apporte, par exemple, un excès de perte de charge par colmatage interne du medium et provoque une détérioration prématurée des éléments filtrants. En revanche, si la surface de filtration est correctement dimensionnée et le décolmatage bien dimensionné, les séparateurs sur media fibreux s'avèrent dans le temps des appareils très fiables.

En moyenne, la durée de vie d'une manche est estimée à 5 ans. Les constructeurs garantissent généralement leurs manches pendant une période de 3 à 5 ans. Humphries et Madden (1981) estiment que la durée de vie d'un medium non-tissé peut atteindre 20000 heures de fonctionnement. Cependant, ils précisent que les unités de filtration qui utilisent les non-tissés à de fortes valeurs de vitesses de filtration fonctionnent correctement mais qu'elles possèdent des durées de vie plus courtes (environ 5000 heures de fonctionnement). De même, ils montrent que les manches de dépoussiéreurs à décolmatage pneumatique peuvent rapidement présenter des déchirures locales sous l'effet d'un vieillissement prématuré causé par les innombrables flexions du medium lors de sa régénération. Economiquement parlant, la durée de vie des media est un élément important car même si l'investissement concernant les manches ne représente que 5 % du coût total initial de l'installation, leur remplacement trop fréquent peut conduire à des coûts de maintenance excessifs.

Il est cependant impossible de prévoir avec exactitude la durée de vie d'un medium soumis à l'influence néfaste des variations de température et d'humidité, et des effets mécaniques

violents répétés lors du décolmatage. Quelles que soient les précautions prises, les manches doivent être périodiquement remplacées car l'usure par l'érosion due aux poussières ou par des décolmatages trop fréquents ou trop brutaux restent inévitables. Les frottements du medium contre sa cage support ou contre son point d'attache lors du décolmatage conduisent également à l'usure, voire même à des coupures de l'élément filtrant.

L'usure du medium filtrant dépend principalement de :

- la pression d'injection d'air comprimé et donc la puissance du décolmatage
- la granulométrie des poussières : les fines pénètrent définitivement au cœur des fibres et même le décolmatage ne permet pas de les déloger
- la fréquence du décolmatage
- la présence d'une cage support avec laquelle la manche peut rentrer en interaction
- la qualité du medium et du traitement de surface dont il a bénéficié

Humphries et Madden (1981) constatent d'autre part que dans le cas précis de l'étude d'un dépoussiéreur pour traiter les fumées issues d'une chaudière à charbon, la raison principale du vieillissement des manches provient de l'apparition de fissures longitudinales le long du medium fibreux. La fissure apparaît généralement dans les 50 premiers centimètres supérieurs de la manche. Le mouvement brutal initial du medium pendant le décolmatage crée un point d'inflexion qui formera le point de départ d'une fissure. Des observations microscopiques permettent d'observer que les fibres comportent à termes des fractures causées par l'action mécanique plutôt que par la chaleur de l'air ou une combustion.

Le medium se fragilise plus rapidement en haut de la manche du fait que les fibres subissent dans cette zone une fatigue prématurée (Humphries et Madden (1981), Lu et Tsai (1996)). Les contraintes mécaniques les plus violentes se concentrent à proximité de la buse d'injection d'air comprimé et occasionnent majoritairement des dégradations dans la partie supérieure du medium alors que le reste de la manche reste pratiquement intact et exempt de fissures.

I.4.6. Emission particulaire à l'aval des éléments filtrants

Le décolmatage s'accompagne certes d'une baisse de la perte de charge jusqu'à une valeur résiduelle mais également d'une chute brutale de l'efficacité de filtration du fait de la création d'une bouffée de particules émise à l'aval des éléments filtrants (Dennis et Wilder (1975), Strangert (1978), Leith et Ellenbecker (1983), Traub (2000)). Schmidt et Löffler (1990) stipulent que 60 à 90 % des émissions particulières mesurées à l'aval des dépoussiéreurs à manches proviennent de la contamination issue du décolmatage.

On comprend tout d'abord que la disparition, même partielle, du gâteau de filtration, entraîne une baisse considérable de l'efficacité de filtration après décolmatage. Le gâteau constitue en effet le principal collecteur de particules et les performances du système baissent lorsque le gâteau est détaché.

Leith et Ellenbecker (1980) et Leith et Allen (1986) supposent ensuite que les problèmes de baisse d'efficacité consécutifs au décolmatage proviennent d'une augmentation du nombre de particules à l'aval soit par pénétration par des micro-perforations, soit par migration.

Pour des media non-tissés, la présence de micro-perforations s'explique majoritairement par leur mode de confection, notamment l'étape d'aiguilletage. Holland et Rothwell (1977) (cités par Leith et Ellenbecker (1980)) ont également observé des micro-perforations à la surface de gâteaux de particules formés par filtration sur un medium non-tissé. Une approximation de la densité numérique des micro-perforations avait alors révélé la présence de 250 de ces défauts par m². Une seconde estimation, incluant les diamètres des micro-perforations, montrait

qu'environ 8 % du flux total filtré passerait par ces « chemins préférentiels », démontrant ainsi l'importance du problème. En effet, le flux passant par ces trous n'est pas correctement filtré par les fibres du medium et les particules qu'il transporte se retrouvent à l'aval du medium et participent à la création d'une bouffée de particules. Ce phénomène intervient principalement à l'état neuf ou après un décolmatage, lorsque le gâteau a été retiré.

Contrairement à la pénétration par micro-perforations, la migration se caractérise comme un processus au cours duquel les particules sont d'abord collectées au sein du medium, puis seulement par la suite passent à travers. Leur chemin dans le medium et dans le gâteau est tortueux et plus ou moins long selon les particules considérées. Dans un système de décolmatage pneumatique, la majeure partie de la migration intervient lorsque le medium filtrant se remet en place et vient se repositionner brutalement sur son support à la fin de son mouvement de flexion (Leith et Ellenbecker (1980)). En effet, les chocs brutaux associés à une modification de la structure interne du medium (élongations, contraintes multi-axiales) favorisent le déplacement des particules au sein de la couche fibreuse jusqu'au moment où elles seront définitivement piégées pour certaines ou relarguées pour d'autres.

Leith et First (1977), Leith et Ellenbecker (1980) observent que, pour un medium conditionné et fonctionnant en régime permanent, le phénomène de migration des particules est très majoritaire par rapport au passage directe de particules par pénétration. La présence perpétuelle d'une couche résiduelle externe et du fort colmatage interne rend en effet beaucoup moins probable le phénomène de pénétration.

Leith et Ellenbecker (1983) ont montré que la courbe du flux massique aval de particules en fonction du diamètre des particules présente un maximum pour des particules de tailles comprises entre 1 et 10 μm . Ce maximum dépend toutefois de la forme des particules, des caractéristiques du medium et des paramètres de filtration. En effet, les fines particules ($< 1 \mu\text{m}$) transitent plus facilement à travers le medium mais leur contribution au flux massique reste faible, du fait de leur masse individuelle négligeable. D'autre part, les grosses particules ($> 10 \mu\text{m}$) ont, certes, chacune une masse importante, mais peu d'entre elles traversent le medium. La répartition granulométrique en nombre de l'aérosol est profondément modifiée lorsque les mesures à l'amont et l'aval sont comparées (Dennis et Wilder (1975)). Les bouffées de particules à l'aval émises lors des décolmatages s'enrichissent en fines particules.

Les particules ont également une capacité beaucoup plus faible à traverser un medium filtrant traité en surface (présence d'une membrane PTFE par exemple) que non traité (Ellenbecker et Leith (1980), Leith et Ellenbecker (1983)).

Les influences de paramètres de la filtration et du décolmatage sur la concentration en particules mesurée à l'aval, $C_{p,aval}$, ont été synthétisées dans le tableau I.7 :

Résultats et constats		Auteurs	Commentaires
Concentration en particules à l'amont $C_{p,amont}$			
$C_{p,amont} \nearrow$	$C_{p,aval} \nearrow$	Dennis et Wilder (1975)	Phénomène accentué lors du décolmatage Tous les paramètres qui augmentent la puissance des forces de décolmatage sont susceptibles d'augmenter $C_{p,aval}$
Pression initiale du réservoir d'air comprimé P_r		Dennis et Wilder (1975)	
$P_r \nearrow$	$C_{p,aval} \nearrow$		
Diamètre de la buse d'injection d_b			
$d_b \nearrow$	$C_{p,aval} \nearrow$	Traub (2000)	
Vitesse de filtration U_f			
$U_f \nearrow$	$C_{p,aval} \nearrow$	Dennis et Wilder (1975) Hall (1977) Dennis et Klemm (1979) Traub (2000)	Le phénomène de migration des particules dans le medium est particulièrement incriminé dans ces études
Fréquence de décolmatage $1/T_c$			
$1/T_c \nearrow$	$C_{p,aval} \nearrow$	Dennis et Wilder (1975) Strangert (1978) Schmidt (1997)	Le medium est plus souvent à l'état décolmaté et les bouffées de particules consécutives aux décolmatage sont plus fréquentes.
Temps de décolmatage t_d			
$t_d \nearrow$	$C_{p,aval} \rightarrow$	Dennis et Wilder (1975)	/

Tableau I.7 : Synthèse des influences de certaines conditions opératoires sur les valeurs de concentration en particules relevées à l'aval ($C_{p,aval}$).

Sont listés à la suite quelques compléments d'informations concernant les valeurs de concentration en particules relevées à l'aval, $C_{p,aval}$:

Profil de $C_{p,aval}$ sur la hauteur d'une manche

Dennis et Wilder (1975) ont effectué un profil de concentration en particules à l'aval le long d'une manche, à différentes pressions de réservoir et pour différents media (figure I.8).

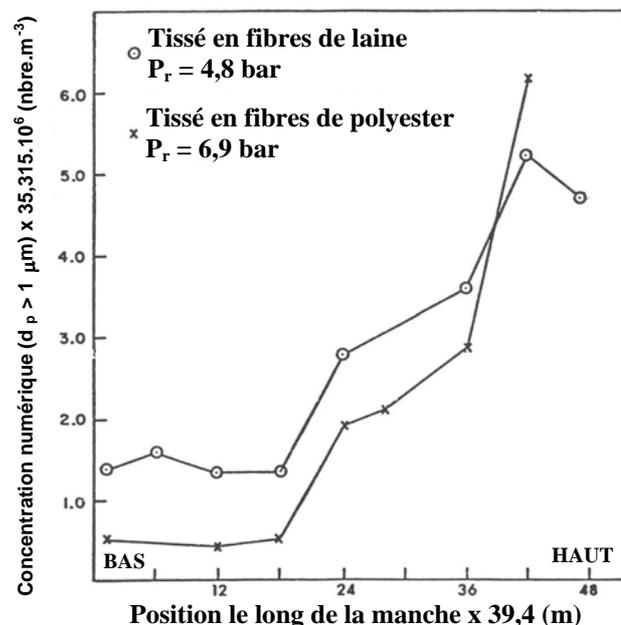


Figure I.8 : Profil de concentration à l'aval le long d'une manche filtrante (temps de cycle $T_c = 1$ min, $t_d = 60$ ms, cendres volantes) (Dennis et Wilder (1975)).

La plus grande augmentation de concentration à l'aval se situe entre le milieu et le haut de la manche, région dans laquelle le décolmatage semble être le plus intense. L'émission

particulaire à l'aval semble être d'autant plus importante que la quantité de gâteau détaché est grande. En effet, dans le bas de la manche, zone pour laquelle les auteurs constatent qu'il reste une bonne épaisseur de gâteau et donc que le décolmatage ne s'est pas correctement effectué, la concentration des pics de particules issues du décolmatage est environ 6 fois moins importante qu'en haut de manche. Les auteurs émettent l'hypothèse que la manche est soumise à de trop puissantes actions de décolmatages dans sa partie supérieure par rapport à sa partie inférieure, et qu'elles conduisent à l'émission de bouffées importantes à l'aval.

Stratégie de décolmatage

Hindy (1986) illustre la précédente remarque en comparant les différents modes de fonctionnement d'un dépoussiéreur à manches. Il est en effet possible de programmer le décolmatage selon deux méthodes : fixer une valeur de perte de charge maximale (ΔP_{\max}) ou fixer une durée de cycle de filtration (T_c) à atteindre avant de déclencher l'à-coup de pression. La concentration en particules à l'aval était la plus faible pour des décolmatages basés sur des pertes de charge maximales élevées. Ainsi, la concentration en particules à l'aval ($0,05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) était la plus faible pour $\Delta P_{\max} = 2500 \text{ Pa}$ (fréquence de décolmatage la plus faible), soit deux et cinq fois plus faible que pour les deux autres expériences à $\Delta t = 1 \text{ min}$ et à $\Delta P_{\max} = 1500 \text{ Pa}$. Enfin, cette expérience rejoint certaines observations de Dennis et Wilder (1975) qui stipulent que la masse surfacique de particules déposées détermine largement l'émission de particules à l'aval.

Modélisation

Certains auteurs (Leith et First (1975), Strangert (1978), Dennis et Klemm (1979), Leith et Ellenbecker (1980), Sherman et al. (1990)) ont tenté d'élaborer des modèles de prédiction de l'émission de particules à l'aval des dépoussiéreurs à décolmatage pneumatique. Cependant, les influences respectives de la plupart des paramètres constituant ces modèles sont particulièrement discutables et la méconnaissance de certains facteurs rend ces équations empiriques inutilisables. Bien que les informations fournies par ces modèles soient insuffisantes pour prédire la quantité de particules qui passe à travers un medium, ils suggèrent que la vitesse de filtration et la durée d'un cycle (perte de charge maximale atteinte) sont des paramètres décisifs.

Les causes listées ci-dessous expliquent elles seules une grande partie des problèmes liés à l'émission particulaire à l'aval des media filtrants :

- défauts d'étanchéité dans la carcasse ou aux interfaces medium - taule ;
- des trous ou fissures dans les éléments filtrants qui peuvent être causés par des défauts de fabrication ou par des dommages mécaniques ;
- le décrochage accidentel d'une ou plusieurs manches ;
- un décolmatage exagérément puissant.

I.4.7. Redéposition des poussières décolmatées

Le choc produit lors du décolmatage pneumatique et le passage de l'air à contre-courant provoquent le détachement d'agglomérats de particules de la surface filtrante du medium. Ces agglomérats tombent ensuite vers la trémie de récupération du dépoussiéreur et sont ainsi éliminés du système. Cependant, certaines poussières décolmatées, généralement les plus fines, peuvent également se redéposer sur la manche décolmatée ou sur les manches adjacentes avant d'avoir atteint la trémie. La redéposition est un phénomène inévitable lors du décolmatage par à-coup de pression qui dégrade les performances des éléments filtrants, en particulier sur le plan aérodynamique. En effet, le temps très court de décolmatage et le

fonctionnement on-line du dispositif ne permettent pas à toutes les particules d'atteindre la trémie. Cette redéposition n'a pas d'importance tant que ce pourcentage reste faible (< 20 %). Cependant, des observations ont montré que la proportion de particules décolmatées et immédiatement redéposées sur la manche décolmatée ou sur les manches voisines était considérable. La fraction de poussières décolmatées atteignant effectivement le fond de récupération du dépoussiéreur est très faible et ne présente que quelques pourcents de la totalité des particules décollées (Dennis et Wilder (1975), Ellenbecker et Leith (1979, 1981), Dennis et Klemm (1980)).

Ellenbecker et Leith (1978, 1979, 1981), Stöcklmayer et Höflinger (1998), Smith et *al.* (1998), Bach et Schmidt (2003) constatent la présence d'une large masse de poussières sur les manches après un décolmatage, principalement lorsque l'on travaille à de fortes valeurs de vitesse de filtration. Selon ces auteurs, deux mécanismes sont à l'origine de ce défaut de régénération des media : l'incapacité à vaincre les forces d'adhésion qui retiennent le gâteau de particules au medium et la redéposition d'une partie des poussières éjectées et mises en suspension lors de l'à-coup de pression. La redéposition des particules après un décolmatage pneumatique participe donc à la perte de charge résiduelle et au fait que la quantité totale de poussière sur une manche augmente d'un cycle de filtration au suivant, jusqu'à ce que des conditions d'équilibres soient atteintes.

Selon Ellenbecker et Leith (1981), la fraction de poussières qui atteint au final la trémie, γ_{total} , peut être représentée par le produit de deux mécanismes distincts :

$$\gamma_{total} = \gamma \cdot \kappa \quad (I.23)$$

avec γ la fraction de poussières décolmatées du medium par un à-coup de pression ;
 κ la fraction de poussières décolmatées qui tombe réellement dans la trémie.

L'air empoussiéré peut pénétrer dans le caisson de filtration soit par le bas (technologie dite « up-flow » - figure I.1b), soit par le haut (technologie dite « down-flow » - figure I.1c). Dans la technologie « up-flow », la décantation des poussières fines détachées des manches lors du décolmatage est freinée par l'air poussiéreux qui monte et les particules ont tendance à rester en suspension et pourront ainsi facilement être redéposées. Cependant, pour cette configuration, la décantation directe des poussières les plus lourdes dans la trémie à l'entrée du filtre est facilitée (Powell (1998)). Dans la technologie « down-flow », les poussières décolmatées sont par contre entraînées vers la trémie par l'air qui transite. Des essais ont démontré que les performances de la technologie « down-flow » sont supérieures, particulièrement en présence de poussières fines (Leith et al. (1978), Peukert et Wadenpohl (2001), Powell (1998)) (figure I.9).

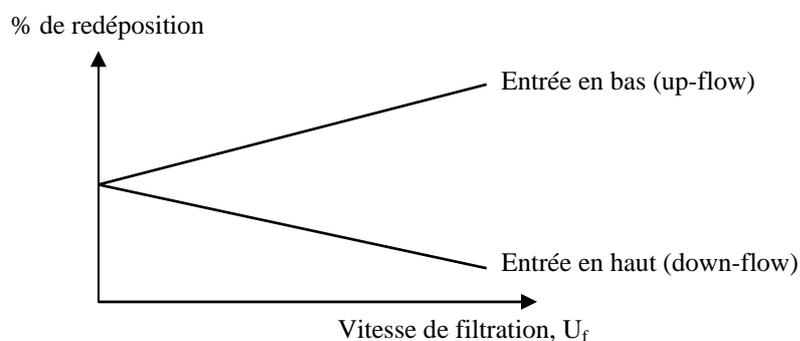


Figure I.9 : Comparaison de l'efficacité de filtres à entrée d'air à traiter en bas et en haut de caisson. Perry et Green (1997).

Grâce à des observations du nuage de poussières produit lors du décolmatage du gâteau, Dennis et Wilder (1975) constatent que des agglomérats (d'environ 100 μm de diamètre) sont éjectés de la surface du medium avec une vitesse initiale de 2 m.s^{-1} . Ils peuvent ainsi être éloignés d'environ 10 cm en air calme. Cette distance de projection est estimée égale à la distance séparant les manches de filtration.

A des vitesses de filtration comprises entre 2 et 8 cm.s^{-1} , la majorité des poussières se redéposent sur les manches adjacentes. A des vitesses de filtrations plus élevées, la redéposition augmente et le pourcentage de poussière atteignant la trémie devient faible. D'autre part, la manche d'origine du gâteau devient le site privilégié de redéposition du nuage de poussières. Cependant, les observations de Leith et *al.* (1977) sont issues d'un banc d'essais comportant seulement trois manches espacées de 12 cm entre elles, et doivent donc être associées à leur contexte. En effet, les dépoussiéreurs industriels contiennent un nombre beaucoup plus conséquent de manches et, pour des raisons d'encombrement, ces dernières sont beaucoup plus proches entre elles (jusqu'à seulement 5 cm de distance). Dans ce contexte, les phénomènes de redéposition sont certainement différents.

De plus, les performances d'un dépoussiéreur à décolmatage par à-coup de pression dépendent de beaucoup de paramètres qui influencent la redéposition et les conditions de filtration : les caractéristiques de la poussière, particulièrement sa granulométrie, type de medium et géométrie de la manche, humidité et température de l'air, longueur des manches et espacements. Les paramètres de décolmatage sont également importants, en particuliers la durée et l'intensité de l'à-coup de pression qui déterminent l'efficacité du décolmatage, qui elles même influe sur la distance à laquelle va être éjecté les agglomérats de gâteau décolmatés. Pour chaque type de géométrie de manches, il existe un espacement optimal entre les manches qui favorise une chute maximale des poussières vers la trémie lors du décolmatage. Pour l'instant, la connaissance n'est pas encore assez avancée pour déterminer si ces distances à recommander seraient en adéquation avec les priorités industrielles.

I.5. CONCLUSIONS

Le bon fonctionnement des dépoussiéreurs à manches, en terme de dépenses énergétiques (perte de charge) et de respect des normes de rejet (concentrations en particules à l'aval), dépend grandement de la qualité du décolmatage pneumatique. Cette étape essentielle de la filtration sur medium fibreux permet la régénération périodique des éléments filtrants et conditionne les valeurs et les évolutions de nombreux paramètres essentiels tels que la perte de charge résiduelle, la durée des cycles, l'efficacité de filtration ou encore l'usure des manches. Un décolmatage pneumatique inadapté entraîne une dégradation des performances du système, dont la plus pénalisante d'un point de vue hygiène et environnement est le non respect des valeurs limites réglementant les rejets particuliers.

L'étude bibliographique fait état d'un grand nombre de travaux sur le sujet. Les informations principales qui en découlent sont synthétisées dans le tableau I.8.

L'analyse de ces travaux conduit à plusieurs remarques et interrogations :

- Les descriptions des mécanismes du décolmatage pneumatique d'une manche sont parfois contradictoires, notamment concernant la participation et l'influence d'un flux d'air de décolmatage à contre-courant. Les travaux effectués concernent généralement des manches qui ont été testées dans des conditions non représentatives d'un dépoussiéreur à media filtrants industriel, notamment du point de vue du nombre d'éléments filtrants. De plus, les manches disposant d'une cage support métallique interne bénéficient de nombreux travaux mais il n'existe aucune information concernant le comportement de manches équipées d'anneaux de renfort, alors même que leur utilisation se généralise.

Certaines questions subsistent donc : Quelles sont les conséquences d'un décolmatage pneumatique sur le comportement d'une manche filtrante comportant des anneaux de renforts dans sa structure ? Les mécanismes de décolmatage, mis en évidence pour des manches avec cage et sur des bancs d'essais de petites tailles, sont-ils toujours identiques pour des manches avec anneaux dans un dépoussiéreur de taille semi-industrielle ? Certaines contradictions relevées dans la littérature peuvent elles être résolues en menant pour la première fois une étude de l'influence des paramètres sur un seul et unique dépoussiéreur à manches ?

- Les informations concernant la brutale augmentation de la concentration en particules à l'aval juste après un décolmatage pneumatique sont peu nombreuses. Si leur existence est désormais bien établie, peu d'études ont été entreprises pour mieux caractériser les mécanismes à l'origine de la formation de ces bouffées de particules. Leur participation à la dégradation de l'efficacité du système est évoquée mais n'a pas encore été quantifiée. Ce manque de connaissance freine les tentatives de diminution des rejets et les utilisateurs en sont souvent réduits à puiser dans leur expérience, si cette dernière existe, ou à procéder par tâtonnements. Des réponses à certaines questions primordiales doivent donc être apportées : Quelles sont les origines conduisant à la formation des bouffées de particules observées à l'aval des media filtrants ? Quelle part de responsabilité ces bouffées de particules possèdent-elles dans l'émission particulaire globale relevée à l'aval d'un dépoussiéreur à manches ? Doit-on se satisfaire des formances actuelles et possède-t-on les connaissances suffisantes pour envisager une amélioration du procédé ?
- La taille des bancs d'essais sur lesquels ont été établis les résultats de la majorité de ces travaux est rarement représentative du fonctionnement industriel des dépoussiéreurs à manches. La pertinence des résultats dans de telles conditions peut difficilement être évaluées. Faisant suite à ce constat, il apparaît qu'une question simple en apparence n'a pourtant jamais trouvé de réponse satisfaisante dans les précédents travaux : la filtration des particules s'effectue-t-elle de manière homogène sur l'ensemble des éléments filtrants d'un dépoussiéreur à manches ?

	Paramètre	Evolution du paramètre	Evolution de la grandeur considérée		
			a_{max}	ΔP_{res}	$C_{p,aval}$
Géométrie de la buse	d_b	↗	↘	↘	↗
Paramètres de décolmatage	P_r	↗	↗	↘	↗
	t_d	↗	→*	→*	→
Conditions opératoires de filtration	U_f	↗	↘	↗*	↗
	ΔP_{max}	↗	↘	↘*	↘
	$1/T_c$	↗	-	?	↗
Nombre de cycles	N_c	↗	↗	?	?
Medium filtrant	Flexibilité du medium	↗	↗	?	?
	Traitement de surface anti-colmatant	oui	?	↘*	?

* Certains travaux viennent cependant contredire ces tendances.

Tableau I.8 : Synthèse des influences de paramètres étudiés dans la littérature sur la décélération maximale du medium pendant le décolmatage (a_{max}), sur la perte de charge résiduelle (ΔP_{res}) et sur la concentration en particules à l'aval ($C_{p,aval}$)

Les travaux de recherche qui vont désormais être présentés possèdent pour objectifs de contribuer à une meilleure compréhension des conséquences d'un décolmatage pneumatique sur un dépoussiéreur à manches et de fournir des (éléments de) réponses aux questions qui viennent d'être soulevées.

CHAPITRE II
MATERIEL ET METHODES

II.1. PRESENTATION GENERALE DU DEPOUSSEUR PILOTE A MANCHES

Les essais se déroulent sur un dépoussiéreur à manches pilote de taille industrielle (figures II.1 et II.2). Il comporte 24 manches de filtration cylindriques, réparties sur 5 rails. Chaque manche a une longueur de 1,5 m et un diamètre de 0,13 m. Le dépoussiéreur présente ainsi une surface totale de filtration de $14,7 \text{ m}^2$ si les 24 manches sont présentes (capacité maximale de $300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$).

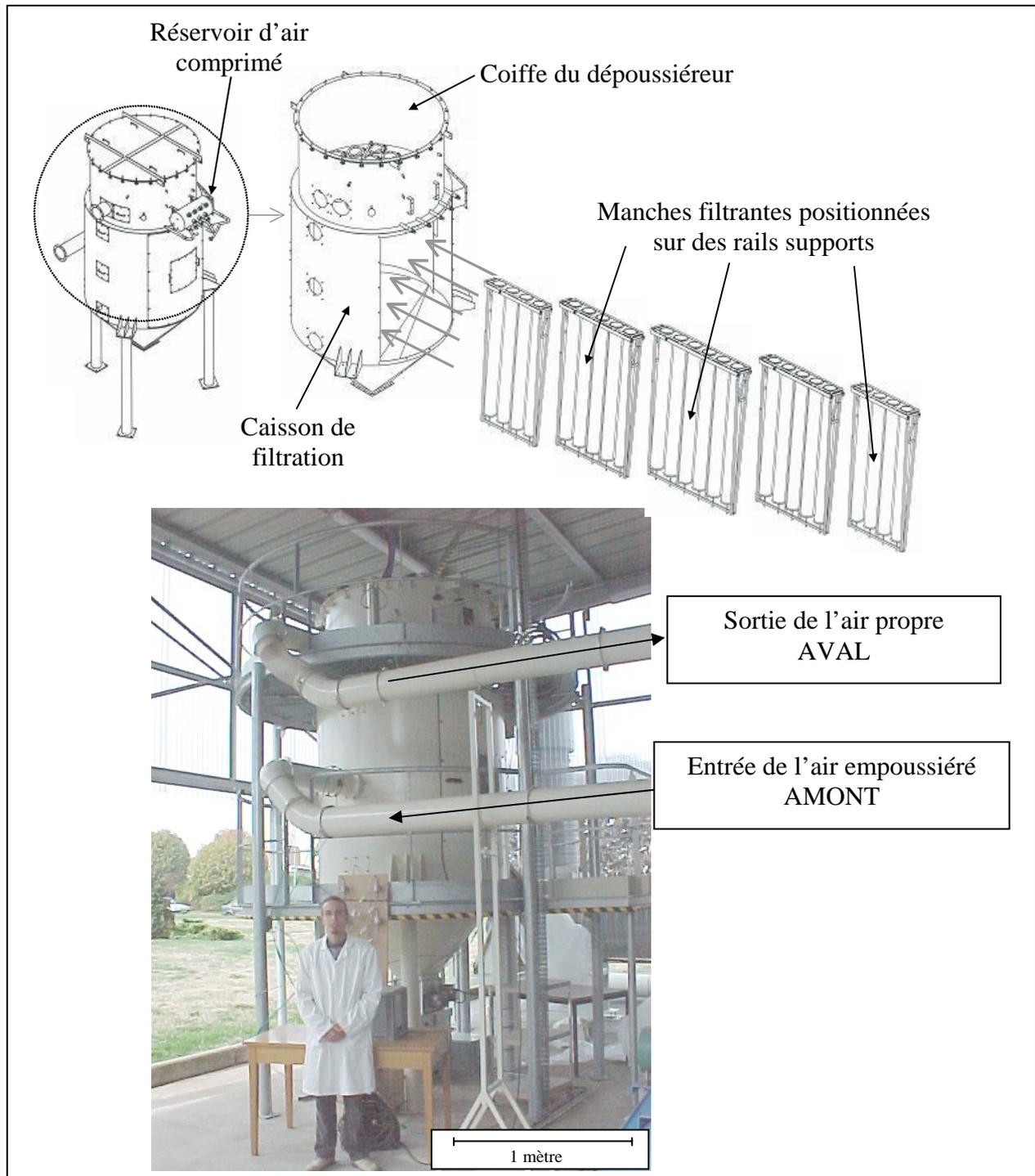


Figure II.1 : Schémas et photographie du dépoussiéreur pilote à manches.

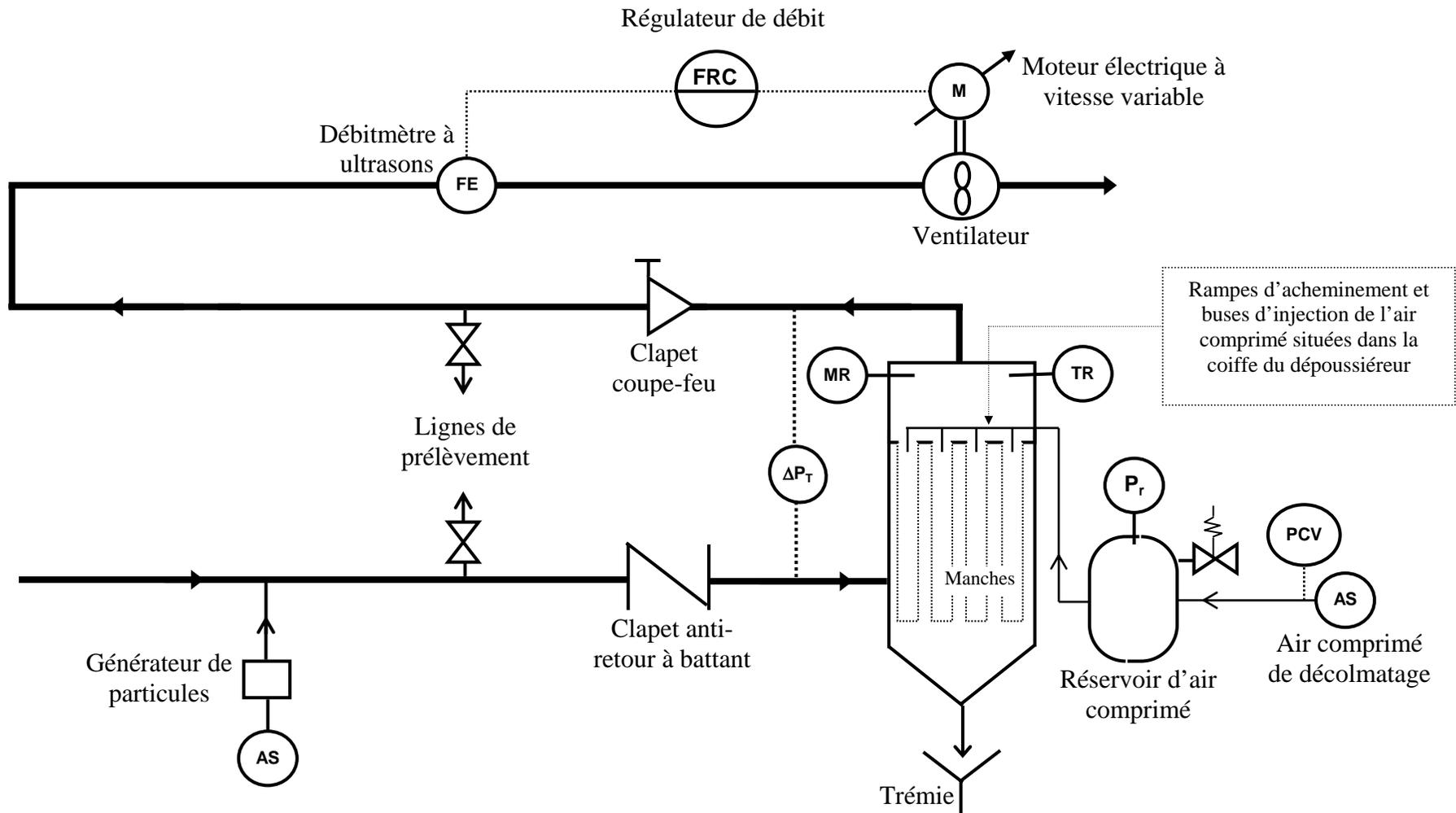


Figure II.2 : Schéma de l'installation du banc d'essais « dépoussiéreur pilote à manches ».

Le corps du dépoussiéreur est implanté à l'extérieur sous un abri qui permet de protéger le matériel et les opérateurs. L'accès aux parties supérieures (interventions sur les manches ou dans la coiffe) se fait à l'aide d'une plate-forme de circulation installée sur le pourtour du dépoussiéreur. Une structure similaire permet l'accès aux lignes de prélèvement sur les veines d'essais amont et aval à l'intérieur du bâtiment (figure II.3).



Figure II.3 : Photographie de la passerelle intérieure du banc d'essais.

Les manches filtrantes sont positionnées sur des rails supports qui se glissent puis se fixent dans le caisson de filtration. L'étanchéité des rails supports contre le plateau de séparation entre le caisson de filtration et la coiffe est assurée au moyen d'un joint caoutchouc comprimé. Les manches sont préalablement fixées sur le rail support d'une manière qui est décrite sur la figure II.4 :

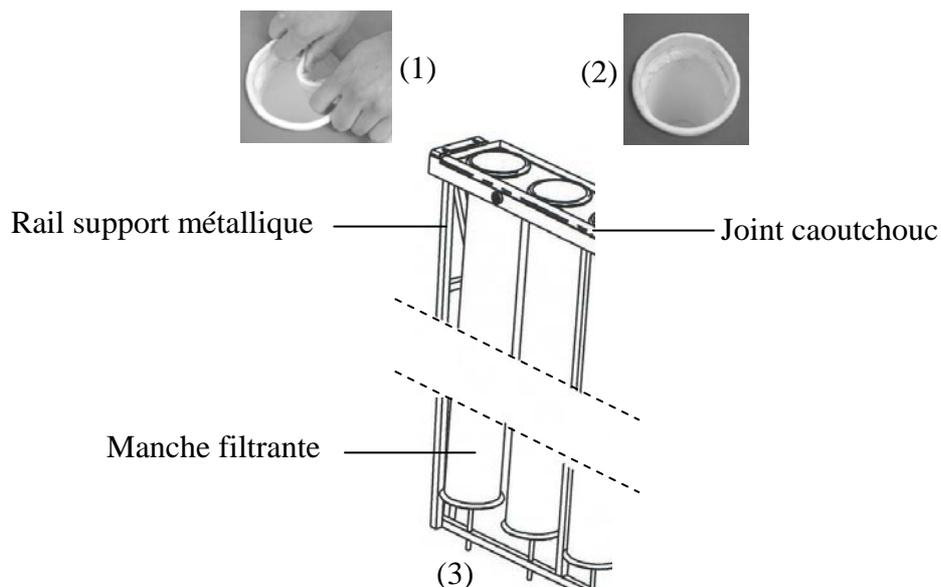


Figure II.4 : Installation des manches filtrantes

(1) et (2) Insérer la manche par le haut du rail et clipser le 'snap-ring' pour fixer le haut de la manche dans l'orifice prévu à cet effet, (3) Visser la coupelle métallique de fond de manche sur le rail.

Décolmatage

La régénération des manches s'effectue par décolmatage pneumatique. Les 24 manches possèdent chacune leur propre buse de décolmatage. Une description détaillée d'une manche et de son positionnement par rapport à son système de décolmatage est fournie sur la figure II.5.

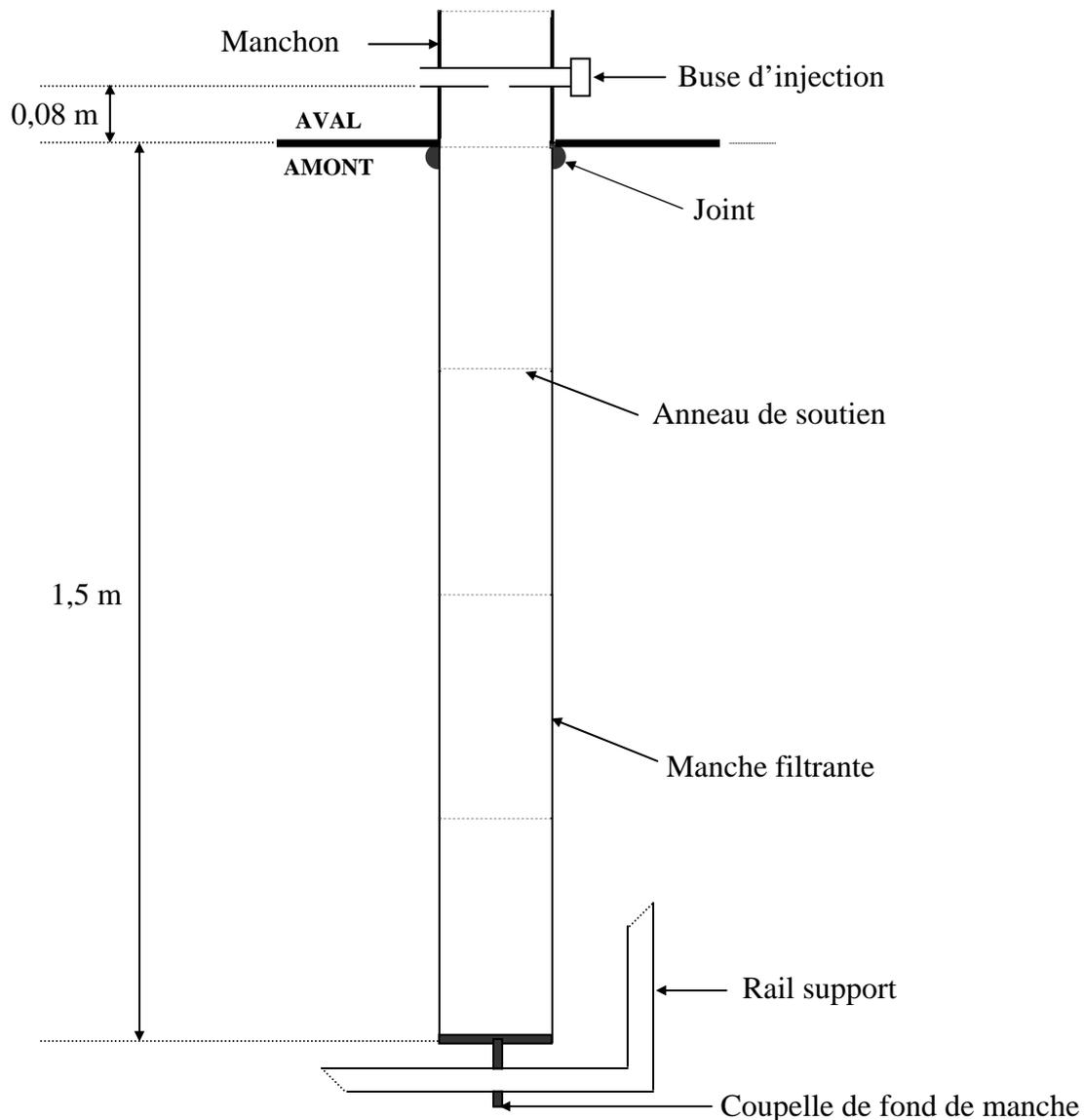


Figure II.5 : Schéma d'une manche filtrante et de la buse d'injection de l'air comprimé de décolmatage qui lui est associé.

Le diamètre de l'orifice de la buse d'injection standard est $d_b = 10$ mm. Il est placé de manière centrale à 0,08 m au-dessus de l'ouverture de la manche. Un manchon de diamètre 130 mm est situé en sortie de chaque manche et permet de fixer la buse d'injection. Cette dernière est entièrement démontable (embout fileté vissé) pour pouvoir être modifiée si nécessaire.

Il est à noter que la bonne tenue mécanique des manches sur l'ensemble de leur hauteur est assurée par cinq anneaux de soutien, partageant ainsi la manche en quatre zones distinctes. Les anneaux confèrent aux manches une certaine rigidité qui évite leur écrasement lors de la filtration.

Le réservoir d'air comprimé possède un volume de 54 litres et une soupape de sécurité tarée à 7 bar. La pression du réservoir d'air comprimé est modifiable entre $P_r = 1$ et 7 bar. Un capteur de pression statique (piezoresistive pressure transmitter type PA-23S/80549.55/ 0 – 10 bar), connecté au réservoir d'air comprimé, permet d'enregistrer les évolutions de P_r pendant les décolmatages. Cinq rampes d'alimentation en air comprimé circulent au dessus des manches et sont connectées aux 24 électrovannes de décolmatage (électrovannes 'power pulse' à membrane, Asco/Joucomatic). Le temps d'ouverture des électrovannes est réglable et la durée d'impulsion de l'à-coup de pression (t_d) peut varier entre 100 et 1000 ms. La programmation des séquences de décolmatage s'effectue à l'aide d'un automate. Il est possible de décolmater une ou plusieurs manche(s) isolée(s), un groupe quelconque de manches (entre $N = 1$ et $N = 24$) ou plusieurs groupes de manches (entre 1 et 24), successivement ou simultanément. Ceci permet une grande flexibilité dans les essais et constitue une des grandes originalités de ce banc d'essais.

Lors des cycles de filtration, la programmation des séquences de décolmatages est inspirée d'un fonctionnement industriel classique. Elle s'effectuera généralement de la manière suivante (sauf cas mentionné) :

- décolmatage rail par rail avec un intervalle de temps entre les rails égal à 10 s ;
- décolmatage en cascade des manches d'un même rail avec un intervalle de temps entre deux manches consécutives sur le rail égal à 0,1 s ;
- temps de décolmatage (durée d'impulsion de l'air comprimé) $t_d = 0,1$ s.

L'accès à la coiffe et au système de décolmatage se fait par l'intermédiaire de deux demi-portes situées sur le dessus du dépoussiéreur.

Débit d'air filtré

Le débit volumique global de l'installation est mesuré en conduit par un débitmètre à ultrasons (Panametrics Model XGM868). Son principe de fonctionnement repose sur la mesure par différence du temps de transit d'une onde codée (modèle breveté) entre une paire de transducteurs. Le principal avantage de ce débitmètre est qu'il est non intrusif et qu'il ne vient donc pas perturber l'écoulement de l'air en conduit.

Une détermination des débits en conduit par traçage gazeux a permis de vérifier la bonne concordance des valeurs avec les résultats fournis par le débitmètre à ultrasons. Le principe de la méthode par traçage gazeux est le suivant : un débit massique connu de traceur est injecté dans le flux d'air circulant dans le conduit ; le rapport de dilution du traceur dans l'air est proportionnel au débit d'air recherché (norme NF X 10-141 - ensemble de mesurage Leybold UL100+).

D'autre part, le débit d'air est réglé afin d'assurer un débit de filtration constant quel que soit l'état de colmatage des manches filtrantes (régulateur West model 8200). La vitesse de filtration (U_f) varie de 2 à 8 cm.s^{-1} , suivant les besoins des essais.

La température (Prosensor PT100) et l'humidité de l'air (Delta Ohm HD2011TO 5%-98%) sont également mesurées en continu lors des essais.

Génération d'aérosols

L'aérosol de colmatage est généré par différents générateurs de particules. Ces appareils sont capables d'assurer une concentration en particules constante à l'entrée du dépoussiéreur (valeur qui variera au cours des essais entre 0,5 et 4 mg.m^{-3}). Ces générateurs sont décrits de manière détaillée dans l'annexe IV. Leur mise en place et leur mise au point ont nécessité, comme pour une grande partie du matériel installé sur ce banc d'essais, un grand nombre d'heures de travail.

Mesure des performances du dépoussiéreur

La concentration de l'aérosol en conduit peut être déterminée à partir des lignes de prélèvements, tant à l'amont qu'à l'aval des media filtrants (détaillées au paragraphe II.4.1).

La perte de charge totale entre l'enceinte de filtration (amont) et la coiffe du dépoussiéreur (aval) est mesurée par un capteur de pression différentielle (Keller type PD-41/8885.D-0,05). La perte de charge des éléments autres que le medium filtrant et le gâteau de particules a été préalablement évaluée en fonction du débit imposé (perméations aérauliques sans les manches – cf. paragraphe II.5.2) : les résultats présentés dans ce rapport concernent donc uniquement la perte de charge due aux seuls éléments filtrants (colmatés ou non suivant les essais).

Equipements de sécurité

D'un point de vue sécurité, le caisson de filtration est équipé de deux événements d'explosion d'une surface totale de $0,2 \text{ m}^2$, permettant une protection contre les explosions de poussières. La gaine aval de retour d'air vers le bâtiment est équipée avec une chicane à 180° munie d'un événement d'explosion, et avec un clapet coupe-feu effectif pendant deux heures sous 1500 Pa (série TEK – Trox Technik). Les événements d'explosion sont munis de détecteurs d'ouvertures permettant d'arrêter l'installation en cas de surpression. Un clapet anti-retour empêche un retour de pression brutale vers le bâtiment par la veine d'essais amont. Enfin, l'ensemble de l'installation est muni de tresses de liaisons équipotentielles, raccordées à la terre via l'armoire électrique de commande, afin d'éliminer les charges électriques induites par le frottement entre particules et entre les particules et les parois.

Au final, le dépoussiéreur pilote comporte à la fois les avantages d'un procédé de laboratoire (instrumentation, flexibilité, accessibilité) et d'un matériel industriel (représentativité, conditions opératoires réalistes). N'existant pas au début de la thèse, plusieurs mois de travail ont été nécessaires pour qu'il devienne opérationnel et que les expériences puissent commencer.

II.2. MATERIEL ADDITIONNEL POUR L'ETUDE D'UNE MANCHE EN PHASE DE DECOLMATAGE (Chapitre IV)

Pour apprécier les conséquences d'un décolmatage, différents capteurs équipent certaines manches filtrantes et permettent de mesurer les grandeurs suivantes en quatre points sur leur hauteur : perte de charge, accélération du medium, vitesse de l'air sur l'axe intérieur de la manche et vitesse frontale au niveau de la surface filtrante (figure II.6).

Pour mesurer la perte de charge en quatre positions sur la hauteur d'une manche (figure II.6.a), des prises de pression statique, conçues pour éviter toute mesure additionnelle de pression dynamique, ont été positionnées sur une tige filetée parcourant l'ensemble de la hauteur de la manche (mesure de la pression intérieure des manches). Les mesures simultanées de ΔP_1 entre l'extérieur et l'intérieur de la manche sont effectuées avec des capteurs de pressions différentielles Keller de type PD-41/8885.D-0,05 à une fréquence d'analyse de 100 Hz . Les valeurs numériques sont moyennées sur trois essais.

$$\Delta P_i = P_{\text{enceinte}} - P_{\text{int},i} \quad (\text{II.1})$$

avec P_{enceinte} , la pression extérieure des manches. Elle est prise égale à la pression dans le conduit amont, elle-même supposée égale à la pression régnant dans l'enceinte de filtration du dépoussiéreur « autour » des manches ($P_{\text{entrée}} = P_{\text{enceinte}} = P_{\text{amont}}$). Par la suite, la pression extérieure des manches sera systématiquement notée P_{enceinte} .

$P_{\text{int},i}$, la pression interne des manches où i représente la $i^{\text{ème}}$ position de mesure sur la hauteur de la manche.

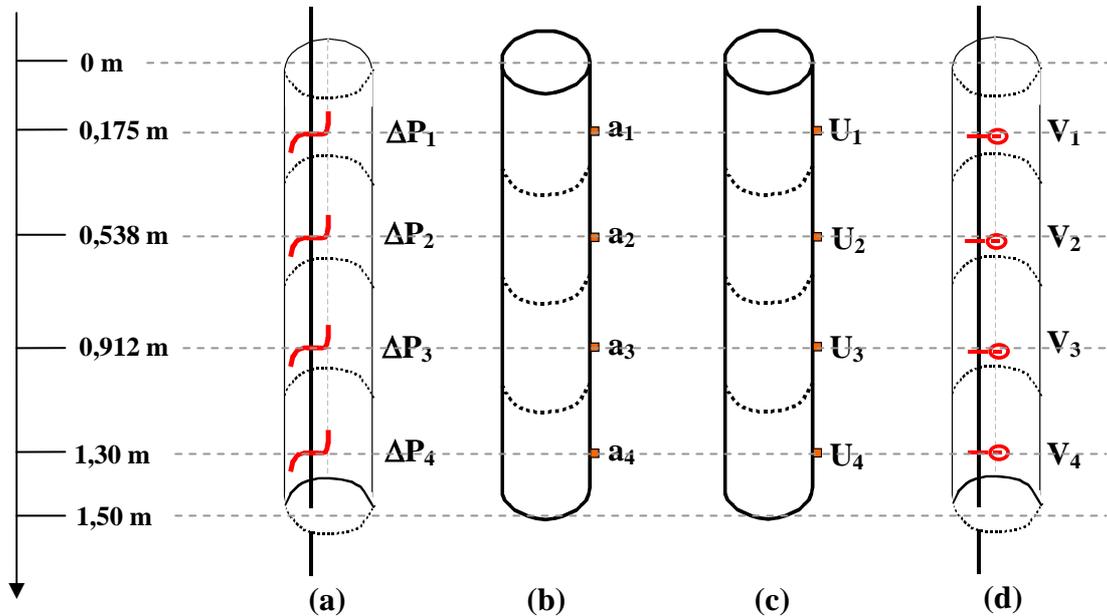


Figure II.6 : Schémas de positionnement des capteurs - (a) Capteurs de pression interne, (b) Accéléromètres, (c) Capteurs de vitesses frontales, (d) Capteurs de vitesse axiale.

Les mesures des accélérations du medium en quatre positions sur la hauteur d'une manche sont effectuées à l'aide d'accéléromètres miniatures de très faibles masses (Brüel & Kjaer Type 4393 V), préalablement collés sur le medium (figure II.6.b). Le fonctionnement de ces accéléromètres nécessite une alimentation par des amplificateurs de charge (deux de type Brüel & Kjaer 2635, deux de type KISTLER 5015A) qui permettent également de procéder à certains réglages (gain, intégration, filtrage). Un système d'acquisition (LMS Instruments) permet l'enregistrement et le post-traitement des signaux. Les mesures simultanées d'accélérations sont effectuées avec une fréquence d'analyse de 2048 Hz. Les valeurs obtenues sont répétées au moins trois fois pour s'assurer de la reproductibilité du signal.

Les acquisitions des valeurs de vitesses frontales en quatre points de mesure sur la hauteur d'une manche (figure II.6.c) sont effectuées à l'aide de capteurs de vitesses d'air (anémomètre à fil chaud Cambridge Accusense AFS-200 / 0–5 m.s⁻¹). Les vitesses axiales du jet d'air comprimé sont mesurées en quatre points le long d'une manche filtrante (figure II.6.d) en utilisant des capteurs de vitesses 0-20 m.s⁻¹ (anémomètre à fil chaud Cambridge Accusense AVS-1024D1W224). Les mesures simultanées des vitesses frontales et des vitesses verticales sont effectuées avec une fréquence d'analyse de 100 Hz et moyennées sur trois essais. Du fait de la technologie des anémomètres, il n'est pas possible de réaliser une mesure de la vitesse frontale locale lors des essais avec empoussiérement des manches. A noter que ces anémomètres ne renseignent pas sur la direction des vecteurs vitesses qu'ils mesurent.

Le mouvement du médium pendant les décolmatages est également observé à l'aide d'une caméra rapide (Sysmat Industrie - jusqu'à 950 images par seconde).

Cinq géométries de buse de décolmatage, représentées sur la figure II.7, sont testées :

- Position 1 : buses avec orifices de diamètre d_b , placées à 0,08 m au dessus de la partie supérieure de la manche ($d_b = 5, 10$ ou 15 mm – (a), (b) ou (c)) ;
- Position 2 : buse débouchant en partie supérieure de la manche ($d_b = 10$ mm – (d)) ;
- Position 3 : buse s'introduisant dans la manche ($d_b = 10$ mm – (e)).

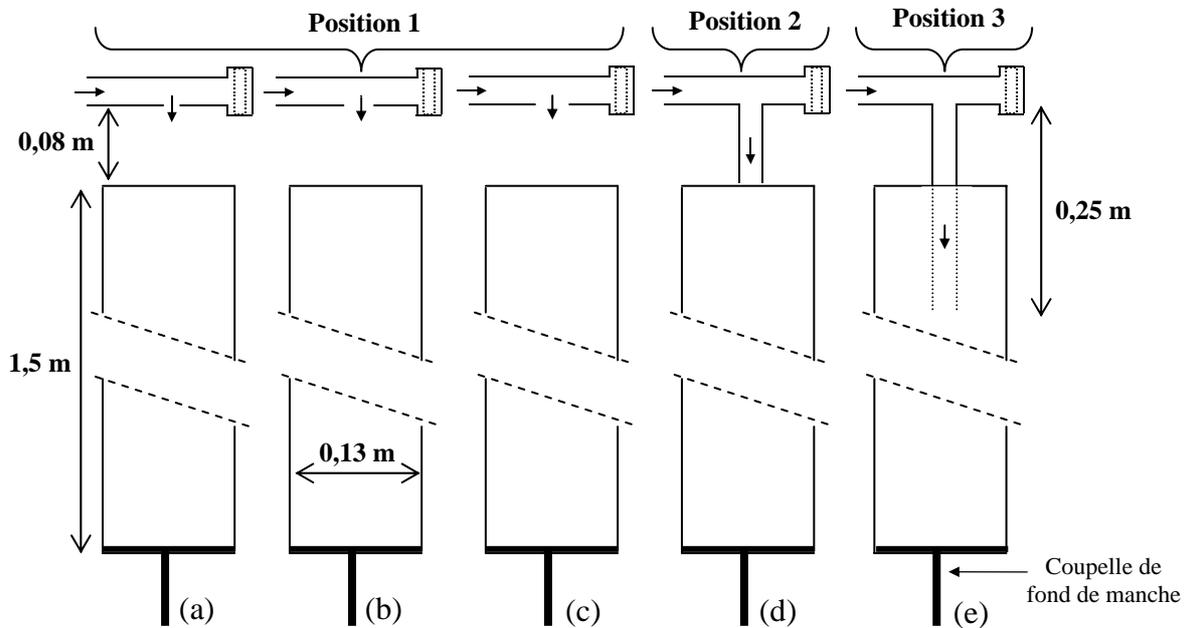


Figure II.7 : Présentation des différentes buses d'injection étudiées.

La tension de la manche est obtenue en vissant la coupelle de fond de manche sur le rail support à l'aide d'une clef dynamométrique. Deux états ont été retenus : un fonctionnement avec des manches de tension initiale nulle et un fonctionnement avec des manches fortement tendues ($T = 0,1$ m.kg).

II.3. MATERIEL ADDITIONNEL POUR L'ETUDE DE LA REPARTITION DES DEBITS (Chapitre V)

L'objectif de cette étude consiste à suivre la répartition du débit d'air empoussiéré sur les différentes manches d'un dépoussiéreur au cours des cycles de filtration. Pour cela, la sortie d'air de chaque manche est connectée à un Venturi positionné au dessus du manchon qui accueille la buse d'injection, via un cône de réduction (figure II.8). Chaque manche est donc équipée de son propre organe de mesure de débit. Chaque Venturi est relié à un capteur de pression différentielle (Keller type PD-41/8885.D-0,05). Le Venturi fournit le débit d'air de filtration qui passe par une manche donnée, et qui représente une fraction du débit total mesuré en conduit par le débitmètre à ultrasons.

Les nombreux capteurs qui équipent le dépoussiéreur lors des essais concernant la répartition des débits sont connectés à une centrale d'acquisition multivoies (Keithley model 2700 multimeter / switch system). Le traitement et la visualisation des données s'effectuent en temps réel grâce à un logiciel informatique spécialement conçu pour cette application.

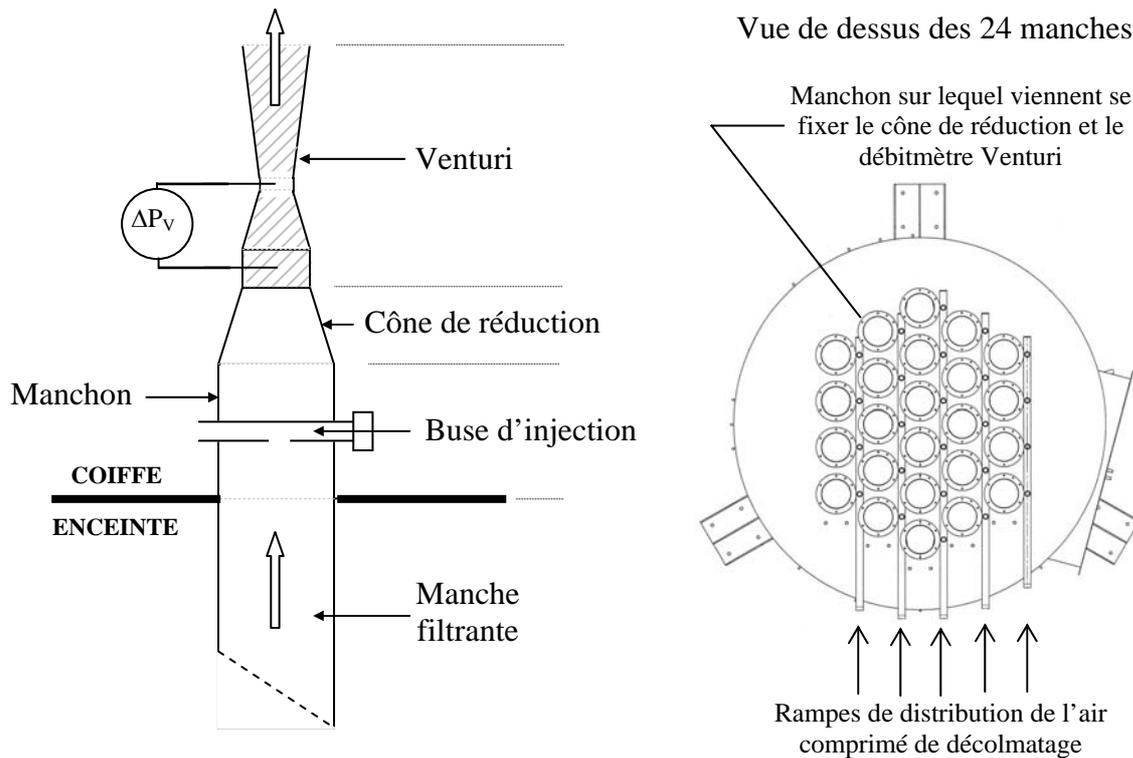


Figure II.8 : Installation des débitmètres Venturi dans la coiffe du dépoussiéreur.

A noter que lors de leur réception, un échantillon de 5 débitmètres Venturi parmi les 24 a été « vérifié » suivant les spécificités de la norme NF X 10-231 (1984). Le travail avait alors été effectué en conduit avec des longueurs minimales à l'amont et à l'aval suffisantes pour s'assurer que le profil de vitesses à l'approche de l'appareil de mesure soit proche d'un écoulement établi. Une détermination des débits par traçage gazeux, sur une plage comprise entre 50 et 250 m³.h⁻¹, avait permis de valider le bon fonctionnement des débitmètres Venturi. Une seconde vérification des débitmètres Venturi, après avoir été fixés dans la coiffe du dépoussiéreur (figure II.8), a été nécessaire. Il fallait s'assurer que le positionnement particulier (non respect de la longueur droite minimale à l'amont et rejet de l'air dans la coiffe à l'aval, sans longueur droite de conduit) n'occasionnait pas une erreur de mesure trop importante. La détermination d'un coefficient d'ajustement a alors permis de corriger la faible erreur (< 5 %) constatée entre la valeur de débit fournie par les 24 venturis et la valeur de débit mesurée par le débitmètre à ultrasons.

II.4. METHODES DE PRELEVEMENTS ET PRESENTATION DES AEROSOLS TESTS

II.4.1. Prélèvements en conduit

Deux lignes de prélèvements, à l'amont et à l'aval des manches filtrantes, permettent de prélever et d'analyser l'aérosol transporté en conduit. Une sonde de prélèvement profilée, située à l'extrémité d'un tube coudé, est placée au centre du conduit. Le tube de prélèvement est lui-même relié soit à un dispositif de prélèvement sur filtre très haute efficacité (filtre THE Whatman en fibres de verre - amont, fortement empoussiéré), soit à un compteur optique de particules (aval, faible concentration en poussières). Le diamètre d'ouverture de la sonde profilée est déterminé de telle sorte que le prélèvement s'effectue de manière isocinétique.

La chaîne de prélèvement à l'amont se compose d'un filtre Très Haute Efficacité (THE) de diamètre égal à 47 mm, d'une tuyère à col sonique et d'une pompe à air (30 L.min⁻¹). La concentration massique en particules est donc déterminée par une méthode gravimétrique.

Le compteur optique de particules utilisé à l'aval est un compteur laser (Grimm 1.108) conçu pour une mesure en continue des poussières fines. Le débit de prélèvement de l'appareil est réglé à 1,2 L.min⁻¹ et les résultats du comptage sont affichés en Nbre.L⁻¹ pour les diamètres de particules supérieurs à 0,3 µm. Le principe de comptage repose sur la diffraction lumineuse d'un faisceau laser de longueur d'onde parfaitement définie. Le compteur optique analyse la lumière diffractée par le passage des particules dans une cellule de mesure et classe les résultats suivant un registre de 15 canaux en taille de particules (0,3 à 20 µm). Du fait que l'appareil ne pèse pas directement la masse de particules, mais la calcule à partir de la lumière diffractée, il est nécessaire de comparer la masse réelle avec la masse optique. L'appareil permet d'effectuer cette correction par une analyse gravimétrique sur un filtre placé dans un compartiment prévu à cet effet. Les droites d'étalonnages obtenues montrent un rapport de la concentration massique de référence (gravimétrie) sur la concentration mesurée par comptage proches de 1. L'erreur type d'estimation est inférieure à 0,05 mg.m⁻³.

Le compteur optique de particules permet de suivre les variations de la concentration massique aval, notamment lors des phases de décolmatage du dépoussiéreur et de déterminer l'efficacité de filtration. Celle-ci est déterminée à partir de prélèvements à l'amont et à l'aval de l'installation, toute production de poussière étant arrêtée afin d'éviter la saturation de l'appareil.

Les résultats mesurés par comptage optique seront exprimés en fonction d'un diamètre « équivalent optique », qui correspond au diamètre de la particule sphérique d'indice de réfraction $n = 1,59$, diffusant la même intensité de lumière que la particule mesurée (Willeke et Baron (1993)).

II.4.2. Caractérisation des aérosols tests

Deux types d'aérosols sont utilisés pour effectuer les cycles de filtration : des particules d'alumine et des particules de bois.

L'alumine a été choisie comme aérosol modèle car elle présente un bon compromis entre plusieurs critères de choix : caractère monodispersé de la répartition granulométrique, facilité de génération ou encore faible toxicité. Les particules d'alumine ont de plus contribué à l'établissement de nombreux résultats dans le laboratoire (Callé (2000), Vaxelaire (2001), Simon (2002)) et permettent de se raccrocher à des travaux antérieurs. Cette poudre est habituellement commercialisée comme abrasif pour l'usinage, le polissage, le rodage ou le sablage des aciers.

Les poussières de bois, considérées comme l'aérosol réel, proviennent d'un circuit de ponçage séparé d'une ébénisterie ; elles sont donc exemptes de déchets type copeaux qui auraient pu être gênants lors de la génération des particules. Il s'agit d'un mélange de chêne et de hêtre (essences de bois dur), facile à générer dans la mesure où il présente un faible pouvoir collant. Le choix de ces particules de bois est basé sur un désir de tester des particules issues d'une unité industrielle et correspond à l'un des secteurs d'activités qui intéresse particulièrement l'INRS du fait de la toxicité de ces aérosols (cf. paragraphe I.1.3).

La distribution granulométrique de l'aérosol généré à l'amont du dépoussiéreur est déterminée par prélèvement isocinétique d'un échantillon de poussières sur filtre THE et analyse ultérieure au moyen d'un compteur en phase liquide (Coulter Multisizer). Les principales caractéristiques des poussières étudiées sont répertoriées dans le tableau suivant :

Aérosol	Provenance	Diamètre médian en volume (μm)	Ecart - type géométrique	Masse volumique ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Alumine1	A.G.P. L'Abrasienne Corindon blanc 1200 (2002)	2,5	1,47	4000
Alumine2	A.G.P. L'Abrasienne Corindon blanc 1200 (2003)	3,1	1,47	4000
Bois2	Ebénisterie (2005)	33,8	2,05	800

Tableau II.1 : Caractéristiques des différentes particules générées pendant les essais sur le dépoussiéreur pilote.

Les résultats complets des analyses granulométriques sont fournis dans l'annexe V.

II.5. DESCRIPTION DU MEDIUM FILTRANT A L'ETAT NEUF

II.5.1. Propriétés physiques

Le medium testé est constitué de fibres de polyester non tissées et bénéficie d'un traitement de surface anti-colmatant par calandrage thermique. Ce medium est souvent employé pour la confection des manches de dépoussiéreurs dans l'industrie de la transformation du bois, en raison de sa faible perte de charge et de son faible coût. Un medium filtrant vierge se caractérise par sa masse surfacique G , son épaisseur Z , sa compacité α_f et le diamètre de ses fibres d_f . Ces caractéristiques à l'état neuf sont regroupées dans le tableau II.2 pour le medium testé. Elles correspondent à celles de filtres à fibres communément employés en dépoussiérage industriel.

Référence	T12T56320
Masse surfacique G ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	400 ± 5
Epaisseur Z (mm)	$1,22 \pm 0,10$
Compacité α_f	$0,237 \pm 0,021$
Diamètre de fibre (Davies) d_f (μm)	$20,3 \pm 3,4$
Diamètre de fibre moyen d_{moy} (μm)	≈ 20

Tableau II.2 : Propriétés à l'état neuf du medium filtrant testé.

La détermination de la masse surfacique du medium filtrant sec consiste en la pesée d'un échantillon de surface connue.

L'épaisseur est un paramètre clé car il intervient dans le calcul de la compacité, de la perte de charge et de l'efficacité du medium fibreux. La mesure de l'épaisseur est délicate à réaliser et peut être obtenue par l'observation d'une tranche de medium au microscope électronique à balayage (M.E.B.). Cette technique nécessite une grande minutie pour placer la tranche du medium perpendiculairement à l'axe d'observation afin d'éviter les effets liés à la profondeur de champ ou à l'inclinaison de l'échantillon. La préparation de l'échantillon implique une incision du medium et par conséquent un écrasement local qui peut être durable ou dans le meilleur des cas, temporaire. Enfin, l'obtention d'une valeur moyenne de l'épaisseur demande d'un point de vue statistique l'analyse d'un grand nombre d'échantillons.

La compacité α_f des media vierges, qui se définit comme le rapport du volume des fibres sur le volume total du filtre, se déduit de la relation suivante :

$$\alpha_f = \frac{m_f}{S_f \cdot \rho_f \cdot Z} = \frac{G}{\rho_f \cdot Z} \quad (\text{II.2})$$

Le diamètre des fibres et leur distribution granulométrique conditionnent en partie la perte de charge et l'efficacité de capture du medium. Seule l'utilisation d'un microscope optique ou électronique à balayage couplée à une analyse d'images permet d'accéder à la distribution granulométrique des fibres supposées parfaitement cylindriques. Cette technique permet l'obtention d'un diamètre moyen arithmétique, d_{moy} , ou d'un diamètre médian, d_{50} , des fibres. Il est cependant plus facile de déterminer le diamètre aéraulique des fibres. Le diamètre moyen aéraulique, d_f , est déterminé à partir de l'évolution de la perte de charge d'un échantillon de medium plan (cf. annexe VI) en fonction de la vitesse de perméation, à partir de l'équation I.3.

Des observations (M.E.B.) du medium filtrant utilisé sont fournies sur la figure II.9. Les modifications de l'état de surface du medium filtrant du fait de son traitement thermique sont visibles et contribuent à améliorer les performances de décolmatage du gâteau, comme l'a mis en évidence Callé (2000).

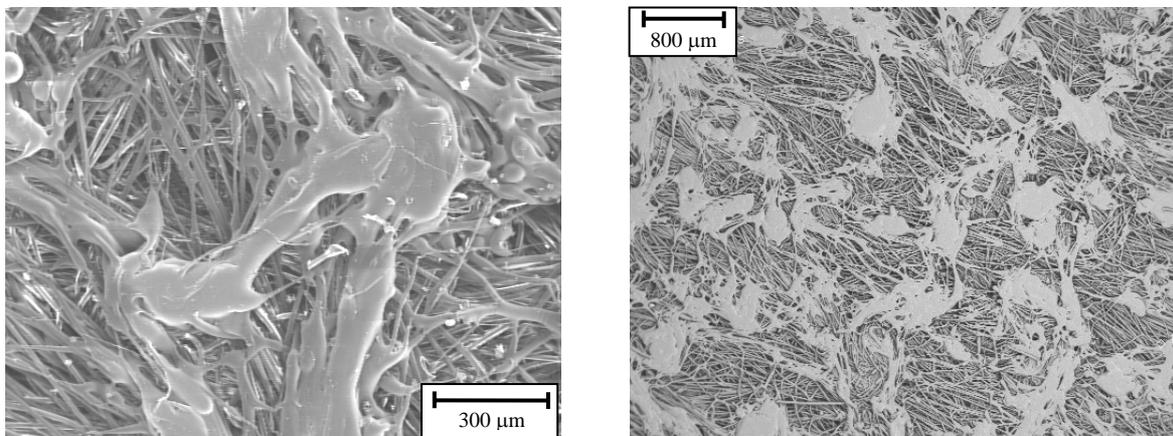


Figure II.9 : Observations de la surface filtrante du medium T12T56320 – Traitement par calandrage thermique.

Toutes les expériences concernant le dépoussiéreur pilote à manches ont été effectuées avec des manches constituées du medium T12T56320.

II.5.2. Propriétés aérauliques

Procéder à une perméation aéraulique revient à suivre l'évolution de la perte de charge engendrée par une augmentation progressive du débit d'air à travers les éléments filtrants ($\Delta P = f(Q_v)$). La courbe obtenue caractérise le comportement aéraulique du medium filtrant. Dans le cas précis du dépoussiéreur à manches pilote étudié, les prises de pression amont et aval sont positionnées de telle sorte que la perte de charge enregistrée ne correspond pas à la perte de charge du medium seul. Il faut donc procéder à une détermination préalable de la perte de charge additionnelle occasionnée par la carcasse et les éléments du dépoussiéreur autres que les media filtrants.

Pour ce faire, deux perméations aérauliques ont été effectuées (figure II.10) :

- une perméation d'air avec les manches à l'état neuf qui fournit l'évolution de la perte de charge totale, ΔP_T , en fonction du débit ;
- une perméation d'air sans les manches qui fournit l'évolution de la perte de charge de la carcasse sans les éléments filtrants, $\Delta P_{carcasse}$, en fonction du débit.

La perte de charge des éléments filtrants (colmatés ou non), ΔP , sera donc obtenue en retranchant la perte de charge de la carcasse seule à la perte de charge totale, de la manière suivante :

$$\text{pour un débit volumique } Q_v \text{ donné, } \Delta P = \Delta P_T - \Delta P_{\text{carcasse}} \quad (\text{II.3})$$

Les courbes de la figure II.10 montrent clairement que la majorité de la perte de charge totale enregistrée dans l'enceinte de filtration du dépoussiéreur provient de la carcasse et des divers assemblages de pièces métalliques. Le medium filtrant à l'état neuf n'entraîne jamais plus de 200 Pa de perte de charge sur la plage de débit étudiée. A noter qu'aucune barre d'erreur n'a été spécifiée sur les valeurs de perte de charge car le capteur de pression différentielle Keller utilisé présente une marge de précision inférieure ou égale à 8 Pa.

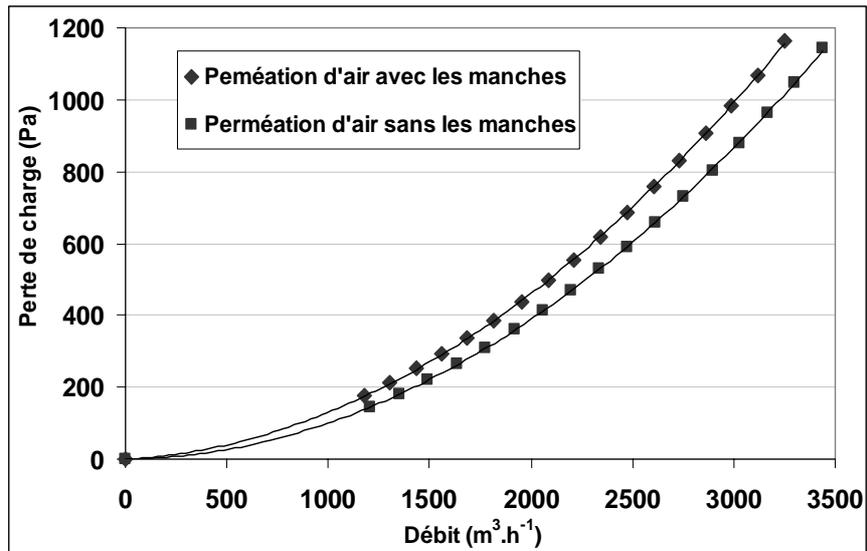


Figure II.10 : Perméations aérauliques sur le dépoussiéreur avec et sans les manches filtrantes.

Les évolutions de la perte de charge des media à l'état neuf en fonction de la vitesse de filtration ont été déterminées sur le dépoussiéreur à manches pilote (à partir des résultats de la figure II.10 et de l'équation II.3) et sur un banc d'étude des media plans (diamètre égal à 130 mm – cf. annexe VI) que possède également le laboratoire (figure II.11).

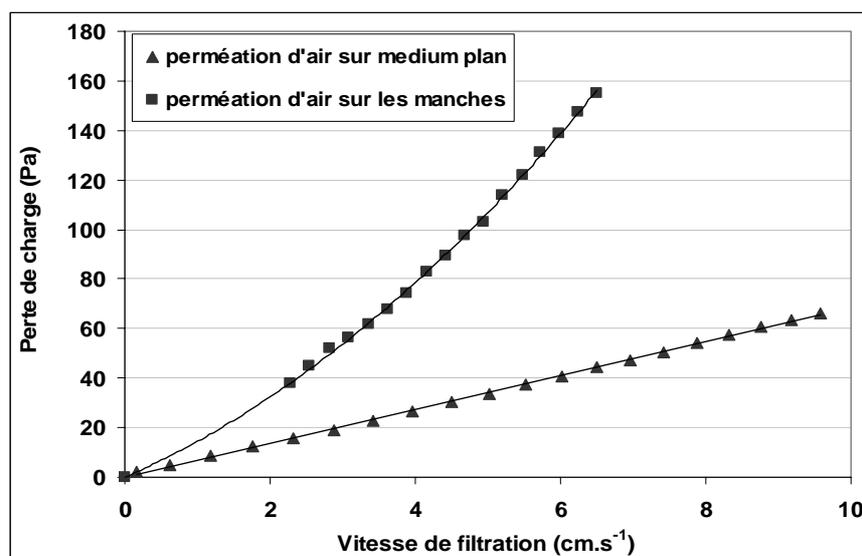


Figure II.11 : Evolution de la perte de charge du medium filtrant à l'état neuf en fonction de la vitesse de filtration pour les manches du dépoussiéreur pilote et pour un échantillon de medium plan.

Conformément à l'équation I.2. de Darcy, la croissance de la perte de charge est linéaire pour l'expérience sur medium plan. Par contre, la courbe décrivant l'évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse de perméation est de forme parabolique. Cette différence de comportement provient certainement de l'influence de la géométrie du dépoussiéreur, ainsi que d'une modification apportée par l'écoulement de l'air entre les manches (tourbillons ...). De plus, l'essai sur medium plan consiste effectivement à faire traverser de l'air dans un milieu poreux qui est le filtre à fibres non tissées. La perméation d'air sur medium plan a d'ailleurs servi à déterminer le diamètre des fibres selon Davies à partir de l'équation I.3. L'essai sur les manches caractérise quant à lui la perte de charge engendrée par les 24 éléments filtrants. Mais ceux-ci, s'ils sont majoritairement constitués du medium filtrant comportent également des coutures (zones renforcées aux propriétés différentes) ainsi que des anneaux de renfort dont la géométrie ne permet peut être pas une répartition homogène de la vitesse de filtration sur l'ensemble de la surface d'une manche. Toutes ces différences sont autant d'éléments perturbateurs qui font que la perméation aéraulique effectuée sur le dépoussiéreur ne caractérise pas le medium fibreux seul mais l'ensemble que forme les manches. L'allure de la courbe $\Delta P = f(U_f)$ s'en trouve modifiée.

II.5.3. Efficacité initiale de filtration

L'efficacité fractionnelle de filtration pour le medium testé a été déterminée par comptages optiques sur le dépoussiéreur pilote à manches et sur le banc d'essais pour media plans. Les résultats sont fournis sur la figure II.12.

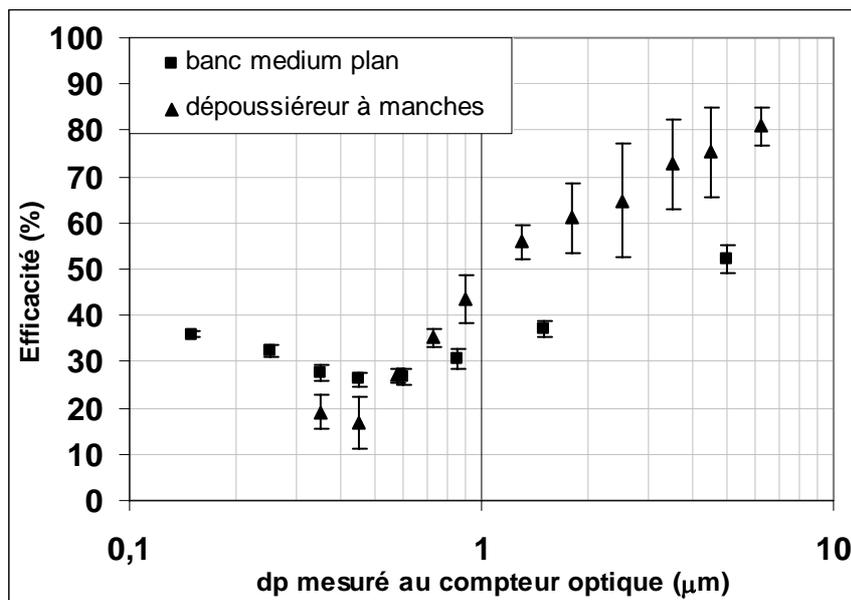


Figure II.12 : Efficacité fractionnelle du medium à l'état neuf pour une vitesse de filtration de 5 cm.s^{-1} .

La méthode choisie pour les essais sur medium plan est celle décrite dans la norme EN 779 (1998). Le principe repose sur le prélèvement alterné à l'amont et à l'aval du medium filtrant d'un aérosol test polydispersé par un compteur optique. Le calcul de l'efficacité fractionnelle s'effectue ensuite suivant les spécifications de la norme, à partir des comptages optiques. L'ensemble des explications et la description du matériel utilisé pour la détermination de l'efficacité initiale sont données dans l'annexe VI.

La méthode retenue pour effectuer la détermination de l'efficacité de filtration initiale sur le dépoussiéreur à manches est comparable au niveau méthodologique à celle utilisée sur media plans. Elle diffère cependant en trois points :

- l'aérosol test est une solution de KCl à 1,5 % en volume pulvérisé dans le hall d'essais et non plus un aérosol de KCl généré en conduit à l'aide d'un nébuliseur ;
- les prélèvements à l'amont et à l'aval des manches filtrantes sont toujours alternés mais seulement moyennés sur trois séquences ;
- le compteur optique de particules est un compteur Grimm 1.108.

Pour résumer, la méthode ne suit plus exactement la norme EN 779 mais elle est très proche.

Pour les deux installations, le medium présente une courbe d'efficacité initiale en fonction du diamètre des particules tout à fait caractéristique des media filtrants fibreux de moyenne efficacité. L'efficacité de filtration présente en effet un minimum (zone comprise entre 0,3 et 0,6 μm) résultant de la compétition entre les mécanismes de diffusion, d'impaction et d'interception ; l'efficacité initiale est faible pour l'ensemble des particules dont le diamètre est compris entre 0,1 et 10 μm .

Malgré la différence de géométrie importante entre l'échantillon de medium plan et le réseau de 24 manches filtrantes, les deux courbes présentent la même allure et sont proches l'une de l'autre. Néanmoins, les valeurs d'efficacité caractérisées sur medium plan pour un diamètre de particules supérieur à 0,6 μm deviennent inférieures à celles pour les manches. Plusieurs hypothèses peuvent être évoquées pour expliquer ces différences de comportement :

- l'air d'entraînement des particules n'est pas neutralisé pour les tests sur les manches et il peut se produire un arrêt par induction sur les fibres, qui n'existait pas sur medium plan ;
- l'aérosol test utilisé pour les manches (pulvérisation dans le hall) a pu produire des particules moins « calibrées », quant à leur forme sphérique, qu'avec une génération par nébuliseur et des erreurs peuvent intervenir dans la détermination des diamètres optiques de particules ;
- l'influence de la différence de géométrie entre manches et medium plan, la présence des autres manches ainsi que l'action de l'écoulement entre les manches peuvent entraîner des différences ;
- la présence d'un déflecteur à l'entrée du dépoussiéreur peut expliquer l'amélioration de l'efficacité pour les plus grosses particules.

II.6. INFORMATIONS LIEES AUX UTILISATIONS PONCTUELLES D'AUTRES BANCS D'ESSAIS

Les expériences de cette étude ont principalement été menées sur le dépoussiéreur pilote à manches. Cependant, des résultats complémentaires ont parfois été établis sur d'autres bancs d'essais. Chacun de ces bancs d'essais est conçu de manière à pouvoir effectuer des cycles de colmatage par des aérosols solides microniques et décolmatage par à-coup de pression à contre-courant. Ils seront désignés comme suit dans le texte : Banc media plans et Dépoussiéreur à poches.

Banc media plans

Il s'agit d'une unité de tests de filtration mettant en œuvre un medium plan circulaire de 0,13 m de diamètre (cf. annexe VI).

Les caractéristiques à l'état neuf de deux autres media utilisés pour les expériences sur échantillon plan sont regroupées dans le tableau II.3.

Référence	T 452 SA	Tetratex 6214
Traitement de surface du medium non tissé en fibres de polyster	Calandrage thermique	Membrane PTFE
Masse surfacique G (g.m^{-2})	528 ± 8	564 ± 6
Epaisseur Z (mm)	$1,72 \pm 0,10$	$1,93 \pm 0,10$
Compacité α_f	$0,222 \pm 0,014$	$0,212 \pm 0,011$
Diamètre de fibre (Davies) d_f (μm)	$20,4 \pm 2,4$	$10,5 \pm 1,0$

Tableau II.3 : Propriétés à l'état neuf des media filtrants testés sur échantillons plans.

Mis à part sa masse surfacique un peu plus élevée du fait d'une épaisseur légèrement supérieure, le medium T 452 SA montre des caractéristiques physiques proches du medium T12T56320 qui constitue les manches du dépoussiéreur pilote (cf. tableau II.2).

La surface filtrante du medium T 452 SA, bénéficiant d'un traitement de surface par calandrage thermique, est en tout point similaire à celle observée sur la figure II.9. Des observations microscopiques de la surface filtrante du medium doté d'un laminage par membrane PTFE ont été également réalisées au moyen d'un microscope électronique à balayage (MEB) (figure II.13).

Ces images montrent clairement le caractère beaucoup plus uniforme et lisse que possède un traitement de surface par membrane PTFE par rapport à un traitement par calandrage thermique. De ce fait, le medium avec membrane PTFE possède un meilleur état de surface et engendre un décolmatage plus efficace du gâteau de particules. La membrane PTFE a également un effet sur la filtration car elle améliore l'efficacité et limite le colmatage en profondeur. Une détermination de la distribution de tailles des fibres d'une membrane PTFE effectuée par Callé (2000) avait révélé un diamètre médian de fibres de $0,2 \mu\text{m}$, donc très inférieur au diamètre des fibres de la trame principale. En outre, la présence de la membrane rend le medium beaucoup plus rigide et cette propriété pourrait entraîner des différences de comportement physique pendant le décolmatage (accélérations subies par le medium ou amortissement des chocs).

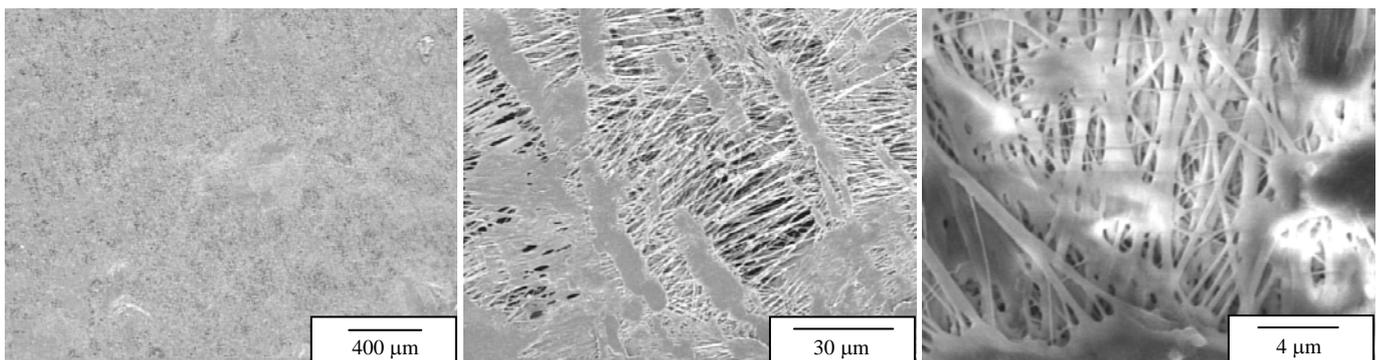


Figure II.13 : Observations au MEB de la surface du medium doté d'une membrane PTFE.

L'aérosol étudié lors des expériences sur media plans est un aérosol d'alumine de type DX5R (Alumine3) de diamètre médian en volume égal à $4,6 \mu\text{m}$, pour un écart-type géométrique de 1,5 (cf. annexe V).

Dépoussiéreur à poches

Il s'agit d'un dépoussiéreur industriel comportant 12 poches rectangulaires (cf. annexe VII).

Les poches étudiées étaient confectionnées avec les mêmes media que ceux décrits pour le banc d'essais pour échantillons plans (T 452 SA et Tetratex 6214 – tableau II.3).

Les aérosols qui ont été générés sur le dépoussiéreur à poches au cours des divers essais étaient les suivants : Alumine1 ($d_{pm} = 2,5 \mu m$), Alumine4 ($d_{pm} = 6 \mu m$), Alumine5 ($d_{pm} = 35 \mu m$) et Bois1 ($d_{pm} = 16,5 \mu m$ – distribution granulométrique dans l'annexe V).

CHAPITRE III
DESCRIPTION DES CYCLES DE
FILTRATION

III.1. INTRODUCTION

L'objectif principal de ce court chapitre est de décrire les évolutions de la perte de charge et de la concentration numérique à l'aval pour une grande partie des cycles réalisés sur le dépoussiéreur à manches pilote. Il s'agit également d'introduire certains résultats ou certaines notions qui seront utilisées ultérieurement dans les chapitres suivants.

Les résultats qui vont être commentés résultent de 3 séries de manipulations distinctes. Pour chacune d'entre elles, un nouveau jeu de manches est utilisé (medium T12T56320 pour chacune des manches et pour chacune des séries). Les cycles de colmatage et de décolmatage de chaque série s'effectuent donc à partir de 24 manches filtrantes neuves.

A chacune des séries correspond un aérosol de colmatage particulier et un nombre de cycles précis pour des conditions opératoires identiques (tableau III.1).

Série	Aérosol test	Nombre de cycles total	Nombre de cycles dans des conditions opératoires identiques	Conditions opératoires
1	Alumine1 ($d_{pm} = 2,5 \mu\text{m}$)	150	150	$P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 15.\Delta P_0$, $C_p = 0,72 \text{ g.m}^{-3}$
2	Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu\text{m}$)	355	215	$P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 9.\Delta P_0$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$
			32	$P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 13.\Delta P_0$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$
			26	$P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 19.\Delta P_0$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$
			52	$P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 19.\Delta P_0$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$
			30	$P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 500 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 19.\Delta P_0$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$
3	Bois2 ($d_{pm} = 33,8 \mu\text{m}$)	132	65	$P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 10.\Delta P_0$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$
			25	$P_r = 1,5 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 10.\Delta P_0$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$
			26	$P_r = 1,5 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 20.\Delta P_0$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$
			16	$P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $\Delta P_{\text{max}} = 20.\Delta P_0$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$

Tableau III.1 : Récapitulatif des cycles de filtration menées sur le dépoussiéreur à manches pilote.
- décolmatage pneumatique séquentiel rail par rail (cf. Chapitre II) , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$ -

Les évolutions de la perte de charge et de la concentration numérique en particules à l'aval du dépoussiéreur pendant ces cycles de filtration sont présentées dans l'annexe VIII.

Ces évolutions sont représentés en fonction de la masse surfacique de particules générées au temps t , donnée par :

$$W(t) = \frac{q_p \cdot t}{S_f} \quad (\text{III.1})$$

avec W : masse surfacique de particules générées ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) ;
 t : temps (s) ;
 q_p : débit massique de particules à l'amont ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
 S_f : surface filtrante totale (m^2).

Le débit massique, q_p , est déterminé par prélèvement isocinétique sur filtre de l'aérosol dans le conduit à l'amont des manches filtrantes, puis détermination par pesée de la masse de particules collectée sur le filtre. Les valeurs mesurées par cette méthode sont en bonne adéquation avec les valeurs de débits massiques calculés (logiciel de suivi de la masse générée sur le Palas BEG 1000S) ou mesurés (par empotage sur le Parimix 'DZ2 DMR 30A') sur les générateurs de particules utilisés (cf. annexe IV).

La perte de charge représentée sur les courbes de l'annexe VIII correspond à la perte de charge des éléments filtrants : $\Delta P = \Delta P_T - \Delta P_{\text{carcasse}}$ (Equation II.3, paragraphe II.5.2).

III.2. EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE AU COURS DES CYCLES

Critère énergétique de fonctionnement et d'exploitation important pour les dépoussiéreurs à media filtrants, la perte de charge évolue de manière cyclique au cours du temps (cf. paragraphe I.2.1). Elle permet généralement à un utilisateur de s'assurer de la présence bénéfique du gâteau lors de la filtration. Son évolution au cours des cycles a été étudiée sur le dépoussiéreur à manches pilote. L'objectif principal est de décrire l'évolution de la perte de charge des manches au cours des cycles de filtration.

III.2.1. Description pour les premiers cycles

Quel que soit l'aérosol utilisé, le premier cycle de fonctionnement des manches diffère du comportement qu'elles adopteront par la suite. L'évolution de la perte de charge sur les cinq premiers cycles de la série 1 (cf. tableau III.1) est représentée sur la figure III.1.

Pour le premier cycle, la partie incurvée indiquée A démontre que pour le medium T12T56320 (cf. paragraphe II.5.1), il existe une étape de colmatage en profondeur du filtre avant que le colmatage de surface n'apparaisse (zone linéaire C). Cette évolution en deux phases est bien connue et a été largement étudiée dans la littérature (paragraphe I.2.2.2). Au contraire, la partie indiquée B qui caractérise la reprise du colmatage pour les cycles suivants, indique que la phase de colmatage en profondeur n'existe plus et qu'il y a construction d'un dépôt de particules en surface dès le début de la filtration. Pour ces cycles, on observe dès le début une augmentation quasi linéaire de la perte de charge : l'épaisseur de la couche de particules croît proportionnellement à la masse de particules collectée et la perte de charge augmente alors proportionnellement avec la masse surfacique générée (cf. équations I.5 et I.8).

Ces considérations sont en parfait accord avec de précédents travaux effectués au laboratoire sur les bancs d'essais pour media plans et sur le dépoussiéreur à poches (Bémer et al. (2004)).

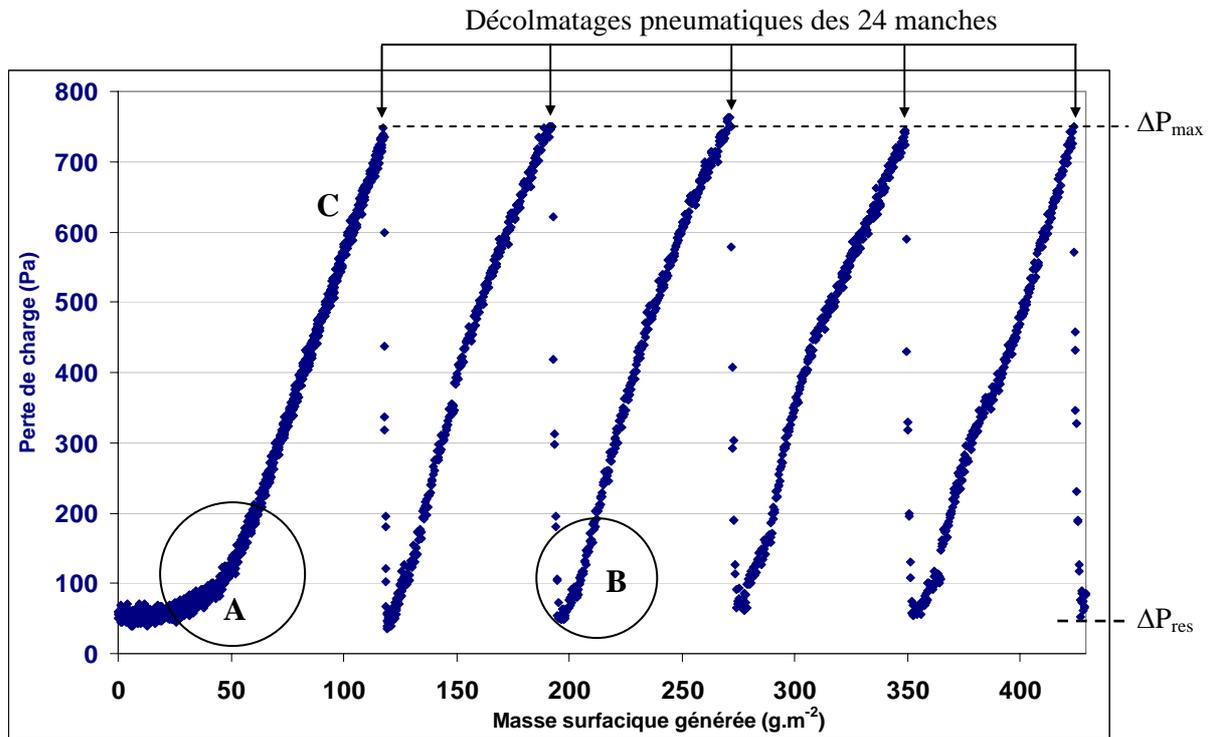


Figure III.1 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse surfacique générée de particules pour les 5 premiers cycles de colmatage et de décolmatage.

Alumine1 ($d_{pm} = 2,5 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\text{max}} = 15.\Delta P_0$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,72 \text{ g.m}^{-3}$

Le grossissement effectué sur la figure III.1 permet de bien observer les cycles de filtration et de constater qu'après chaque décolmatage pneumatique des 24 manches, il se produit une chute de la perte de charge, d'une valeur maximale prédéfinie, ΔP_{max} , jusqu'à une valeur résiduelle, ΔP_{res} , qui correspond à l'état décolmaté des éléments filtrants. La valeur de la perte de charge résiduelle évolue au cours des cycles car elle dépend notamment de l'état de colmatage en profondeur du medium et de la fraction de gâteau décolmaté en surface (cf. paragraphes I.3.3 et I.4.3).

III.2.2. Evolution de la perte de charge résiduelle et des durées de cycle

Les figures AVIII.1 (alumine1), AVIII.2 et AVIII.3 (alumine2) et AVIII.6 (bois2) de l'annexe VIII permettent d'apprécier l'augmentation de la perte de charge résiduelle au cours des cycles de filtration. Une synthèse de ces valeurs est donnée dans le tableau III.2.

ΔP_0 (Pa)	n	$\Delta P_{\text{res},n}$ (Pa)	Conditions opératoires
≈ 50	150	230	Alumine1 ($dp = 2,5 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\text{max}} = 15.\Delta P_0$, $C_p = 0,72 \text{ g.m}^{-3}$
≈ 50	215	310	Alumine2 ($dp = 3,1 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\text{max}} = 9.\Delta P_0$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$
≈ 50	65	325	Bois2 ($dp = 33,8 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\text{max}} = 10.\Delta P_0$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$

ΔP_0 : perte de charge initiale des manches
 n : nombre de cycles effectué
 $\Delta P_{\text{res},n}$: perte de charge résiduelle au cycle n

Tableau III.2 : Evolution de la perte de charge résiduelle pour les trois séries d'essais en fonction du nombre de cycles effectué.

Pour toutes les particules testées, on observe une augmentation de la perte de charge résiduelle au fur et à mesure que le nombre de cycles effectués augmente. Pour les expériences avec l'alumine1 et l'alumine2, cette augmentation est plus rapide que pour le bois. Il semble que pour les particules fines d'alumine, la stabilisation de la valeur de la perte de charge résiduelle ne s'effectue qu'après au minimum environ 200 cycles de filtration.

Pour les essais sur le bois2, il se produit une importante augmentation de la perte de charge résiduelle dans les cinq premiers cycles (environ 200 Pa) puis l'augmentation s'effectue ensuite plus lentement. Un palier stable de perte de charge résiduelle semble être atteint dès le 50^{ème} cycle.

Dans le paragraphe I.4.3, il a été vu que plusieurs phénomènes peuvent contribuer à l'augmentation de la perte de charge résiduelle au fur et à mesure des cycles. Que la cause majeure provienne du colmatage interne ou d'un dépôt résiduel en surface, les propriétés (en particulier l'adhésion) et la taille des particules restent sans doute le facteur décisif dans l'évolution de la perte de charge résiduelle.

Des expériences qui seront présentées au chapitre IV (cf. paragraphe IV.6) montrent que les gâteaux de particules d'alumine sont bien décrochés et qu'il reste peu de particules en surface à l'état décolmaté. On peut donc supposer, dans le cas de l'alumine, que le colmatage interne contrôle principalement l'augmentation de la perte de charge résiduelle et que celle-ci s'effectue progressivement au cours des cycles, en relation avec la quantité croissante de particules piégées en profondeur.

Par contre, pour le bois2, l'augmentation très rapide de la perte de charge résiduelle dans les premiers cycles semble plutôt traduire un problème de décrochage du gâteau en surface. Il paraît en effet surprenant que les particules de bois, de plus grand diamètre médian, soit capables de colmater plus l'intérieur du medium que les particules d'alumine et ce, en seulement deux ou trois cycles. De plus, les observations qui seront présentées au paragraphe IV.6 montrent clairement la présence d'une couche de particules de plusieurs millimètres d'épaisseurs sur la surface des manches à l'état décolmaté. Ce dépôt de particules résiduelles entraîne inévitablement une perte de charge supplémentaire sur les manches ; celle-ci pourrait expliquer la brutale augmentation de la perte de charge résiduelle dès les premiers cycles.

Si les figures présentées dans l'annexe VIII montrent que la perte de charge résiduelle atteint un palier stable après environ 200 cycles pour l'alumine2 et environ 50 cycles pour le bois2, elles montrent également que la valeur de ce palier dépend des autres conditions opératoires de fonctionnement.

Le tableau III.3 récapitule les valeurs moyennes de la perte de charge résiduelle (ΔP_{res}) et de la durée d'un cycle de colmatage et de décolmatage (T_c) en fonction des conditions opératoires, pour les expériences sur l'alumine2 et le bois2.

Que ce soit pour l'alumine2 ou le bois2 et lorsque toutes les autres conditions opératoires sont constantes par ailleurs, plus la pression initiale du réservoir est petite, plus la perte de charge résiduelle est élevée et plus la durée d'un cycle est courte. Le gâteau est moins bien décroché lorsque la pression du réservoir est basse (puissance de décolmatage inférieure), ce qui entraîne une résistance à l'écoulement plus importante à l'état décolmaté. La durée moyenne d'un cycle se trouve ainsi raccourcie pour les faibles pressions de réservoir : la résistance spécifique du gâteau en construction reste constante au cours des cycles (cf. paragraphe I.2.2.3) mais la différence entre la perte de charge résiduelle (ΔP_{res}) et la perte de charge maximale avant décolmatage (ΔP_{max}) est désormais plus faible.

Conditions opératoires			Paramètres de description des cycles	
Aérosol	P_r (bar)	ΔP_{max}	ΔP_{res} (Pa)	T_c (s)
Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu m$, $C_p = 0,5 g.m^{-3}$)	7	$9.\Delta P_0$	330	510
	7	$13.\Delta P_0$	330	1100
	7	$19.\Delta P_0$	350	2820
	3	$19.\Delta P_0$	630	970
	3	$19.\Delta P_0$	750 *	520
Bois2 ($d_{pm} = 33,8 \mu m$, $C_p = 3,9 g.m^{-3}$)	3	$10.\Delta P_0$	320	1700
	1,5	$10.\Delta P_0$	420 **	850
	3	$20.\Delta P_0$	430	2600
	1,5	$20.\Delta P_0$	600 **	1850

* $t_d = 500$ ms

** décolmatage par plaques sur l'ensemble de la hauteur des manches

Tableau III.3 : Valeurs moyennes de la perte de charge résiduelle (ΔP_{res}) et de la durée d'un cycle de colmatage et de décolmatage (T_c) en fonction des conditions opératoires imposées aux manches

$$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}, t_d = 100 \text{ ms}, d_b = 10 \text{ mm}, \text{ configuration 1}$$

Une augmentation de la perte de charge maximale avant décolmatage conduit quant à elle à des augmentations de la perte de charge résiduelle (ΔP_{res}) et de la durée d'un cycle de filtration (T_c), toutes les autres conditions opératoires étant égales par ailleurs. L'augmentation de la perte de charge résiduelle est cependant faible pour l'alumine2 lorsque ΔP_{max} est compris entre 9 et $19.\Delta P_0$: le gâteau se décroche donc presque aussi bien à n'importe quelle perte de charge maximale dans cette gamme et entraîne ainsi une augmentation significative de la durée moyenne d'un cycle. Le phénomène associé à l'augmentation de la perte de charge résiduelle est plus marqué concernant le bois2, soulignant ici encore les difficultés plus grandes de convenablement décrocher le gâteau de particules de bois.

La seule expérience menée avec un temps de décolmatage supérieur à 100 ms ($t_d = 500$ ms pendant 30 cycles) conduit à perte de charge résiduelle plus élevée pour les manches à l'état décolmaté. Il semble donc que les décolmatages à des valeurs importantes de t_d amènent à une régénération moins grande des manches. L'influence de ce paramètre sera abordée de manière plus approfondie dans les chapitres V et VI.

III.2.3. Conclusions

Les cycles de filtration, effectués sur le dépoussiéreur pilote à manches, présentent une évolution de la perte de charge conforme à la filtration d'un aérosol solide sur un medium fibreux. Les différences observées dans l'évolution de la perte de charge résiduelle entre les deux types d'aérosols testés démontrent toute l'influence des propriétés des particules sur le colmatage interne ainsi que sur l'état décolmaté des manches. La perte de charge maximale avant décolmatage influence la durée de cycle alors que la pression du réservoir d'air comprimé influence plutôt les valeurs de perte de charge résiduelle. Cependant, ces deux paramètres restent intimement liés et participent tous deux à conditionner la manière dont s'effectuera le décolmatage pneumatique des éléments filtrants.

Le décolmatage est considéré comme la source principale de dégradation de la qualité de l'air à l'aval des éléments filtrants. La logique première voudrait donc que l'utilisateur procède à l'ajustement des conditions opératoires de telle manière que les durées de cycles soient les plus longues possibles et les décolmatages les moins fréquents possibles. Cependant, les mécanismes mis en jeu sont compliqués et les pics de concentration en particules, consécutifs aux décolmatages pneumatiques, dépendent également de nombreux autres paramètres.

III.3. EVOLUTION DE LA CONCENTRATION NUMERIQUE EN PARTICULES A L'AVAL AU COURS DES CYCLES

La concentration en particules à l'aval est le principal indicateur des performances d'un dépoussiéreur à media filtrants. Grâce à elle, il est possible de calculer l'efficacité de filtration d'une installation ou de s'assurer de la conformité des rejets particuliers aux regards des normes en vigueur. L'évolution de la concentration numérique mesurée à l'aval au cours des cycles a été étudiée sur le dépoussiéreur à manches pilote. L'objectif principal est de décrire qualitativement le comportement de la concentration à l'aval et de déterminer l'influence de certains paramètres.

III.3.1. Description pour les premiers cycles

Le suivi de la concentration numérique en particules à l'aval des manches filtrantes du dépoussiéreur pilote est représenté sur la figure III.2, pour les 10 premiers cycles de filtration de la série 2 (Alumine2).

De brutales augmentations de la concentration numérique en particules à l'aval existent juste après chaque décolmatage. Plusieurs mécanismes, qui seront étudiés en détail au chapitre VI, sont à l'origine de la formation de ces pics de concentration. Ces pics traduisent notamment la brutale chute de l'efficacité de filtration lorsque le gâteau de filtration est décroché. On note également la diminution progressive de la concentration à l'aval au cours d'un colmatage, lorsque le gâteau se constitue, jusqu'à atteindre des valeurs basses pour lesquelles l'efficacité de filtration est proche de 100 %. Rapidement au cours d'un cycle, le medium fibreux ne joue plus qu'un rôle de support au gâteau de filtration qui devient le principal collecteur de particules et qui contrôle majoritairement l'efficacité de filtration (cf. paragraphe I.2.3.2). Ces propriétés sont particulièrement bien mises en évidence entre 0 et 100 g.m⁻² sur la figure III.2 puisque le medium passe d'un état complètement vierge pour lequel il laisse passer un grand nombre de particules à un état colmaté avec présence du gâteau pour lequel, cette fois, l'efficacité de collecte est nettement améliorée.

Lors des 10 premiers cycles de filtration, il se produit sur cet exemple une diminution de la valeur crête des pics de concentration en particules. Ce phénomène correspond certainement à l'augmentation du colmatage interne du medium et à l'amélioration de l'efficacité de filtration du medium à l'état décolmaté par rapport à l'état neuf. Cependant, les valeurs crêtes des pics de concentration numérique en particules se stabilisent beaucoup plus rapidement que les valeurs de perte de charge résiduelle (cf. figures AVIII.1, AVIII.2 et AVIII.6 de l'annexe VIII). Quel que soit l'aérosol colmatant utilisé, les valeurs crêtes des pics de concentration sont stabilisées après seulement environ un dizaine de cycles ; leur fréquence augmente par contre au fur et à mesure que la durée des cycles diminue.

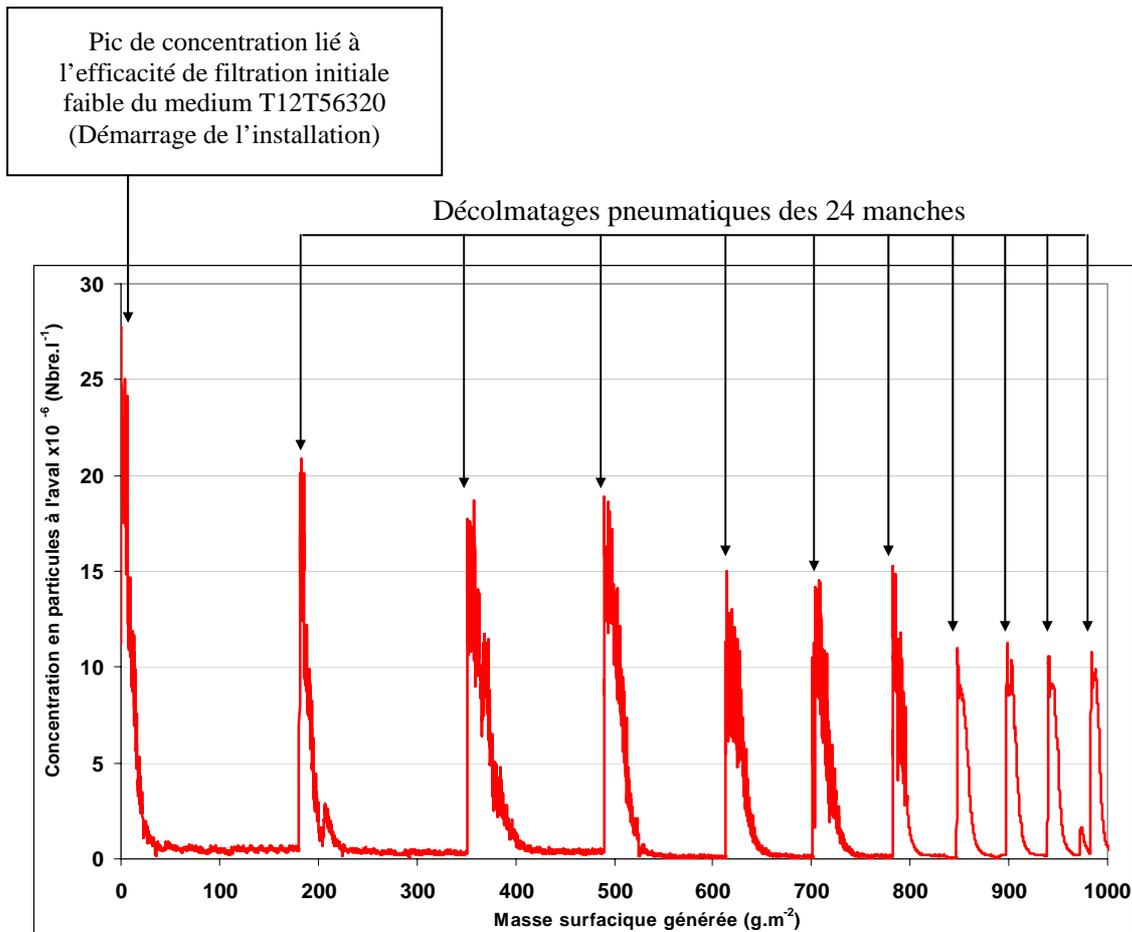


Figure III.2 : Evolution de la concentration numérique en particules en fonction de la masse surfacique générée de particules pour les 10 premiers cycles de colmatage et de décolmatage.

Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\text{max}} = 9.\Delta P_0$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$

III.3.2. Evolutions des pics de concentration numérique en particules au cours des cycles

Le tableau III.4 récapitule les valeurs crêtes moyennes des pics de concentration numérique en particules à l'aval, $\overline{C_{n,\text{max}}}$, en fonction des conditions opératoires, pour les expériences sur l'alumine1, l'alumine2 et le bois2.

Une augmentation des valeurs du diamètre médian des particules à filtrer, de 3,1 à 33,8 μm ($P_r = 3 \text{ bar}$, $\Delta P_{\text{max}} \approx 20.\Delta P_0$), conduit à une diminution importante des valeurs crêtes des pics de concentration numérique. Le medium à l'état décolmaté, privé en partie de l'efficacité de filtration du gâteau de particules en surface, collecte en effet plus facilement les particules de gros diamètres que les particules plus fines.

Les valeurs crêtes de concentration augmentent lorsque la pression du réservoir d'air comprimé de décolmatage est plus grande. Une augmentation de la pression du réservoir d'air comprimé provoque en effet des décolmatages plus puissants et un meilleur décrochage du gâteau de particules. Ces effets ont manifestement pour conséquences de dégrader l'efficacité de collecte pendant et juste après un décolmatage des manches.

Conditions opératoires			$\overline{C}_{n,max} \times 10^{-6}$ (Nbre.L ⁻¹)
Aérosol	P _r (bar)	ΔP _{max}	
Alumine1 (d _p = 2,5 μm, C _p = 0,72 g.m ⁻³)	7	15.ΔP ₀	50
	7	9.ΔP ₀	12,8
Alumine2 (d _p = 3,1 μm, C _p = 0,5 g.m ⁻³)	7	13.ΔP ₀	13,3
	7	19.ΔP ₀	14,4
	3	19.ΔP ₀	6,3
	3	19.ΔP ₀	8,3 *
Bois2 (d _p = 33,8 μm, C _p = 3,9 g.m ⁻³)	3	10.ΔP ₀	5,2
	1,5	10.ΔP ₀	1,5
	3	20.ΔP ₀	2,5
	1,5	20.ΔP ₀	1,1

* t_d = 500 ms

Tableau III.4 : Valeurs moyennes des concentrations maximales des pics de concentrations en particules à l'aval en fonction des conditions opératoires imposées aux manches
U_f = 4,7 cm.s⁻¹, t_d = 100 ms, d_b = 10 mm, configuration 1

L'influence de la perte de charge maximale avant décolmatage, ΔP_{max}, sur les valeurs de $\overline{C}_{n,max}$ dépend de l'aérosol filtré qui est considéré :

- Pour les essais sur l'alumine2, une augmentation de ΔP_{max} conduit à une légère augmentation de $\overline{C}_{n,max}$. Comme pour la perte de charge résiduelle, l'augmentation de ce paramètre reste faible lorsque ΔP_{max} est compris entre 9 et 19.ΔP₀.
- Pour le bois2, une augmentation de ΔP_{max} provoque une diminution de $\overline{C}_{n,max}$.

Les différences dans la nature du décolmatage, sont certainement à l'origine de cette différence dans les comportements.

Enfin, l'augmentation du temps de décolmatage fait augmenter les valeurs crêtes moyennes des pics de concentration numérique en particules relevées à l'aval. Ce résultat, valable pour les particules d'alumine2 n'a cependant pas été vérifié pour les particules de bois2.

Ces quelques considérations liées aux pics de concentration consécutifs aux décolmatages des manches permettent de se forger une première opinion quant à l'influence des conditions opératoires sur ce paramètre, mais elles seront plus largement étudiées dans le chapitre VI. Leur traitement ne reposera plus sur des aspects seulement qualitatifs tel que $\overline{C}_{n,max}$ mais sur des mesures quantitatives en continu de la concentration massique en particules à l'aval.

III.4. CONCLUSIONS

Ce chapitre permet de présenter les cycles de filtration qui ont été effectués sur les manches du dépoussiéreur pilote avec différents aérosols de colmatage. Les résultats permettent d'apprécier les évolutions de la perte de charge et de la concentration numérique en particules à l'aval au cours des cycles. L'analyse de ces essais conduit à plusieurs constats (qui ne sont valables que pour le dépoussiéreur pilote et pour les conditions opératoires spécifiées) :

- Le décolmatage pneumatique ne régénère jamais parfaitement le medium filtrant et il se produit une augmentation de la perte de charge résiduelle des manches au cours des cycles de filtration.
- L'augmentation de la perte de charge résiduelle des manches s'effectue différemment en fonction de l'aérosol de colmatage considéré :
 - L'augmentation est très progressive pour l'alumine ($d_{pm} = 2,5$ et $3,1 \mu m$). Les valeurs de perte de charge résiduelle semblent atteindre un palier stabilisé après environ 200 cycles de filtration.
 - L'augmentation est rapide dans les tous premiers cycles pour le bois ($d_{pm} = 33,8 \mu m$). Les valeurs de perte de charge résiduelle semblent atteindre un palier stabilisé après environ 50 cycles de filtration.
 - La manière dont s'effectue le colmatage interne et le détachement du gâteau de filtration dépend de l'aérosol filtré et pourrait expliquer les différences de comportement constatées lors de l'augmentation puis de la stabilisation de la perte de charge résiduelle.
- Après chaque décolmatage, il se produit un important pic de concentration en particules à l'aval des éléments filtrants. Ces pics de concentration semblent constituer une cause majeure de la dégradation de la qualité de l'air à l'aval.
- Les performances d'un medium filtrant neuf ne rendent pas compte de celles d'un dépoussiéreur en fonctionnement. L'efficacité de séparation d'un medium non-tissé avec un traitement de surface par calandrage thermique repose principalement sur la formation et la présence d'un gâteau de particules à sa surface. Seul, comme il peut l'être en début de fonctionnement ou après un décolmatage du gâteau de filtration, il est incapable d'assurer une efficacité équivalente.
- En début de vie des manches, les valeurs crêtes des pics de concentration numérique en particules diminuent significativement pour atteindre un palier stable après seulement une dizaine de cycles. Ce palier apparaît beaucoup plus rapidement que celui constaté pour la perte de charge résiduelle et alors même que le medium est encore en phase évolutive de conditionnement.
- Les valeurs de la perte de charge résiduelle, de la durée moyenne d'un cycle de filtration et de la concentration numérique maximale enregistrée à l'aval pendant un pic sont dépendantes d'un certain nombre de conditions opératoires. Les influences de certains de ces paramètres sont résumées dans le tableau suivant :

Paramètre	Evolution du paramètre	Evolution de ΔP_{res}	Evolution de T_c	Evolution de $\overline{C}_{n,max}$
ΔP_{max}	↗	↗	↗	↗ (alumine2) ↘ (bois2)
P_r	↗	↘	↗	↗
Nombre de cycles effectués	↗	↗ puis →	↘ puis →	↘ puis →
t_d	↗	↗	↘	↗ (alumine2)
d_{pm}	↗	-	-	↘

ΔP_{res} : perte de charge résiduelle à l'état décolmaté

T_c : durée moyenne d'un cycle de filtration

$\overline{C}_{n,max}$: valeur crête d'un pic de concentration numérique en particules à l'aval

Tableau III.5 : Influence de paramètres de filtration et de décolmatage sur ΔP_{res} , T_c et $\overline{C}_{n,max}$.

Ce tableau retranscrit la compétition qui existe entre l'amélioration des conditions aérauliques (recherche d'une petite perte de charge résiduelle après décolmatage et d'une grande durée de colmatage et donc de présence du gâteau) et l'amélioration de l'efficacité de filtration (recherche d'une petite concentration en particules à l'aval).

Tous ces points soulignent également le caractère perturbateur du décolmatage pneumatique dans le fonctionnement d'un dépoussiéreur à media filtrant et la nécessité d'étudier de manière approfondie cette technique de régénération.

Des compléments d'informations sur le fonctionnement du dépoussiéreur à manches pilote vont désormais être apportés dans les prochains chapitres. Les travaux vont se focaliser sur des points d'études précis pour lesquels les résultats seront beaucoup plus complets que la présentation générale qui a délibérément été effectuée dans ce premier chapitre.

CHAPITRE IV

**ETUDE DES EFFETS D'UN
DECOLMATAGE PNEUMATIQUE SUR LES
MANCHES D'UN DEPOUSSIÉREUR**

IV.1. INTRODUCTION

La synthèse bibliographique concernant le décolmatage pneumatique a permis de mettre en évidence les difficultés qui existent pour comprendre les mécanismes liés au détachement du gâteau et pour intégrer les différentes influences des conditions opératoires auxquelles sont soumises les manches filtrantes. Le manque de représentativité des bancs d'essais étudiés a également été invoqué et peut laisser penser que certains résultats établis par le passé pourraient être éloignés du comportement réel des manches pendant un décolmatage.

L'objectif de ce chapitre est de présenter de nouveaux résultats sur la caractérisation des effets du décolmatage pneumatique sur les manches filtrantes d'un dépoussiéreur de taille semi-industrielle. L'apport principal de cette étude réside dans le fait que l'ensemble des expériences va être mené sur un dépoussiéreur pilote unique qui place les manches dans des conditions identiques à celles d'un fonctionnement industriel.

L'ensemble des paramètres opératoires susceptibles d'influencer les effets d'un décolmatage pneumatique sont étudiés sur une seule et même installation. De plus, les interactions aérodynamiques éventuelles du fait du fonctionnement d'autres manches à proximité immédiate sont prises en compte dans la description du comportement des éléments filtrants.

Les résultats vont permettre de comprendre le comportement d'une manche filtrante soumise à un décolmatage par à-coup de pression et l'évolution de ce comportement en fonction des conditions opératoires imposées.

IV.2. DESCRIPTION DES EXPERIENCES

La description du matériel additionnel utilisé pour cette étude est fournie au paragraphe II.2. Il est principalement constitué par différents capteurs qui vont permettre d'enregistrer les conséquences d'un décolmatage pneumatique sur les manches filtrantes : capteurs de pression différentielle, accéléromètres miniatures, capteurs de vitesses axiale et frontale. Chacun de ces quatre capteurs existe en quatre exemplaires de manière à explorer l'ensemble de la hauteur d'une manche. Les signaux de réponses de ces capteurs vont permettre d'analyser le comportement des manches lors de l'envoi d'un à-coup de pression d'air comprimé à contre-courant du sens de filtration.

Les essais concernant cette étude se déroulent en plusieurs étapes.

Pendant l'étape 1, le générateur de poussières placé à l'amont n'est pas connecté et les résultats sont obtenus avec un flux d'air non empoussiéré sur les manches. Le comportement d'une manche filtrante est ainsi tout d'abord caractérisé à l'état neuf et sans gâteau de particules à sa surface. Des injections d'air comprimé sont alors déclenchées et les réponses des différents capteurs sont enregistrées. Le but de cette première série d'expériences est d'obtenir une détermination expérimentale de la réaction d'un medium filtrant à l'état neuf lorsqu'il est soumis à une injection d'air comprimé à contre-courant.

Lors de l'étape 2, les 24 éléments filtrants du dépoussiéreur sont soumis à 150 cycles de colmatage et de décolmatage (cf. figure AVIII.1 dans l'annexe VIII) avec l'aérosol Alumine1. Le nettoyage cyclique des 24 éléments filtrants est déclenché à une perte de charge maximale, ΔP_{\max} , prédéfinie ($\Delta P_{\max} = 13 \cdot \Delta P_0 = 570 \text{ Pa}$) suivant des conditions opératoires et selon une séquence de décolmatage inspirées d'un fonctionnement industriel classique (décolmatage des rangées de manches les unes après les autres, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $T = 0 \text{ m} \cdot \text{kg}$). Ce conditionnement des manches filtrantes a pour objectif l'obtention

d'une perte de charge résiduelle constante après décolmatage. On peut, dès lors, considérer que le colmatage interne des manches n'évolue plus et que les manches sont dans un état profondément différent de leur état neuf. A noter que pendant ces 150 cycles, les capteurs de pression différentielle, accéléromètres et capteurs de vitesse qui équipent certaines manches ne sont plus utilisés.

L'étape 3 consiste à déterminer expérimentalement la réaction des manches conditionnées et colmatées (par l'Alumine1 toujours) lorsqu'elles sont soumises à un décolmatage pneumatique. Pour ce faire, les réponses des différents capteurs (pression différentielle, accélération du medium, vitesse sur la hauteur d'une manche) sont de nouveau enregistrées lors des décolmatages. L'objectif est de déterminer les modifications du comportement des manches colmatées lors d'un décolmatage par rapport aux manches neuves.

Les influences de plusieurs paramètres sur le comportement des manches neuves (Etape 1) ou colmatées (Etape 3) vont être étudiées :

- Géométrie de la buse d'injection :
 - Diamètre de la buse (d_b)
 - Position de la buse par rapport à l'ouverture de la manche
- Paramètres de décolmatage :
 - Pression initiale du réservoir d'air comprimé (P_r)
 - Temps de décolmatage (t_d)
- Conditions opératoires de filtration :
 - Vitesse de filtration (U_f)
 - Perte de charge maximale avant décolmatage (ΔP_{max})
- Autres paramètres :
 - Nombre de manches décolmatées simultanément (N)
 - Tension des manches filtrantes (T)

Tous les résultats des nombreuses expériences qui ont été menées ne seront pas inclus dans ce chapitre. Seuls ceux les plus importants et les plus représentatifs seront présentés et commentés. L'annexe IX propose cependant un récapitulatif de l'ensemble des expériences qui ont été réalisées au cours des étapes 1 et 3.

Ces essais ont été complétés par une détermination de la masse surfacique résiduelle du medium sur la hauteur d'une manche décolmatée après plus de 200 cycles. Ils permettent de déterminer les zones d'action majoritaires du décolmatage sur la hauteur de la manche.

Enfin, un suivi de la pression dans le réservoir d'air comprimé pendant les décolmatages a aussi été effectué. Il permet de mesurer la chute de pression dans le réservoir lors du décolmatage pneumatique des manches, lorsque celle-ci se produit.

IV.3. RESULTATS POUR DES MANCHES NEUVES

IV.3.1. Description des phénomènes observés lors du décolmatage

IV.3.1.1. Comportement aéraulique d'une manche neuve

Des courbes de différence de pression (ΔP), de la vitesse de filtration frontale (U) et de la vitesse axiale (V) lors d'un décolmatage, en fonction du temps et de la position sur la manche, sont présentées sur la figure IV.1.

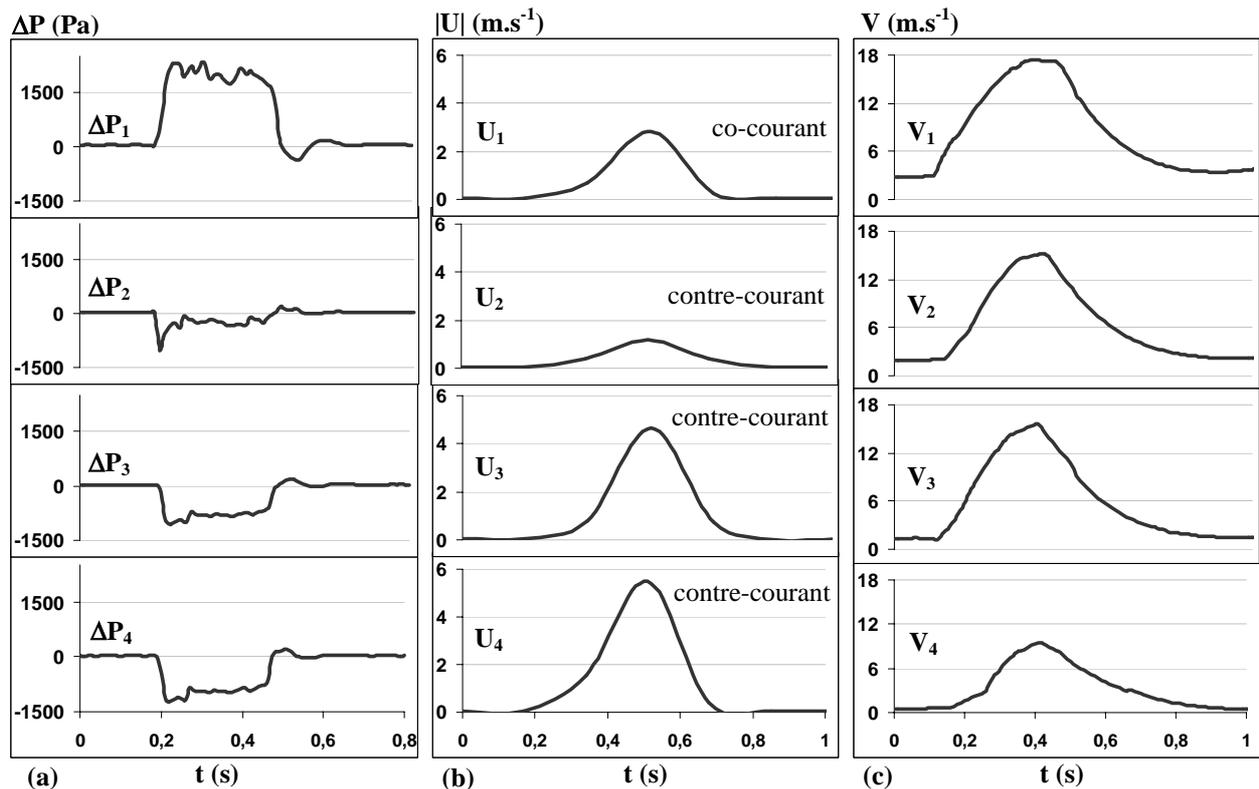


Figure IV.1 : Signaux de ΔP , U et V pendant un à-coup de pression en fonction de la position sur la manche
 $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_f = 7 \text{ bars}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$.

Remarque :

La perte de charge du medium dans la zone i est notée $\Delta P_i = P_{\text{enceinte}} - P_{\text{int},i}$ (Equation II.1). Elle vaut pour un écoulement de l'air de l'enceinte (amont) vers la coiffe (aval).

Cependant, lors d'un décolmatage, ΔP_i peut devenir négatif (bref écoulement d'air à contre-courant). Le terme « perte de charge » n'est alors plus adapté car la perte de charge d'un medium est par définition positive ; c'est pourquoi, on adoptera plutôt le terme « différence de pression ».

L'à-coup de pression entraîne une dépression importante dans le premier quart supérieur de la manche, au plus près de la buse ($P_{\text{enceinte}} > P_{\text{int},1}$ d'où un $\Delta P > 0$ - figure IV.1a). Cela provoque dans cette zone une aspiration brutale d'air vers l'intérieur de la manche. Ce phénomène est lié à un entraînement d'air par induction à proximité immédiate de l'orifice de la buse d'injection. Le jet d'air en phase d'expansion dans le quart supérieur de la manche provoque une aspiration d'air propre, émanant de l'aval du filtre via la coiffe, mais également d'air empoussiéré provenant de l'enceinte du dépoussiéreur. Ce phénomène est également observé par d'autres auteurs pour des manches filtrantes (Theodore et al. (1975), Humphries et

Madden (1983), Morris (1984), Lu et Tsai (1999)) et des filtres céramiques (Mai et al. (1996), Choi et al. (2001), Schildermans et al. (2004)). Une inversion de pression s'opère ensuite dans le deuxième quart supérieur de la manche. Sur le reste de la hauteur de la manche, on observe une surpression intérieure croissante au fur et à mesure que l'on se rapproche du fond de la manche et des pics négatifs pour ΔP_2 , ΔP_3 et ΔP_4 . Le phénomène de surpression est en fait accentué par la réflexion de l'air de décolmatage sur la coupelle métallique du fond de la manche (Ellenbecker et Leith (1979), Sievert et Löffler (1986)). La surpression en bas d'une manche neuve est d'environ 1200 Pa sur cet exemple.

La figure IV.1b représente l'évolution du profil de vitesse frontale en quatre points le long d'une manche neuve lors d'un à-coup de pression à contre-courant. Du fait de la dépression enregistrée dans le premier quart de manche lors de la mesure de ΔP_1 , le jet d'air crée une aspiration d'air et provoque une brutale augmentation de la vitesse de l'air, U_1 , dans le sens de filtration pour la partie supérieure de la manche. Cette vitesse frontale passe brutalement de $0,05 \text{ m.s}^{-1}$ à environ $2,8 \text{ m.s}^{-1}$ pendant la durée d'injection de l'air comprimé. Il s'opère ensuite une inversion du sens de la vitesse U entre le haut et le bas de la manche. Les pics observés pour les signaux U_2 , U_3 et U_4 atteignent des valeurs de plus en plus importantes au fur et à mesure que l'on se rapproche du bas de la manche et correspondent à une augmentation de la vitesse d'air à contre-courant. Sur cet exemple, les vitesses maximales des zones 3 et 4 sont supérieures à 4 m.s^{-1} soit 80 fois U_f . Il est légitime de penser qu'elles joueront un rôle non négligeable dans le décolmatage du gâteau de particules en bas de la manche. Nos observations concordent avec les résultats d'autres auteurs (Dennis et al. (1981), Sievert et Löffler (1987), Klimczack et Applewhite (1997)) qui concluent que la vitesse de perméation de l'air comprimé de décolmatage à travers la surface propre du medium est généralement comprise entre 10 et 100 fois la vitesse de filtration. A noter cependant que les mesures de la vitesse frontale doivent être exploitées avec précaution car elles restent des valeurs locales de la vitesse à la surface externe du medium et non pas une vitesse moyenne au sein du medium.

L'évolution de la vitesse intérieure axiale, V , en fonction de la hauteur d'une manche est présentée sur la figure IV.1c. La vitesse V_1 du jet d'air comprimé atteint des valeurs élevées en partie haute de la manche de l'ordre de 20 m.s^{-1} . La vitesse verticale chute le long de son trajet à l'intérieur de la manche et de son éloignement de la buse d'injection, pour atteindre des vitesses inférieures à 10 m.s^{-1} pour la position de mesure la plus basse. La perméation d'air à contre-courant sur une grande partie de la manche explique ce constat.

IV.3.1.2. Comportement mécanique d'une manche neuve

La figure IV.2 représente, à titre d'exemple, l'évolution temporelle de l'accélération du medium à l'état neuf en fonction de la hauteur sur la manche.

Pour un medium neuf, les plus fortes accélérations sont enregistrées dans le premier quart supérieur de l'élément filtrant, au plus près de la buse. Dans cette zone, les valeurs d'accélération maximale du medium atteignent plus de 180 g. Sur le reste de la manche, les accélérations restent faibles et ne conduisent pas à un mouvement du medium. A partir de ces seules observations sur manche neuve, il semble qu'à une distance éloignée du point d'injection de l'impulsion d'air comprimé, le détachement éventuel du gâteau de filtration ne puisse pas résulter des mouvements du medium liés à son accélération.

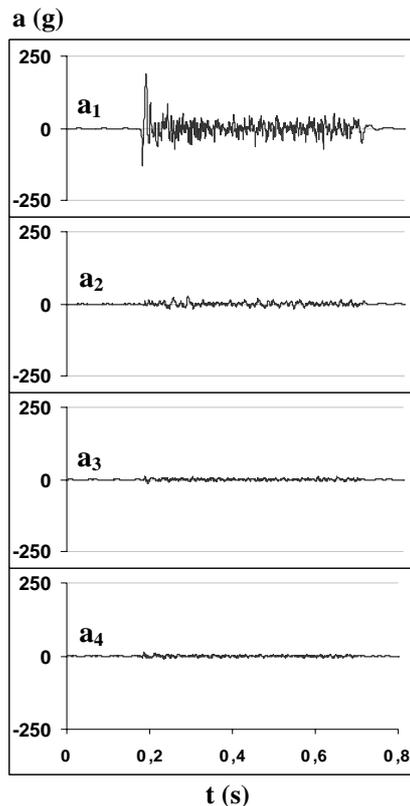


Figure IV.2 : Profil d'accélération du médium le long d'une manche filtrante neuve pendant un à-coup de pression à contre-courant

- $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}^{-1}$

Ces résultats sur manche neuve rejoignent les travaux de certains auteurs (Humphries et Madden (1983), Lu et Tsai (1998, 1999)) qui stipulent que l'accélération du médium conditionne les forces de décolmatage en partie supérieure de la manche alors que, en bas de manche, le flux à contre-courant domine seul le mécanisme de décrochage des particules.

IV.3.2. Influence des paramètres sur une manche en phase de décolmatage

IV.3.2.1. Géométrie de la buse d'injection

La taille de l'orifice circulaire de la buse d'injection et sa position par rapport à l'ouverture de la manche ont été étudiées.

Différents diamètres pour la buse d'injection (cf. figure II.7) ont été testés dans des conditions d'à-coup de pression identiques. Des exemples de résultats sur manche neuve concernant les valeurs de différence de pression et d'accélération sont regroupés sur la figure IV.3.

Les résultats montrent que plus le diamètre de la buse est grand, plus la surpression en bas de manche est importante. Les deux diamètres $d_b = 10$ et 15 mm fournissent des valeurs maximales de surpressions proches en bas d'une manche neuve (entre 1400 et 1500 Pa).

La buse d'orifice 10 mm provoque une dépression en haut de manche beaucoup plus importante que celles de 5 et de 15 mm : le volume d'air induit est plus important. C'est la raison pour laquelle la surpression en bas de manche pour la buse de 10 mm est à la fois plus grande que pour $d_b = 5 \text{ mm}$ et plus longue que pour $d_b = 15 \text{ mm}$. Des considérations similaires concernant la taille de la buse d'injection avaient été avancées par d'autres auteurs (De Ravin et al. (1988), Morris (1991), Lu et Tsai (1996, 1998, 1999)). Cependant seuls Lu et Tsai (1998, 1999) ont précisé l'existence d'une taille d'orifice optimale. Pour des tailles supérieures à la taille de buse optimale, l'onde de choc faiblit et l'énergie se dissipe inutilement, sans améliorer les capacités du décolmatage.

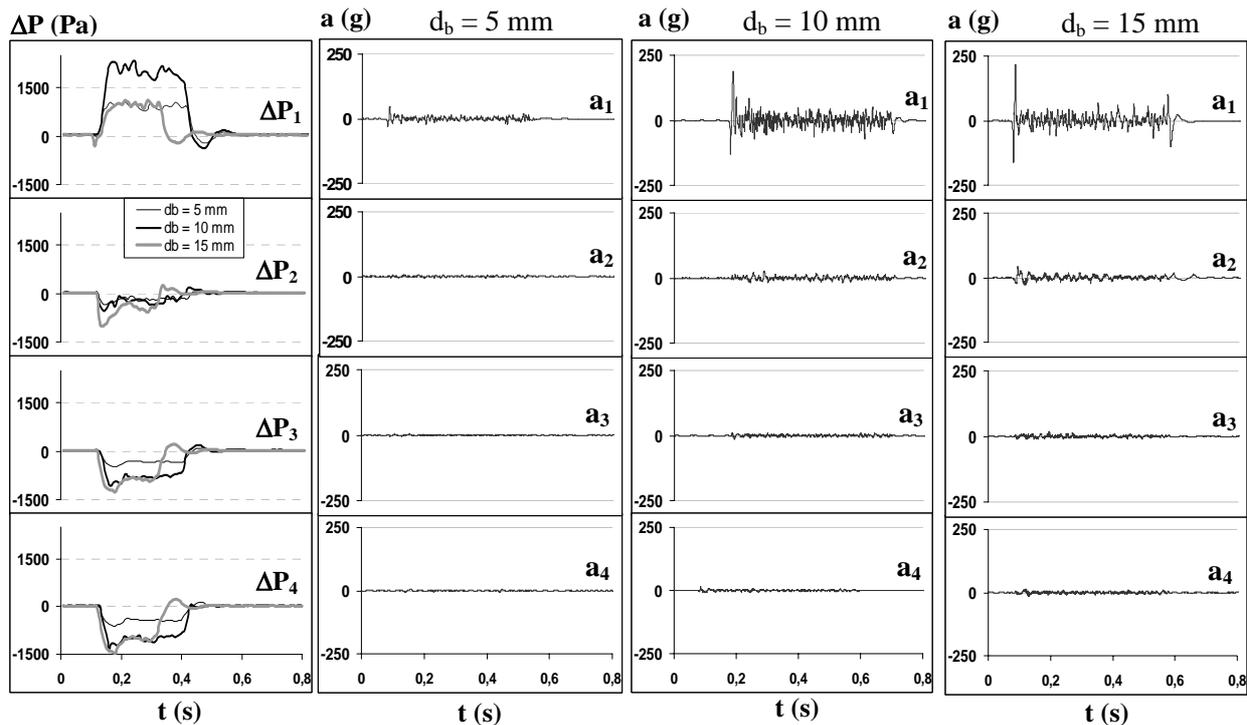


Figure IV.3 : Influence du diamètre de la buse d'injection sur la différence de pression et l'accélération.
Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$

L'effet du diamètre de la buse d'injection d'air comprimé sur l'accélération est également représenté sur la figure IV.3. Les résultats montrent que plus le diamètre d_b est grand, plus les valeurs maximales d'accélération du médium en haut de manche, lors de son mouvement initial, sont grandes. L'effet de taille optimale pour l'orifice de 10 mm n'apparaît plus lors de l'étude du mouvement du médium filtrant.

L'influence de la distance entre la buse d'injection et l'ouverture de la manche (cf. figure II.7 au paragraphe II.2) est illustrée sur les courbes de la figure IV.4.

Lorsque la buse de diamètre $d_b = 10 \text{ mm}$ débouche juste en partie supérieure d'une manche neuve (position 2) ou s'introduit dans le premier quart supérieur de cette manche (position 3), les profils changent par rapport à ce qui avait été décrit précédemment (figures IV.1a et IV.2). La dépression enregistrée en ΔP_1 s'accroît, logiquement, au fur et à mesure que le jet d'air comprimé se rapproche du point de mesure (figure IV.4a). La zone du médium subissant une dépression s'étend à l'ensemble de la moitié supérieure de la manche. Pour les points de mesures 3 et 4, les signaux de différence de pression montrent qu'il se produit une surpression de valeur similaire (environ 1300 – 1400 Pa) quelle que soit la position de la buse considérée. Les fronts d'accélération se décalent vers le bas, d'une distance environ égale à la distance à laquelle le point d'injection d'air comprimé est descendu (figures IV.4c et IV.4d). Ceci confirme que la zone de forte accélération du filtre est provoquée par une interaction entre le jet d'air et le médium. Cette interaction se produit en dessous de la buse d'injection de l'air comprimé de décolmatage, à une distance qu'il n'est pas possible de mesurer précisément avec ces seuls essais (environ 0,25 m). Dans tous les cas de figure, le bas de la manche ne subit aucun mouvement brutal.

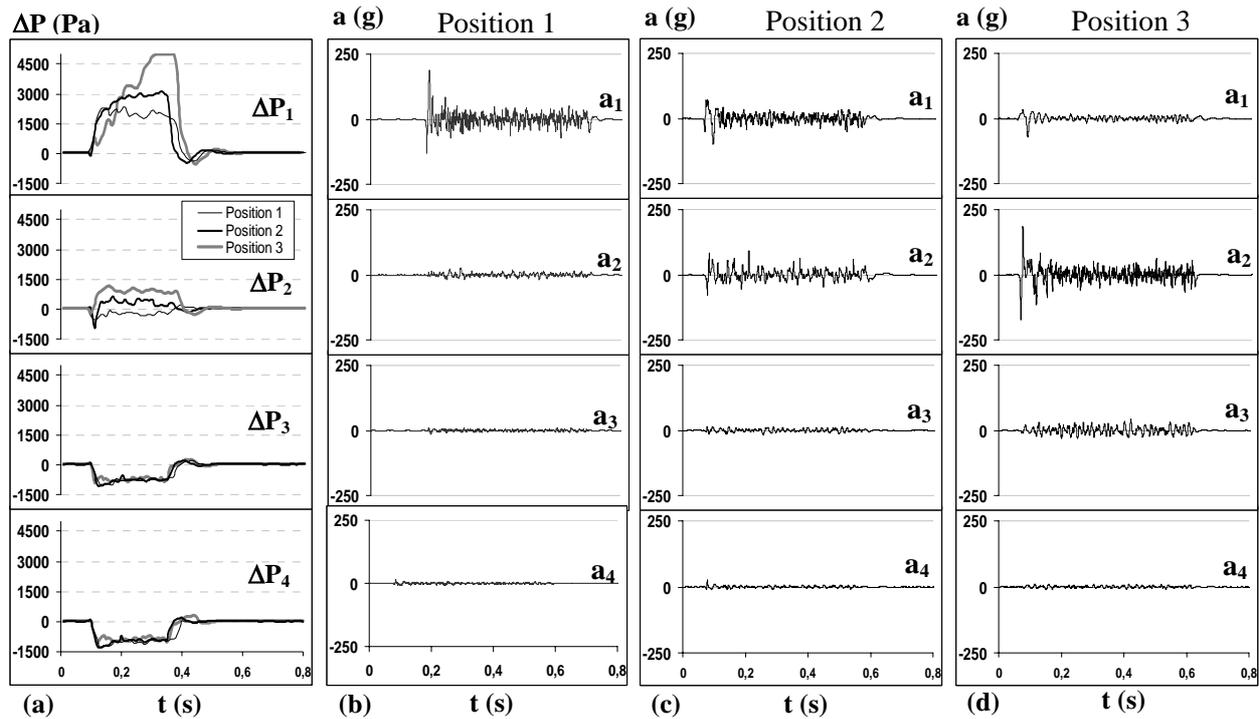


Figure IV.4 : Influence de la position de la buse d'injection sur la différence de pression (a) et l'accélération le long d'une manche – (a) position 1, (b) position 2 , (c) position 3.
 - Manche neuve , $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Cependant, l'introduction du système d'injection dans la manche n'est pas souhaitable dans la mesure où le phénomène d'aspiration d'air par induction en haut de manche se produit de manière plus intense et sur une plus large zone (figure IV.4a) et de manière plus intense qu'auparavant sans améliorer les accélérations du medium. On constate en effet que les valeurs de dépression peuvent être augmentées d'un facteur trois et que la surface d'action du phénomène de succion est multipliée par deux. Ceci, ajouté au fait que la maintenance des filtres n'est pas facilitée par des systèmes d'injection plus volumineux et intrusifs, démontre qu'il n'est pas préférable d'introduire la buse d'injection dans la manche. D'autres auteurs (Rothwell (1986), Lu et Tsai (1996) pour les manches et Mai et al. (1996) pour des bougies filtrantes) aboutissent aux mêmes conclusions et préconisent même d'éloigner au maximum la buse d'injection de l'ouverture de la manche pour assurer une surpression dans la manche sur le maximum de surface et pour s'affranchir des effets néfastes d'aspiration d'air en provenance de l'amont pour le haut de manche. A noter que l'équation I.18, appliquée aux caractéristiques du dépoussiéreur pilote étudié, donne une valeur de 0,34 m pour la distance optimale entre la buse d'injection et l'ouverture de la manche. Cette distance proposée, plus haute de 26 cm par rapport à la distance standard des buses d'injection du dépoussiéreur permettrait peut être de s'affranchir de la dépression d'air enregistrée en haut de manche.

IV.3.2.2. Paramètres de décolmatage

Pression initiale du réservoir d'air comprimé de décolmatage (P_r)

Les influences de la pression initiale du réservoir d'air comprimé, de la durée d'impulsion de l'air comprimé de décolmatage et du nombre de manches décolmatées simultanément ont été étudiées.

Les effets de la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la différence de pression et les accélérations du medium le long d'une manche neuve sont représentés sur la figure IV.5.

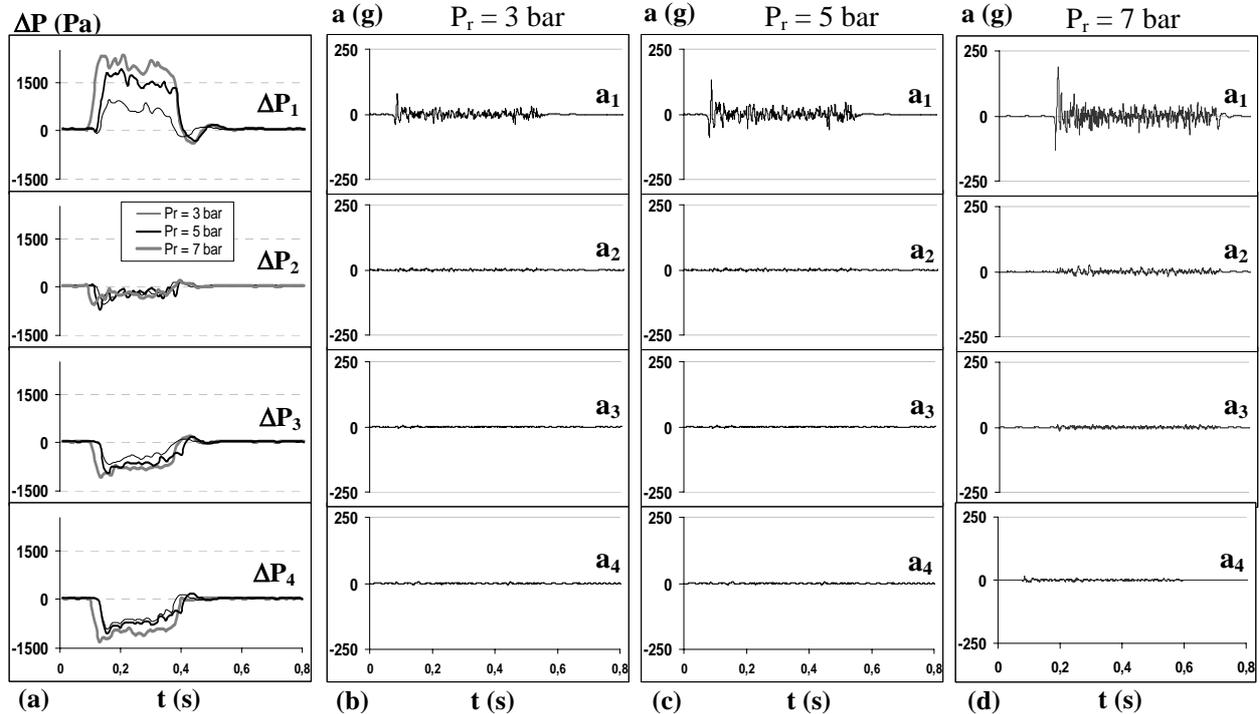


Figure IV.5 : Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la différence de pression (a) et l'accélération le long d'une manche - (b) $P_r = 3$ bar, (c) $P_r = 5$ bar, (d) $P_r = 7$ bar
 - Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Quelle que soit la pression du réservoir fixée, il se produit un mouvement du medium uniquement dans la zone 1 de la manche neuve. Les accélérations qui y sont enregistrées sont d'autant plus grandes que la pression de l'air comprimé est importante. Ainsi, la valeur d'accélération maximale est augmentée de près de 60% en haut de manche entre $P_r = 3$ bar et $P_r = 7$ bar.

Plus la pression initiale du réservoir d'air comprimé est grande, plus les variations de différence de pression en haut et en bas de la manche sont grandes (figure IV.5a). La dépression enregistrée dans la zone supérieure de la manche est logiquement accentuée lorsque la pression P_r augmente. En effet, la puissance du jet d'air et le volume d'air comprimé injecté augmentent lorsque la pression initiale du réservoir d'air comprimé est plus grande. Ainsi, la valeur maximale de la vitesse axiale du jet d'air pour la position 1 est égale à $V_1 = 13 \text{ m.s}^{-1}$ pour $P_r = 3$ bar et $V_1 = 18 \text{ m.s}^{-1}$ pour $P_r = 7$ bar. Les valeurs moyennes de surpressions en bas de manches sont multipliées par 1,5 lorsque la pression du réservoir passe de 3 à 7 bars. Cela implique des vitesses d'air à contre-courant en bas de manche bien plus importantes pour les grandes pressions de réservoir que pour les petites, ce qui est montré sur la figure IV.6.

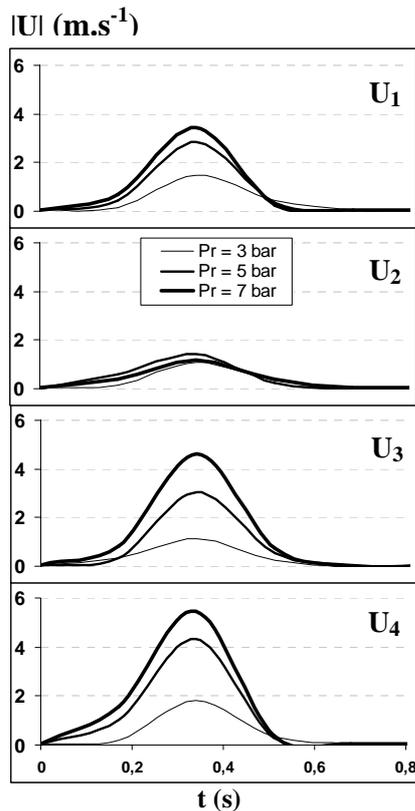


Figure IV.6 : Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la vitesse frontale mesurée à la surface d'une manche - Manche neuve , $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1 , $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Les résultats concernant l'évolution de la vitesse frontale en fonction de la position sur la hauteur d'une manche sont conformes aux attentes. Dans la zone 1 de la manche, la dépression enregistrée provoque une aspiration d'air en provenance du compartiment amont. Cette dernière crée une augmentation de la vitesse de filtration d'autant plus importante que la pression du réservoir d'air comprimé est grande. Les vitesses d'air à contre-courant dans la partie inférieure de la manche sont également d'autant plus grandes que la pression du réservoir est élevée. U_4 est par exemple considérablement augmentée entre $P_r = 3 \text{ bar}$ (environ 2 m.s^{-1}) et $P_r = 7 \text{ bar}$ ($5,5 \text{ m.s}^{-1}$). Ces valeurs de vitesses à contre-courant sont élevées et joueront certainement un rôle important dans le décolmatage du gâteau en bas de manche.

Durée d'impulsion de l'à-coup de pression (t_d)

La figure IV.7 présente les signaux de différence de pression (a) et de vitesse frontale de l'air (b) le long d'une manche en fonction de la durée d'impulsion de l'à-coup de pression, t_d . Aucune différence significative n'apparaît, en terme de valeurs crêtes, dans la comparaison des signaux de perte de charge ΔP (figure IV.7a) et de vitesse frontale U (figure IV.7b) lorsque la durée du décolmatage varie. Par contre, la durée des phénomènes est d'autant plus importante que le temps de décolmatage est élevé.

Le medium subit donc les conséquences de l'à-coup de pression d'autant plus longtemps que la durée de décolmatage est longue. Cela se traduit notamment par une dépression et donc une aspiration d'air plus longue en partie haute de la manche : le volume d'air induit par le jet est d'autant plus important que le temps de décolmatage est long. L'influence de t_d est comparable en bas de manche puisque la surpression et donc le refoulement de l'excès d'air à contre-courant durent plus longtemps lorsque le temps de décolmatage est plus grand.

Enfin, les résultats montrent également que l'action de secouage du medium mise en évidence en haut de manche dure également plus longtemps lorsque la durée d'impulsion du jet d'air est augmentée (figure IV.7c).

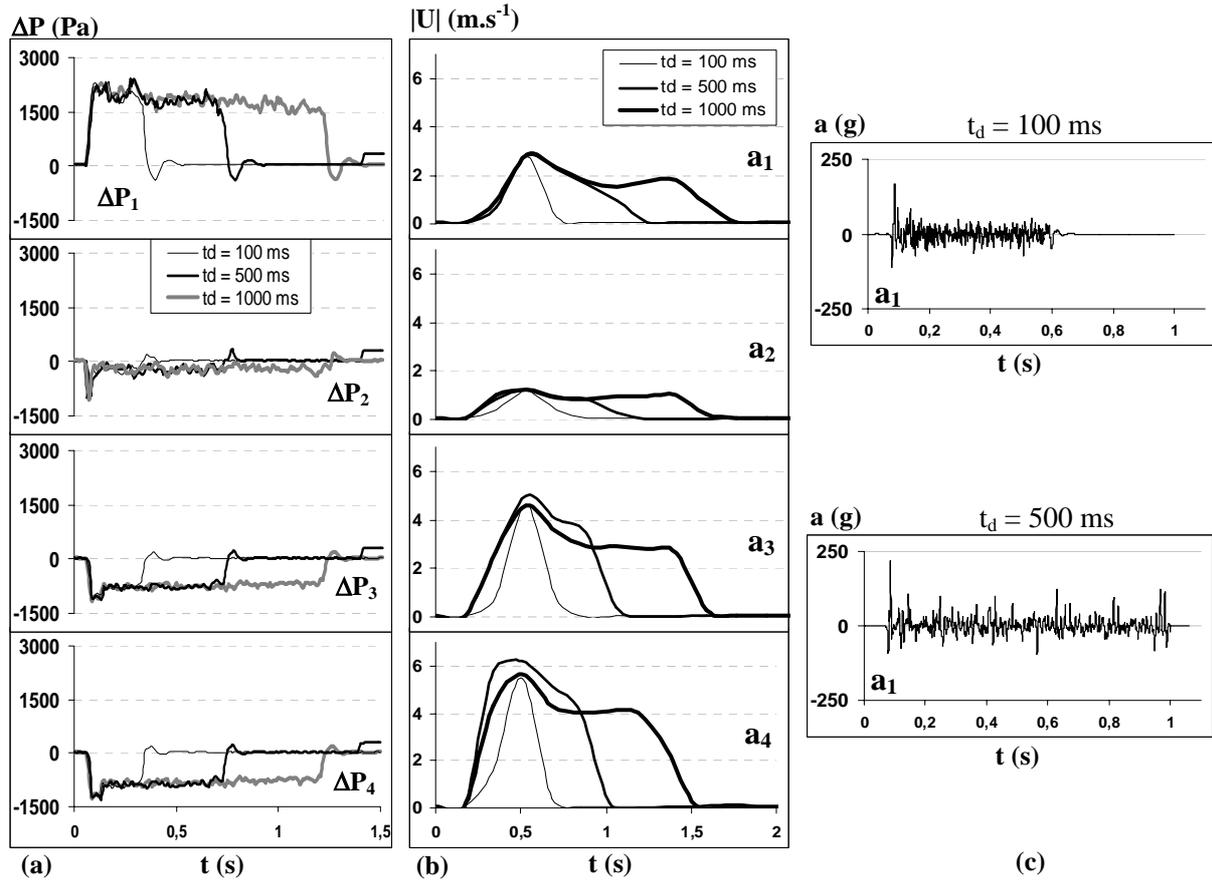


Figure IV.7 : Influence de la durée d'impulsion sur la différence de pression (a), la vitesse frontale (b) et l'accélération du medium (c) le long d'une manche
 – Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

La modification du temps de décolmatage est par contre sans effet significatif sur le mouvement initial du medium et sur les valeurs maximales des accélérations produites sur une manche neuve (tableau IV.1). L'impulsion provoquée par la décharge de l'air comprimé dans la manche reste initialement identique quelle que soit la durée de cette impulsion.

td (ms)	Accélération maximale (g)			
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
100	189,6	23,5	12,5	15,7
200	177,8	25,9	12,1	14,4
300	196,8	23,2	11,8	16,3
400	197,6	22,4	12,3	17,1
500	176,5	26,8	13,2	14,6
600	185,1	24,1	12,4	14,3
700	195,1	24,4	12,4	12,9
800	181,6	24,8	11,7	15,3
900	188,4	22,2	14	17,8
1000	194,1	24,8	13,3	17,5

Tableau IV.1 : Valeurs des accélérations maximales du medium enregistrées sur une manche neuve en fonction de la position considérée sur la hauteur de la manche et en fonction du temps de décolmatage
 – $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Nombre de manches décolmatées simultanément (N)

L'influence du nombre de manches décolmatées simultanément, N, sur la différence de pression et sur l'évolution du signal d'accélération du medium sur la hauteur d'une manche

est présentée sur la figure IV.8. Comme il peut être observé sur l'annexe IX, des expériences ont été menées pour $N = 1, 5, 13, 18,$ et 24 manches ; l'ensemble de ces travaux permettent de corroborer les conclusions apportées dans ce paragraphe. Toutefois, pour des raisons de clarté, seuls certains des résultats expérimentaux vont être présentés.

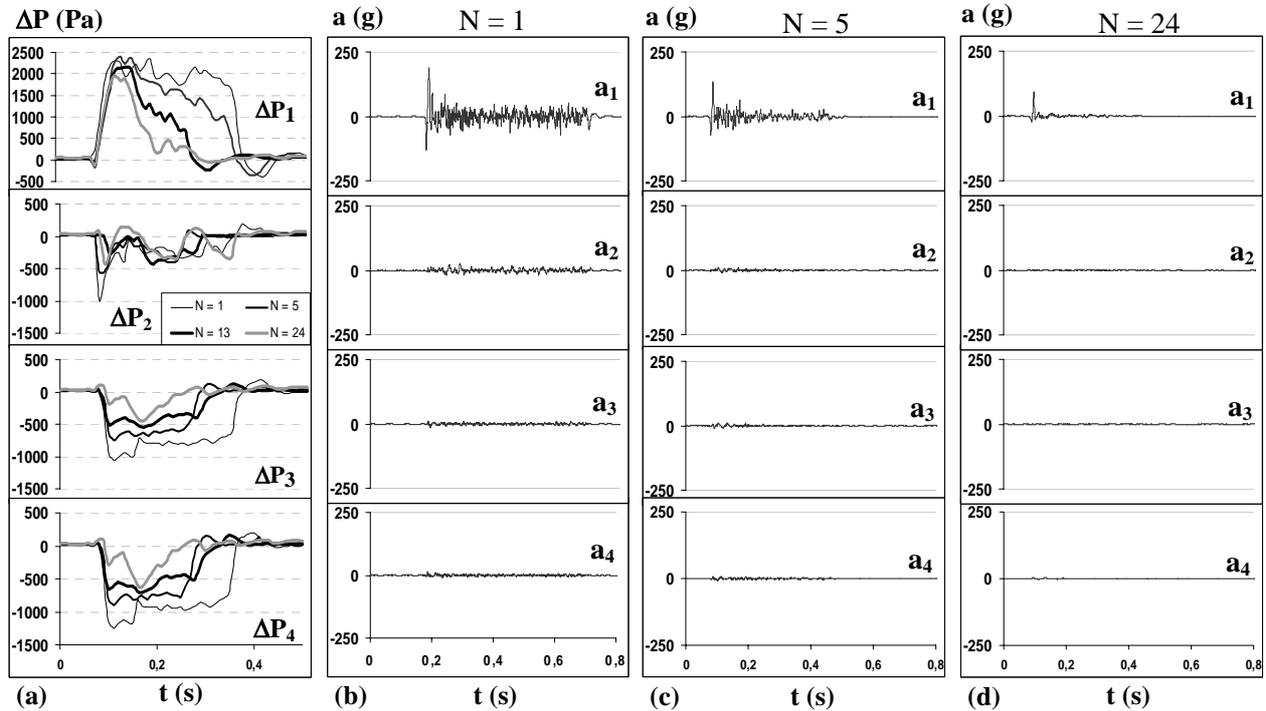


Figure IV.8 : Influence du nombre de manches décolmatées simultanément sur la différence de pression (a) et sur l'accélération du medium (b, c et d) le long d'une manche – Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $t_d = 100 \text{ ms}$, $T = 0 \text{ kg.m}$ –

Ces résultats montrent que le nombre de manches décolmatées n'a pas d'influence marquante sur ΔP et sur l'accélération lorsque les expériences pour $N = 1$ et $N = 5$ sont comparées. On note tout de même une différence d'environ 60 g entre les valeurs maximales des signaux d'accélération pour $N = 1$ ($a_{\max} = 188,1 \text{ g}$) et pour $N = 5$ ($a_{\max} = 126,5 \text{ g}$).

Lorsque le nombre de manches décolmatées simultanément est plus grand, les courbes de ΔP sont modifiées : les amplitudes des signaux sont plus faibles et la durée d'action du jet décroît lorsque N augmente. Il s'ensuit une diminution des vitesses d'air à contre-courant en bas de manche lorsque N est important : ainsi U_4 chute à $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ pour $P_r = 7 \text{ bar}$ et moins de $0,2 \text{ m.s}^{-1}$ pour $P_r = 3 \text{ bar}$ lorsque les 24 manches sont décolmatées simultanément, contre respectivement $5,5$ et 2 m.s^{-1} pour une manche seule. Le mécanisme de flux d'air à contre-courant dans la partie inférieure de la manche ne pourra pas être efficace si trop de manches sont décolmatées simultanément.

L'intensité des signaux d'accélération diminue également progressivement lorsque le nombre de manches décolmatées simultanément augmente. Les courbes de la figure IV.8d montrent que l'à-coup de pression d'air comprimé est beaucoup moins à même de produire un brutal mouvement du medium lorsque les 24 manches sont décolmatées simultanément. L'accélération résultante en a_1 est beaucoup plus faible et les zones du bas de la manche ne subissent aucun mouvement.

Les allures de profils de perte de charge (ΔP) le long d'une manche sont donc comparables que le décolmatage s'effectue sur une seule manche ou sur 24 (figure IV.8). Cependant,

derrière ces résultats globaux de même nature se cachent des différences de comportements beaucoup plus marquées. La différence de pression pour la position i , ΔP_i , résulte de la différence entre la pression extérieure, P_{enceinte} , et la pression intérieure pour la position i , $P_{\text{int},i}$. La figure IV.9 montre les évolutions de P_{enceinte} et $P_{\text{int},i}$ (pressions effectives) le long d'une manche filtrante lorsque 1 puis 24 manches sont décolmatées.

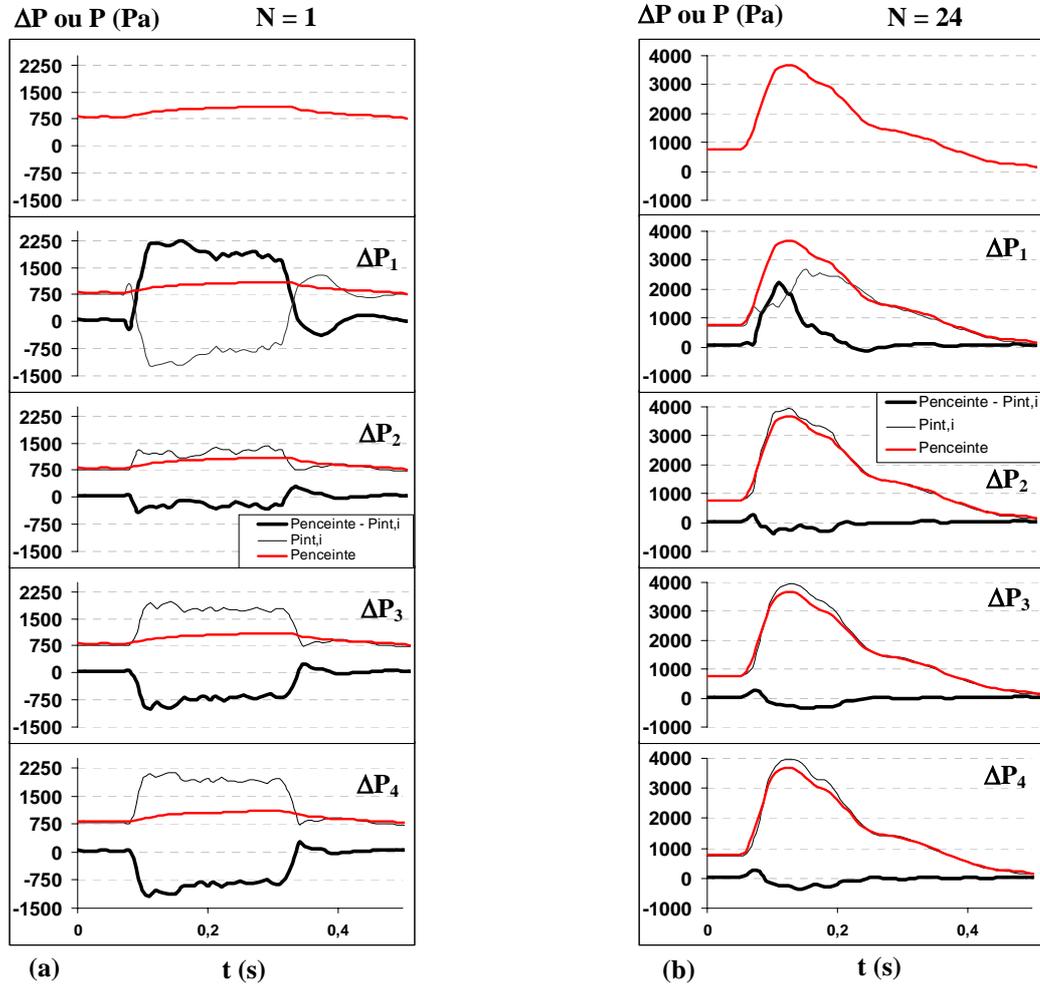


Figure IV.9 : Evolutions de P_e et $P_{\text{int},i}$ pendant un à-coup de pression – (a) $N = 1$, (b) $N = 24$ – Manche neuve, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, Position 1, $T = 0 \text{ kg.m}^{-3}$

Lors d'un décolmatage, la pression extérieure (P_{enceinte}) est identique pour toutes les positions sur la hauteur de la manche étudiée. C'est la pression à l'amont des éléments filtrants qui règne, de façon homogène, dans l'enceinte de filtration du dépoussiéreur. L'air comprimé sous pression à 7 bar, qui est injecté pour le décolmatage d'une seule manche, modifie très peu la valeur de P_{enceinte} . Une montée en pression d'environ 250 Pa à l'amont des manches est constatée du fait de l'injection de ce volume d'air à contre-courant (figure IV.9a). L'air comprimé injecté pour $N = 24$, modifie par contre fortement le comportement de la pression extérieure aux manches. La pression extérieure subit alors une augmentation de 3000 Pa du fait qu'un volume d'air comprimé plus important se retrouve dans l'enceinte (figure IV.9b). Les résultats de la figure IV.8a avaient montré que la manche subit une dépression dans le premier quart supérieur et une surpression grandissante sur le reste de sa hauteur. Quel que soit le nombre de manches décolmatées, les valeurs de P_{enceinte} augmentent du fait de l'augmentation de pression apportée par l'air de décolmatage dans l'enceinte de filtration. L'augmentation de la pression extérieure est d'autant plus grande que le nombre de manches

décolmatées simultanément est élevé. La pression intérieure varie suivant le point de mesure le long de la manche et suivant le nombre de manches décolmatées simultanément.

Lorsque $N = 1$, il se produit une forte diminution de $P_{int,1}$ (dépression dans le quart supérieur de la manche) du fait d'une induction d'air produit par l'injection d'air comprimé. Sur le reste de la hauteur de la manche, des augmentations de P_{int} sont observées (surpression à l'intérieur de la manche d'autant plus élevée que le point de mesure est situé bas dans la manche).

Lorsque $N = 24$, $P_{int,1}$ ne présente pas de valeurs négatives et l'ensemble de l'intérieur de la manche subit donc une augmentation forte de pression. L'injection d'air comprimé est moins intense dans ce cas, c'est pourquoi l'aspiration d'air par induction n'existe plus pour $N = 24$. Les valeurs maximales atteintes par $P_{int,i}$ sont également très supérieures pour $N = 24$.

Finalement, les évolutions des paramètres $P_{enceinte}$ et $P_{int,i}$ sont très différentes selon le nombre de manches décolmatées simultanément. Ces divergences de comportement s'expliquent par les différences de volume d'air comprimé injecté dans les manches et dans l'enceinte de filtration mais également par la diminution de la puissance du jet d'air pour un grand nombre de manches décolmatées en même temps.

Etude de $P_r = f(t)$

Les différences de comportement qui viennent d'être décrites lorsque la durée d'impulsion (t_d) et le nombre de manches décolmatées simultanément (N) augmentent pourraient trouver leur origine dans l'incapacité du réservoir d'air comprimé à maintenir une puissance de décolmatage identique suivant les conditions imposées. Le volume du réservoir d'air comprimé pourrait s'avérer trop petit et son temps de recharge via le réseau trop long pour pouvoir assurer une intensité de décolmatage identique pour $t_d = 100$ ms et $t_d = 1000$ ms ou encore pour $N = 1$ et $N = 24$. Sur la base de cette hypothèse, un suivi de la pression du réservoir d'air comprimé au cours du temps pendant différents décolmatages a été réalisé. Certains résultats sont présentés sur la figure suivante :

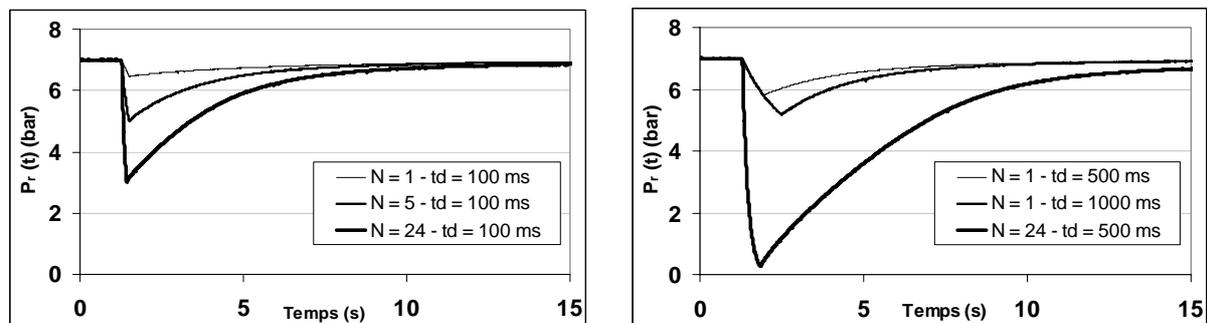


Figure IV.10 : Influence du nombre de manches décolmatées simultanément et du temps de décolmatage sur la pression du réservoir d'air comprimé – $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$ – $P_r = 7 \text{ bar}$ – $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1 , $T = 0 \text{ kg.m}$.

Plus le nombre de manches décolmatées simultanément est grand et/ou plus la durée d'impulsion du décolmatage est longue, plus la chute de pression dans le réservoir d'air comprimé est importante. Le réseau d'air comprimé ne recharge pas assez rapidement le réservoir pour que ce dernier soit en mesure de maintenir la pression d'air de décolmatage constante au cours de l'impulsion. Pour ne pas s'exposer à des baisses de puissance de décolmatage, il faut donc veiller à ne pas décolmater un nombre de manches trop important simultanément et garder des valeurs de durée d'impulsion communément utilisée en dépoussiérage (50 à 150 ms). Le décolmatage séquentiel, qui consiste à décolmater l'un après l'autre des groupes d'un nombre réduit de manches, paraît donc constituer un bon compromis.

Son étude sera effectuée au chapitre V pour le dépoussiéreur à manches pilote. Celle-ci inclura une évolution de $P_r = f(t)$ lors d'un décolmatage séquentiel.

IV.3.2.3. Conditions opératoires de filtration

La vitesse de filtration est le seul paramètre opératoire dont l'influence a été testée pour la caractérisation sur manche neuve. Les résultats sont présentés pour la zone 4 de la manche sur la figure IV.11.

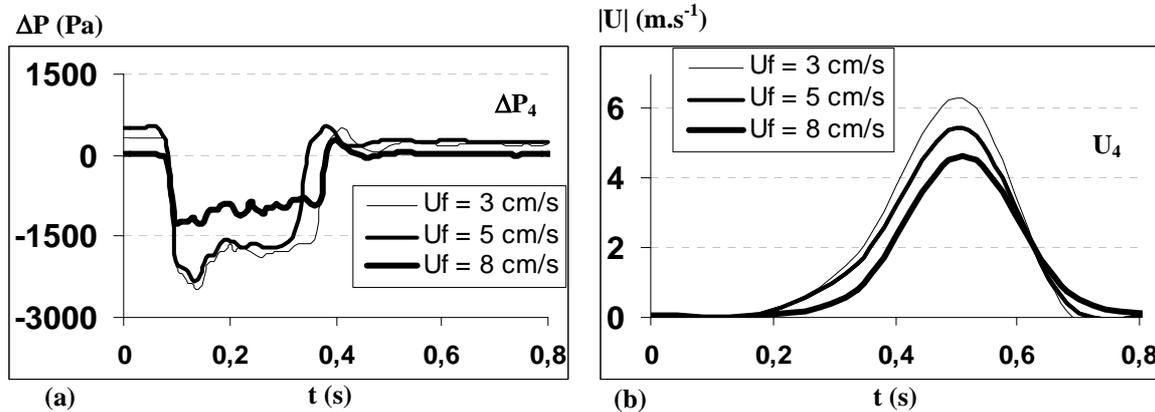


Figure IV.11 : Influence de la vitesse de filtration sur la différence de pression (a) et la vitesse frontale à contre-courant (b) dans la zone 4 – $t_d = 100$ ms, $P_r = 7$ bar, $d_b = 10$ mm, position 1, $N = 1$, $T = 0$ kg.m.

L'influence de la vitesse de filtration sur le comportement d'une manche neuve pendant le décolmatage est faible. Les effets les plus marquants sont toutefois visualisés en bas de la manche. On observe de légères augmentations des valeurs maximales de surpressions et de vitesses d'air à contre-courant lorsque la vitesse de filtration diminue. Ainsi, la vitesse d'air de décolmatage à contre-courant est égale à $6,3 \text{ m.s}^{-1}$ pour $U_f = 3 \text{ cm.s}^{-1}$ et à $4,6 \text{ m.s}^{-1}$ pour $U_f = 8 \text{ cm.s}^{-1}$. Ce phénomène est logique puisque l'air de décolmatage rencontre moins de résistance lorsque U_f est petite plutôt que lorsque U_f est grande. Par ailleurs, l'influence de la vitesse de filtration est très peu significative sur l'accélération et donc le mouvement du medium. Elle devrait par contre prendre de l'importance lors du décrochement du gâteau à l'amont car elle jouera alors un rôle sur la redéposition des particules décolmatées.

Aucun effet de la tension imposée sur le medium n'a été observé dans la gamme testée. Cela est surprenant car on aurait pu s'attendre à une modification des propriétés d'élasticité et de flexibilité du medium en fonction de la tension de la manche et donc à des changements dans signaux d'accélération. La présence des anneaux de soutien des manches à intervalle régulier sur leur hauteur est peut être à l'origine de ce constat. Ces éléments peuvent en effet empêcher la propagation d'une éventuelle onde de choc mécanique dans le medium.

IV.4. RESULTATS POUR DES MANCHES COLMATEES AVEC PRESENCE DU GATEAU EN SURFACE

Les résultats de l'étape 1, présentés dans le paragraphe IV.2, ont permis de comprendre comment réagissent les manches du dépoussiéreur pilote à l'état neuf pendant un à-coup de pression d'air comprimé à contre-courant. L'objectif des résultats de l'étape 3 est désormais de déterminer le comportement des manches pendant un décolmatage pneumatique lorsque celles-ci sont conditionnées et colmatées. Rappelons que ces travaux interviennent après 150 cycles de colmatage et de décolmatage (cf. figure AVIII.1 dans l'annexe VIII) dans les

conditions suivantes : décolmatage des rangées de manches les unes après les autres, Alumine1, $P_r = 7 \text{ bar}$, $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $T = 0 \text{ m.kg}$.
Le comportement est-il modifié par le colmatage interne et par le colmatage de surface ? Quelles sont les zones les mieux décolmatées ? Quels mécanismes participent à la régénération du medium ? Autant de questions qui ont motivé la collecte de ces résultats.

IV.4.1. Description des phénomènes observés lors du décolmatage

IV.4.1.1. Comportement aéraulique d'une manche colmatée avec présence du gâteau en surface

La figure IV.12 représente, à titre d'exemple, les évolutions temporelles de la différence de pression (a) et de la vitesse axiale interne du jet d'air (b) en fonction de la hauteur de la manche, pour un medium vierge et pour un medium colmaté avec présence du gâteau.

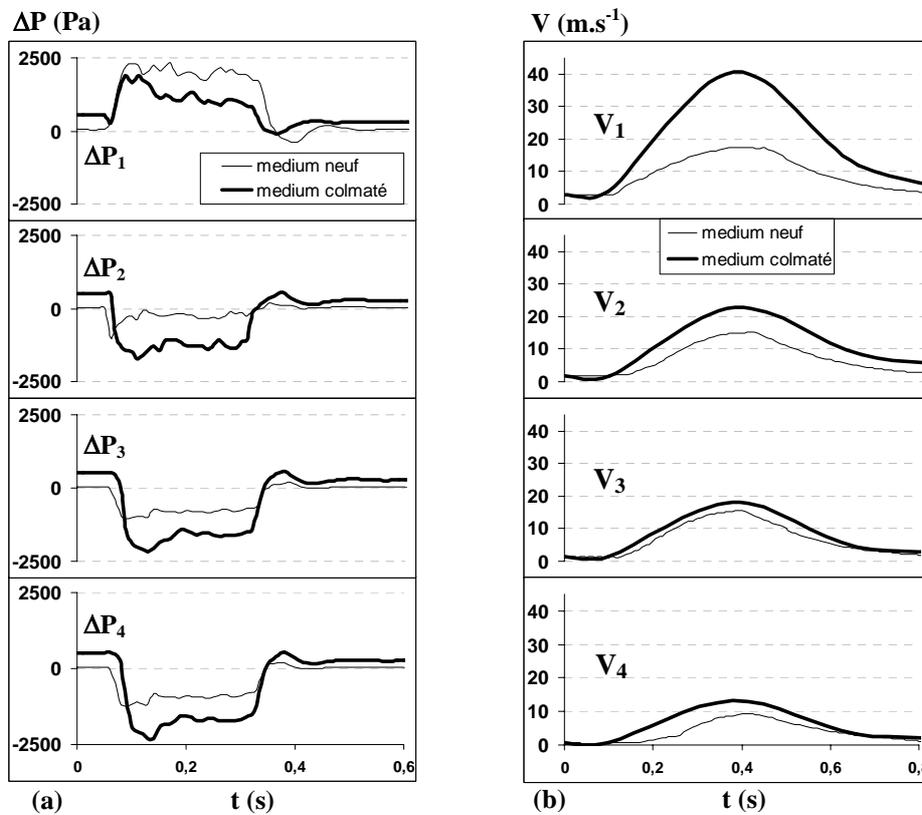


Figure IV.12 : Influence du gâteau sur les signaux de différence de pression (a) et de vitesse axiale (b) le long d'une manche pendant un décolmatage pneumatique (medium colmaté = après 150 cycles, $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$).
- $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Pour le medium colmaté, les allures des courbes sont similaires à celles relatives à la manche neuve. Concernant l'évolution de la différence de pression (figure IV.12a), il se produit une importante dépression dans la zone 1 de la manche et une surpression sur le reste de la hauteur de la manche, supérieure à celle enregistrée pour le medium neuf. Cette surpression atteint environ 2500 Pa sur cet exemple au lieu de seulement 1200 Pa pour une manche neuve dans les mêmes conditions de décolmatage.

D'autre part, la vitesse axiale du jet d'air comprimé, qui faiblit au fur et à mesure de son éloignement de la buse d'injection, est plus importante dans le cas de la manche colmatée. Ainsi, V_4 en bas d'une manche colmatée est supérieure à 13 m.s^{-1} alors que pour une manche neuve, cette grandeur est inférieure à 10 m.s^{-1} . Ceci, couplé au fait que les valeurs de

surpression en bas d'une manche colmatée sont également plus élevées, laisse supposer que les valeurs de vitesses à contre-courant en bas de manches sont plus élevées pour une manche colmatée que pour une manche neuve. Malheureusement, la technologie des capteurs n'a pas permis d'effectuer l'enregistrement de la vitesse frontale, U , sur une manche colmatée.

Le colmatage (interne et de surface), seul paramètre ayant changé au cours de ces expériences, modifie le comportement aéraulique d'une manche pendant son décolmatage pneumatique. L'influence probable de la modification des propriétés du medium avec le colmatage (notamment pour la compacité du filtre) sera développée au paragraphe IV.5.

IV.4.1.2. Comportement mécanique d'une manche colmatée

Résultats expérimentaux

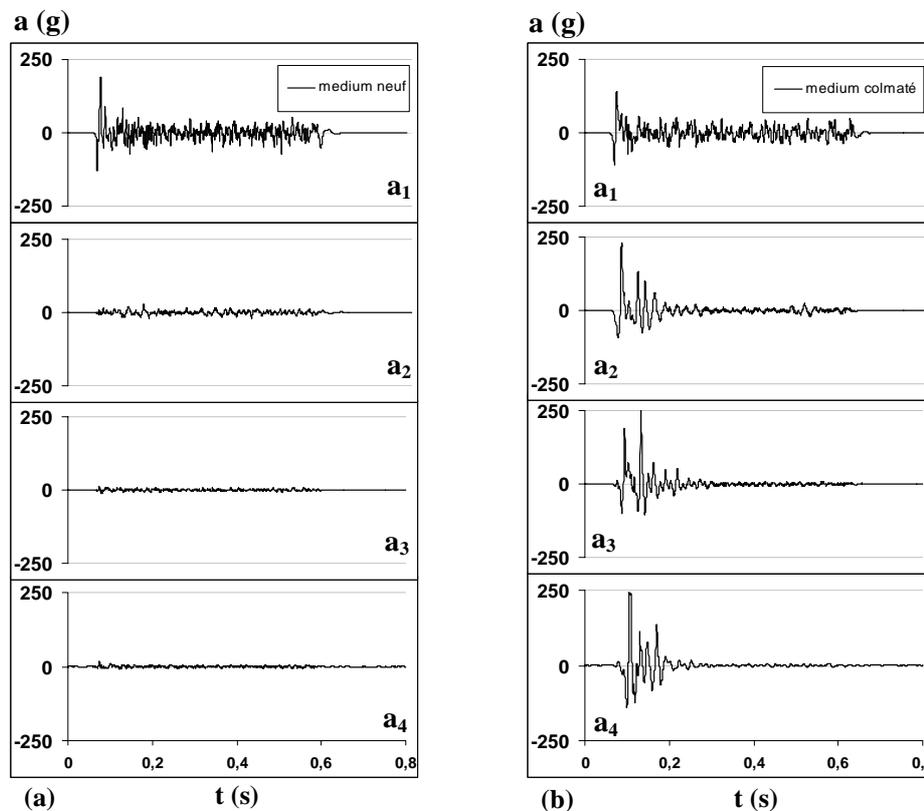


Figure IV.13 : Profil d'accélération du medium le long d'une manche pendant un à-coup de pression à contre-courant en fonction de l'état de colmatage du medium (medium colmaté = après 150 cycles, $\Delta P_{\max} = 13 \cdot \Delta P_0$)
 - $U_f = 5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $P_f = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg} \cdot \text{m}$ -

La figure IV.13 représente des exemples d'évolutions temporelles de l'accélération du medium filtrant en fonction de la hauteur de la manche, pour un medium neuf (a) et pour un medium colmaté (b).

Les signaux d'accélération du medium à l'état colmaté sont très différents du comportement du medium neuf. La manche colmatée ne subit plus uniquement un brutal mouvement dans la seule zone 1 : le mécanisme initial d'accélération – décélération du medium filtrant se produit désormais sur l'ensemble de la hauteur de la manche. De fortes accélérations, proches ou supérieures à 200 g, sont enregistrées dans chacune des 4 zones de la manche. Le colmatage (interne et de surface) modifie donc également les propriétés mécaniques d'une manche.

L'allure du signal d'accélération a_1 est différente de celles des trois autres zones de la manche (figure IV.13b). L'accélération ne s'amortit pas au bout de 200 ms mais perdure environ trois fois plus longtemps (perturbations de ± 50 g), jusqu'à la fin de la durée d'action du jet. Ce résultat indique que dans la zone la plus proche du point d'injection de l'air de décolmatage, le medium est soumis à des forces de tension particulièrement importantes. L'observation de la surface du filtre dans cette zone, grâce à la caméra rapide, révèle que le medium subit une action de secouage intense pendant environ 600 ms. On peut supposer que les mouvements de secouage du medium dans la zone 1 ou le phénomène d'oscillations passagères amorties dans les zones 2, 3 et 4 sont gouvernés par les propriétés d'élasticité et de flexibilité du medium. D'autres auteurs avaient déjà évoqué cet aspect (Sievert et Löffler (1986), Lu et Tsai (1998)).

L'étude du décalage des signaux d'accélération le long de la hauteur de la manche montre que l'onde de choc à l'origine du mouvement initial de la manche se déplace à environ 37 m.s^{-1} pour $P_r = 7 \text{ bar}$ et environ 25 m.s^{-1} pour $P_r = 3 \text{ bar}$. L'origine exacte de la propagation du mouvement le long de la manche est encore incertain : provient-il d'une onde de pression transmise dans l'air intérieur de la manche ou alors d'une onde de choc transmise mécaniquement le long de la manche ? Les auteurs ayant déjà travaillé sur le sujet (Dennis et al. (1981), Klingel et Löffler (1983), De Ravin et al. (1988), Allen et al. (1999)) stipulent qu'une vague de pression serait à l'origine du mouvement initial de la manche. De Ravin et al. (1988) parle d'un déplacement le long de la manche à une vitesse d'environ $1/10^{\text{ème}}$ la vitesse du son ($\approx 35 \text{ m.s}^{-1}$) et qui ralentirait lors de son éloignement avec la buse d'injection.

Etablissement d'un scénario de décolmatage lié à l'accélération du medium

Chaque début de signal est similaire quel que soit le point de mesure considéré : le medium subit d'abord une accélération centripète de valeur maximale proche de 100 g avant d'être très soudainement soumis à une accélération centrifuge de valeur maximale supérieure à 150 voir 200 g. Cette réaction initiale de la manche a été confirmée par l'analyse des signaux d'accélération ainsi que par des observations du mouvement du medium grâce à une caméra rapide. La description du mouvement initial du medium est effectuée sur la figure IV.14.

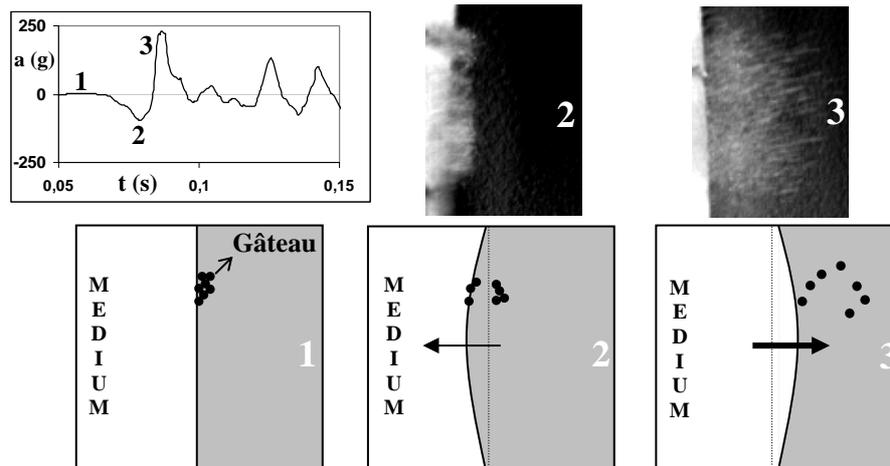


Figure IV.14 : Compréhension du mouvement initial du medium filtrant en réaction à un-coup de pression à contre-courant ($U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$)

1 : avant décolmatage ; 2 : accélération vers l'intérieur ; 3 : accélération vers l'extérieur.

Pendant la phase 2, l'accélération vers l'intérieur est tellement soudaine qu'une partie des forces de cohésion du gâteau est déjà vaincue et qu'une partie des particules se désolidarise du

gâteau sous l'effet de leur inertie. En effet, une grande quantité de particules n'est pas entraînée avec le medium mais reste figée sur place, momentanément en équilibre dans l'air. Puis pendant la phase 3, le retour et l'expansion du medium expulsent les particules précédemment détachées et créent les forces de rupture qui permettent de détacher d'autres particules, qui elles, avaient suivi le mouvement du medium vers l'intérieur. La durée du phénomène qui vient d'être décrit est de l'ordre de 50 millièmes de secondes et n'a pu être observé qu'au moyen d'une caméra rapide. Cette approche du mouvement du medium est originale et va à l'encontre de la description qu'en faisait un certain nombre d'auteurs (Dennis et al. (1981), Morris (1984), Sievert et Löffler (1986), Allen et al. (1999)). Pour eux, le mouvement initial du medium se traduisait par une accélération vers l'extérieur suivi d'une brutale décélération avant que le media n'atteigne son expansion maximale. Aucune mention n'était faite de la première contraction de la manche vers l'intérieur qui a été observé sur la figure IV.14. Cependant, le mouvement initial décrit sur la figure IV.14 caractérise le comportement de manches particulières : 1,5 m de longueur pour 0,13 m de diamètre, présence de plusieurs anneaux de renfort sur leur hauteur et medium non tissé avec traitement de surface par calandrage thermique. Des géométries de manches et des propriétés physiques du medium différentes ainsi que la présence d'une cage support en lieu et place des anneaux pourraient être à l'origine de ces divergences de comportement.

Il est néanmoins légitime de penser que la majorité des forces de rupture du gâteau de particules sont créés lors de la brutale décélération du medium avant son expansion maximale, c'est-à-dire pendant la fin de la phase 3. Cette dernière hypothèse rejoint les travaux de Dennis et al. (1981), même si par ailleurs ces auteurs ne décrivent pas le mouvement initial du medium de la même manière.

L'application du modèle qu'ils ont développé (équation I.13) pour le calcul de la décélération maximale subie par le medium n'a toutefois pas fourni de résultats satisfaisants sur nos propres essais. Le calcul des valeurs expérimentales de $\left(\frac{d(\Delta P)}{dt}\right)_{\max}$ à partir des signaux de

$\Delta P = f(t)$ était pourtant aisé mais des incohérences entre nos résultats expérimentaux et les valeurs théoriques fournies par le modèle de Dennis et al. sont rapidement apparues. Nous n'avons donc pas poussé plus loin nos investigations dans ce domaine. Le modèle ne semble pas être adapté au type de manches testé.

IV.4.2. Influence des paramètres sur une manche en phase de décolmatage

IV.4.2.1. Géométrie de la buse d'injection

Pour des raisons techniques, il n'a pas été possible d'étudier l'influence du diamètre de la buse d'injection sur les manches colmatées. En effet, les accès aux manches et à la coiffe du dépoussiéreur deviennent rapidement délicats après le début de l'empoussièremet et du colmatage des éléments filtrants. L'état de colmatage des manches aurait également pu être modifié après une intervention de notre part pour changer les buses de décolmatages.

IV.4.2.2. Paramètres de décolmatage

De même que pour une manche neuve, les influences de la pression initiale du réservoir d'air comprimé, de la durée d'impulsion de l'air comprimé de décolmatage et du nombre de manches décolmatées simultanément ont été étudiées.

Pression initiale du réservoir d'air comprimé (P_r)

La figure IV.15 représente l'influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la différence de pression et l'accélération du medium en fonction de la hauteur sur une manche.

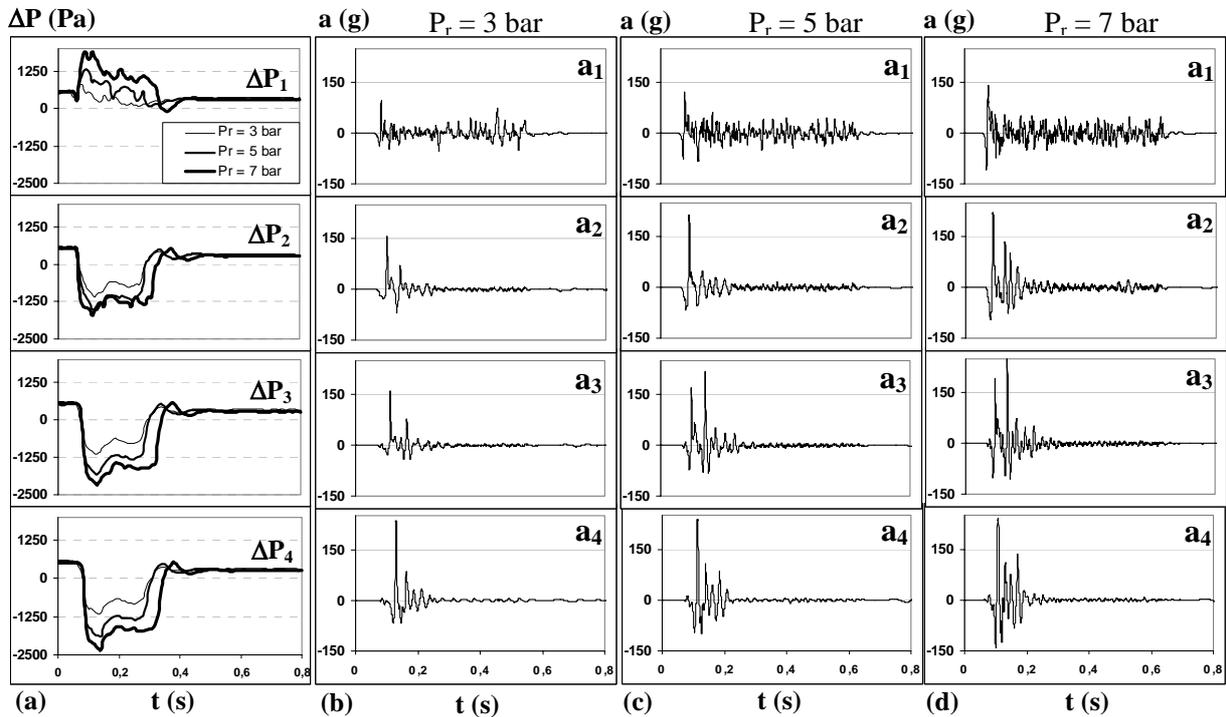


Figure IV.15 : Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la différence de pression (a) et l'accélération du medium le long d'une manche – (b) $P_r = 3$ bar , (c) $P_r = 5$ bar , (d) $P_r = 7$ bar –
 - Manche colmatée à $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Comme pour le medium neuf, les caractéristiques du décolmatage augmentent avec la pression du réservoir d'air comprimé : les vitesses d'air du flux à contre-courant et les valeurs d'accélération sont d'autant plus importantes que la valeur de la pression du réservoir d'air comprimé (P_r) est grande. Par contre, il est intéressant de constater qu'un décolmatage à une aussi faible pression de réservoir que 3 bar permet d'assurer des accélérations supérieures à 150 g sur les trois quarts inférieurs de la surface de la manche. Ce résultat n'était pas accessible avec les seuls essais sur medium neuf.

Dans notre cas, il semble donc inutile de travailler à des pressions de décolmatage trop importantes. Les différences entre 5 et 7 bars sont minimales. Des conditions de décolmatages proches de celles obtenues pour $P_r = 7$ bar semblent atteintes dès 5 bars ; augmenter la pression de réservoir au-delà de 5 bars améliore peu les mécanismes de surpression en bas de manche et d'accélération du medium. De plus, réduire la pression du réservoir comporte le double avantage de réaliser des économies budgétaires liées à la consommation d'air comprimé et de ne pas soumettre le medium filtrant à des forces de tension trop importantes, ce qui inévitablement le vieillirait prématurément.

Durée d'impulsion de l'à-coup de pression (t_d)

La figure IV.16 présente les signaux de différence de pression (a) et d'accélération du medium (b, c et d) le long d'une manche colmatée en fonction de t_d .

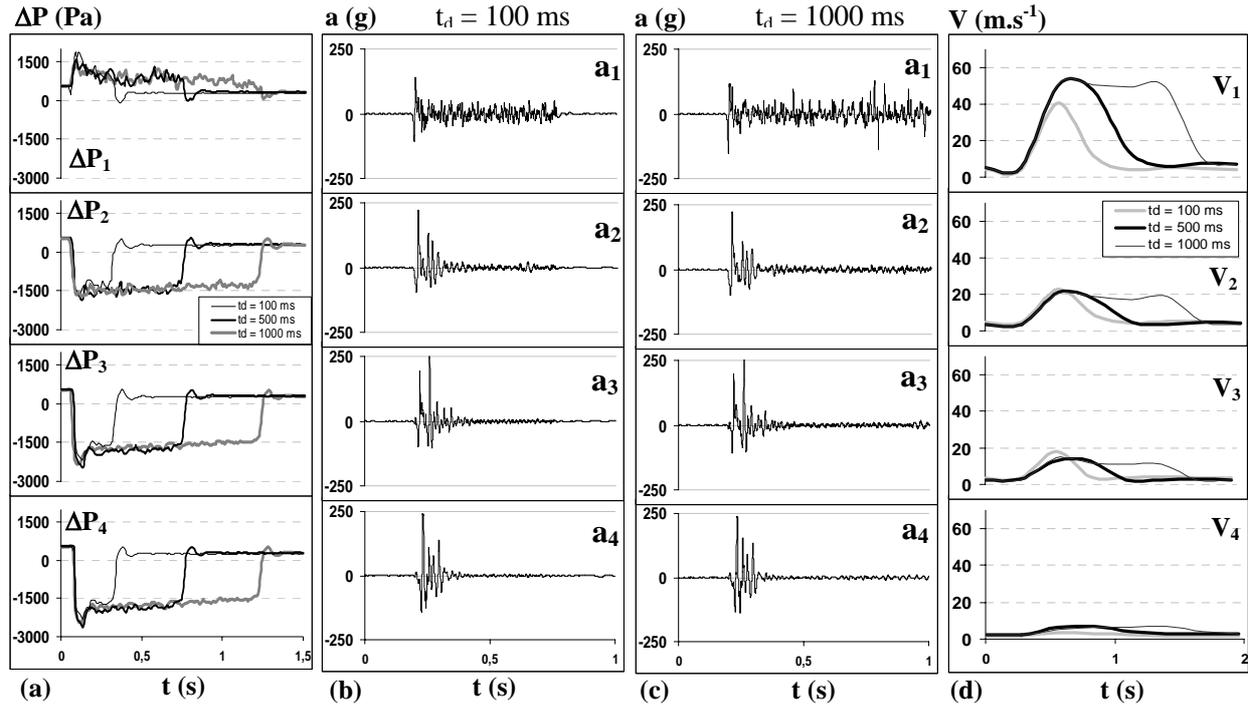


Figure IV.16 : Influence de la durée d'impulsion sur la différence de pression (a), sur l'accélération du médium le long d'une manche ((b) $t_d = 100$ ms, (c) $t_d = 1000$ ms) et sur la vitesse axiale (d)

- Manche colmatée à $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $N = 1$, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

A l'instar des résultats sur manche neuve, il n'existe pas de différence, en terme de valeurs crêtes, dans la comparaison des signaux de différence de pression (figure IV.16a) et d'accélération (figure IV.16b et IV.16c) lorsque la durée du décolmatage varie.

Quelle que soit la valeur de t_d entre 100 et 1000 ms, les signaux d'accélération du médium sont en tout point comparables pour un point de mesure donné. Il reste cependant l'action de secouage du médium en zone 1 de la manche qui dure d'autant plus longtemps que la valeur de la durée d'impulsion du jet d'air de décolmatage (t_d) est importante.

La durée de décolmatage influe peu sur les valeurs crêtes de la vitesse axiale du jet d'air comprimé atteintes au centre de la manche. La différence la plus marquée se situe au niveau de la valeur crête pour la zone 1 : $V_1 = 40 \text{ m.s}^{-1}$ pour $t_d = 100 \text{ ms}$ et $V_1 \approx 52 \text{ m.s}^{-1}$ pour $t_d \geq 400 \text{ ms}$. L'injection d'un plus grand volume d'air lorsque t_d est plus élevé conduit donc à des vitesses axiales d'air plus grandes. Il est également possible que la décharge du réservoir par l'orifice d'injection constitué par la buse de 10 mm ne puisse atteindre sa puissance maximale qu'à partir d'un temps minimum d'ouverture de l'électrovanne de décolmatage.

Nombre de manches décolmatées simultanément (N)

La figure IV.17 présente les signaux de différence de pression (a) et d'accélération du médium (b, c et d) le long d'une manche en fonction du nombre d'éléments filtrants décolmatés simultanément, N.

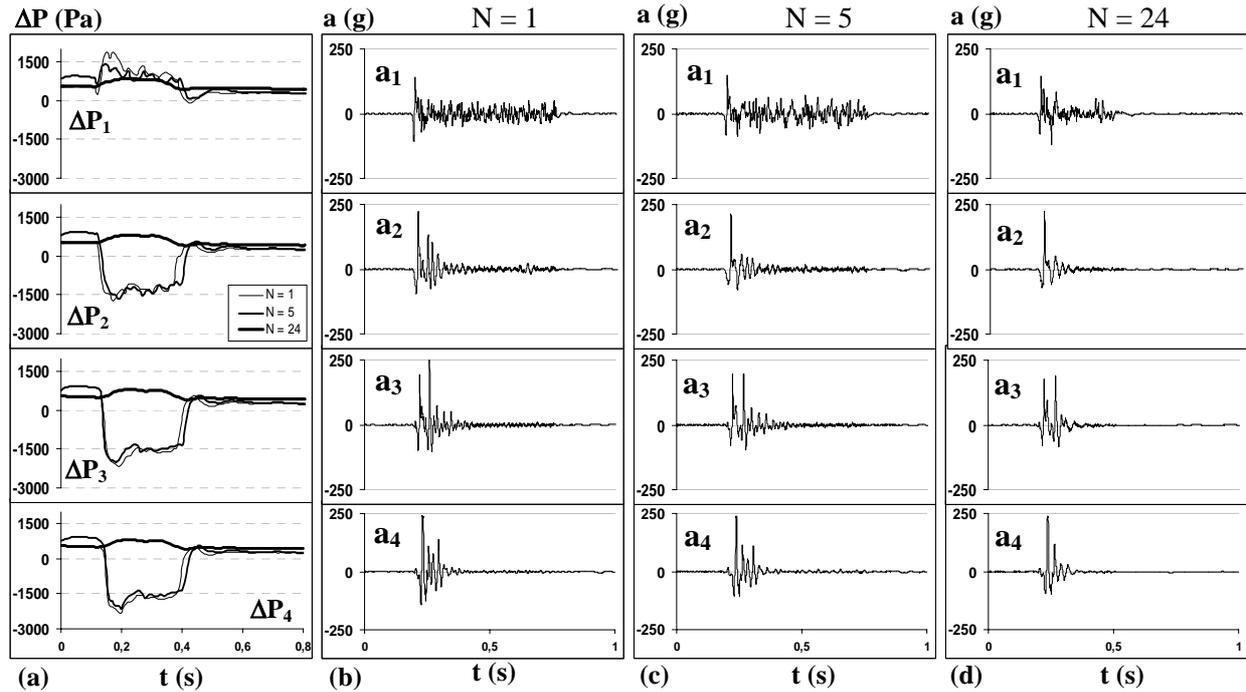


Figure IV.17 : Influence du nombre de manches décolmatées simultanément sur la différence de pression (a) et sur l'accélération du médium le long d'une manche ((b) N = 1 , (c) N = 5 , (d) N = 24)
 - Manche colmatée à $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Les résultats de la figure IV.17 montrent que le nombre de manches décolmatées en même temps n'a pas d'influence marquante sur la différence de pression et sur l'accélération lorsque N reste petit (≤ 5). Les allures des signaux de perte de charge ou d'accélération sont similaires pour N = 1 et pour N = 5, autant en ce qui concerne leurs allures que pour les valeurs crêtes obtenues. Lorsque le nombre de manches décolmatées simultanément est plus grand, les courbes de différence de pression se modifient progressivement pour finalement aboutir aux profils présentés sur la figure IV.17a pour N = 24 manches. Le jet d'air comprimé perd beaucoup de son intensité et le signal est presque plat, et ce pour les quatre points de mesure. Les courbes d'accélération sont par contre assez peu modifiées lorsqu'on les compare avec les résultats obtenus pour des N plus petits. Le mécanisme initial d'accélération – décélération du médium est toujours présent à l'identique lorsqu'un grand nombre de manches sont décolmatées simultanément. Ceci conforte nos conclusions apportées au paragraphe IV.4.1.2., stipulant qu'il n'existait pas de relation de proportionnalité entre nos valeurs expérimentales de $\left(\frac{d(\Delta P)}{dt}\right)_{\max}$ et nos valeurs expérimentales d'accélération maximale (a_{\max}) correspondantes.

Lors des essais correspondant à la figure IV.17 ($P_r = 7 \text{ bar}$) et pour N = 24, la perte de charge de la manche redescend tout de même de près de 260 Pa après le décolmatage et ce, quelle que soit la zone étudiée. Des essais identiques à $P_r = 3 \text{ bar}$ montrent par contre que le décolmatage devient inutile et qu'il n'a plus aucune incidence sur la différence de pression : la régénération du médium ne se produit plus et la perte de charge ne redescend pas.

Le cumul d'un grand nombre de manches décolmatées simultanément et d'une pression de réservoir faible fait tellement chuter la puissance du décolmatage qu'il réduit à néant les mécanismes de décolmatage produit par l'à-coup de pression d'air comprimé.

IV.4.2.3. Conditions opératoires de filtration

L'influence de la vitesse de filtration ($U_f = 3$ à 8 cm.s^{-1}) est négligeable sur les signaux de différence de pression, d'accélération et de vitesse axiale. Les courbes obtenues sont identiques quelle que soit la vitesse de filtration imposée sur les manches. La perte de charge résiduelle obtenue après décolmatage n'est pas non plus influencée par les changements de U_f dans cette gamme de valeurs.

Pourtant, d'autres auteurs (Leith et al. (1977, 1978), Klingel et Löffler (1983)) ont montré qu'il se produisait une hausse de la perte de charge résiduelle après décolmatage lorsque la vitesse de filtration augmentait. Ce constat paraît logique car plus U_f est grande, plus elle est potentiellement capable, à la reprise de la filtration après un décolmatage "on line", de venir plaquer les particules décolmatées sur les manches, avant que ces dernières ne sédimentent dans la trémie. Cependant, les propriétés de l'aérosol et la longueur des manches testées jouent des rôles essentiels dans la redéposition des particules après décolmatage. Les travaux de ces auteurs ont porté sur des manches de 2,5 m de long, plus grandes que celles utilisées dans cette étude (1,5 m) et donc plus vulnérables à la redéposition des poussières.

L'influence de la tension imposée aux manches n'a pas été testée lorsque celles ci étaient colmatées, l'accès aux manches équipées étant devenu impossible sans une détérioration de l'état de surface de certaines manches.

Plusieurs essais comparatifs à différentes pertes de charge maximale ($\Delta P_{\max} = 13, 20$ et $30.\Delta P_0$) et après plus de 200 cycles ont été menés. Ils sont présentés sur la figure IV.18.

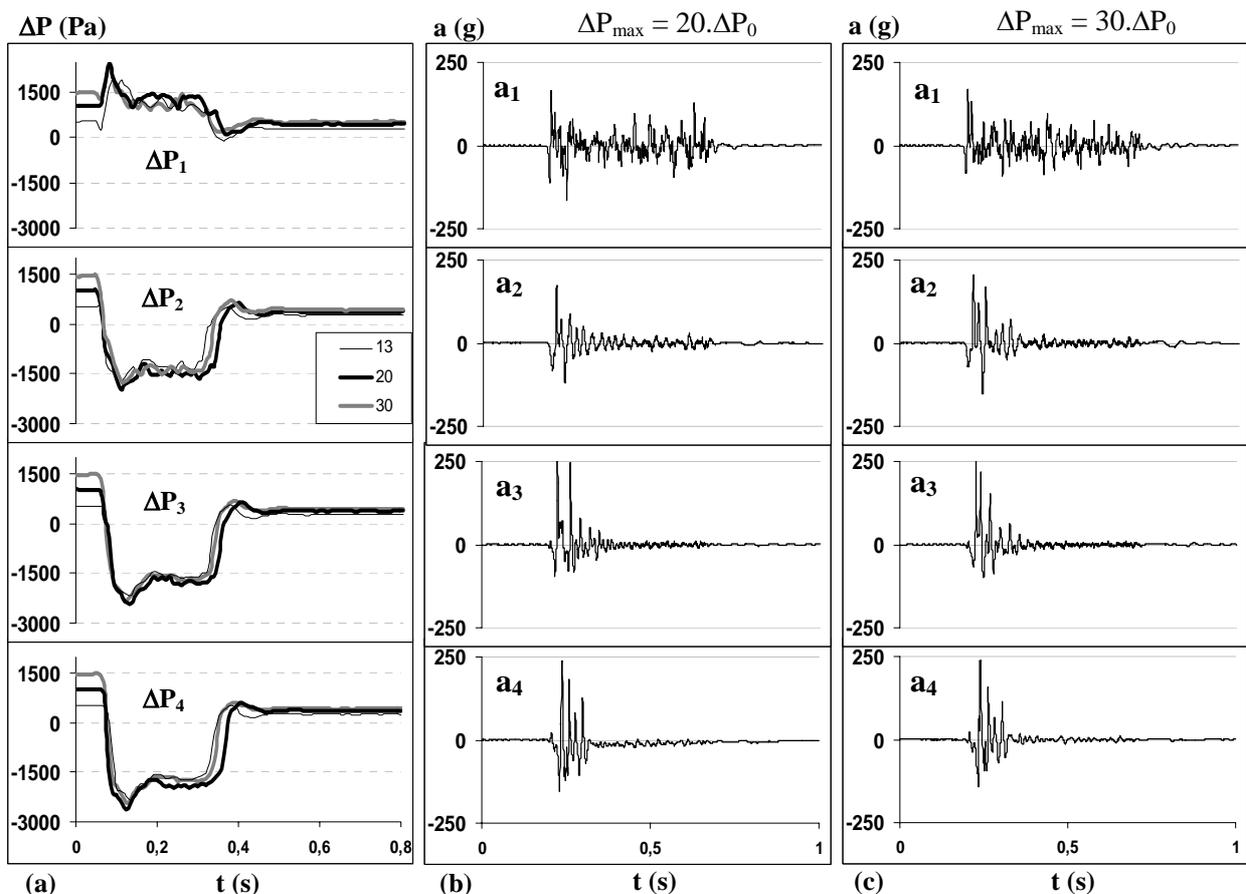


Figure IV.18 : Influence de la perte de charge maximale avant décolmatage sur la différence de pression (a) et sur l'accélération du médium le long d'une manche ((b) $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0$, (c) $\Delta P_{\max} = 30.\Delta P_0$)
 - Manche colmatée , $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_f = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $N = 1$, position 1, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Aucune influence significative de la masse déposée en surface du filtre ($W_{g,max}$) n'a été enregistrée sur les signaux de différence de pression et d'accélération le long de la manche. Il n'en reste pas moins vrai que les modifications de structure du medium entre une manche neuve et une manche colmatée (après plusieurs centaines de cycles) apportent une différence considérable dans la réponse des différents capteurs, notamment pour les signaux d'accélération. Mais une fois les propriétés du medium modifiées par le colmatage interne et stabilisées, la masse additionnelle de gâteau en surface ne possède pas d'influence particulière dans la gamme de valeurs que nous avons testée. Ce constat n'est cependant valable que pour le type de particules qui a été utilisée, à savoir de fines particules d'alumine de diamètre médian égal à $2,5 \mu m$ (Alumine1).

IV.5. PROFILS DE MASSE SURFACIQUE RESIDUELLE SUR LE MEDIUM

Les profils de masse surfacique du medium selon 12 points de mesure le long d'une manche filtrante et pour différents états de nettoyage sont présentés sur la figure IV.19.

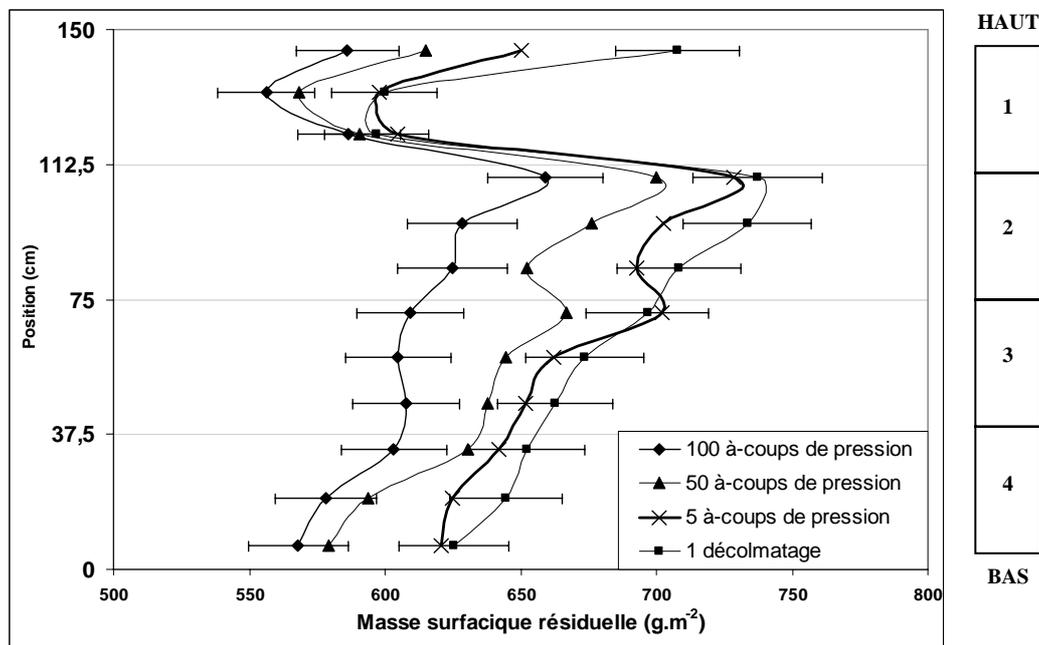


Figure IV.19 : Profil de masse surfacique le long d'une manche filtrante après un décolmatage classique et après différentes séries d'à-coups de pression successifs (Grammage du medium neuf = 400 g.m^{-2})
 - Après plus de 200 cycles, $U_f = 5 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, position 1, $T = 0 \text{ kg.m}$ -

Chaque mesure correspond à la pesée d'un échantillon de medium de surface connue. Les différents états de manches étudiés correspondent soit à un état décolmaté classique (état résiduel après un seul à-coup de pression à contre-courant), soit à un état de manche ayant subi de multiples à-coups de pression successifs (5, 50 ou 100 injections consécutives). L'objectif de ces essais est de mettre en évidence un état de colmatage résiduel irréversible. Ces mesures interviennent après plus de 200 cycles de colmatage décolmatage à $\Delta P_{max} = 13.\Delta P_0$. Chaque point de mesure correspond à la moyenne de trois valeurs, issues de trois manches différentes.

La masse surfacique du medium à l'état décolmaté varie en fonction de la hauteur de la manche et du nombre d'à-coups de pression. Quel que soit l'état de décolmatage du medium, une grande quantité de poussières est présente dans la zone proche du col d'attache de la manche (position 150 cm). Ceci résulte de l'existence d'une zone morte d'environ 2 ou 3 cm

de long dans laquelle le décolmatage ne se produit jamais. Ce phénomène d'accumulation localisée a déjà été observé par Ellenbecker et Leith (1979) sur des manches filtrantes et par Stephen et al. (1996) sur des bougies céramiques. Il provient certainement de l'effet de succion d'air en partie haute de la manche et du manque de degré de liberté de la manche à la proximité de son point d'attache.

Pour les deux autres points de mesure de la zone 1, une bonne efficacité de décolmatage est atteinte et un minimum local de masse surfacique à l'état décolmaté est enregistré. Le nettoyage du medium dans cette zone est bon car il se produit une action de secouage intense tout au long de la durée d'action du jet. Bien que la partie haute de la manche soit le siège d'une dépression entraînant une aspiration d'air par induction, les forces de détachement des particules par inertie lors des mouvements saccadés et répétés du medium sont suffisantes pour déloger efficacement les particules dans cette région.

La zone 2 du medium est la moins bien nettoyée des quatre. Cette zone bénéficie des forces de décolmatage induite par le mouvement initial du medium au même titre que les zones 3 et 4, mais elle n'est pas le siège de vitesses de décolmatage à contre-courant aussi grandes que dans la partie basse de la manche. En effet, c'est dans la zone 2 que la transition entre dépression et surpression s'opère et la pression interne est proche de la pression de l'enceinte. En dessous de la cote 75 cm, la masse surfacique résiduelle diminue. En bas de la manche, les valeurs de masses surfaciques sont comparables à celles observées pour la zone de fortes perturbations en haut de manche. La partie basse de la manche bénéficie de plus fortes valeurs de flux à contre-courant. Le profil général établi sur la figure IV.19 est comparable aux résultats obtenus par d'autres auteurs (Sievert et Löffler (1986), Ellenbecker et Leith (1979)). Il est important de noter que ce profil n'est valable que s'il est associé aux conditions opératoires dans lesquelles il a été déterminé, notamment une buse d'injection avec un orifice de diamètre 10 mm, située à 8 cm au dessus de la manche et pour une pression de réservoir de 7 bar. Un profil qui aurait été obtenu dans d'autres conditions pourrait être différent. La position de la buse par rapport à l'ouverture de la manche et principalement la distance à laquelle elle est éloignée est un facteur qui pourrait modifier grandement le profil de masse surfacique résiduelle et les zones d'actions privilégiées des mécanismes de décolmatage.

Par ailleurs, plus le nombre d'à-coups de pression imposés à la manche est grand, plus la masse surfacique de chacun des points de mesure diminue. Ce résultat est logique dans la mesure où les liaisons entre les particules et les fibres du medium sont d'autant plus fragilisées et/ou rompues qu'elles subissent un grand nombre de sollicitations de rupture. Cependant, il est intéressant de constater que même après 100 à-coups de pression successifs, le medium reste fortement colmaté de manière interne et que sa masse surfacique reste très supérieure aux 400 g.m⁻² de son état neuf. Le colmatage intérieur du medium fibreux est souvent qualifié d'irréversible dans les travaux concernant la filtration et on comprend avec ces nouvelles mesures qu'il est en effet impossible de déloger les nombreuses particules piégées en profondeur.

Il est probable que le profil de masse surfacique ait progressivement évolué pendant les 200 cycles jusqu'à atteindre l'état représenté sur la figure IV.19. En effet, une pénétration de plus en plus importante de particules à l'intérieur du medium intervient après chaque décolmatage jusqu'à saturer le medium, ce qui correspond à un régime d'équilibre de ΔP_{res} . Ces conditions de pseudo régime permanent étant atteintes après 150 cycles (cf. figure AVIII.1 dans l'annexe VIII), il est fort probable que ce profil de masse surfacique ne montre plus, désormais, que des variations mineures de cycle en cycle.

Un résultat important de la figure IV.19 reste la mise en évidence d'une augmentation d'environ 250 g.m^{-2} de la masse surfacique globale du medium filtrant colmaté par rapport à son état neuf. Cette prise de masse provient principalement du colmatage interne au sein des fibres du medium. Elle semble modifier de manière importante les propriétés physiques du medium et avoir une incidence forte sur les modules d'élasticité et de flexibilité. Les modifications constatées dans le comportement de la manche filtrante, entre son état neuf et son état colmaté, proviennent des changements profonds de la structure du medium progressivement apparus lors des cycles de colmatage et de décolmatage. Cette hypothèse est d'autant plus valide que le colmatage interne est le seul paramètre à avoir été modifié au cours des essais comparatifs (dans la mesure où il n'a pas été constaté d'influence de la perte de charge maximale avant décolmatage (ΔP_{max}) ou de la quantité de gâteau présente en surface – paragraphe IV.4.2.3).

IV.6. INFLUENCE DES PROPRIETES DES PARTICULES FILTRES

Des expériences, développées de manière plus importante au chapitre V, ont permis d'effectuer certaines observations concernant la nature du décolmatage pour deux types d'aérosols.

Pour l'aérosol test d'alumine (Alumine1 – tableau II.1) et quelle que soit la pression de réservoir utilisée dans la gamme étudiée (1,5 à 7 bar), le décolmatage du gâteau se fait de manière homogène sur l'ensemble de la hauteur de la manche (sauf pour l'extrémité supérieure de la manche pour laquelle le détachement du gâteau ne se produit pas – paragraphe IV.5). L'état de surface de la manche à l'état décolmaté peut être observé sur la figure IV.20a.

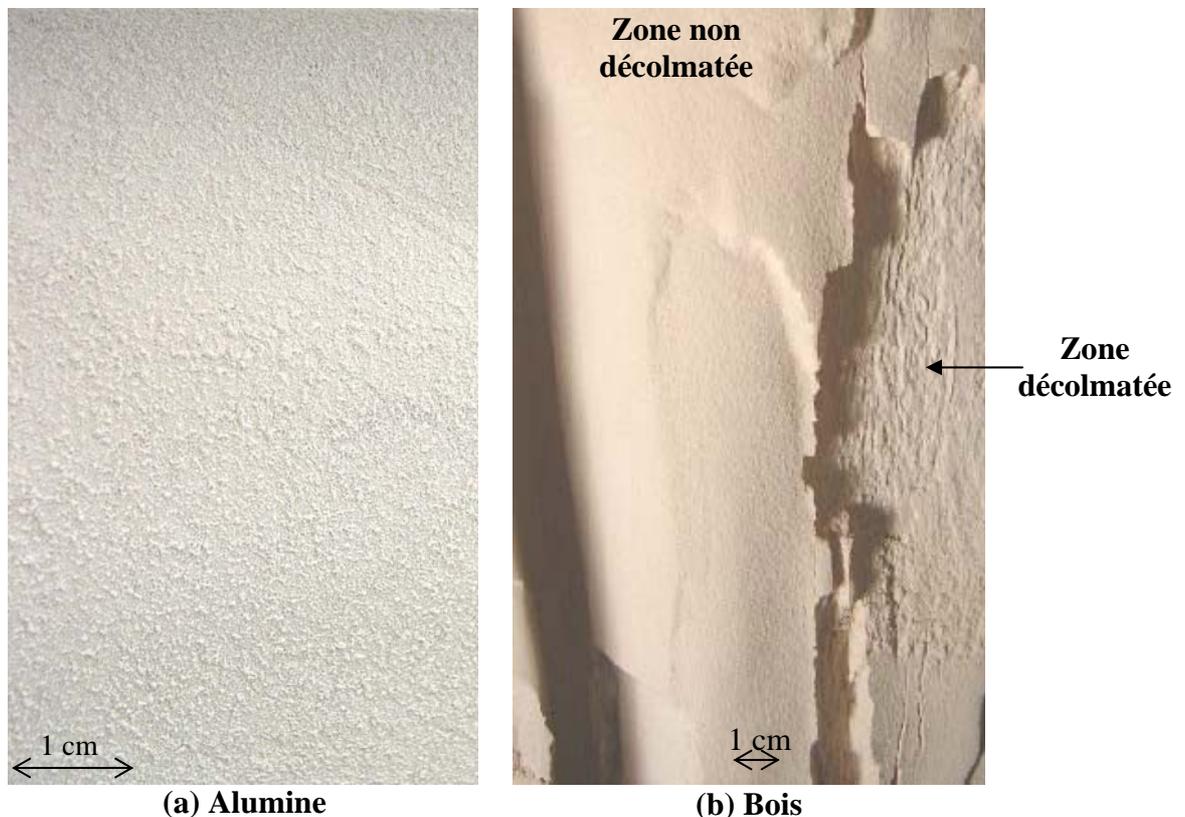


Figure IV.20 : Photographies de l'état de surface d'une manche à l'état décolmaté
(a) Alumine pour tout $P_r > 1,5 \text{ bar}$ – (b) Bois pour $P_r < 3 \text{ bar}$

On constate que la majorité du gâteau de particules d'alumine a été détaché et qu'il ne reste plus qu'une très fine couche de particules, morcelée de petits amas de gâteau non décrochés. La surface du medium est visible par endroit et démontre ainsi qu'il se produit une combinaison entre un détachement du gâteau émanant de ruptures de liaisons « surface du medium / gâteau de particules » et un décrochement de particules émanant de ruptures de liaisons « petits amas indécrochables / restant du gâteau ». Ce constat est certainement le résultat de l'état de surface du medium filtrant neuf étudié (figure II.9). Les plaques étanches et lisses résultant de la fonte des fibres lors du traitement par calandrage thermique engendrent des forces d'adhésion vis à vis du gâteau plus faibles que les zones où les fibres sont à nu. Les particules du gâteau déposées sur les plaques lisses seront plus facilement détachées que les particules déposées à même les fibres.

Malgré la mise en évidence de différences dans les mécanismes de décolmatage d'un gâteau de particules d'alumine le long d'une manche, l'état de surface après le détachement de ce gâteau est identique sur l'ensemble de la hauteur de la manche.

Pour l'aérosol test de bois (Bois2 – tableau II.1) le résultat du nettoyage d'une manche est différent. Il dépend de plus des conditions opératoires de décolmatage qui sont utilisées.

Quelle que soit la perte de charge maximale fixée, un décolmatage des manches à une pression de réservoir faible de 1,5 bar conduit systématiquement à un décolmatage par plaques sur l'ensemble de la hauteur de la manche. L'état de surface de la manche après décolmatage peut être observé sur la figure IV.20b. Sur de larges zones, le gâteau de filtration est intact. Pour les zones décolmatées, le medium n'est pas visible et on observe la présence d'une couche de particules uniforme de quelques millimètres d'épaisseur. Il n'a pas pu être déterminé si cette fine couche de particules, présente dans les zones décolmatées, résultait d'une incapacité à être décrochée lors de l'à-coup de pression où s'il s'agissait de particules redéposées sur la manche juste après leur détachement. Pour des pressions de réservoir supérieures ou égales à 3 bar, le gâteau de particules de bois se détache de manière uniforme sur l'ensemble de la hauteur de la manche et on observe plus de décolmatage par plaques. La même fine couche de particules, observée précédemment dans les zones décolmatées, caractérise désormais l'état décolmaté pour toute la surface de la manche.

Les gâteaux de particules d'alumine ne sont pas décolmatés de la même manière que les gâteaux de particules de bois. L'importance de la combinaison « medium filtrant / particules filtrées » dans la nature du décolmatage a été mise en évidence mais n'a pas été étudiée de manière approfondie. Les hypothèses principales qui peuvent être avancées pour expliquer les différences observées sont les suivantes :

- la nature et la taille des particules étant éloignées entre les particules d'alumine et de bois, il en découle de profondes différences au niveau des forces de cohésion et des forces d'adhésion et donc des modifications de comportements lors du détachement du gâteau ;
- le colmatage interne du medium fibreux est différent pour les particules d'alumine et de bois et n'engendre pas les mêmes changements de propriétés physiques pour la manche (élasticité, flexibilité ...).

Il serait intéressant de caractériser le comportement des manches filtrantes avec l'aérosol de bois comme cela a été fait dans ce chapitre pour l'aérosol d'alumine. Cela permettrait de vérifier si le comportement des manches pendant les décolmatages reste le même quand le colmatage (interne ou de surface) du medium s'effectue avec des particules de bois de diamètre médian plus important. Les signaux de différence de pression et d'accélération ainsi qu'une détermination de la masse surfacique du medium, à l'état conditionné et décolmaté, le long d'une manche permettrait d'en apprendre plus quant à ses modifications de propriétés physiques au cours des cycles.

IV.7. CONCLUSIONS

Les influences de différents paramètres opératoires sur les performances de décolmatage pneumatique "on line" de manches filtrantes ont été étudiées. Elles ont permis de mieux comprendre les effets que provoque l'à-coup de pression d'air comprimé et d'identifier les mécanismes de décolmatage du gâteau et les zones où le décolmatage semble le plus efficace. Les résultats qui ont été établis correspondent à la filtration d'un aérosol d'alumine par un medium fibreux non tissé doté d'un traitement de surface par calandrage thermique.

Les effets du colmatage progressif du medium modifient les signaux de différence de pression, d'accélération du filtre et de vitesses d'air obtenus pendant un décolmatage. La présence du gâteau en surface et surtout le colmatage interne de la structure fibreuse modifient profondément le comportement de la manche pendant le décolmatage et provoquent des modifications dans la réponse d'une manche colmatée par rapport à une manche neuve. Un colmatage interne, en grande partie irréversible, a été mis en évidence et conduit à une augmentation de la masse surfacique du medium de plus de 50 % par rapport à la masse surfacique initiale. Cette augmentation de la masse surfacique semble induire des changements de porosité et de propriétés physiques du medium. Les travaux ont montré que la caractérisation des effets d'un décolmatage pneumatique sur une manche neuve ne renseignait pas sur le comportement de l'élément filtrant à l'état conditionné et colmaté. La manière dont une manche filtrante réagit au décolmatage pneumatique évolue au cours des cycles, et cette évolution semble grandement dépendante de la nature et des propriétés de l'aérosol filtré.

Dans le cas précis de notre étude et pour une manche colmatée depuis de nombreux cycles, l'à-coup brutal provoqué par l'injection de l'air comprimé conduit à un mouvement initial de la manche caractérisé par de hautes valeurs d'accélération sur l'ensemble de la hauteur de la manche. Ce mouvement initial du medium correspond à une première contraction du medium vers l'intérieur suivi d'une brutale éjection vers l'extérieur. Il provoque les valeurs maximales d'accélération et conduit au décrochement du gâteau de particules en surface. Les mécanismes de propagations de ce mouvement ne sont pas encore parfaitement déterminés. Il existe ensuite deux autres phénomènes qui participent au nettoyage de la manche : un effet de secouage en haut de la manche du fait de la proximité de l'injection de l'air comprimé et un effet de flux à contre-courant dans la moitié inférieure de la manche provoquée par l'importante surpression mesurée en bas de manche. La description fournie du mouvement initial de la manche et l'importance accordée au phénomène de flux à contre-courant vont à l'encontre des constats de bons nombres d'auteurs ayant précédemment travaillé sur le sujet. La synthèse de l'emplacement des différents mécanismes de décolmatage conduit au schéma récapitulatif présenté sur la figure IV.21.

La zone supérieure de la manche, du fait de sa proximité avec la buse d'injection d'air comprimé, est caractérisée par un comportement très différent du reste de la manche. Le medium subit le même mouvement initial brutal que l'ensemble de la manche mais il est ensuite parcouru par un secouage intensif tout au long de la durée d'action du jet. Dans cette région, le medium subit de fortes sollicitations mécaniques qui permettent un nettoyage efficace du gâteau malgré le phénomène d'aspiration d'air en provenance de l'amont qui serait susceptible de gêner le détachement du gâteau. Les contraintes imposées au medium dans cette zone, couplées à une importante augmentation de la vitesse de filtration, pourraient être la cause d'une forte émission particulaire à l'aval des éléments filtrants. En effet, toutes les conditions sont réunies ici pour faciliter le passage de particules vers l'aval. Nous

reviendrons sur ces considérations liées à la dégradation de l'efficacité de filtration dans le chapitre VI.

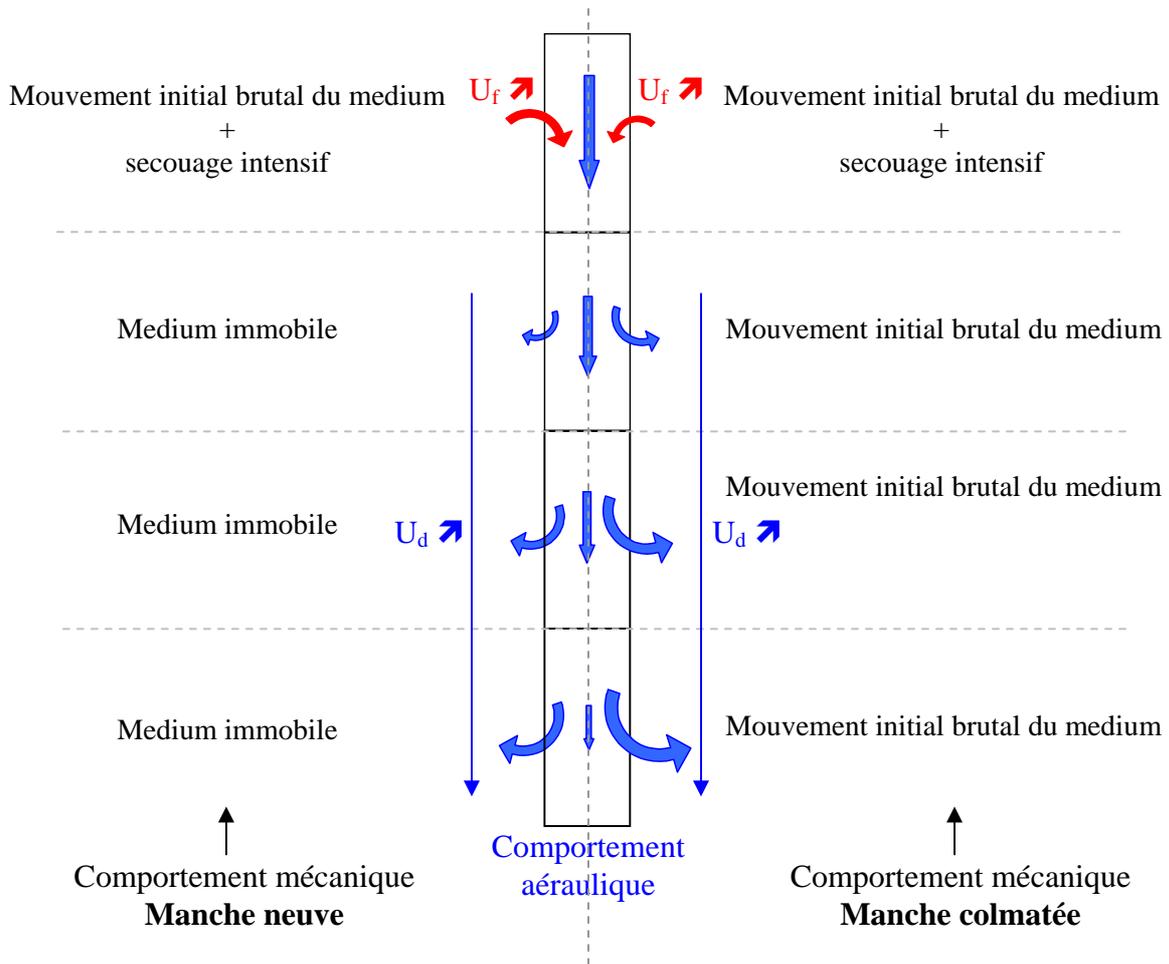


Figure IV.21 : Schéma de synthèse des différents mécanismes de décolmatage d'un point de vue mécanique et aéraulique, pour une manche neuve et pour une manche colmatée.

U_f : vitesse de filtration – U_d : vitesse d'air à contre-courant

L'analyse du profil de masse surfacique du medium à l'état décolmaté a permis de confirmer les résultats obtenus concernant les zones d'action des mécanismes de décolmatage : le medium semble être nettoyé plus efficacement dans les parties haute et basse de la manche. C'est en effet dans ces zones que les mécanismes de décolmatage sont les plus influents. Cette inhomogénéité de masse surfacique à l'état décolmaté sur la hauteur d'une manche ne manquera pas de créer un profil de vitesse de filtration également non homogène à la reprise de la filtration après un décolmatage.

La synthèse des résultats de l'influence des paramètres est donnée dans le tableau IV.2.

Les effets d'un décolmatage pneumatique sur une manche filtrante dépendent d'un grand nombre de paramètres. C'est pourquoi, les courbes de résultats qui ont été présentées dans ce chapitre ne sont pas généralisables et doivent toujours être considérées avec les conditions opératoires qui les caractérisent. Par exemple, une modification de la géométrie de la buse et de la longueur de la manche pourraient très bien conduire à des profils et à des conclusions différentes.

	Paramètre	Domaine de variation	Evolution du paramètre	Evolution de la grandeur considérée		
				a_{max}	U_d	ΔP_{res}
Géométrie de la buse	d_b	[5 – 15 mm]	↗	↗	↗	↘
	Position	de 1 vers 3 (figure II.7)	→	→	↘	↗
Paramètres de décolmatage	P_r	[3 – 7 bar]	↗	↗	↗	↘
	t_d	[100 – 1000 ms]	↗	→	↗	↘
Conditions opératoires de filtration	U_f	[0,03 – 0,08 m.s ⁻¹]	↗	→	↘	↗
	ΔP_{max} (ou $W_{g,max}$)	[13. ΔP_0 – 30. ΔP_0]	↗	→	→	→
Autres paramètres	N	[1 – 24 manches]	↗	↘	↘	↗
	T	[0 – 0,1 m.kg]	↗	→	→	→

Tableau IV.2 : Récapitulatif des influences des paramètres étudiés sur les valeurs crêtes des signaux d'accélération du medium (a_{max}), sur l'effet de la vitesse d'air à contre-courant dans la manche (U_d) et sur la perte de charge résiduelle des manches après décolmatage (ΔP_{res}).

- Manches en fibres de polyester non tissées avec traitement de surface par calandrage thermique, présence de 3 anneaux de renfort sur la hauteur des manches, manches colmatées par l'aérosol d'Alumine1 (après 150 cycles) -

A noter que les résultats concernant les influences de la durée du décolmatage et du nombre de manches décolmatées simultanément reflètent simplement la baisse de régime du réservoir d'air comprimé qui ne peut alimenter le décolmatage d'un grand nombre de manches en même temps sans perdre en puissance de décolmatage. Les conclusions seraient différentes si le volume du réservoir permettait d'assurer une puissance de décolmatage constante quel que soit la durée de décolmatage ou le nombre de manches décolmatées simultanément.

Aucune influence de la tension de la manche, T, n'a été enregistrée pour une manche neuve dans le domaine étudié alors même que les deux états étaient très éloignés (manche relâchée ou fortement tendue). Cela constitue un résultat surprenant, principalement concernant les données sur l'accélération du medium, dans la mesure où les modules d'élasticité et de flexibilité du système devraient avoir été modifiés entre les deux séries de tests. Mais encore une fois, les mécanismes de propagations de l'onde de décolmatage ne sont pas connus et la présence d'anneaux de renforts sur les manches peut constituer une source de complication dans la compréhension des phénomènes mis en jeu (coupure de l'effet de vague du décolmatage).

Un paramètre ayant une influence avérée sur le décolmatage mais n'apparaissant pas dans le tableau IV.2 est la taille des particules filtrées. De nombreuses observations de l'état décolmaté, corrélées à diverses conditions opératoires, ont permis de constater que le détachement du gâteau pouvait être également différent suivant la nature des particules agglomérées. La nature et le degré de colmatage interne d'un medium, les forces d'adhésion d'un gâteau sur un filtre ou les forces de cohésion d'une couche de particules sont modifiées en fonction de ces paramètres et provoqueront des modifications de comportement lors du décolmatage en fonction des poussières et du medium filtrant utilisés.

Les paramètres possédant une influence forte sont : le diamètre de la buse d'injection et sa distance par rapport à l'ouverture de la manche, la pression initiale et le volume du réservoir d'air comprimé et la nature et la répartition granulométrique de la poussière à filtrer.

L'étude comparative de l'ensemble de ces résultats permet d'apporter une solide base de connaissances pour optimiser la problématique étape du décolmatage des dépoussiéreurs industriels.

CHAPITRE V

REPARTITION DU DEBIT D'AIR FILTRE DANS UN DEPOUSSIÉREUR A MANCHES

V.1. INTRODUCTION

La synthèse bibliographique a permis de mettre en évidence le fait que le décolmatage constitue la principale cause de problèmes pour les dépoussiéreurs à manches. Parmi les problèmes rencontrés, certains auteurs (Ellenbecker et Leith (1979), Kanaoka et Amornkitbamrung (2001)) constatent que des inhomogénéités dans la répartition de la masse surfacique de particules collectées conduisent à des vitesses de filtration différentes suivant les éléments filtrants d'un dépoussiéreur (cf. paragraphe I.4.4).

Ceci peut s'avérer gênant car l'émission particulaire enregistrée à l'aval augmente significativement avec la vitesse de filtration (Leith et Ellenbecker (1980), Traub (2000)). Si certaines manches présentent des résistances aérauliques plus faibles au cours des cycles, elles sont alors traversées par des débits d'air plus conséquents et elles sont ainsi susceptibles de contaminer plus largement l'aval en particules.

D'autre part, la formation du gâteau de particules est fortement tributaire de la vitesse de filtration. On peut alors craindre que des inhomogénéités dans les débits filtrés par les manches engendrent la construction de gâteaux de structure et de propriétés différentes d'un élément filtrant à l'autre. Des comportements distincts (perte de charge générée, efficacité de collecte, propriétés de décolmatage ...) sont alors susceptibles d'apparaître et de compartimenter le dépoussiéreur en plusieurs zones aux propriétés hétérogènes.

Le phénomène est complexe car il englobe plusieurs effets liés au fonctionnement cyclique des dépoussiéreurs : redéposition d'une fraction des poussières décolmatées, réorganisation du gâteau de particules résiduelles sous l'effet de la perméation d'air, effets sur la perte de charge résiduelle ou sur le vieillissement des éléments filtrants. Ce sujet mérite une étude d'autant plus détaillée que peu de connaissances sont actuellement disponibles concernant la répartition des débits sur un dépoussiéreur à manches.

L'objectif de l'étude consiste donc à suivre la répartition du débit d'air empoussiéré sur les manches du dépoussiéreur pilote au cours des cycles de filtration. Les résultats de ces travaux doivent notamment permettre de répondre aux questions suivantes : Comment s'effectue la répartition du débit global dans les manches d'un dépoussiéreur ? Chacune des manches du dépoussiéreur travaille-t-elle de manière identique tout au long des cycles, ou, au contraire, certaines d'entre elles sont-elles amenées à filtrer des débits plus importants, au gré des décolmatages successifs et de l'éventuelle redéposition des particules décolmatées ? Les manches intérieures subissent-elles un colmatage différent des manches périphériques ? Les inhomogénéités, si elles existent, s'accroissent-elles avec le temps ? Les réponses à l'ensemble de ces questions permettront de mieux comprendre le fonctionnement cyclique d'un dépoussiéreur à manches et conduiront à des recommandations pour l'optimisation de ce procédé de filtration.

V.2. DESCRIPTION DES EXPERIENCES

La description du matériel additionnel utilisé pour cette étude est présentée au paragraphe II.3. L'approche est originale car le débit d'air propre s'échappant de chacune des 24 manches du dépoussiéreur pilote est mesuré individuellement au moyen d'un Venturi. Chacun de ces 24 débits représente une fraction du débit total filtré. Ce dernier est régulé de manière à rester constant quel que soit le degré de colmatage des manches. Les manches du dépoussiéreur sont positionnées en parallèle vis à vis du flux d'air ; celui-ci se répartit donc sur le réseau de manches en fonction des résistances à l'écoulement de chacun des éléments filtrants. Suivre l'évolution des débits individuels par manche revient donc à caractériser les différences d'état de colmatage qui peuvent exister entre chacune des manches.

Les expériences consistent à suivre les évolutions des 24 débits relatifs aux 24 manches filtrantes présentes dans le dépoussiéreur au cours des cycles de filtration. Pendant les cycles, le colmatage des manches s'effectue jusqu'à une perte de charge maximale, ΔP_{\max} , qui peut être variable. Lorsque cette perte de charge, ΔP_{\max} , est atteinte, le décolmatage des manches est déclenché.

Les 24 débits individuels, le débit total et la perte de charge sont enregistrés toutes les 5 secondes. Ces mesures permettent de suivre en temps réel l'évolution de la perte de charge des manches au cours des cycles.

Les résultats qui vont être décrits dans ce chapitre résultent de 3 séries de manipulations distinctes. Pour chacune des séries, un nouveau jeu de filtres est utilisé (medium T12T56320). Les expériences permettent d'étudier les influences de différents paramètres sur la répartition du débit global dans les manches :

- perte de charge maximale avant décolmatage, ΔP_{\max} ;
- pression initiale du réservoir d'air comprimé, P_r ;
- séquence de décolmatage ;
- nature de l'aérosol test.

Les courbes des évolutions de la perte de charge et la concentration à l'aval au cours de ces cycles ont également été décrites au chapitre III et sont fournies dans l'annexe VIII.

	Aérosol test	Nombre de cycles	Conditions opératoires
1	Alumine1	150	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} = 15.\Delta P_0$, configurations de décolmatage variables
2	Alumine2	355	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$ t_d , P_r , ΔP_{\max} et configurations de décolmatage variables
3	Bois2	132	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $t_d = 100 \text{ ms}$ P_r et ΔP_{\max} variables

Tableau V.1 : Récapitulatif des essais menés pour l'étude de la répartition du débit sur les manches.

Rappelons que le décolmatage qui est adopté pour chacune de ces 3 séries de manipulations possèdent les caractéristiques suivantes :

- décolmatage rail par rail avec un intervalle de temps entre les rails égal à 10 s ;
- décolmatage en cascade des manches d'un même rail avec un intervalle de temps entre deux manches consécutives sur le rail égal à 0,1 s ;
- temps de décolmatage (durée d'impulsion de l'air comprimé) $t_d = 0,1 \text{ s}$.

Un décolmatage complet des 24 éléments filtrants se caractérisent donc par le décolmatage des 5 rails de manches à la suite les uns des autres lorsque la valeur de perte de charge maximale prédéfinie est atteinte. Une fois les 5 rails décolmatés, l'injection d'air comprimé est stoppée et ne sera redéclenchée qu'à la fin du cycle suivant.

Pour un cycle donné, la répartition du débit total à travers les 24 manches filtrantes est déterminée soit avant le décolmatage lorsque la perte de charge est égale à ΔP_{\max} , soit juste après le décolmatage lorsque la perte de charge est égale à la perte de charge résiduelle. Les moyennes de débit s'effectuent sur une durée de 60 secondes (12 points de mesure) et débutent soit 70 secondes avant le déclenchement d'un décolmatage, soit 10 secondes après l'arrêt du décolmatage des 5 rails, comme cela est schématisé sur la figure V.1.

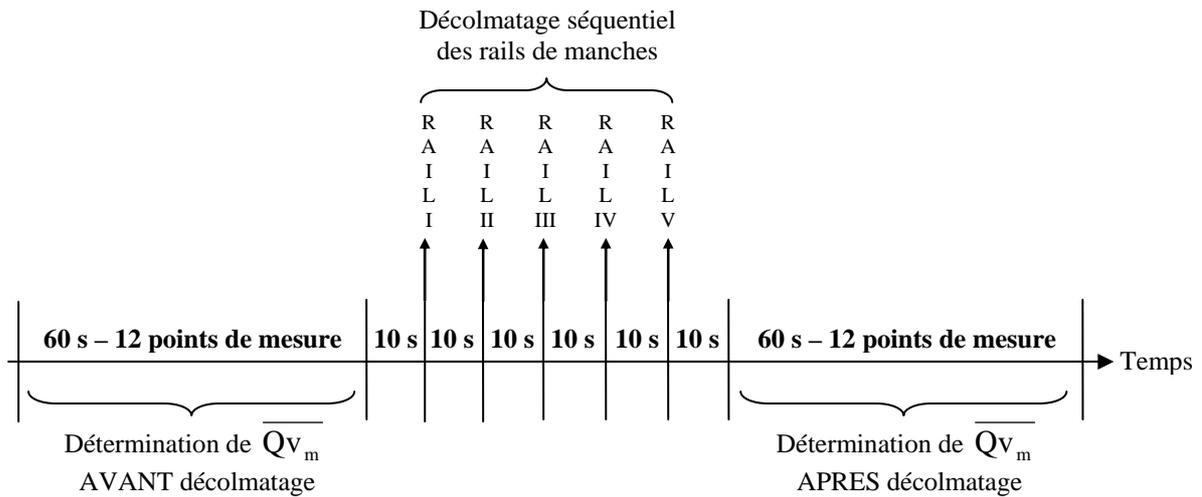


Figure V.1 : Schéma de compréhension de la méthode de calcul des débits moyens par manche.

L'équation suivante permet de calculer le débit moyen de la manche m , avant ou après un décolmatage :

$$\overline{Qv_m} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{12} \cdot \sum_{k=1}^{12} Qv_{m,i,k} \right) \quad (V.1)$$

- avec $\overline{Qv_m}$ le débit moyen de la manche m ($m = 1$ à 24)
 n le nombre de cycle sur lequel s'effectue la moyenne ($n \leq 30$)
 $Qv_{m,i,k}$ la $k^{ième}$ valeur du débit sur une série de 12, pour la manche m et lors du cycle i

Quand il s'agit de calculer un débit moyen par manche en cours de décolmatage (débit transitoire), le calcul est identique mais il s'effectue uniquement sur 2 points de mesure au lieu de 12 du fait que l'intervalle de temps est réduit à 10 secondes.

Les valeurs de débits qui seront indiquées pour chacune des répartitions résultent de calculs de moyennes sur n cycles de filtration. Pour un nombre de cycles peu élevé (≤ 30), l'écart-type* associé aux débits moyens par manche reste faible et justifie le fait que l'état de la manche avant ou après un décolmatage ne fluctue pas de cycle en cycle. Le débit moyen d'une manche, $\overline{Qv_m}$, calculé comme il vient d'être indiqué, est un paramètre stable, qui évolue lentement au cours des cycles s'il reste soumis aux mêmes conditions opératoires.

Au cours de ces essais, un enregistrement de la pression du réservoir d'air comprimé au cours des séquences de décolmatage est effectué afin de pouvoir interpréter l'influence d'éventuelles fluctuations de cette pression au cours des décolmatages pneumatiques sur la répartition des débits.

V.3. REPARTITION DU DEBIT TOTAL SUR DES MANCHES NEUVES

Les différentes répartitions du débit total sur les 24 manches à l'état neuf (sans gâteau et en air propre) en fonction de la vitesse de filtration sont présentés dans le tableau V.2.

Dans le tableau V.2 et dans d'autres tableaux au cours de ce chapitre, les résultats des débits par manche sont organisés de telle manière que le lecteur trouve, pour chaque cas étudié, une représentation schématique de la coiffe du dépoussiéreur avec une vue de dessus. Comme cela est expliqué sur la figure V.2, à chaque valeur indiquée correspond une manche et le débit volumique moyen qui lui est associé.

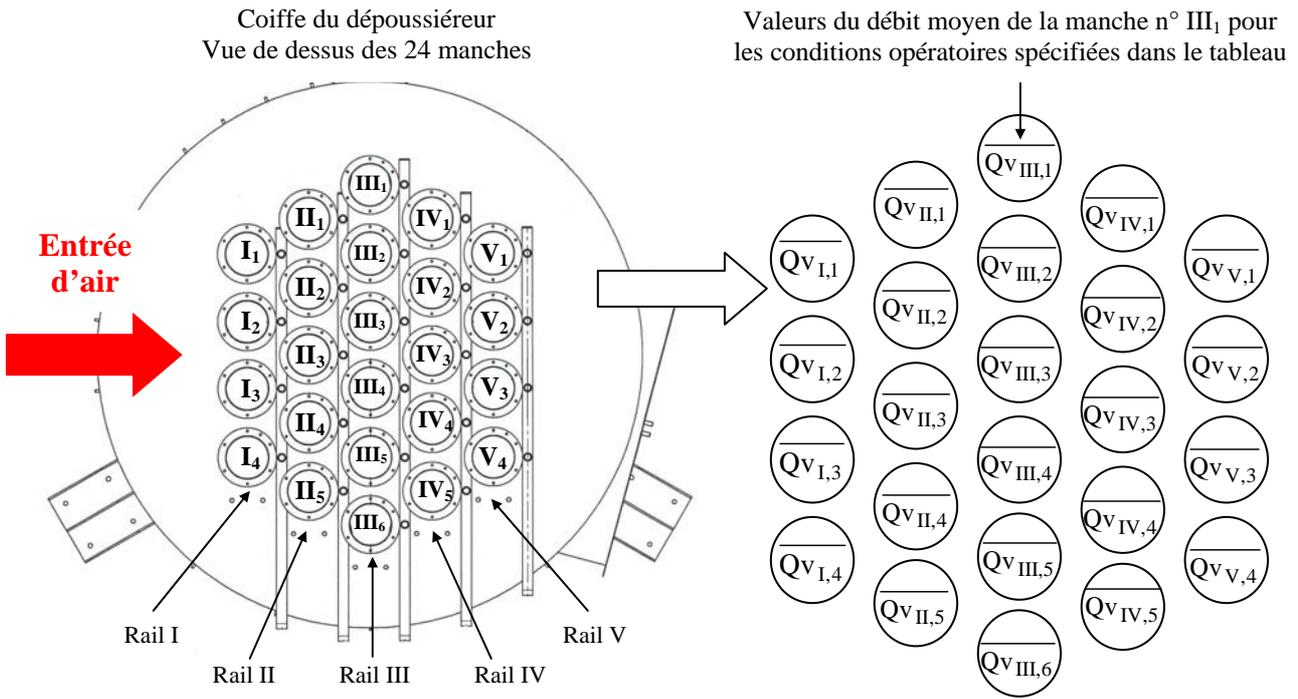


Figure V.2 : Représentation de la coiffe et présentation des résultats des débits moyens par manches, $\overline{Qv_m}$.

Vitesse de filtration	$U_f = 3 \text{ cm.s}^{-1}$	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$	$U_f = 8 \text{ cm.s}^{-1}$
Débits par manche arrondis $\overline{Qv_m}$ ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	<p style="text-align: center;"> 67 67 66 67 65 67 66 66 67 67 66 65 67 66 65 67 65 66 64 66 66 65 </p>	<p style="text-align: center;"> 105 105 105 104 105 103 104 104 103 104 103 103 105 104 104 103 104 105 103 104 105 103 </p>	<p style="text-align: center;"> 177 177 176 175 177 178 179 177 175 174 175 175 176 175 177 177 176 177 177 178 175 178 176 </p>
Débit total Qv	$1585 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	$2500 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	$4235 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
Débit théorique par manche	$\overline{Qv_m} = \frac{Qv}{24} = 66 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	$\overline{Qv_m} = \frac{Qv}{24} = 104 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	$\overline{Qv_m} = \frac{Qv}{24} = 176 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
Ecart type associé	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 0,9 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 0,8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 1,1 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$

Tableau V.2 : Répartition des débits sur les 24 manches neuves en fonction de la vitesse de filtration.

Les résultats montrent que la répartition d'un flux d'air propre se fait de manière homogène sur l'ensemble des 24 éléments filtrants à l'état neuf. L'écart-type caractéristique de l'étalement de la série des 24 débits moyens, $\sigma(\overline{Qv_m})$, est petit par rapport à la valeur moyenne (le coefficient de variation obtenu en relativisant l'écart-type par rapport à la moyenne est inférieur à 1,4 % pour les trois vitesses) et justifie du faible étalement des valeurs de débits. Ces considérations démontrent que chaque manche du dépoussiéreur est amenée, dans les conditions initiales, à traiter le même débit volumique d'air que tous les autres éléments filtrants.

V.4. REPARTITION DES DEBITS PAR MANCHE LORS DES CYCLES DE FILTRATION

V.4.1. Dépendance de la répartition des débits avec la séquence de décolmatage imposée

Ce paragraphe a pour objectif de décrire la manière dont se répartit le débit total dans les manches avant et après un décolmatage pneumatique. L'influence de la séquence de décolmatage a été évaluée sur 3 configurations décrites dans la figure V.3 :

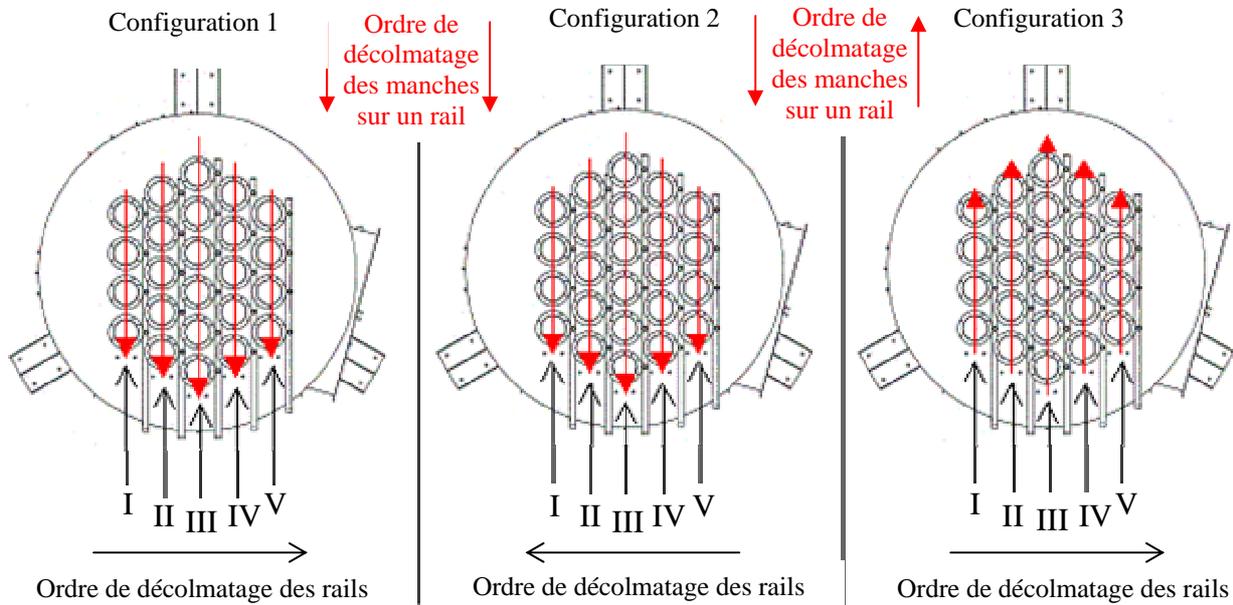


Figure V.3 : Présentation des différentes configurations de décolmatage étudiées (dépoussiéreur à manches vu de dessus).

Chaque séquence de décolmatage s'effectue suivant un schéma classiquement rencontré dans l'industrie et qui consiste à décolmater les rails de manches les uns à la suite des autres. Cependant, l'ordre de décolmatage des rails et/ou des manches sur un rail est modifié suivant la séquence de décolmatage étudiée :

- Configuration 1 : décolmatage du rail I vers le rail V et décolmatage des manches sur un rail dans l'ordre croissant de leur numérotation (cf. figure V.2 pour la numérotation)
- Configuration 2 : décolmatage du rail V vers le rail I et décolmatage des manches sur un rail dans l'ordre croissant de leur numérotation
- Configuration 3 : décolmatage du rail I vers le rail V et décolmatage des manches sur un rail dans l'ordre décroissant de leur numérotation

Les différentes répartitions des débits par manche, avant et après le décolmatage de tous les rails, sont présentées dans le tableau V.3, en fonction de la configuration de décolmatage imposée. Les valeurs indiquées résultent de calculs de moyennes sur 30 cycles de filtration.

Ces résultats montrent tout d'abord que la répartition du débit global avant décolmatage s'effectue de manière homogène sur l'ensemble des 24 manches, et ce, quelle que soit la configuration du décolmatage. L'étendue maximale* observée sur une même série de valeurs est de $10 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et les écarts-types associés aux 24 débits de la répartition, $\sigma(\overline{Q_{v_m}})$, sont tous inférieurs ou égaux à $2,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Lorsque le gâteau de filtration est constitué, chacune des 24 manches filtre donc environ $1/24^{\text{ème}}$ du débit total. A noter tout de même que l'homogénéité est moins bonne que lorsque les manches étaient neuves (tableau V.2 - $\sigma(\overline{Q_{v_m}}) = 0,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$).

Décolmatage	Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3
Débits par manche Q_{v_m} ($m^3.h^{-1}$) AVANT décolmatage à $\Delta P_{max} = 15.\Delta P_0$			
	$\sigma(Q_{v_m}) = 2,3 \text{ m}^3.h^{-1}$	$\sigma(Q_{v_m}) = 2,5 \text{ m}^3.h^{-1}$	$\sigma(Q_{v_m}) = 2,8 \text{ m}^3.h^{-1}$
Débits par manche Q_{v_m} ($m^3.h^{-1}$) APRES décolmatage à $\Delta P_{max} = 15.\Delta P_0$			
	$\sigma(Q_{v_m}) = 4,9 \text{ m}^3.h^{-1}$	$\sigma(Q_{v_m}) = 4,8 \text{ m}^3.h^{-1}$	$\sigma(Q_{v_m}) = 6,4 \text{ m}^3.h^{-1}$

$$\text{Débits en gras} > \frac{Q_v}{24} = 104 \text{ m}^3.h^{-1}$$

Tableau V.3 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur avant et après décolmatage.
 Alumine1 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{max} = 15.\Delta P_0$

Immédiatement après un décolmatage, il apparaît un déséquilibre plus prononcé et on observe que certaines manches laissent passer des débits plus grands que d'autres. L'étendue maximale pour une même série de valeurs est désormais de $23 \text{ m}^3.h^{-1}$ et les écarts-types associés aux 24 débits de la répartition sont tous supérieurs ou égaux à $4,8 \text{ m}^3.h^{-1}$.

Une simple comparaison avec l'ordre de décolmatage des manches mis en œuvre dans les différentes configurations (figure V.3) permet de comprendre que cette cartographie des débits après le décolmatage des cinq rails est dépendante de la manière dont ce décolmatage s'effectue. Ainsi, un décolmatage en configuration 1 conduit, après décolmatage, à une cartographie pour laquelle les débits vont croissants du rail I vers le rail V et dans l'ordre inverse du sens de décolmatage des manches sur un rail. A l'inverse, un décolmatage en configuration 2 conduit, après décolmatage, à une cartographie pour laquelle les débits vont croissants du rail V vers le rail I et dans l'ordre inverse du sens de décolmatage des manches.

Le décolmatage séquentiel complet des 24 éléments filtrants provoque des déséquilibres dans la répartition du débit total sur les manches. Les premières manches du dépoussiéreur à être décolmatées présentent manifestement des résistances aérauliques plus grandes que les dernières manches décolmatées. Les déséquilibres observés sont donc directement dépendants de la manière dont s'est effectuée la séquence de décolmatage. Pourquoi le décolmatage provoque-t-il une inhomogénéité dans la répartition des débits par manche ?

V.4.2. Origines probables de l'inhomogénéité de la répartition des débits constatée après un décolmatage

V.4.2.1. Evolution dynamique des débits au cours d'un décolmatage pneumatique

La répartition des débits par manche au cours d'un décolmatage déclenché à $\Delta P_{max} = 30.\Delta P_0$ est présentée dans le tableau V.4. Les valeurs de débits indiquées résultent de calculs de moyennes sur 5 cycles de filtration et sont caractéristiques du débit de la manche considérée juste avant, pendant ou juste après un décolmatage (cf. figure V.1 pour la méthode de calcul du débit moyen par manche).

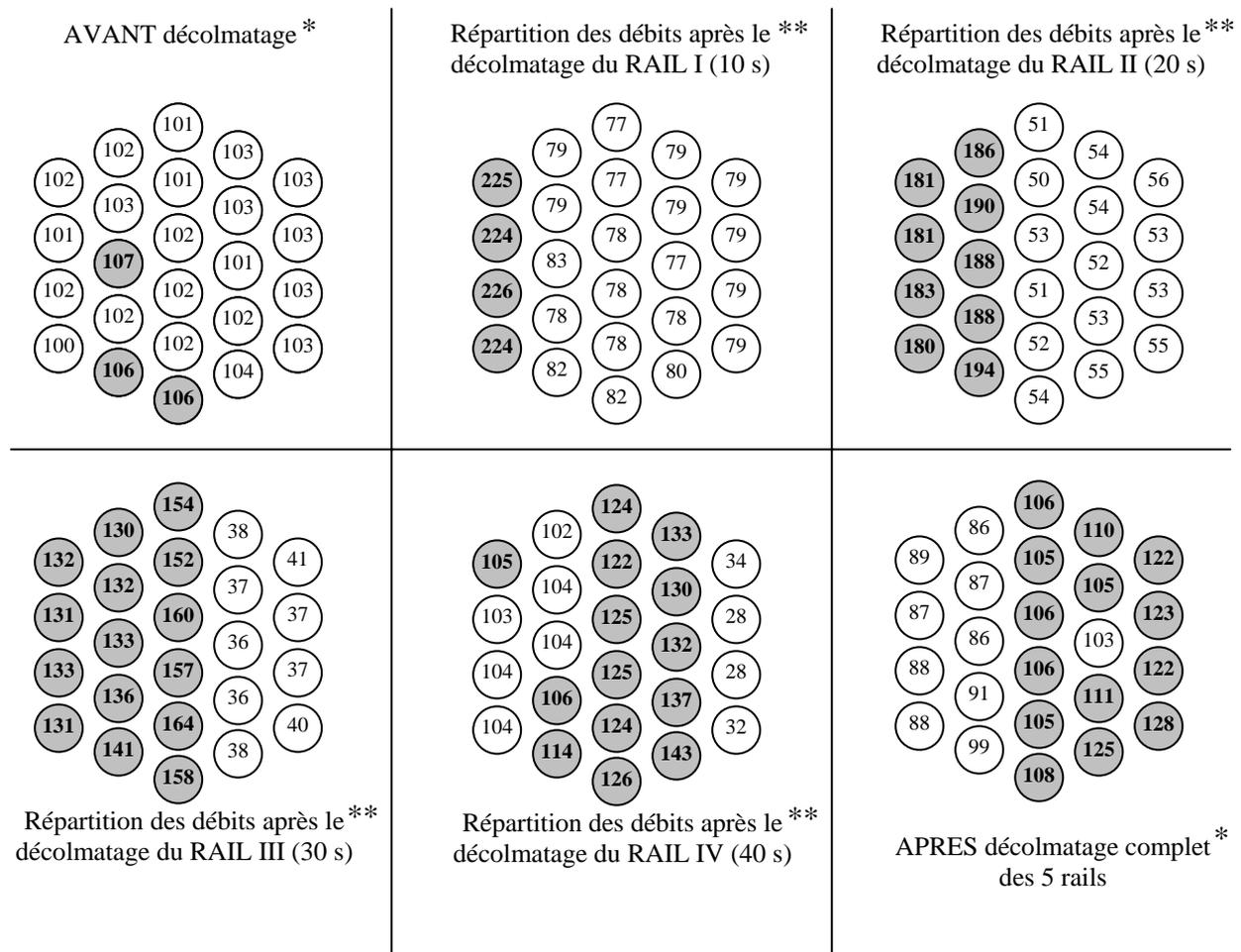


Tableau V.4 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur avant, pendant et après un décolmatage. Alumine 1, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{max} = 30.\Delta P_0$, configuration 3

* Q_{v_m} calculés sur une moyenne de 60s ; ** Q_{v_m} calculés sur une moyenne de 10s

Ces résultats mettent particulièrement bien en évidence le fait que les premières manches décolmatées sont le siège de débits fortement élevés quand les autres manches ne le sont pas encore. Les débits des manches décolmatées dépassent largement la valeur moyenne de $104 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ sur une manche ; ces débits transitoires atteignent des valeurs très élevées (jusqu'à plus de deux fois la valeur moyenne mesurée pendant le colmatage pour certaines manches). Même si ce dépassement ne dure que très peu de temps, les conséquences dans la répartition du débit global ne sont pas négligeables. Les déséquilibres dans les débits après le décolmatage des cinq rails sont notables sur cet exemple : l'étendue de cette série de valeurs est égale à $42 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, l'écart-type associé est de $13,7 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ pour un coefficient de variation de plus de 13 %.

Cette évolution de la répartition des débits pendant la durée du décolmatage permet d'avancer des hypothèses pour expliquer les différences de résistances aérauliques qui existent entre les manches après l'achèvement du décolmatage séquentiel des cinq rails :

- Les premières manches à être décolmatées voient leur colmatage reprendre avant les autres manches. Le premier rail est par exemple décolmaté 40 secondes avant le dernier. Il est donc probable qu'il se produise sur les manches du rail I une redéposition d'une fraction des poussières détachées pendant le décolmatage. La remise en suspension des particules lors du décolmatage provoque une augmentation importante de la concentration dans l'enceinte. Sous l'influence des forts débits transitoires qui les traversent (tableau V.4), les manches décolmatées sont donc susceptibles de filtrer une quantité de particules élevée en un temps relativement court et donc de reconstituer un nouveau gâteau avant même que les manches du dernier rail ne soient décolmatées.
- Les débits transitoires élevés mesurés sur les manches décolmatées peuvent également provoquer une compression du gâteau résiduel ou une compression du medium.

Des expériences ont été menées dans l'objectif d'approfondir la validité de ces hypothèses.

V.4.2.2. Mise en évidence des influences de la redéposition d'une partie des poussières décolmatées et des forts débits transitoires lors du décolmatage

Différence entre un décolmatage « on-line » et un décolmatage en air propre

Deux exemples de comparaison de la répartition des débits entre un décolmatage « on-line » et un décolmatage en air propre sont présentés sur le tableau V.5.

Ces résultats montrent tout d'abord qu'il se produit une inhomogénéité dans la répartition des débits après décolmatage que ce dernier s'effectue « on-line » ou en air propre. Les inhomogénéités observées pour les décolmatages en air propre ne peuvent provenir que des particules décolmatées à l'amont qui se redéposent sur les manches ou encore d'un effet de compression du gâteau résiduel provoqué par les forts débits transitoires ou encore d'une combinaison des deux. En tout état de cause, ces phénomènes suffisent à engendrer des perturbations dans les débits après un décolmatage.

L'étude des résultats obtenus « on-line » montre que la présence supplémentaire de particules dans le flux d'air amont joue un rôle aggravant dans l'inhomogénéité observée dans la répartition des débits. L'apport massique en particules dans l'enceinte de filtration par la génération à l'amont participe à l'inhomogénéité des résistances aérauliques des manches après un décolmatage, mais dans une proportion moindre que les deux autres phénomènes évoqués précédemment.

	décolmatage « on-line »	décolmatage en air propre
Débits par manche $\overline{Qv_m}$ (m ³ .h ⁻¹) APRES décolmatage $\Delta P_{max} = 13.\Delta P_0$ $P_r = 7 \text{ bar}$		
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 3,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 2,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Débits par manche $\overline{Qv_m}$ (m ³ .h ⁻¹) APRES décolmatage $\Delta P_{max} = 19.\Delta P_0$ $P_r = 3 \text{ bar}$		
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 8,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 6,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Tableau V.5 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après des décolmatages « on-line » et en air propre.
 Alumine1 , $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1

Incidence des fortes vitesses transitoires sur l'état décolmaté des manches

Lors d'un décolmatage, les débits d'air transitoires dépassent largement la vitesse de filtration habituellement imposée sur les manches lors de leur colmatage. Des modifications de la structure de l'état résiduel des manches ainsi que la formation d'un nouveau gâteau aux propriétés modifiées par les valeurs élevées de vitesse de dépôt sont alors possibles. L'influence de la vitesse de perméation de l'air sur la perte de charge des manches à l'état décolmaté doit donc être étudiée.

La modification de l'état résiduel des manches, lorsque celles-ci sont traversées par des débits d'air importants, est mise en évidence par des perméations aérauliques sur les manches à l'état décolmaté.

Les manches sont tout d'abord décolmatées avec le débit d'air coupé. Ainsi, l'effet de redéposition est minimisé. L'hypothèse qu'après ce décolmatage particulier, toutes les manches se retrouvent dans le même état résiduel peut donc être avancée. L'expérience consiste ensuite à effectuer une perméation d'air propre dans le sens des débits croissants (« sens croissant » correspondant à des vitesses échelonnées entre $0,4.U_f$ et $1,5.U_f$) puis une perméation d'air propre dans le sens des débits décroissants (« sens décroissant » correspondant à des vitesses allant de $1,5.U_f$ à $0,4.U_f$). Le « sens décroissant » est réalisé immédiatement à la suite du « sens croissant ». Ces deux perméations d'air successives permettent ainsi la simulation du comportement des premières manches à être décolmatées (si ce n'est que le phénomène est plus rapide lors d'un décolmatage - cf. paragraphe V.4.2.1) :

- à l'issue du décolmatage, le débit d'air traversant la manche croit jusqu'à atteindre une valeur élevée du fait de sa faible résistance aéraulique par rapport aux autres (« sens croissant ») ;
- puis, au cours du décolmatage des autres rails, le débit filtré par ces premières manches diminue jusqu'à revenir à une valeur proche de la vitesse de filtration (« sens décroissant »).

Deux exemples de résultats sont fournis sur les figures V.4 (colmatage par l'alumine²) et V.5 (colmatage par le bois²). Les courbes présentent l'évolution de la perte de charge des manches à l'état décolmaté en fonction de la vitesse de perméation d'air au cours des sens « croissant » et « décroissant » décrits précédemment.

A noter que les barres d'incertitudes liées aux points expérimentaux n'ont pas été représentées sur les figures car leurs valeurs restaient faibles (inférieures à quelques %) et ne permettaient pas une représentation lisible sur le graphique.

Les expériences présentent une hystérèse entre le « sens croissant » et le « sens décroissant ». Ainsi, la perte de charge résiduelle des manches pendant le « sens décroissant » est supérieure à celle mesurée pendant le « sens croissant ». L'essai pour l'alumine présente une augmentation de la perte de charge résiduelle des manches de 110 Pa à $4,7 \text{ cm.s}^{-1}$. Celui pour le bois conduit à une augmentation de près de 60 Pa à $4,7 \text{ cm.s}^{-1}$.

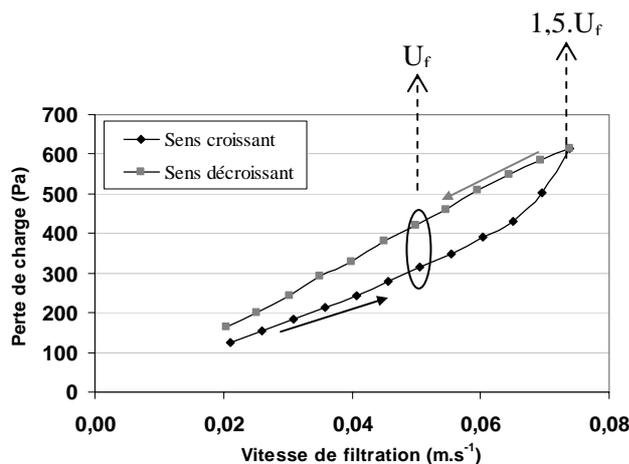


Figure V.4 : Perte de charge des manches à l'état décolmaté en fonction de la vitesse de perméation. Alumine², $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\text{max}} = 10.\Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$ lors du colmatage

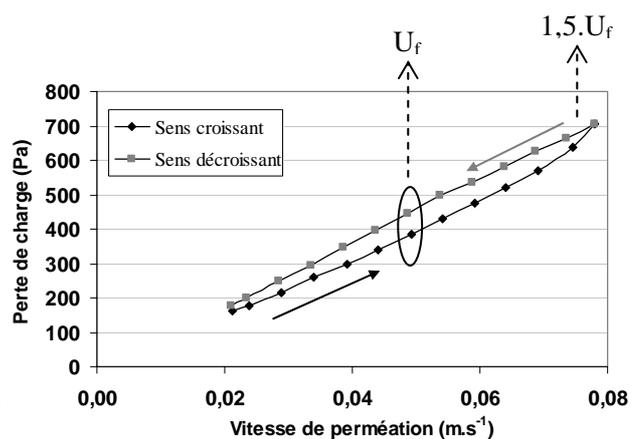


Figure V.5 : Perte de charge des manches à l'état décolmaté en fonction de la vitesse de perméation. Bois², $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\text{max}} = 20.\Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$ lors du colmatage

Soumettre les manches dans leur état résiduel à des vitesses plus grandes que la vitesse de filtration U_f revient à modifier leur résistance à l'écoulement. Cette modification de l'état du système ne va manifestement pas dans le sens d'une minimisation de l'énergie mais conduit, au contraire, à une augmentation de la résistance globale à l'écoulement des manches. Le phénomène est identique pour les deux types d'aérosol.

Ce constat a été confirmé par deux autres résultats :

- Une perméation d'air dans le « sens croissant », correspondant à des vitesses croissantes de $0,4.U_f$ à U_f suivi d'un « sens décroissant » jusque $0,4.U_f$, ne modifie pas les valeurs de perte de charge des manches car U_f n'a pas été dépassée.

- Des essais identiques à ceux présentés figures V.4 et V.5 ont été menés jusqu'à des vitesses de perméation maximales comprises entre U_f et $1,5.U_f$. Ils donnent des résultats similaires mais la courbe « décroissante » se situent toujours en dessous de la courbe obtenue pour $1,5.U_f$.

Il semble donc que pendant la perméation d'air dans le « sens croissant », dès lors que la vitesse de perméation, U_p , dépasse la vitesse de filtration, U_f , à laquelle s'est construit le gâteau, il s'opère une modification de la structure résiduelle des manches provoquant une augmentation de la résistance à l'écoulement. Dans le cas des expériences de perméation d'air propre qui ont été menées, cette modification ne peut provenir que d'une réorganisation des particules résiduelles présentes autant en surface (compression) qu'en profondeur (migration).

L'hypothèse d'une compression du media, elle n'est pas valide et ce, pour deux raisons :

- Les données accessibles sur le sujet ne font pas état d'une compression des media filtrants utilisés en dépoussiérage industriel pour les vitesses utilisées dans nos expériences.
- La compression d'un medium fibreux est un phénomène réversible, ce qui n'est pas observé dans nos expériences puisque la modification reste permanente.

Lors d'un décolmatage pneumatique, les résistances à l'écoulement des premières manches à être décolmatées, et qui sont traversées par les plus importants débits d'air transitoires, augmentent par rapport à celles des autres manches. Les expériences qui ont été menées ne permettent pas, par contre, d'expliquer plus en détail les raisons de ce phénomène. Les hypothèses les plus probables sont une compression de la couche de particules résiduelles si cette dernière existe et une migration de certaines particules résiduelles au cœur du medium, qui entraînent toutes les deux une augmentation de la résistance à l'écoulement de l'ensemble.

V.4.2.3. Inhomogénéité des débits filtrés par les manches d'un même rail

L'objectif de ce paragraphe est d'effectuer un enregistrement de la pression du réservoir d'air comprimé au cours des séquences de décolmatage pour tenter d'expliquer les disparités momentanées après décolmatage dans les débits d'air filtrés par les manches d'un même rail (cf. tableaux V.3, V.4 et V.5). En effet, ce sont les manches décolmatées en dernier sur le rail qui laissent passer les plus petits débits alors qu'à l'inverse, ce sont les manches des derniers rails à être décolmatées qui sont traversées par les débits les plus grands.

Ces différences restent généralement faibles pour les conditions opératoires utilisées. Cependant, des étendues supérieures à $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ et des écarts-types, $\sigma(\overline{Q_{v_m}}, \text{rail}_r)$ (notation de $\sigma(\overline{Q_{v_m}})$ pour les manches du rail r), de plus de $8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ sont tout de même relevés sur certaines séries de valeurs de débits émanant des manches d'un même rail.

La figure V.6 représente les évolutions de la pression du réservoir d'air comprimé au cours du temps lors d'un décolmatage pneumatique classique des 24 manches et pour trois pressions initiales de réservoir. Rappelons que le décolmatage des manches d'un même rail s'effectue en cascade avec un intervalle de temps entre deux manches consécutives sur le rail égal à 0,1 s et que l'intervalle de temps entre deux rails consécutifs est égal à 10 s.

Après chaque décolmatage d'un rail et quelle que soit la pression initiale de décolmatage, il se produit une chute de pression dans le réservoir d'air comprimé. La baisse de pression,

enregistrée à la fin du décolmatage complet d'un rail, est d'autant plus marquée que le nombre de manches décolmatées sur le rail est grand.

Ce résultat prouve que, lors du décolmatage des éléments filtrants d'un rail, la dernière manche à être décolmatée ne bénéficie plus d'une aussi grande pression de réservoir que les précédentes. Les manches décolmatées en dernier sur les rails sont donc les moins bien régénérées de toutes. Elles possèdent au final des résistances à l'écoulement plus élevées et elles laissent ainsi passer moins de débit que les autres manches.

Les disparités observées dans les débits par manche d'un même rail n'ont pas les mêmes causes que les inhomogénéités constatées entre les rails. En effet, le délai inférieur ou égal à 1200 ms qui sépare le décolmatage des deux manches les plus éloignées d'un même rail ne permet pas de penser que des mécanismes tels que la redéposition de particules ou les importantes valeurs de vitesse de flux d'air filtré sont à l'origine des écarts observés. De plus, les conséquences ne concordent pas avec ce qui avait été observé auparavant.

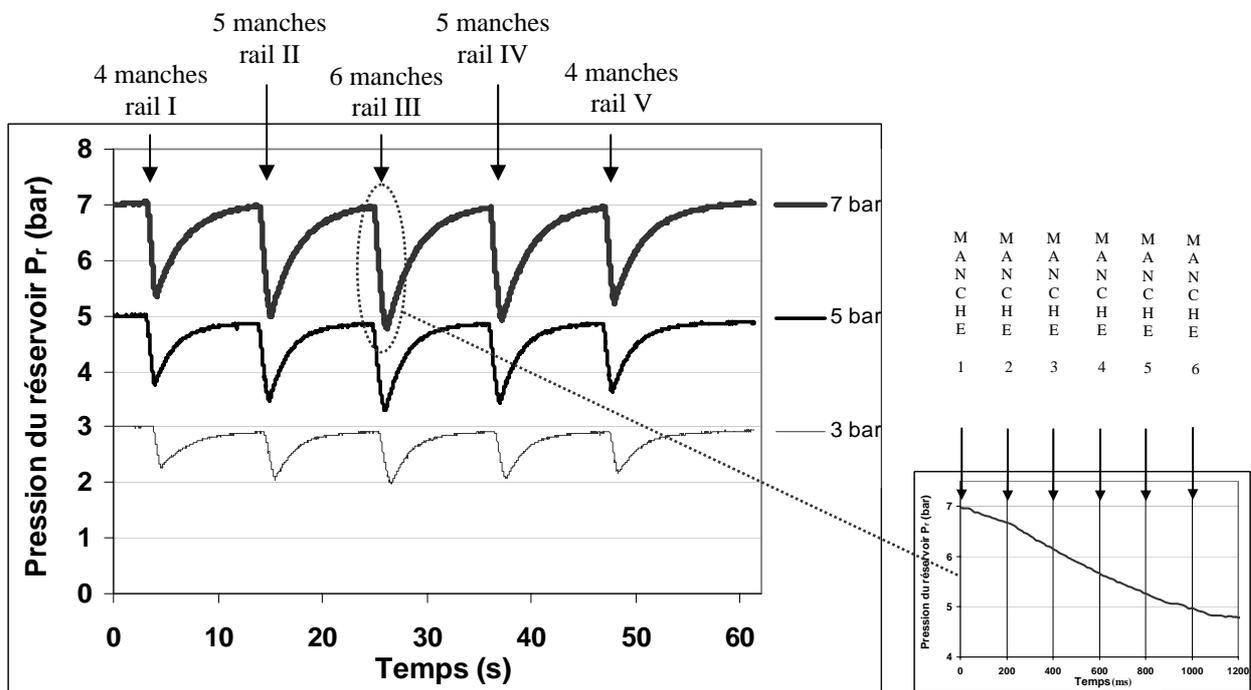


Figure V.6 : Evolutions de $P_r(t)$ au cours de séquences de décolmatage pour différentes pressions initiales.

Alumine2 , $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} = 10 \cdot \Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, Configuration 1

Δt entre 2 manches sur un rail = 100 ms , Δt entre 2 rails = 10s

Il est intéressant de noter que le temps de recharge du réservoir en air comprimé est beaucoup plus long que celui de sa décharge. La durée de 10 secondes allouée à cet effet permet tout juste de retrouver la pression initiale dans le réservoir avant le décolmatage du rail suivant (elle semble même légèrement insuffisante dans les exemples à 3 et à 5 bar). Il semble donc que dans le cas précis du dépoussiéreur étudié, une durée inférieure à 10 s entre le décolmatage de deux rails consécutifs, ne permettrait pas au réservoir de retrouver sa valeur de pression initiale de décolmatage et provoquerait donc des inhomogénéités supplémentaires dans les débits filtrés par les manches, faute d'un décolmatage efficace de toutes les manches. Ce temps de 10 secondes semble donc constituer un bon compromis entre une recharge suffisante de la pression dans le réservoir et une durée d'action la moins longue possible concernant les phénomènes de redéposition de poussières, de formation d'un nouveau gâteau et de perméation de fortes vitesses d'air.

V.4.3. Etude des influences des conditions opératoires sur la répartition des débits

Les considérations développées dans le paragraphe V.4.2 ont permis de mieux comprendre les causes qui conduisent à l'établissement d'un état inhomogène dans la répartition des débits après un décolmatage séquentiel pneumatique. Les paragraphes qui vont suivre présentent les influences de différents paramètres sur cette répartition des débits. L'objectif de ces travaux est de déterminer s'il existe des facteurs qui limitent ou détériorent l'inhomogénéité de la répartition.

V.4.3.1. Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé

Les résultats du chapitre IV montrent qu'une augmentation de P_r conduit à des accélérations du medium et à des vitesses d'air à contre-courant en bas de manche plus importantes. Le décolmatage d'une manche devrait donc vraisemblablement être meilleur lorsque la pression du réservoir (P_r) est grande. Mais quelle influence possède la pression initiale du réservoir d'air comprimé sur la répartition des débits filtrés après décolmatage ?

Les résultats pour quatre pressions de réservoir, échelonnées entre 2,5 et 7 bar, sont fournis dans le tableau V.6 (toutes les autres conditions opératoires restant identiques par ailleurs sauf le vieillissement éventuel du medium).

	$P_r = 2,5 \text{ bar}$	$P_r = 3 \text{ bar}$
Débits par manche $\overline{Qv_m}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) APRES décolmatage		
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 8,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 7,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
	$P_r = 5 \text{ bar}$	$P_r = 7 \text{ bar}$
Débits par manche $\overline{Qv_m}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) APRES décolmatage		
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 5,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 5,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Tableau V.6 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après un décolmatage complet des 5 rails, en fonction de la pression du réservoir d'air comprimé.

Alumine2 , $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $\Delta P_{\text{max}} = 19 \cdot \Delta P_0$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1

Il n'y a pas d'évolution nette dans la répartition des débits en fonction de la pression du réservoir d'air comprimé. Cependant, il semble que plus la pression du réservoir d'air comprimé de décolmatage est petite, plus les différences entre les premières et les dernières manches décolmatées d'un même rail s'accroissent (comparaisons des débits dans le sens croissant de numérotation des manches sur un rail).

Le décolmatage d'un rail sous forte pression ($P_r > 5$ bar) permet un nettoyage des manches plus homogène car le réservoir d'air comprimé possède vraisemblablement assez d'énergie pour décolmater correctement l'ensemble des 4, 5 ou 6 manches du rail (cf. figure V.6). Par contre, dans le cas d'un décolmatage à faible pression ($P_r < 3$ bar), il semble que la pression initiale du réservoir ne fournisse pas assez de puissance pour décolmater l'ensemble des manches d'un rail de manière identique.

Pour $P_r < 3$ bar, on observe d'ailleurs visuellement une séparation en deux zones de manches dans le dépoussiéreur : une zone où le gâteau a été décolmaté et pour laquelle les manches laissent passer d'importants débits (manches décolmatées en premier sur le rail) et une zone où le gâteau est encore fortement présent après décolmatage et qui est caractérisée par de faibles débits (manches décolmatées en dernier sur le rail).

Plus la pression de réservoir (P_r) est petite, plus il semble que les différences entre les manches des premiers et des derniers rails à être décolmatés diminuent (comparaisons des débits du rail I vers le rail V). Tout d'abord, le décolmatage pour une pression de 2,5 bar est moins puissant et donc, moins efficace que pour une pression de 7 bar. Les débits transitoires pour $P_r = 2,5$ bar sont donc plus faibles car les différences de résistance à l'écoulement entre les manches colmatées et les manches décolmatées ne sont pas aussi grandes que pour $P_r = 7$ bar. Les phénomènes perturbateurs associés aux débits d'air transitoires lors d'un décolmatage pneumatique (cf. paragraphe V.4.2.1) sont d'autant moins influents que la pression du réservoir est faible.

D'autre part, les valeurs de débit par manche dans le rail décolmaté en dernier sont beaucoup plus dispersées que lors des résultats pour le décolmatage à 7 bar. Il apparaît clairement sur ces résultats que les manches décolmatées en dernier sur un rail possèdent une résistance à l'écoulement significativement plus importante que les manches décolmatées en premier. Ce constat rejoint les commentaires apportés au paragraphe V.4.2.3 et qui portent sur l'impossibilité pour le réservoir d'air comprimé de décolmater efficacement l'ensemble des manches d'un rail lorsque la pression initiale imposée est trop petite.

Les différences observées dans la répartition des débits émanent de l'incapacité pour le réservoir d'air comprimé à assurer un décolmatage identique dans chacune des 24 manches (principalement pour $P_r \leq 3$ bar). Elles proviennent également du comportement transitoire des débits pendant les 50 secondes du décolmatage séquentiel pneumatique (redéposition et modification de la structure de certaines manches, principalement pour $P_r \geq 5$ bar). Ces deux phénomènes conditionnent l'état de la répartition des débits après décolmatage.

En conclusion, il apparaît que la répartition des débits après décolmatage est plus inhomogène lorsque la pression du réservoir (P_r) est faible.

V.4.3.2. Influence du temps de décolmatage

Le temps de décolmatage, t_d , correspond à la durée d'ouverture des électrovannes de décolmatage et donc à la durée d'injection de l'air comprimé à contre-courant dans une manche. Au cours des expériences, t_d a généralement été pris égal à 100 ms. Une fois sa valeur fixée, t_d est identique pour l'ensemble des 24 éléments filtrants. Dans le chapitre IV, il a été montré qu'un temps de décolmatage plus élevé conduit à un secouage en haut de manche et une surpression en bas de manche plus longs, mais pas plus puissants.

Pour mettre en évidence l'influence de ce paramètre sur la répartition des débits filtrés par les manches, le temps de décolmatage a varié lors des essais. Les résultats sont présentés sur le tableau V.7 (toutes les autres conditions opératoires restant identiques par ailleurs sauf le vieillissement éventuel du medium).

	$t_d = 100 \text{ ms}$	$t_d = 500 \text{ ms}$
Débits par manche arrondis $\overline{Qv_m}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) APRES décolmatage		
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 7,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 9,4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
	$\sigma(\overline{Qv_m}, \text{rail}_r) \geq 5,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}, \text{rail}_r) \geq 8,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Tableau V.7 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après décolmatage, en fonction du temps de décolmatage.

Alumine2 , $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $\Delta P_{\text{max}} = 19 \cdot \Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1

Plus le temps de décolmatage est élevé, plus l'inhomogénéité globale existant dans les valeurs de débits, $\sigma(\overline{Qv_m})$, est grande. Lorsque t_d augmente, il se produit une accentuation du phénomène de séparation en deux zones, entre les premières manches à être décolmatées sur les rails et les dernières. Les écarts-types associés aux valeurs de débits pour chaque rail, $\sigma(\overline{Qv_m}, \text{rail}_r)$, sont ainsi plus grands pour $t_d = 500 \text{ ms}$ que pour $t_d = 100 \text{ ms}$. La chute de pression rapide du réservoir d'air comprimé de décolmatage lorsque t_d augmente, quantifié dans le tableau V.8, semble donc constituer la cause majeure des différences observées dans le tableau V.7.

		Valeur minimale de P_r (en bar) en fin de décolmatage d'un rail (% de diminution par rapport à P_r initiale)	
		$t_d = 100 \text{ ms}$	$t_d = 500 \text{ ms}$
$P_r = 3 \text{ bar}$	Rails de 4 manches (I et V)	2,3 (23 %)	1,8 (40 %)
	Rails de 5 manches (II et IV)	2 (33 %)	1,75 (42 %)
	Rail de 6 manches (III)	2 (33 %)	1,7 (43 %)
$P_r = 5 \text{ bar}$	Rails de 4 manches (I et V)	3,8 24 %)	3,2 (36 %)
	Rails de 5 manches (II et IV)	3,5 30 %)	3 (40 %)
	Rail de 6 manches (III)	3,3 34 %)	2,8 (44 %)
$P_r = 7 \text{ bar}$	Rails de 4 manches (I et V)	5,3 (24 %)	4,2 (40 %)
	Rails de 5 manches (II et IV)	5 (28 %)	3,9 (44 %)
	Rail de 6 manches (III)	4,7 (33 %)	3,6 (48 %)

Tableau V.8 : Diminution de la pression du réservoir d'air comprimé après le décolmatage d'un rail en fonction de la pression initiale du réservoir, du temps de décolmatage et du nombre de manches sur le rail décolmaté.

Plus le nombre de manches positionnées sur le rail concerné est grand et/ou plus le temps de décolmatage est élevé, plus la valeur de pression dans le réservoir chute jusqu'à une valeur basse. Le pourcentage de diminution de la pression dans le réservoir par rapport à la valeur initiale varie entre 23 et 33 % pour $t_d = 100$ ms et entre 36 et 48 % pour $t_d = 500$ ms, selon les conditions du décolmatage. La ou les première(s) manche(s) sur un rail restent donc convenablement décolmaté(es) (la pression initiale étant identique dans tous les cas) mais les manches suivantes, principalement les dernières, sont d'autant moins bien décolmatées que t_d est grand.

Un temps de décolmatage qui augmente favorise les inhomogénéités de débits entre les manches d'un même rail et conduit à une répartition globale des débits après décolmatage moins homogène.

V.4.3.3. Influence de la perte de charge maximale avant décolmatage

Pour mettre en évidence l'influence de la perte de charge maximale avant décolmatage sur la répartition des débits filtrés par les manches, différents essais à des valeurs échelonnées entre $9.\Delta P_0$ et $30.\Delta P_0$ ont été réalisés. Les répartitions des débits par manche, après décolmatage complet des cinq rails, sont présentées dans le tableau V.9, en fonction de la perte de charge maximale avant décolmatage (toutes les autres conditions opératoires restant identiques par ailleurs sauf le vieillissement éventuel du medium).

	$\Delta P_{max} = 9.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 13.\Delta P_0$
Débits par manche $\overline{Qv_m}$ ($m^3.h^{-1}$) APRES décolmatage		
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 1,7 \text{ m}^3.h^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 3,5 \text{ m}^3.h^{-1}$
	$\Delta P_{max} = 19.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 30.\Delta P_0$
Débits par manche $\overline{Qv_m}$ ($m^3.h^{-1}$) APRES décolmatage		
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 5,6 \text{ m}^3.h^{-1}$	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 13,2 \text{ m}^3.h^{-1}$

Tableau V.9 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après décolmatage en fonction de la perte de charge maximale atteinte avant décolmatage.
 Alumine2 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1

Plus la perte de charge maximale avant décolmatage est grande, plus la répartition des débits après décolmatage est inhomogène. Ainsi, le décolmatage à $\Delta P_{\max} = 9.\Delta P_0$ ne perturbe pratiquement pas la répartition des débits ($\sigma(\overline{Q_{v_m}})$ faible et étendue de la série seulement égale à $6 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$). A l'inverse, les décolmatages à $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$ et $30.\Delta P_0$ conduisent à de plus grandes perturbations dans la répartition des débits et les étalements de la série de valeurs sont caractérisés par des étendues respectives de 21 et $41 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$.

Les deux hypothèses exploitées dans le paragraphe V.4.2.1 trouvent ici encore une justification :

- Lorsque la perte de charge maximale (ΔP_{\max}) est grande (masse de gâteau élevée), le décolmatage est facilité car les forces de cohésion du gâteau sont plus grandes et facilitent la rupture des forces d'adhésion avec le medium (cf. paragraphe I.3.4.4 - Morris et al. (1987), Sievert et Löffler (1987), Aguiar et Coury (1992), Koch (1996)). Les différences de résistance à l'écoulement entre les manches décolmatées et celles qui ne le sont pas se creusent et les débits transitoires qui traversent les manches décolmatées sont d'autant plus grands que la perte de charge ΔP_{\max} est élevée.
- Si la remise en suspension du gâteau ne se fait pas sous forme de particules élémentaires ou de petits agglomérats, mais qu'elle s'effectue par plaques, alors la quantité de particules susceptibles de se redéposer est faible. Par contre, la modification de la résistance à l'écoulement de la manche à l'état résiduel par les débits transitoires est encore augmentée car les vitesses de passage de l'air sur la manche dans les zones décolmatées sont plus grandes (cf. paragraphe I.4.1).
- Enfin, si le gâteau « explose » et si sa remise en suspension se fait principalement sous forme de particules élémentaires, alors la redéposition des poussières sur les manches peut également avoir lieu. Elle sera d'ailleurs d'autant plus conséquente que la perte de charge maximale sera élevée puisque les débits transitoires et la concentration en particules à l'amont seront tous deux augmentés.

Lorsque la perte de charge maximale avant décolmatage (ΔP_{\max}) augmente, le gâteau à la surface des premières manches décolmatées peut se reconstruire plus vite et les modifications de structure de l'état décolmaté seront plus importantes.

V.4.3.4. Influence de la nature des particules

La nature des particules à filtrer conditionne la manière dont s'effectue le décolmatage des gâteaux de filtration (cf. paragraphe IV.6). L'influence de ce paramètre sur la répartition des débits a été testée.

Des exemples de répartition des débits dans les manches après décolmatage sont présentés sur le tableau V.10, pour des particules de bois² de $33,8 \mu\text{m}$ de diamètre médian et pour des particules d'alumine² de $3,1 \mu\text{m}$ de diamètre médian, dans différentes conditions opératoires.

La comparaison des résultats de la répartition pour le bois et l'alumine amène à un commentaire principal. L'étude des écarts-types des valeurs de débits par rail indique qu'il existe des inhomogénéités plus importantes sur un même rail lorsque le colmatage s'effectue avec des particules d'alumine qu'avec des particules de bois. Ainsi pour $\Delta P_{\max} \approx 20.\Delta P_0$ et $P_r = 3 \text{ bar}$, les cinq écarts-types associés aux séries de valeurs de débits pour chacun des cinq rails, $\sigma(\overline{Q_{v_m, \text{rail}_r}})$, sont tous supérieurs à $5,8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ pour l'alumine alors qu'ils sont tous inférieurs à $1,8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ pour le bois.

	<p>Bois2 ($d_p = 33,8 \mu\text{m}$) $\Delta P_{\text{max}} = 10.\Delta P_0 - P_r = 3 \text{ bar}$</p>
<p>Débits par manche $\overline{Qv_m}$ ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) APRES décolmatage</p>	
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 5,8 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
	<p>Bois2 ($d_p = 33,8 \mu\text{m}$) $\Delta P_{\text{max}} = 20.\Delta P_0 - P_r = 3 \text{ bar}$</p>
<p>Débits par manche $\overline{Qv_m}$ ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) APRES décolmatage</p>	
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 6,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
	<p>Alumine2 ($d_p = 3,1 \mu\text{m}$) $\Delta P_{\text{max}} = 19.\Delta P_0 - P_r = 3 \text{ bar}$</p>
<p>Débits par manche $\overline{Qv_m}$ ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) APRES décolmatage</p>	
	$\sigma(\overline{Qv_m}) = 7,3 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$

Tableau V.10 : Répartition des débits dans les manches du dépoussiéreur après décolmatage, en fonction de la nature des particules et d'autres conditions opératoires.

$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1

Il semble donc que la chute de puissance du réservoir d'air comprimé affecte plus le décolmatage des manches pour l'alumine que pour le bois. Malgré, la baisse de l'intensité du jet d'air comprimé pour les dernières manches à être décolmatées, le gâteau de particules de bois est décolmaté de manière identique sur toutes les manches d'un rail lorsque $P_r = 3 \text{ bar}$, ce qui n'est pas le cas pour le gâteau d'alumine.

Les résultats du tableau V.10 et d'autres qui ne sont pas présentés ont permis de déterminer que les influences des paramètres ΔP_{\max} et P_r sur la répartition des débits après décolmatage évoluent de manière similaire pour les particules de bois et pour les particules d'alumine. Ces observations sont donc en accord avec ce qui a été développé précédemment pour les particules d'alumine (paragraphe V.4.3.1 et V.4.3.3).

D'autre part, les résultats ne sont plus comparables lorsque $P_r \leq 2,5$ bar car le décolmatage s'effectue d'une manière complètement différente pour chacune des deux poudres (observations visuelles). Le décolmatage du gâteau de particules de bois s'effectue désormais par plaques. Ce changement de comportement lors du décolmatage modifie profondément la répartition des débits par rapport à ce qui avait été commenté jusque maintenant. L'écart-type associé aux 24 valeurs de débits et les écarts-types sur un même rail augmentent fortement.

Les deux types de particules, alumine et bois, possèdent des propriétés physiques différentes (propriétés adhésives et cohésives, masse volumique, taille et forme des particules ...) mais conduisent toutes deux à des inhomogénéités dans la répartition des débits après décolmatage. Ce constat n'est pas surprenant en soi dans la mesure où l'apparition de ces écarts de débit dépend plus largement de la séquence de décolmatage (forts débits transitoires) et des capacités insuffisantes du réservoir d'air comprimé que des propriétés de l'aérosol colmatant. Si elle n'est pas le principal facteur, la nature des particules joue néanmoins un rôle qui doit être pris en considération car la manière dont se détache le gâteau influe tout de même sur les mécanismes perturbateurs à l'origine de la dispersion dans les valeurs des 24 débits.

Il est probable que des différences apparaissent à terme dans les comportements qui viennent d'être décrits. En effet, le degré de colmatage interne du médium augmente lentement au cours des cycles et pourrait conduire à une modification progressive des réponses des manches. Du fait de la différence de taille entre les particules d'alumine ($d_{pm} = 3,1 \mu\text{m}$) et de bois ($d_{pm} = 33,8 \mu\text{m}$), il est également possible que les modifications qui seront apportées sur le comportement des manches soient différentes pour chacun des deux aérosols et qu'il se produise une divergence, en terme de répartition du débit, entre les deux systèmes.

V.5. EVOLUTION DE LA REPARTITION DES DEBITS PAR MANCHE AU COURS DU COLMATAGE

A la suite d'un décolmatage pneumatique des 24 manches du dépoussiéreur pilote, il se produit une inhomogénéité dans la répartition du débit global sur les 24 éléments filtrants. Le colmatage suivant permet en général de réajuster les différences de résistance à l'écoulement des manches et permet donc de retrouver une valeur de débit de filtration proche sur l'ensemble des manches. Dès lors, plusieurs questions apparaissent concernant ce retour à l'équilibre des 24 débits : La période pendant laquelle la répartition des débits est inhomogène est-elle majoritaire au cours d'un cycle ou bien le phénomène d'homogénéisation est-il rapide ? Cette période dépend-elle uniquement du degré de dispersion obtenu juste après le décolmatage ou les conditions opératoires interviennent-elles ?

Pour répondre à cette problématique, des suivis des débits traversant les manches filtrantes ont été effectués en continu pendant les cycles de filtration. Jusque maintenant, les tableaux de résultats présentaient des valeurs instantanées de cette répartition à certains moments clefs d'une séquence de décolmatage. Désormais, pour les résultats des figures V.7 et V.8 et pour le tableau V.11, l'exploitation porte sur le suivi en continu des débits pendant plusieurs cycles consécutifs.

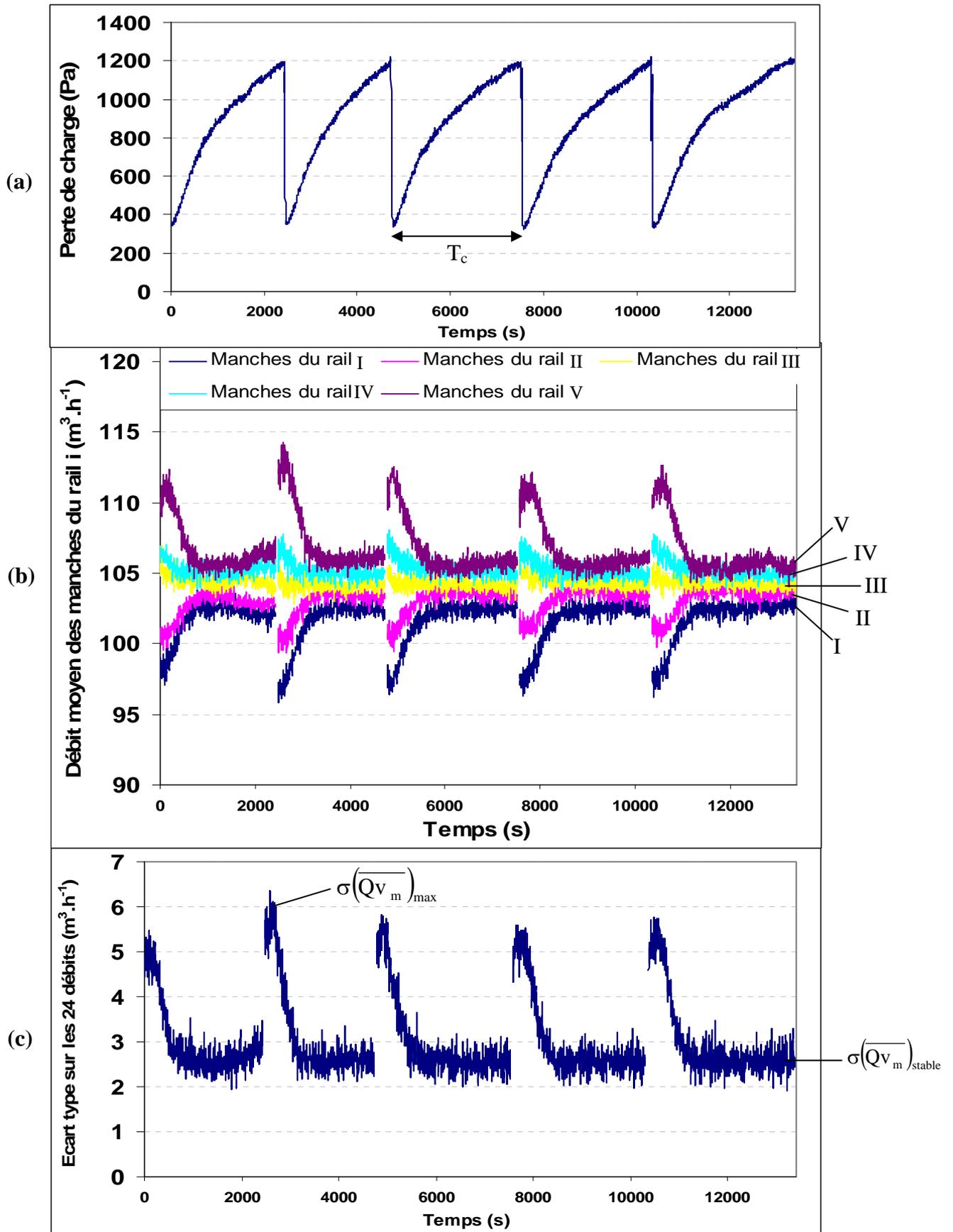


Figure V.7 : Evolution de la perte de charge (a), des débits moyens des manches par rail (b) et de l'écart-type des 24 valeurs de débits au cours de 5 cycles de colmatage et de décolmatage
 Alumine2, $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $\Delta P_{max} = 19 \cdot \Delta P_0$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1

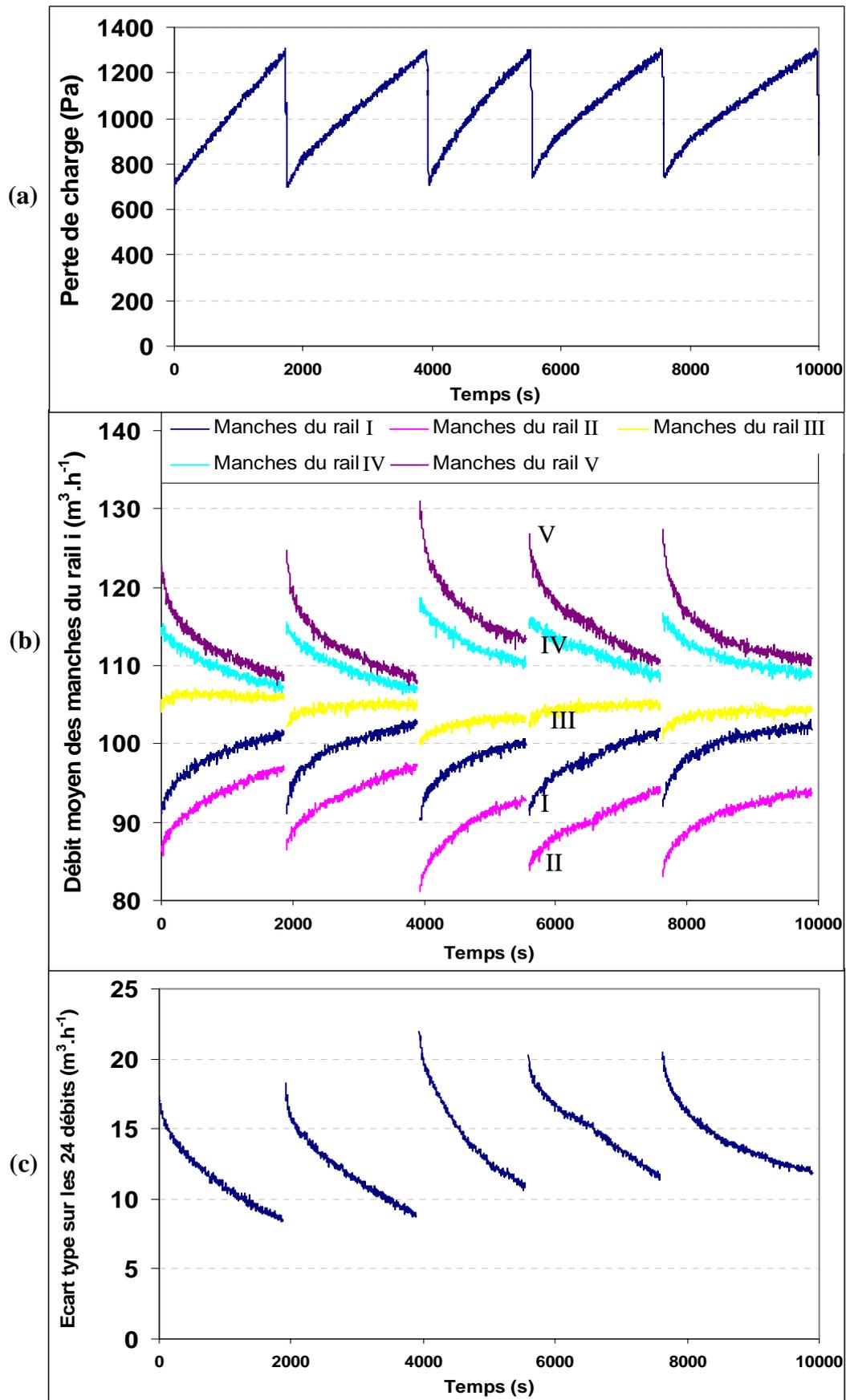


Figure V.8: Evolution de la perte de charge (a), des débits moyens des manches par rail (b) et de l'écart-type des 24 valeurs de débits au cours de 5 cycles de colmatage et de décolmatage
 Bois2 , $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $P_r = 1,5 \text{ bar}$, $\Delta P_{\max} = 20 \cdot \Delta P_0$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1

La figure V.7a représente l'évolution de la perte de charge des manches en fonction du temps au cours de cinq cycles de filtration.

Sur la figure V.7b sont représentées les évolutions des débits moyens des manches pour chacun des cinq rails en fonction du temps et ce, pour les mêmes cinq cycles de filtration. Le débit moyen des manches du rail r , pour un instant donné, se calcul en effectuant la moyenne des débits des manches du rail r . Pour des problèmes de représentation et d'échelles, seules les valeurs de débits des états transitoires n'ont pas été inscrits sur le graphe.

L'évolution de l'écart-type sur les 24 valeurs de débit par manche, $\sigma(\overline{Q_{v_m}})$, en fonction du temps est représentée sur la figure V.7c, pour les cinq cycles de colmatage et de décolmatage. La figure V.8 réunit des résultats similaires mais dans une situation où les débits par manche ne retournent jamais à une répartition homogène.

L'observation de la figure V.7b conduit à trois constats majeurs et permet de visualiser de manière concrète des phénomènes évoqués précédemment :

- La répartition des débits sur les manches du dépoussiéreur est inhomogène après une séquence de décolmatage. Les premières manches décolmatées (celles du rail I sur cet exemple) possèdent des résistances à l'écoulement supérieures aux autres et elles laissent donc passer moins de débits à la reprise de la filtration. Les premières manches décolmatées des rails IV et V filtrent quant à elles des débits d'air plus faibles à la fin du décolmatage du dernier rail.
- Le colmatage suivant permet de rééquilibrer les résistances des manches car la construction du nouveau gâteau se fait majoritairement sur celles qui sont traversées par les débits les plus grands. Les disparités de débits se réduisent donc progressivement pour s'homogénéiser autour de la valeur moyenne de $104 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (en environ 1000 s).
- Enfin, pour cet exemple, toute la fin du colmatage (environ 1800 s) s'effectue avec une répartition des débits homogène. La courbe de montée en perte de charge n'est plus caractérisée par une augmentation concave mais par une évolution linéaire, signe que l'ensemble des résistances à l'écoulement sont proches pour toutes les manches.

Il apparaît que $\sigma(\overline{Q_{v_m}})$ est également soumis à un comportement cyclique avec de fortes valeurs après les décolmatages et une stabilisation vers une valeur basse lorsque les débits se répartissent de nouveau de manière homogène sur les manches (figure V.7c).

Les résultats de la figure V.7 présente un cas favorable pour l'inhomogénéité dans la répartition du débit total filtré, ce qui n'est pas le cas de la figure V.8.

Les figures V.8b et V.8c réunissent des résultats similaires mais dans une situation où les débits par manche ne retournent jamais à une répartition homogène ($P_r = 1,5 \text{ bar}$, $\Delta P_{\max} = 20 \cdot \Delta P_0$). Les fortes inhomogénéités obtenues après décolmatage et des temps de cycles relativement courts ne permettent pas, pour ces conditions opératoires particulières, une harmonisation des résistances à l'écoulement et un retour assez rapide pour retrouver une répartition homogène des débits à la fin du colmatage.

Le tableau V.11 récapitule différents paramètres permettant de décrire l'évolution de la répartition des débits par manche au cours du colmatage :

- T_c représente la durée moyenne d'un cycle pour les conditions opératoires spécifiées.
- $\%_1$ représente le pourcentage de temps pendant lequel la répartition des débits reste inhomogène après le décolmatage (la répartition est considérée comme étant redevenue homogène lorsque $\sigma(\overline{Q_{v_m}}) \leq 3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Ce pourcentage est obtenu en

divisant la durée moyenne pour laquelle les débits sont inhomogènes par la durée moyenne totale d'un cycle.

- $\sigma(\overline{Qv_m})_{\max}$ est la valeur maximale de l'écart-type pour la série des 24 débits, relevée après un décolmatage et qui caractérise donc le degré d'inhomogénéité des débits juste après le décolmatage.
- $\sigma(\overline{Qv_m})_{\text{stable}}$ est la valeur stabilisée de l'écart-type pour la série des 24 débits, relevée juste avant un décolmatage et qui caractérise donc le degré d'homogénéité retrouvé des débits en toute fin de colmatage.

Conditions opératoires			Paramètres descriptifs			
Aérosol	ΔP_{\max}	P_r (bar)	T_c (s)	%I (en %)	$\sigma(\overline{Qv_m})_{\max}$ ($m^3.h^{-1}$)	$\sigma(\overline{Qv_m})_{\text{stable}}$ ($m^3.h^{-1}$)
Alumine2	13. ΔP_0	7	1100	56	4,2	2,4
	19. ΔP_0	7	2820	38	6	2,5
	19. ΔP_0	3	970	72	8	3
	19. ΔP_0	2,5	520	100	9	-
Bois2	10. ΔP_0	3	1700	18	7	3
	10. ΔP_0	1,5	850	42*	8	3,7*
	20. ΔP_0	3	2600	22	10	3
	20. ΔP_0	1,5	1850	100	22	-

* les débits se stabilisent autour de $104 m^3.h^{-1}$ en environ 360 secondes mais leur écart-type stabilisé, $\sigma(\overline{Qv_m})_{\text{stable}}$, garde la valeur constante de $3,7 m^3.h^{-1}$, supérieure à $3 m^3.h^{-1}$.

Tableau V.11 : Paramètres permettant de décrire l'évolution de la répartition des débits par manche au cours du colmatage en fonction des conditions opératoires imposées aux manches
 $U_f = 4,7 cm.s^{-1}$, $d_b = 10 mm$, configuration 1

Les résultats du tableau V.11 montrent tout d'abord que plus la perte de charge maximale avant décolmatage est grande et/ou plus la pression initiale du réservoir d'air comprimé est importante, plus la durée moyenne d'un cycle est allongée. Ce constat, classique en dépoussiérage, provient du fait que le gâteau de particules met plus de temps à se reconstruire si la valeur maximale de perte de charge à atteindre est élevée (ΔP_{\max} grande) ou si la perte de charge résiduelle après un décolmatage est basse (P_r grande).

Il a également été montré précédemment (paragraphe V.4.3.1) que plus P_r est basse, plus $\sigma(\overline{Qv_m})$ est élevé (principalement du fait des écarts entre les manches d'un même rail). Ce résultat est vérifié par les évolutions de $\sigma(\overline{Qv_m})_{\max}$ en fonction de P_r , relevées dans le tableau V.11. Pour une perte de charge maximale et un aérosol donnés, la valeur maximale de l'écart-type après un décolmatage est d'autant plus grande que la pression initiale du réservoir est faible. Les inhomogénéités globales sur les 24 débits sont maximisées pour les petites pressions de réservoir d'air comprimé.

Il a été montré précédemment (paragraphe V.4.3.3) que plus ΔP_{\max} est élevée, plus $\sigma(\overline{Qv_m})$ est grand. Ce résultat est également observable grâce aux résultats du tableau V.11, au regard des évolutions de $\sigma(\overline{Qv_m})_{\max}$ en fonction de ΔP_{\max} . Pour une pression de réservoir et un aérosol donnés, la valeur maximale de l'écart-type après un décolmatage est d'autant plus grande que la perte de charge maximale est élevée. Les inhomogénéités globales sur les 24 débits sont maximisées pour les fortes perte de charge maximale (ΔP_{\max}).

L'ensemble de ces considérations permet d'aboutir aux conclusions suivantes concernant le comportement des débits et les évolutions du pourcentage de temps pendant lequel la répartition des débits reste inhomogène après le décolmatage, $\%_I$:

- Plus la pression initiale du réservoir est petite, plus $\%_I$ est grand. Cette aggravation du temps global d'inhomogénéité des débits pendant les cycles résultent de deux phénomènes complémentaires : le raccourcissement de la durée moyenne d'un cycle et la baisse de puissance du décolmatage.
- L'influence de la perte de charge maximale (ΔP_{max}) sur la durée d'inhomogénéité des débits ne peut pas être décrite à partir de ces seules expériences.
Pour une perte de charge maximale élevée, si la pression du réservoir est fixée à une valeur trop basse, alors $\%_I$ restera égale à 100 % la totalité du temps et la filtration des particules ne s'effectuera jamais dans des conditions où les débits par manches se répartissent de manière homogène. Certaines manches travailleront donc tout le temps à des vitesses de filtrations notablement plus élevées que certaines autres (les vitesses moyennes U_f peuvent parfois différer de plus de 20 %).

V.6. CONCLUSIONS

La filtration d'air empoussiéré et la répartition des flux massiques de poussières s'effectuent de manière à ce que chacune des manches du dépoussiéreur possède la même résistance à l'écoulement. Les résultats obtenus pour les aérosols d'alumine et de bois démontrent que la répartition des débits volumiques d'air présente des disparités après un décolmatage qui sont ensuite atténuées par le colmatage suivant.

Le décolmatage par à-coup de pression, tel qu'il est classiquement mis en œuvre, possède un effet perturbateur indéniable et provoque des déséquilibres dans la répartition des débits. Les inhomogénéités qui ont été observées et quantifiées ne proviennent pas de l'emplacement des manches par rapport aux autres (manches périphériques, manches intérieures ...) mais bel et bien de la technologie de régénération des manches qui est utilisée : le décolmatage pneumatique séquentiel.

Les variations de débit à travers les manches, qui traduisent les différences de résistances à l'écoulement, ont pour origine trois causes principales :

- A - La perméation de forts débits transitoires sur les premières manches à être décolmatées.
Ceci peut conduire à une réorganisation de l'état résiduel des manches et notamment provoquer une compression du gâteau résiduel et une migration accentuée de particules dans la structure interne du medium.
- B - La remise en suspension de particules du gâteau lors du décolmatage.
Puisqu'elle est couplée à l'établissement de vitesses de filtration élevées sur les premières manches décolmatées, la remise en suspension peut induire une forte redéposition de particules et la création d'un nouveau gâteau de forte compacité.
- C - L'incapacité du réservoir d'air comprimé de décolmatage à assurer une pression de décolmatage identique dans l'ensemble des éléments filtrants d'un unique rail, spécialement pour les faibles pression de réservoir.

Les actions de ces trois phénomènes peuvent parfois se combiner. Ils conduisent à des différences de résistances à l'écoulement entre les manches des premiers et derniers rails à être décolmatés (A et B) ou entre les premières et dernières manches à être décolmatées sur un même rail (C).

Il en résulte des périodes transitoires consécutives à chaque décolmatage, pendant lesquelles la répartition du débit total dans les manches ne s'effectue pas de manière homogène. La durée pendant laquelle la répartition des débits reste inhomogène après le décolmatage dépend des conditions opératoires de filtration et de décolmatage, ainsi que de la nature de l'aérosol colmatant. Le colmatage s'emploie à chaque nouveau cycle à gommer les différences de résistances à l'écoulement entre les manches. Pendant la phase de filtration, il s'opère une compensation des différences de débits entre les manches jusqu'à ce que chacune d'entre elles ait retrouvé une résistance aéraulique équivalente aux autres. Certaines conditions défavorables (perte de charge maximale ΔP_{\max} élevée et pression du réservoir d'air comprimé P_r petite) conduisent à un grand degré d'inhomogénéité des manches et ne permettent jamais le retour des débits à une situation stable et homogène pour laquelle chacune des manches filtrerait environ $104 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ pour $U_f = 0,047 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

La synthèse des résultats de l'influence des paramètres est donnée dans le tableau V.12.

	Paramètre	Domaine de variation	Evolution du paramètre	Evolution de la grandeur considérée		
				$\sigma(\overline{Qv_m})$	$\sigma(\overline{Qv_m}, \text{rail}_r)$	% _I
Paramètres de décolmatage	P_r	[1,5 – 7 bar]	↗	↘	↘	↘
	t_d	[100 – 500 ms]	↗	↗	↗	-
Conditions opératoires de filtration	ΔP_{\max} (ou $W_{g,\max}$)	[9. ΔP_0 – 30. ΔP_0]	↗	↗	→	-

↗ : Augmentation ↘ : Diminution → : Stabilité

Tableau V.12 : Récapitulatif des influences des paramètres étudiés sur l'écart-type associé à la série des 24 valeurs de débit ($\sigma(\overline{Qv_r})$), sur les écarts-types associés aux valeurs de débits pour chaque rail ($\sigma(\overline{Qv_m}, \text{rail}_r)$) et sur le pourcentage de temps pendant lequel la répartition des débits reste inhomogène après le décolmatage (%_I).

Il semble que des augmentations de perte de charge maximale avant décolmatage ou de durée d'impulsion de décolmatage et des diminutions de la pression initiale du réservoir d'air comprimé provoquent une répartition du débit dans les manches encore plus inhomogène. Cependant, les effets d'un décolmatage pneumatique sur la répartition des débits et la cartographie des résistances à l'écoulement des manches du dépoussiéreur dépendent d'un grand nombre de paramètres. Les valeurs numériques obtenues lors de ces travaux et l'ensemble des considérations qui ont pu être développées dans ce chapitre ne sont pas généralisables, en l'état, à un autre dépoussiéreur et doivent toujours être considérées avec les conditions opératoires qui les caractérisent.

La nature de l'aérosol et la manière dont se détache le gâteau de particules peut aussi largement modifier les résultats. En effet, l'état résiduel d'une manche juste après son décolmatage est un élément primordial dans le devenir de sa résistance à l'écoulement pendant l'étape clef de la régénération.

Les inhomogénéités de débits filtrés mis en évidence lors de cette étude ne bouleversent pas fondamentalement le fonctionnement habituel des dépoussiéreurs à manches dans la mesure où les modifications sur la vitesse de filtration sont relativement minimales pendant les phases de colmatage. Par contre, les fortes augmentations de débits sur les premières manches à être décolmatées pendant une séquence de décolmatage classique pourraient être fortement préjudiciables pour la concentration particulaire à l'aval des manches. La forte augmentation de vitesse qui a été mise en évidence, même si elle n'est que transitoire, va en effet pouvoir faciliter le passage de particules vers l'aval.

V.7. MODELISATION DE LA PERTE DE CHARGE ET DE LA REPARTITION DES DEBITS AU COURS DES CYCLES

Un modèle phénoménologique a été développé afin de donner une interprétation des essais de suivi de la perte de charge et de la répartition des débits sur les manches au cours des cycles de colmatage et de décolmatage. A partir d'une mise en équation de la perte de charge des manches selon les équations de Novick et al. (1992), ce modèle décrit les évolutions de la perte de charge et des débits pour chaque étape de la filtration cyclique d'un aérosol. Il prend notamment en compte les différences de résistances à l'écoulement entre manches qui apparaissent au moment du décolmatage séquentiel et les disparités de filtration de l'air empoussiéré qui en découlent.

V.7.1. Hypothèses préliminaires

- Hypothèse 1 : Régime stationnaire en perte de charge résiduelle.

Le modèle est présenté dans le cas d'un état stabilisé des valeurs de perte de charge résiduelle des manches. Ce pseudo régime permanent pour lequel la perte de charge évolue de manière identique de cycles en cycles (dans des conditions opératoires fixées) est observable sur les figures AVIII.4 (Alumine2) et AVIII.7 (Bois2) de l'annexe VIII. Les valeurs expérimentales constantes de ΔP_{res} et ΔP_{max} sont présentées dans le tableau suivant :

Aérosols	Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu m$)			Bois2 ($d_{pm} = 33,8 \mu m$)	
Conditions opératoires	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$; $P_r = 7 \text{ bar}$; $t_d = 100 \text{ ms}$; $d_b = 10 \text{ mm}$; $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$; Configuration 1			$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$; $P_r = 3 \text{ bar}$; $t_d = 100 \text{ ms}$; $d_b = 10 \text{ mm}$; $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$; Configuration 1	
	$\Delta P_{max} = 9.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 13.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 19.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 10.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 20.\Delta P_0$
ΔP_{max} (Pa)	580	820	1210	700	1300
ΔP_{res} (Pa)	330	330	350	320	430

Tableau V.13 : Présentation des valeurs de ΔP_{max} et ΔP_{res} en régime stationnaire pour les différents essais qui ont fait l'objet d'une modélisation.

- Hypothèse 2 : Toute la masse surfacique de particules présente sur la surface filtrante des manches est susceptible d'être décrochée lors du décolmatage.

$$\begin{aligned} \Delta P_{res} &= \Delta P \text{ (medium colmaté en profondeur)} &+& \Delta P \text{ (gâteau résiduel)} \\ \Delta P_{res} &= \Delta P_{res}' &+& \Delta P_{res}'' \\ \Delta P_{res} &= \mu.R_f^*.U_f &+& \mu.K_2.U_f.W_{g,res} \end{aligned}$$

(Equation V.2)

avec $\Delta P_{res}'$ la perte de charge entraînée par le medium colmaté en profondeur (Pa).

$\Delta P_{res}''$ la perte de charge entraînée par un dépôt de particules résiduelles constitué de particules qui n'ont pas été décrochées et de particules qui se sont redéposées au cours du décolmatage précédent (Pa).

R_f^* la résistance à l'écoulement du medium colmaté en profondeur (m^{-1}).

$W_{g,res}$ la masse surfacique de particules résiduelles présente sur la surface externe des manches après le décolmatage ($kg.m^{-2}$).

Il s'en suit que la masse surfacique totale de particules présente sur la surface du medium juste avant un décolmatage, et qui sera donc susceptible d'être décolmatée lors de l'à-coup de pression, peut se calculer de la manière suivante :

$$W_{g,max} = \frac{\Delta P_{max} - \Delta P_{res}'}{\mu \cdot K_2 \cdot U_f} \quad (V.3)$$

$\Delta P_{res}'$ n'est pas un paramètre qui peut être déterminé expérimentalement de manière simple. Il constituera donc un paramètre d'ajustement du modèle, dont la pertinence des valeurs sera discutée ultérieurement. Le seul point de repère que nous possédons est la valeur de la perte de charge du filtre vierge ΔP_0 , qui constitue la valeur de $\Delta P_{res}'$ dans les tous premiers instants de la filtration lorsque le colmatage interne ne s'est pas encore produit. Les valeurs de $\Delta P_{res}'$ en régime stationnaire devraient donc être supérieures à ΔP_0 puisque le colmatage interne aura évolué depuis de nombreux cycles.

La résistance à l'écoulement R_f^* se calculera à partir de $\Delta P_{res}'$ de la manière suivante :

$$R_f^* = \frac{\Delta P_{res}'}{\mu \cdot U_f} \quad (V.4)$$

- Hypothèse 3 : Le décolmatage du medium est uniforme sur la surface totale des manches.

Lors du décolmatage, le gâteau de particules se détache d'une manière uniforme sur l'ensemble de la surface filtrante du medium et d'une manière identique pour les 24 manches. Le modèle ne gère donc pas les cas de décolmatage par plaques, par exemple.

- Hypothèse 4 : Existence d'une fraction décolmatée du gâteau, γ .

La fraction décolmatée détermine la quantité de particules du gâteau qui sera détachée lors d'un décolmatage et qui sera donc remise en suspension à l'amont.

γ , telle qu'elle est employée dans le modèle, peut se définir de la manière suivante :

$$\gamma = \frac{\text{Masse surfacique de particules du gâteau remise en suspension lors du décolmatage}}{\text{Masse surfacique totale de particules collectée sur la surface externe du medium avant décolmatage}}$$

$$\gamma = \frac{W_{g,dec}}{W_{g,max}} \quad (V.5)$$

Les valeurs de γ devraient être en toute logique élevées (> 70 %) car les observations expérimentales attestent d'un bon décrochage du gâteau.

- Hypothèse 5 : Existence d'une fraction redéposée pour les particules, γ_r .

La fraction redéposée détermine la quantité de particules du gâteau remise en suspension à l'amont lors du décolmatage et qui sera redéposée sur le medium filtrant. Il s'agit de particules détachées lors de l'à-coup de pression mais qui n'ont pas la faculté de sédimenter suffisamment rapidement vers la trémie du dépoussiéreur.

γ_r , telle qu'elle est employée dans le modèle, peut se définir de la manière suivante :

$$\gamma_r = \frac{\text{Masse surfacique de particules du gâteau remise en suspension lors du décolmatage et redéposée}}{\text{Masse surfacique totale de particules collectée sur la surface externe du medium avant décolmatage}}$$

$$\gamma_r = \frac{W_{g,redép}}{W_{g,max}} = \frac{W_{g,redép}}{W_{g,dec}} \cdot \gamma \quad (V.6)$$

Les valeurs de γ_r devraient être en toute logique très faibles pour les essais avec l'alumine2 (> 5 %) car les observations expérimentales font état de peu de particules sur la surface des manches après décolmatage (cf. paragraphe IV.6). Les valeurs pour le bois2 devraient par contre être un peu plus élevées.

γ et γ_f sont des paramètres qui n'ont pas été mesurés expérimentalement sur les manches du dépoussiéreur. Ils constitueront donc des paramètres d'ajustements du modèle dont les valeurs seront discutées lors de l'interprétation des résultats.

- Hypothèse 6 : Les manches d'un même rail sont décolmatées simultanément.

Sur les essais, l'intervalle de temps qui sépare le décolmatage de deux manches consécutives d'un même rail est égal à 100 ms. Mis à part ce changement, le décolmatage pris en compte dans le modèle s'effectue selon la configuration 1 (figures V.1 et V.3).

- Hypothèse 7 : Le medium possède une efficacité de collecte de 100 %.

Il s'en suit que la masse surfacique de particules collectées par le medium, $W_c(t)$, qui est engendrée par la génération de poussières à l'amont évolue selon l'équation suivante :

$$W_c(t) = \frac{q_p \cdot t}{S_f} \quad (V.7)$$

- Hypothèse 8 : Pendant les 10 s séparant les décolmatages de deux rails consécutifs, les débits établis sur les manches sont considérés comme constants.

La modification des débits transitoires que peuvent entraîner la redéposition de particules décolmatées et la collecte de nouvelles particules provenant de l'amont est négligée.

- Hypothèse 9 : L'enceinte de filtration est assimilée à un réacteur parfaitement agité.

Par conséquent, la concentration des particules remise en suspension et/ou injectées par génération dans le conduit amont est supposée homogène dans l'ensemble du volume de l'enceinte de filtration.

- Hypothèse 10 : La masse de particules qui se dépose et/ou se redépose sur les manches se fait de manière proportionnelle au débit qui traverse chaque manche.

Remarque : Les 2 m³ que constitue approximativement le volume de l'enceinte de filtration sont balayés en moins de 3 s par le débit d'air de 2500 m³.h⁻¹. La redéposition éventuelle des particules décolmatées sur les manches s'effectue donc bien en moins de 10 s, temps alloué avant le décolmatage du rail suivant.

V.7.2. Mise en équation et procédure de calcul

Le débit total de filtration du dépoussiéreur est régulé et maintenu constant quels que soient l'état de colmatage des 24 manches ou la manière dont se répartit le débit sur le réseau de manches. Par conséquent, la perte de charge est à tout moment identique sur chacune des 24 manches disposées en parallèle. Si les résistances aérauliques des manches viennent à être différentes, les débits individuels qui les traversent se répartiront de manière à ce que la perte de charge soit égale sur chacune des manches du dépoussiéreur.

A tout instant, la perte de charge d'une manche colmatée et traversée par un débit de perméation, U_p , peut être décrite par l'équation suivante :

$$\Delta P(t) = \Delta P(\text{medium colmaté en profondeur}) + \Delta P(\text{gâteau résiduel}) + \Delta P(\text{gâteau en formation})$$

$$\Delta P(t) = \mu \cdot R_f^* \cdot U_p + \mu \cdot K_2 \cdot U_p \cdot W_{g.res} + \mu \cdot K_2 \cdot U_p \cdot W_c(t)$$

(Equation V.8)

La modélisation débute à un cycle n lorsque l'évolution de la perte de charge résiduelle est stabilisée (hypothèse 1) et lorsque la perte de charge des 24 manches est égale à ΔP_{\max} . On suppose que la répartition des débits s'effectue alors de manière homogène sur l'ensemble des manches (le débit total étant de $2500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, chacune des manches filtre donc $104 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

V.7.2.1. Phase de décolmatage séquentiel rail par rail

Le nombre de manches du rail r est noté N_r ($N_1 = 4 = N_5$; $N_2 = 5 = N_4$; $N_3 = 6$)
La surface filtrante d'une manche du dépoussiéreur est notée S_{fm} ($S_{\text{fm}} = 0,613 \text{ m}^2$).

Décolmatage des manches du rail I ($N_1 = 4$)

Pendant l'intervalle de 10 secondes avant le décolmatage des manches du rail II, les quatre manches décolmatées du rail I possèdent une résistance aéraulique plus faible que les 20 autres manches encore colmatées.

Perte de charge des quatre manches du rail I, juste après le décolmatage du rail I :

$$\Delta P = \Delta P (\text{medium colmaté en profondeur}) + \Delta P (\text{gâteau résiduel non décolmaté})$$

$$\Delta P d_{1_1} = \mu \cdot R_f^* \cdot U d_{1_1} + \mu \cdot K_2 \cdot U d_{1_1} \cdot (1 - \gamma) \cdot W_{g,\max} \quad (\text{V.9})$$

avec $U d_{1_1}$ la vitesse de perméation de l'air sur les manches décolmatées du rail I, juste après leur décolmatage ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Perte de charge des vingt manches encore colmatées, juste après le décolmatage du rail I :

$$\Delta P n d_1 = \mu \cdot R_f^* \cdot U n d_1 + \mu \cdot K_2 \cdot U n d_1 \cdot W_{g,\max} \quad (\text{V.10})$$

avec $U n d_1$ la vitesse de perméation de l'air sur les manches non décolmatées, juste après le décolmatage du rail I ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

La figure V.9 expose les étapes de la procédure de calcul qui permet de trouver les valeurs des paramètres importants lors de premier décolmatage :

- $\Delta P d_{1_1}$: perte de charge intermédiaire après décolmatage des manches du rail I (Pa)
- $Q d_{1,m}$: débit transitoire traversant chacune des 4 manches décolmatées du rail I ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
- $Q n d_{1,m}$: débit transitoire traversant chacune des 20 manches non décolmatées ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

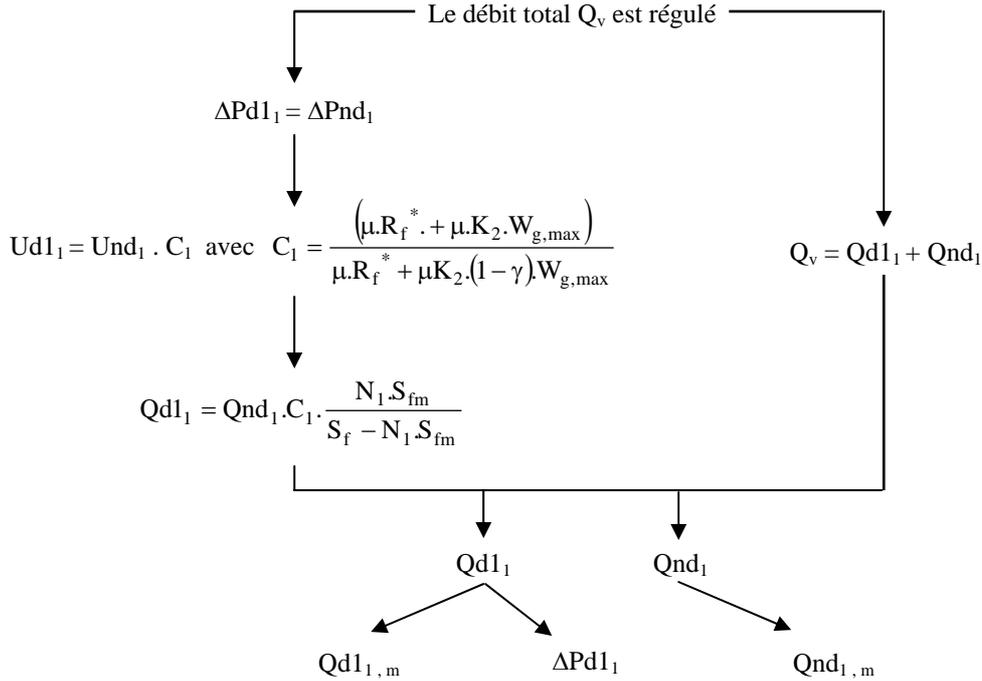


Figure V.9 : Procédure de calcul permettant d'atteindre les débits transitoires et la perte de charge résiduelle intermédiaire après le décolmatage des manches du rail I.
(avec $Qd_1 = N_1.Qd_{1,m}$ et $Qnd_1 = (N_2 + N_3 + N_4 + N_5).Qnd_{1,m}$)

Décolmatage des manches du rail II ($N_2 = 5$)

Pendant l'intervalle de 10 s avant le décolmatage des manches du rail III, les neuf manches décolmatées des rails I et II possèdent des résistances aérauliques plus faibles que les 15 autres manches encore colmatées. Les nouvelles équations de la perte de charge d'une manche en fonction du rail sur lequel elle est positionnée tiennent compte de la redéposition et de la collecte de particules qui se sont opérées pendant les 10 s entre le décolmatage du rail I et celui du rail II (autant sur les manches décolmatées que sur celles non décolmatées).

Perte de charge des quatre manches du rail I, juste après le décolmatage du rail II :

$$\Delta P = \Delta P \begin{matrix} \text{(medium} \\ \text{colmaté en} \\ \text{profondeur)} \end{matrix} + \Delta P \begin{matrix} \text{(gâteau} \\ \text{résiduel non} \\ \text{décolmaté)} \end{matrix} + \Delta P \begin{matrix} \text{(particules} \\ \text{décolmatées} \\ \text{et redéposées)} \end{matrix} + \Delta P \begin{matrix} \text{(particules} \\ \text{collectées)} \end{matrix}$$

$$\Delta Pd_2 = \mu.R_f^* . Ud_2 + \mu.K_2 . Ud_2 . (1-\gamma) . W_{g,max} + \mu.K_2 . Ud_2 . \left(\frac{Qd_1}{Q_v} \right) . W_{g,max} . \gamma_r + \mu.K_2 . Ud_2 . \left(\frac{Qd_1}{Q_v} \right) . \frac{q_p . \Delta t}{N_1 . S_{fm}}$$

(Equation V.11)

avec Ud_2 la vitesse de perméation de l'air sur les manches décolmatées du rail I juste après le décolmatage du rail II ($m.s^{-1}$).

Δt l'intervalle de temps entre les décolmatages de deux rails consécutifs (10 s).

Perte de charge des cinq manches du rail II, juste après le décolmatage du rail II :

$$\Delta P = \Delta P \text{ (medium colmaté en profondeur)} + \Delta P \text{ (gâteau résiduel non décolmaté)}$$

$$\Delta Pd_{2_2} = \mu \cdot R_f^* \cdot Ud_{2_2} + \mu \cdot K_2 \cdot Ud_{2_2} \cdot (1 - \gamma) \cdot \left[W_{g,\max} + \left(\frac{Qnd_1}{Q_v} \right) \cdot \frac{W_{g,\max} \cdot N_1 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r}{S_f - N_1 \cdot S_{fm}} + \left(\frac{Qnd_1}{Q_v} \right) \cdot \frac{q_p \cdot \Delta t}{S_f - N_1 \cdot S_{fm}} \right]$$

Masse surfacique de particules présente sur la surface des manches du rail II juste avant décolmatage (prise en compte de la redéposition et de la collecte ayant opérée pendant les 10 s depuis le décolmatage du rail I).

(Equation V.12)

avec Ud_{2_2} la vitesse de perméation de l'air sur les manches décolmatées du rail II juste après le décolmatage du rail II ($m \cdot s^{-1}$).

Perte de charge des quinze manches encore colmatées, juste après le décolmatage du rail II :

$$\Delta Pnd_2 = \mu \cdot R_f^* \cdot Und_2 + \mu \cdot K_2 \cdot Und_2 \cdot \left[W_{g,\max} + \left(\frac{Qnd_1}{Q_v} \right) \cdot \frac{W_{g,\max} \cdot N_1 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r}{S_f - N_1 \cdot S_{fm}} + \left(\frac{Qnd_1}{Q_v} \right) \cdot \frac{q_p \cdot \Delta t}{S_f - N_1 \cdot S_{fm}} \right]$$

(Equation V.13)

avec Und_2 la vitesse de perméation de l'air sur les manches non décolmatées, juste après le décolmatage du rail II ($m \cdot s^{-1}$).

La figure V.10 expose les étapes de la procédure de calcul qui permet de trouver les valeurs des paramètres importants lors de deuxième décolmatage :

- ΔPd_{2_2} : perte de charge intermédiaire après décolmatage des manches du rail II (Pa)
- $Qd_{1,2,m}$: débit transitoire traversant chacune des 4 manches décolmatées du rail I ($m^3 \cdot h^{-1}$)
- $Qd_{2,2,m}$: débit transitoire traversant chacune des 5 manches décolmatées du rail II ($m^3 \cdot h^{-1}$)
- $Qnd_{2,m}$: débit transitoire traversant chacune des 15 manches non décolmatées ($m^3 \cdot h^{-1}$)

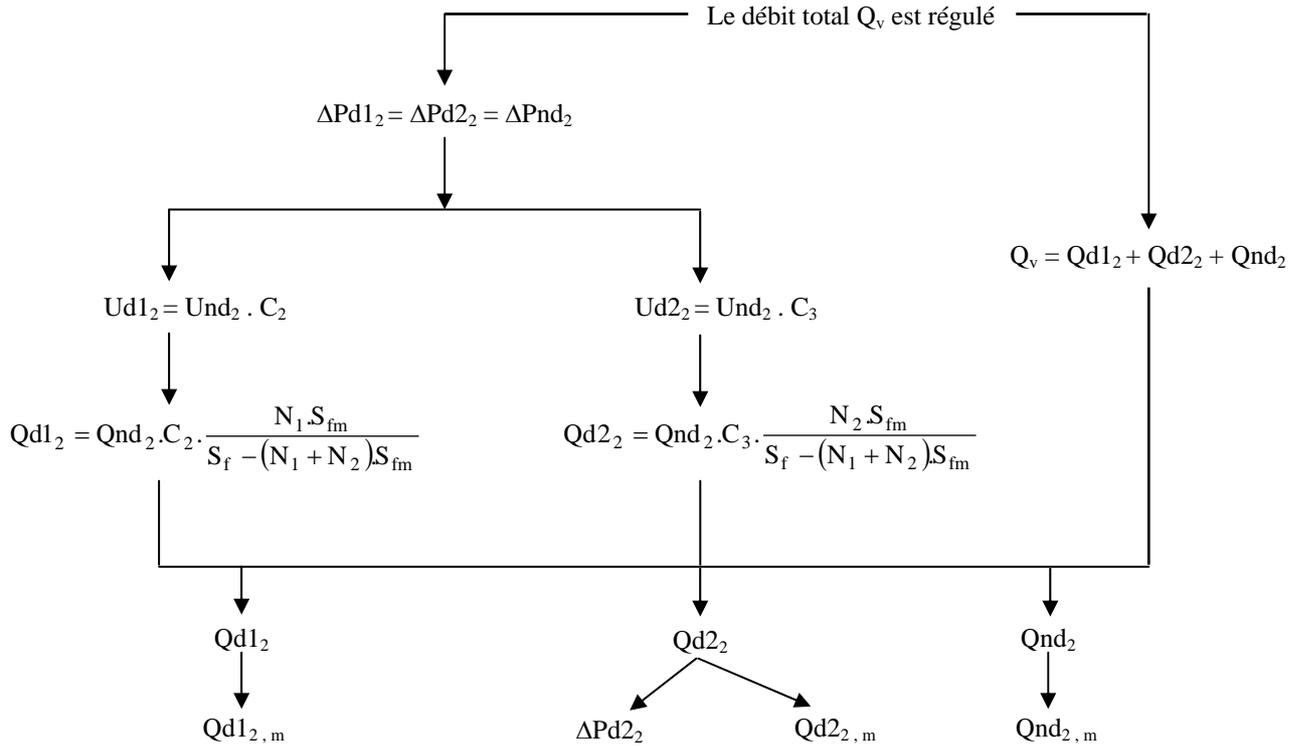


Figure V.10 : Procédure de calcul permettant d'atteindre les débits transitoires et la perte de charge résiduelle intermédiaire après le décolmatage des manches du rail II.

avec $Qd_{12} = N_1 \cdot Qd_{12,m}$; $Qd_{22} = N_2 \cdot Qd_{22,m}$ et $Qnd_2 = (N_3 + N_4 + N_5) \cdot Qnd_{2,m}$

$$C_2 = \frac{\mu \cdot R_f^* + \mu \cdot K_2 \cdot \left[W_{g,max} + \left(\frac{Qnd_1}{Q_v} \right) \cdot \left(\frac{W_{g,max} \cdot N_1 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r + q_p \cdot \Delta t}{S_f - N_1 \cdot S_{fm}} \right) \right]}{\mu \cdot R_f^* + \mu \cdot K_2 \cdot (1 - \gamma) \cdot W_{g,max} + \mu \cdot K_2 \cdot \left(\frac{Qd_{12}}{Q_v} \right) \cdot W_{g,max} \cdot \gamma_r + \mu \cdot K_2 \cdot \left(\frac{Qd_{12}}{Q_v} \right) \cdot \frac{q_p \cdot \Delta t}{N_1 \cdot S_{fm}}}$$

$$C_3 = \frac{\mu \cdot R_f^* + \mu \cdot K_2 \cdot \left[W_{g,max} + \left(\frac{Qnd_1}{Q_v} \right) \cdot \left(\frac{W_{g,max} \cdot N_1 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r + q_p \cdot \Delta t}{S_f - N_1 \cdot S_{fm}} \right) \right]}{\mu \cdot R_f^* + \mu \cdot K_2 \cdot (1 - \gamma) \cdot \left[W_{g,max} + \left(\frac{Qnd_1}{Q_v} \right) \cdot \left(\frac{W_{g,max} \cdot N_1 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r + q_p \cdot \Delta t}{S_f - N_1 \cdot S_{fm}} \right) \right]}$$

Décolmatage des manches du rail III ($N_3 = 6$)

Perte de charge des quatre manches du rail I, juste après le décolmatage du rail III :

$$\Delta P = \Delta P \text{ (juste après décolmatage du rail II actualisée avec la nouvelle vitesse de perméation, } Ud_{13}) + \Delta P \text{ (particules décolmatées et redéposées)} + \Delta P \text{ (particules collectées)}$$

$$\Delta Pd_{13} = \Delta Pd_{12} \cdot \frac{Ud_{13}}{Ud_{12}} + \mu \cdot K_2 \cdot Ud_{13} \cdot \left(\frac{Qd_{12}}{Q_v} \right) \cdot \frac{W_{g,max} \cdot N_2 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r}{N_1 \cdot S_{fm}} + \mu \cdot K_2 \cdot Ud_{13} \cdot \left(\frac{Qd_{12}}{Q_v} \right) \cdot \frac{q_p \cdot \Delta t}{N_1 \cdot S_{fm}}$$

(Equation V.14)

avec Ud_{13} la vitesse de perméation de l'air sur les manches décolmatées du rail I juste après le décolmatage du rail III ($m \cdot s^{-1}$).

Perte de charge des cinq manches du rail II, juste après le décolmatage du rail III :

$$\Delta P = \Delta P \text{ (juste après décolmatage du rail II actualisée avec la nouvelle vitesse de perméation, } Ud_{23}) + \Delta P \text{ (particules décolmatées et redéposées)} + \Delta P \text{ (particules collectées)}$$

$$\Delta Pd_{23} = \Delta Pd_{22} \cdot \frac{Ud_{23}}{Ud_{22}} + \mu \cdot K_2 \cdot Ud_{23} \cdot \left(\frac{Qd_{22}}{Q_v} \right) \cdot \frac{W_{g,max} \cdot N_2 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r}{N_2 \cdot S_{fm}} + \mu \cdot K_2 \cdot Ud_{23} \cdot \left(\frac{Qd_{22}}{Q_v} \right) \cdot \frac{q_p \cdot \Delta t}{N_2 \cdot S_{fm}}$$

(Equation V.15)

avec Ud_{23} la vitesse de perméation de l'air sur les manches décolmatées du rail II juste après le décolmatage du rail III ($m \cdot s^{-1}$).

Perte de charge des six manches du rail III, juste après le décolmatage du rail III :

$$\Delta P = \Delta P \text{ (medium colmaté en profondeur)} + \Delta P \text{ (gâteau résiduel non décolmaté)}$$

$$\Delta Pd_{33} = \mu \cdot R_f^* \cdot Ud_{33} + \mu \cdot K_2 \cdot Ud_{33} \cdot (1 - \gamma) \left[W_{g,max} + \left(\frac{Qnd_1}{Q_v} \right) \cdot \frac{W_{g,max} \cdot N_1 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r + q_p \cdot \Delta t}{S_f - N_1 \cdot S_{fm}} + \left(\frac{Qnd_2}{Q_v} \right) \cdot \frac{W_{g,max} \cdot N_2 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r + q_p \cdot \Delta t}{S_f - (N_1 + N_2) \cdot S_{fm}} \right]$$

Masse surfacique de particules présente sur la surface des manches du rail III juste avant décolmatage (prise en compte de la redéposition et de la collecte ayant opérée pendant les 20 s depuis le décolmatage des rails I et II).

(Equation V.16)

avec Ud_{33} la vitesse de perméation de l'air sur les manches décolmatées du rail III juste après le décolmatage du rail III ($m \cdot s^{-1}$).

Perte de charge des neuf manches encore colmatées, juste après le décolmatage du rail III :

$$\Delta Pnd_3 = \Delta Pnd_2 \cdot \frac{Und_3}{Und_2} + \mu \cdot K_2 \cdot Und_3 \cdot \left(\frac{Qnd_2}{Q_v} \right) \cdot \frac{W_{g,max} \cdot N_2 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r + q_p \cdot \Delta t}{S_f - (N_1 + N_2) \cdot S_{fm}}$$

(Equation V.17)

avec Und_3 la vitesse de perméation de l'air sur les manches non décolmatées, juste après le décolmatage du rail III ($m \cdot s^{-1}$).

La procédure de calcul est ensuite identique à celles présentées sur les figures V.9 et V.10 : les égalités dans les pertes de charge des manches de chaque rail permettent d'établir des relations de proportionnalité entre les débits traversant les manches et de calculer les nouveaux débits transitoires par manche ainsi que la perte de charge intermédiaire, juste après le décolmatage du rail III.

Décolmatages des manches du rail IV ($N_4 = 5$) et du rail V ($N_5 = 4$)

Une démarche équivalente est ensuite menée pour les décolmatages des deux derniers rails. Comme pour les rails précédents, le premier travail consiste à bien définir les expressions de

la perte de charge qui caractérise les manches de chacun des rails. Cela inclut la prise en compte de la redéposition des particules décolmatées lors du décolmatage du dernier rail de manches ainsi que de la collecte des particules provenant de la génération dans le conduit amont. Ensuite, il s'agit de résoudre le système d'équations qui permet de calculer les débits individuels traversant chacune des manches du réseau. Connaissant ces débits, il est possible de calculer la perte de charge intermédiaire du système.

Présentation des résultats lors de la phase de décolmatage

Le modèle permet d'établir la répartition des débits qui traversent les manches après le décolmatage complet des cinq rails. Il permet également de calculer les débits transitoires qui traversent les manches après le décolmatage de chaque rail ainsi que la perte de charge correspondante. Les résultats sont synthétisés dans un tableau qui possède la structure suivante :

Résultats de la modélisation lors du décolmatage						
Après décolmatage du rail I	Qd1 _{1,m}	Qnd _{1,m}	Qnd _{1,m}	Qnd _{1,m}	Qnd _{1,m}	ΔPd ₁
Après décolmatage du rail II	Qd1 _{2,m}	Qd2 _{2,m}	Qnd _{2,m}	Qnd _{2,m}	Qnd _{2,m}	ΔPd ₂
Après décolmatage du rail III	Qd1 _{3,m}	Qd2 _{3,m}	Qd3 _{3,m}	Qnd _{3,m}	Qnd _{3,m}	ΔPd ₃
Après décolmatage du rail IV	Qd1 _{4,m}	Qd2 _{4,m}	Qd3 _{4,m}	Qd4 _{4,m}	Qnd _{4,m}	ΔPd ₄
Après décolmatage du rail V	Qd1 _{5,m}	Qd2 _{5,m}	Qd3 _{5,m}	Qd4 _{5,m}	Qd5 _{5,m}	ΔPd ₅
	Débit dans les manches du rail I	Débit dans les manches du rail II	Débit dans les manches du rail III	Débit dans les manches du rail IV	Débit dans les manches du rail V	Perte de charge intermédiaire (Pa)

Tableau V.14 : Présentation de la structure du tableau de résultats obtenus pour la modélisation de la phase de décolmatage séquentiel.

$Qdr_{r',m}$: débit d'une manche décolmatée du rail r après le décolmatage du rail r' ($m^3 \cdot h^{-1}$).

$Qnd_{r',m}$: débit d'une manche non décolmatée après le décolmatage du rail r' ($m^3 \cdot h^{-1}$).

$\Delta Pdr_{r'}$: perte de charge après le décolmatage du rail r' ($m^3 \cdot h^{-1}$).

Les valeurs qui seront présentées dans les tableaux de résultats ont été obtenues en modifiant les trois paramètres d'ajustement que sont ΔP_{res} , γ et γ_r de manière, d'une part, à ce que $\Delta Pd5_5 = \Delta P_{res}$ (hypothèse 1) et, d'autre part, à ce que les 25 valeurs de débits, issues de la modélisation, soient les plus proches possible des 25 valeurs de débits provenant des essais expérimentaux. Pour effectuer cette comparaison des débits entre expérience et modèle, la méthode des moindres carrés a été utilisée. Il s'agissait dans notre cas de minimiser la somme moyennée sur l'ensemble des mesures des écarts calculés entre valeurs expérimentales et théoriques, et élevés au carré.

Les résultats de la modélisation seront comparés aux résultats expérimentaux dans un tableau similaire qui présentera, non pas les valeurs expérimentales, mais les écarts exprimés en pourcentage et calculés de la manière suivante : $\frac{(valeur\ expérimentale - valeur\ modélisation)}{valeur\ expérimentale} \cdot 100$.

V.7.2.2. Phase de colmatage

Partant de la répartition des débits obtenus grâce à la modélisation après le décolmatage du rail V et de la perte de charge résiduelle $\Delta P_{d5} = \Delta P_{res}$, il est également possible de décrire les évolutions des débits par manche et de la perte de charge au cours du colmatage suivant.

Dans un premier temps, il est nécessaire de tenir compte de la redéposition des particules remises en suspension lors du décolmatage du rail V. Ceci constitue l'étape 0 de la modélisation du colmatage.

Perte de charge des N_r manches du rail r, 10 secondes après le décolmatage du rail 5 (ou perte de charge des manches du rail r à l'instant initial de la reprise du colmatage) :

$$\Delta P_{cr_0} = \Delta P_{dr_5} \cdot \frac{U_{cr_0}}{U_{dr_5}} + \mu \cdot K_2 \cdot U_{cr_0} \cdot \left(\frac{Q_{dr_5}}{Q_v} \right) \cdot \frac{W_{g,max} \cdot N_5 \cdot S_{fm} \cdot \gamma_r + q_p \cdot \Delta t}{N_r \cdot S_{fm}} \quad (V.18)$$

- avec ΔP_{dr_5} la perte de charge des manches du rail r, juste après le décolmatage du rail 5.
 U_{dr_5} la vitesse de perméation sur les manches du rail r, juste après le décolmatage des manches du rail V.
 Q_{dr_5} le débit de perméation sur les manches du rail r, juste après le décolmatage des manches du rail V.
 U_{cr_0} la vitesse de perméation sur les manches du rail r lors de l'étape 0 du colmatage.

La méthode est itérative : en partant de l'étape 0 définie précédemment et en se basant sur un pas de temps constant Δt_c , on calcule de proche en proche, pour chaque étape, l'augmentation de la perte de charge occasionnée par la collecte de particules ainsi que les modifications des valeurs de débits traversant les manches de chaque rail du dépoussiéreur et ce, jusqu'à atteindre la valeur de perte de charge maximale avant décolmatage, ΔP_{max} . La procédure de calcul correspondante au colmatage est résumée dans la figure V.11, page suivante.

On note

- U_{cr_n} la vitesse de perméation sur les manches du rail r, pour l'étape de calcul n du colmatage
 Q_{cr_n} le débit de perméation sur les manches du rail r, pour l'étape de calcul n du colmatage
 $\Delta P_{cr_n} = \Delta P_{c_n}$ la perte de charge des manches, pour l'étape de calcul n du colmatage

Au final, le modèle permet d'établir les courbes d'augmentation de la perte de charge et les courbes des évolutions des débits individuels par manche en fonction du temps (ou de la masse surfacique collectée) et de les comparer avec les résultats expérimentaux.

Les résultats de modélisation de la phase de colmatage seront donnés sous forme de graphique qui présenteront les évolutions de $\Delta P = f(t)$ et $Q_{cr} = f(t)$.

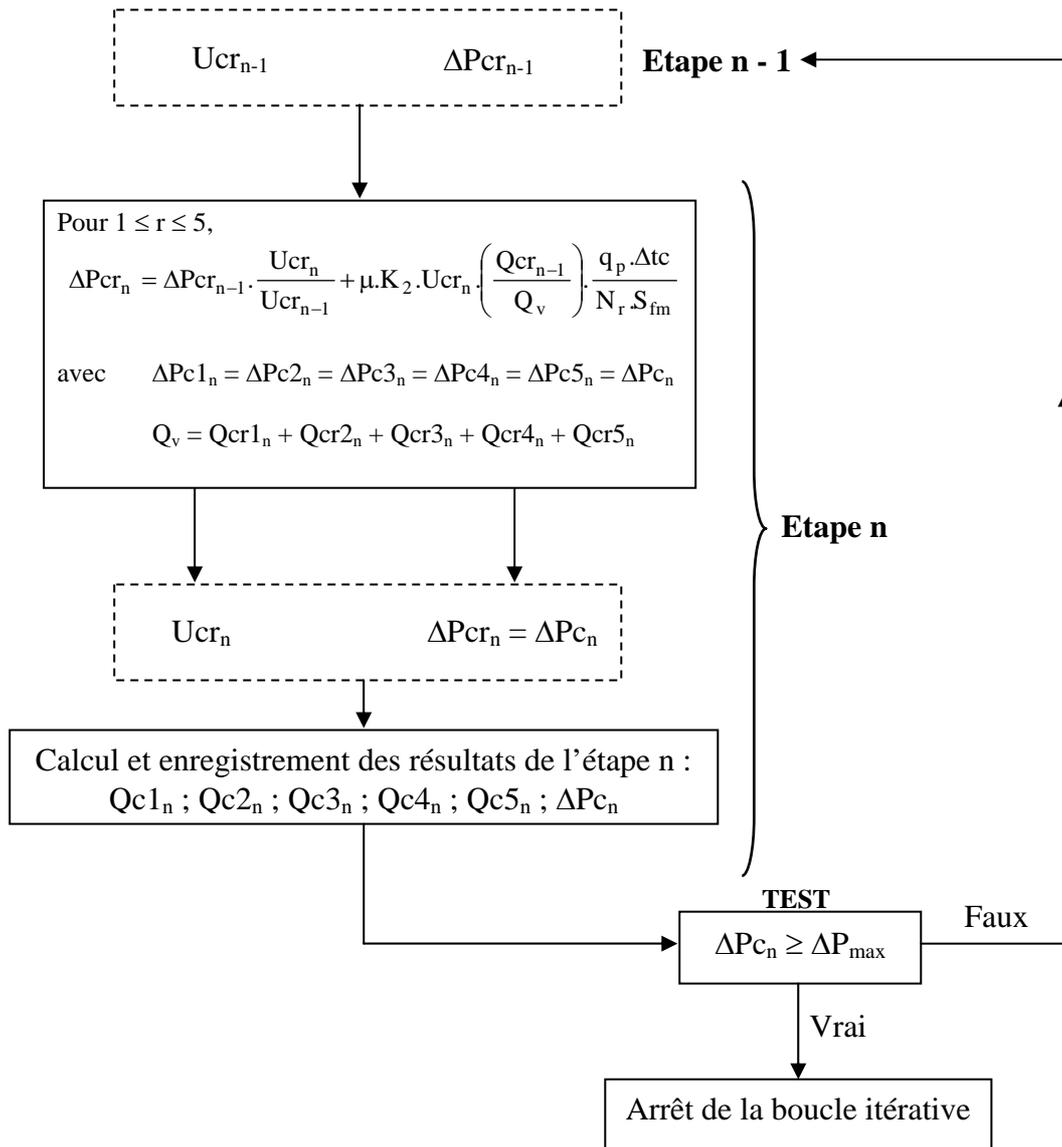


Figure V.11 : Présentation de la boucle itérative de calcul permettant de modéliser les évolutions de la perte de charge et des débits de perméation dans les manches au cours d'un colmatage.

V.7.3. Résultats de la modélisation

V.7.3.1. Aérosol d'alumine₂

La modélisation vaut pour des essais dans les conditions suivantes :

$$d_{pm} = 3,1 \mu m, U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}, P_r = 7 \text{ bar}, t_d = 100 \text{ ms}, C_p = 0,5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}.$$

Phase de décolmatage

Les tableaux V.15 à V.17 présentent les résultats modélisés de la répartition des débits moyens par manche en fonction de leur rail d'appartenance, ainsi qu'une comparaison avec les valeurs expérimentales. Les résultats sont présentés pour trois pertes de charge maximales, ΔP_{max} , différentes.

Résultats de la modélisation lors du décolmatage						
Après décolmatage du rail I	167,3	91,5	91,5	91,5	91,5	512
Après décolmatage du rail II	143,5	146,2	79,7	79,7	79,7	448
Après décolmatage du rail III	122,8	125,0	127,0	69,1	69,1	391
Après décolmatage du rail IV	109,6	111,5	113,2	115,0	62,3	355
Après décolmatage du rail V	101,0	102,7	104,2	105,8	107,1	330
Débits par manche (m ³ .h ⁻¹)	Débits dans les manches du rail I	Débits dans les manches du rail II	Débits dans les manches du rail III	Débits dans les manches du rail IV	Débits dans les manches du rail V	Perte de charge intermédiaire (Pa)

(a)

Ecart (en %) entre expérience et modèle						
Après décolmatage du rail I	-17,2	5,1	5,1	5,1	5,1	-3,4
Après décolmatage du rail II	-8,5	-7,0	7,3	7,3	7,3	-1,8
Après décolmatage du rail III	-3,8	-4,1	-4,5	10,6	10,6	-0,3
Après décolmatage du rail IV	-0,6	-1,1	-2,3	-1,1	10,7	0,0
Après décolmatage du rail V	0,5	1,1	0,0	-0,4	-1,2	0,0
Débits dans les manches du rail I	Débits dans les manches du rail II	Débits dans les manches du rail III	Débits dans les manches du rail IV	Débits dans les manches du rail V	Perte de charge intermédiaire (Pa)	

(b)

Tableau V.15 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage (a) et comparaison avec les valeurs expérimentales (b) - $\Delta P_{\max} = 9.\Delta P_0 = 580 \text{ Pa}$.

Résultats de la modélisation lors du décolmatage						
Après décolmatage du rail I	215,0	82,0	82,0	82,0	82,0	650
Après décolmatage du rail II	165,8	171,7	65,2	65,2	65,2	519
Après décolmatage du rail III	130,3	134,7	138,7	52,5	52,5	420
Après décolmatage du rail IV	110,5	114,0	117,3	120,4	45,5	365
Après décolmatage du rail V	98,6	101,6	104,3	107,0	109,3	330
Débits par manche (m ³ .h ⁻¹)	Débits dans les manches du rail I	Débits dans les manches du rail II	Débits dans les manches du rail III	Débits dans les manches du rail IV	Débits dans les manches du rail V	Perte de charge intermédiaire (Pa)

(a)

Ecart (en %) entre expérience et modèle						
Après décolmatage du rail I	-25,3	9,6	9,6	9,6	9,6	1,5
Après décolmatage du rail II	-11,6	-12,1	14,1	14,1	14,1	3,0
Après décolmatage du rail III	-4,2	-4,5	-4,7	15,7	15,7	3,4
Après décolmatage du rail IV	-3,1	-2,9	-4,0	-3,4	29,6	6,4
Après décolmatage du rail V	1,1	0,2	0,0	-0,2	-1,1	0,0
Débits dans les manches du rail I	Débits dans les manches du rail II	Débits dans les manches du rail III	Débits dans les manches du rail IV	Débits dans les manches du rail V	Perte de charge intermédiaire (Pa)	

(b)

Tableau V.16 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage (a) et comparaison avec les valeurs expérimentales (b) - $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0 = 820 \text{ Pa}$.

Résultats de la modélisation lors du décolmatage						
Après décolmatage du rail I	266,0	71,8	71,8	71,8	71,8	838
Après décolmatage du rail II	184,6	195,0	52,4	52,4	52,4	615
Après décolmatage du rail III	135,1	142,0	148,5	39,8	39,8	470
Après décolmatage du rail IV	110,3	115,5	120,4	125,0	33,5	395
Après décolmatage du rail V	96,1	100,4	104,4	108,2	111,4	350
Débits par manche (m ³ .h ⁻¹)	Débits dans les manches du rail I	Débits dans les manches du rail II	Débits dans les manches du rail III	Débits dans les manches du rail IV	Débits dans les manches du rail V	Perte de charge intermédiaire (Pa)

(a)

Ecart (en %) entre expérience et modèle						
Après décolmatage du rail I	-31,2	14,9	14,9	14,9	14,9	6,9
Après décolmatage du rail II	-11,3	-13,3	19,5	19,5	19,5	3,1
Après décolmatage du rail III	-1,9	-4,2	-5,8	19,8	19,3	7,8
Après décolmatage du rail IV	-0,9	-2,0	-2,2	-1,7	23,3	1,3
Après décolmatage du rail V	0,6	0,6	0,1	-0,2	-0,6	0,0
Débits dans les manches du rail I	Débits dans les manches du rail II	Débits dans les manches du rail III	Débits dans les manches du rail IV	Débits dans les manches du rail V	Perte de charge intermédiaire (Pa)	

(b)

Tableau V.17 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage (a) et comparaison avec les valeurs expérimentales (b) - $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0 = 1210 \text{ Pa}$.

Les résultats du modèle traduisent correctement la répartition des débits après le décolmatage complet des cinq rails. Les écarts observés pour ces valeurs, entre le modèle et l'expérience, sont de l'ordre de 1 %. Le modèle retranscrit de manière satisfaisante le fait que les premières à être décolmatées soient celles qui présentent les plus grandes résistances aérauliques à la toute fin du décolmatage pneumatique séquentiel.

Les pertes de charge intermédiaires après le décolmatage de chacun des rails présentent des écarts entre le modèle et l'expérience qui sont un peu plus grandes (entre 1 et 8 %) mais qui restent tout de même satisfaisantes et proches de la réalité.

Le modèle ne gère pas correctement les résistances à l'écoulement qui s'établissent sur les manches après les décolmatages des premiers rails. La conséquence est que les débits transitoires qui traversent les manches à la suite de ces décolmatages partiels présentent des écarts avec les résultats expérimentaux beaucoup plus conséquents (compris entre 10 et 30 %) pour les débits calculés après les décolmatages des rails I et II). La valeur de la fraction décolmatée γ ne peut pas concilier à la fois des résultats proches de l'expérience pour les débits transitoires s'établissant lors du décolmatage des premiers rails et pour l'ensemble des 25 débits.

Phase de colmatage

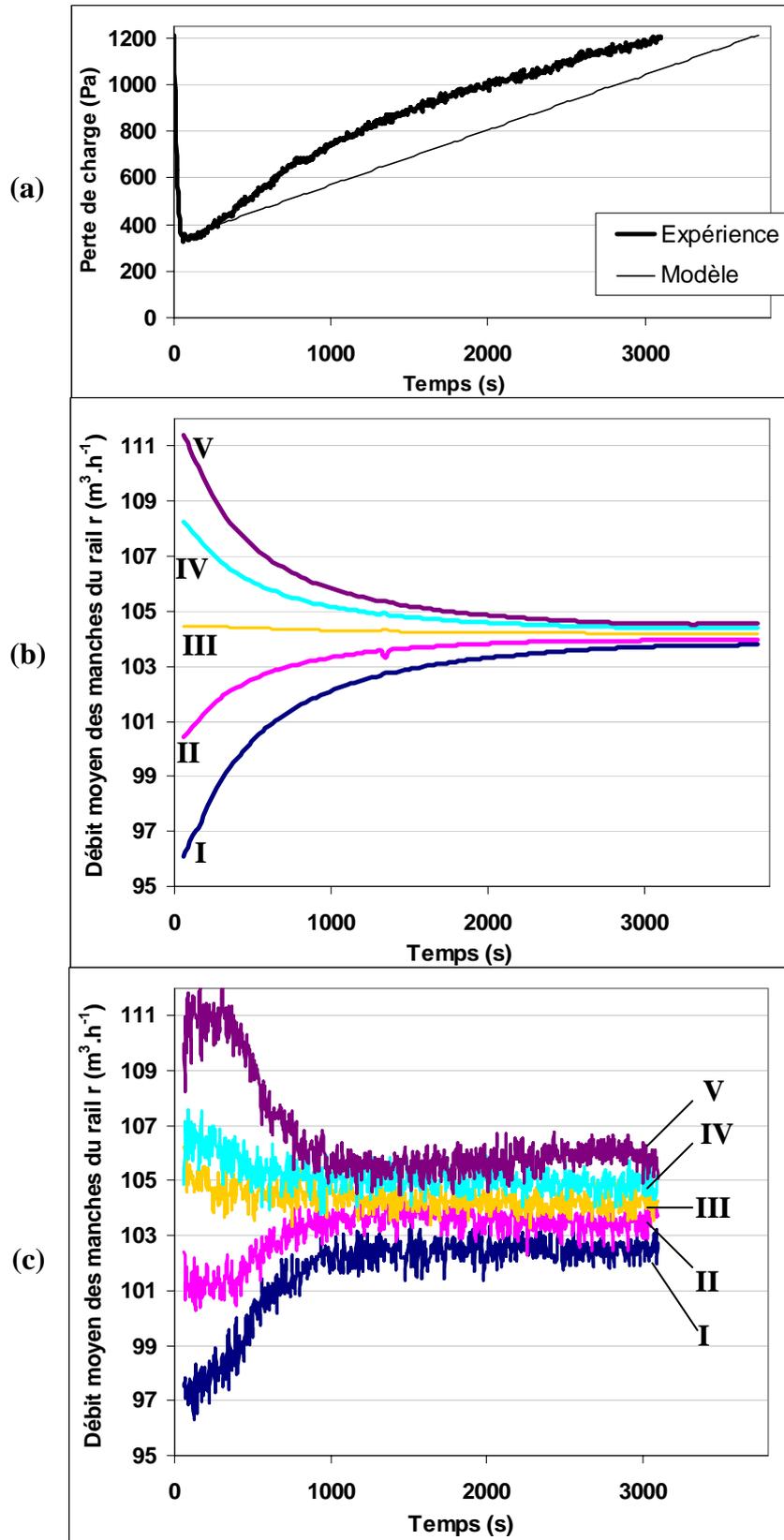


Figure V.12 : Comparaison des évolutions de la perte de charge (a) et des débits moyens par manche entre les valeurs modélisées (b) et les valeurs expérimentales (c) - $\Delta P_{\max} = 19 \cdot \Delta P_0 = 1210 \text{ Pa}$.

La figure V.12a présente les évolutions de la perte de charge en fonction du temps sur un cycle de filtration, pour les valeurs expérimentales et modélisées. La figure V.12b donne les évolutions modélisées des débits moyens de perméation sur les manches pour chacun des cinq rails en fonction du temps sur le même cycle de filtration. La figure V.12c permet de comparer les résultats de modélisation des débits avec les résultats expérimentaux.

La modélisation de l'évolution de la perte de charge en fonction du temps au cours du colmatage décrit de manière convenable les résultats expérimentaux. Les deux défauts principaux du modèle sont qu'il ne traduit pas correctement la durée du cycle (plus long pour le modèle) et que la courbe modélisée ne possède pas une concavité aussi prononcée que celle de l'expérience. La concavité de la courbe expérimentale est pourtant bien logique puisqu'elle traduit une analogie avec un décolmatage par plaques (figure I.5 , paragraphe I.4.1) qui peut être trouvé dans notre cas en assimilant les zones non décolmatées aux premières manches décolmatées (grande résistance à l'écoulement) et les zones décolmatées aux dernières manches décolmatées (résistance à l'écoulement moindre). Une amélioration de la réponse du modèle peut certainement être apportée sur cet aspect.

La modélisation de l'évolution des débits moyens par manche au cours du temps est conforme aux résultats expérimentaux qui avaient fait l'objet d'une description dans le paragraphe V.5.

Synthèse des principaux paramètres utilisés dans le modèle

Le tableau V.18 récapitule la majorité des paramètres qui ont été utilisés pour effectuer les calculs du modèle sur l'alumine2 :

Aérosol	Alumine2 - $d_{pm} = 3,1 \mu m$		
K_2 (m.kg ⁻¹)	2.10 ¹⁰ - mesure expérimentale		
Conditions opératoires	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$; $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$ donc $q_p = 0,34.10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$ Configuration 1		
ΔP_{max}	9. $\Delta P_0 = 580 \text{ Pa}$	13. $\Delta P_0 = 820 \text{ Pa}$	19. $\Delta P_0 = 1210 \text{ Pa}$
ΔP_{res}	330 Pa	330 Pa	350 Pa
$\Delta P_{res}'$	220 Pa	250 Pa	260 Pa
γ	0,73	0,89	0,93
γ_r	0,01. γ (7,3.10 ⁻³)	0,02. γ (17,8.10 ⁻³)	0,025. γ (23,2.10 ⁻³)

Tableau V.18 : Synthèse des paramètres utilisés pour la modélisation des essais sur l'alumine2.

Ce tableau permet de commenter les valeurs obtenues pour les trois paramètres d'ajustement du modèle :

- $\Delta P_{res}'$ est supérieur à 220 Pa pour tous les essais, ce qui correspond à une multiplication par environ 3,4 de la perte de charge du medium à l'état neuf, ΔP_0 . Cette valeur paraît tout à fait concevable puisque le colmatage interne a fortement augmenté depuis l'instant initial de la filtration.

L'augmentation de $\Delta P_{res}'$ avec ΔP_{max} trouve de plus une explication logique pour peu que l'on s'intéresse à l'ordre dans lequel les expériences ont été effectuées (cf. figure AVIII.4 de l'annexe VIII). Plus le nombre de cycles effectué par le medium est grand, plus la quantité de particules participant au colmatage interne est importante et plus la valeur de la perte de charge résultante, $\Delta P_{res}'$, augmente.

- La fraction décolmatée γ est supérieure à 73 % pour l'ensemble des essais. Ces valeurs ne sont pas étonnantes car il apparaît visuellement que le gâteau se décroche de manière conséquente. De plus, l'augmentation de γ avec l'augmentation de ΔP_{\max} est un résultat classiquement rencontré dans la littérature : il traduit le fait que plus la masse et l'épaisseur d'un gâteau de particules sont grandes, plus le décolmatage s'effectue de manière efficace et que la quantité de particules détachées est importante.
- Comme nous nous y attendions les valeurs de la fraction de particules redéposées, γ_r , sont faibles. L'augmentation de γ_r avec l'augmentation de ΔP_{\max} pour l'alumine2 s'explique à la fois par la remise en suspension d'une plus large fraction de particules du gâteau (quantité de particules piégées plus grande et bonne remise en suspension du fait de l'explosion du gâteau) et par l'établissement, dans le même temps, de plus grands débits transitoires sur les manches décolmatées (différence de résistance à l'écoulement plus grande).

V.7.3.2. Aérosol de bois2

La modélisation vaut pour des essais dans les conditions suivantes :

$$d_{pm} = 33,8 \mu\text{m}, U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}, P_r = 3 \text{ bar}, t_d = 100 \text{ ms}, C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}.$$

Phase de décolmatage

Les tableaux V.19 et V.20 présentent les résultats modélisés de la répartition des débits moyens par manche en fonction de leur rail d'appartenance, ainsi qu'une comparaison avec les valeurs expérimentales. Les résultats sont présentés pour deux valeurs de ΔP_{\max} .

		Résultats de la modélisation lors du décolmatage					
Débits par manche ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	Après décolmatage du rail I	207,5	83,5	83,5	83,5	83,5	565
	Après décolmatage du rail II	158,9	169,5	67,8	67,8	67,8	463
	Après décolmatage du rail III	124,5	131,6	140,2	55,8	55,8	386
	Après décolmatage du rail IV	105,4	110,8	117,0	125,0	49,4	350
	Après décolmatage du rail V	94,0	98,4	103,5	109,9	115,3	320
		Perte de charge intermédiaire (Pa)					

(a)

		Ecart (en %) entre expérience et modèle					
Débits dans les manches du rail I Débits dans les manches du rail II Débits dans les manches du rail III Débits dans les manches du rail IV Débits dans les manches du rail V Perte de charge intermédiaire (Pa)	Après décolmatage du rail I	-22,3	8,3	8,3	8,3	8,3	7,4
	Après décolmatage du rail II	-13,2	-14,6	15,1	15,1	15,1	7,4
	Après décolmatage du rail III	-3,3	-6,6	-2,8	13,8	13,8	1,0
	Après décolmatage du rail IV	-0,2	-3,6	-5,3	3,3	14,4	1,4
	Après décolmatage du rail V	4,4	1,2	-0,7	-3,6	-0,1	0,0

(b)

Tableau V.19 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage (a) et comparaison avec les valeurs expérimentales (b) - $\Delta P_{\max} = 10.\Delta P_0 = 700 \text{ Pa}$.

		Résultats de la modélisation lors du décolmatage					
Débits par manche ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	Après décolmatage du rail I	252,2	74,5	74,5	74,5	74,5	935
	Après décolmatage du rail II	176,8	190,5	56,0	56,0	56,0	707
	Après décolmatage du rail III	130,1	138,8	148,9	43,6	43,6	554
	Après décolmatage du rail IV	106,4	112,8	120,0	128,2	37,3	478
	Après décolmatage du rail V	93,0	98,1	103,8	110,3	115,7	430
		Perte de charge intermédiaire (Pa)					

(a)

		Ecart (en %) entre expérience et modèle					
Débits dans les manches du rail I Débits dans les manches du rail II Débits dans les manches du rail III Débits dans les manches du rail IV Débits dans les manches du rail V Perte de charge intermédiaire (Pa)	Après décolmatage du rail I	-24,1	11,6	11,6	11,6	11,6	8,3
	Après décolmatage du rail II	-13,5	-17,0	21,0	21,0	21,0	12,7
	Après décolmatage du rail III	-2,0	-4,1	-3,9	15,3	15,3	4,5
	Après décolmatage du rail IV	-1,5	-0,6	-5,3	3,5	13,5	2,4
	Après décolmatage du rail V	3,2	1,7	-0,7	-3,7	0,6	0,0

(b)

Tableau V.20 : Résultats de la modélisation de la phase de décolmatage (a) et comparaison avec les valeurs expérimentales (b) - $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0 = 700 \text{ Pa}$.

Phase de colmatage

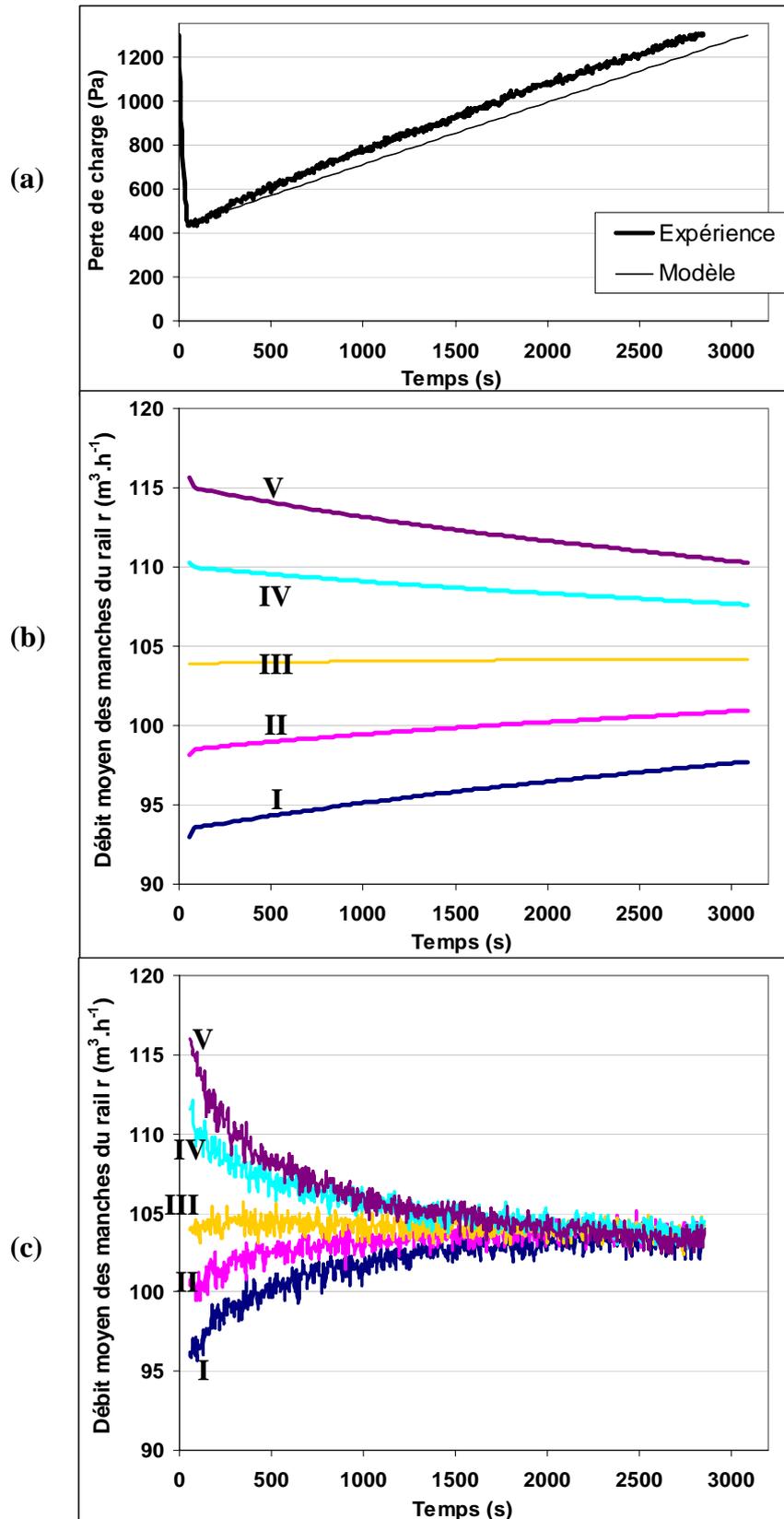


Figure V.13 : Comparaison des évolutions de la perte de charge (a) et des débits moyens par manche entre les valeurs modélisées (b) et les valeurs expérimentales (c).
 Bois2 ($d_{pm} = 33,8 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 20 \cdot \Delta P_0 = 700 \text{ Pa}$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 3,9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$

La figure V.13a présente les évolutions de la perte de charge en fonction du temps sur un cycle de filtration, pour les valeurs expérimentales et modélisées. La figure V.13b donne les évolutions modélisées des débits moyens de perméation sur les manches pour chacun des cinq rails en fonction du temps sur le même cycle de filtration. La figure V.13c permet de comparer les résultats de modélisation des débits avec les résultats expérimentaux.

Les résultats pour le bois2 des tableaux V.19 et V.20 et de la figure V.13 présentent les mêmes caractéristiques que ceux discutés pour les essais sur l'alumine2. Le modèle reste performant et garde ses défauts sur les mêmes points, commentés précédemment.

Notons tout de même que le modèle décrit beaucoup moins bien l'évolution des débits moyens au cours du colmatage dans le cas du bois 2, que pour l'alumine2. Aucune explication satisfaisante n'a été trouvée pour le moment.

Synthèse des principaux paramètres utilisés dans le modèle

Le tableau V.21 récapitule la majorité des paramètres qui ont été utilisés pour effectuer les calculs du modèle sur le bois2 :

Aérosol	Bois2 - $d_{pm} = 33,8 \mu m$	
K_2 (m.kg ⁻¹)	2,8.10 ⁸ - mesure expérimentale	
Conditions opératoires	$U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$; $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$ donc $q_p = 2,7.10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$ Configuration 1	
ΔP_{max}	10. $\Delta P_0 = 700 \text{ Pa}$	20. $\Delta P_0 = 1300 \text{ Pa}$
ΔP_{res}	320 Pa	430 Pa
$\Delta P_{res}'$	190 Pa	310 Pa
γ	0,82	0,925
γ_r	0,14. γ (115.10 ⁻³)	0,08. γ (74.10 ⁻³)

Tableau V.21 : Synthèse des paramètres utilisés pour la modélisation des essais sur le bois2.

Les commentaires qui peuvent être effectués sur $\Delta P_{res}'$ et γ sont similaires à ceux qui ont été faits pour l'alumine2. Par contre, l'évolution de la fraction de particules redéposées, γ_r , va à l'encontre de ce qui avait été observé pour l'alumine2.

La diminution de la fraction de poussières redéposées (γ_r) avec l'augmentation de la perte de charge maximale avant décolmatage (ΔP_{max}) pour le bois2 paraît donc surprenante dans un premier temps. Cependant, il faut considérer le fait que les propriétés du gâteau de particules de bois sont complètement différentes de celles du gâteau de particules d'alumine, principalement du point de vue des forces d'adhésion et de cohésion. Plus la perte de charge maximale, ΔP_{max} , augmente et plus l'épaisseur du gâteau de particules de bois augmente, plus la cohésion interne de cette couche de particules est grande et plus elle se décolmate sous forme de gros agglomérats qui sédimentent rapidement dans la trémie sans être redéposés. Ceci pourrait constituer une explication plausible pour la diminution de la fraction de poussières redéposées (γ_r) pour le bois2.

A noter également que les valeurs de fractions décolmatées sont nettement plus grandes pour le bois que pour l'alumine (poussières de bois de masse volumique plus faible, quantité de particules de bois piégées dans le gâteau beaucoup plus importante à perte de charge équivalente ...).

V.7.4. Conclusions

- Malgré le fait que le modèle ne prenne pas en compte la compression du gâteau résiduel, il traduit correctement la répartition des débits après le décolmatage complet des cinq rails.
- Les valeurs expérimentales de la perte de charge intermédiaire après le décolmatage de chacun des rails traduit de manière fidèle les mesures expérimentales.
- L'influence d'une augmentation de la perte de charge maximale avant décolmatage est fidèlement retranscrite par le modèle. Les débits transitoires traversant les manches décolmatées en premier sont en effet d'autant plus grands que la perte de charge maximale avant décolmatage (ΔP_{\max}) est élevée. De même, la répartition des débits après le décolmatage complet des cinq rails est d'autant plus inhomogène que la perte de charge maximale est élevée.
- Les valeurs modélisées des débits transitoires traversant les manches après le décolmatage du premier et du second rail sont les plus éloignées des valeurs expérimentales. Les débits transitoires qui apparaissent plus tard dans la séquence de décolmatage sont modélisés de manière plus proche de la réalité. La raison de la divergence du modèle sur ce point particulier émane d'une mauvaise estimation de la fraction décolmatée pour les décolmatages des premiers rails. Les résultats du modèle pourraient certainement être améliorés en introduisant une valeur de fraction décolmatée propre à chaque rail, dépendante des propriétés du gâteau et des antécédents comportementaux de la manche, notamment au niveau des débits transitoires.
- L'évolution de la perte de charge en fonction du temps au cours du colmatage est décrite de manière convenable par le modèle. Cependant, l'incapacité de la modélisation à traduire la concavité réelle de la courbe $\Delta P = f(t)$ aboutit à un temps de cycle modélisé plus long que celui mesuré expérimentalement. A noter que la courbe du modèle est tout de même légèrement concave du fait de l'inhomogénéité des débits au début du colmatage mais que cette concavité, du fait de son caractère peu prononcé, reste invisible sur les figures de résultats. Un travail supplémentaire devra donc être mené pour corriger ce défaut de représentation.
- La modélisation de l'évolution des débits moyens des manches par rail en fonction du temps est réaliste pour l'aérosol d'alumine², mais relativement éloignée de l'expérience pour l'aérosol de bois². Des investigations supplémentaires devront être menées pour tenter d'expliquer et de corriger cet écart.
- Les valeurs du modèle sont approchées au mieux des valeurs expérimentales (méthode des moindres carrés) par l'ajustement de trois paramètres :
 - ΔP_{res} la perte de charge entraînée par le médium colmaté en profondeur (Pa)
 - γ la fraction du gâteau de particules qui est remise en suspension lors du décolmatage
 - γ_r la fraction de particules détachées et redéposées sur les manches après décolmatage.

L'analyse des valeurs des paramètres d'ajustement conduit aux considérations suivantes :

Expériences	Modélisation			
Evolutions de deux paramètres au cours des essais (cf. figures AVIII.4 et AVIII.7)	Evolution des paramètres d'ajustement			
Nombre de cycles ↗ ΔP_{\max} ↗	$\Delta P_{\text{res}}'$	γ	γ_r	
	↗	↗	Alumine2 ↗	Bois2 ↘

Tableau V.22 : Evolutions des paramètres d'ajustement du modèle lors des essais.

Explications proposées :

L'augmentation de $\Delta P_{\text{res}}'$ trouve une explication probable avec l'ordre dans lequel les expériences ont été effectuées. Plus le nombre de cycles effectué par le médium est grand, plus la quantité de particules participant au colmatage interne est importante et plus la valeur de la perte de charge résultante, $\Delta P_{\text{res}}'$, augmente.

L'augmentation de la fraction décolmatée, γ , avec l'augmentation de ΔP_{\max} est un résultat classiquement rencontré dans la littérature : il traduit le fait que plus la masse et l'épaisseur d'un gâteau de particules sont grandes, plus le décolmatage s'effectue de manière efficace et que la quantité de particules détachées est importante.

L'augmentation de la fraction de particules redéposées, γ_r , avec l'augmentation de ΔP_{\max} pour l'alumine2 s'explique à la fois par la remise en suspension d'une plus large fraction de particules du gâteau (quantité de particules piégées plus grande et bonne remise en suspension du fait de l'explosion du gâteau) et par l'établissement, dans le même temps, de plus grands débits transitoires sur les manches décolmatées (différence de résistance à l'écoulement plus grande).

La diminution de la fraction de particules redéposées, γ_r , avec l'augmentation de ΔP_{\max} pour le bois2 paraît surprenante dans un premier temps car on pourrait penser que les mêmes causes entraînent les mêmes effets. Cependant, il faut considérer le fait que les propriétés du gâteau de particules de bois sont complètement différentes de celles du gâteau de particules d'alumine, principalement du point de vue des forces d'adhésion et de cohésion. Plus ΔP_{\max} augmente et plus l'épaisseur du gâteau de particules de bois augmente, plus la cohésion interne de cette couche de particules est grande et plus elle se décolmate sous forme de gros agglomérats qui sédimente rapidement dans la trémie sans être redéposés. Ceci pourrait constituer une explication plausible pour la diminution de γ_r .

A noter également que les valeurs de fractions décolmatées sont nettement plus grandes pour le bois que pour l'alumine (poussières de bois de masse volumique plus faible, quantité de particules de bois piégées dans le gâteau beaucoup plus importante à perte de charge équivalente ...).

Au final, les valeurs et le comportement des paramètres d'ajustement paraissent tout à fait réalistes et confortent la bonne représentativité des données de ce modèle.

- Perspectives : les travaux concernant ce modèle demanderaient une étude de sa sensibilité par rapport à des paramètres telle que la concentration amont en particules, ainsi qu'une détermination de ses éventuelles qualités prédictives.

CHAPITRE VI

ETUDE DES BOUFFEES DE CONCENTRATION EN PARTICULES EMISES A L'AVAL D'UN DEPOUSSIHEREUR CONSECUTIVEMENT A DES DECOLMATAGES PNEUMATIQUES

VI.1. INTRODUCTION

Le décolmatage du gâteau de particules s'accompagne de la création de bouffées de concentration en particules émises à l'aval des éléments filtrants. L'observation des performances cycliques des dépoussiéreurs à media filtrants montre clairement qu'il se produit une forte augmentation des concentrations numérique et massique en particules à l'aval juste après chaque régénération des éléments fibreux (cf. chapitre III). Ces pics de concentration restent un des problèmes majeurs que l'utilisateur doit prendre en considération et soulèvent beaucoup d'interrogations d'un point de vue hygiène et toxicité en cas de recyclage de l'air après filtration. Mise à part leur existence qui a été observée par de nombreux auteurs, les connaissances actuelles concernant ces pics perturbateurs sont peu nombreuses (cf. paragraphe I.4.6). Les objectifs principaux de cette étude sont d'enregistrer et de déterminer les origines des pics de concentration qui se forment à l'aval immédiatement après un décolmatage pneumatique. Une approche plus globale, visant à déterminer les paramètres optimaux de fonctionnement du dépoussiéreur pilote à manches, sera également présentée.

Les résultats de ces travaux permettront notamment de répondre aux questions suivantes : Quels sont les sources de particules qui participent à la formation d'un pic de concentration après un décolmatage ? Existe-t-il des sources prépondérantes et des sources minoritaires ? Quelles influences les paramètres tels que la perte de charge maximale avant décolmatage (ΔP_{\max}), la vitesse de filtration (U_f) ou la pression du réservoir (P_r) ont-ils sur l'émission particulaire ? Comment évoluent les pics de concentration au fur et à mesure du vieillissement du medium filtrant ? Existe-t-il des conditions optimales pour réduire l'émission particulaire ?

La prise en considération de ces résultats devrait permettre de fournir des recommandations concrètes pour un meilleur fonctionnement des dépoussiéreurs à media filtrants. Les travaux sur le dépoussiéreur pilote seront complétés par des essais provenant d'autres bancs d'essais étudiés en laboratoire (cf. chapitre II, annexes VI et VII) et par des campagnes de mesures effectuées sur des dépoussiéreurs industriels en activité dans le secteur du bois.

Dans un premier temps, une étude visant à déterminer les origines des bouffées de concentration en particules consécutives au décolmatage pneumatique va être présentée. Dans un second temps, une détermination quantitative de l'émission particulaire sera menée. Cette dernière conduira à une réflexion globale portant à la fois sur l'hygiène et la sécurité des travailleurs du secteur du bois et sur les possibilités d'amélioration des systèmes de dépoussiérage par media filtrants décolmatés par jets d'air pneumatiques.

VI.2. ETUDE DES ORIGINES DE LA CREATION DES BOUFFEES DE CONCENTRATION EN PARTICULES

Tout d'abord, il convient de bien définir ce que l'on entend par « bouffée de particules ». Il s'agit de la brusque augmentation de la concentration à l'aval (mesurée côté air propre), enregistrée immédiatement après le décolmatage pneumatique des éléments filtrants. Le terme « bouffée » correspond bien au phénomène observé dans la mesure où il y a réellement formation d'un nuage de particules particulièrement concentré qui subsiste brièvement. C'est une manifestation transitoire qui est souvent visible à l'œil nu tant l'enrichissement en particules est intense : l'air rejeté par le conduit aval n'est plus transparent mais devient opaque pendant une à deux minutes.

Expérimentalement, les bouffées peuvent être quantifiées en mesurant en continu la concentration en particules à l'aval des éléments filtrants d'un dépoussiéreur à l'aide, par exemple, d'un compteur optique de particules (Grimm 1.108, concentration en nombre de particules par litre d'air pour les diamètres supérieurs à 0,35 μm). Un exemple de suivi de la perte de charge et de la concentration numérique à l'aval du dépoussiéreur pilote est présenté sur la figure VI.1 :

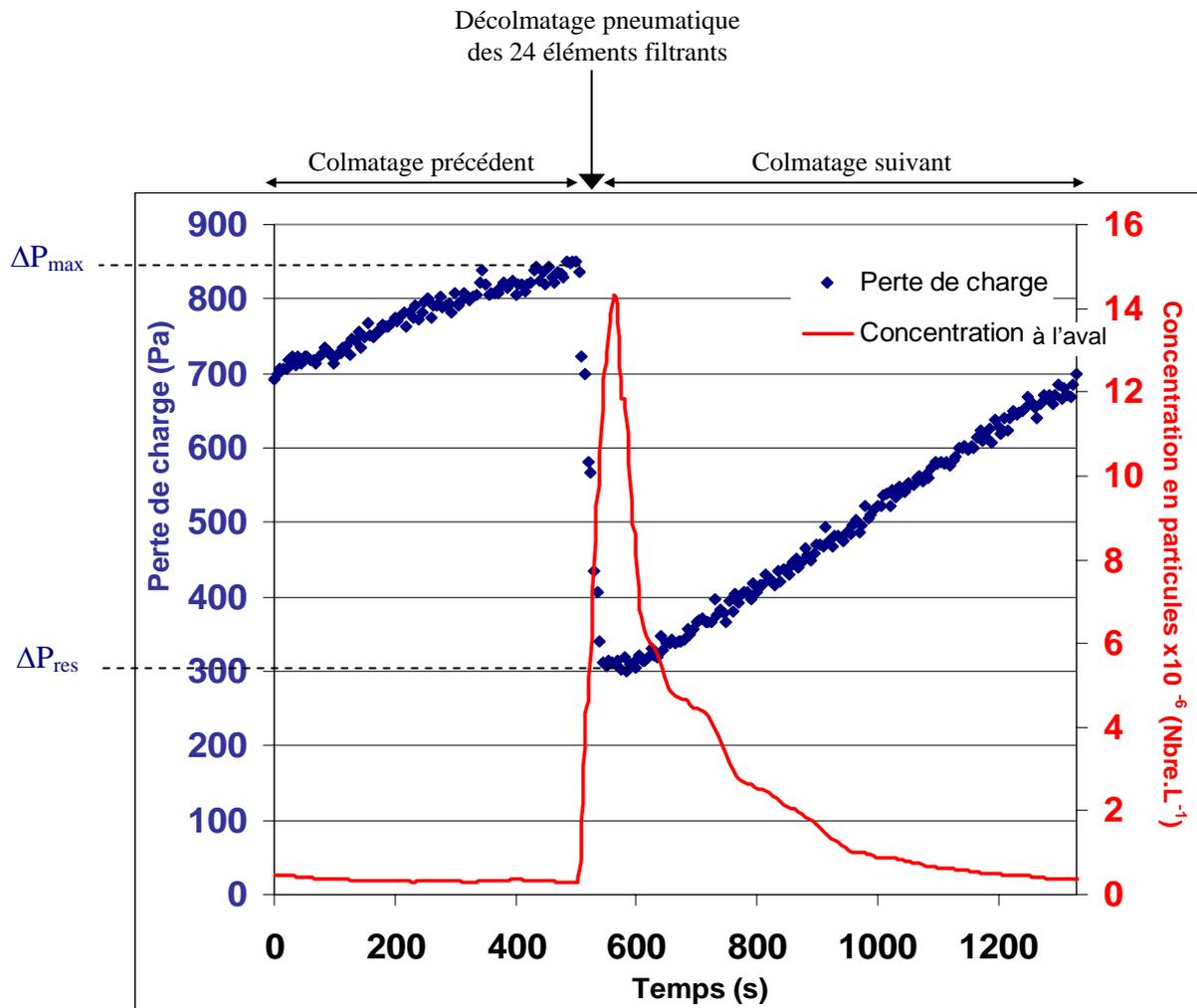


Figure VI.1 : Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval du dépoussiéreur pendant un décolmatage - Mise en évidence de la formation d'une bouffée de particules Alumine2 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 13.\Delta P_0$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, configuration 1

Pendant le décolmatage présenté sur la figure VI.1, la perte de charge chute de sa valeur maximale prédéfinie, ΔP_{\max} , jusqu'à une valeur résiduelle, ΔP_{res} . Le pic de concentration en particules consécutif au décolmatage pneumatique peut être divisé en deux zones, comme il sera présenté par la suite :

- le pic de concentration correspond à la création de la bouffée de particules dans le conduit aval du dépoussiéreur ;
- la fin du pic de concentration (traîne de la courbe) ne caractérise plus la bouffée de particules mais représente simplement la décroissance de la concentration liée à la reconstruction du gâteau.

Les travaux qui seront développés au début de ce chapitre concernent l'étude particulière des bouffées de concentration en particules et les origines de leur formation.

VI.2.1. Présentation des mécanismes et des sources de particules responsables des bouffées de concentration

L'augmentation de la concentration en particules après un décolmatage est liée à une baisse d'efficacité du couple « medium + gâteau de particules ». Les mécanismes qui en sont responsables sont les suivants :

- ***Mécanisme 1 : Disparition partielle du gâteau de filtration.***
C'est la cause qui paraît la plus logique et qui est la plus souvent citée dans la littérature (Leith et Ellenbecker (1980), Smith et al. (1998), Callé (2000), Callé et al. (2002), Bémer et al. (2004)). Du fait que le gâteau est le principal collecteur de particules pendant la phase de colmatage, sa disparition lors du décolmatage, même partielle provoque une chute de l'efficacité de filtration.
- ***Mécanisme 2 : Modification structurelle momentanée du medium ou migration directe.***
Les travaux de Dennis et Wilder (1975), Leith et Allen (1986), Callé (2000) font référence à ce type de modifications transitoires du média fibreux. Cette source se caractérise par le passage direct des particules de l'amont vers l'aval, sans collecte intermédiaire au sein du medium. Les particules traversent directement le medium grâce à des modifications momentanées de sa structure pendant le décolmatage. En effet, lors de l'à-coup de pression, un volume important d'air passe à contre-courant, pendant un temps extrêmement court, à travers les pores du medium. La conséquence envisagée est une augmentation temporaire de la taille de ces pores et le passage éventuel de certaines particules vers l'aval à la reprise de la filtration.
- ***Mécanisme 3 : Passage par des micro-perforations persistantes.***
Il s'agit du passage de particules vers l'aval du fait de l'existence ou de la création de fissures ou de micro-fuites au sein de la structure du medium. Ces dernières peuvent traduire une mauvaise qualité du filtre, un vieillissement du medium ou le fait qu'il soit soumis à de trop puissantes forces de tension lors du décolmatage.
- ***Mécanisme 4 : Migration indirecte de particules dans le medium.***
Ce mécanisme particulier est cité dans les travaux de Leith et Ellenbecker (1980) et de Leith et Allen (1986).
Lors du choc engendré par le medium pendant les décolmatages pneumatiques, il se produit un déplacement des particules piégées en profondeur présentant les plus faibles forces d'adhésion. Ces particules ont la particularité d'avoir tout d'abord été collectées au sein du medium, puis de migrer progressivement vers l'aval au gré des à-coups de pression de décolmatage successifs et des brusques contraintes provoquées sur le réseau de fibres. Une fraction d'entre elles sera finalement libérée et rejoindra le flux aval pour enrichir en particules la bouffée. Ce mécanisme n'est effectif que lors des chocs subis par les manches pendant les à-coups de pression du décolmatage.

Cas particulier : l'augmentation de la vitesse de filtration.

Elle se produit immédiatement après la fermeture de la vanne d'amenée d'air de décolmatage (et même pendant les séquences de décolmatage, comme cela a été vu en haut de manche au paragraphe IV.4.1.1. et sur les premières manches décolmatées au paragraphe V.4.2.1). L'augmentation de la vitesse de filtration est la résultante du fort volume d'air de décolmatage couplé à la baisse de la perte de charge. Elle facilite pendant un temps court le passage de particules vers l'aval par les différents mécanismes précédemment évoqués. Cependant, l'augmentation temporaire de la vitesse de filtration ne sera pas considérée comme un mécanisme en soi mais juste comme un facteur aggravant pour chacun des autres.

Les particules constituant les bouffées observées à l'aval des dépoussiéreurs résultent de plusieurs sources possibles, qui ont été listées et schématisées dans la figure VI.2.

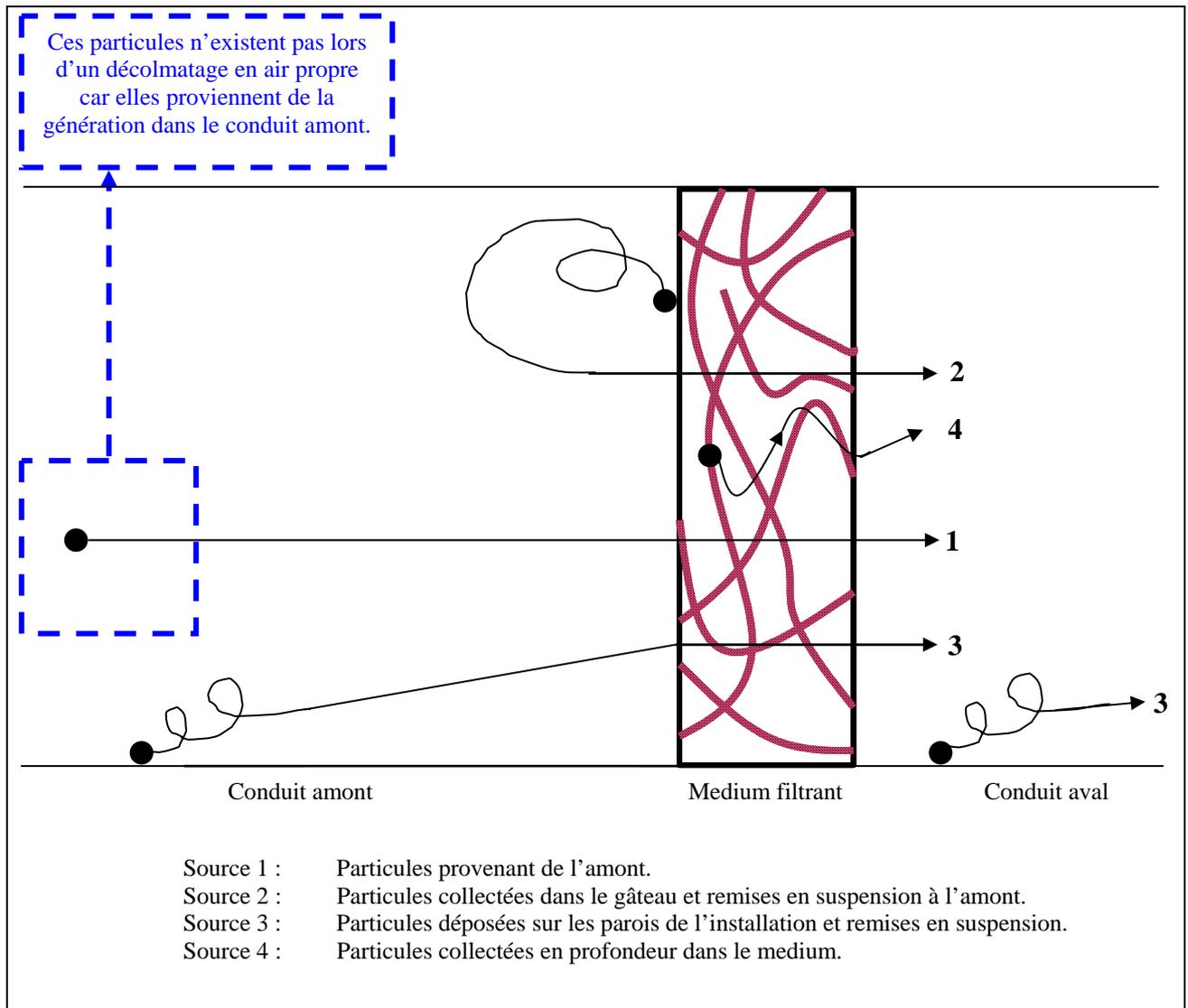


Figure VI.2 : Synthèse des origines possibles pour le passage de particules vers l'aval.

- **Source 1 : Particules provenant de l'amont.**
 Ces particules proviennent uniquement de la génération qui est effectuée dans le conduit amont. Elles sont susceptibles de passer vers l'aval par les mécanismes 1, 2 et 3.
- **Source 2 : Particules collectées dans le gâteau et remises en suspension à l'amont.**
 Ces particules ont suivi un premier parcours qui les a conduit à être collectées en surface du medium filtrant, dans le gâteau de filtration. Lors du détachement de la couche de particules, il se produit une brutale augmentation de la concentration en particules à l'amont du fait de la remise en suspension des poussières du gâteau qui ont été décolmatées. Sous l'effet du choc lors de la régénération, une grande partie des particules précédemment piégées dans le gâteau se détachent sous forme de particules élémentaires ou de petits agglomérats et participent au brusque enrichissement de la concentration en particules qui se produit à l'amont juste après un décolmatage. Leur passage vers l'aval s'effectue par les mécanismes 1, 2 et 3

- **Source 3 : Particules déposées sur les parois de l'installation et remises en suspension.**
Le choc de l'à-coup de pression et les turbulences que peut produire un grand volume d'air introduit en un temps très court provoquent la remise en suspension de certaines particules qui s'étaient déposées sur les parois de l'installation. Ce phénomène de rupture des plus faibles forces d'adhésion entre certaines particules et la paroi peut se produire tant à l'amont qu'à l'aval du medium. Les particules remises en suspension à l'aval sont susceptibles de participer directement à la bouffée de particules, alors que celles remises en suspension à l'amont viendront enrichir le nombre de particules susceptibles de traverser le medium selon les mécanismes 1, 2 et 3.
- **Source 4 : Particules collectées en profondeur dans le medium.**
Parmis les particules qui traverse à l'aval, ces particules sont les seules à avoir été préalablement collectées dans la structure interne fibreuse du medium. Leur mode de passage vers l'aval s'effectue par le mécanisme 4.

Lors d'un décolmatage par à-coup de pression, les contributions respectives de chacune de ces sources s'additionnent pour former un pic de concentration en particules global à l'aval des media filtrants.

VI.2.2. Méthode pour quantifier les contributions des sources à l'origine de la formation d'une bouffée de particules

Les essais consistent à suivre en continu la concentration en particules à l'aval pendant les décolmatages. Pour séparer les différentes sources de particules prenant part au pic de concentration observé lors de la régénération du medium, deux types de décolmatage ont été effectués : un décolmatage classique « on-line » (décolmatage 1) et un décolmatage en air propre sans génération de particules (décolmatage 2). La figure VI.3 représente les évolutions de la perte de charge et de la concentration en particules de bois1 à l'aval pour ces deux types de décolmatage. Elle représente un exemple typique de résultats obtenus lors de l'étude des bouffées de concentration et illustre les propos qui vont suivre sur la méthode adoptée.

Sur cet exemple, le premier décolmatage est effectué « on-line », c'est-à-dire avec maintien de la génération de particules à l'amont. On constate qu'il y a formation d'un pic de concentration en particules à l'aval qui est en tout point comparable a ce qui a été décrit sur la figure VI.1. Toutes les sources contribuant à la bouffée de particules globale à l'aval (bouffée G) sont alors influentes. A partir des données du compteur optique de particules concernant le début de ce pic de concentration, il est possible de calculer la masse totale de particules pour cette bouffée globale ($M(G)$) pendant sa durée d'action Δt_b . Les moyens de déterminer les paramètres $M(G)$ et Δt_b vont être développés par la suite.

Le second décolmatage est effectué en air propre, après un palier de perte de charge à ΔP_{max} qui provient du fait qu'il y a une perméation d'air propre à travers les éléments filtrants sans nouvel apport de particules. Une bouffée de particules (bouffée partielle, notée bouffée P) est alors libérée. Cette bouffée P regroupe les sources de particules 2, 3 et 4. Le pic de concentration issu de ce décolmatage en air propre est beaucoup moins important que pour un décolmatage « on-line » : il correspond uniquement à la phase liée à la bouffée de particules (cf. figure VI.4) et, de plus, il n'englobe pas toutes les sources de formation de cette bouffée. Les données du compteur optique de particules permettent de calculer la masse totale de particules pour cette bouffée partielle ($M(P)$), comme il sera vu par la suite.

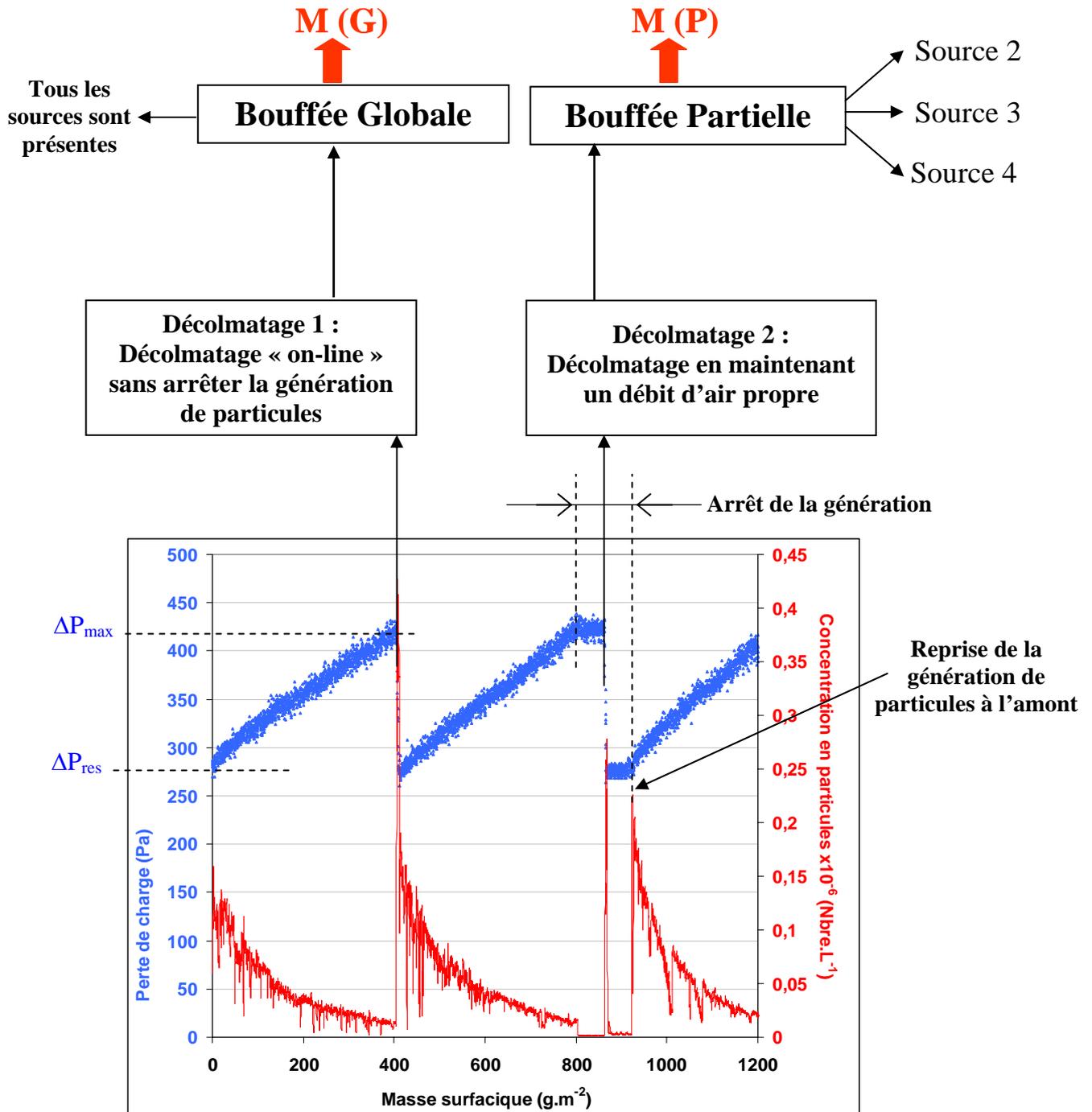


Figure VI.3 : Méthode de séparation des sources à l'origine d'une bouffée de particules à l'aval
 Bois1 , $U_f = 3,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\text{max}} = 420 \text{ Pa}$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, dépoussiéreur à poches

Enfin, il se produit un dernier pic de concentration à la reprise de la génération de particules à l'amont qui est uniquement provoqué par le fait que le gâteau de filtration a été détaché. Ce pic n'a pas été étudié car il ne correspond plus au phénomène de bouffée de particules.

Deux groupes de sources de particules peuvent être distingués :

- le groupe P comprend particules collectées dans le gâteau et remises en suspension à l'amont (source 2), les particules déposées sur les parois de l'installation et remises en suspension (source 3) et enfin, les particules collectées en profondeur dans le medium (source 4) ;
- le groupe 'G - P' concerne les particules provenant de l'amont (source 1).

La durée totale de la bouffée de particules, Δt_b , intervalle de temps sur lequel est basé le calcul des deux masses totales de particules ($M(G)$ et $M(P)$), est déterminée à partir de l'amplitude de la bouffée partielle. Un exemple de détermination de Δt_b est présenté sur la figure VI.4.

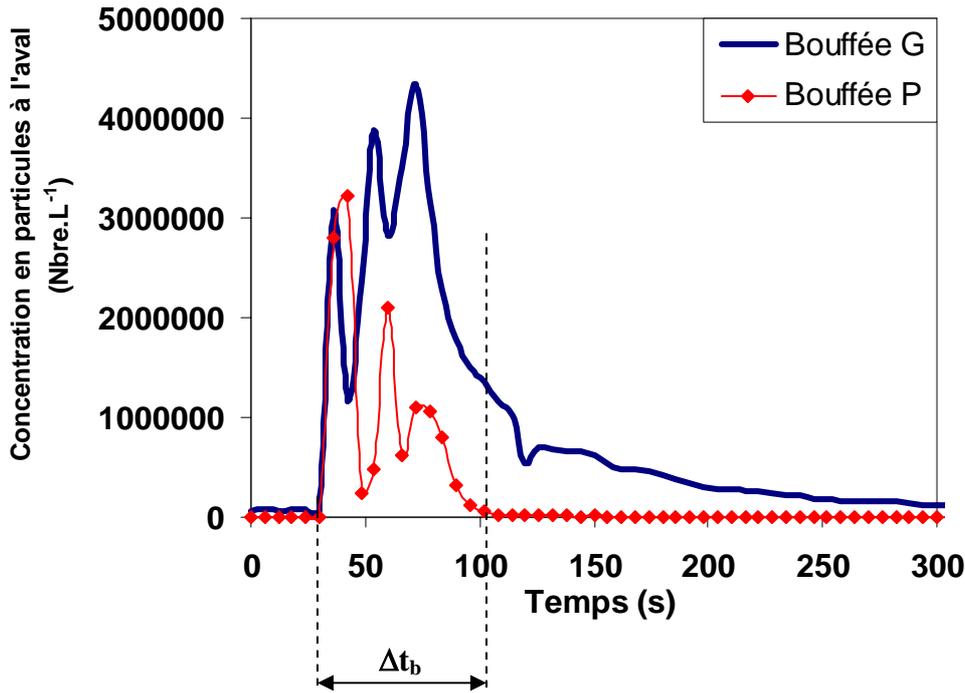


Figure VI.4 : Evolutions des pics de concentration correspondant aux bouffées G et P.
Exemple de détermination de la durée totale de la bouffée de particules.

La figure VI.4 montre bien qu'il est plus facile de déterminer la durée totale de la bouffée de particules à partir des données de la bouffée P plutôt qu'à partir des résultats de la bouffée G. Le pic de concentration correspondant au décolmatage « on-line » englobe en effet à la fois la bouffée de particules et la baisse d'efficacité du filtre : le passage d'un phénomène à l'autre est délicat à trouver sans l'apport d'informations fournies par la bouffée P.

Le suivi de la concentration numérique à l'aval, $C_{n,i}(t)$, est effectué par comptage optique (Grimm 1.108 - une mesure toutes les 6 secondes) pour 15 classes granulométriques (indiquées i). Si l'on s'intéresse à un seul diamètre d_{pi} de particules, $\overline{C_{n,i}}$ et $\overline{C_{m,i}}$ représentent les concentrations moyennes en nombre et en masse sur la durée d'existence d'une bouffée, Δt_b . En supposant les particules sphériques, $\overline{C_{m,i}}$ est donné par l'équation suivante :

$$\overline{C_{m,i}} = \rho_p \cdot \frac{\pi \cdot d_{pi}^3}{6} \cdot \overline{C_{n,i}} \quad (VI.1)$$

avec $\overline{C_{n,i}}$ la valeur moyenne de $C_{n,i}(t)$ pendant l'intervalle de temps Δt_b ;
 ρ_p la masse volumique des particules.

La masse d'aérosol émise à l'aval au cours d'une bouffée de particules est déterminée à partir de la concentration massique à l'aval, $C_m(t)$, intégrée sur la durée de la bouffée (de 0 à Δt_b) :

$$M = Q_v \cdot \int_0^{\Delta t_b} C_m(t) dt = \Delta t_b \cdot Q_v \cdot \overline{C_m} \quad (\text{VI.2})$$

$$\text{avec } \overline{C_m} = \sum_{i=1}^{15} \overline{C_{m,i}} \quad (\text{VI.3})$$

avec Δt_b la durée totale de la bouffée de particules ;

Q_v le débit volumique traité

$\overline{C_m}$ la concentration massique moyenne en particules lors de la bouffée.

La quantification de la contribution de chacun de deux groupes cités précédemment est calculée sous forme de pourcentage de la masse totale, $M(G)$, de particules émises lors de la bouffée globale. La figure suivante indique les calculs effectués pour déterminer la contribution massique à la bouffée de particules (en %) de chacun des deux groupes.

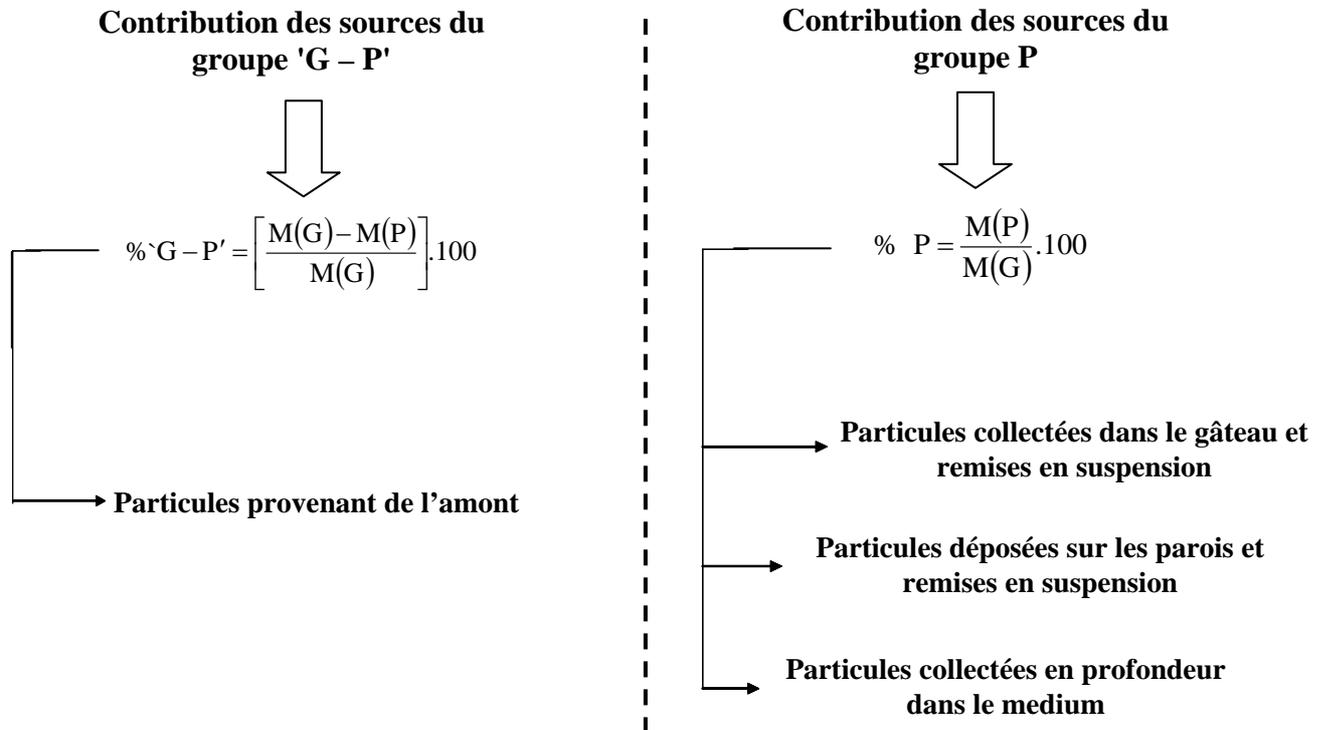


Figure VI.5 : Détermination des contributions massiques de chacun des deux groupes de sources formatrices de bouffées de concentration en particules à l'aval à partir des masses de particules $M(G)$ et $M(P)$ relevées à l'aval.

Les valeurs de $\% \text{'G - P'}$ et de $\% P$ qui seront indiquées par la suite dans les tableaux de synthèse sont toujours issues d'une moyenne sur au moins 3 essais. Les écarts types associés à ces valeurs restent systématiquement faibles et n'ont pas été notés dans les tableaux pour une meilleure lisibilité.

VI.2.3. Etude de l'influence de certaines conditions opératoires

Les influences de différents paramètres sur les bouffées vont être présentées :

- a) nature et taille de l'aérosol filtré (alumine et bois ; $d_{pm} = 2,5\mu m - 108\mu m$)
- b) perte de charge maximale avant décolmatage ΔP_{max} (350 Pa - 1300 Pa)
- c) pression initiale d'air comprimé dans le réservoir P_r (3 bars - 7 bars)
- d) vitesse de filtration U_f ($2\text{ cm.s}^{-1} - 4,7\text{ cm.s}^{-1}$)
- e) nombre de cycles de colmatage et de décolmatage (1 - 150 cycles)

Des résultats vont désormais être présentés et commentés. Ils s'appuieront principalement sur la comparaison des deux fractions %'G - P' et % P.

VI.2.3.1. Influence des propriétés de l'aérosol filtré

La taille et nature des particules à filtrer sont testées. L'objectif est de déterminer si des changements dans ces paramètres induisent des modifications dans les répartitions respectives des groupes de sources de particules émises à l'aval.

L'analyse de la contribution des différentes sources participant à la bouffée de particules est indiquée dans le tableau VI.1. Ces résultats sont des exemples représentatifs issus d'une série plus importante d'essais qui nous a permis de vérifier la cohérence et la reproductibilité des expériences. Dans un souci de clarté, ils n'ont pas tous été donnés ici.

Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA $U_f = 2\text{ cm.s}^{-1}$ $P_r = 5\text{ bar}$ Alumine1 ($d_{pm} = 2,5\mu m$)	ΔP_{max}	400 Pa
	% P	7,1
	%'G - P'	92,9
Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA $U_f = 3,7\text{ cm.s}^{-1}$ $P_r = 5\text{ bar}$ Alumine4 ($d_{pm} = 6\mu m$)	ΔP_{max}	400 Pa
	% P	37
	%'G - P'	63
Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA $U_f = 3,7\text{ cm.s}^{-1}$ $P_r = 5\text{ bar}$ Bois1 ($d_{pm} = 16,5\mu m$)	ΔP_{max}	400 Pa
	% P	95
	%'G - P'	5
Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA $U_f = 3,7\text{ cm.s}^{-1}$ $P_r = 5\text{ bar}$ Alumine5 ($d_{pm} = 35\mu m$)	ΔP_{max}	400 Pa
	% P	~ 100
	%'G - P'	~ 0

Tableau VI.1 : Contributions des groupes de sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, pour différentes tailles de particules.

Les résultats montrent que la contribution des particules provenant de l'amont (%'G - P') est largement prédominante pour les aérosols de plus petite taille (2,5 et 6 μm). Il semble que lors de la filtration des particules les plus fines, le medium dépourvu de son gâteau de filtration ne soit pas assez performant pour assurer une efficacité de collecte suffisante.

Pour les aérosols de diamètre médian plus élevé (16,5 et 35 μm), la tendance est inversée. Les sources contribuant à la formation de la bouffée P sont, cette fois, fortement majoritaires. Les particules provenant de l'amont ne participent plus activement à la formation de la bouffée. Les particules filtrées sont désormais trop grosses pour passer en majorité à l'aval par des mécanismes tels que la disparition partielle du gâteau ou la migration directe. Cela permet aux sources du groupe P de prendre l'ascendant et de contrôler majoritairement la production de particules vers l'aval pendant la bouffée. Ce constat nous permet cependant de douter quant à une forte implication des particules issues de la remise en suspension des particules du gâteau ou de la paroi, à l'amont des éléments filtrants. Ces particules sont en effet susceptibles d'être également arrêtées par le medium, au même titre que les particules issues de la génération à l'amont. Ainsi, même s'il n'a pas été possible de séparer la contribution des sources au sein du groupe P, il semble que les particules collectées dans le medium et celles déposées sur les parois à l'aval et remises en suspension soient les sources de particules les plus probables dans ce cas de figure.

Le cas particulier observé pour $d_{pm} = 6 \mu\text{m}$ est intéressant car il indique que les contributions des deux groupes s'inversent dans une zone intermédiaire mal définie (approximativement $8 < d_{pm} < 10 \mu\text{m}$ pour le medium étudié). Pour cette catégorie de particules, les apports du groupe 'G – P' et du groupe P se rapprochent. Les particules de diamètre avoisinant cette taille ont donc un comportement intermédiaire. Les media 'moyenne efficacité' qui ont été étudiés lors de ces expériences ne peuvent manifestement pas être performants lorsque les particules à filtrer sont trop fines.

Si l'influence de la taille des particules est particulièrement visible sur ces essais, il n'en est pas de même pour la nature des particules. Les essais (ceux du tableau VI.1 et d'autres) ne permettent pas de tirer de conclusions quant à ce paramètre. Pourtant, la forme des particules, leur rugosité et leur état de surface, la dureté du matériau qui les constitue ou encore leur capacité d'adhésion et de cohésion constituent autant de facteurs qui sont susceptibles d'intervenir pour conditionner eux aussi l'émission particulaire vers l'aval, pendant et après un décolmatage pneumatique. Une étude plus approfondie des influences de ces facteurs liés à la nature des particules pourrait cependant s'avérer utile pour la détermination du choix d'un medium filtrant en fonction de l'aérosol à filtrer. Elle pourrait également constituer une avancée intéressante concernant la compréhension des phénomènes formateurs des bouffées de concentration en particules et la réduction de l'émission particulaire à l'aval.

D'autres paramètres conditionnent le fonctionnement des dépoussiéreurs à media filtrants. Le choix des conditions opératoires de filtration et de décolmatage possède, à n'en pas douter des conséquences dans la formation d'une bouffée de particules et dans les sources à l'origine de cette formation. Ces éléments vont être étudiés dans les paragraphes qui suivent.

VI.2.3.2. Influence de la perte de charge maximale avant décolmatage

L'influence de la perte de charge maximale avant décolmatage, ΔP_{max} , va faire l'objet d'une description détaillée. La perte de charge maximale est un élément fondamental dans le fonctionnement cyclique des dépoussiéreurs à media filtrants. Elle conditionne notamment la quantité de particules filtrées pendant un cycle de colmatage et la fréquence de décolmatage à imposer. Aucune référence ne traite de son influence sur les bouffées de concentration en particules et sur la répartition des origines de formation de cette bouffée.

Les résultats concernant l'influence de la perte de charge maximale (ΔP_{max}) sont récapitulés dans le tableau VI.2 :

Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA Uf = 2 cm.s ⁻¹ Pr = 5 bar Alumine1 (d_{pm} = 2,5 μm)	ΔP_{max}	400 Pa	700 Pa	1000 Pa
	% P	7,1	6,8	4,8
	%'G - P'	92,9	93,2	95,2
Dépoussiéreur pilote à manches Medium T12T56320 Uf = 4,7 cm.s ⁻¹ Pr = 7 bar Alumine2 (d_{pm} = 3,1 μm)	ΔP_{max}	600 Pa	830 Pa	
	% P	8,2	6,2	
	%'G - P'	91,8	93,8	
Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA Uf = 3,7 cm.s ⁻¹ Pr = 5 bar Alumine4 (d_{pm} = 6 μm)	ΔP_{max}	350 Pa	400 Pa	700 Pa
	% P	49	37	32
	%'G - P'	51	63	68
Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA Uf = 3,7 cm.s ⁻¹ Pr = 5 bar Bois1 (d_{pm} = 16,5 μm)	ΔP_{max}	400 Pa	550 Pa	700 Pa
	% P	95	91	84
	%'G - P'	5	9	16
Dépoussiéreur pilote à manches Medium T12T56320 Uf = 4,7 cm.s ⁻¹ Pr = 3 bar Bois2 (d_{pm} = 33,8 μm)	ΔP_{max}	700 Pa	1300 Pa	
	% P	~ 100	98,7	
	%'G - P'	~ 0	1,3	

Tableau VI.2 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, pour différentes valeurs de perte de charge maximale.

Les résultats du tableau VI.2 montrent que lorsque la perte de charge maximale augmente, la contribution du groupe P diminue. Ce constat se généralise à l'ensemble des essais, quels que soient l'aérosol filtré et le type de dépoussiéreur utilisé (à poches ou à manches). L'évolution des pourcentages en fonction de la perte de charge maximale avant décolmatage ne modifie pas la prédominance d'un groupe par rapport à l'autre.

L'augmentation de la perte de charge maximale favorise donc la prédominance des particules provenant de l'amont au détriment de celles des sources 2, 3 et 4.

Une hypothèse pour expliquer ce phénomène consiste à dire que le gâteau se décolmate de manière plus efficace et avec moins de remise en suspension de particules individuelles à l'amont lorsque la perte de charge maximale est grande. Cette caractéristique du décolmatage qui veut que les gâteaux les plus épais se détachent par agglomérats de tailles importantes (qui sédimentent plus facilement dans la trémie) et en régénérant correctement le medium a d'ailleurs été mise en évidence par différents auteurs (cf. chapitre I.3.4.1). Ainsi, la remise en suspension de particules du gâteau à l'amont (source 2 participant à la bouffée P) se trouverait défavorisée alors que les particules provenant de l'amont pourraient profiter en plus grand nombre de la chute d'efficacité du medium du fait de l'importante disparition du gâteau de particules. Ces dernières permettraient ainsi au groupe 'G - P' d'augmenter sa contribution en particules vers l'aval.

Quelles que soient la taille et la nature des particules, il semble donc qu'une augmentation de la perte de charge maximale avant décolmatage conduise à une contribution majoritaire des sources constituant le groupe 'G - P'.

Autre paramètre essentiel du décolmatage, la pression initiale du réservoir d'air comprimé (P_r) favorise, à l'instar de la perte de charge maximale (ΔP_{max}), un meilleur détachement du gâteau lorsque sa valeur est augmentée. Il va donc être intéressant de vérifier si l'influence de la pression du réservoir d'air comprimé produit les mêmes conséquences sur la contribution des deux groupes de sources en particules pour la bouffée.

VI.2.3.3. Influence de la pression initiale du réservoir d'air comprimé de décolmatage

La pression initiale du réservoir d'air comprimé conditionne les propriétés du jet d'air produit lors de l'à-coup de pression à contre-courant. Les valeurs fixées pour la pression du réservoir (P_r) influent largement sur l'intensité du décolmatage et sur la réaction adoptée par le medium pour répondre à cette sollicitation extérieure (cf. paragraphe IV.4.2.2). Les accélérations subies par le medium et les mouvements brutaux qui en résultent jouent un rôle primordial dans la formation des bouffées de concentration à l'aval. Mais comment évoluent les contributions des sources à l'origine des bouffées lorsqu'il se produit une modification dans la valeur de la pression du réservoir ?

Le tableau VI.3 résume les modes de répartition entre les groupes en fonction de la pression initiale du réservoir d'air comprimé de décolmatage :

Dépoussiéreur pilote à manches Medium T12T56320 Uf = 4,7 cm.s ⁻¹ ΔPmax = 830 Pa Alumine2 (d_{pm} = 3,1 μm)	Pr	3 bar	7 bar	
	% P	2,7	6,2	
	%'G - P'	97,3	93,8	
Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA Uf = 3,7 cm.s ⁻¹ ΔPmax = 400 Pa Bois1 (d_{pm} = 16,5 μm)	Pr	3 bar	5 bar	6,5 bar
	% P	68	95	96
	%'G - P'	32	5	4
Dépoussiéreur pilote à manches Média T12T56320 Uf = 4,7 cm.s ⁻¹ ΔPmax = 1300 Pa Bois2 (d_{pm} = 33,8 μm)	Pr	1,5 bar	3 bar	
	% P	91,7	98,7	
	%'G - P'	8,3	1,3	
Dépoussiéreur pilote à manches Média T12T56320 Uf = 4,7 cm.s ⁻¹ ΔPmax = 700 Pa Bois2 (d_{pm} = 33,8 μm)	Pr	1,5 bar	3 bar	
	% P	94,3	~ 100	
	%'G - P'	5,7	~ 0	

Tableau VI.3 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, pour différentes valeurs de la pression initiale du réservoir d'air comprimé.

Une augmentation de P_r favorise systématiquement une contribution plus élevée du groupe P au détriment de l'apport en particules fourni par le groupe 'G – P'. Ce constat montre que les sources de particules 2, 3 et 4 voient leurs parts accrues lors d'une augmentation de la pression du réservoir.

Ce résultat paraît logique dans la mesure où une augmentation de la pression du réservoir d'air comprimé de décolmatage (P_r) favorise une plus grande brutalité du choc subi par le medium. Il s'en suit une augmentation probable des phénomènes de migration indirecte (hausse potentielle de la progression des particules dans le medium et de la rupture de

certaines forces d'adhésion et de cohésion) et de remise en suspension des particules du gâteau (éclatement du gâteau à l'amont du medium sous forme de particules élémentaires potentiellement plus élevé). Ces considérations s'appuient notamment sur les mesures d'accélération présentées au paragraphe IV.4.2.2, qui avaient alors montré la déformation plus grande du medium lorsque la pression de réservoir est plus grande. Les secousses provoquées dans les conduits amont et aval sont également plus importantes lorsque la pression du réservoir d'air comprimé est plus élevée et peuvent conduire à une plus importante remise en suspension des particules déposées.

Cependant, l'expérience n'était pas inutile car une évolution dans ce sens, même si elle était envisageable, n'était pourtant pas évidente. En effet, une décharge pneumatique sous forte pression de réservoir conduit à des décolmatages plus puissants et plus brutaux et donc à une meilleure régénération du medium filtrant. Ainsi, la chute d'efficacité liée à la disparition du gâteau ou la migration directe étaient également susceptibles de jouer un rôle important et de favoriser la source 1 et le groupe 'G – P'. C'est d'ailleurs ce qui avait été constaté dans le paragraphe précédent pour une augmentation du paramètre ΔP_{\max} , la perte de charge maximale avant décolmatage. Ici, les conclusions sont différentes car la puissance du décolmatage et les contraintes résultantes imposées au medium modifient les contributions des sources de particules.

Une augmentation de la pression initiale du réservoir d'air comprimé favorise toutes les sources de formation d'une bouffée de particules et conduit à une augmentation systématique de la masse émise à l'aval, pendant et juste après un décolmatage. L'expérience qui vient d'être commentée montre par contre que la concurrence qui existe entre les deux groupes favorise le groupe P lorsque la pression du réservoir d'air comprimé (P_r) est augmentée. Cette évolution de la contribution des sources en fonction de ce paramètre ne remet pourtant pas en cause la prédominance du groupe majoritaire par rapport à l'autre.

Après avoir étudié les influences de l'aérosol filtré et de certains paramètres de décolmatage (ΔP_{\max} et P_r), des résultats concernant les influences de certains paramètres opératoires de filtration vont être présentés dans les paragraphes qui suivent.

VI.2.3.4. Influence de la vitesse de filtration

La vitesse de filtration est également un paramètre important à prendre en considération lorsque l'on s'intéresse à l'émission particulaire à l'aval (cf. chapitre I.5.6). L'augmentation de la vitesse de filtration imposée sur les éléments filtrants conduit à des efficacités de filtration plus faibles, principalement lorsque le gâteau de particules ne peut pas jouer son rôle de principal collecteur (medium neuf ou à l'état décolmaté). Le fait d'augmenter la vitesse de filtration dégrade la qualité de la filtration au bénéfice d'une réduction de la taille des installations et donc des coûts d'investissement ; c'est un élément bien connu. L'influence de la vitesse de filtration sur les contributions des sources qui forment les bouffées de concentration en particules consécutives au décolmatage est par contre un élément beaucoup plus méconnu. L'objectif est donc ici de déterminer le groupe de sources de particules qui est favorisé lors d'une augmentation de la vitesse de filtration, U_f .

Le tableau VI.4 synthétise deux séries de résultats sur deux dépoussiéreurs distincts qui vont permettre de mieux apprécier l'influence de la vitesse de filtration (U_f) sur la formation des bouffées :

Dépoussiéreur pilote à manches Medium T12T56320 Pr = 7 bar $\Delta P_{max} = 830$ Pa Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu m$)	U_f	2 cm.s ⁻¹	4,7 cm.s ⁻¹	8 cm.s ⁻¹
	% P	17,7	6,2	3,3
	%'G - P'	82,3	93,8	96,7
Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA Pr = 5 bar $\Delta P_{max} = 400$ Pa Bois1 ($d_{pm} = 16,5 \mu m$)	U_f	2 cm.s ⁻¹	2,8 cm.s ⁻¹	3,7 cm.s ⁻¹
	% P	97	96,3	95
	%'G - P'	3	3,7	5

Tableau VI.4 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, pour différentes valeurs de la vitesse de filtration.

L'augmentation de la vitesse de filtration (U_f) provoque une augmentation de la contribution du groupe 'G – P' à la bouffée de particules par rapport au groupe P.

La part attribuée aux particules piégées en profondeur du medium et aux deux sources par remise en suspension diminue donc lorsque la vitesse de filtration augmente. C'est la contribution des particules provenant de l'amont qui est favorisée par ce changement de conditions opératoires.

Une fois encore, ce constat est d'autant plus intéressant qu'il était difficile à prévoir. Dans un sens, l'efficacité de collecte du medium, pendant et juste après décolmatage, est supérieure pour les faibles vitesses de filtration. Il apparaît donc logique que la contribution des particules présentes à l'amont (donc notamment la source 1) soit réduite lorsque la vitesse de filtration diminue. De même, il est tout à fait concevable que la part attribuée aux particules provenant de l'amont soit plus importante lorsque la vitesse de filtration et donc la vitesse de passage de l'air dans les micro-perforations éventuelles sont plus importantes. Par contre, il aurait également été envisageable que la part du groupe P progresse car toutes les sources qui le constituent sont théoriquement accentuées par une augmentation de la vitesse de filtration (U_f). Ainsi, une vitesse de filtration plus grande est susceptible de faire migrer de manière plus importante les particules piégées en profondeur aux forces d'adhésion fragilisées par le décolmatage. Elle est également plus à même de redéposer les particules détachées du gâteau avant leur sédimentation dans la trémie, et donc d'augmenter les probabilités de passage vers l'aval des particules remises en suspension à l'amont en provenance du gâteau.

L'augmentation de la vitesse de filtration favorise le passage des particules vers l'aval par des sources provenant des deux groupes ; le résultat qui est apporté ici est qu'elle avantage préférentiellement le groupe 'G – P'.

VI.2.3.5. Influence du traitement de surface

Les performances du traitement de surface dont bénéficient les media filtrants n'interviennent pas uniquement au niveau de l'efficacité de décolmatage : ils peuvent parfois contribuer à l'amélioration de l'efficacité de collecte des particules (cf. annexe I). Ainsi, l'apport d'une membrane PTFE sur un medium non tissé contribue à améliorer ses performances de filtration et à fortement réduire l'influence négative des bouffées de concentration sur l'efficacité de filtration globale du système (Vaxelaire (2001), Simon (2002), Callé et al. (2002), Bémer et al. (2004)). Pourtant, du fait notamment du coût plus élevé de ces types de media pour des applications telle que le secteur du bois par exemple et d'une résistance mécanique peut être insuffisante, ils sont aujourd'hui pratiquement absents du marché du dépoussiérage.

Les résultats qui vont être présentés découlent de la compilation d'un précédent travail de D.E.A. effectué au laboratoire (Simon (2002)). Ils ont pour objectifs de déterminer l'influence de deux traitements de surface sur les contributions respectives des deux groupes de sources formatrices d'une bouffée.

Le tableau suivant présente les résultats concernant les contributions des deux groupes en fonction du traitement de surface dont est doté le medium (cf. paragraphe II.6) :

Dépoussiéreur à poches $U_f = 2 \text{ cm.s}^{-1}$ $P_r = 7 \text{ bar}$ $\Delta P_{\text{max}} = 350 \text{ Pa}$ Alumine1 ($d_{\text{pm}} = 2,5 \mu\text{m}$)	Traitement de surface	Calandrage	Membrane PTFE
	% P	8,1	17,5
	%'G - P'	91,9	82,5
Banc media plans $U_f = 2 \text{ cm.s}^{-1}$ $P_r = 7 \text{ bar}$ $\Delta P_{\text{max}} = 300 \text{ Pa}$ Alumine3 ($d_{\text{pm}} = 4,6 \mu\text{m}$)	Traitement de surface	Calandrage	Membrane PTFE
	% P	5,5	12
	%'G - P'	94,5	88

Tableau VI.5 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, en fonction de différents traitements de surface pour le medium.

Sur ces exemples faisant intervenir des particules fines, les résultats montrent que le groupe 'G – P' contribue de manière majoritaire à la production de la bouffée de particules, et ce quel que soit le traitement de surface rencontré. Il apparaît toutefois que la part allouée à ce groupe est moins importante avec le traitement par membrane PTFE comparativement au traitement par calandrage thermique.

Le medium bénéficiant de la qualité de collecte de la membrane PTFE s'expose beaucoup moins aux chutes de l'efficacité à l'état décolmaté, lorsque le gâteau de particules a été détaché (Simon (2002) et Bémer et al. (2004)). La source de particules du groupe 'G – P' se trouve donc plus défavorisée en terme d'apport particulaire vers l'aval en présence d'une fine membrane polymère plutôt qu'en présence d'un traitement de surface par calandrage qui n'améliore en rien les propriétés d'efficacité de filtration du medium (Simon (2002)).

La migration indirecte de particules au sein du medium (particules de la source 4) profite donc de ce phénomène pour faire gagner quelques pourcents de contribution au groupe P lors des essais sur membrane PTFE. Ceci semble se produire malgré le fait que le colmatage interne soit fortement réduit en présence d'une telle membrane qui joue le rôle de barrière et donc que la probabilité de passage d'une particule vers l'aval par migration soit réduite.

D'autre part, les essais interviennent en tout début de vie pour les media (moins de 20 cycles effectués) et les résultats pourraient être différents avec un conditionnement et un vieillissement plus avancé pour le medium.

VI.2.3.6. Influence du nombre de cycles effectués (vieillessement du medium)

Plus les éléments filtrants ont subi de nombreux cycles, plus ils ont été sollicités un nombre important de fois par des décolmatages pneumatiques et plus leur colmatage interne ou leur degré d'usure (fissures, micro-perforations) sont avancés. Les bouffées et les sources qui sont à l'origine de leur formation pourraient s'en trouver changées.

L'objectif de ce paragraphe est de déterminer si le vieillissement du medium, caractérisé dans nos expériences par le nombre de cycles de filtration effectué, a une influence sur les contributions en particules à l'aval.

Le tableau VI.6 récapitule les résultats concernant les influences des groupes 'G - P' et P en fonction du nombre de cycles.

Dans ce tableau, le terme « 19 et 20 » pour le paramètre 'Nombre de cycles' signifie, pour l'exemple, que la bouffée globale G qui a permis d'effectuer les calculs a été obtenue au cycle numéro 19 alors que la bouffée partielle P à quant à elle été obtenue au cycle 20. Les deux bouffées ne peuvent en effet pas intervenir au même cycle puisqu'elles sont chacune issues d'un décolmatage différent.

De plus, les résultats du tableau VI.6 ne résultent exceptionnellement pas d'une moyenne sur 3 essais comme cela a été le cas pour l'ensemble des précédents tableaux (mis à part l'essai indicé 137 à 141 sur le dépoussiéreur pilote à manches qui lui a bien été effectué sur une moyenne de plusieurs essais).

Dépoussiéreur pilote à manches Medium T12T56320 Uf = 4,7 cm.s ⁻¹ Pr = 7 bar ΔPmax = 600 Pa Alumine2 (d _{pm} = 3,1 μm)	Nombre de cycles	19 et 20	50 et 51	100 et 101	137 à 141	148 et 149
	% P	8,8	7,9	7,7	8,2	8
	%'G - P'	91,2	92,1	92,3	91,8	92
Dépoussiéreur à poches Medium T 452 SA Uf = 3,7 cm.s ⁻¹ Pr = 5 bar ΔPmax = 400 Pa Bois1 (d _{pm} = 16,5 μm)	Nombre de cycles	1 et 2	15 et 16	40 et 41		
	% P	76	91,2	95		
	%'G - P'	24	8,8	5		

Tableau VI.6 : Contributions des sources prenant part à la bouffée de particules après un décolmatage, en fonction du nombre de cycles précédemment effectués par le medium.

Pour le dépoussiéreur à poches, les résultats montrent tout d'abord une différence significative entre les pourcentages calculés pour le nombre de cycles le moins élevé (« 1 et 2 ») et les autres, lors des essais sur le dépoussiéreur à poches avec des particules de bois de 16,5 μm de diamètre. La valeur de %'G - P', égale à 24 %, est en effet beaucoup plus élevée que pour les deux autres essais où elle descend en dessous des 10 %. Ce premier décolmatage intervient alors que le medium est quasiment neuf et qu'il n'est pas encore fortement imprégné à l'intérieur. Il est probable que la migration des particules soit encore très peu influente et qu'au contraire les particules issues de l'amont (sources 1, 2 et 3) possèdent une grande part de responsabilité dans l'émission particulaire à l'aval. L'efficacité de filtration du medium à l'état décolmaté après les décolmatages des cycles 1 et 2 est encore faible : elle est meilleure que pour l'état neuf mais pas encore aussi élevée que ce qu'elle pourra être lorsque le colmatage interne sera important (Callé (2000)). Si le groupe P contribue de manière plus large à la bouffée, c'est que les sources qui le constituent créent un apport beaucoup plus conséquent de particules à l'amont pendant le décolmatage que ce que peut apporter la seule génération de particules.

Les constats sont par contre modifiés lorsque les comparaisons interviennent entre des états correspondant à des nombres de cycles plus importants.

Dans le cas du dépoussiéreur à manches, entre le cycle 19 et le cycle 149 pour les essais sur le dépoussiéreur pilote à manches, il n'apparaît aucune évolution significative dans les contributions respectives des deux groupes étudiés. Pour les conditions dans lesquelles l'expérience a été menée, le groupe 'G - P' possède une part majoritaire dans le passage de particules vers l'aval (moyenne d'environ 91,9 %) par rapport au groupe P (environ 8,1 %). Cette absence d'évolution signifie que les contributions respectives de chacun des groupes restent constantes et que le système a atteint, de ce point de vue, un régime stationnaire. Ce résultat est à rapprocher du constat qui avait été effectué lors du commentaire des cycles pour

les expériences sur l'alumine2 (annexe VIII) : l'amplitude des pics de concentration en particules émis à l'aval après chaque décolmatage se stabilise rapidement (dès les 20 premiers cycles) et n'évolue plus par la suite au cours des cycles. Par ailleurs, les résultats montrent également clairement que la perte de charge résiduelle après un décolmatage (ΔP_{res}) est en progressive augmentation sur l'ensemble des 150 premiers cycles de colmatage et de décolmatage. Le colmatage interne, seul facteur pouvant influencer sur la perte de charge résiduelle des manches, est donc, quant à lui, encore en période d'évolution. Le gâteau de particules résiduelles, pour ces expériences sur l'Alumine2, garde une structure identique tout au long des cycles et ne peut donc pas être tenu pour responsable de cette évolution de la perte de charge résiduelle (ΔP_{res}).

Ces comportements distincts entre l'évolution des propriétés physiques du medium au cours du temps et la relative stabilité des bouffées de concentration en particules produites après décolmatage amènent à une réflexion de fond.

Les travaux de la bibliographie (cf. paragraphes I.2.2.2 et I.2.3.2) et nos propres essais (commentaires de la figure IV.19 du paragraphe IV.5) ont mis en évidence l'existence du colmatage interne et de l'imprégnation progressive du réseau de fibres d'un medium, au fur et à mesure des cycles. Il est donc certain que la masse de particules piégées dans le medium a augmenté entre le 20^{ième} et le 150^{ième} cycle de filtration. Ce colmatage interne possède, entre autre propriété, la capacité d'améliorer l'efficacité de filtration d'un medium en multipliant les possibilités de collecte. Chaque particule collectée et piégée devient en effet un nouveau site potentiel de collecte, au même titre qu'une fibre constitutive du medium. De nombreux auteurs constatent d'ailleurs que l'efficacité de collecte d'un medium s'améliore, au fur et à mesure des cycles de fonctionnement. Pour conforter cette hypothèse, les évolutions des efficacités fractionnelles en fonction du diamètre des particules et du nombre de cycles effectués ont été mesurées sur chacun des deux dépoussiéreurs étudiés (figures VI.6 et VI.7). La méthode de détermination de ces efficacités fractionnelles est identique à celle qui a été présentée dans le paragraphe II.5.3.

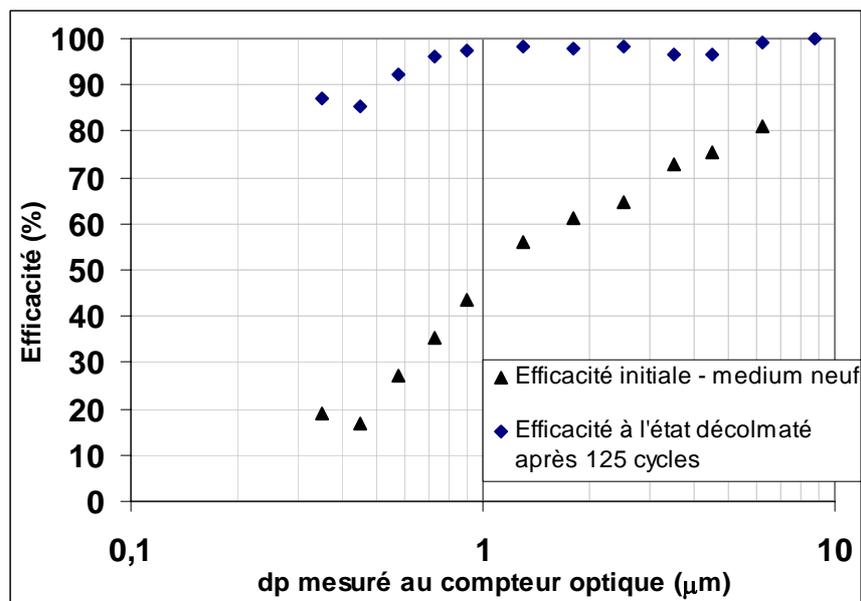


Figure VI.6 : Efficacités fractionnelles des manches du dépoussiéreur pilote en fonction du diamètre des particules pour l'état neuf et pour l'état décolmaté après 125 cycles.

- Dépoussiéreur pilote à manches, Alumine2, $\Delta P_{max} = 600$ Pa, $P_r = 7$ bar, $t_d = 100$ ms, $U_f = 4,7$ cm.s⁻¹ -

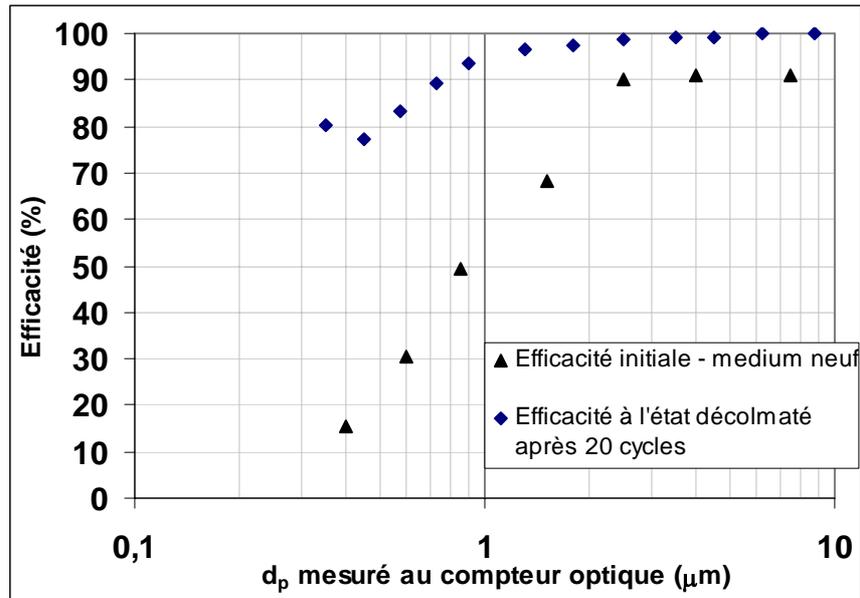


Figure VI.7 : Efficacités fractionnelles du dépoussiéreur à poches en fonction du diamètre des particules pour l'état neuf et pour l'état décolmaté après 20 cycles.

- Dépoussiéreur à poches, Bois1, $\Delta P_{\text{max}} = 400 \text{ Pa}$, $P_r = 5 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $U_f = 3,7 \text{ cm.s}^{-1}$ -

Pour les deux bancs d'essais, on constate que l'efficacité de collecte du medium est beaucoup plus importante à l'état décolmaté après plusieurs cycles qu'à l'état neuf. Un medium fortement colmaté à l'intérieur, même dépourvu de son gâteau de filtration, possèdera tout de même une efficacité suffisante pour amoindrir le passage de particules par les sources suivantes (particules provenant de l'amont, remise en suspension des particules du gâteau et de celles déposées sur les parois à l'amont). D'autre part, l'augmentation du colmatage interne conduit à une contribution plus importante du mécanisme de migration indirecte.

Les résultats sur le bois indiquent une progression nette de la contribution du groupe P (le pourcentage pour P passe de 76 à 95 % en environ 40 cycles – tableau VI.6). Ils laissent donc supposer que la croissance du colmatage interne provoque une progression de la source 4 au détriment de la source du groupe 'G – P' qui, elle, se heurte à l'amélioration des propriétés de collecte du medium (cf. figure VI.7).

Les résultats sur l'alumine sont caractérisés par l'établissement de valeurs relativement constantes dans les contributions après le 20^{ème} cycle (cf. tableau VI.6). Il semble donc que sur cet exemple, les mêmes causes (augmentation du colmatage interne et de l'efficacité de collecte du medium) ne conduisent pas aux mêmes effets (progression de la contribution du groupe P). Les phénomènes mis en jeu dans ce cas apparaissent complexes et fortement interdépendants. Malgré de nombreuses réflexions et tentatives d'explications, aucune ne paraît pouvoir être convenablement vérifiée en l'état des connaissances.

Tout au mieux pouvons nous dire que les constatations qui ont été apportées sur les essais pour l'alumine (tableau VI.6 et annexe VIII) paraîtraient plus logiques si les valeurs de perte de charge résiduelle (ΔP_{res}) étaient elles aussi stabilisées. Le régime permanent résulterait alors d'une subtile adéquation entre :

- un colmatage interne du medium fibreux qui ne collecterait pendant un cycle que l'exacte quantité de particules qui aurait été relarguée au décolmatage précédent (contribution par migration indirecte stable) ;
- une efficacité de filtration du medium qui serait elle-même stabilisée et qui régulerait la production de particules vers l'aval par la source du groupe 'G – P' et par les sources de remise en suspension à l'amont (sources 2 et 3).

A noter que la stabilité observée dans les résultats sur l'alumine dans le tableau VI.6 serait peut être également apparue pour les essais sur le bois si le travail avait été prolongé pendant encore 100 cycles ou plus.

VI.3. QUANTIFICATION DES BOUFFEES DE CONCENTRATION EN PARTICULES GLOBALES A L'AVAL – SUIVI DE L'EMISSION PARTICULAIRE AU COURS DES CYCLES DE COLMATAGE ET DE DECOLMATAGE

Depuis le 1^{er} juillet 2005, la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP - valeur réglementaire) en présence d'aérosol de bois est fixée en France à 1 mg.m^{-3} pour la fraction inhalable (au lieu de 5 mg.m^{-3} dans le passé). Pour atteindre cette valeur, il est recommandé que la concentration dans les conduits de recyclage de l'air à l'aval du dispositif de dépoussiérage soit inférieure au cinquième de la valeur limite soit $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$. Ces nouvelles dispositions concernant la VLEP nécessitent un contrôle stricte des performances des installations. Pour illustrer ces propos, une quantification des rejets du dépoussiéreur pilote va désormais être effectuée.

VI.3.1. Résultats obtenus sur le dépoussiéreur pilote à manches

VI.3.1.1. Concentrations moyennes en particules relevées à l'aval

Les sources de formation d'une bouffée de particules viennent d'être décrites et étudiées. On comprend désormais mieux la formation de ces pics de concentration et l'évolution des sources qui en sont à l'origine. Il convient désormais, pour compléter ces travaux, de s'intéresser à un aspect plus global du système et de mesurer et commenter le fonctionnement du dépoussiéreur pilote à manches en terme de performances de filtration. Cet aspect passe par un suivi de la concentration en aval au cours des cycles de colmatage et de décolmatage et une détermination de l'évolution des bouffées de concentration en particules en fonction des conditions opératoires retenues. Le tableau VI.7 propose une synthèse de l'ensemble des cycles de filtration présentés dans l'annexe VIII en terme de suivi de l'émission particulaire.

		Alumine1 - $d_{pm} = 2,5 \mu m$ - $C_p = 720 mg.m^{-3}$	
		Figure AVIII 1	
Conditions opératoires →		$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$	
		$\Delta P_{max} = 13.\Delta P_0$	
		$P_r = 7 bar$	
	$\overline{C}_{m,bouffées} (mg.m^{-3})$	15,6	
	$\overline{C}_{m,cycles} (mg.m^{-3})$	2,76	
	$\overline{C}_{m,sans bouffées} (mg.m^{-3})$	1,41	

		Alumine2 - $d_{pm} = 3,1 \mu m$ - $C_p = 500 mg.m^{-3}$			
		Figure AVIII 4	Figure AVIII 4	Figure AVIII 4	Figure AVIII 5
Conditions opératoires →		$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$	$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$	$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$	$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$
		$\Delta P_{max} = 9.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 13.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 19.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 19.\Delta P_0$
		$P_r = 7 bar$	$P_r = 7 bar$	$P_r = 7 bar$	$P_r = 3 bar$
	$\overline{C}_{m,bouffées} (mg.m^{-3})$	12,5	21,8	24,5	9,4
	$\overline{C}_{m,cycles} (mg.m^{-3})$	3,18	3,08	1,46	1,65
	$\overline{C}_{m,sans bouffées} (mg.m^{-3})$	0,75	0,7	0,54	0,55

		Bois2 - $d_{pm} = 33,8 \mu m$ - $C_p = 3900 mg.m^{-3}$			
		Figure AVIII 7			
Conditions opératoires →		$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$	$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$	$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$	$U_f = 4,7 cm.s^{-1}$
		$\Delta P_{max} = 10.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 10.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 20.\Delta P_0$	$\Delta P_{max} = 20.\Delta P_0$
		$P_r = 3 bar$	$P_r = 1,5 bar$	$P_r = 1,5 bar$	$P_r = 3 bar$
	$\overline{C}_{m,bouffées} (mg.m^{-3})$	0,94	0,42	1,6	2,7
	$\overline{C}_{m,cycles} (mg.m^{-3})$	0,15	0,16	0,11	0,25
	$\overline{C}_{m,sans bouffées} (mg.m^{-3})$	0,097	0,12	0,084	0,18

Tableau VI.7 : Synthèse des concentrations massiques moyennes en particules à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches en fonction des conditions opératoires de fonctionnement et du type d'aérosol filtré ($t_d = 100 ms$).
(Ce tableau est complémentaire des courbes présentées dans l'annexe VIII)

Ce tableau permet de comparer les valeurs de trois types de concentrations moyennes (cf. figure VI.8 – calculs effectués sur un minimum de 15 cycles) récapitulées ci-dessous :

- La concentration massique moyenne des bouffées de concentration en particules, $\overline{C}_{m, \text{bouffées}}$. Elle représente la moyenne arithmétique des valeurs de concentrations massiques en particules pendant les seules périodes d'existence des bouffées de concentration. Ces courtes périodes consécutives aux décolmatages sont généralement inférieures à 5 % (en fonction des conditions opératoires) du temps total de filtration. Les valeurs pour cette concentration sont, de loin, les plus élevées car elles décrivent la période pour laquelle la concentration en particules à l'aval est la plus élevée.
- La concentration moyenne en particules sur n cycles, $\overline{C}_{m, \text{cycles}}$. Elle représente la moyenne arithmétique de l'ensemble des valeurs de concentrations massiques en particules pendant plusieurs cycles. Les valeurs correspondant à cette concentration sont les plus pertinentes car elles rendent compte de la concentration dans le conduit aval (qui peut être parfois un conduit de recyclage) sur une longue période d'activité et elles permettent d'évaluer quantitativement les rejets massiques en poussières.
- La concentration moyenne sans les bouffées de concentration en particules, $\overline{C}_{m, \text{sans bouffées}}$. Elle représente la moyenne arithmétique des valeurs de concentrations massiques en particules au long de plusieurs cycles de filtration mais après avoir pris soin de retirer les courtes périodes de temps qui correspondent aux bouffées de concentration. Les valeurs pour cette concentration sont les plus basses car elles ne prennent pas en compte les brutales montées en concentration liées au passage des bouffées.

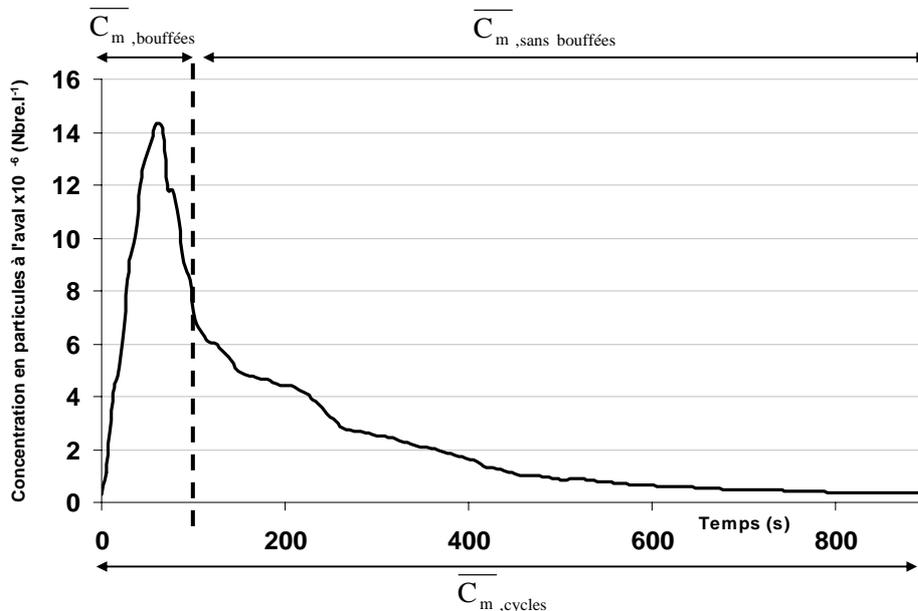


Figure VI.8 : Exemple de détermination des trois types de concentrations moyennes sur un cycle de filtration

L'émission particulaire à l'aval est beaucoup plus importante pour les deux aérosols d'alumine que pour l'aérosol de bois testé. Les concentrations moyennes en particules à

l'aval, $\overline{C_{m,cycles}}$, oscillent entre 1,46 et 3,18 mg.m⁻³ pour l'alumine, suivant les conditions opératoires. Les valeurs pour le bois sont quant à elles comprises entre 0,11 et 0,25 mg.m⁻³. Le medium en fibres de polyester non tissées avec traitement de surface par calandrage thermique n'est pas suffisamment performant pour assurer une efficacité de filtration importante sur des aérosols aussi fins que les poussières d'alumine qui ont été testées. La disparition du gâteau de filtration après un décolmatage pneumatique entraîne d'une part une bouffée de particules importante et d'autre part une baisse d'efficacité telle qu'elle permet à un nombre beaucoup plus grand de particules de transiter vers l'aval. A la vue des résultats bibliographiques faisant état d'une augmentation de l'émission particulaire lors d'une élévation de la valeur de concentration à l'amont (paragraphe I.4.6), on peut même penser que la différence entre alumine et bois aurait été plus importante si la concentration amont en particules d'alumine avait été identique à celle du bois.

Ce constat rejoint les commentaires apportés au VI.2.3.1. concernant les aérosols les plus fins et confirme la grande difficulté à filtrer des aérosols de diamètre médian inférieur à 5 µm avec les media de moyenne efficacité classiquement utilisés en dépolluage industriel. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où la filtration des particules de petite taille n'est pas la vocation première de ce type de media, dont le domaine d'application privilégié se situe pour des particules de taille bien supérieure au micromètre. Par contre, il souligne l'attention toute particulière qui doit être portée sur la granulométrie de l'aérosol à l'amont du dépollueur. On peut par exemple penser aux activités ponctuelles de ponçage du bois qui peuvent considérablement faire baisser le diamètre médian de l'aérosol à l'amont et pourraient entraîner une baisse de l'efficacité de filtration.

D'autre part, ces résultats concernant l'aérosol modèle d'alumine n'ont pas vocation à être comparés avec une quelconque activité industrielle. Un commentaire plus poussé des valeurs quantitatives n'est donc pas utile. Les résultats permettent par contre de compléter les données en vue d'interpréter, de manière qualitative cette fois, l'influence de différentes conditions opératoires, comme il va être vu dans la suite de ce paragraphe.

Pour le bois, les valeurs de concentration massique moyenne en particules de bois dans l'air recyclé (conduit aval du dépollueur pilote à manches), calculées sur plusieurs cycles de colmatage et de décolmatage, sont proches ou inférieures à la limite de 0,2 mg.m⁻³ recommandée dans les conduits de recyclage de l'air à l'aval des dispositifs de dépolluage. Seul le résultat concernant les essais à $\Delta P_{max} = 20.\Delta P_0$ et $P_r = 3$ bar, est supérieur à cette valeur mais la valeur enregistrée, égale à $\overline{C_{m,cycles}} = 0,25$ mg.m⁻³, n'est pas tellement éloignée de la limite. Dans la mesure où les résultats sont satisfaisants pour un recyclage, ils le sont d'autant plus pour un rejet vers l'extérieur*.

Malgré la dégradation significative de l'efficacité de filtration consécutivement aux décolmatages pneumatiques, causée par l'émission de particules sous forme de bouffées et par la disparition momentanée du gâteau de filtration, il semble donc que les concentrations massiques moyennes à l'aval, intégrant plusieurs cycles, restent faibles. De plus, ce résultat montre qu'une concentration massique à l'aval inférieure à la valeur limite de 0,2 mg.m⁻³ peut être atteinte. Etant donné la vitesse de filtration relativement élevée ($U_f = 4,7$ cm.s⁻¹) et la taille modeste des particules à filtrer qui ne plaçaient pas le dépollueur dans les conditions les plus favorables, ce constat est donc plutôt encourageant. Cependant, il convient bien entendu de replacer ces résultats dans leur contexte. Ils ne valent que pour le dépollueur étudié, avec des manches en bon état et pour les conditions opératoires utilisées et ne peuvent être généralisés, en l'état, à d'autres installations de dépolluage.

Ces premières observations optimistes concernant la filtration de particules de bois sont toutefois quelques peu contrariées par d'autres résultats :

- Valeurs élevées de la concentration moyenne des bouffées, $\overline{C_{m, \text{bouffées}}}$.

Les pics de concentrations dans le conduit aval, intervenant après chaque décolmatage, dépassent systématiquement la valeur recommandée de $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$. Même si le temps pendant lequel existent ces pics de concentration reste court (généralement inférieur à 5 % du temps total d'un cycle, soit entre 25 et 150 s pour nos essais suivant les conditions de l'expérience), il ne change rien au fait que la valeur de $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$ soit invariablement dépassée après chaque décolmatage. Ce constat est valable pour chacun des aérosols testés. Dans ces conditions, il apparaît que l'effort principal d'amélioration de l'efficacité globale d'épuration d'un tel système passe principalement par la réduction des pics de concentration en particules consécutifs au décolmatage.

Pour continuer d'illustrer ces propos, la concentration moyenne sans les bouffées, $\overline{C_{m, \text{sans bouffées}}}$, permet de visualiser ce que pourrait être les rejets en particules à l'aval du dépoussiéreur si l'on réussissait à s'affranchir complètement de l'apport massique en particules lié à ces pics perturbateurs. La synthèse de ces valeurs permet de constater que des baisses de 63 à 77 % de la concentration à l'aval pourraient alors être envisagées concernant les essais sur l'alumine². De même, des réductions allant de 23 à 35 %, suivant les conditions opératoires, pourraient être atteinte lors des essais sur le bois.

Techniquement, il existe trois principales possibilités pour réduire ou s'affranchir des bouffées de concentration en particules et donc atteindre les concentrations représentées par $\overline{C_{m, \text{sans bouffées}}}$:

- Remplacer les media moyenne efficacité dont sont habituellement dotés les dépoussiéreurs par des media dont l'efficacité initiale est très supérieure (possédant par exemple un traitement de surface par laminage d'une membrane polymère telle que le PTFE). Plus efficace à l'état décolmaté et moins enclin au colmatage interne, ces media permettraient de réduire considérablement l'émission particulaire consécutive au décolmatage (Bémer et al. (2004)). Cependant leur coût élevé et la fragilité de la membrane polymère font qu'ils sont très peu employés dans le marché du dépoussiérage.
- Evacuer la bouffée de concentrations en particules vers l'extérieur, en basculant automatiquement de la position recyclage de l'air vers la position rejet extérieur au moment de chaque décolmatage (système breveté par Disa-Cattinair). Ce système de by-passe vers l'extérieur lors du décolmatage permet d'empêcher la réintroduction dans les locaux d'air fortement concentré en poussières. Il se produit alors un écrêtage des pics de concentration qui conduit à une baisse de l'émission particulaire à l'aval.
- Effectuer un by-passe systématique des bouffées de concentration en particules mais cette fois vers le conduit amont, pour que celles-ci soient de nouveau filtrées par le système au lieu de polluer l'aval.

L'état actuel des connaissances du laboratoire concernant ces possibilités (coût d'investissement et de fonctionnement, performances réelles, vieillissement dans le temps du matériel, facilité de réglage et évolution des performances) ne permet pas de pousser

plus loin la discussion et de commenter l'apport exact de ces technologies pour l'amélioration de l'efficacité de filtration des dépoussiéreurs à media filtrants. Cependant, la troisième possibilité conduit à une perspective intéressante pour la suite de cette étude. En effet, les modifications de l'installation actuelle du dépoussiéreur pilote à manches seraient mineures pour mener à bien une étude et les résultats qui pourraient en découler seraient particulièrement riches en enseignements.

Ce manque de connaissance sur ces technologies souligne d'ailleurs tout l'intérêt à rechercher des conditions optimales de fonctionnement des dépoussiéreurs tels qu'ils existent actuellement sur le marché pour limiter les rejets particulaires.

- Granulométrie des poussières dans le conduit aval.

Même si les valeurs de $\overline{C_{m,cycles}}$ mesurées pour les expériences sur le bois sont globalement satisfaisantes, le recyclage de l'air s'accompagne toutefois d'une réintroduction dans le local de travail de nombreuses particules dont la granulométrie est différente de celle de l'aérosol source à l'amont. La seule quantification de l'émission particulaire en terme de masse n'est peut être pas suffisante pour assurer une bonne hygiène dans le local de travail. Il convient également de bien caractériser le nombre et la taille de ces particules réintroduites. Un nouveau point apparaît en effet dans les discussions actuelles relatives aux particules submicroniques ; il concerne le critère d'échantillonnage lié à la santé à appliquer pour cette catégorie de particules. McCawley (1999) suggère que le critère d'échantillonnage pour les particules submicroniques soit basé sur la probabilité de dépôt dans les voies respiratoires et non plus sur la probabilité de pénétration à certains niveaux (larynx, alvéoles) comme c'est actuellement le cas avec les conventions inhalable, thoracique* et alvéolaire. Un second point de discussion émergeant concerne l'expression de la concentration en particules. Compte tenu des effets aigus à faible niveau de concentration massique qui ont pu être relevés lors de certaines études, il semblerait que le mécanisme pathogénique soit relié non plus à la masse déposée mais au nombre de particules. Cette relation n'est pas encore clairement mise en évidence (Osunsanya et al. (2001)) et il est donc nécessaire de conduire des recherches pour confirmer ou infirmer ces nouvelles hypothèses.

Une détermination de la distribution granulométrique des particules émises à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches a donc été effectuée. En cas de recyclage, il faut donc s'attendre à une réintroduction de particules beaucoup plus fines comme le montre les distributions représentées sur les figures VI.9 (alumine2) et VI.10 (bois2).

Les distributions présentées sur ces deux figures sont des distributions granulométriques en nombre. Celles fournies par le compteur de particules Coulter Multisizer possèdent l'allure classique de ce type de courbe alors que celles obtenues à partir des données du Grimm sont manifestement tronquées. Cela provient du fait que le compteur optique de particules Grimm 1.108 ne comptabilise que les particules de diamètre optique supérieur à 0,3 μm . Il s'ensuit que les diamètres médians de l'aérosol émis à l'aval, calculés à partir des distributions obtenues avec le Grimm (environ 0,4 μm pour les deux aérosols), sont surestimés. Ces diamètres médians se trouvent d'autant plus surestimés que le nombre de particules de diamètre inférieur à 0,3 μm , réellement existantes mais non détectées, est grand. La probabilité est donc importante pour que les particules émises à l'aval soient encore plus fines que ce que ces deux courbes ne laissent paraître. L'utilisation d'un appareil de mesure plus performant (ELPI*) permettra de lever ce doute.

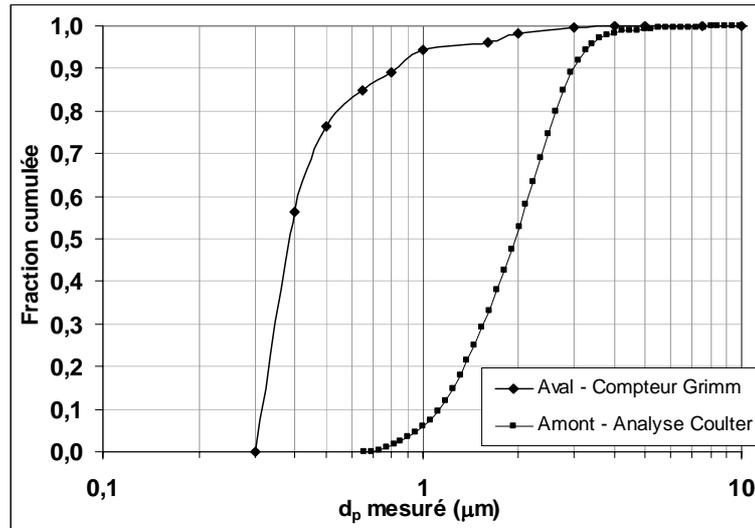


Figure VI.9 : Exemple de distributions granulométriques en nombre de l'aérosol d'alumine2 à l'amont et à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches.

Alumine2 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$

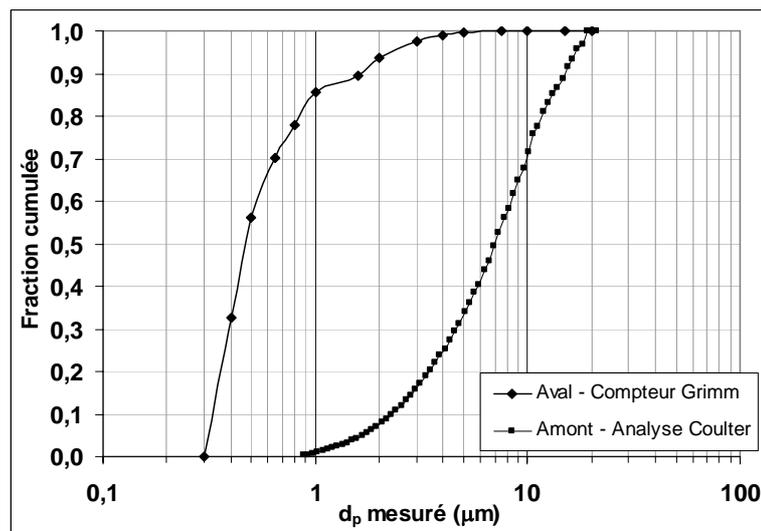


Figure VI.10 : Exemple de distributions granulométriques en nombre de l'aérosol de bois2 à l'amont et à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches.

Bois2 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$

La population en nombre des particules émises à l'aval est largement submicronique, autant pour les particules d'alumine que pour les particules de bois. Ces données sont en accord avec de précédentes observations effectuées par Leith et Allen (1986).

On constate également, sur l'exemple de la figure VI.11 pour le bois, que ces nombreuses particules submicroniques ont dans le même temps un apport négligeable d'un point de vue massique.

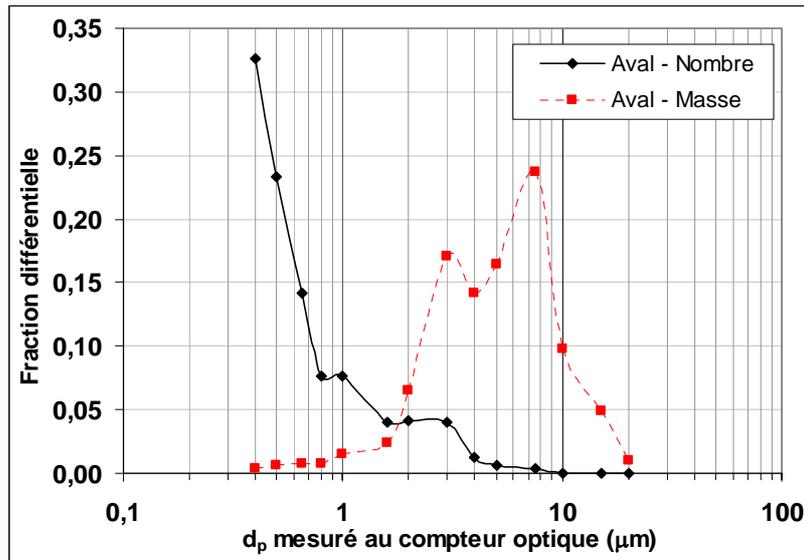


Figure VI.11 : Exemple de distributions granulométriques en nombre et en masse des particules émises à l'aval du dépoussiéreur pilote à manches.

Bois2 , $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 20.\Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$

L'utilisateur d'un système de dépoussiérage en mode recyclage peut donc se trouver dans une situation de respect de la valeur limite en conduit égale à $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$, et dans le même temps d'exposition forte à de nombreuses particules très fines. Or, les effets sur la santé, de l'inhalation de particules submicroniques ne sont encore pas bien déterminés. Le caractère nocif des poussières de bois, substance classée parmi les cancérigènes avérés pour l'homme, est réel mais il n'a par contre pas été démontré qu'il grandissait au fur et à mesure que la taille des particules diminuait. La réduction de la taille des particules émises à l'aval du dépoussiéreur pilote semble cependant constituer un élément important de notre étude. Il pourrait peut être même constituer un axe de recherche complémentaire tant qu'on ne disposera pas de résultats concrets portant sur l'exposition de ce types de particules en milieu du travail.

A noter enfin, que les distributions granulométriques effectuées à l'aval avec le compteur optique de particules Grimm ne révèlent pas de différence significative entre l'analyse de la seule bouffée de concentration en particules et l'analyse de l'ensemble des particules émises sur un cycle de filtration complet ou sur plusieurs. Cette information montre que les particules émises lors du décolmatage sont identiques, en terme de diamètres, à celles issues de la filtration. Ce constat ne milite donc pas pour une contribution forte du mécanisme de modification structurelle du medium dans la formation d'une bouffée car celui serait hypothétiquement à même de produire des particules de plus grandes tailles et donc de modifier la répartition granulométrique de la bouffée.

VI.3.1.2. Influence des conditions opératoires de décolmatage sur la concentration en particules à l'aval

Les résultats du tableau VI.7 permettent également d'émettre des remarques concernant l'influence des conditions opératoires de décolmatage sur la concentration massique en particules relevée dans le conduit aval.

- **Influence de la perte de charge maximale avant décolmatage, ΔP_{\max}**

Il apparaît que lorsque la perte de charge maximale avant décolmatage (ΔP_{\max}) augmente (tous les autres paramètres étant maintenus égaux par ailleurs), $\overline{C}_{m, \text{bouffées}}$ augmente également et ce, quels que soient la pression du réservoir ou le type d'aérosol étudié.

Ce résultat vient compléter les données établies au paragraphe VI.2.3.2. Il avait alors été montré que lors d'une augmentation de la perte de charge maximale, il se produisait une diminution de la contribution des sources associées à la bouffée P. Aucune explication quant à ce constat n'avait été validée du fait de la complexité des phénomènes impliqués. Ici, il semble que chacun des deux groupes (P et 'G - P') libèrent des quantités de particules d'autant plus importantes que la perte de charge maximale est élevée. Tout au plus pouvons nous supposer que cette augmentation d'émission particulaire s'explique par un apport plus conséquent par les phénomènes de remise en suspension des particules du gâteau à l'amont (quantité de particules présente dans le gâteau plus importante lorsque la perte de charge maximale est grande), de migration directe et de baisse d'efficacité du système (meilleur détachement du gâteau lorsque la perte de charge maximale est grande).

Il semble que la concentration moyenne en particules, $\overline{C}_{m, \text{cycles}}$, diminue lorsque la perte de charge maximale (ΔP_{\max}) augmente. Cette évolution signifie que la réduction de la fréquence de décolmatage, lorsque les valeurs de perte de charge maximale augmentent, prend le pas sur l'augmentation de la concentration moyenne massique des bouffées. Des bouffées plus riches en particules et en apport massique mais moins fréquentes semblent donc préférables du point de vue de la qualité de l'air à l'aval.

Ce constat est toutefois nuancé par les résultats obtenus sur le Bois2 et pour $P_r = 3$ bar, qui font état d'une augmentation de $\overline{C}_{m, \text{cycles}}$ de 0,15 à 0,25 mg.m⁻³ lors du passage de ΔP_{\max} entre $10.\Delta P_0$ et $20.\Delta P_0$.

- **Influence de la pression du réservoir d'air comprimé de décolmatage, P_r**

Il apparaît que lorsque la pression du réservoir augmente (tous les autres paramètres étant maintenus égaux par ailleurs), $\overline{C}_{m, \text{bouffées}}$ augmente également et ce, quels que soient les valeurs de perte de charge maximale (ΔP_{\max}) ou le type d'aérosol.

Ces résultats viennent compléter certaines données établies au paragraphe VI.2.3.3. Il avait alors été montré que lors d'une augmentation de la pression initiale du réservoir, il se produisait majoritairement une augmentation de la contribution des sources associées à la bouffée partielle en air propre. Il avait également été évoqué le fait qu'une augmentation de la pression du réservoir d'air comprimé (P_r) favorisait l'ensemble des sources de formation d'une bouffée de particules et devait donc conduire à une augmentation de la masse émise à l'aval, lors des décolmatages pneumatiques. Les résultats qui viennent d'être présentés illustrent bien ce phénomène. Ils confirment que les brutales sollicitations mécaniques imposées au médium pendant le décolmatage grandissent avec les valeurs de la pression du réservoir d'air comprimé de décolmatage (P_r) et conditionnent largement l'émission particulaire à l'aval.

Ce constat permet de faire une liaison avec les résultats établis au chapitre IV. Il avait alors été montré que la partie haute d'une manche filtrante subissait lors du décolmatage les sollicitations mécaniques les plus brutales et qu'il se produisait dans le même temps une forte augmentation de la vitesse de perméation de l'air vers l'intérieur dans cette zone (cf. figure IV.21). Ces deux conditions réunies sont en effet susceptibles de permettre un passage de particules vers l'aval qui se ferait de manière privilégiée dans cette zone haute de la manche par rapport aux trois autres zones. Toutes les sources de formation d'une

bouffée de particules sont avantagées par ces conditions défavorables. De part les déformations du medium qu'il entraîne et de part le bon nettoyage de la zone qu'il procure (cf. figure IV.19), ce décolmatage agressif facilite l'émission particulaire. Les travaux de Dennis et Wilder (1975 – cf. figure I.8) confirment d'ailleurs cette hypothèse.

Par contre, aucune corrélation entre P_r et $\overline{C_{m,cycles}}$, n'a pu être relevée. Baisser la pression du réservoir (P_r) ne signifie pas forcément réduire la concentration massique moyenne sur plusieurs cycles ($\overline{C_{m,cycles}}$). D'autres facteurs tels que la fréquence de décolmatage (conditionnée notamment par la perte de charge résiduelle à laquelle retombe le système), la nature des particules et/ou la perte de charge maximale atteinte avant décolmatage rentrent en ligne de compte. La complexité et l'interdépendance des influences de chaque facteur empêchent une analyse plus poussée.

- **Influence du temps de décolmatage, t_d**

Une expérience a également été menée pour déterminer l'influence de t_d sur la concentration en particules à l'aval. Pour ce faire, une comparaison des valeurs de $\overline{C_{m,cycles}}$ et de $\overline{C_{m,bouffées}}$ pour $t_d = 100$ ms et pour $t_d = 500$ ms a été effectuée (Alumine2, $\Delta P_{max} = 19 \cdot \Delta P_0$, $P_r = 3$ bar - cf. figure AVIII.5 de l'annexe VIII). Les résultats obtenus pour $t_d = 500$ ms sont les suivants : $\overline{C_{m,cycles}} = 1,8 \text{ mg.m}^{-3}$ et $\overline{C_{m,bouffées}} = 9,9 \text{ mg.m}^{-3}$. Ces valeurs sont très proches de celles qui avaient été obtenues pour $t_d = 100$ ms dans les mêmes conditions (respectivement 1,65 et 9,4 mg.m^{-3} - tableau VI.7). La campagne d'essais effectuée ne permet pas de juger de l'influence réelle de ce paramètre.

- **Influence des vitesses de filtration transitoires enregistrées pendant les séquences de décolmatage pneumatique**

Certains résultats du chapitre V, qui concernent la répartition du débit total dans les 24 manches du dépoussiéreur, sont à rapprocher des considérations traitant de l'émission particulaire à l'aval des éléments filtrants. En effet, il a été montré au paragraphe V.4.2.1 que les premières manches à être décolmatées sont le siège de débits transitoires fortement élevés avant que les autres manches ne soient décolmatées à leur tour. La vitesse de filtration imposée sur ces manches lors du colmatage se transforme alors en une vitesse transitoire qui atteint des valeurs élevées, parfois égales à deux fois U_f . Le problème réside dans le fait qu'une vitesse de perméation grande pendant le décolmatage est un facteur aggravant pour l'émission de particules vers l'aval. Elle accentuera la baisse d'efficacité du medium.

Cette remarque pourrait en partie expliquer l'augmentation de la concentration en particules $\overline{C_{m,bouffées}}$ lors de l'augmentation du paramètre P_r ou du paramètre ΔP_{max} . En effet, une valeur plus élevée pour la pression initiale du réservoir conduit à un meilleur décolmatage des manches et donc à une différence de résistance aéraulique plus grande entre les manches décolmatées et les autres qui ne le sont pas encore (cf. tableau V.6). De même, plus ΔP_{max} sera élevée au moment du décolmatage, plus la différence de résistance à l'écoulement entre les manches décolmatées et celles non décolmatées sera grande pendant la séquence de régénération (cf. tableau V.9). Dans les deux cas les vitesses transitoires imposées aux manches des rails décolmatés en premier seront plus grandes et pourront participer d'autant plus activement à l'enrichissement du compartiment aval.

Une expérience a été menée sur le dépoussiéreur à manches pour tenter de mettre en évidence l'influence des vitesses transitoires sur l'augmentation de la concentration en particules à l'aval.

Le protocole était le suivant :

- Décolmatage intensif des manches pendant plusieurs heures pour ramener la résistance à l'écoulement de celles-ci à une valeur la plus homogène possible.
- Colmatage des manches par l'aérosol d'Alumine2 à $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$ et $C_p = 500 \text{ mg.m}^{-3}$ et décolmatage spécifique à $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$ et $P_r = 3 \text{ bar}$ pendant 20 cycles. Le décolmatage spécifique ne diffère en rien du décolmatage séquentiel habituellement employé (Configuration 1 – figure V.3) sauf qu'il est effectué avec arrêt du débit d'air traité. Ainsi, les manches décolmatées en premier ne sont pas, pendant les décolmatages de ces 20 cycles, traversées par des débits transitoires.
- Après ce traitement particulier des manches et le décolmatage du 20^{ème} cycle, les 24 manches se retrouvent à l'état décolmaté et les résistances à l'écoulement sont homogènes ($\overline{Qv_m} = 104 \pm 2,1 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$). On procède alors à une perméation aéraulique en air propre des manches entre 45 et 160 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ (débit par manche). Celle-ci permet de simuler la variation de débit transitoire que subissent les premières manches à être régénérées pendant un décolmatage et la forte augmentation de vitesse qui lui est liée. A noter que le balayage des vitesses de perméation s'est cependant déroulé sur environ 500 s et non pas sur seulement 10 s, comme l'intervalle de temps entre les décolmatages de deux rails successifs le permet dans la réalité. Cette expérience est à rapprocher de celle qui avait été menée au paragraphe V.4.2.2 pour déterminer l'influence des fortes vitesses transitoires sur l'état décolmaté des manches.
- Le suivi de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval est effectué pendant la perméation aéraulique.

Les résultats de cette expérience sont fournis sur la figure VI.12.

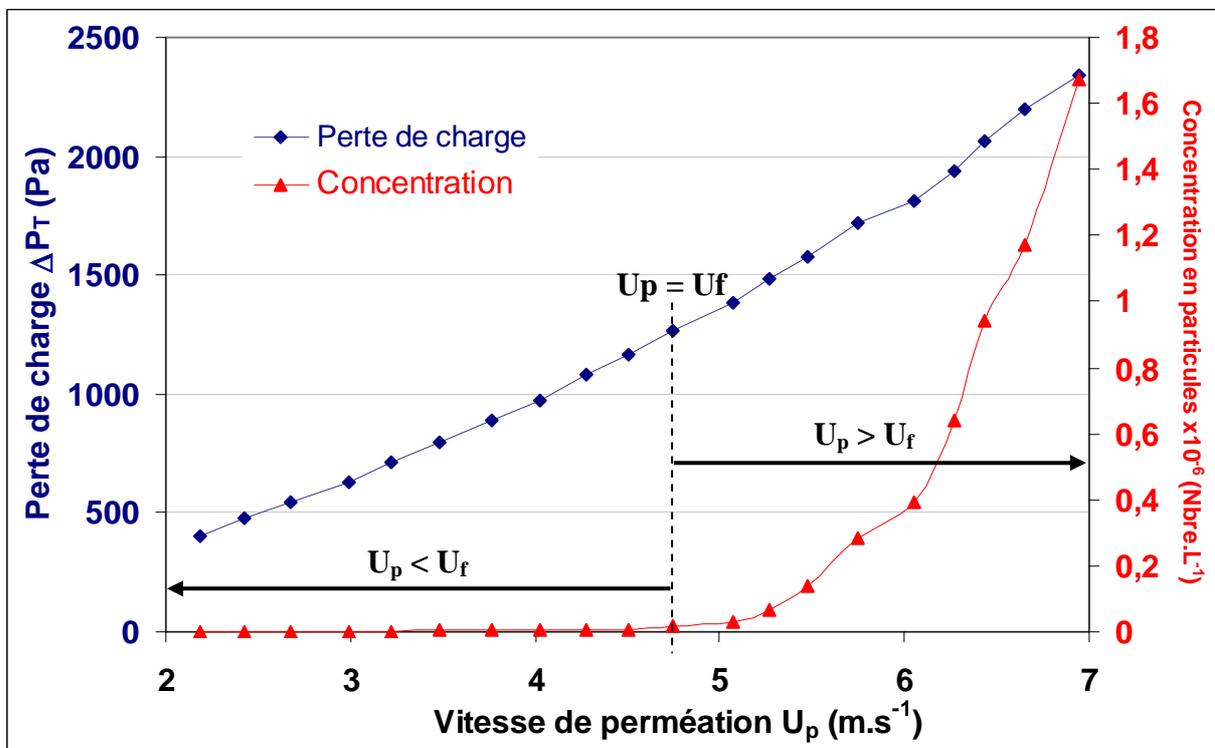


Figure VI.12 : Evolutions de la perte de charge totale et de la concentration en particules à l'aval des 24 manches pendant une perméation aéraulique entre $U_p = 2 \text{ cm.s}^{-1}$ et 7 cm.s^{-1} à l'état décolmaté. Alumine2, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $C_p = 500 \text{ mg.m}^{-3}$

Lorsque la vitesse de perméation de l'air, U_p , est inférieure à la vitesse de filtration pendant le colmatage, U_f , la concentration en particules à l'aval reste faible. Par contre, dès lors que la vitesse de perméation devient supérieure à la vitesse de filtration, on observe une augmentation brutale de la concentration en particules, qui va croissante au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse de perméation de l'air, U_p . Les valeurs atteintes par la concentration ne sont pas représentatives de ce qui serait émis pendant un décolmatage par les premières manches à être décolmatées et ce, pour deux raisons : d'une part, le travail s'effectue sur 24 manches et non pas seulement sur un petit nombre de manches et d'autre part, le temps de montée à $U_p = 7 \text{ cm.s}^{-1}$ est bien plus long ($\approx 500 \text{ s}$) que le temps réel alloué à l'existence de cette vitesse entre les décolmatages de deux rails consécutifs (10 s).

Malgré des divergences par rapport au phénomène réel, l'expérience montre néanmoins l'effet préjudiciable que possèdent les débits transitoires sur l'augmentation de l'émission particulaire à l'aval. Le dépassement de U_f , vitesse de filtration à laquelle s'est construit le gâteau, facilite manifestement le passage de particules vers l'aval par un ou plusieurs des mécanismes de formations des bouffées. Pour l'expérience de la figure VI.12, seul le mécanisme de migration indirecte des particules dans le medium peut être incriminé au vu des conditions opératoires utilisées. Il provient du réentraînement des particules de plus faibles forces d'adhésion sous l'effet des grandes vitesses de passage de l'air au sein du medium. Cependant, lors d'un décolmatage « on-line » réel, on peut craindre que d'autres sources soient également accentuées par l'augmentation de la vitesse de filtration.

Ces considérations sur les débits transitoires dont sont le siège les premières manches décolmatées laissent penser que les 9 éléments filtrants des deux premiers rails à être décolmatés sont des sources d'émission particulaire particulièrement importantes dans le dépoussiéreur pilote étudié. Ce sont en effet eux qui subissent les plus importantes valeurs de vitesses transitoires lors du décolmatage. Pour tenter de vérifier cette hypothèse, un décolmatage en air propre découpé en 5 phases a été effectué. L'expérience consistait à fortement colmater les 24 manches ($\Delta P_{\max} \approx 30.\Delta P_0$) avec un aérosol d'Alumine1 à $C_p = 0,72 \text{ g.m}^{-3}$ et à décolmater les rails un par un, en prenant soin de détacher et d'enregistrer individuellement, à l'aide du compteur optique de particules, chacun des cinq pics de concentration résultants. Trois essais comparables ont permis de s'assurer de la reproductibilité de l'expérience. Les résultats d'un de ces trois essais sont présentés sur la figure VI.13.

Sur cette figure, $\%_{Br}$ représente le pourcentage d'importance de la bouffée de particules émise lors du décolmatage des manches du rail r par rapport à la somme des bouffées émises par les cinq rails.

Ce paramètre est calculé de la manière suivante :

$$\%_{Br} = \frac{\overline{C}_{n,r}}{\sum_{r=1}^5 \overline{C}_{n,r}} \quad (\text{VI.4})$$

avec $\overline{C}_{n,r}$ la concentration moyenne en nombre émise lors du décolmatage des manches du rail r , mesurée au compteur optique de particules.

U_{dr} représente la valeur moyenne de la vitesse transitoire mesurée sur les manches du rail r juste après leur décolmatage. La valeur de U_{dI} est la plus élevée car la différence de résistance à l'écoulement entre les manches du rail I et les autres non décolmatées est la plus grande. La valeur de U_{dr} décroît ensuite progressivement pour les autres rails car les différences entre manches décolmatées et manches colmatées diminuent.

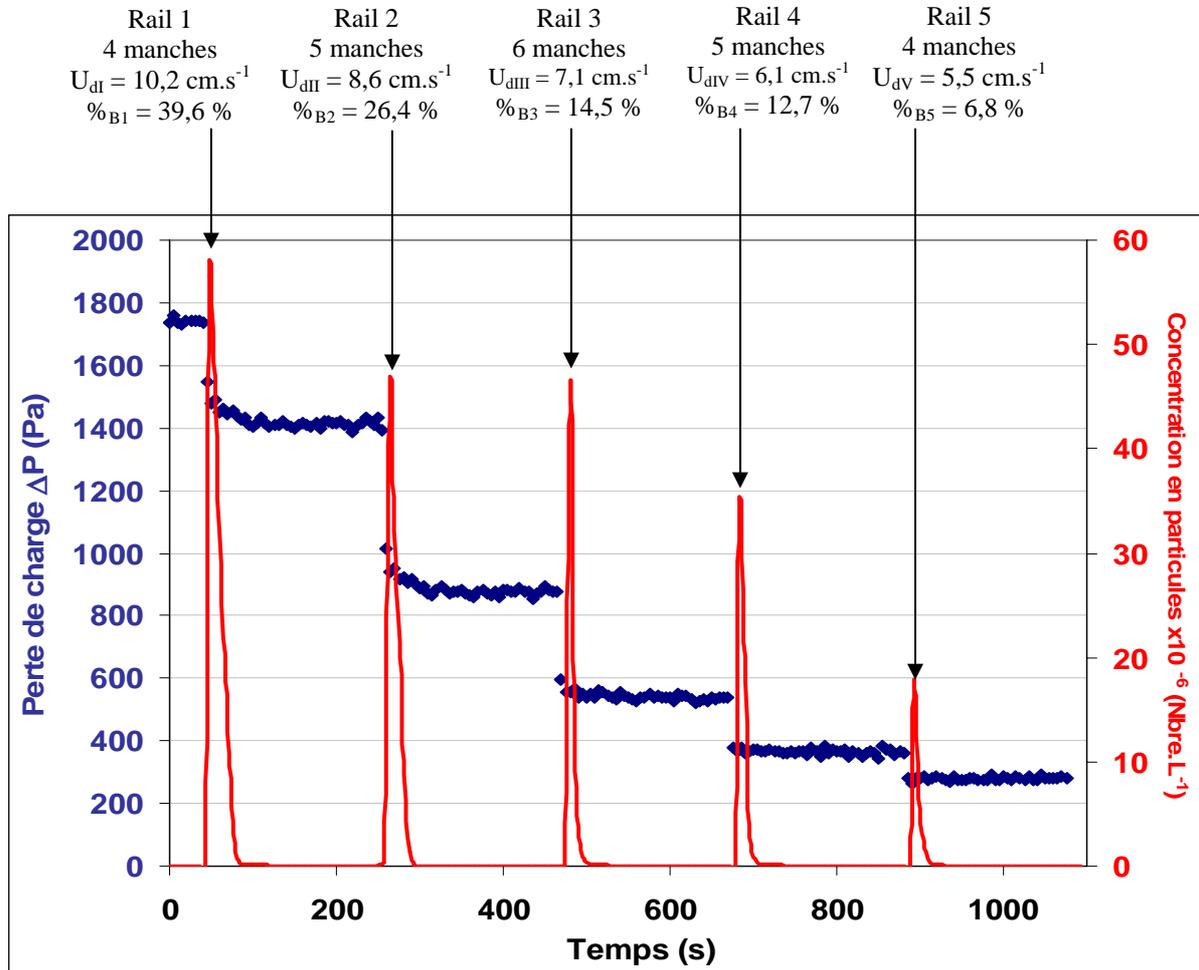


Figure VI.13 : Suivi de la concentration en particules à l'aval en fonction du rail de manches décolmaté. Alumine1 , $P_f = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $d_b = 10 \text{ mm}$, $\Delta P_{\max} \approx 30.\Delta P_0$, $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, décolmatage en air propre

On observe sur la figure VI.13 que $\%_{Br}$ diffère en fonction du rail de manches qui est décolmaté. Celui-ci ne varie pas en fonction du nombre de manches présentes sur le rail mais en fonction de l'ordre de décolmatage des rails. Ainsi, la contribution des pics de concentration en particules diminue en suivant l'ordre de décolmatage des rails. Les deux premières bouffées, correspondant au décolmatage de seulement 9 manches sur les 24, apportent 66 % de l'émission particulaire totale à l'aval. Les 4 manches du rail 1, premier rail à être décolmaté, entraînent à elles seules plus de 39 % de l'émission particulaire totale à l'aval. Les contributions des rails 3, 4 et 5 diminuent ensuite logiquement puisque de moins en moins de manches sont décolmatées, à des vitesses transitoires qui sont de plus en plus faibles.

Les manches des deux premiers rails à être décolmatés semblent contrôler majoritairement l'émission de particules vers l'aval. Le fait qu'elles soient traversées par les plus importantes vitesses transitoires ($U_{dI} = 10,2 \text{ cm.s}^{-1}$ et $U_{dII} = 8,6 \text{ cm.s}^{-1}$) n'est certainement pas étranger à ce résultat. Une expérience ponctuelle du même type a

d'ailleurs confirmé qu'un décolmatage des rails en sens inverse (Configuration 2 – figure V.3) renversait la situation et permettait aux nouveaux rails décolmatés en premiers de présenter les contributions les plus grandes à l'émission particulaire totale.

Ces expériences conduisent à deux conclusions :

- Le décolmatage séquentiel, rail par rail, conduit à l'établissement de vitesses transitoires de fortes valeurs pendant le décolmatage. Ces dernières participent activement au passage de particules vers l'aval et provoquent une augmentation de la concentration en particules pendant le temps d'existence des bouffées.
- Les vitesses transitoires n'ont pas été considérées comme une source de formation des bouffées de concentration en particules en soi, mais seulement comme un facteur aggravant. Le fait que chaque rail (voire même chaque manche) possède sa propre vitesse transitoire maximale sous entend que la répartition des contributions des sources liées aux bouffées est propre à chaque élément filtrant. Les considérations établies et commentées tout au long du paragraphe VI.2.3 sont donc des résultats globaux, découlant d'une moyenne des multiples contributions individuelles des 24 manches. La contribution individuelle d'une manche en particulier est quant à elle influencée par un certain nombre de facteurs aux premiers rangs desquels figurent l'efficacité de décolmatage de la couche de particules et la vitesse transitoire maximale atteinte sur cette manche.

VI.3.2. Résultats obtenus sur d'autres dépoussiéreurs

Afin de confirmer et de compléter les données obtenues sur le dépoussiéreur pilote, d'autres résultats vont désormais être présentés. Ils proviennent des travaux suivants :

- Une campagne de mesures effectuée en 2002 et 2003 par des agents de l'INRS. Elle portait sur le suivi de la concentration à l'aval par comptage optique (Grimm 1.108) de quatre dépoussiéreurs installés dans des industries de la deuxième transformation du bois (dépoussiéreurs 1 à 4 – cf. tableau VI.8). Des essais de suivi de la concentration en particules à l'aval ont également été effectués sur le dépoussiéreur 4 à l'aide d'un détecteur à « effet triboélectrique* ».
- Une campagne de mesures effectuée de 1995 à 2000 par le LICE (Laboratoire Interrégional de Chimie de l'Est). Elle consistait à déterminer la concentration en poussières de bois dans les conduits de recyclage de l'air à l'aval de onze installations de dépoussiérage (dépoussiéreurs 5 à 15 – cf. tableau VI.8). La méthode consiste à prélever de manière isocinétique l'aérosol (pendant environ 3 heures) et à mesurer par pesée la masse de particules déposées sur un filtre en fibres de quartz de 90 mm de diamètre (spécifications de la norme NFX44-052 (2002)).

Tous les dépoussiéreurs étudiés sont équipés de manches en fibres de polyester non tissées incorporant parfois des fibres en carbone ou métalliques pour l'écoulement des charges électriques et bénéficiant généralement d'un traitement de surface par calandrage thermique. Tous ces dépoussiéreurs disposent d'un décolmatage pneumatique qui est parfois réglé sur une perte de charge maximum et parfois sur une minuterie.

Les résultats concernant les valeurs moyennes de concentration en particules, relevées dans les conduits de recyclage des dépoussiéreurs ayant fait l'objet des deux campagnes de mesure évoquées précédemment, sont récapitulées dans le tableau suivant :

Dépoussiéreur	débit (m ³ .h ⁻¹)	Nature du décolmatage	$\overline{C}_{m, \text{bouffées}}$ (mg.m ⁻³)	$\overline{C}_{m, \text{cycles}}$ (mg.m ⁻³)	$\overline{C}_{m, \text{sans décolmatages}}$ (mg.m ⁻³)
1	8000	$\Delta P_{\text{max}} = ?$	0,11	0,065	-
2	23500	minuterie 30 s	0,05	0,035	-
3	2400	$\Delta P_{\text{max}} = ?$	0,07	< 0,01	-
4	31400	$\Delta P_{\text{max}} = ?$	0,23	0,14	-
5	94000	$\Delta P_{\text{max}} = 800$ Pa forcé 3 h	-	0,43	0,24
6	29000	$\Delta P_{\text{max}} = ?$ forcé 2 h	-	0,01	-
7	22200	?	-	0,035	-
8	32000	$\Delta P_{\text{max}} = 500$ Pa forcé 2 h	-	-	0,04
9	39000	?	-	-	0,08
10	10000	$\Delta P_{\text{max}} = 200$ Pa	-	0,33	0,04
11	46000	$\Delta P_{\text{max}} = 800$ Pa	-	-	0,04
12	50000	$\Delta P_{\text{max}} = 600$ Pa forcé 1 h	-	0,11	0,04
13	80000	$\Delta P_{\text{max}} = 800$ Pa	-	0,03	-
14	36000	$\Delta P_{\text{max}} = 800$ Pa forcé 2 h	-	< 0,02	-
15	32000	$\Delta P_{\text{max}} = 500$ Pa forcé 2 h	-	< 0,02	-

Tableau VI.8 : Synthèse des concentrations massiques moyennes en particules à l'aval de quinze dépoussiéreurs à manches, mesurées par comptage optique ou par prélèvement et pesée (selon norme NFX44-052).

- forcé X h = décolmatage forcé au bout de X heures si la ΔP_{max} n'a pas encore été atteinte -

Malgré le caractère très incomplet des données relatives au fonctionnement de ces dépoussiéreurs, notamment pour les conditions opératoires de filtration et de décolmatage, l'analyse de ces résultats est très enrichissante car elle porte sur des installations en activité dans des entreprises. Elle va permettre d'apporter un complément d'information par rapport aux tendances qui se sont dégagées lors de l'étude en laboratoire.

Les concentrations massiques moyennes à l'aval, $\overline{C}_{m, \text{cycles}}$, intégrant plusieurs cycles de colmatage et de décolmatage, restent faibles. Seules deux installations dépassent la concentration limite de 0,2 mg.m⁻³ recommandée dans les conduits de recyclage (installations 5 et 10 du tableau VI.8). Aucune des installations étudiées ne présente de dysfonctionnement important. Les mesures effectuées à l'aval des installations montrent des concentrations en poussières de bois faibles, généralement inférieures à la limite fixée ($\leq 0,2$ mg.m⁻³) même lors des phases de décolmatage (< 1 mg.m⁻³).

Ces considérations rejoignent les observations qui ont été faites sur le dépoussiéreur pilote à manches étudié lors des essais avec des poussières de bois (cf. tableau VI.7).

Néanmoins, des restrictions identiques à celles proposées lors de l'étude du dépoussiéreur pilote doivent être apportées à ces constats plutôt encourageants.

Tout d'abord, les décolmatages entraînent une dégradation certaine de la qualité de l'air à l'aval. Les pics de concentration qui sont émis par les éléments filtrants peuvent dépasser la valeur recommandée de 0,2 mg.m⁻³.

D'autre part, les résultats des études menées par l'INRS et le LICE montrent également que le recyclage de l'air se traduit par la réintroduction dans le local de travail de poussières bien plus fines que les poussières sources et dont les effets sur la santé sont encore indéterminés.

Aucune courbe n'a été présentée pour illustrer ce fait car elles sont en tout point comparables à ce qui avait été présenté sur les figures VI.9 et VI.10.

Les enregistrements de la figure VI.14 montrent des dégradations temporaires de la qualité de l'air recyclé au cours d'une journée, pour le dépoussiéreur 4, installé dans une ébénisterie.

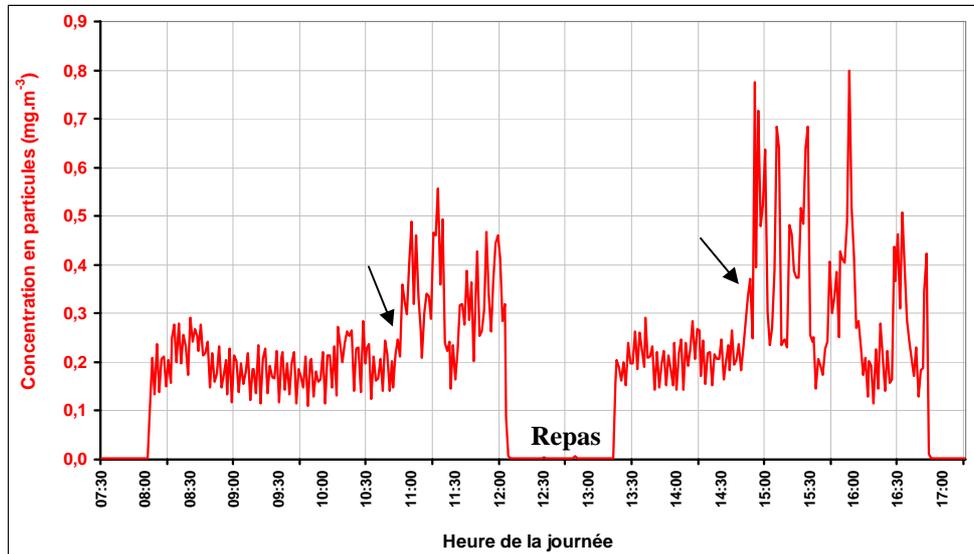


Figure VI.14 : Variations de la concentration mesurée par un détecteur à « effet triboélectrique* » au cours d'une journée de travail dans le conduit aval du dépoussiéreur 4.

- les flèches indiquent le moment de la mise en route de machines à forte production de poussières -

Si la valeur limite de $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$ est dépassée plusieurs fois au cours d'une période de travail et parfois sur des durées assez longues, les variations de concentration observées ne permettent pas de mettre en évidence de véritables dysfonctionnements de l'installation de filtration du type décrochage ou déchirure de manche.

Ces variations de la concentration de poussières dépendent manifestement de la charge en particules imposée à l'amont de l'installation mais pourraient également traduire l'état de vieillissement du dépoussiéreur et des manches filtrantes. Les manches, fortement colmatées en profondeur et proches de la saturation (le décolmatage s'effectue toutes les 40 secondes sur ce dépoussiéreur), laissent certainement migrer une quantité non négligeable de poussière vers le conduit de recyclage. Ce phénomène est accentué avec l'augmentation de la concentration en amont et pendant les phases de décolmatage, notamment lorsque leur fréquence est élevée. Ceci montre qu'il faut rester vigilant quant à l'activité de l'entreprise pendant les périodes de mesures de la concentration à l'aval du dépoussiéreur sans quoi les performances de l'installation peuvent être surestimées.

Si aucun dysfonctionnement type n'a pu être observé au cours de ces campagnes d'essais, l'ensemble des paramètres enregistrés met en évidence la nécessité, d'un contrôle régulier d'une part de la qualité et de l'état des manches filtrantes, et d'autre part de l'optimisation des cycles de décolmatage pour limiter l'enrichissement de l'air recyclé en fines particules.

Enfin, un point qui soulève beaucoup d'interrogations reste malheureusement en suspend après ces essais : aucun élément ne permet de déterminer s'il est préférable d'utiliser un système de décolmatage dont le fonctionnement dépend d'une perte de charge maximale prédéfinie ou plutôt d'adopter un décolmatage réglé sur une minuterie. Comme on peut le voir sur le tableau VI.8, certains dépoussiéreurs combinent de plus un décolmatage pneumatique suivant une perte de charge maximale prédéfinie (ΔP_{max}) et un décolmatage sur minuterie qui ne se déclenche que si la ΔP_{max} n'est pas atteint au bout d'un temps donné.

VI.4. CONCLUSIONS

Une brutale augmentation de concentration à l'aval est enregistrée consécutivement à chaque décolmatage pneumatique des manches du dépoussiéreur pilote étudié. Ce pic est caractérisé par une première phase où la concentration est particulièrement élevée et qui correspond au passage d'une bouffée de particules. La seconde phase d'un pic de concentration en particules est caractérisée par une décroissance de la concentration liée à la reconstruction du gâteau de filtration.

La bouffée de particules résulte de plusieurs sources de formation qui ont fait l'objet d'une description détaillée dans ce chapitre :

- Particules provenant de l'amont
 - Particules collectées dans le gâteau et remises en suspension à l'amont
 - Particules déposées sur les parois de l'installation et remises en suspension
 - Particules collectées en profondeur dans le medium
- } Groupe 'G – P'
} Groupe P

Chacune de ces sources évolue en fonction des conditions opératoires de filtration et surtout de décolmatage.

Une description de l'évolution de chacun d'eux n'a pas pu être fournie. Cependant, deux groupes de sources ont pu être isolés : le groupe P mis en évidence par un décolmatage en air propre et le groupe 'G – P'. Les contributions respectives de chacun de ces deux groupes à la bouffée de particules globale ont été calculées et les influences de certains paramètres ont été étudiées.

Ces différentes contributions dépendent principalement des propriétés de l'aérosol filtré. La nature et la taille des particules sont des facteurs importants et l'efficacité du medium reste décisive au début du fonctionnement de l'installation comme après plusieurs cycles. Les media moyenne efficacité, classiquement utilisés en dépoussiérage dans le secteur du bois par exemple, ont une trop faible efficacité de filtration propre pour pouvoir être performants en présence exclusive de fines particules ($d_p < 10 \mu\text{m}$ environ). Par conséquent, les sources du groupe 'G – P' dominent, dans ce cas, la production de particules vers l'aval pendant les bouffées. Pour les particules de plus gros diamètres, les sources du groupe P deviennent majoritaires. L'émission particulaire vers l'aval est dès lors contrôlée par les propriétés du medium et non plus par la taille des particules. Le principal facteur régulateur devient le colmatage interne, duquel vont découler à la fois l'efficacité propre du medium à l'état décolmaté et l'émission de particules vers l'aval par la migration.

L'utilisateur s'assurera une bonne efficacité de filtration s'il choisit un medium suffisamment performant. Il faut cependant rester vigilant et veiller aux effets néfastes de l'utilisation de certaines machines dans l'entreprise (opération de ponçage et autres) qui, si elles sont de grosses productrices de fines particules et de fortes concentrations, pourraient périodiquement faire chuter l'efficacité de filtration en modifiant les sources majoritaires à l'origine des bouffées de concentration.

Les contributions des groupes de sources dépendent également des conditions opératoires de filtration et de décolmatage ainsi que de l'état de vieillissement du medium, mais dans une moindre proportion que les propriétés des particules filtrées.

Les influences de certains paramètres étudiés sont synthétisées dans le tableau VI.9.

Paramètre	Evolution du paramètre	Contribution du groupe P	Evolution de $\overline{C}_{m, \text{bouffées}}^*$
ΔP_{\max}	↗	↘	↗
P_f	↗	↗	↗
U_f	↗	↘	↗
Amélioration de l'efficacité de filtration du medium par le traitement de surface	↗	↗	↘
Nombre de cycles effectués	↗	↗ puis →	↘ puis →

Tableau VI.9 : Influence de paramètres de filtration et de décolmatage sur les bouffées de concentration.
* résultats valables uniquement pour les installations de filtration étudiées au laboratoire

Les résultats montrent qu'une augmentation de ΔP_{\max} ou de U_f favorisent une contribution plus importante de particules vers l'aval par la baisse de l'efficacité du fait de la disparition du gâteau et/ou par migration directe du fait de la modification structurelle momentanée du medium. Par contre, une augmentation de P_f ou une amélioration de l'efficacité de filtration propre au medium engendre une augmentation de la contribution d'une ou plusieurs des sources de particules suivantes : migration progressive des particules dans le medium, remise en suspension des particules du gâteau et des particules déposées sur les parois de l'installation.

Cette étude a permis de décrire avec précision les origines de la formation d'une bouffée de particules et de mieux comprendre le comportement des diverses sources de particules contribuant à l'émission particulaire à l'aval, en fonction des conditions opératoires imposées. Il semble que le colmatage interne joue un rôle particulièrement important dans l'émission de particules vers l'aval. C'est en effet lui qui conditionne en grande partie l'efficacité de collecte du medium à l'état décolmaté et la migration des particules au sein des fibres.

Cependant la difficulté principale de ces travaux réside dans l'incapacité d'évaluer la contribution individuelle de chacune des sources responsables de la bouffée de particules sur une installation de grandes dimensions. La difficulté s'accroît encore si l'on considère que les phénomènes responsables de la bouffée n'additionnent pas simplement leurs contributions propres mais interfèrent entre eux d'une manière qui pourrait de plus ne pas être constante dans le temps. Enfin, les travaux concernant la répartition du débit total sur les manches (chapitre V) montrent que les contributions respectives de ces différentes sources pourraient se faire différemment suivant la manche considérée dans le dépoussiéreur, en fonction des vitesses de perméation par lesquelles elles sont traversées.

Les essais effectués sur le dépoussiéreur pilote à manches confirment que les media de moyenne efficacité utilisés en dépoussiérage ne sont pas assez performants pour traiter un air chargé en particules de tailles exclusivement inférieures à 10 μm . Les résultats font état de concentrations moyennes à l'aval élevées, surtout pendant le décolmatage car les mécanismes de passage vers l'aval de particules atteignent alors leur maximum.

Les mesures de concentration en particules à l'aval des dépoussiéreurs étudiés montrent des valeurs faibles pour les poussières de bois, en grande majorité inférieures à la limite recommandée ($< 0,2 \text{ mg.m}^{-3}$). Aucune des installations étudiées ne présente de dysfonctionnement significatif. Cependant, les valeurs se trouvent très souvent à la limite de la valeur recommandée de $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$; cette situation ne tolère alors aucune dérive telle qu'une augmentation de la production de poussières dans l'usine ou que le vieillissement des éléments filtrants.

Néanmoins, sur certaines installations et lors du décolmatage, des pics de concentration dépassent systématiquement la valeur recommandée. De plus, des dégradations de la qualité de l'air recyclé au cours d'une journée de travail peuvent apparaître. Elles proviennent d'une augmentation temporaire de l'activité de l'entreprise et sont généralement associées au démarrage de machines qui génèrent de grosses quantités de poussières et qui viennent considérablement enrichir la concentration en particules à l'amont.

Le recyclage de l'air s'accompagne également d'une réintroduction dans le local de travail de particules bien plus fines que les poussières sources à l'amont. Ce constat soulève donc une interrogation quant aux effets de ce type de particules sur la santé humaine et sur leur prise en considération dans le domaine de l'hygiène et de sécurité. Seul la continuité et le développement des études épidémiologiques permettront de répondre à ce manque de connaissance et de résultats portant sur l'exposition à des particules submicroniques de bois en milieu du travail.

La diversité des conditions opératoires dans lesquelles le fonctionnement d'un dépoussiéreur semble conduire à des valeurs de concentrations satisfaisantes est grande. Dans ces conditions, il paraît délicat d'établir des recommandations sur les paramètres d'utilisation visant à optimiser le fonctionnement des dépoussiéreurs.

Toutefois, les essais de laboratoire issus du dépoussiéreur pilote à manches semblent indiquer qu'il est préférable de travailler à des pertes de charge maximales élevées et à des pressions de décolmatage faibles. Cette configuration se justifie d'ailleurs car elle est susceptible d'apporter un bon compromis entre une fréquence de décolmatage des manches relativement faible et un bon maintien d'une filtration par le gâteau de particules. La vitesse de filtration doit toujours être la plus faible possible, en tenant bien sûr compte d'autres impératifs tels que les coûts financiers liés à la taille du dépoussiéreur et la vitesse d'entraînement des poussières en conduit. Le temps de décolmatage ne semble pas avoir une influence déterminante lorsqu'il reste dans l'ordre de grandeur de la centaine de milliseconde ; il est néanmoins préférable de le fixer le plus court possible pour des raisons de consommation d'air comprimé. Mais ces recommandations, à compter même qu'elles puissent être considérées comme telles, ne sont valables que pour le dépoussiéreur pilote et pour les conditions dans lesquelles il a été testé. Elles sont le reflet d'un fonctionnement d'une installation particulière dans une situation particulière et les conclusions apportées ne peuvent pas être transposées à d'autres dépoussiéreurs, tout du moins pas en l'état actuel des connaissances. L'expérience, sur laquelle peuvent se reposer les fournisseurs de dépoussiéreur, nous fait ici défaut car malheureusement, le marché du dépoussiérage étant fortement concurrentiel, les informations découlant de cette expérience sont difficiles à glaner.

Les essais qui ont été réalisés ne permettent pas non plus d'apporter une réponse à la question de choisir entre un système de décolmatage reposant sur une perte de charge maximale prédéfinie et un système réglé sur une minuterie. La grande diversité des systèmes rencontrés sur le terrain, qui semblent tous fonctionner d'une manière comparable en terme de rejets, ne permet pas de se prononcer.

Enfin, ce travail a permis de pointer deux facteurs aggravants potentiels pour l'émission particulaire : les vitesses transitoires qui traversent les premières manches à être décolmatées lors d'un décolmatage séquentiel rail par rail et l'effet d'induction d'air qui se produit en haut de manche lors du décolmatage lorsque la buse d'injection de l'air comprimé est trop rapprochée de l'ouverture de la manche. Ces nouveaux éléments devront sans doute être considérés avec attention dans l'avenir car ils constituent peut être une voie d'amélioration pour réduire l'émission particulaire, ainsi que pour prévenir un vieillissement prématuré des éléments filtrants.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail était de collecter de nouveaux éléments sur le décolmatage pneumatique des manches filtrantes des dépoussiéreurs. Pour ce faire, un dépoussiéreur pilote a été spécialement conçu et équipé pour les besoins des essais.

L'étude des conséquences du décolmatage pneumatique sur des manches a permis de comprendre les effets que provoque l'à-coup de pression d'air comprimé à contre-courant, d'identifier les mécanismes qui conduisent au détachement du gâteau et les zones qui sont le mieux régénérées.

Le décolmatage pneumatique entraîne un mouvement mécanique brutal du medium ainsi qu'une perméation d'air à contre-courant. Ces mécanismes sont complémentaires mais possèdent chacun leur zone d'action privilégiée. Le détachement du gâteau en haut de manche s'effectue majoritairement du fait de la déformation brutale du medium et de son secouage intensif. Le détachement du gâteau en bas de la manche est provoqué par un rapide mouvement de flexion du medium et par la perméation d'un flux d'air à contre-courant. L'analyse du profil de masse surfacique du medium à l'état décolmaté confirme qu'il se produit une meilleure régénération du medium dans les parties haute et basse de la manche.

Des différences de comportement, attribuées à l'évolution du colmatage interne du medium fibreux, apparaissent entre une manche à l'état neuve et une manche colmatée depuis de nombreux cycles. La description du mouvement initial de la manche et l'importance accordée au mécanisme de flux d'air à contre-courant apparaissent comme des résultats particulièrement originaux. Ces différences par rapport aux travaux antérieurs peuvent cependant provenir du mode de confection des manches filtrantes étudiées (anneaux de renfort au lieu d'une cage support métallique).

Ce travail a également permis d'établir, pour la première fois, les influences des principaux paramètres de décolmatage et de conditions opératoires de filtration sur un dépoussiéreur à manches unique. Ces nombreux résultats constituent un solide apport de connaissances des phénomènes liés au décolmatage pneumatique.

La caractérisation de la répartition du débit d'air filtré sur le réseau de manches du dépoussiéreur constitue ensuite l'apport le plus original de ce mémoire puisqu'il n'existait aucune donnée sur ce sujet.

Les résultats montrent que la répartition des débits volumiques d'air présentent des disparités après un décolmatage qui dépendent des conditions opératoires et des paramètres de décolmatage. Les inhomogénéités provoquées par le décolmatage pneumatique séquentiel ont été quantifiées. Les variations de débits à travers les manches traduisent des différences de résistances à l'écoulement qui ont pour origine trois causes principales :

- la perméation de forts débits transitoires sur les premières manches à être décolmatées ;
- la remise en suspension de particules du gâteau lors du décolmatage ;
- l'incapacité du réservoir d'air comprimé à assurer une pression de décolmatage identique sur l'ensemble des manches d'un même rail.

La durée pendant laquelle la répartition des débits reste inhomogène après le décolmatage dépend des conditions opératoires de filtration et de décolmatage, ainsi que de la nature de l'aérosol colmatant.

Un modèle phénoménologique décrit de manière satisfaisante les résultats expérimentaux mais nécessitera un travail supplémentaire pour devenir un modèle prédictif.

L'étude des bouffées de concentration en particules émises à l'aval des manches a permis de décrire les mécanismes de la formation d'une bouffée de particules et de mieux comprendre le comportement des diverses sources de particules contribuant à l'émission particulaire à l'aval, en fonction des conditions opératoires imposées.

Les mécanismes sont au nombre de quatre :

- Disparition partielle du gâteau de filtration ;
- Modification structurelle momentanée du medium ;
- Passage par des micro-perforations persistantes ;
- Migration indirecte des particules dans le medium.

Les particules émises à l'aval proviennent de plusieurs sources :

- Particules provenant de l'amont
- Particules collectées dans le gâteau et remises en suspension à l'amont
- Particules déposées sur les parois de l'installation et remises en suspension
- Particules collectées en profondeur dans le medium

Les contributions de ces mécanismes et de ces sources évoluent en fonction des conditions opératoires de filtration, des paramètres de décolmatage et de l'aérosol colmatant. Ces résultats montrent que les media moyenne efficacité, classiquement utilisés en dépoussiérage dans le secteur du bois par exemple, ont une trop faible efficacité de filtration propre pour pouvoir être performants en présence exclusive de fines particules ($d_{pm} < 10 \mu m$). Pour les particules plus grosses, l'émission particulaire vers l'aval est contrôlée par les propriétés du medium et non plus par la taille des particules. Le colmatage interne joue un rôle particulièrement important dans l'émission de particules vers l'aval : il conditionne en grande partie l'efficacité de collecte du medium à l'état décolmaté et la migration des particules entre les fibres.

Les mesures de concentration en particules à l'aval des dépoussiéreurs étudiés montrent des valeurs faibles pour les poussières de bois, en grande majorité inférieures à la limite recommandée de $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$. Aucune des installations étudiées ne présente de dysfonctionnement significatif. Cependant, les valeurs se trouvent très souvent à la limite de la valeur recommandée. Cette situation ne tolère alors aucune dérive telle qu'une augmentation de la production de poussières dans l'usine ou que le vieillissement des éléments filtrants. De plus, certains dépoussiéreurs présentent des pics de concentration lors du décolmatage, qui dépassent systématiquement la valeur recommandée. Des dégradations de la qualité de l'air recyclé au cours d'une journée de travail peuvent également apparaître. Elles proviennent d'une augmentation temporaire de l'activité de l'entreprise et sont généralement associées au démarrage de machines qui génèrent de grosses quantités de poussières et qui viennent considérablement enrichir la concentration en particules à l'amont. Le recyclage de l'air s'accompagne également d'une réintroduction dans le local de travail de particules bien plus fines que les poussières sources à l'amont. Le respect des normes en vigueur, basé sur un calcul massique peut donc, parfois, être atteint tout en relevant d'importante concentration numérique en fines particules. Ce constat soulève donc une interrogation quant aux effets de ce type de particules sur la santé humaine et sur leur prise en considération dans le domaine de l'hygiène et de sécurité. Seul la continuité et le développement des études épidémiologiques permettront de répondre à ce manque de connaissance et de résultats portant sur l'exposition à des particules submicroniques de bois en milieu du travail.

Les essais qui ont été réalisés ne permettent pas d'apporter une réponse à la question de choisir entre un système de décolmatage reposant sur une perte de charge maximale prédéfinie et un système réglé sur une minuterie. La grande diversité des systèmes rencontrés

sur le terrain, qui semblent tous fonctionner d'une manière comparable en terme de rejets, ne permet pas de se prononcer. D'autres part, les résultats obtenus permettent de donner des éléments de réflexion pour une amélioration du décolmatage pneumatique mais ne permettent pas encore d'établir des recommandations concrètes sur les paramètres d'utilisation pour une véritable optimisation de leur fonctionnement.

Enfin, ce travail a permis de pointer deux facteurs aggravants pour l'émission particulaire : les vitesses transitoires qui traversent les premières manches à être décolmatées lors d'un décolmatage séquentiel rail par rail et l'effet d'induction d'air qui se produit en haut de manche lors du décolmatage lorsque la buse d'injection de l'air comprimé est trop rapprochée de l'ouverture de la manche. Ces nouveaux éléments devront sans doute être considérés avec attention dans l'avenir car ils constituent peut être une voix d'amélioration pour réduire l'émission particulaire, ainsi que pour prévenir un vieillissement prématuré des éléments.

Les perspectives de ce travail concernent autant la modélisation que les expériences :

- Déterminer les mécanismes de propagation du mouvement mécanique de décolmatage le long d'une manche filtrante avec anneaux de renforts.
- Modéliser l'expansion et le trajet du jet d'air comprimé de décolmatage dans la manche pour optimiser le positionnement des buses d'injection et minimiser les aspirations d'air en provenance de l'amont (privilégier les aspirations d'air en provenance de la coiffe).
- Comparer les résultats obtenus avec des media plus performants, ce qui permettrait de répondre à deux questions principalement : Les performances réelles de ces media, notamment d'un point de vue rejet particulaire, améliore-t-elles considérablement le fonctionnement des dépoussiéreurs ? Comment évoluent leurs propriétés, initialement bénéfiques, au cours des cycles de filtration ?
- Continuer le travail développé sur le modèle phénoménologique de description de la répartition des débits d'air filtrés au cours des cycles de colmatage et de décolmatage, afin de juger de sa sensibilité et de ses qualités prédictives.
- Engager des partenariats avec les constructeurs de dépoussiéreurs à manches, qui pourraient, du fait de leur expérience du métier et des connaissances techniques qu'ils ont accumulés, apporter des avancées non négligeables dans notre réflexion actuelle sur les améliorations du décolmatage pneumatique.
- Caractériser plus en détail les rejets à l'aval des manches, notamment d'un point de vue distribution granulométrique de l'aérosol filtré, en utilisant des appareils de mesure plus performants.
- Caractériser expérimentalement les techniques d'écrtage des bouffées de particules (by-passage vers l'extérieur), dans le cadre d'un recyclage de l'air.

REFERENCES

- Aguiar M.L., Coury J.R. ; Air filtration in fabric filters : Cake – cloth adhesion force ; Fluid / particle separation journal, 5 (4) ; 1992.
- Aguiar M.L., Coury J.R. ; Cake formation in fabric filtration of gases ; Industrial and Engineering Chemistry Research, 35, pp. 3673 - 3679 ; 1996.
- Allen M.D., Raabe O.G. ; Re-evaluation of Millikan's oil drop data for the motion of small particles in air ; Journal of Aerosol Science, 13 (6), pp 537 – 547 ; 1982.
- Allen M.D., Raabe O.G. ; Slip correction measurements of spherical solid aerosol particles in an improved Millikan apparatus; Aerosol Science and Technology, 4, pp. 269 – 286 ; 1985.
- Allen R.W.K., Goyder H.G.D., Morris K. ; Modelling media movement during cleaning of pulse-jet fabric filters ; Chemical engineering research and design ; 77 (3) ; pp. 223 – 230 ; 1999.
- Bach B., Schmidt E. ; Dust re-deposition caused by pulse-jet regeneration of surface filters, Filtech europa, Düsseldorf, Germany, II, pp. 280 – 287 ; 2003.
- Bémer D., Fabries J-F. ; Calculation of the theoretical response of an optical particle counter and its predictal usefulness ; Journal of Aerosol Science, 21 (5), pp. 689 – 700 ; 1990.
- Bémer D., Simon X., Callé S., Thomas D., Régnier R., Contal P. ; Performance of baghouse dust collector – Study on plane media and on a pilot installation ; Reinhaltung der Luft, 64 (9), pp. 399 – 405 ; 2004.
- Berchner S., Löffler F. ; Influence of high temperatures on particle adhesion ; Powder Technology, 78, pp. 273-280 ; 1994.
- Bergman W., Taylor R.D., Miller H.H. ; 15th DOE nuclear air cleaning conference ; Boston ; 1978.
- Brown R.C. ; Air filtration – an integrated approach to the theory and applications of fibrous filters (Chapitre 7) ; Pergamon Press, Oxford ; 1992.
- Bustard C.J., Cushing K.M., Chang R.L. ; The potential of pulse-jet bag-houses for utility boilers. II : Performance of pulse-jet fabric filter pilot plants ; Journal of the air and waste management association, 42 (9), pp. 1240 – 1249 ; 1992.
- Callé S. ; Etude des performances des médias filtrants utilisés en dépolluierage industriel ; Thèse INPL ; 2000.
- Callé S., Contal P., Thomas D., Bémer D., Leclerc D. ; Description of the clogging and cleaning cycles of filter media ; Powder Tchnology, 123, pp. 40 – 52 ; 2002.
- Callé S., Bémer D., Vaxelaire S., Thomas D., Contal P., Leclerc D. ; Change in filtration efficiency during dust cake removal from fabric filters ; World Congress on Particle Technology 4, Sydney ; 21 – 25 juillet 2002.
- Cancers professionnels – Barrer la route aux risques ; Travail et Sécurité, 10, pp. 37 – 39 ; 2004.
- Carr R.C., Smith W.B. ; Fabric filter technology for utility coal-fired power plants, Part III : performance of full-scale utility baghouses ; Journal of Aeosol Pollution Control Association, 31 (3), pp. 282 – 293 ; 1984.
- Carosso A., Ruffino C., Bugiani M. ; Respiratory diseases in wood workers ; Br. Journal Ind. Med., 44, pp 53 – 56 ; 1987.
- Choi J-H., Seo Y-G., Chung J-W. ; Experimental study on the nozzle effect of the pulse cleaning for the ceramic filter candle ; Powder technology, 114 (1-3), pp. 129 – 135 ; 2001.
- Choi J-H., Ha S-J., Jang H-J. ; Compression properties of dust cake of fine fly ashes from a fluidized bed coal combustor on a ceramic filter ; Powder Technology, 140 (1-2), pp. 106 – 115 ; 2004.
- Chuah T.G., Withers C.J., Seville J.P.K. ; Prediction and measurements of the pressure and velocity distributions in cylindrical and tapered rigid ceramic filters ; Separation and Purification Technology, 40, pp. 47 – 60 ; 2004.

- Contal P. ; Les techniques du dépoussiérage ; Rapport effectué pour le réseau FIRTECH Ingénierie des Procédés ; 1994.
- Contal P. ; Approche de la filtration des gaz par un lit fluidisé stabilisé magnétiquement ; Thèse Université de Savoie ; 1994.
- Corn M. ; Adhesion of particles (Chap. XI) ; Aerosol Science, ed. Davies, Academic Press, London ; 1966.
- Crepy M.N., Rousselin X., Conso F., Honnet P. ; Traitement curatif des bois : risques professionnels et prévention ; INRS – DMT, 36, pp. 363 – 374 ; 1988.
- Davies C.N. ; Air filtration ; Academic press, London – New York ; 1973.
- Dennis R., Wilder J.E. ; Fabric filter cleaning studies ; National Environmental Research Center, Report EPA 650/2-75-009 ; 1975.
- Dennis R., Cass R.W., Hall R.R. ; Dust dislodgement from woven fabrics versus filter performance ; Journal of Aerosol Pollution Control Association, 28, pp. 47 - 52 ; 1978.
- Dennis R., Klemm H.A. ; A model for coal fly ash filtration ; Journal of the air pollution control association, 29 (3) ; 1979.
- Dennis R., Klemm H.A. ; Modeling concepts for pulse jet filtration ; Journal of the Air Pollution Control Association, 30 (1), pp. 38 – 43 ; 1980.
- Dennis R., Wilder J.E., Harmon D.L. ; Predicting pressure loss for pulse jet filters ; Journal of the air pollution control association, 31 (9), pp. 987 – 992 ; 1981.
- De Ravin M., Humphries W., Postle R. ; A model for the performance of a pulse jet filter ; Filtration and Separation, pp. 201 – 208 ; Mai / Juin 1988.
- Dittler A., Gutmann B., Lichtenberger R., Weber H., Kasper G. ; Optical in-situ measurement of dust cake thickness distributions on rigid filter media for gas cleaning ; Powder Technology, 99 (2), pp. 177 – 184 ; 1998.
- Duo W., Kirkby N.F., Seville J.P.K., Clift R. ; Patchy cleaning of rigid gas filters – I. A probabilistic model, Chemical Eng. Sciences, 52, pp. 141 – 151 ; 1997.*
- Duo W., Kirkby N.F., Seville J.P.K., Clift R. ; Patchy cleaning of rigid gas filters – II. Experiments and model validation, Chemical Eng. Sciences, 52, pp. 153 – 164 ; 1997.
- Ellenbecker M.J., Leith D. ; Effect of dust cake redeposition on pressure drop in pulse-jet fabric filters ; Paper presented at 3rd International Powder and Bulk solids handling & processing conference, Rosemont, IL ; 1978.
- Ellenbecker M.J., Leith D. ; Theory for dust deposit retention in a pulse-jet fabric filter ; Filtration and Separation, 16 (6), pp. 624 – 629, 1979.
- Ellenbecker M.J., Leith D. ; Dust removal from non-woven-fabric-cleaning methods need to be improved ; Filtration and Separation, 18, pp. 41 - 45 ; juillet 1981.
- Endo Y., Chen D-R., Pui D.Y.H. ; Effects of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading on air filters ; Powder Technology, 98, pp. 241 - 249 ; 1998.
- Ferer M.V., Smith D.H. ; Modelling backpulse filter cleaning : the small particle cake fragments ; Aerosol Science and Technology, 29, pp. 246 – 256 ; 1998.
- Flehsig R., Nedo G. ; Hazardous health effects of occupational exposure to wood dust ; Ind. Health, 28, pp. 107 – 119 ; 1990.
- Fuchs N.A. ; The mechanic of aerosols ; Pergamon Press, Oxford ; 1924.

- Goldsmith D.F., Shy C.M. ; Respiratory health effects from occupational exposure to wood dusts ; *Scand. Journal Work Environ. Health*, 14, pp. 1 – 15 ; 1988.
- Hall R.F. ; Getting the best results from needlefelts in dust filtration ; *Filtration and Separation*, 14, pp. 350 ; 1977.
- Hata M., Furuuchi M., Kanaoka C., Kurose R., Makino H. ; Observation of dust release behavior from ceramic elements ; *Advanced Powder Technology*, 14 (6), pp. 719 – 734 ; 2003.
- Hinds W.C. ; *Aerosol technology – properties, behavior and measurement of airborne particles*, Chap. 6 : Adhesion of particles ; ed. John Wiley, New York ; 1982.
- Hindy K.T. ; Influence of selected fixed parameters on pulse-jet fabric filter operation ; *Atmospheric environment*, 20 (8), pp. 1517 – 1521 ; 1986.
- Höflinger W., Stöcklmayer C., Hackl A. ; *Filtration and Separation*, pp. 807 ; 1994.
- Höflinger W. ; *Advances in aerosol filtration – Chapter 18 : Fundamentals of the compression behavior of dust filter cakes* ; CRC Press LLC, pp. 349 – 360 ; 1998.
- Holland C.R., Rothwell E. ; Model studies of fabric dust filtration. 1 – Flow characteristics of dust cakes uniformly distributed on filter fabrics ; *Filtration and Separation*, 14, pp. 30 ; 1977.
- Holland C.R., Rothwell E. ; Model studies of fabric dust filtration 2 – A study of the phenomenon of cake collapse ; *Filtration and Separation*, 14, pp. 224 ; 1977.
- Holness D.L., Sass-Kortsak A.M., Pilger C.W., Nethercott J.R. ; Respiratory function and exposure effect relationships in wood dust exposed and control workers ; *Journal Occup. Med.*, 27, pp 501 – 506 ; 1985.
- Humphries W. ; Influence of cloth structure on dust dislodgement from fabric filters ; *Powder Technology*, 28, pp. 189-194 ; 1981.
- Humphries W., Madden J.J. ; Fabric filtration for coal-fired boilers : Nature of fabric failures in pulse jet filters ; *Filtration and Separation*, 18 (6), pp. 503 – ... ; 1981.
- Humphries W., Madden J.J. ; Fabric filtration for coal-fired boilers : dust dislodgement in pulse jet filters ; *Filtration and Separation*, 20 (1), pp. 40 – 44 ; 1983.
- IARC ; *Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans* ; IARC Lyon, 62, Wood dust and formaldehyde ; 1995.
- ICOH-NIOSH, US department of health and human services, Public health service, Centers of diseases control, National institute for occupational safety and health ; *Health effects of exposure to wood dust : a summary of the literature* ; Cincinnati, ICOH-NIOSH ; 1987.
- Ito S., Tanaka T., Kawamura S. ; Changes in pressure loss and face velocity of ceramic candle filters caused by reverse cleaning in hot coal gas filtration ; *Powder Technology*, 100 (1), pp. 32 – 40 ; 1998.
- Japuntich D.A., Stenhouse J.I.T., Liu B.Y.H. ; Experimental results of solid monodisperse particle clogging of fibrous filters ; *Journal of Aerosol Science*, 25, pp. 385 – 393 ; 1994.
- Jeon K.-J., Jung Y.-W. ; A simulation study on the compression behavior of dust cakes ; *Powder Technology*, 141, pp. 1 – 11 ; 2004.
- Ju J. M.-S., Chiu M.-S., Tien C. ; Further work on pulse-jet fabric filtration modelling ; *Powder Technology*, 118 (1-2), pp. 79 – 89 ; 2001.
- Juda J., Chrosciel S. ; Ein theoretisches modell der druckverlusthöhung beim filtrationsvorgang ; *Staub Reinhaltung des Luft*, 5, pp. 196 – 198 ; 1970.

- Kanaoka C., Hiragi S. ; Pressure drop of air filter with dust load ; *Journal of Aerosol Science*, 21, pp. 127 – 137 ; 1990.
- Kanaoka C., Amornkitbamrung M. ; Effect of filter permeability on the release of captured dust from a rigid ceramic filter surface ; *Powder Technology*, 118, pp. 113-120 ; 2001.
- Kavouras A., Krammer G. ; Model development of the transient solid hold-up and pressure drop in fabric filters ; *Chemical Engineering and technology*, 25 (2), pp. 149 – 157 ; 2002.
- Kavouras A., Krammer G. ; Distributions of age, thickness and gas velocity in the cake of jet pulsed filters – application and validation of a generation filter model ; *Chemical Engineering Science*, 58, pp. 223 – 238 ; 2003.
- Kavouras A., Krammer G. ; Deriving cake detachment versus cake area load in a pulsed filter by a mechanistic model ; *Powder Technology*, 133, pp. 134 – 146 ; 2003.
- Klimczack W.J., Applewhite G. ; Optimize pulse-jet dust collector performance ; *Chemical Engineering Progress*, 93 (8), pp. 56 – 61 ; 1997.
- Klingel R., Löffler F. ; Dust collection and cleaning efficiency of a pulse-jet fabric ; *Filtration and Separation*, 20 (3), pp. 205 – 208 ; 1983.
- Klingel R., Löffler F. ; Influence of cleaning intensity on pressure drop and residual dust areal density in a pulse-jet fabric filter ; *Proc. Filtech Conf., London*, pp. 306 – 314 ; 1983.
- Koch D., Schulz K., Seville J., Clift R. ; Regeneration of rigid ceramic filters ; *Gas cleaning and High Temperature*, 1993.
- Koch D., Seville J., Clift R. ; Dust cake detachment from gas filters ; *Powder Technology*, 86, pp. 21 – 29 ; 1996.
- Krupp H. ; Particle adhesion – theory and experiments ; *Advanced Colloid interface Science*, 1, pp. 111 – 239 ; 1967.
- Leith D., First M.W. ; Particle collection by pulse jet fabric filter ; Presented at 68th annual APCA meeting, Boston ; 1975.
- Leith D.H., First M.W., Feldmann H. ; Performance of a pulse-jet filter at high filtration velocity – II. Filter cake redéposition ; *Journal of Aerosol Pollution Control Association*, 27, pp. 636 ; 1977.
- Leith D., First M.W. ; Pressure drop in a pulse-jet fabric filter ; *Filtration and Separation*, 14 (5), pp. 473 - 480 ; 1977.
- Leith D., First M.W., Gibson D.D. ; Effect of modified cleaning pulses on pulse-jet filter performance ; *Filtration and Separation*, 15, pp. 393 ; 1978.
- Leith D., Ellenbecker J. ; Theory for penetration in a pulse-jet cleaned fabric filter ; *Journal of the Air Pollution Control Association*, 30 (8), pp. 877 – 881 ; 1980.
- Leith D., Ellenbecker M.J. ; Dust emissions from a pulse-jet fabric filter ; *Filtration and Separation*, pp. 311 – 314 ; Juillet / Août 1983.
- Leith D., Allen R.W.K. ; Dust filtration by fabric filters ; *Progress in filtration and separation*, Vol. 4 ; Wakeman R.J. Ed., Elsevier ; 1986.
- Lenhart-Batar S., Grannelle S.K., Seville J.P.K. ; Filter cake detachment from rigid gas filtration media ; *PARTEC 98*, 4th European Symposium Separation of particles from gases, Nurnberg, Germany ; 1998.
- Letourneau P., Mulcey P., Vendel J. ; Aerosol penetration inside HEPA filtration media ; 21st nuclear air cleaning conference, San-Diego, California, pp. 798 – 811 ; 1990.

- Lu H.C., Tsai C.J. ; Numerical and experimental study of cleaning process of a pulse-jet fabric filtration system ; *Environmental science and technology*, 30 (11), pp. 3243 – 3249 ; 1996.
- Lu H.C., Tsai C.J. ; A pilot-scale study of the design and operation parameters of a pulse-jet baghouse ; *Aerosol science and technology*, 29 (6), pp. 510 – 524 ; 1998.
- Lu H.C., Tsai C.J. ; Influence of design and operation parameters on bag-cleaning performance of pulse-jet baghouse ; *Journal of environmental engineering (New York)*, 125 (6), pp. 583 – 591 ; 1999.
- Mai R., Fronöfer M., Leibold H. ; Flow characteristics of filter candles during recleaning ; 3rd International Symposium on Gas Cleaning at High Temperature, Karlsruhe, Germany, pp. 194 – 206 ; 1996.
- McCawley M.A. ; Particle size-selective criteria for deposited submicrometer particles ; *Particle Size-Selective for Particulate Air Contaminants*, Ed. J.H. Vincent, ACGIH, pp. 211 – 223 ; 1999.
- Millikan R.A. ; *The Physical review*, 22, pp. 1 ; 1923.
- Morris K., Allen R.W.K., Clift R. ; Adhesion of cakes to filter media ; *Filtration and Separation* ; Janvier / Février 1987.
- Morris W.J. ; Cleaning mechanisms in pulse jet fabric filters ; *Filtration and Separation*, 21 (1), pp. 50 – 54 ; 1984.
- Morris K. ; Expert system control of fabric filters ; *Filtration and Separation*, 28 (4), pp. 275 – 280 ; 1991.
- Muller R.H., Kern R., Stahl W. ; Adhesive forces between filter cloth and cake ; *Filtration and Separation* ; Janvier / Février 1987.
- Müller J.P., Bémer D., Dessagne J-M. ; Dysfonctionnement des dépoussiéreurs de l'industrie du bois – Etude de deux principes de détection ; Ed. INRS, ND 180, pp. 21 – 34 ; 2000.
- ND 2098 ; Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France ; Collection des notes documentaires, Edition INRS, mise à jour février 2005 ; 2005.
- NF X 10-141 ; Mesurage du débit d'air dans les conduits – Méthodes par gaz traceurs ; Paris La Défense, AFNOR.
- NF X 10-231 ; Distribution et diffusion d'air – Technique de mesure du débit d'air dans un conduit aéraulique ; Paris La Défense, AFNOR ; 1984.
- NF X 43-257 ; Qualité de l'air – Air des lieux de travail – Prélèvement individuel de la fraction inspirable de la pollution particulaire ; Paris La Défense, AFNOR ; 1988.
- NF X 44-001 ; Séparateurs aérauliques – Vocabulaire ; Paris La Défense, AFNOR ; 1981.
- NF X 44-052 ; Emissions de sources fixes – Détermination de fortes concentrations massiques de poussières – Méthode gravimétrique manuelle ; Paris La Défense, AFNOR ; 2002.
- Norme EN 779 ; Particulate air filters for general ventilation – Determination of the filtration performance ; 1998.
- Novick V.J., Monson P.R., Ellison P.G. ; The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters ; *Journal of Aerosol Science*, 23, pp. 657 – 665 ; 1992.
- Osunsanya T., Prescott G., Seaton A. ; Acute respiratory effects of particles : mass or number? ; *Occup. Environ. Med.*, 58, pp. 154 – 159 ; 2001.
- Palica M. ; A method to investigate filtration by the use of a pressure test filter ; *Chemical Engineering and Processing*, 35, pp. 333 – 342 ; 1996.

- Parkes W.R. ; Occupational lung disorders, 3^{ème} edition, Butterworth Heinemann ; 1994.
- Payatakes A.C. ; Model of the dynamic behaviour of a fibrous filter – Application to the case of pure interception during period of hindered growth ; Powder Technology, 14, pp. 267 – 278 ; 1976.
- Pénicot P. ; Etude de la performance des filtres à fibres lors de la filtration d'aérosols liquides ou solides submicroniques ; Thèse INPL ; 23 octobre 1998.
- Perry R., Green D. ; Perry's Chemical Engineer's Handbook, 6th edition ; Mc Graw-Hill Editions, International edition, pp. 5 (22) ; 1984.
- Perry R., Green D. ; Perry's Chemical Engineer's Handbook, seventh edition ; Mc Graw-Hill Editions, International edition ; 1997.
- Peukert W., Wadenpohl C. ; Industrial separation of fine particles with difficult dust properties ; Powder Technology, 118, pp. 136 – 148 ; 2001.
- Plassart N. ; Epuration des gaz par les filtres décolmatables en place et applications hautes températures ; Pétrole et technique, 385, pp. 79 – 83 ; 1994.
- Powell J. ; Surface filtration : the way forward? ; Filtration and Separation, Vol. 35, n°2, pp. 134 – 136 ; 1998.
- Rader D.J. ; Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases ; Journal of Aerosol Science, 21 (2), pp. 161 – 168 ; 1990.
- Rembor H.-J., Kasper G. ; Fibrous filters – Measurements of spatial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency ; World Congress on Particle Technology 3 ; 1998.
- Renoux A., Boulaud D. ; Les aérosols, Physique et Métrologie ; Technique et documentation, Lavoisier ; 1998.
- Rosenberg N., Gervais P. ; Allergies respiratoires professionnelles provoquées par les poussières de bois ; INRS – DMT, 20, pp. 95 – 98 ; 1987.
- Rothwell E. ; The design and operating characteristics of reverse-jet assemblies for pulse jet dust collectors ; Fourth World Filtration Congress, Part I, Ostend, Belgium, pp. 2.43 – 2.53 ; 22 – 25 Avril 1986.
- Rumpf H. ; The strength of granules and agglomerates ; First International Symposium on agglomeration, Philadelphia, ed. Wiley, New York, pp. 379 – 418 ; 1962.
- Schildermans I., Baeyens J., Smolders K. ; Pulse-jet cleaning of rigid filters : a literature review and introduction to process modelling ; Filtration + Separation, pp. 26 – 33 ; Juin 2004.
- Schmidt E., Löffler F. ; Preparation of dust cakes for microscopic examination ; Powder Technology, 60, pp. 173 – 177 ; 1990.
- Schmidt E. ; Zur kompression von auf filtermedien abgedehnten staubschichten ; Staub Reinhaltung der Luft, 53, pp. 369 – 376 ; 1993.
- Schmidt E. ; Experimental investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media ; Filtration and Separation, pp. 789 – 793 ; 1995.
- Schmidt E. ; Theoretical investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media ; Filtration and Separation, 34 (4) pp. 365 – 368 ; 1997.
- Seville J.P.K., Cheung W., Clift R. ; A patchy-cleaning interpretation of dust cake release from non-woven fabric ; Filtration and Separation, 26, pp. 187 – 190 ; 1989.
- Shamssain Mh. ; Pulmonary function and symptoms in workers exposed to wood dust ; Thorax, 47, pp. 84 – 87 ; 1992.

- Sherman C.P.C., Leith D., Symons M.J. ; Outlet mass flux from a pulse-jet cleaned fabric filter : testing a theoretical model ; *Aerosol Science and Technology*, 13 (4), pp. 423 – 433 ; 1990.
- Sievert J., Löffler F. ; Dust dislodgement in pulse-jet fabric filters ; *First World Congress on particle technology, Part IV* ; Nurnburg, West Germany, pp. 111 – 126 ; 16 – 18 Avril 1986.
- Sievert J., Löffler F. ; Dust cake release from non woven fabrics ; *Filtration and Separation*, pp. 424 – 427 ; Novembre / Décembre 1987.
- Sievert J., Löffler F. ; Fabric cleaning in pulse-jet filter ; *Chem. Eng. Process*, 26, pp. 179 – 183 ; 1989.
- Silva C.R.N., Negrini V.S., Aguiar M.L., Coury J.R. ; Influence of gas velocity on cake formation and detachment ; *Powder Technology*, 101, pp. 165-172 ; 1999.
- Simon X. ; Performance des dépoussiéreurs à manches – Etude sur media plans et sur dépoussiéreur industriel ; DEA de Génie des Procédés, Université de Savoie ; 2002.
- Simon X., Bémer D., Callé S., Thomas D., Régnier R., Contal P. ; Performance des dépoussiéreurs à manches – Etude sur média plan et sur pilote ; 18^{ème} Congrès Français sur les Aérosols, Paris ; 11 et 12 décembre 2002.
- Simon X. ; Forces d'adhésion des particules et des couches de particules : Application au décolmatage des gâteaux de filtration ; Rapport interne de 50 pages, LSGC – Groupe Sisyphe ; 2003.
- Smith D.H., Powell V., Ahmadi G., Ferer M. ; Analysis of operational filtration data – Part. III : Re-entrainment and incomplete cleaning of dust cake ; *Aerosol science and technology*, 29, pp. 224 – 235 ; 1998.
- Stenhouse J.I.T., Trottier R. ; The loading of fibrous filter with submicron particles ; *Journal of Aerosol Science*, 22 (S1), pp. S777 – S780 ; 1991.
- Stephen C.M., Grannel S.K., Seville J.P.K., Ivatt S., Burnard G.K. dans : Schmidt E., Gang P., Pilz T., Dittler A.G. (Eds.) ; *High Temperature Gas cleaning*, Karlsruhe, Germany ; G. Braun Printconsult, Karlsruhe, pp. 207 ; 1996.
- Stöcklmayer C., Höflinger ; The effect of dust-compression on the residual pressure drop of dust filters – a simulation approach ; *PARTEC 98, 4th European Symposium Separation of particles from gases*, Nürnberg / Germany ; 1998.
- Strangert S. ; Predicting performance of bag filters ; *Filtration and Separation*, 15 (1), pp. 42 – 48 ; 1978.
- Theodore I., Reynolds J., Corvini A., Buonicore A. ; Particulate control by pulsed-air baghouse filtration : describing equations and solutions ; *Proc. 2nd speciality on : the user and fabric filtration equipment*, Buffalo, p. 90 ; 1975.
- Thomas D. ; Etude de la filtration des aérosols par des filtres à fibres ; HDR Université Henri Poincaré – LSGC/CNRS ; 19 décembre 2001.
- Thomas D., Penicot P., Contal P., Leclerc D., Vendel J. ; Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles. Experimental and modelling study ; *Chemical Engineering Science*, 56 (11), pp 3549 – 3561 ; 2001.
- Traub D.A. ; How to prevent dust leaks in a reverse pulsing dust collector ? ; *Powder and bulk engineering*, 14 (10), pp. 59 – 65 ; 2000.
- Tsai C.J., Pui D.Y.H., Liu B.Y.H. ; Elastic flattening and particle adhesion ; *Aerosol Science and Technology*, 15 (4), pp. 239 – 255 ; 1991.
- Tsai C.J., Tsai M.L., Lu H.C. ; Effect of filtration velocity and filtration pressure drop on the bag-cleaning performance of pulse-jet baghouse ; *Separation Science and Technology*, 35 (2), pp. 211 – 226 ; 2000.
- Vaxelaire S. ; Modélisation des performances d'un filter avec décolmatage par air comprimé ; DEA de Génie des Procédés, Université de Savoie ; 2001.

Vercoulen P.H.W., Roos R.A., Marijnissen J.C.M. et al. ; An instrument for measuring electric charge on individual aerosol particles ; *Journal of Aerosol Science*, 22 (S1), pp. S335 – S338 ; 1991.

Walsh D.C. ; Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load ; *Filtration and Separation*, 33, pp. 501 – 506 ; 1996.

Willeke K., Baron P.A. ; *Aerosol measurement* ; Van Nostrand Reinhold Eds, New York, pp. 333 – 335 ; 1993.

Xu L., Chambers A.J., Keys S. ; The release of dust cake from fabric filters ; International conference on bulk materials handling and transportation ; Symposium on freight pipelines ; Wollongong, Australia ; 6 – 8 juillet 1992.

Xu L., Scott O.J., Chambers A.J., Keys S. ; Dust removal from woven fabrics by mechanical acceleration ; 6th World Filtration Congress, Nagoya, 1993.

ANNEXES

Table des Annexes

ANNEXE I : LES MEDIA FILTRANTS	I
ANNEXE II : FORCES D'ADHESION ET DE COHESION DU GATEAU	III
ANNEXE III : COMPRESSIBILITE DU GATEAU DE FILTRATION	V
ANNEXE IV : PRESENTATION DES GENERATEURS DE PARTICULES	VII
ANNEXE V : DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES EN VOLUME DES AEROSOLS GENERES LORS DES ESSAIS	XI
ANNEXE VI : PRESENTATION DU BANC D'ESSAIS POUR MEDIA PLANS	XVII
ANNEXE VII : PRESENTATION DU DEPOUSSIHEREUR A Poches	XXI
ANNEXE VIII : CYCLES DE FILTRATION SUR LE DEPOUSSIHEREUR A MANCHES PILOTE	XXVII
ANNEXE IX : SYNTHESE DES TRAVAUX REALISES DANS LE CHAPITRE IV	XXXI

ANNEXE I : LES MEDIA FILTRANTS

Structure des media

Outre les feutres et les papiers dont nous ne parlerons pas, les media fibreux filtrants utilisés dans le domaine du dépolluissage et de la ventilation peuvent être tissés ou non-tissés.

Le tissage a pour fonction d'obtenir une surface par un assemblage de fils entrelacés, les uns étendus dans le sens de déroulement du tissu (chaîne), les autres dans une direction transversale (trame). Le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame constitue l'armure d'un tissu. On parle ainsi d'armure unie ou croisée, d'armure satin ou reps. Les media tissés sont constitués de fibres longues entrelacées formant une grille. Les dimensions des pores d'un filtre tissé (100 à 500 μm) sont d'autant plus petites que les fils utilisés pour sa confection sont fins et nombreux. Ces media présentent généralement une faible résistance mécanique. Leur épaisseur varie de 1 à 2,5 mm. Les media tissés ne permettent généralement pas de retenir les poussières de taille inférieure à 8 μm . Leur emploi est proscrit dans le cas d'un décolmatage pneumatique ou pour les poussières considérées dangereuses. Ces supports ne résistent pas longtemps aux efforts violents imposés durant l'à-coup de pression d'air comprimé ; malgré l'utilisation de nouvelles fibres, ils ont des rejets supérieurs à 20 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$, rejets qui s'aggravent rapidement au fil de l'utilisation. Systématiquement utilisés auparavant, les media tissés tendent aujourd'hui à disparaître au profit des non-tissés.

Deux étapes sont nécessaires à l'obtention d'un non-tissé : la fabrication d'un voile de fibres et sa consolidation. La fabrication du voile fait appel à trois types de procédés : procédé par voie sèche, procédé par voie humide ou procédé par fusion. La consolidation du voile est obtenue par trois méthodes : thermique, chimique ou par aiguilletage. Les non-tissés sont plus épais, plus denses et offrent des pores plus tortueux et plus nombreux que les media tissés, augmentant ainsi les probabilités de collecte des poussières. Le grammage (masse de fibres / m^2 de surface) des non-tissés est de l'ordre de 300 à 700 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ pour une épaisseur de 1,5 à 3 mm. Le diamètre des fibres utilisées varie entre 10 et 30 μm et les pores atteignent 10 à 20 μm . La porosité des non-tissés est toujours plus grande que celle des tissés car la faible dimension des pores est compensée par leur nombre beaucoup plus élevé. Ce type de medium filtrant peut être utilisé avec des vitesses de filtration plus grandes (entre 3 et 7 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) tout en assurant une efficacité de filtration plus élevée et en offrant une longévité plus grande.

Les fibres naturelles (coton, laine) ont constitué les premiers media utilisés. Désormais celles-ci sont pratiquement abandonnées au profit de fibres synthétiques qui ont une meilleure tenue mécanique. La fibre la plus utilisée est le polyester : elle convient bien aux températures des gaz traités habituellement (de l'ambiance jusqu'à 135 °C), elle résiste très bien à l'abrasion et son coût est modéré. Lorsqu'on craint des attaques acides transitoires, comme par exemple lors de la mise en route d'un sécheur avec contact direct des gaz de combustion, on peut lui préférer la fibre acrylique. Plus généralement, les media utilisés en dépolluissage peuvent être confectionnés à partir de n'importe quelle qualité de fibres sachant que chaque fibre possède ses propres caractéristiques : diamètre, résistance variable à la température, aux agressions chimiques et mécaniques. Les progrès dans les media filtrants des dépolluiseurs en font aujourd'hui un appareil de choix pour les problèmes difficiles.

Enfin, la qualité de la surface filtrante du medium est très importante. Elle peut être améliorée et faire l'objet de divers traitements spécifiques.

Les traitements de surface des media non-tissés

Le traitement de la surface filtrante vise à faciliter le détachement du gâteau, à arrêter les poussières fines dès la surface pour empêcher le colmatage du medium en profondeur, à accroître le volume des pores sous la surface pour améliorer l'efficacité du décolmatage et augmenter le débit de gaz ou à renforcer la résistance des media pour certaines applications bien déterminées (humidité, acidité). Les traitements de surface les plus courants sont les suivants :

- *flambage* : traitement le plus ancien, consiste à brûler la surface du medium à la flamme ou grâce à une lame chauffante. Le medium est chauffé pour obtenir la fusion des fibres en surface et pour constituer un film lisse lors de leur refroidissement. Il confère au medium un aspect brun, stabilise les phénomènes de rétraction, augmente la cohésion des fibres et évite que les fibres émergentes ne retiennent le gâteau.
- *calandrage* : le medium passe entre deux rouleaux chauds. Ce traitement thermique se déroule à pression et à température bien déterminées en fonction du type de fibres. Cette action a pour effet d'aplatir et de faire fondre les fibres en surface, créant ainsi des plaques étanches et lisses. L'air peut ainsi passer entre les plaques tandis que les poussières sont retenues à la surface de ces zones étanches. Ce traitement réduit la pénétration des poussières à cœur des fibres mais n'améliore pas particulièrement l'efficacité de filtration. Il permet d'obtenir des surfaces plus lisses et des tailles de pores réduites du fait de l'aplatissement de la masse fibreuse et de la réduction des volumes de vide. Le calandrage est également responsable de l'augmentation de la perte de charge du medium ; pour éviter cet inconvénient, on a habituellement recours aux techniques de calandrage à basse pression.
- *thermofixation* : traitement thermique réalisé à des températures légèrement supérieures à celles que le medium aura à supporter en cours d'utilisation. Cette technique a pour but de faire rétrécir le tissu en fabrication et d'éviter des retraits excessifs par la suite.
- *laminage* : consiste à laminer une membrane, en général une membrane de polymères comme le PTFE, à la surface du medium. Cette membrane comporte des pores beaucoup plus petits que ceux du medium non-tissé, elle lui confère donc un état de surface lisse et dense. Elle améliore l'efficacité de filtration (par multiplication des pores) tout en conservant une bonne perméabilité à l'air et en facilitant le décolmatage. Cependant cette technique ne convient pas à tous les types de poussières. Par exemple, les poussières abrasives attaquent les membranes en PTFE et les poussières grossières (contenant des copeaux) les perforent rapidement. Les particules fines peuvent éventuellement pénétrer sous la membrane et former des « nids » de poussières qui décollent la surface micro-poreuse lors des décolmatages.

Types de media filtrants

Les éléments filtrants d'un dépoussiéreur sont confectionnés par couture ou par collage sous forme de manches (éléments cylindriques) ou de poches (éléments rectangulaires plats).

Deux types de manches se distinguent : les manches avec ou sans anneaux. Les anneaux, répartis régulièrement sur la hauteur du cylindre, confèrent aux manches une certaine rigidité qui évite leur écrasement lorsque l'air les traverse. Pour les manches sans anneaux et pour les poches, c'est une cage support métallique, glissée à l'intérieur de l'élément sur toute sa hauteur, qui assure son maintien en forme. Les travaux de la littérature sont exclusivement axés sur cette seconde technologie.

ANNEXE II : FORCES D'ADHESION ET DE COHESION DU GATEAU

Les forces d'adhésion globales qui agissent à l'interface surface / particule résultent de phénomènes d'attraction et de répulsion et sont appelées forces d'interactions. Les trois principales forces d'interactions régissant l'adhésion entre deux particules ou entre une particule et une surface, sont les forces de Van der Waals, capillaires et électrostatiques.

L'état de surface des matériaux joue notamment un rôle essentiel dans l'adhésion des particules (Corn (1966), Hinds (1982)). Le rapport entre la taille des aspérités de la surface et la taille des particules est primordiale dans la détermination des forces d'adhésion. De même, la dureté des matériaux et la déformation progressive des surfaces entrent en jeu (Krupp (1967), Tsai et al. (1991)). Ces différentes considérations démontrent que les propriétés des corps en interaction influencent particulièrement leur adhésion.

Leith et Allen (1986) décrivent le mécanisme de décollement d'une couche de particules en réalisant un bilan de forces sur un fragment de gâteau. La force totale pour décoller ce morceau de gâteau présente deux composantes :

- la force d'adhésion par unité de surface : σ_{ad}
- la force de cohésion par unité de surface au sein du gâteau : $\sigma_{co} = f(\alpha_g, W_g)$

Le bilan des forces est le suivant :
$$\sigma_T = C_0 \cdot W_g \cdot \sigma_{co} + \sigma_{ad} \quad (AII.1)$$

où C_0 représente un paramètre traduisant l'effet de cohésion.

Le terme de force d'adhésion est déduit empiriquement des courbes d'évolution de la proportion décolmatée en fonction de la force appliquée. Il est alors possible de quantifier les forces liant le gâteau au medium. Mais lorsque les masses de particules déposées sont trop faibles, la couche n'est pas encore formée et l'équation précédente ne peut plus s'appliquer.

Sans distinguer les effets de l'adhésion à une surface et de la cohésion des particules au sein du gâteau, Seville (1989) définit la pression critique de détachement du gâteau de particules. La perte de charge totale lors de l'application d'un flux d'air de vitesse donnée à contre-courant, U_d , peut s'exprimer selon les modèles classiques d'évolution de la perte de charge :

$$DP_d = \mu \cdot K_1 \cdot U_d + \mu \cdot K_2 \cdot U_d \cdot W_g \quad (AII.2)$$

L'augmentation de la vitesse à contre-courant entraîne une augmentation de la pression totale et donc de la pression exercée sur le gâteau jusqu'à ce que cette tension atteigne la valeur critique de décollement du gâteau. Cette théorie est reprise par de nombreux auteurs qui cherchent à déterminer de manière expérimentale la pression critique de détachement d'un gâteau de particules vis à vis d'une surface.

La vitesse requise pour déloger des particules déposées est toujours significativement plus importante que la vitesse de filtration. Par exemple, pour des particules de diamètres inférieurs à 15 μm et pour une vitesse de filtration de l'ordre de 5 cm.s^{-1} , les vitesses de décolmatage par flux à contre-courant sont habituellement comprises entre 10 et 20 m.s^{-1} .

Aguiar et Coury (1992) ont montré que l'augmentation du diamètre des particules entraîne une diminution de la pression critique de détachement du gâteau. La loi qu'ils proposent, nettement inspirée de l'équation de Rumpf, ne dépend que du diamètre d_p des particules et de la compacité du gâteau α_g :

$$DP_{\text{critique}} = \beta \cdot \frac{\alpha_g}{1 - \alpha_g} \cdot \frac{1}{d_p} \quad (\text{AII.3})$$

avec β une constante expérimentale.

Aguiar et Coury (1992) ont également testé l'influence de deux paramètres : la masse du gâteau de particules et la force de détachement appliquée par envoi d'air à contre-courant. Les résultats expérimentaux montrent que plus la masse du gâteau à décolmater est importante, plus la force de décollement nécessaire sera faible. Les mêmes conclusions sont apportées par Sievert et Löffler (1987) et Koch et al. (1996). Plus la masse de gâteau est importante, plus son épaisseur et les forces de cohésion interne le sont également. Concernant les gâteaux de faibles épaisseurs, de petits trous et/ou fissures se forment rapidement et le flux d'air de décolmatage y passe préférentiellement. C'est pourquoi il faut des vitesses de décolmatage de plus en plus grandes pour bien décoller des gâteaux de plus en plus fins. Dans le cas de gâteaux plus épais, la cohésion interne entre particules étant plus grande, ces défauts n'apparaissent pas aussi facilement et le décolmatage devient plus efficace car les forces de pression de l'air sur le gâteau exercent leur poussée maximum.

Morris et al. (1987) étudient le décolmatage pneumatique et montrent que la force requise pour détacher une quantité donnée de gâteau dépend de sa masse surfacique du dépôt de particules. L'explication de l'augmentation de la force de détachement avec la masse surfacique provient du fait que le gâteau subit une compression croissante au fur et à mesure de la filtration (cf. paragraphe I.4.2). Cette compression augmente la compacité du gâteau, plus spécifiquement à l'interface avec le medium, et peut également causer un écrasement des contacts particules-particules. Les forces de cohésion et les contraintes de détachement vont ainsi augmenter. Cependant, Dennis et Wilder (1975) et Morris et al. (1987) constatent également que plus l'épaisseur du gâteau est importante, meilleure est l'efficacité de décolmatage.

Xu et al. (1993) aboutissent à des observations concernant l'effet de la masse surfacique de gâteau qui diffèrent suivant le type de traitement de surface du medium support. Ainsi, la variation de la force de détachement en fonction de l'augmentation de la masse surfacique est constante, augmente et diminue respectivement pour un traitement par flambage, un medium non traité et un traitement par couche microporeuse. Aucune explication n'est apportée.

Muller et al. (1987) ont montré, pour différents types de media, que les valeurs de forces d'adhésion augmentaient avec le nombre de cycles de colmatage et de décolmatage effectués, principalement lors des tous premiers cycles. La distribution des forces d'adhésion dépend étroitement de l'état de surface et des paramètres du medium. Les changements qui apparaissent sur ces derniers au cours des cycles de filtration influencent donc les phénomènes d'adhésion, et ce d'une manière qui est propre à chaque type de filtre et à chaque type de poussières.

Kanaoka et Amornkitbamrung (2001) montrent que la résistance du gâteau peut être influencée par la nature et les propriétés de la surface filtrante du medium. Ils observent également que la présence d'une couche de poussières irréversiblement présente sur la surface du medium (même après décolmatage) peut changer la régularité des dépôts ultérieurs et les propriétés d'adhésion du gâteau. Enfin, ils précisent que la nature du medium filtrant et en particulier son état de surface influe sur la formation du gâteau de particules. La présence d'une surface lisse entraînera la constitution d'une couche de particules plus homogène que dans le cas d'une surface rugueuse.

ANNEXE III : COMPRESSIBILITE DU GATEAU DE FILTRATION

Höflinger (1998) propose une description du gâteau de particules sous forme d'une structure composée de trois couches distinctes :

Au début de la filtration, les particules filtrées initialement forment une couche peu dense en surface du medium. Cette couche de particules n'est alors pas soumise à de grandes forces de pression car la perte de charge est peu importante en début de colmatage. Pendant cette première étape de colmatage en surface, le gâteau reste donc incompressible ; sa résistance à la compression n'a pas encore été vaincue. Dès lors que les forces de pression dépassent la solidité de structure initiale du gâteau (ou résistance à la compression), la compression de la couche de particules débute. Cependant, le phénomène est complexe car cette compression du gâteau entraîne une augmentation simultanée de sa résistance à la compression. La résistance à la compression du gâteau augmente d'abord lentement car peu de particules se réorganisent dans la structure. Puis, lorsque les forces de pression continue d'augmenter, les particules sont de plus en plus nombreuses à se réorganiser au sein du gâteau. Une fois que les particules se sont suffisamment bien réarrangées et que leur déplacement est devenu impossible, la compression maximale est alors atteinte et la couche de particules est incompressible.

Pour résumer les travaux de Höflinger (1998), le gâteau se décompose en trois couches :

- une couche supérieure compressible et de faible compacité, mais non-compressée ;
- une couche intermédiaire compressée mais encore compressible ;
- une couche inférieure incompressible et de forte compacité, proche de la surface filtrante du medium.

Cette approche est intéressante mais il existe cependant une autre explication pour interpréter ce phénomène. Elle consiste à dire qu'au fur et à mesure du colmatage, il se produit une augmentation de l'efficacité de filtration et, par là même, une augmentation du nombre de particules collectées dans le dépôt. Certaines nouvelles particules pénètrent ou migrent dans l'épaisseur du gâteau pour venir combler la porosité des parties les plus profondes de cette couche de particules et faire ainsi augmenter la compacité.

Schmidt (1993, 1995, 1997), grâce à une détermination par imagerie du profil de compacité au sein du gâteau, avait déjà montré que ce paramètre augmentait avec la distance par rapport à la surface externe du gâteau. Dans le voisinage du medium filtrant, la compacité augmente d'autant plus que la perte de charge est élevée. Dans les couches supérieures externes du gâteau, la porosité est d'environ 85 %.

La figure AIII.1, issue des travaux de Choi et al. (2004) sur les filtres céramiques, complète les explications apportées par Höflinger (1998). Elle montre schématiquement comment la compression du gâteau se traduit pour une courbe d'évolution de l'épaisseur du gâteau en fonction de la masse surfacique collectée, selon le modèle de construction proposé par Schmidt 1997.

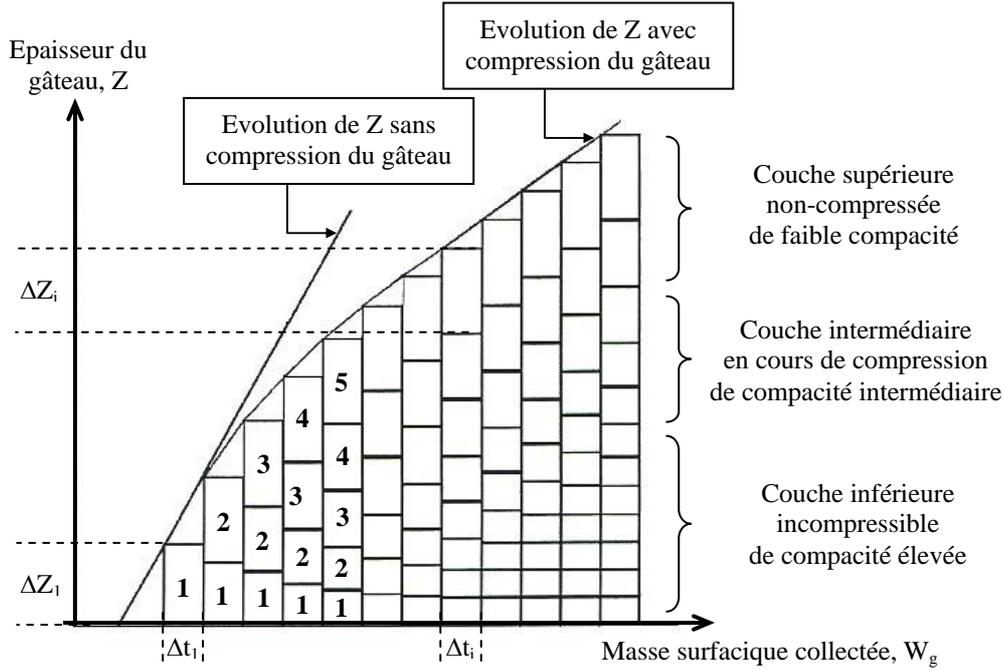


Figure AIII.1 : Schéma de l'évolution de l'épaisseur du gâteau sous l'effet de sa compression (Choi et al. (2004)).

Dans ce modèle, la couche de particules est divisée en de nombreuses couches ayant chacune l'épaisseur du gâteau qui s'est déposé pendant l'intervalle de temps Δt_i correspondant à une épaisseur ΔZ_i . Après un intervalle de temps Δt_1 , la première couche d'épaisseur ΔZ_1 s'est formée sur la surface du medium. Puis pendant la courte période suivante, une seconde couche se forme par dessus la première couche. La première couche est compressée et se tasse sous l'effet des forces de pression créées par la perte de charge développée par la seconde couche. Lorsque la troisième couche se forme, la première couche se tasse de nouveau sous l'effet de la somme des forces de pression résultant de la deuxième et de la troisième couche. Par conséquent, la porosité et l'épaisseur des couches de particules formées précédemment sont réduites au fur et à mesure que la masse surfacique de particules déposées augmente. La pente d'évolution de Z devient constante après une certaine quantité de particules déposées car les couches de particules, après une certaine épaisseur minimale limite deviennent incompressibles. D'autres résultats expérimentaux montrent que la compacité du dépôt croît exponentiellement avec l'épaisseur du gâteau.

Au final, cette description rejoint l'approche structurale en trois couches de compacités distinctes proposée par Höflinger (1998).

Choi et al. (2004) se sont également interrogés sur la possibilité d'obtenir une description théorique de l'évolution de la perte de charge incluant l'effet de la compression du gâteau. Se basant sur les travaux de Endo et al. (1998), ils proposent une équation analytique de la perte de charge du gâteau qui prend en compte la distribution en taille des particules et le facteur de forme dynamique des particules :

$$\Delta P_g = \frac{2970 \cdot \mu \cdot \kappa_a \cdot (\alpha_g)}{(1 - \alpha_g)^4} \cdot [\rho_p \cdot d_p^2 \cdot \exp(4 \cdot \ln^2(\sigma_g))]^1 \cdot U_f \cdot W_g \quad (\text{AIII.1})$$

avec κ_a le facteur de forme dynamique d'une particule défini comme le rapport de la résistance à l'écoulement de la particule pour une vitesse donnée avec la résistance à l'écoulement d'une sphère de même volume pour la même vitesse

$$\kappa_a = \frac{Cu_v}{Cu_s} \cdot \frac{d_v^2}{d_s^2} \quad (\text{AIII.2})$$

- d_s diamètre de Stokes de la particule (correspondant à la vitesse terminale de chute, déterminé par la méthode de sédimentation) ;
- d_v diamètre équivalent en volume ;
- Cu_v facteur de correction de Cunningham de la particule de diamètre d_v ;
- Cu_s facteur de correction de Cunningham de la particule de diamètre d_s .

σ_g l'écart type géométrique de la distribution en taille de particules.

α_g la compacité globale du gâteau de filtration, qui est elle-même régi par l'équation AIII.3 lorsque la structure est soumise à la compression :

$$\alpha_g = \left(0,88 - 0,37 \cdot W_g^{0,25} \cdot U_f^{0,36}\right) U_f^{0,36} \cdot W_g^{0,25} \quad (\text{AIII.3})$$

Ces équations décrivent les effets complexes relatifs aux propriétés des particules, aux conditions opératoires et aux effets de compressibilité. Elles comportent par contre le désavantage de n'être valable que pour l'aérosol test utilisé par Choi et al. (2004) : de fines particules de cendres volantes provenant d'une centrale de combustion de charbon et répondant à certains critères spécifiques ($d_g = 2,2 \mu\text{m}$; $\sigma_g = 1,6$; $\kappa_a = 1,28$). D'autres travaux sur le sujet soulignent en effet la difficulté d'obtenir une équation fiable qui soit applicable dans un cas général. Cela vient du fait que la filtration dépend de nombreux facteurs interdépendants comme les propriétés des particules (forme, taille et masse volumique), la surface filtrante du medium, les propriétés du gaz porteur (masse volumique, viscosité et taux d'humidité) et des conditions opératoires (vitesse de filtration et méthode de décolmatage).

Schmidt (1997) propose une équation empirique pour le calcul de la résistance à la compression maximale, σ_{max} , que peut accepter un gâteau sans que sa structure ne se tasse :

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{a \cdot (\alpha_g)^b}{(0,524 - \alpha_g)} \quad (\text{AIII.4})$$

Les constantes a et b sont des paramètres d'ajustement qui ne possèdent pas de signification physique précise. La résistance à la compression est négligeable pour des compacités proches de 0 et infinie pour des porosités proches de 0,524. L'utilisation de cette équation est cependant restreinte car aucune information concrète n'est disponible sur les constantes a et b.

ANNEXE IV : PRESENTATION DES GENERATEURS DE PARTICULES**GENERATEUR DE PARTICULES PALAS BEG 1000 S**

Le schéma de ce générateur est donné sur la figure suivante :

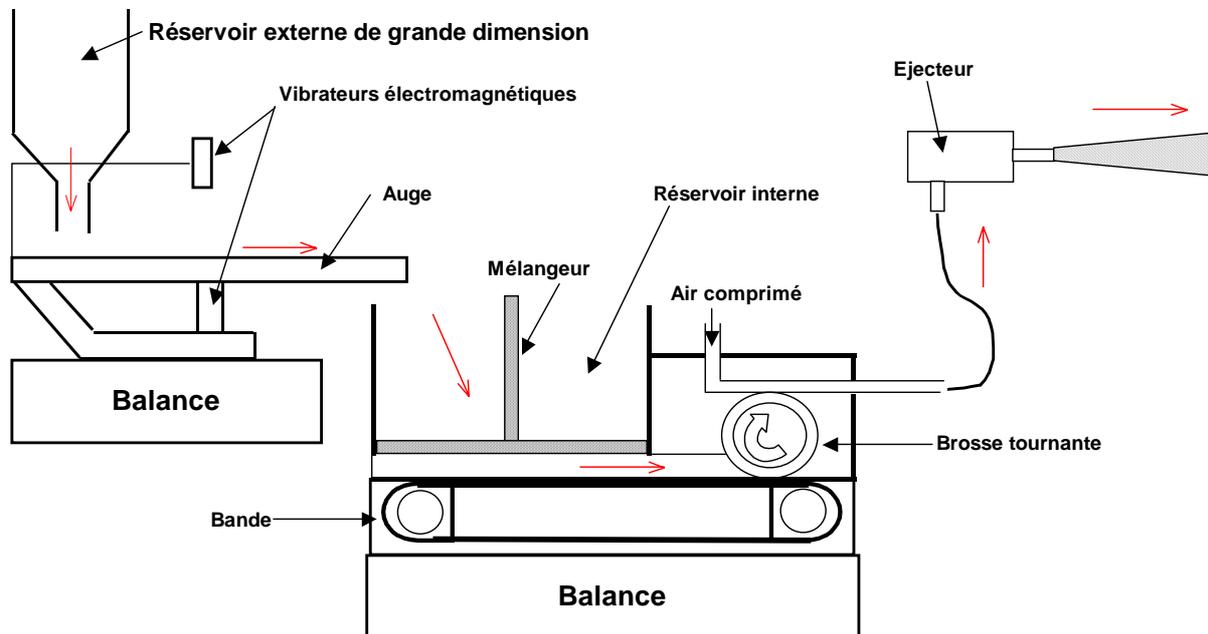


Figure AIV.1 : Schéma du générateur de particules PALAS BEG 1000 S.

Le principe de fonctionnement repose sur la mise en contact d'une quantité de particules solides avec une brosse tournante, qui les entraîne dans un flux d'air jusqu'à un système de dispersion. Les particules sont placées dans un réservoir interne muni d'un mélangeur qui brasse la poudre avant qu'elle ne se dépose sur une bande qui défile et qui emmène les particules jusqu'à la brosse. Au-dessus de cette dernière se trouve une arrivée d'air comprimé, tangentielle, dont le débit, constant, permet d'entraîner les poussières.

Ce générateur a pour autre caractéristique d'être équipé d'un réservoir externe de poudre de grande dimension et d'une trémie vibrante, permettant ainsi la génération en continu d'une quantité quelconque d'aérosol. En effet, la recharge du réservoir externe ne nécessite pas l'arrêt de la génération : la trémie vibrante recharge automatiquement le réservoir de poudre interne au générateur lorsque cela est nécessaire. Des systèmes de pesées en continu permettent d'automatiser l'alimentation en poudre du générateur et de déclencher la recharge lorsque un seuil minimum est atteint. Ils permettent également de suivre en direct, sur ordinateur, l'évolution de la masse générée en fonction du temps.

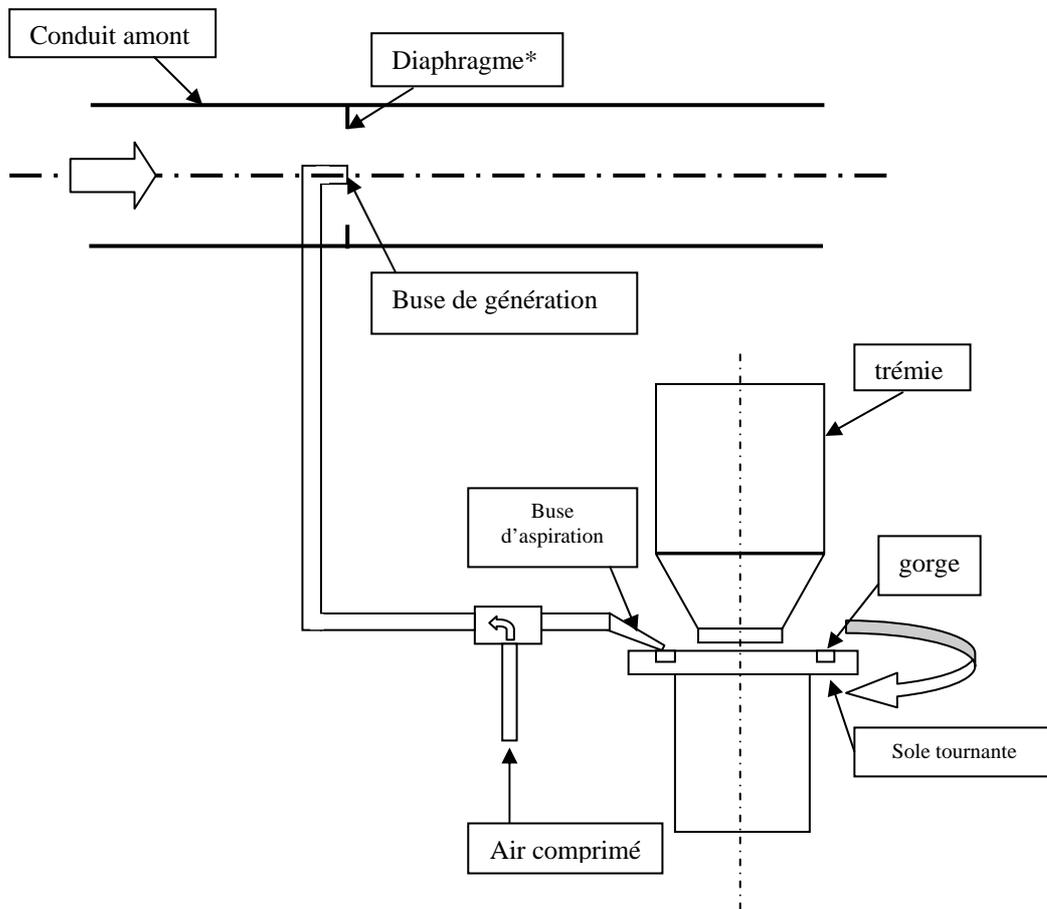
La mise en route se fait en plusieurs temps. L'air d'entraînement est tout d'abord admis dans le générateur puis l'alimentation se fait par déclenchement du défilement de la bande et de la brosse tournante. La brosse tournante possède une vitesse de rotation fixe alors que la vitesse de déroulement de la bande peut varier entre 0,5 et 10 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

La concentration en particules dépend de la vitesse de déroulement de la bande et le débit massique peut varier, en conséquence, de quelques dizaines de $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$ à 2,5 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$.

Le générateur permet, via son éjecteur, la génération de particules non cohésives dont les diamètres peuvent varier entre 0,5 et 200 μm .

GENERATEUR DE PARTICULES A SOLE TOURNANTE

Le schéma de ce générateur est donné sur la figure AIV.2.



*Un diaphragme est placé au niveau de la buse de génération afin de créer des turbulences et d'homogénéiser le flux de poussières dans le conduit

Figure AIV.2 : Schéma du générateur de particules à sole tournante.

Le principe de fonctionnement repose sur l'aspiration des particules contenues dans la gorge d'une sole tournante et préalablement stockées dans une trémie. Les particules se déposent de manière régulière dans la gorge de la sole tournante au fur et à mesure de son mouvement circulaire. Les poussières sont ensuite aspirées par effet Venturi à l'aide d'une buse d'aspiration alimentée en air comprimé afin d'envoyer les particules vers la buse d'injection située au centre du conduit amont. Le réglage de la vitesse de rotation de la sole permet de modifier le débit de génération des poussières.

La connaissance des dimensions de la gorge et de la vitesse de rotation de la sole permet de déterminer le débit massique généré pour un aérosol donné. Il existe différents types de sole avec des gorges plus ou moins larges. La concentration en particules dans le conduit amont et le débit massique peuvent varier, par conséquent, de quelques dizaines de mg.s^{-1} à quelques g.s^{-1} .

Ce générateur est difficile d'utilisation lorsque les particules sont très agglomérantes. De plus, l'abrasion des particules peut rapidement détériorer le système d'aspiration de la gorge ou les tuyaux dans lesquels sont véhiculés les poussières avant leur génération.

GENERATEUR DE PARTICULES PARIMIX 'DZ 2 DMR 30 A'

Le schéma de ce générateur est donné sur la figure AIV.3.

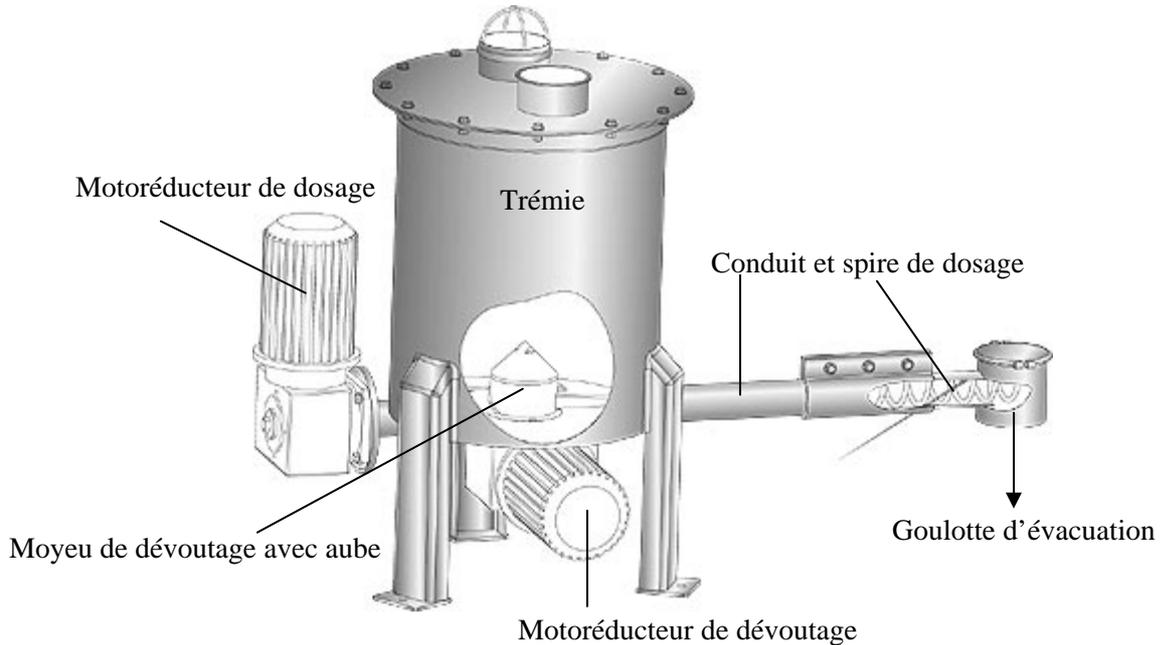


Figure AIV.3 : Schéma du générateur de particules PARIMIX 'DZ 2 DMR 30 A'.

Les particules sont placées dans la trémie qui fait office de cuve de réserve. Un système de dévoutage à aube est situé en bas de cette trémie et assure à la fois les fonctions de remplissage de la spire de dosage et de dévoutage des poussières dans la cuve de réserve. Ceci permet d'alimenter en continu le conduit de dosage en poussières, en permettant la descente du produit à générer sans agitation permanente de celui-ci. Le moyeu de dévoutage a été conçu de telle manière que le conduit de dosage soit toujours rempli, quelle que soit la charge dans la trémie. Ceci permet d'obtenir une parfaite régularité de débit massique.

La spire de dosage, assimilable à une vis sans fin, sert ensuite à transporter les poussières le long du conduit de dosage et leur évacuation dans le conduit amont du dépoussiéreur est effectuée via la goulotte, préalablement connectée au conduit.

La concentration en particules dépend de la vitesse de rotation de la spire de dosage et le débit massique peut varier, en conséquence, de quelques dizaines de mg.s^{-1} à quelques g.s^{-1} . Il peut par exemple se calculer de manière simple, par empotage d'une masse connue de particules en un temps donné.

Contrairement aux deux précédents générateurs de particules qui sont sujets à des bourrages lorsque les poussières tests ne sont pas parfaitement « fluides », cet appareil permet de générer des poussières plus grossières pouvant par exemple comporter de petits granulats, des copeaux ou encore des fibres.

ANNEXE V : DISTRIBUTIONS GRANULOMETRIQUES EN VOLUME DES AEROSOLS GENERES LORS DES ESSAIS

Aérosol	Provenance	d_{pm} (μm)	σ_g	Banc d'essais	Analyse granulométrique disponible
Alumine1	AGP L'abrasienne Corindon Blanc 1200 (2002)	2,5	1,47	Dépoussiéreur à poches Dépoussiéreur pilote à manches	Oui
Alumine2	AGP L'abrasienne Corindon Blanc 1200 (2003)	3,1	1,47	Dépoussiéreur pilote à manches	Oui
Alumine3	DX5R (< 2000)	4,6	1,5	Banc media plans	Oui
Alumine4	Contrat INRS F1200	6	?	Dépoussiéreur à poches	Non
Alumine5	Contrat INRS F400	35	?	Dépoussiéreur à poches	Non
Bois1	Ebénisterie (< 2001)	16,5	1,93	Dépoussiéreur à poches	Oui
Bois2	Ebénisterie (2005)	33,8	2,05	Dépoussiéreur pilote à manches	Oui

Tableau AV.1 : Récapitulatif des caractéristiques et des utilisations des différents aérosols testés.

Alumine1 : Alumine de type corindon blanc 1200 (2002)

Diamètre médian (μm)	2,5
Ecart-type géométrique	1,47

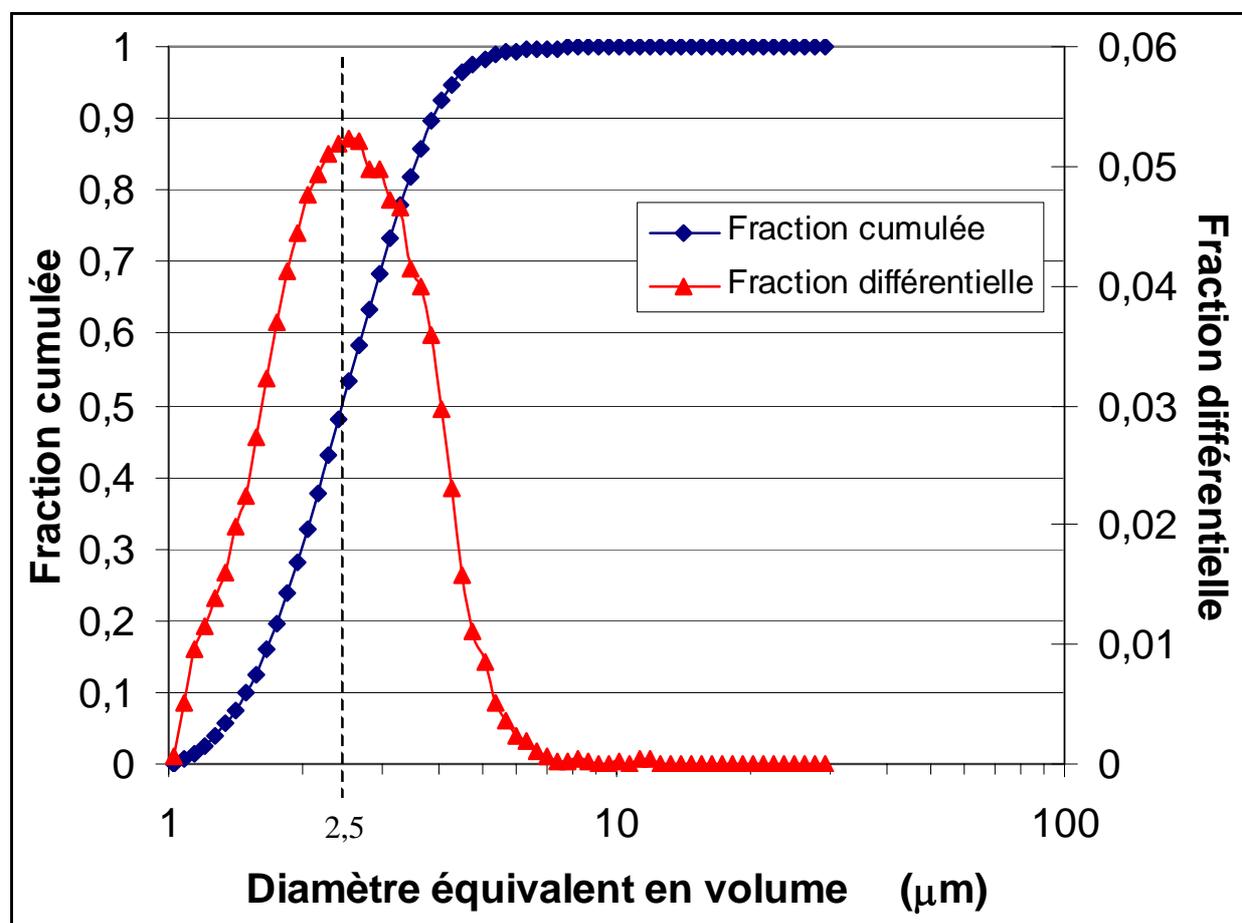


Figure AV.1 : Distribution granulométrique en volume et fraction cumulée pour l'aérosol d'Alumine1.

Alumine2 : Alumine de type corindon blanc 1200 (2003)

Diamètre médian (μm)	3,1
Ecart-type géométrique	1,47

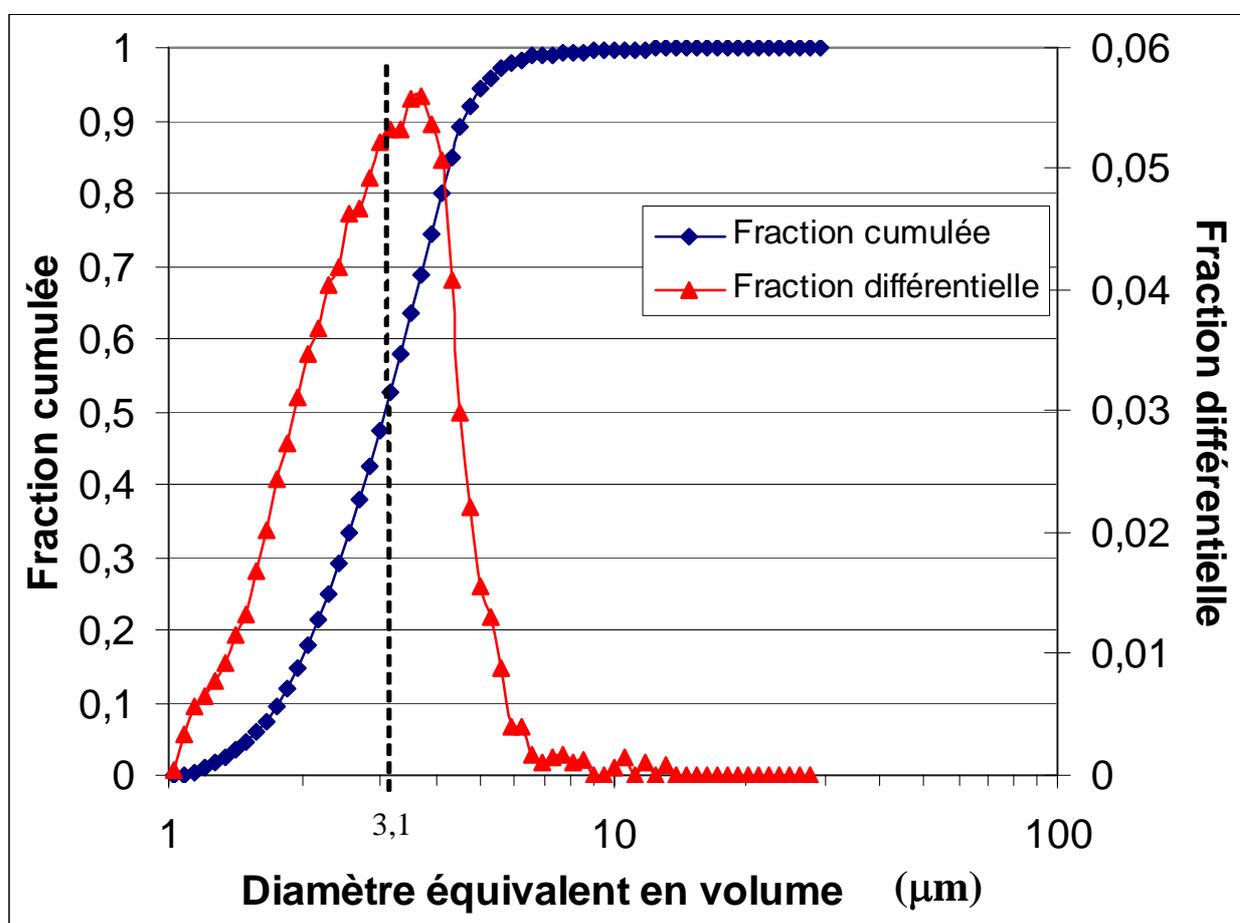


Figure AV.2 : Distribution granulométrique en volume et fraction cumulée pour l'aérosol d'Alumine2.

Alumine3 : Alumine de type DX5R (< 2000)

Diamètre médian (μm)	4,6
Ecart-type géométrique	1,5

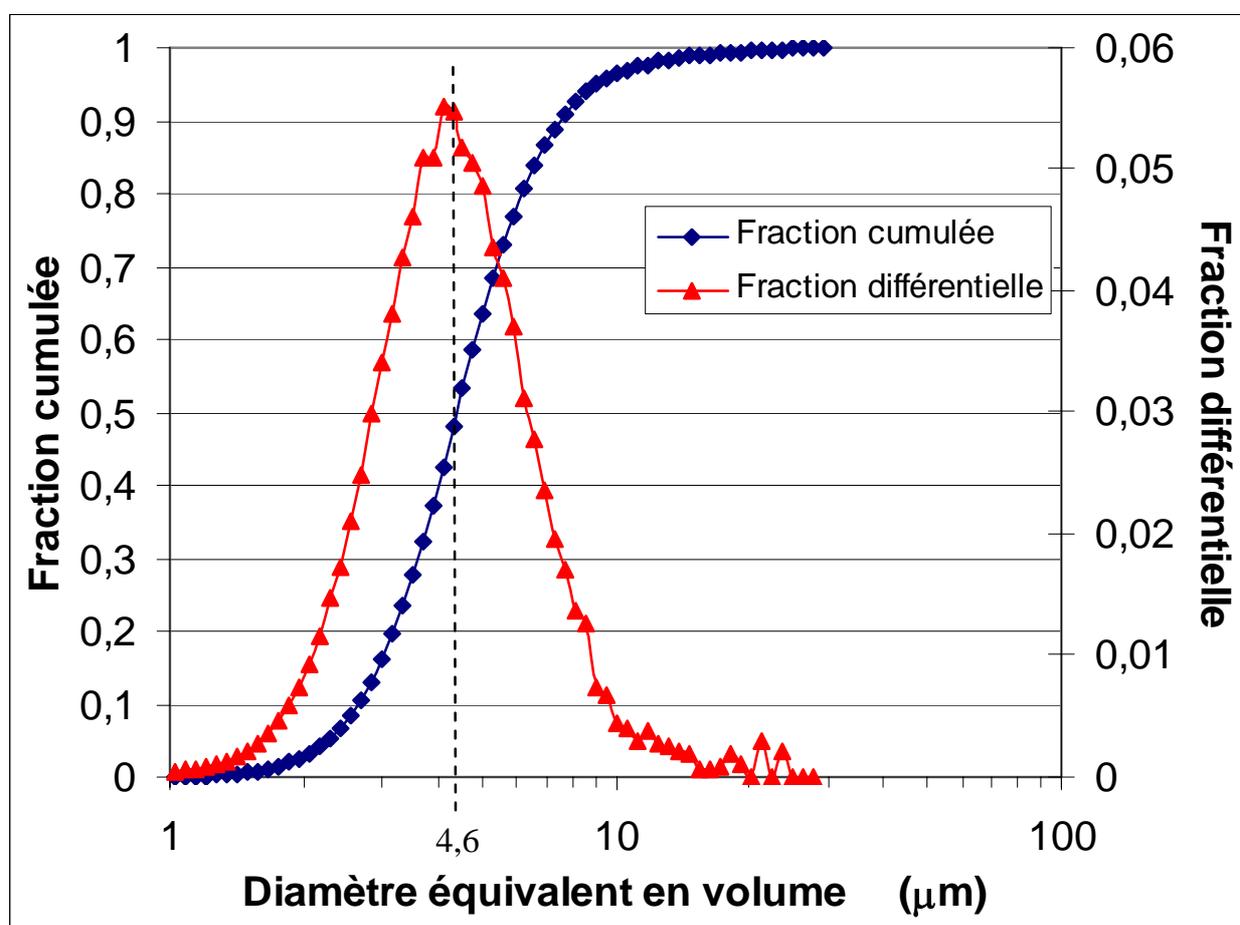


Figure AV.3 : Distribution granulométrique en volume et fraction cumulée pour l'aérosol d'Alumine3.

Bois1 : Poussières de ponçage provenant d'une ébénisterie (< 2001)

Diamètre médian (μm)	16,5
Ecart-type géométrique	1,93

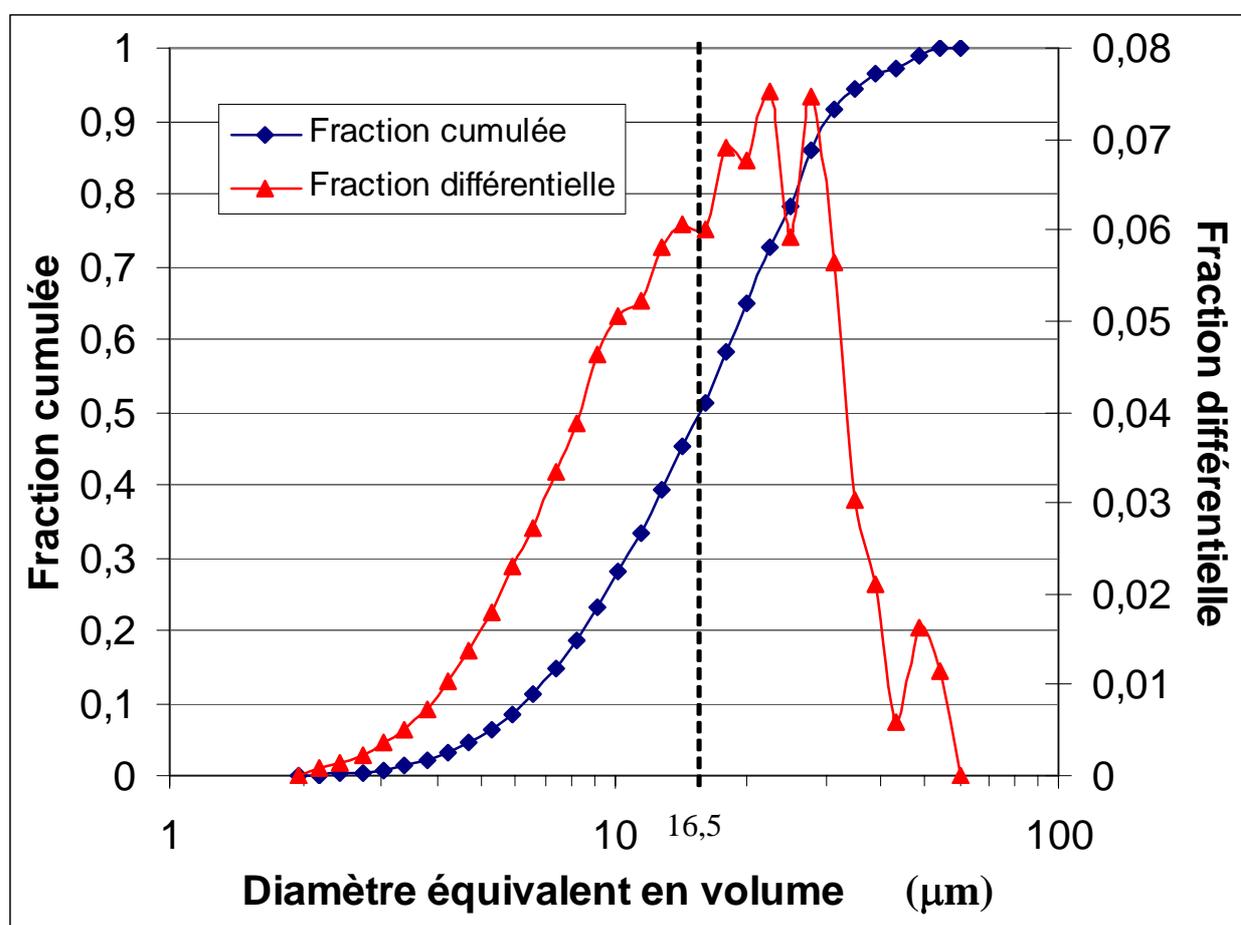


Figure AV.4 : Distribution granulométrique en volume et fraction cumulée pour l'aérosol de Bois1.

Bois2 : Poussières de ponçage provenant d'une ébénisterie (2005)

Diamètre médian (μm)	33,8
Ecart-type géométrique	2,05

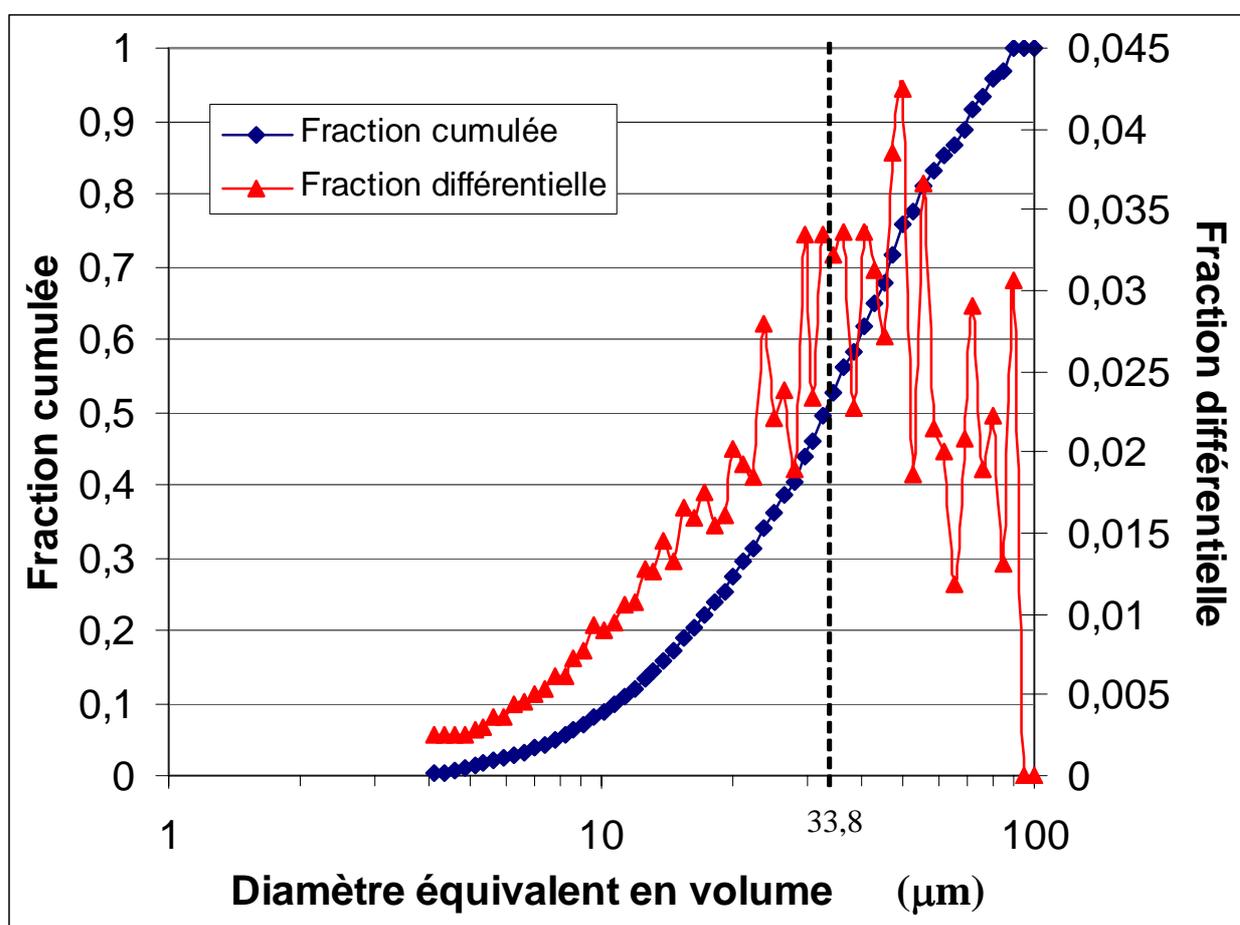


Figure AV.5 : Distribution granulométrique en volume et fraction cumulée pour l'aérosol de Bois2.

ANNEXE VI :
- PRESENTATION DU BANC D'ESSAIS POUR MEDIA PLANS -
MATERIEL ET METHODES POUR LA DETERMINATION DE L'EFFICACITE DE
FILTRATION D'UN MEDIA FILTRANT

Présentation du banc d'essais pour media plans

Le schéma du banc d'essais est représenté sur la figure AVI.1.

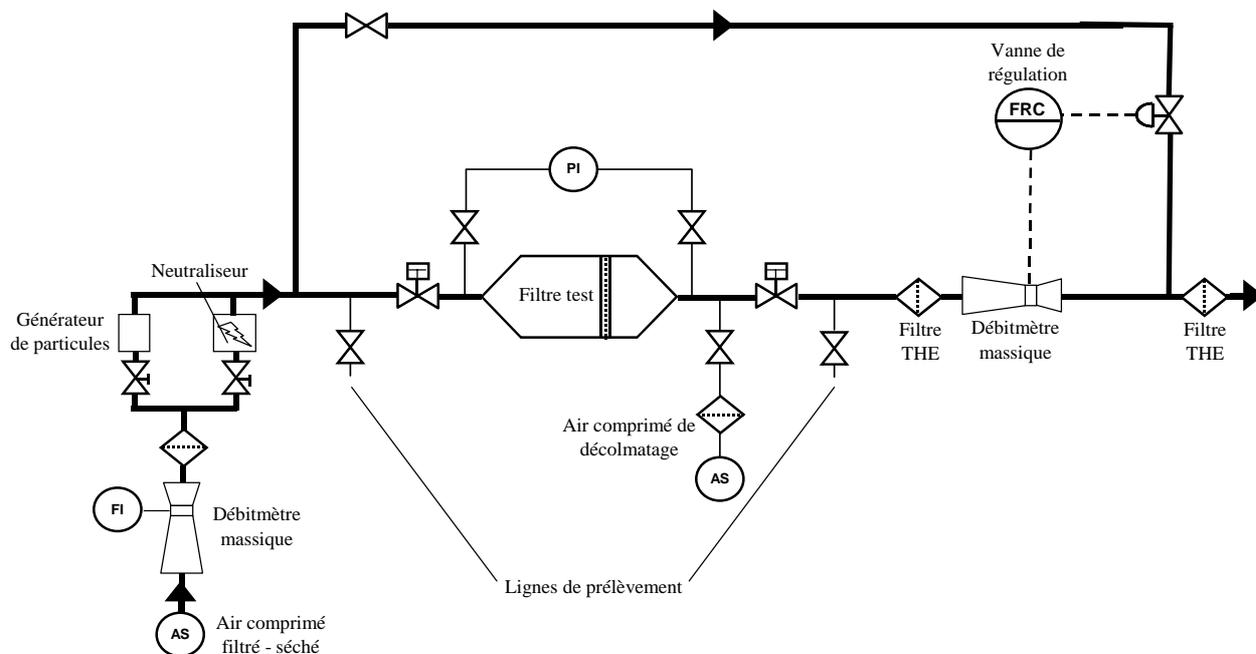


Figure AVI.1 : Schéma du banc d'essais pour media plan.

Ce banc d'essais a été conçu pour l'étude des performances de media filtrants utilisés en dépolluissage industriel soumis à des cycles de colmatage par des aérosols solides et de décolmatage par air comprimé injecté à contre-courant.

Le contrôle du débit qui passe à travers le medium est assuré par un système de régulation et un by-pass. De ce fait, le débit d'air est maintenu constant quel que soit l'état de colmatage du filtre. Le débit volumique traversant le filtre est mesuré en continu au moyen d'un débitmètre massique (BROOKS 5861S, 0 – 100 NL.min⁻¹) placé à l'aval du porte-filtre. La valeur du débit est comparée à la valeur de consigne programmée au niveau du régulateur et chaque écart à cette consigne entraîne un réajustement du régulateur de débit par la commande l'ouverture ou la fermeture de la vanne de régulation électropneumatique.

L'élément testé est un échantillon plan de medium filtrant de diamètre égal à 130 mm. Le porte-filtre a été choisi de forme cylindrique pour limiter les turbulences dans le flux empoussiéré arrivant à la surface du medium filtrant. Deux hublots latéraux permettent, à tout moment, de visualiser la surface collectrice du medium filtrant.

Le suivi de la perte de charge en continu est assuré par des prises de pression de part et d'autre du porte-filtre, qui sont reliées à un transmetteur de pression différentielle. Une carte d'acquisition analogique permet de faire l'acquisition de ces mesures.

Le décolmatage par à-coup de pression est mis en œuvre par l'installation d'une arrivée d'air comprimé à l'aval du medium filtrant. La buse d'envoi de cet air sur la surface propre du medium filtrant est dimensionnée pour avoir des conditions de régime sonique de l'air en sortie. Le schéma de l'ensemble de décolmatage est présenté sur la figure AVI.2.

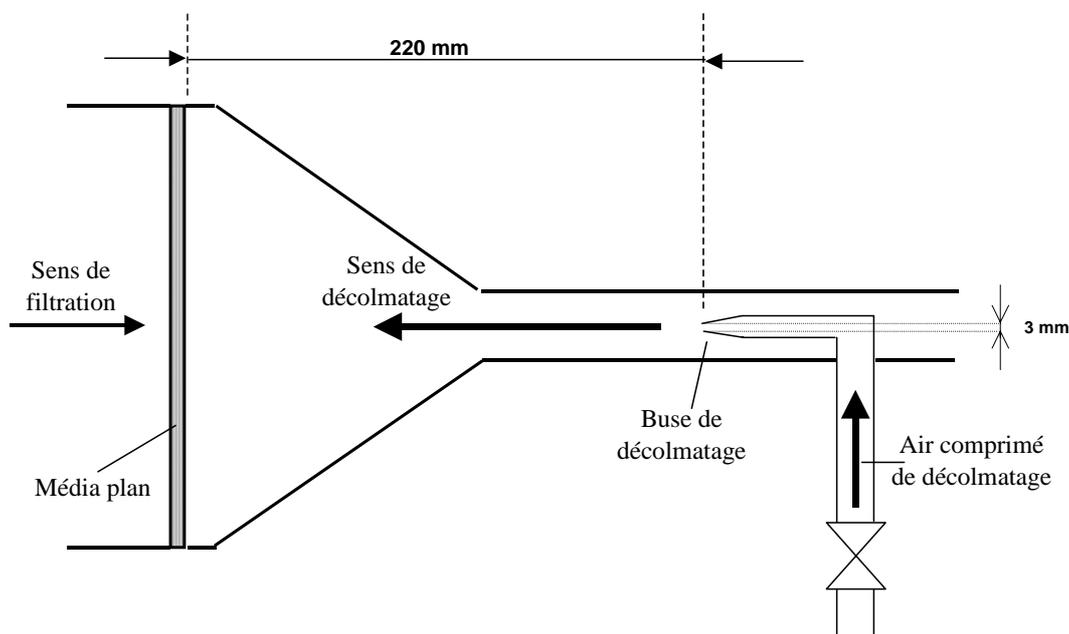


Figure AVI.2 : Schéma de la buse de décolmatage du banc d'essais pour media plans.

La vanne d'admission d'air à l'aval du medium filtrant est temporisée. Son temps d'ouverture, variable de 0,2 à 1 seconde, est fixé à une valeur constante pour chaque cycle et est suffisamment court pour assurer le choc de pression. Ainsi, le décolmatage peut être réglé à une intensité égale pour chaque cycle.

Matériel et méthodes pour la détermination de l'efficacité initiale d'un medium

La méthode est celle décrite dans la norme EN 779 (1998). Le principe repose sur le prélèvement alterné à l'amont et à l'aval du medium filtrant d'un aérosol test polydispersé par un compteur optique (moyennant ou non dilution). Cette méthode nécessite la génération d'un aérosol dont les propriétés optiques sont compatibles avec l'étalonnage interne du compteur. L'indice de réfraction de référence pour les compteurs optiques utilisés était celui du PolyStyrène Latex (PSL), égal à 1,59.

Un aérosol de KCl a été ici préféré au PSL pour des facilités d'approvisionnement et de manipulation. Son indice de réfraction étant de 1,49, cet écart sera à prendre en compte si une détermination des diamètres de classes du compteur en équivalent KCl est souhaitée. Bémer et Fabries (1990) ont donné une comparaison des réponses données par un compteur optique, du type de ceux utilisés dans cette étude, pour différents indices de réfraction.

L'écart obtenu est très faible, ce qui autorise l'utilisation du KCl comme aérosol test dans la mesure de l'efficacité fractionnelle de filtration. L'erreur commise sur la mesure du diamètre particulaire, liée à la différence de l'indice de référence égal à 1,59 par rapport à l'indice des particules que nous générons, est faible, inférieure à 10%.

Le système de génération de l'aérosol de KCl est présenté sur la figure AVI.3.

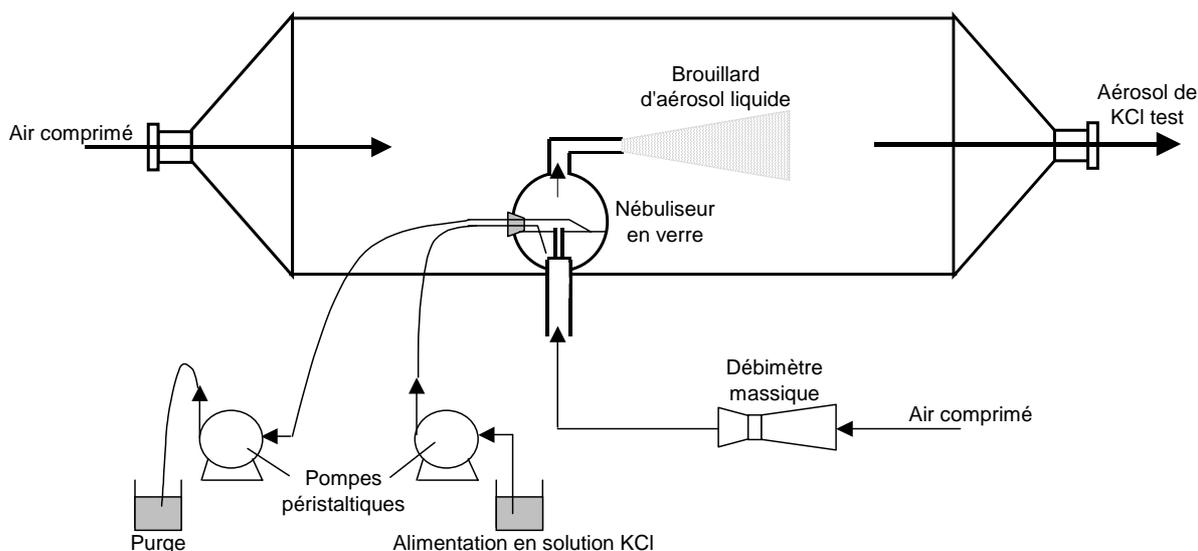


Figure AVI.3 : Générateur d'aérosol test de KCl pour la mesure d'efficacité fractionnelle de filtration.

Un nébuliseur en verre (deVilbiss, model 40) est alimenté d'une part par une solution de KCl à 10 g.L^{-1} dans de l'eau désionisée et d'autre part par de l'air à un débit régulé par un débitmètre massique (Bronkhorst Hi-Tech B.V., $0\text{--}14 \text{ NL.min}^{-1}$). Cet air entraîne la nébulisation de la solution de KCl. Des gouttelettes sont générées et séchées par un courant d'air d'entraînement. L'ensemble est en effet placé dans une enceinte dimensionnée en longueur pour permettre à l'aérosol généré sous forme de gouttelettes de sécher avant d'arriver dans le conduit principal du banc d'essais. Le diamètre médian aérodynamique en masse de l'aérosol de KCl généré est de $2,1 \mu\text{m}$ et son écart-type géométrique de 2,2.

Le prélèvement se fait ensuite alternativement à l'amont et à l'aval du medium filtrant. Un système d'acquisition relié au compteur optique permet d'enregistrer les six séquences de mesures amont / aval prévues par la norme. Les prélèvements amont et aval sont réalisés en respectant les conditions d'isocinétisme. Pour faciliter la mise en application de cette méthode, un distributeur à trois voies est utilisé pour que les prélèvements se fassent sur le même appareil et limitant ainsi les erreurs de mesure. Chaque mesure dure 20 secondes et le temps de pause prévu pour modifier les vannes et purger le compteur est de 30 secondes également. La figure 4 représente la chaîne de prélèvement pour le comptage optique qui vient se greffer sur les lignes de prélèvement indiquées sur la figure 1.

L'efficacité fractionnelle est ensuite calculée à partir de ces comptages suivant la norme EN 779. L'efficacité granulométrique qui a été mesurée est le rapport, en pourcentage, de la différence des concentrations amont et aval, sur la concentration amont. Ces concentrations sont exprimées en nombre de particules par unité de volume d'air et sont mesurées pour chaque classe granulométrique. Les concentrations ont ainsi été mesurées à l'amont et à l'aval du medium filtrant à l'aide d'un compteur optique de particules à source laser (compteur Lasair 1001 de la société PMT France). Ce type d'appareil, qui utilise les propriétés de la lumière diffusée, permet la mesure de la répartition granulométrique des particules d'alumines testées entre $0,1$ et $5 \mu\text{m}$.

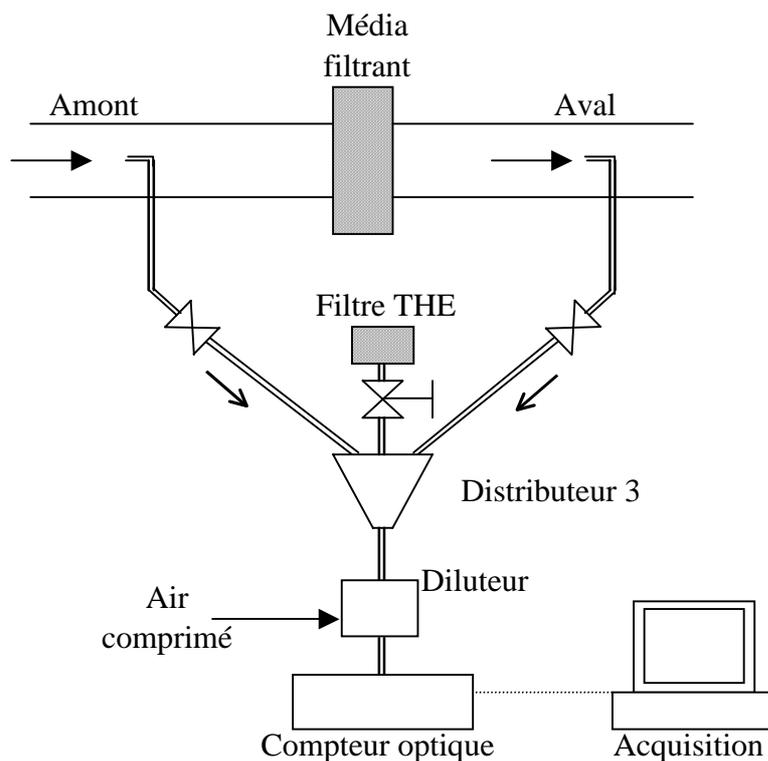


Figure AVI.4 : Lignes de prélèvement pour le comptage optique.

Le diamètre délivré par le compteur de particules, dp_{opt} , est un diamètre optique, égal au diamètre géométrique de la particule si celle-ci est de forme sphérique et son indice de réfraction égal à l'indice des particules utilisées pour la calibration du compteur (latex, $n_{ref} = 1,59$). Dans le cas présent, on peut estimer que ces deux critères sont effectivement respectés.

Ce banc d'essais pour media plans a fait l'objet de travaux de doctorat concernant l'étude des performances des media filtrants utilisés en dépolluissage industriel. De plus nombreuses informations quant à son fonctionnement sont disponibles dans le rapport de thèse de Sandrine Callé (2000).

ANNEXE VII : PRESENTATION DU DEPOUSSIEREUR A POCHE

Ce banc d'essais est implanté sur le site de recherche de l'INRS de Vandoeuvre les Nancy. Un schéma de cette installation est fourni sur la figure AVII.1.

L'installation comprend, d'amont en aval, les éléments suivants :

- un caisson réduit à l'aspiration équipé d'un diaphragme et d'une prise de pression effective permettent de mesurer le débit ;
- un premier caisson de filtration qui, selon les utilisations du banc, peut être équipé ou non de son filtre ASHRAE 95 % ;
- un générateur de particules ;
- une canne de prélèvement de l'aérosol amont destinée à être connectée à un dispositif de comptage optique des particules ;
- le dépoussiéreur industriel de marque TORIT, série DCE F 2018, équipé de prises de pression pour la mesure de la perte de charge aux bornes des filtres ;
- une canne de prélèvement de l'aérosol aval destinée à être connectée à un dispositif de comptage optique des particules ;
- un caisson de filtration terminal comportant un filtre ASHRAE 99 %

Le dépoussiéreur est implanté à l'extérieur et un abri permet de protéger le matériel et les opérateurs.

1	Caisson réduit à l'aspiration
2	Filtre ASHRAE 95 %
3	Générateur de particules
4	Accès ligne de prélèvement pour le comptage optique
5	Organe de réglage du débit
6	Dépoussiéreur à poches filtrantes
7	Trémie
8	Air comprimé de décolmatage
9	Ventilateur
10	Filtre ASHRAE 99 %

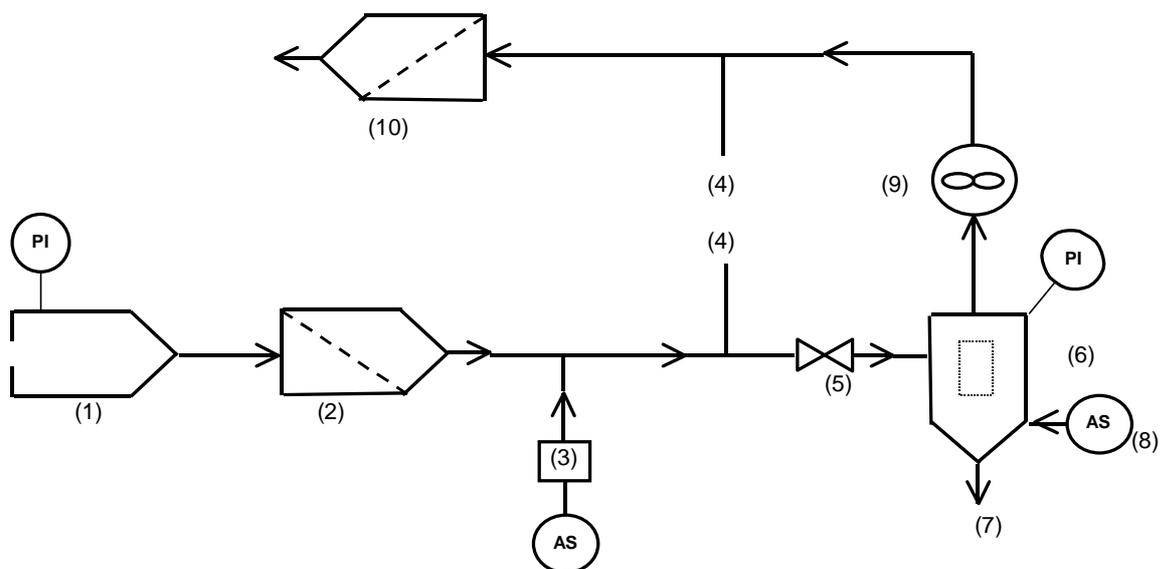


Figure AVII.1 : Schéma du banc d'essais du dépoussiéreur à poches et sa légende.

Les débits de l'installation sont contrôlés à l'aide d'un caisson réduit à l'aspiration. Ainsi, il est possible de suivre l'évolution de la vitesse de filtration en fonction du temps.

Le schéma classique d'un caisson réduit à l'aspiration est le suivant :

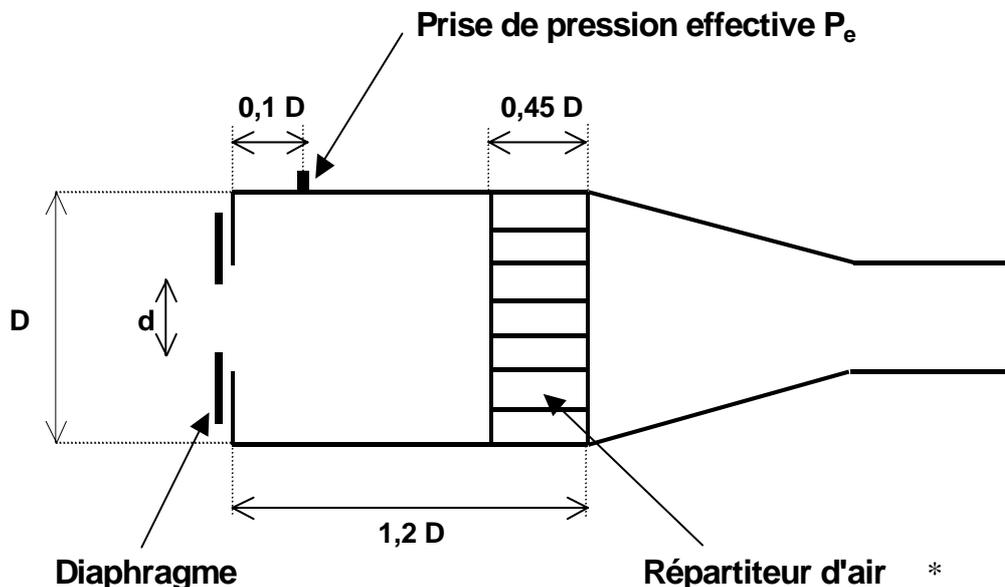


Figure AVII.2 : Schéma d'un dispositif de caisson réduit à l'aspiration.
* type « nid d'abeille », servant à la limitation de la turbulence.

Un tel dispositif permet de déterminer le débit massique de l'installation, connaissant les dimensions du diaphragme et la pression effective engendrée, selon la formule :

$$Q_m = \alpha_d \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_a \cdot P_e} = Q_v \cdot \rho_a \quad \text{avec } \alpha_d \cdot \varepsilon \approx 0,6 \quad (\text{AVII.1})$$

avec α_d le coefficient de débit (-) ;
 ε le coefficient de détente (-) ;
 Q_m le débit massique ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
 Q_v le débit volumique ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;
 d le diamètre intérieur du diaphragme (= 0,25 m dans notre cas) ;
 ρ_a la masse volumique de l'air (valeur corrigée en fonction de la température et de la pression – $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ;
 P_e la valeur de la pression au niveau du caisson réduit à l'aspiration (Pa).

Le suivi en continu de la pression effective du diaphragme permet de suivre le débit d'air de l'installation (ou encore la vitesse de filtration, U_f , imposée aux 12 poches filtrantes).

Avant le début de l'ensemble des expériences, le caisson réduit à l'aspiration a fait l'objet d'une vérification par traçage gazeux au SF_6 . Cette dernière consiste à injecter un débit massique connu de SF_6 à l'entrée de l'installation et à mesurer, à l'aide d'un analyseur Miran 203, la concentration en SF_6 en sortie. Par conservation des débits massiques de l'entrée à la sortie, il est alors possible de déterminer le débit volumique de l'installation.

La génération de particules est assurée par un des générateurs de particules décrits dans l'annexe IV.

Le dépoussiéreur TORIT testé fait partie de la série des filtres intégrés DCE 2000. C'est un dépoussiéreur à décolmatage par air comprimé à contre courant, conçu pour traiter de grandes quantités d'air chargé de poussières. Il est capable de fonctionner en continu pendant de très longues périodes. Le système de nettoyage par air comprimé à contre-courant, qui agit pendant le fonctionnement normal du filtre, sert non seulement à maintenir en permanence une efficacité optimale, mais aussi à permettre au filtre de fonctionner à un débit constant. Ce n'est pas à proprement parler un filtre à manches classique dans la mesure où ses éléments filtrants ne sont pas des cylindres verticaux mais des éléments de forme rectangulaire disposés horizontalement. On parle alors de poches filtrantes (cf. figures AVII.4 et AVII.5).

Un schéma annoté du dépoussiéreur complet (module de base comprenant le groupe d'éléments filtrants, ventilateur et trémie de récupération) est fourni sur la figure AVII.3.

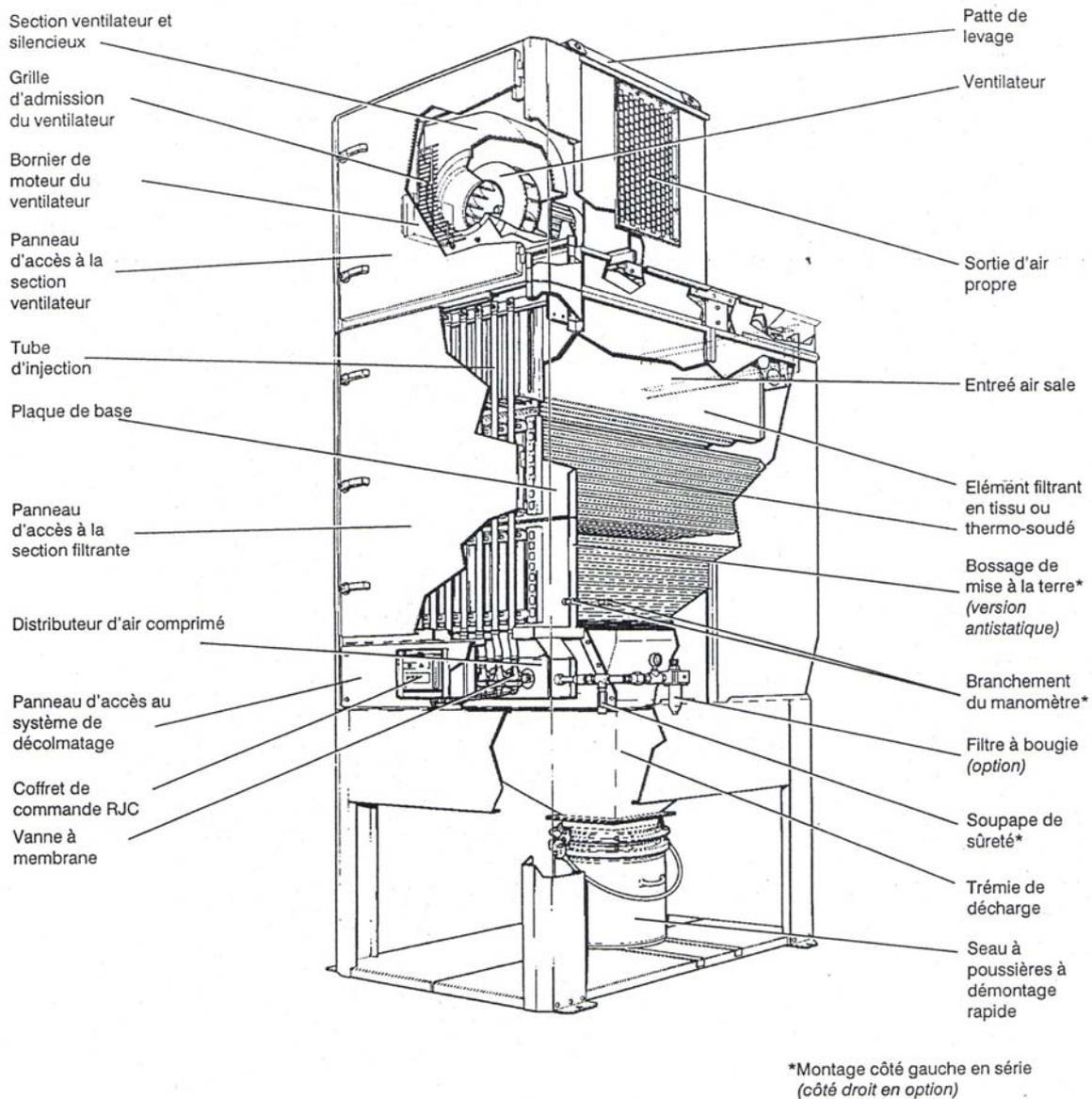


Figure AVII.3 : Schéma type d'un dépoussiéreur TORIT de la série DCE 2000.

Les photos suivantes permettent de mieux se rendre compte de l'implantation du dépoussiéreur et de son aspect :

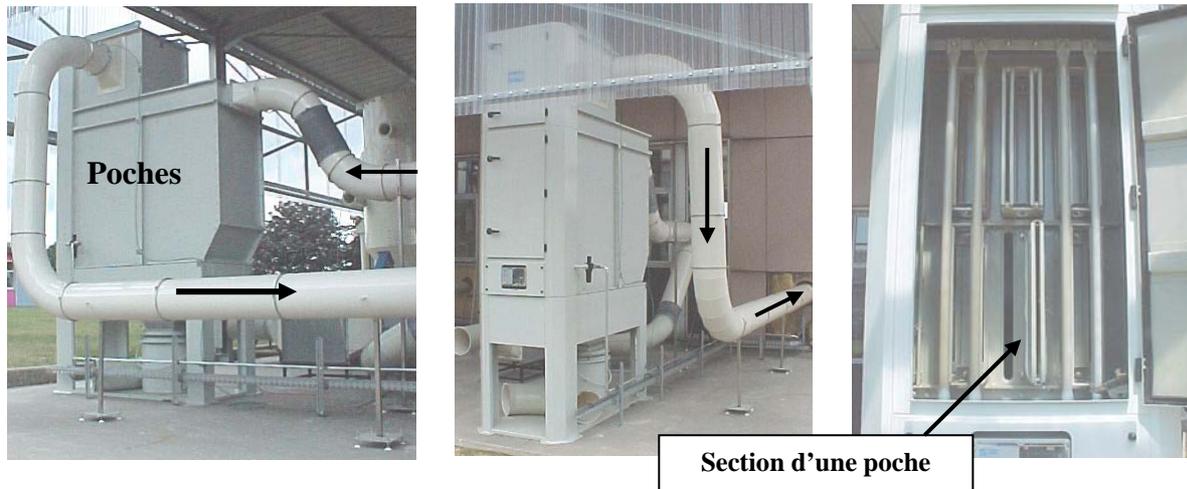


Figure AVII.4 : Photos du dépoussiéreur TORIT DCE F 2018 – Vues d'ensemble et zoom sur le boîtier d'emplacement des poches filtrantes.

Les principales caractéristiques de l'installation sont regroupées dans le tableau AVII.1 :

Dénomination du dépoussiéreur	TORIT DCE F 2018
Longueur du dépoussiéreur	2,1 m
Largeur du dépoussiéreur	0,9 m
Hauteur du dépoussiéreur	3,8 m
Poids du dépoussiéreur	1000 kg
Hauteur des poches	0,5 m
Longueur des poches	1,5 m
Surface d'une poche	1,5 m ²
Nombre de poches	12
Surface de filtration totale	18 m ²
Vitesse de filtration	0,01 à 0,05 m.s ⁻¹
Débit de filtration	800 à 3300 m ³ .h ⁻¹
Moteur du ventilateur	4,0 kW
Diamètre des conduits	0,25 m

Tableau AVII.1 : Principales caractéristiques de l'installation.

Les éléments filtrants sont insérés côte à côte dans la plaque de base, et chaque dispositif d'étanchéité sépare efficacement le côté sale (admission) du filtre du côté propre (sortie), comme le montre la figure AVII.5.

La plaque de base est une structure rectangulaire en tôle, avec brides pour la rigidité, et qui comprend une pièce emboutie percée en acier, dans laquelle les éléments filtrants sont insérés et fixés par étriers (cf. figure AVII.4).

Chaque élément filtrant est de forme rectangulaire et comprend un cadre grillagé sur lequel est soudé un collecteur de sortie en acier avec bride d'étanchéité. L'élément filtrant lui-même consiste en une poche rectangulaire comprenant un joint d'étanchéité côté ouverture. La

poche est glissée sur le châssis métallique jusqu'à que le joint vienne buter contre la bride d'étanchéité. Le joint est comprimé quand l'élément est inséré dans la plaque de base, et isole complètement le côté air sale du côté air propre du filtre.

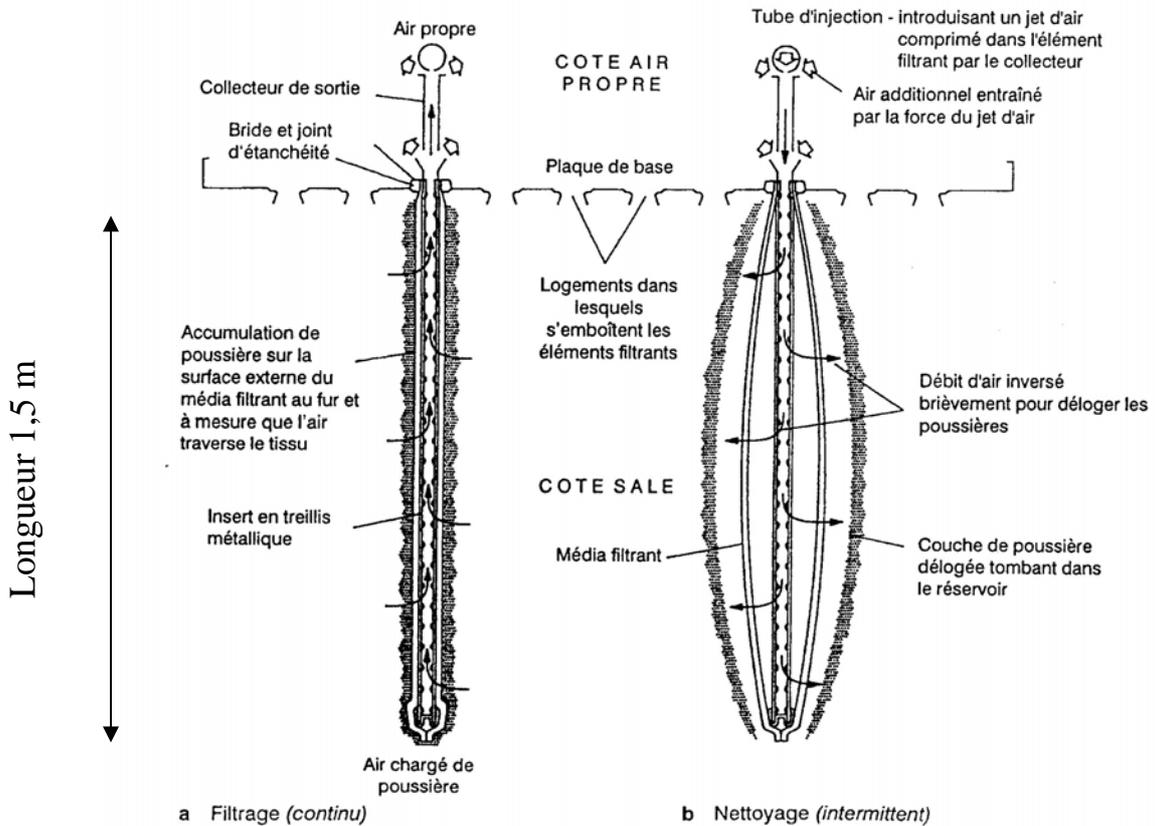


Figure AVII.5 : Coupe de la plaque de base et de deux éléments filtrants, illustrant le principe de fonctionnement des cycles de colmatage / décolmatage du dépoussiéreur.

La longueur d'une poche filtrante est de 1,5 m, pour une surface totale filtrante de 18 m². Les poches filtrantes étudiées sont en polyester avec des traitements de surface du type calandrage thermique ou revêtement par une membrane PTFE.

Une série de tubes d'injection est positionnée sur toute la longueur du côté propre du filtre. Ces tubes sont percés de petits orifices d'injection situés près de la sortie de chaque élément filtrant. Ces orifices constituent le passage du volume d'air de décolmatage à chaque injection d'air comprimé. L'extrémité ouverte de chaque tube est raccordée par un adaptateur à une vanne à air comprimé, et l'autre extrémité, fermée, est aplatée, emboutie et fixée par boulon et écrou.

L'air comprimé est envoyé à chaque tube d'injection par l'intermédiaire d'une vanne à membrane, dont l'ouverture et la fermeture sont contrôlées par une électrovanne pilote connectée à l'évent de la membrane par un tube flexible en Nylon. Entièrement automatique, ce coffret de commande assure le décolmatage séquentiel, à intervalles réguliers, du dépoussiéreur. Le distributeur d'air comprimé est fabriqué à partir d'un tube en acier avec des embouts soudés. Le décolmatage s'effectue tube d'injection par tube d'injection, c'est-à-dire que les poches sont décolmatées successivement deux à deux.

L'équipement de commande du décolmatage est donc constitué du distributeur d'air, des vannes à membrane, des électrovannes et du coffret de commande. Ces éléments sont montés immédiatement au-dessous de la chambre air propre et on y accède par un panneau amovible. La durée d'une impulsion (sur deux poches) de l'à-coup de pression du décolmatage est fixée à 110 ms et est effectuée avec de l'air comprimé entre 2 et 7 bars.

Le ventilateur est logé dans le silencieux, au-dessus de la section filtrante. L'enceinte du dépoussiéreur est formée de panneaux en acier doux, qui permettent un fonctionnement à une dépression de - 5000 Pa environ.

De grandes portes de visite montées sur charnières permettent d'accéder à la chambre d'air propre, pour le démontage des tubes d'injection et des éléments filtrants durant les opérations d'entretien, et donnent également accès au ventilateur.

Le principe de fonctionnement du dépoussiéreur TORIT est classique. L'air chargé de poussières est amené par des conduits dans la chambre où se trouvent les éléments filtrants, et il entre en contact avec toutes les surfaces externes de ces éléments. Un gâteau de particules se forme sur l'extérieur de l'élément filtrant, au fur et à mesure que l'air traverse la surface filtrante. L'air propre sort du collecteur de sortie de chaque élément filtrant pour aller dans la chambre air propre ; de là, il est évacué dans la veine d'essai aval par l'intermédiaire du ventilateur. A intervalles réguliers, contrôlés par le coffret de commande, chaque groupe de deux éléments filtrants reçoit à tour de rôle une brève injection d'air comprimé, à partir de son tube d'injection associé. Ceci entraîne une inversion rapide et puissante du flux d'air qui traverse l'élément filtrant et décroche de manière plus ou moins efficace la couche de poussière, qui tombe alors dans la trémie de récupération (figure AIV.5).

Le lecteur pourra se référer à d'autres publications pour la description complète de ce banc d'essais et pour de plus nombreuses données concernant son fonctionnement (Simon (2002), Simon *et al.* (2002)).

ANNEXE VIII :
CYCLES DE FILTRATION SUR LE DEPOUSSIÉREUR A MANCHES PILOTE

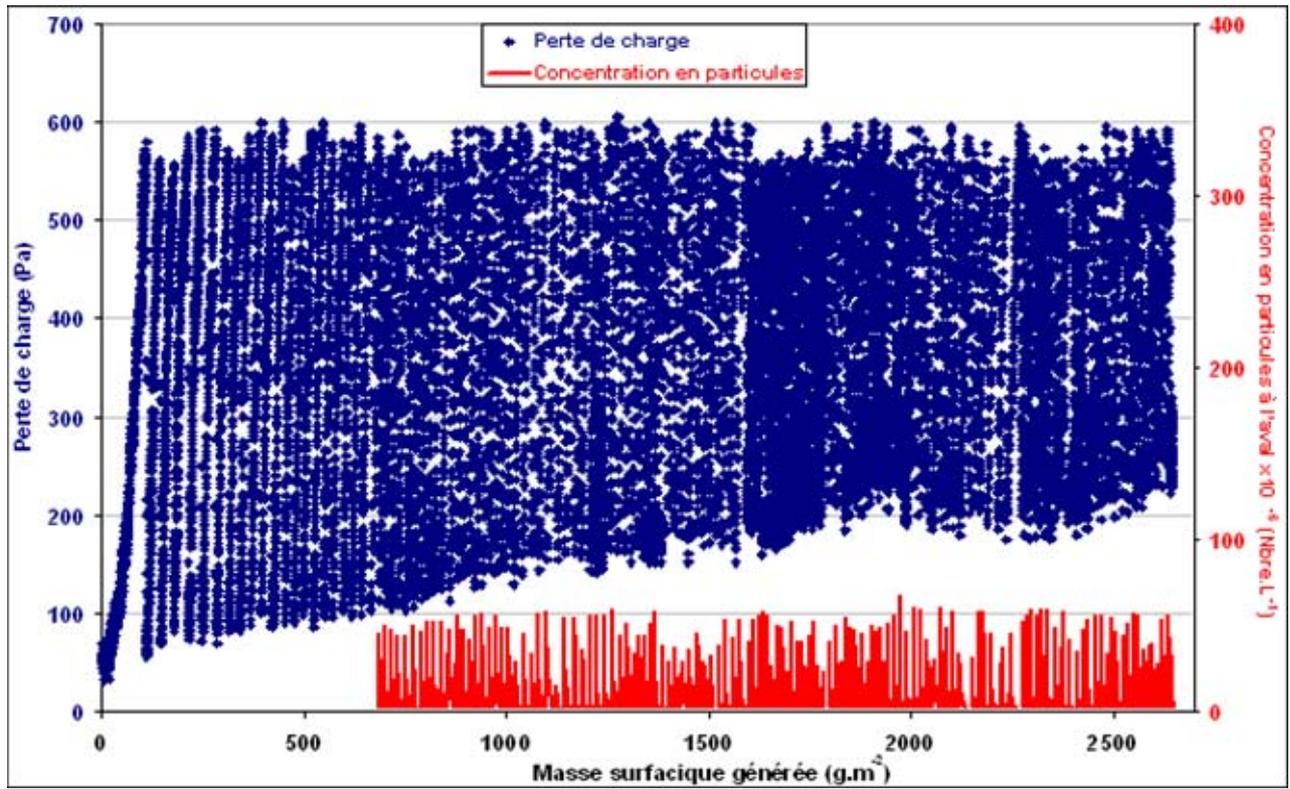


Figure AVIII.1 : Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval pendant les 150 premiers cycles.

Alumine1 ($d_{pm} = 2,5 \mu m$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{max} = 15.\Delta P_0$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,72 \text{ g.m}^{-3}$
(Problème avec le compteur optique de particules lors des 22 premiers cycles)

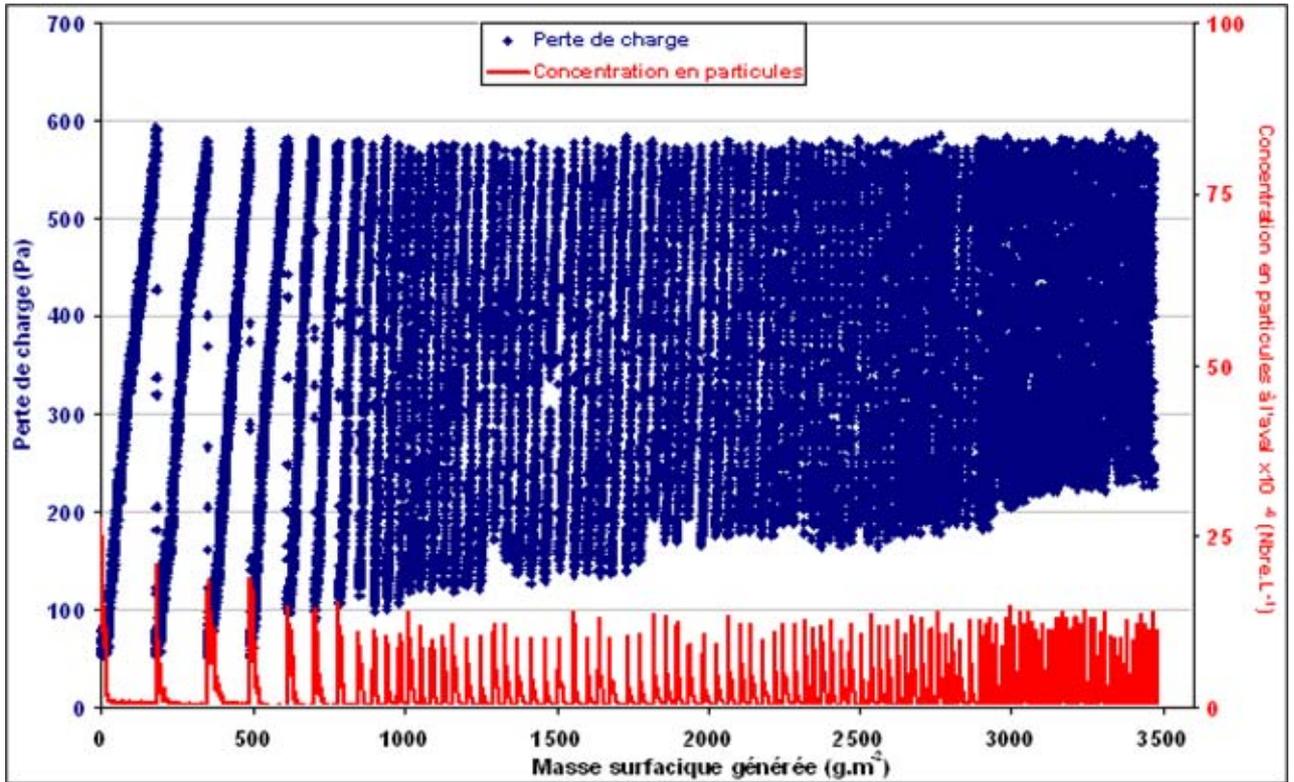


Figure AVIII.2 : Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval pendant les 100 premiers cycles.

Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\text{max}} = 9.\Delta P_0$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$

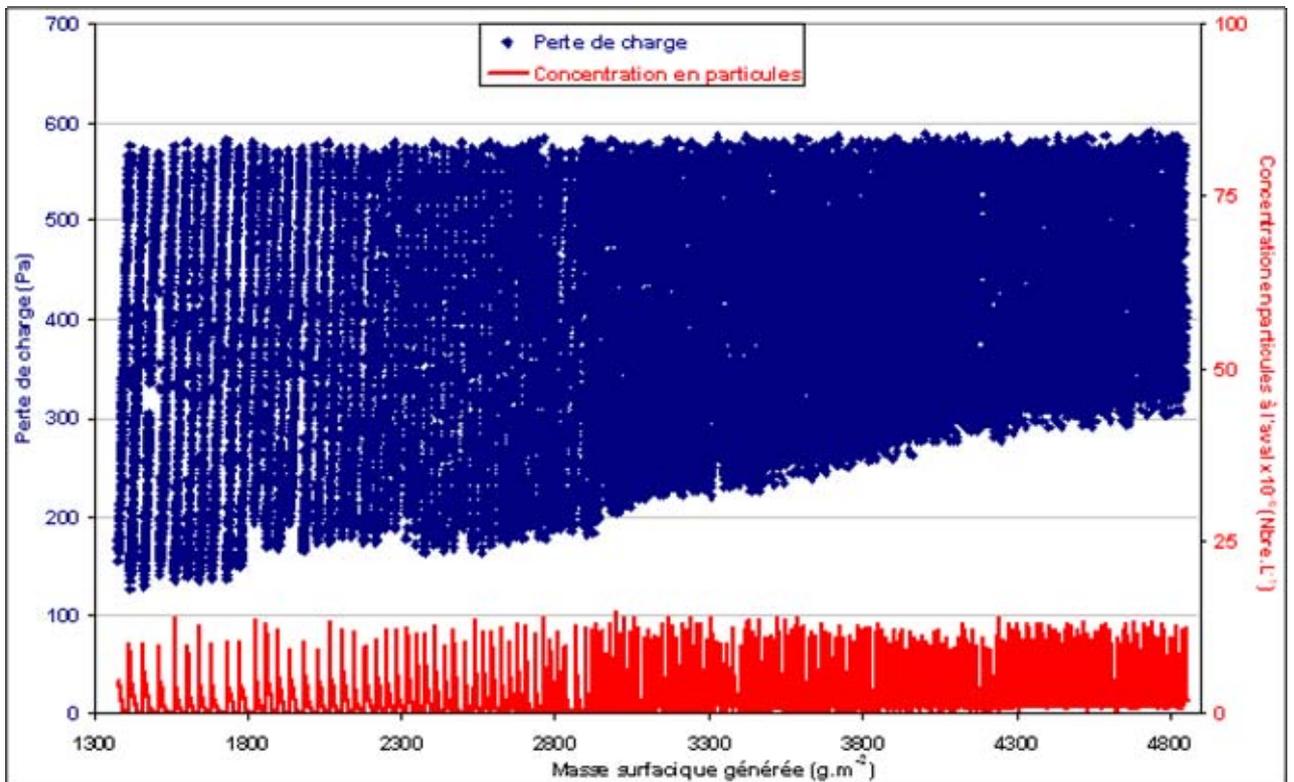


Figure AVIII.3 : Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval pendant 195 cycles (entre les cycles 20 et 215).

Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\text{max}} = 9.\Delta P_0$, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$

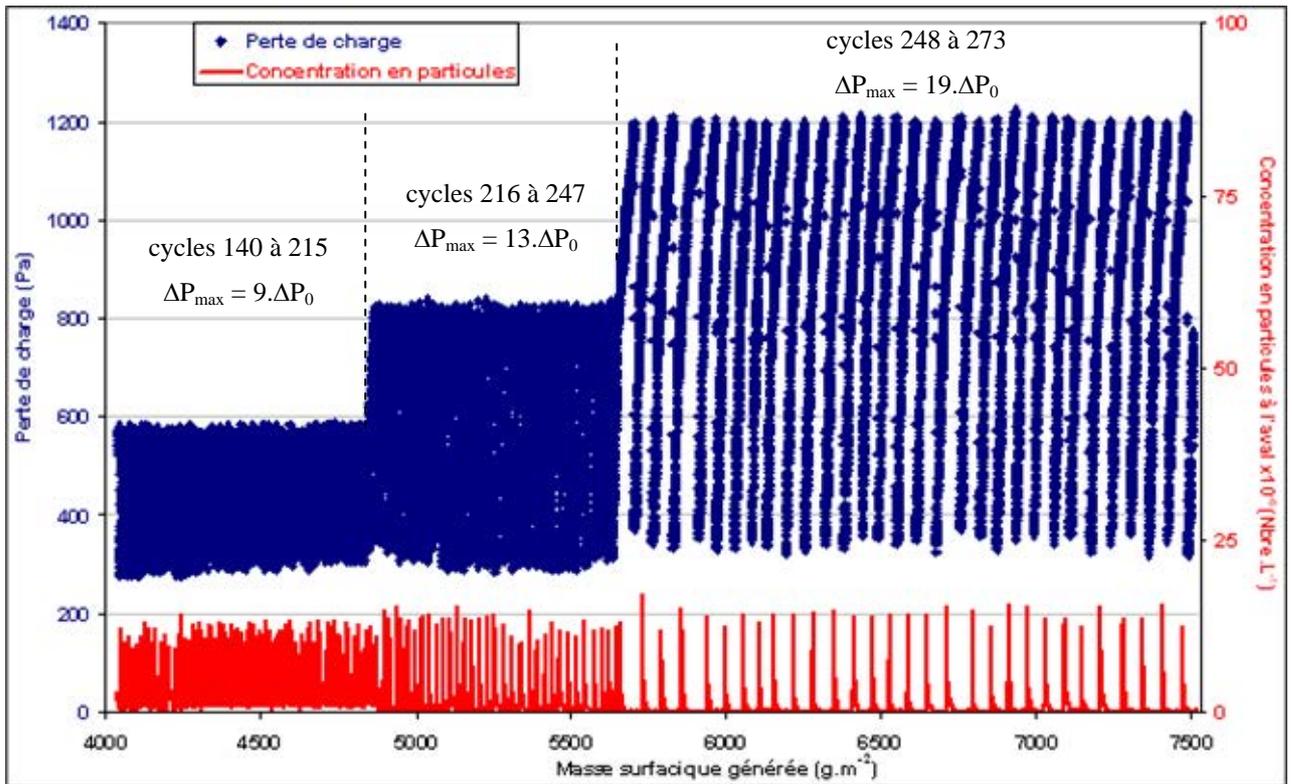


Figure AVIII.4 : Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval pendant 133 cycles (entre les cycles 140 et 273).
 Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu m$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, ΔP_{\max} variable, $P_r = 7 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$

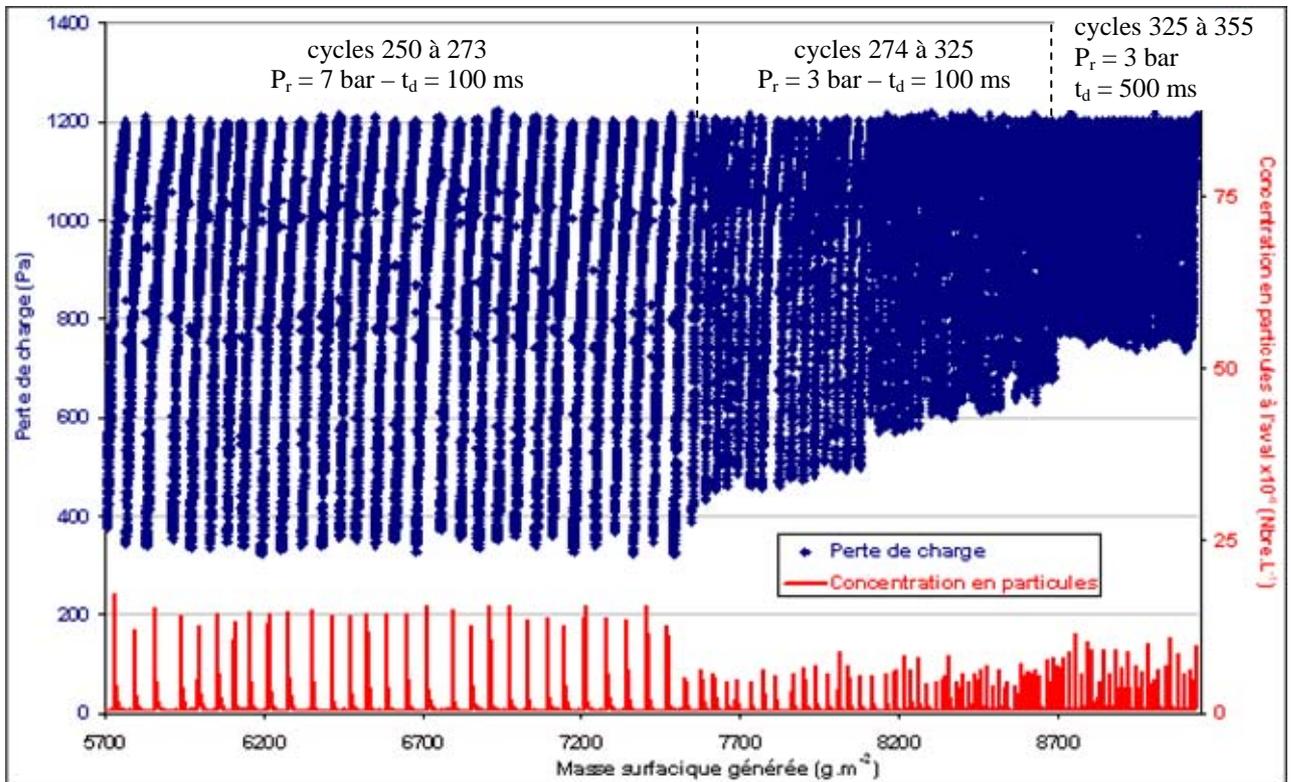


Figure AVIII.5 : Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval pendant 105 cycles (entre les cycles 250 et 355).
 Alumine2 ($d_{pm} = 3,1 \mu m$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\max} = 19.\Delta P_0$, P_r et t_d variables, $C_p = 0,5 \text{ g.m}^{-3}$

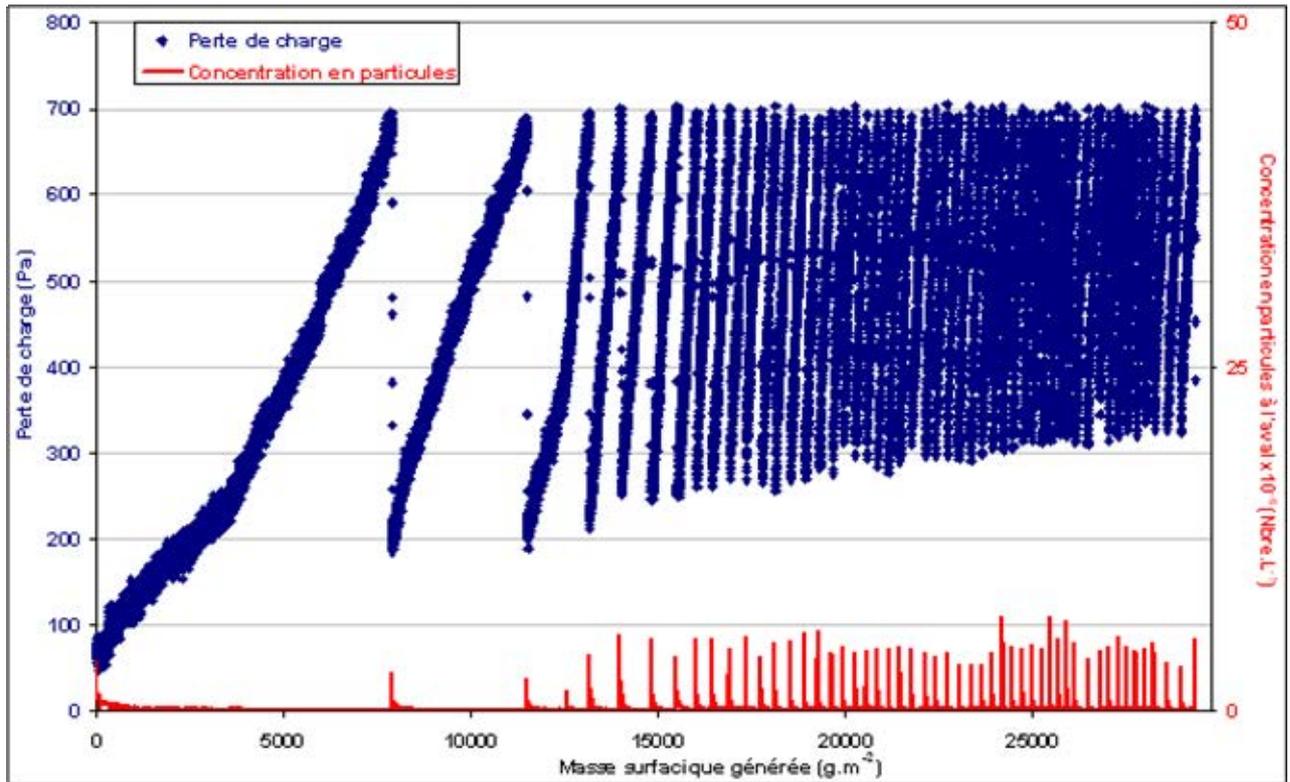


Figure AVIII.6 : Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval pendant les 50 premiers cycles.

Bois2 ($d_{pm} = 33,8 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, $\Delta P_{\text{max}} = 10.\Delta P_0$, $P_r = 3 \text{ bar}$, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$

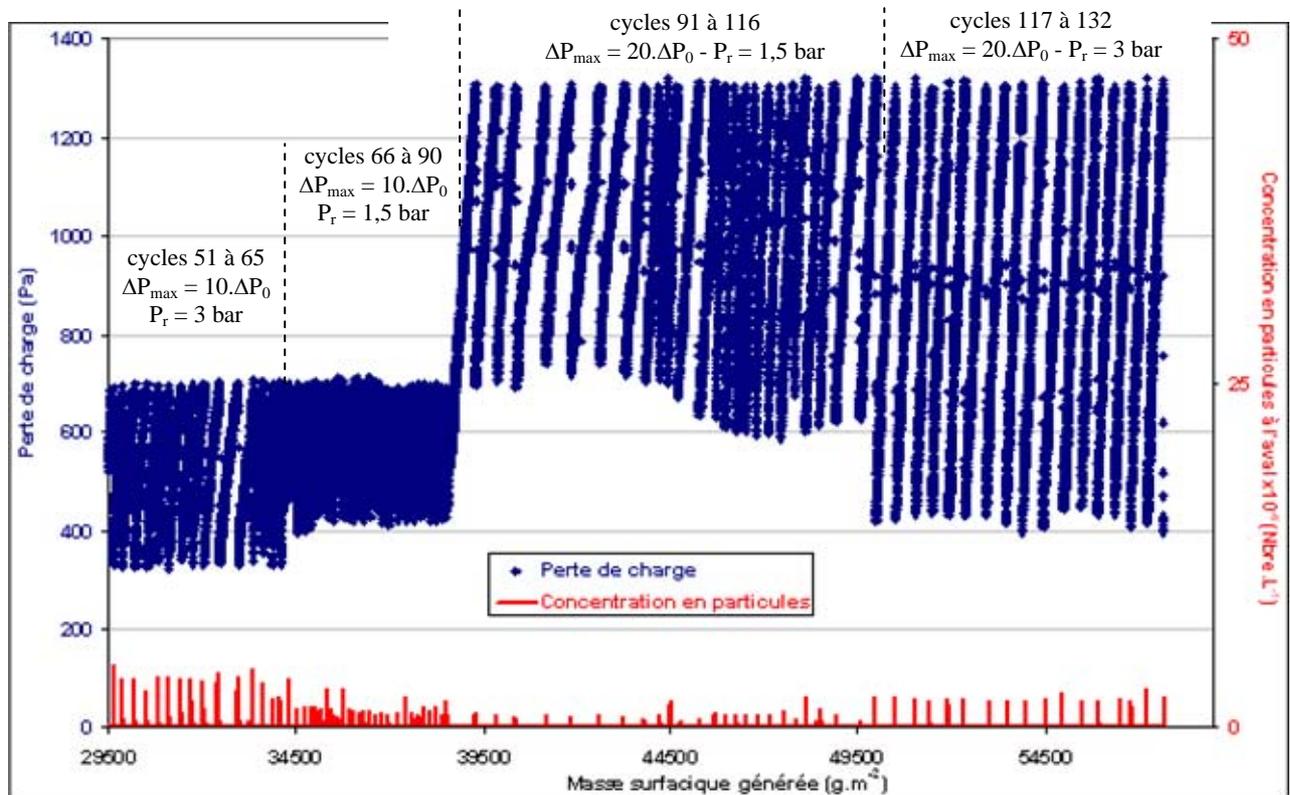


Figure AVIII.7 : Evolution de la perte de charge et de la concentration en particules à l'aval pendant 81 cycles (entre les cycles 51 à 132).

Bois2 ($d_{pm} = 33,8 \mu\text{m}$), $U_f = 4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, ΔP_{max} et P_r variables, $t_d = 100 \text{ ms}$, $C_p = 3,9 \text{ g.m}^{-3}$

ANNEXE IX : SYNTHESE DES TRAVAUX REALISES DANS LE CHAPITRE IV

		Géométrie de la buse d'injection d'air comprimé			Paramètres de décolmatage							Conditions opératoires de filtration			Autres paramètres											
		d _b	Position			P _r			t _d				U _r			ΔP _{max}			N				T			
			10 mm	1	2	3	3 bar	5 bar	7 bar	100 ms	200 ms	500 ms	1000 ms	3 cm.s ⁻¹	5 cm.s ⁻¹	8 cm.s ⁻¹	13.ΔP0	20.ΔP0	30.ΔP0	1	5	13	18	24	0 m.kg	0,1 m.kg
Géométrie de la buse d'injection d'air comprimé	d _b	5 mm	ΔP, a				ΔP, a	ΔP, a				a		ΔP, a					ΔP, a				ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a	
		10 mm	ΔP, a, U, V	ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V
		15 mm	ΔP, a					ΔP, a	ΔP, a				a		ΔP, a					ΔP, a				ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a
Position (cf. figure II.4)		1	ΔP, a, V				ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V
		2					ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a			ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a				ΔP, a				ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a
		3					ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a			ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a				ΔP, a				ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a	ΔP, a
Paramètres de décolmatage	P _r	3 bar	ΔP, a	ΔP, a				ΔP, a, U, V		V	V	V	ΔP, a, U, V	V					ΔP, a, U, V	V			ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	
		5 bar	ΔP, a	ΔP, a				ΔP, a, U, V		V	V	V	ΔP, a, U, V	V					ΔP, a, U, V	V			ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	
		7 bar	ΔP, a, V	ΔP, a, V				ΔP, a, U, V	ΔP, a, U	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V				ΔP, a, U, V	ΔP, a, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V
	t _d	100 ms	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a	ΔP, a, U, V						ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V				ΔP, a, U, V							
	200 ms	ΔP, a, V	ΔP, a, V				ΔP, a, U, V						ΔP, a, U					ΔP, a, U					ΔP, a, U	ΔP, a, U	ΔP, a, U	
	500 ms	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a		ΔP, a, U, V						ΔP, a, U, V					ΔP, a, U				ΔP, a, U, V				
	1000 ms	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a		ΔP, a, U, V						ΔP, a, U, V					ΔP, a, U, V	V			ΔP, a, U, V				
Conditions opératoires de filtration	U _r	3 cm.s ⁻¹	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V					ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V				ΔP, a, U	V			ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	
		5 cm.s ⁻¹	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V							ΔP, a, U, V							
		8 cm.s ⁻¹	ΔP, a, V	ΔP, a, V				ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V										ΔP, a, U, V	V			ΔP, a, U, V			
	ΔP _{max}	13.ΔP0	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V											
	20.ΔP0	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V			ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V						ΔP, a, U, V													
	30.ΔP0	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V			ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V						ΔP, a, U, V													
Autres paramètres	N	1	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V						ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	
		5	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V					ΔP, a, U, V		ΔP, a, U, V									ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	
		13																						ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	
		18																						ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	
	24	ΔP, a, V	ΔP, a, V		ΔP, a	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V						ΔP, a, U, V		ΔP, a, U, V								ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V		
T	0 m.kg	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V		ΔP, a	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	ΔP, a, U, V	

AIR PROPRE - MEDIUM NEUF

ΔP : Mesure de la perte de charge effectuée
 a : Mesure de l'accélération effectuée
 U : Mesure de la vitesse frontale effectuée
 V : Mesure de la vitesse axiale effectuée
 (Se référer au II.2 et à la figure II.6 pour plus de précision sur ces mesures)

 Medium colmaté avec présence du gâteau lors du décolmatage
 Air propre – Medium neuf

Tableau AIX-1 : Tableau récapitulatif de l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du chapitre IV.

LEXIQUE

Coefficient correcteur de Cunningham (Cu)

Le facteur correctif de Cunningham, Cu, permet de tenir compte des discontinuités du milieu pour des particules de taille voisine de la valeur du libre parcours moyen des molécules dans l'air, car dans ce cas, la force de traînée sur la particule est plus faible que ne le prévoit la loi de Stokes. Pour corriger cet effet, un coefficient correcteur (Cu), connu sous les noms de facteur de correction de Cunningham, facteur de glissement ou facteur de Millikan, est introduit.

Une expression de Cu est donnée par l'expression suivante :

$$Cu = 1 + K_n \cdot \left(A + B \cdot \exp\left(-\frac{C}{K_n}\right) \right)$$

avec K_n : nombre de Knudsen défini comme le rapport entre le libre parcours moyen des molécules dans l'air, λ , et le rayon des particules :

$$K_n = 2 \cdot \frac{\lambda}{d_p}$$

A, B, C : constantes expérimentales.

Le tableau suivant donne des valeurs de ces constantes relevées dans la littérature :

Auteur(s)	A	B	C	Libre parcours moyen λ (μm)
Millikan (1923)	0,864	0,29	1,25	0,0942
Fuchs (1924)	1,246	0,42	0,87	0,0653
Hinds (1982)	2,514	0,800	0,55	
Allen et Raabe (1982)	1,155	0,471	0,586	0,0673
Buckley et Loyalka (1989) ¹	1,155	0,471	0,596	
Rader (1990)	1,207	0,440	0,78	
Allen et Raabe (1985)	1,142	0,558	0,999	

¹ cité par A. Renoux et D. Boulaud (1998)

Au delà de $d_p = 5 \mu\text{m}$, l'influence du facteur de correction de Cunningham est négligeable et Cu peut être considéré égal à 1.

Diamètre aérodynamique (d_{ae})

Le diamètre aérodynamique d'une particule est le diamètre de la sphère équivalente de masse densité 1 dont la vitesse limite de chute en air calme est identique à celle de la particule dans les mêmes conditions de pression, température et humidité relative. Il peut être calculé à partir du diamètre d_p de la particule par :

$$d_{ae} = d_p \cdot \sqrt{\frac{\rho_p \cdot Cu_p}{\rho_{eau} \cdot Cu_{ae}}}$$

avec Cu_{ae} : facteur de correction de Cunningham fonction de d_{ae} ;
 Cu_p : facteur de correction de Cunningham fonction de d_p ;
 ρ_{eau} : masse volumique de l'eau ;
 ρ_p : masse volumique de la particule.

Diamètre de Stokes

Il s'agit du diamètre de la sphère équivalente de même masse volumique et de même vitesse limite de chute que la particule.

Ecart-type d'une série de valeurs (σ)

Caractéristique permettant d'apprécier l'étalement autour de la moyenne d'une série de valeur, l'écart-type se calcule de la manière suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

avec x_i : valeurs de la grandeur ;
 \bar{x} : moyenne arithmétique de la série de valeurs ;
 n : nombre de valeurs de la série.

ELPI (Electrical Low Pressure Impactor)

Le ELPI est un impacteur basse pression à détection électrique. Il permet d'obtenir en temps réel la concentration et la distribution granulométrique en nombre, en surface, en volume et en masse si la masse volumique de l'aérosol est connue. Il permet de caractériser un aérosol dans la gamme 0,007 μm à 10 μm .

Emission de polluants vers l'extérieur

Les arrêtés du 30 Juin 1997 et du 2 Février 1998 réglementent les émissions de polluants vers l'extérieur par les installations industrielles.

Les installations sont soumises à autorisation si « la puissance installée de l'ensemble des machines fixes, concourant au fonctionnement de l'installation » est supérieure ou égale à 500 kW. Les installations dont la puissance est comprise entre 50 et 500 kW seront soumises à déclaration. Aucune disposition concernant les rejets des installations de puissance inférieure à 50 kW n'est prévue.

Les valeurs limites de rejet en poussières prévues sont :

- Installation soumise à autorisation (arrêté du 2 Février 1998) :

$$C = 100 \text{ mg.m}^{-3}, \text{ si } D \leq 1 \text{ kg/h}$$

$$C = 40 \text{ mg.m}^{-3}, \text{ si } D > 1 \text{ kg/h}$$

C désigne la valeur limite de la concentration massique de l'aérosol contenu dans l'effluent et D le débit massique horaire maximal autorisé par arrêté préfectoral.

Les rejets doivent être évacués par l'intermédiaire de cheminées équipées d'un point de prélèvement d'échantillon. Un contrôle annuel des paramètres C et D doit être effectué par un organisme choisi en accord avec l'inspection des installations classées.

- Installation soumise à déclaration (arrêté du 30 Juin 1997) : $C = 150 \text{ mg.Nm}^{-3}$.

Le point de rejet doit dépasser d'au moins 3 m les bâtiments situés dans un rayon de 15 m. Le contrôle de C doit être effectué au moins tous les 3 ans par un organisme agréé par le ministère de l'environnement.

Etendue maximale d'une série de valeurs

L'étendue maximale d'une série de valeurs est la différence entre la plus grande et la plus petite valeurs observées.

Fraction alvéolaire

La fraction alvéolaire est le pourcentage à capter ou collecter de la fraction inhalable, défini par une distribution log-normale cumulée, dont le diamètre aérodynamique médian est $4,25 \mu\text{m}$ et l'écart-type géométrique $\sigma_g = 1,5$.

Fraction inhalable

La fraction inhalable est le pourcentage I des particules de l'aérosol de diamètre aérodynamique à capter ou collecter, définit conventionnellement par :

$$I = 50[1 + \exp(-0,06.d_{ae})] \text{ pour } d_{ae} \leq 100 \mu\text{m}$$

Remarque : par *fraction captée*, on désigne la fraction des particules de l'aérosol qui pénètre dans l'orifice d'entrée de la tête d'échantillonnage ; la *fraction collectée* étant celle qui parvient effectivement au dispositif prévu pour le recueil des particules (souvent un filtre). La fraction collectée peut notablement différer de la fraction capter par suite de dépôts de particules sur les parois internes.

Fraction thoracique

La fraction thoracique est le pourcentage à capter ou collecter de la fraction inhalable, défini par une distribution log-normale cumulée, dont le diamètre aérodynamique médian est $11,64 \mu\text{m}$ et l'écart-type géométrique $\sigma_g = 1,5$.

Libre parcours moyen (λ)

Le libre parcours d'une molécule est la longueur de sa trajectoire entre deux collisions successives. Sa valeur moyenne λ est appelée libre parcours moyen. Il est donné par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot n \cdot \pi \cdot d_{\text{mol}}^2}$$

avec n : nombre de molécules par unité de volume ;
 d_{mol} : diamètre d'une molécule.

Pour de l'air à température et pression normale
 $d_{\text{mol}} = 0,36 \text{ nm}$ – $n = 2,69 \cdot 10^{25} \text{ molécules} \cdot \text{m}^{-3}$ soit $\lambda = 65 \text{ nm}$

Masse surfacique de particules déposées à la surface du medium

La masse surfacique de particules collectées peut être déterminée par pesée du medium filtrant ou par calcul en prenant en compte le temps de filtration et la concentration en particules dans le flux d'air amont :

$$W_g(t) = \frac{q_p \cdot t}{S_f}$$

avec W_g : masse surfacique de particules générées ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) ;
 t : temps (s) ;
 q_p : débit massique de particules en amont ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) ;
 S_f : surface filtrante totale (m^2).

L'épaisseur du gâteau est un paramètre plus difficile à obtenir. Schmidt et Löffler (1990) proposent une méthode de détermination expérimentale de Z_g qui repose sur l'observation microscopique d'une tranche de gâteau après un durcissement préalable de cette structure (rigidification par perméation d'un flux de vapeur de cyanoacrylate d'éthyle et imprégnation par une résine liquéfiée). Cependant, cette méthode est lourde et nécessite de prendre de grandes précautions lors de la manipulation du medium colmaté et lors de la découpe du bloc de résine formé.

Mesures par détecteur à « effet triboélectrique » (SPX 100, Sefram, France)

L'appareil de mesure à « effet triboélectrique » permet, à partir d'une sonde placée dans le conduit de recyclage d'un dépoussiéreur à media filtrants, de surveiller en permanence l'air recyclé après filtration dont la concentration en poussière ne doit pas dépasser $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$. Cet appareil, calibré au préalable à partir d'une mesure pondérale réalisée sur site par prélèvement isocinétique, peut détecter les incidents ou les dysfonctionnements pouvant survenir sur un dépoussiéreur (rupture ou déchirure de manche), déclencher l'alarme en cas de dépassement d'une valeur seuil et éventuellement rediriger l'air pollué vers l'extérieur. Basé sur la mesure du courant électrique généré par l'impact (effet triboélectrique strict) ou la charge électrique des particules (charge induite, Vercoulen et al. (1991)) sur un barreau métallique, cet appareil est capable d'évaluer les faibles concentrations présentes dans l'air recyclé (Müller et Bémer (2000)).

VLEP : Valeurs limites d'exposition professionnelle

Les VLEP sont :

- soit des valeurs limites admises (VL) à caractère indicatif dans le cas général. La valeur limite d'un composé chimique représente sa concentration dans l'air que peut respirer une personne pendant un temps déterminé sans risque d'altération pour sa santé. Toutefois, l'expérience montre que de nouvelles pathologies continuent d'être découvertes ; c'est pourquoi il convient que les pratiques retenues visent à abaisser les niveaux d'exposition à des valeurs aussi basses que raisonnablement possible : les VL doivent être considérées comme des objectifs minimaux.

Deux types de valeurs ont été retenus :

- des valeurs limites d'exposition à court terme (VLE), dont le respect permet d'éviter le risque d'effets toxiques immédiats ou à court terme. La VLE est une valeur plafond mesurée sur une durée maximale de 15 minutes, en fonction de la nature du risque, des conditions de travail et des possibilités techniques de mesurage.
- des valeurs limites moyennes d'exposition (VME) destinées à protéger les travailleurs des effets à terme, mesurées ou estimées sur la durée d'un poste de travail de 8 heures. La VME peut être dépassée sur de courtes périodes, sous réserve de ne pas dépasser la VLE, lorsqu'elle existe.
- soit des valeurs limites réglementaires (VR), indicatives (VRI) ou contraignantes (VRC) pour certains composés.
- soit des valeurs limites recommandées par la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie.

NOMENCLATURE

Nomenclature

Lettres latines

a	Accélération du medium	(g ou m.s ⁻²)
a _g	Surface spécifique des particules	(m ⁻¹)
a _i	Accélération du medium pour le point de mesure i	(g ou m.s ⁻²)
a _{max}	Accélération (décélération) maximale du medium	(g ou m.s ⁻²)
C _{n,i}	Concentration numérique à l'aval pour la classe granulométrique i	(Nbre.l ⁻¹)
$\overline{C}_{n,i}$	Concentration numérique moyenne à l'aval pour la classe granulométrique i	(Nbre.l ⁻¹)
$\overline{C}_{n,max}$	Valeurs maximales de concentration numérique moyenne en particules à l'aval	(Nbre.l ⁻¹)
\overline{C}_m	Concentration massique moyenne à l'aval pendant une bouffée	(kg.m ⁻³)
$\overline{C}_{m,i}$	Concentration massique moyenne à l'aval pour la classe granulométrique i	(kg.m ⁻³)
$\overline{C}_{n,r}$	Concentration moyenne en nombre émise lors du décolmatage des manches du rail r	(kg.m ⁻³)
$\overline{C}_{m,bouffées}$	Concentration massique moyenne en particules des bouffées	(kg.m ⁻³)
$\overline{C}_{m,cycles}$	Concentration massique moyenne en particules	(kg.m ⁻³)
$\overline{C}_{m,sans\ bouffées}$	Concentration massique moyenne en particules sans les bouffées	(kg.m ⁻³)
C _{p,amont} ou C _p	Concentration en particules à l'amont (massique : kg.m ⁻³ ou numérique : Nbre.l ⁻¹)	
C _{p,aval}	Concentration en particules à l'aval (massique : kg.m ⁻³ ou numérique : Nbre.l ⁻¹)	
C _u	Facteur de correction de Cunningham	
C _{u_{ae}}	Facteur de correction de Cunningham en fonction de d _{ae}	(-)
C _{u_p}	Facteur de correction de Cunningham en fonction de d _p	(-)
C _{u_s}	Facteur de correction de Cunningham en fonction de d _s	(-)
C _{u_v}	Facteur de correction de Cunningham en fonction de d _v	(-)
d	Diamètre intérieur du diaphragme	(m)
D	Diamètre d'une manche	(m)
d ₅₀	Diamètre médian des fibres du medium	(m)
d _{ae}	Diamètre aérodynamique d'une particule	(m)
d _b	Diamètre de la buse d'injection de l'air comprimé	(m)
$\left(\frac{d(\Delta P)}{dt}\right)_{max}$	Variation de perte de charge maximale pendant le décolmatage	(Pa.s ⁻¹)
d _f	Diamètre aéraulique des fibres selon Davies	(m)
d _{mol}	Diamètre d'une molécule	(m)
d _{moy}	Diamètre moyen des fibres	(m)
d _p	Diamètre des particules	(m)
DP	Surpression dans la manche lors du décolmatage	(Pa)
DP _d	Différence de pression lors de l'application d'un flux d'air à contre-courant U _d	(Pa)
DP _{critique}	Différence de pression critique pour le détachement du gâteau	(Pa)
d _{pi}	Diamètre de particule de la classe granulométrique i	(m)

d_{pm}	Diamètre médian massique des particules	(m)
d_s	Diamètre de Stokes d'une particule	(m)
d_v	Diamètre équivalent en volume d'une particule	(m)
E	Efficacité de filtration	(-)
E_c	Energie cinétique du medium colmaté	(J)
F_s	Force de séparation par unité de surface	(N.m ⁻²)
G	Masse surfacique du medium à l'état neuf (grammage)	kg.m ⁻²)
h	Distance optimale de placement d'une buse d'injection par rapport à l'ouverture de l'élément filtrant	(m)
h_k	Constante de Kozeny et Carman	(-)
K_2	Résistance spécifique du gâteau de particules	(m.kg ⁻¹)
K_n	Nombre de Knudsen	(-)
L	Longueur d'une manche	(m)
m_c	masse du medium à l'état colmaté	(kg)
m_d	masse du medium à l'état décolmaté	(kg)
m_{dec}	Masse de gâteau décrochée lors d'un décolmatage	(kg)
m_{dep}	Masse de gâteau déposée au cours d'un colmatage	(kg)
M_e	Module d'élasticité	(m ² .s ² .kg ⁻¹)
m_f	Masse du medium à l'état neuf	(kg)
M_f	Module de flexibilité	(m ² .s ² .kg ⁻¹)
m_{total}	Masse totale de gâteau présente avant décolmatage	(kg)
M(G)	Masse de particules libérée à l'aval lors de la bouffée globale G	(kg)
M(P)	Masse de particules libérée à l'aval lors de la bouffée partielle P	(kg)
n	Nombre de cycles effectués	(-)
N	Nombre de manches décolmatées simultanément	(-)
N_c	Nombre de cycles de filtration	(-)
N_r	Nombre de manches du rail r	(-)
P_{amont}	Pression statique à l'amont du medium	(Pa)
P_{aval}	Pression statique à l'aval du medium	(Pa)
P_e	Pression au niveau du caisson réduit à l'aspiration	(Pa)
$P_{enceinte}$	Pression régnant dans l'enceinte de filtration à l'extérieur des manches	(Pa)
P_{ext}	Pression extérieure à la manche	(Pa)
P_{int}	Pression intérieure dans la manche	(Pa)
$P_{int,i}$	Pression interne dans les manches pour le point de mesure i	(Pa)
$P_{int,max}$	Pression intérieure maximale dans la manche	(Pa)
P_r	Pression du réservoir d'air comprimé de décolmatage	(Pa)
Q_{cr_n}	Débit de perméation sur les manches du rail r, pour l'étape de calcul n du décolmatage	(m ³ .s ⁻¹)
Q_{dr_r}	Débit de perméation sur les manches décolmatées du rail r, juste après le décolmatage du rail r'	(m ³ .s ⁻¹)
$Q_{dr_r,m}$	Débit de perméation individuel d'une manche décolmatée du rail r, juste après le décolmatage du rail r'	(m ³ .s ⁻¹)
$Q_{nd_r',m}$	Débit de perméation individuel d'une manche non décolmatée, juste après le décolmatage du rail r'	(m ³ .s ⁻¹)
Q_{nd_r}	Débit de perméation sur les manches non décolmatées, juste après le décolmatage du rail r'	(m ³ .s ⁻¹)
q_p	Débit massique de particules à l'amont	(kg.s ⁻¹)
Q_v	Débit volumique total filtré par le dépoussiéreur	(m ³ .s ⁻¹)

\overline{Qv}_m	Débit moyen de la manche m	$(m^3.s^{-1})$
$Qv_{m,i,k}$	$k^{i\text{ème}}$ valeur du débit de la manche m sur une série de 12 pour le cycle i	$(m^3.s^{-1})$
Q_m	Débit massique d'air filtré	$(kg.m^{-3})$
R_d	Résistance à l'écoulement dans les zones décolmatées	(m^{-1})
R_f	Résistance à l'écoulement du medium vierge	(m^{-1})
R_f^*	Résistance à l'écoulement du medium colmaté en profondeur	(m^{-1})
RH	Taux d'humidité relative	(%)
R_{nd}	Résistance à l'écoulement dans les zones non décolmatées	(m^{-1})
R_{res}	Résistance à l'écoulement globale après décolmatage	(m^{-1})
S_f	Surface filtrante	(m^2)
S_{fm}	Surface filtrante d'une manche du dépoussiéreur	(m^2)
t	Temps	(s)
T	Tension des manches	$(m.kg)$
t_d	Temps de décolmatage	(s)
T_c	Durée d'un cycle de filtration	(s)
U	Vitesse de perméation frontale sur le medium	$(m.s^{-1})$
U_{cr_n}	Vitesse de perméation sur les manches du rail r, pour l'étape de calcul n du décolmatage	$(m.s^{-1})$
U_d	Vitesse de perméation dans les zones décolmatées	$(m.s^{-1})$
U_d	Vitesse d'air à contre-courant pendant le décolmatage	$(m.s^{-1})$
U_{dr}	Vitesse transitoire moyenne sur les manches du rail r juste après leur décolmatage	$(m.s^{-1})$
$U_{dr_r'}$	Vitesse de perméation sur les manches décolmatées du rail r, juste après le décolmatage du rail r'	$(m.s^{-1})$
U_f	Vitesse de filtration	$(m.s^{-1})$
U_i	Vitesse de perméation frontale pour le point de mesure i	$(m.s^{-1})$
U_{nd}	Vitesse de perméation dans les zones non décolmatées	$(m.s^{-1})$
$U_{nd_r'}$	Vitesse de perméation sur les manches non décolmatées, juste après le décolmatage du rail r'	$(m.s^{-1})$
U_p	Vitesse de perméation sur les manches	$(m.s^{-1})$
V	Vitesse axiale du jet d'air comprimé	$(m.s^{-1})$
V_i	Vitesse axiale du jet d'air comprimé pour le point de mesure i	$(m.s^{-1})$
V_{max}	Vitesse maximale du medium pendant le décolmatage	$(m.s^{-1})$
$W(t)$	Masse surfacique de particules générées	$(kg.m^{-2})$
W_c	Masse surfacique de particules collectées par le medium	$(kg.m^{-2})$
W_g	Masse surfacique de particules	$(kg.m^{-2})$
$W_{g,dec}$	Masse surfacique de particules du gâteau remise en suspension	$(kg.m^{-2})$
$W_{g,max}$	Masse surfacique du gâteau juste avant décolmatage	$(kg.m^{-2})$
$W_{g,redép}$	Masse surfacique de particules du gâteau remise en suspension et redéposées après décolmatage	$(kg.m^{-2})$
$W_{g,res}$	Masse surfacique de particules résiduelles après décolmatage	$(kg.m^{-2})$
\overline{W}_{res}	Masse surfacique résiduelle après décolmatage	$(kg.m^{-2})$
\overline{W}_{res}	Masse surfacique résiduelle moyenne de particules	$(kg.m^{-2})$
$\overline{W}_{res,min}$	Masse surfacique résiduelle dans les zones décolmatées	$(kg.m^{-2})$
Z	Epaisseur du medium	(m)
Z_g	Epaisseur du gâteau	(m)

Lettres grecques

α	Angle de sortie du jet d'air comprimé	(°)
α_d	Coefficient de débit	(-)
α_f	Compacité du medium	(-)
α_g	Compacité du gâteau	(-)
ΔP	Perte de charge	(Pa)
ΔP_0	Perte de charge initiale des manches	(Pa)
$\Delta P_{\text{carcasse}}$	Perte de charge de la carcasse du dépoussiéreur sans les manches	(Pa)
ΔP_{C_n}	Perte de charge des manches, pour l'étape de calcul n du décolmatage	(Pa)
ΔP_{Cr_n}	Perte de charge des manches du rail r, pour l'étape de calcul n du décolmatage	(Pa)
ΔP_d	Perte de charge des zones décolmatées	(Pa)
ΔP_{dr_r}	Perte de charge des manches décolmatées du rail r, juste après le décolmatage du rail r'	(Pa)
ΔP_f	Perte de charge du medium filtrant vierge	(Pa)
ΔP_g	Perte de charge du gâteau de filtration	(Pa)
ΔP_i	Perte de charge de la manche pour le point de mesure i	(Pa)
ΔP_{max}	Perte de charge maximale avant décolmatage	(Pa)
ΔP_{nd}	Perte de charge des zones non décolmatées	(Pa)
ΔP_{nd_r}	Perte de charge des manches non décolmatées, juste après le décolmatage du rail r'	(Pa)
$\Delta P_{\text{res}'}$	Perte de charge du medium colmaté en profondeur	(Pa)
$\Delta P_{\text{res}''}$	Perte de charge du dépôt de particules résiduelles	(Pa)
$\Delta P_{\text{res},n}$	Perte de charge résiduelle au cycle n	(Pa)
ΔP_T	Perte de charge totale sur le dépoussiéreur	(Pa)
Δt	Intervalle de temps entre les décolmatages de deux rails consécutifs	(s)
Δt_b	Durée totale de la bouffée de particules	(s)
ε	Coefficient de détente	(-)
γ	Fraction de poussières décolmatées	(-)
γ_r	Fraction de poussières détachées et redéposées	(-)
κ	Fraction de poussières décolmatée qui tombe dans la trémie	(-)
κ_a	Facteur dynamique d'une particule	(-)
λ	Libre parcours moyen des molécules dans l'air	(m)
μ	Viscosité dynamique du fluide	(Pa.s)
ρ_a	Masse volumique de l'air	(kg.m ⁻³)
ρ_{eau}	Masse volumique de l'eau	(kg.m ⁻³)
ρ_f	Masse volumique des fibres du medium	(kg.m ⁻³)
ρ_g	Masse volumique des particules	(kg.m ⁻³)
σ_g	Ecart-type géométrique	(-)
$\sigma(\overline{Qv_m})$	Ecart-type caractéristique de l'étalement de la série des 24 débits moyens	(m ³ .s ⁻¹)
$\sigma(\overline{Qv_m})_{\text{max}}$	Valeur maximale de l'écart-type $\sigma(\overline{Qv_m})$	(m ³ .s ⁻¹)
$\sigma(\overline{Qv_m})_{\text{stable}}$	Valeur stabilisée de l'écart-type $\sigma(\overline{Qv_m})$	(m ³ .s ⁻¹)

$\sigma(\overline{Qv_{m, rail r}})$	Notation de $\sigma(\overline{Qv_m})$ pour les manches du rail r	$(m^3 \cdot s^{-1})$
σ_{ad}	Force d'adhésion par unité de surface	$(N \cdot m^{-2})$
σ_{co}	Force de cohésion au sein du gâteau par unité de surface	$(N \cdot m^{-2})$
σ_{max}	Résistance maximale à la compression pour un gâteau	$(N \cdot m^{-1})$
σ_T	Force d'adhésion totale par unité de surface	$(N \cdot m^{-2})$
$1/T_c$	Fréquence de décolmatage	(s^{-1})
% 'G - P'	Contribution massique à la bouffée de particules des sources du groupe 'G - P'	(%)
% P	Contribution massique à la bouffée de particules des sources du groupe P	(%)
% _I	Pourcentage du temps pendant lequel la répartition des débits reste inhomogène après le décolmatage	(%)
% _{Br}	Pourcentage d'importance de la bouffée émise lors du décolmatage des manches du rail r par rapport à la somme des bouffées émise par les manches des cinq rails	(%)

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

oOo

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Monsieur Alain BERNIS, Professeur, ESIC, Université de Savoie, Le Bourget du Lac

Monsieur Jean-Francis BLOCH, Maître de Conférences, EFPG, INPG, St Martin d'Hères

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur SIMON Xavier

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

"Etude du décolmatage pneumatique des dépoussiéreurs à manches"

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « Génie des procédés et des produits »

Fait à Vandoeuvre, le 14 novembre 2005

Le Président de l'I.N.P.L.,

L. SCHUFFENECKER



Pour le Président
Le Vice-président,

J.-L. COUJARD

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 5 4 5 0 1
VANDŒUVRE CEDEX

Résumé

L'objectif de cette étude est de contribuer à une meilleure compréhension des conséquences du décolmatage pneumatique sur un dépoussiéreur à manches.

Une étude bibliographique permet tout d'abord d'identifier les principaux reproches qui peuvent être formulés à l'encontre du décolmatage. Des travaux expérimentaux permettent ensuite d'éclairer sous un jour nouveau les tentatives d'optimisation du décolmatage.

Trois axes complémentaires de recherche ont été explorés sur une unité pilote spécialement équipée :

- Le suivi des comportements mécanique et aérodynamique des manches pendant un décolmatage a conduit à l'identification des zones de régénération préférentielle et à la description des mécanismes de détachement du gâteau de particules.

- Des travaux originaux ont ensuite permis d'établir la manière dont se répartit le débit total filtré par le réseau de manches au cours des cycles de colmatage et de décolmatage. Des inhomogénéités sont provoquées par l'établissement de forts débits transitoires sur les premières manches décolmatées. Un modèle empirique décrit correctement les résultats expérimentaux.

- Enfin, une étude novatrice décrit les bouffées de particules consécutives à chaque décolmatage pneumatique et les différentes sources de particules qui sont responsables de leur formation. Des mesures de la concentration à l'aval de dépoussiéreurs industriels fonctionnant en mode recyclage, révèlent une réintroduction importante de particules fines dans le local de travail. La concentration massique, seule information réellement exploitée à ce jour pour assurer l'hygiène de l'air dans les conduits de recyclage, n'est peut-être pas suffisante et devrait sans doute être complétée, dans le futur, par des mesures de concentrations numériques en particules.

Les résultats permettent d'envisager une amélioration des performances de ce type de dépoussiéreur.

Mots clefs : Filtration, Aérosols solides, Colmatage, Décolmatage pneumatique, Media fibreux, Perte de charge, Gâteau de particules, Bouffées de particules.

Abstract

Study of the pulse-jet cleaning of baghouse dust collector

The objective of this study was to contribute to a better understanding of the consequences of the pulse-jet cleaning of baghouse dust collectors.

Firstly, a review of the literature identifies the main criticisms of pulse-jet cleaning. Secondly, an innovative experimental study is presented which led to new results for improving pulse-jet cleaning.

Three additional research fields were investigated using a specifically designed pilot dust collector:

- Measurements of the mechanical and aerodynamic behaviour of the bags during pulse-jet cleaning enabled the identification of the best regenerated areas of the filter element and the description of the mechanisms that cause the dislodgement of the dust cake.

- Original research established the way in which the global dirty air flow filtered by the pilot dust collector is distributed among the bags during the clogging and cleaning cycles. The pulse-jet cleaning has a disruptive action and results in disequilibrium in the distribution of the air flows among the bags because of considerable increases in air flows on the first bags cleaned. The variations among bags progressively decrease during the clogging step. An empirical model was developed and it correctly describes the experimental results.

- Lastly, the puffs of the downstream particles, emitted after pulse-jet cleaning, are described. Measurements of the downstream concentration before recycling into workplaces show that significant contamination by very fine particles must be taken into consideration. Mass concentration, the only parameter used to control the particulate emission of dust collectors, appears insufficient and an additional measurement of the number concentration should be used in future.

These results may allow for an improvement in the efficiency of industrial dust collectors.

Key words: Filtration, Solid aerosols, Clogging, Pulse-jet cleaning, Non-woven fibrous media, Pressure drop, Dust cake, Particle puffs

