HAL
open science

Étude du colmatage des filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion

Soleiman Bourrous

▶ To cite this version:

Soleiman Bourrous. Étude du colmatage des filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion. Autre. Université de Lorraine, 2014. Français. NNT : 2014LORR0301 . tel-01751445

HAL Id: tel-01751445
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751445v1

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

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

Université de Lorraine Ecole doctorale Ressources Procédés Produits Environnement

Etude du colmatage des filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion

THESE

Présentée et soutenue publiquement le 8 décembre 2014

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'université de Lorraine

Spécialité

Génie des Procédés et des Produits

Par

SOLEIMAN BOURROUS

Composition du jury :

Rapporteurs :	**Prof. Gerhard Kasper**	Professeur à l'Institut de Technologie de Karlsruhe (Allemagne)
	Dr. Denis Boulaud	Adjoint au Directeur de l'Environnement, IRSN
Examinateurs :	**Dr. Denis Bémer**	Ingénieur d'étude, INRS
	Prof. Dominique Thomas	Professeur à l'Université de Lorraine
	Prof. Eric Favre	Professeur à l'Université de Lorraine
	Dr. Jean-Christophe Appert-Collin	Maître de Conférences à l'Université de Lorraine (membre invité)
	Dr. Laurent Bouilloux	Chef du LECEV, IRSN
	M. Ludovic Tampère	Ingénieur d'étude, CAMFIL SAS (membre invité)

IRSN INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

camfil

LRGP LABORATOIRE RÉACTIONS ET GÉNIE DES PROCÉDÉS

Etude du colmatage des filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion

Remerciements

Pour cette période mémorable, je souhaite tout d'abord remercier **Laurent Bouilloux**, sans qui rien n'aurait eu lieu, pour la confiance qu'il m'a accordée la bonne humeur et les discussions qui allèrent bien au-delà de la filtration et furent toujours très enrichissantes.

Merci à **Dominique Thomas** et **Jean-Christophe Appert-Collin** qui m'ont encadré durant ces trois années et ont su guider mon travail malgré la distance.

A Messieurs **Denis Boulaud** et **Gerhard Kasper**, personnalités majeures du monde de la recherche sur les aérosols, j'adresse mes remerciements pour avoir accepté d'être rapporteurs de ces travaux et de participer au jury.

Merci à **Eric Favre,** professeur à l'Ecole Nationale Supérieur des Industries Chimiques, pour avoir accepté de présider ce jury.

Un grand merci à **Denis Bémer** d'avoir accepté de prendre part au jury et pour m'avoir permis de faire des expériences au sein de l'INRS pour sa sympathie et son accueil à Nancy. Et un Enorme merci à **Yves Morelle** pour son dynamisme, sa motivation et surtout son aide lors de ces campagnes d'essai. Vous avez fait de ces quelques jours d'excellents souvenirs !

Je pense bien sûr à Camfil-Farr qui a cofinancé ces travaux. Merci à Monsieur **Jean-Marie Beschemin** d'avoir su justifier auprès de Camfil l'interet d'un travail de recherche. Merci à Monsieur **Ludovic Tampere** pour avoir suivi ces travaux et d'avoir participé au jury.

Un grand merci à l'équipe du LAME, **Sylvain Bassot**, **Evelyne Barker** et **Gilles Alcalde** pour m'avoir permis d'utiliser les installations de microscopie et pour leur bonne humeur !

Je tiens bien sûr à remercier toute l'équipe du LECEV, pour le soutien matériel et moral particulièrement à **Pascal Lemaitre** et pour son enthousiasme contagieux lors des expériences, ses conseils sur l'utilisation de Matlab et à **Phillipe Nerisson(san)** qui fait des « Harein ! ».

Merci à tous ceux du LECEV qui ont constitué le quotidien de ces trois années : **Anne-Laure, Mattbarrault, Nadia Liatimi, Thomaschochon, , U-fesses, Manu, Amandine, Mamadou, Victor Mocho**, **COCO, à M. Florentdany et sa lessive** et bien sûr une pensée pour ceux qui sont partis en cours de route, **Olivier Norvez** et **Seb Artous, Arnaud Querel** et **Constantin Ledier** parce que le travail qui est présenté dans ce manuscrit est aussi le fruit d'une ambiance de travail quotidienne particulièrement chaleureuse.

Une « spéciale Dédicace » aux thésards du SCA**, Simon, Zakouille, Pierremarchal** dit **« Chaleuch' »** avec qui les discussions indignées ont toujours été un grand moment**, Waterring, Edwy, Benoitsabot**. Aux occupants du « 89 », de toutes les générations. **Jean-Christophe, Denise, Francois Gensdarmes, Déjonk, Blondusgueg, Marcifouette.** Un grand merci à **Francois-Xavier Ouf** pour ses conseils, son soutien durant ces travaux. Merci au « peuple du 83 » d'avoir été, **Seigneur Gelain, Maitre Ricciardi, Chareuch', David Guerra.** De même les « ex SCA » du 89, **Lionel Berger, Michael Rabouinne, Seb Pontrax.**

Je n'oublie pas non plus la « filtration Team » de Nancy,**, Nathalie et Hubert** que je remercie particulièrement pour leur accueil lors de la soutenance. **Pierre- Colin Gervais** pour les travaux et les grandes discussions sur la filtration et pour les sorties « chez Patoch ».

Une pensée particulière va à **Barbara Weyh** qui m'a supporté tous les jours et, semblerait il, cela n'a pas été chose aisée. A **mes parents** qui ont toujours été là depuis le début (le tout début !).

« En souvenir de mon grand-père Constant Friconneau
A Mes parents et ma compagne Barbara »

TABLE DES MATIERES

NOMENCLATURE I

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE 3

1. LA FILTRATION DE L'AIR 3

2. PERFORMANCES D'UN FILTRE VIERGE 5

2.1. Perte de charge 5

2.1.1. Filtre plan 5

2.1.2. Filtre plissé 7

2.2. Efficacité 9

3. AEROSOLS NANOSTRUCTURES 10

3.1. Diamètres caractéristiques 11

3.2. Morphologie 12

4. FILTRATION DYNAMIQUE SUR UN MEDIUM PLAN 13

4.1. Filtration profonde 14

4.1.1. Modèles de perte de charge basés sur un dépôt dendritique 15

4.1.2. Modèles de perte de charge basés sur un dépôt stochastique 16

4.1.3. Modèles de perte de charge basés sur un medium capillaire 17

4.2. Domaine de transition 17

4.2.1. Approche pour un medium fibreux 17

4.2.2. Approche capillaire 18

4.3. Filtration en surface 21

4.3.1. Caractéristiques du gâteau 21

4.3.2. Modélisation de la perte de charge du dépôt 24

4.4. Conclusion 25

5. FILTRATION DYNAMIQUE SUR UN MEDIUM PLISSE 26

5.1. Ecoulement et transport des particules..... 27

5.1.1. Ecoulement 27

5.1.2. Trajectoire des particules..... 28

5.2. Réduction de surface 29

5.2.1. Homogénéité du dépôt 29

5.2.2. Perte de charge des filtres plissés / influence de la vitesse 31

6. CONCLUSION 33

CHAPITRE II : AEROSOLS ET MEDIA 35

1. CARACTERISATION DES MEDIA 35

1.1. Résistance aéraulique des filtres vierges 36

1.2. Granulométrie des fibres 37

1.3. Caractérisation compacité et épaisseur 40

1.4. Influence du plissage sur les caractéristiques du medium 42

2. CARACTERISATION DES AEROSOLS 43

2.1. Aérosols nanométriques ou à structures nanométriques 44

2.1.1. Aérosol de carbone 45

2.1.2. Oxyde de titane 46

2.1.3. Argent 47

2.1.4. Fumées de métallisation Zn/Al 49

2.2. Aérosol submicronique 50

2.3. Conclusion 51

CHAPITRE III : ETUDE DU COLMATAGE DES FILTRES PLANS 53

1. MATERIEL ET METHODES 53

1.1. Banc d'essai aéraulique 53

1.2. Mesure du profil de pénétration 54

1.2.1. Préparation des échantillons 54

1.2.2. Mesure EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometry) et traitement des données 55

1.3. Mesure de porosité 57

1.3.1. Présentation du dispositif MEGAPAN (Mesure de l'Epaisseur du GAteau de PArticules Nanométriques) 57

1.3.2. Principe 57

1.3.3. Acquisition et traitement des points expérimentaux 59

1.3.4. Traitement du scintillement 60

1.3.5. Mise au point et validation de la méthode 60

1.3.6. Absorbance du dépôt 63

2. RESULTATS 64

2.1. Filtration profonde et transition / pénétration des particules 64

2.1.1. Colmatage par des particules d'argent 66

2.1.2. Colmatage par des particules d'oxyde de titane 70

2.1.3. Colmatage par des particules d'alumine 71

2.1.4. Comparaison avec un modèle analytique d'efficacité initiale 72

2.2. Filtration en surface et porosité des dépôts 74

2.2.1. Aérosol de carbone 74

2.2.2. Aérosol d'alumine 77

3. COMPORTEMENT DES FILTRES PLISSES VIS-A-VIS DES PARTICULES NANOMETRIQUES 80

3.1. Matériel et méthodes 80

3.2. Résultats 82

4. CONCLUSION 85

CHAPITRE IV : FILTRES PLISSES / OOPS (OBSERVATION OPTIQUE D'UN PLI SIMPLE) 87

1. EXPERIENCE OOPS 87

1.1. Banc aéraulique 89

1.2. Perte de charge du filtre vierge 89

2. DEFORMATION DU PLI 90

2.1. Matériel et méthode 90

2.2. Résultats 92

3. COLMATAGE 95

3.1. Aérosol nanostructuré - carbone 95

3.2. Alumine 96

4. REMPLISSAGE DU PLI 98

4.1. Matériel et méthode 98

4.2. Résultats 101

5. OBSERVATION DE L'ENTREE DU PLI 103

5.1. Matériel et méthode 103

5.2. Résultats 104

5.2.1. Formation des dépôts en entrée de pli 104

5.2.2. Mesure des champs de vitesse 107

6. CONCLUSION 111

CHAPITRE V : MODELISATION 113

1. FILTRE PLAN 113

1.1. Point de colmatage 114

1.2. Perte de charge 114

1.3. Comparaison modèle expérience 117

2. FILTRE PLISSE 119

2.1. Réduction géométrique de la surface 119

2.2. Efficacité de collecte du pli 122

2.3. Réentrainement des dépôts 123

2.4. Perte de charge 124

2.5. Conclusion 125

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 127

ANNEXE I ..... A

ANNEXE II ..... D

ANNEXE III ..... G

ANNEXE IV ..... H

REFERENCES ..... A

LISTE DES TABLES ..... G

LISTE DES FIGURES ..... H

LISTE DES PUBLICATIONS ET DES COMMUNICATIONS ..... O

NOMENCLATURE

Lettres latines

a	Coefficient de l'équation de Darcy	[-]
A_f	Surface volumique des fibres	[m^{-1}]
a_g	Surface volumique des particules	[m^{-1}]
B	Perméabilité	[m²]
b	Coefficient de l'équation de Darcy	[-]
C	Coefficient de trainée des singularités dans le pli	[-]
C_0	Concentration initiale	[kg/ m^3]
C_{amont}	Concentration amont	[kg/ m^3]
C_{aval}	Concentration aval	[kg/ m^3]
CE	Coefficient d'épuration	[-]
Cu	Coefficient de Cunningham	[-]
D_{ae}	Diamètre aérodynamique	[m]
D_{ag}	Diamètre de l'agrégat	[m]
D_{ev}	Diamètre équivalent en volume	[m]
D_f	Dimension fractale	[-]
$D_{fdavies}$	Diamètre de fibre de Davies	[m]
D_g	Diamètre de giration	[m]
D_m	Diamètre de mobilité électrique	[m]
D_p	Diamètre de la particule	[m]
D_{pp}	Diamètre des particules primaires	[m]
D_{po}	Diamètre de pore	[m]
d_f	Diamètre de fibre	[m]
d_e	Diamètre équivalent d'un capillaire chargé en particules	[m]
d_{eq}	Diamètre équivalent d'un capillaire	[m]
E	Efficacité de collecte du pli	[% mm]
E_c	Energie cinétique du fluide	[J]
e_g	Epaisseur du dépôt	[m]
Ft	Force de trainée des singularités présentes dans le pli	[N]
G	Grossissement du système	[-]

g	Grossissement de la caméra	[-]
Gr	Grammage	[Kg/ m²]
h	Hauteur de pli	[m]
h_c	Hauteur de pli après formation du gâteau	[m]
h_k	Constante de Kozeny	[-]
I_0	Intensité lumineuse initiale	[U.A]
I_t	Intensité lumineuse transmise	[U.A]
k_{pli}	Coefficient de pénétration des particules dans le pli	[m^{-1}]
K	Coefficient de pénétration	[m^{-1}]
k_f	Préfacteur fractal	[-]
K_c	Résistance spécifique d'un dépôt	(s^{-1}]
L	Longueur du chemin optique	[m]
Lc	Longueur caractéristique	[m]
m_{ag}	Masse de l'agrégat	[Kg]
m_{cp}	Masse accumulée à la transition	[g/ m²]
m	Masse accumulée	[g/ m²]
Np	Nombre de particules primaires	[-]
p	Pas de plissage	[m]
pc	Pas de plissage après formation du gâteau	[m]
P_{amont}	Pression en amont du filtre	[Pa]
P_{aval}	Pression en aval du filtre	[Pa]
Pe	Nombre de Peclet	[-]
P_m	Perméance	[-]
Q	Débit total dans un capillaire	[m^3/ s]
Q_d	Débit à travers la section colmatée du capillaire	[m^3/ s]
Q_c	Débit à travers la section libre du capillaire	[m^3/ s]
Q_v	Débit volumique	[m^3/ s]
R_i	Rapport d'interception	[-]
R	Résistance aéraulique	[m^{-1}]
Rs	Rapport de surface	[-]
R_0	Résistance aéraulique initiale	[m^{-1}]
Re_p	Nombre de Reynolds de pore	[-]

Re	Nombre de Reynolds local	[-]
Rm	Contrainte de rupture des singularités présentes dans le pli	[Pa]
Rt	Contrainte imposée par la force de trainée dans les singularités présentes dans le pli	[Pa]
r_f	Rayon de fibre	[m]
$S_{d\,i}$	Surface de dépôt dans le capillaire pour chaque tranche i	[m²]
S_f	Surface de filtration	[m²]
S_{plan}	Surface de filtration d'un filtre plan	[m²]
$S_{plissé}$	Surface de filtration d'un filtre plissé	[m²]
S_s	Surface projetée des singularités présentes dans le pli	[m²]
Sec	Section des singularités présentes dans le pli	[m²]
Stk	Nombre de Stokes	[-]
S_{pli}	Surface de la nappe de medium plissé	[m²]
Tx	Grossissement du dépôt	[m/g]
Tx_{surf}	Taux de surface de filtration perdu par gramme de particules	[g^{-1}]
Vf	Vitesse de filtration	[m/s]
Vf_{plan}	Vitesse de filtration sur filtre plan	[m/s]
$Vf_{plissé}$	Vitesse de filtration sur filtre plissé	[m/s]
V_{loc}	Vitesse locale de l'écoulement dans le pli	[m/s]
x	Profondeur dans le medium	[m]
Y	Facteur inertiel de la relation de Dupuit-Forchheimer	[-]
Z*	Epaisseur du medium équivalente	[m]
Z	Epaisseur du medium	[m]

Lettres grecs

α	Compacité du medium	[-]
α_g	Compacité du dépôt	[-]
α_p	Compacité des particules	[-]
$\alpha_{transition}$	Compacité de transition	[-]
α_{pli}	fraction de volume occupée par le medium à l'entrée du pli fonction du pas de plissage et de l'épaisseur du medium	[-]
β	Angle formé par le laser de MEGAPAN et la membrane	[Deg]
ΔP	Perte de charge	[Pa]

Nomenclature

ΔP_0	Perte de charge initiale	[Pa]
ΔP_c	Perte de charge dans la partie libre du capillaire	[Pa]
ΔP_g	Perte de charge du dépôt	[Pa]
ΔP_{medium}	Perte de charge du medium	[Pa]
ΔP_{plan}	Perte de charge d'un filtre plan	[Pa]
$\Delta P_{plissage}$	Perte de charge provoquée par le plissage du medium	[Pa]
$\Delta P_{plissé}$	Perte de charge d'un filtre plissé	[Pa]
ΔP_{totale}	Perte de charge totale	[Pa]
$\Delta P_{redsurf}$	Perte de charge du filtre tenant compte de la réduction de surface	[Pa]
ε	Porosité du dépôt	[-]
μ	Viscosité dynamique du fluide	[Pa.s]
ξ	Coefficient de perte de charge du au plissage	[-]
ρ	Masse volumique du fluide	[Kg/ m^3]
ρ_f	Masse volumique des fibres	[Kg/ m^3]
ρ_p	Masse volumique des particules	[Kg/ m^3]
φ	Angle de plissage	[Deg]
ω	Angle entre la caméra et la membrane sur MEGAPAN	[Deg]
Ω	Section du filtre plissé	[m^2]
σ	Coefficient d'extinction	[-]
X	Facteur de forme	[-]
γ	Fonction dépendant de la masse déposée et de l'angle des dendrites par rapport à l'écoulement	[-]

INTRODUCTION GENERALE

La contribution des filtres à Très Haute Efficacité (filtres THE) au maintien du confinement des radionucléides, dans une installation nucléaire, est cruciale, puisqu'ils assurent le piégeage des aérosols, principaux constituants des sources de contamination. A ce titre, afin de prendre en compte les risques d'agressions industrielles liées au développement de situations accidentelles, l'IRSN conduit depuis plusieurs années des études et des recherches afin d'évaluer la tenue des équipements de filtration en cas d'agression et les rejets potentiels susceptibles d'en découler. Aussi, des recherches ont été entreprises afin de caractériser le comportement, en termes d'efficacité de filtration et d'évolution du colmatage, de filtres THE soumis à des contraintes représentatives de situations accidentelles.

Dans toute installation industrielle, la situation accidentelle la plus probable et également la plus pénalisante en termes de maintien du confinement est l'incendie. En effet, en plus d'élévations significatives de température et d'humidité, la combustion engendre un dégagement massif d'aérosols. Ces aérosols peuvent notamment être porteurs de contamination mais présentent surtout, une capacité de colmatage très importante. La particularité des aérosols formés par un processus de combustion provient de leur morphologie. Composés de particules primaires sphériques de taille nanométrique, ils présentent des comportements aérauliques similaires à des aérosols submicroniques et des surfaces spécifiques propres à des aérosols nanométriques, ce qui leur confère une résistance à l'écoulement importante impliquant lors des colmatages de filtres, une augmentation de perte de charge très rapide comparativement aux aérosols de morphologie plus simple. Ce fort pouvoir colmatant peut déséquilibrer les réseaux de ventilation ou, dans un cas extrême, provoquer la rupture du medium filtrant et entraîner ainsi le rejet de radionucléides dans l'atmosphère. Le colmatage des filtres THE à petits plis, utilisés dans les installations françaises, a donc été tout d'abord étudié de manière empirique, par l'IRSN. Toutefois, l'absence de validation phénoménologique reste handicapante pour envisager toute extrapolation en dehors du domaine d'étude.

Ces faits ont donc conduit l'IRSN, le LRGP et Camfil à engager un sujet de recherche approfondi dont l'objectif était d'étudier le comportement des filtres utilisés dans les installations nucléaires, en cas de colmatage par des aérosols de combustion.

Dans ce contexte, ce travail, qui vise à caractériser la phénoménologie du colmatage de filtres à très haute efficacité représentatifs de ceux utilisés dans des installations industrielles sensibles, se décompose selon trois axes majeurs reprenant les phases de filtration identifiées sur un filtre plissé. Pour chaque partie, une instrumentation spécifique a été développée afin de permettre la mesure des paramètres influents à l'échelle microscopique et de les mettre en lien avec les effets macroscopiques au premier titre desquels l'augmentation de résistance aéraulique du filtre.

Pour ce faire, nous avons eu recours à des aérosols générés de façon maîtrisée et permettant de mettre en place des moyens de mesure nécessaires à la compréhension du phénomène de colmatage.

La première partie de ce mémoire est consacrée à la littérature scientifique sur le sujet du colmatage. Après un rappel sur les bases de la filtration, nous abordons l'état des connaissances sur les media poreux et leur interaction avec des aérosols. Par la suite, un bilan

des travaux sur les dépôts d'aérosols, leurs caractéristiques et leur résistance aéraulique en mettant l'accent sur les dépôts de particules de suie est effectué. Enfin, les travaux réalisés sur la filtration par medium plissé sont discutés.

Sur cette base bibliographique, la seconde partie de ce mémoire présente les travaux réalisés et qui visent à compléter les travaux existants.

Dans le premier chapitre, nous nous intéressons à l'accumulation des particules dans le medium qui caractérise la filtration profonde, en utilisant une méthode de mesure basée sur la microscopie électronique. Nous discutons de la forme du profil d'accumulation des particules dans le medium, de l'influence des conditions de filtration et de l'influence de ce profil sur l'évolution de la perte de charge.

Dans un second temps, notre attention se porte sur la spécificité des dépôts formés à la surface du medium filtrant, en particulier leur porosité liée à des valeurs de perte de charge en utilisant un dispositif réalisé pour l'occasion et permettant la mesure en continu de la croissance des dépôts, afin d'obtenir des valeurs de porosité dans différentes conditions en s'affranchissant de l'erreur de mesure systématique. Ces données sont confrontées aux modèles existants, dont nous discutons la pertinence.

Par la suite, afin d'étudier de manière analytique les phénomènes à l'œuvre dans un filtre plissé, nous avons adopté une stratégie de changement d'échelle afin de mieux maîtriser les conditions expérimentales et de pouvoir observer les écoulements et les accumulations de particules dans un pli représentatif d'un filtre plissé industriel. Peu présentes dans la littérature, ces informations doivent permettre de comprendre les causes de l'augmentation de perte de charge (réduction de surface) due au remplissage du pli et sensible à la vitesse de filtration.

Enfin dans un dernier chapitre, les données acquises sur filtre plan et sur le comportement d'un pli, nous servent de base phénoménologique à l'établissement d'un modèle analytique simple permettant de prédire le comportement aéraulique d'un filtre plissé durant son cycle de vie.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Avant de définir les filtres utilisés dans les installations nucléaires françaises, il convient de se pencher sur les caractéristiques globales permettant de caractériser un filtre à air.

1. LA FILTRATION DE L'AIR

La filtration des fluides pour l'usage des hommes a depuis toujours été une nécessité. Les civilisations précolombiennes et cambodgiennes déjà purifiaient l'eau issue des fleuves. La filtration de l'air a également été utilisée depuis des millénaires. Citons par exemple l'utilisation de chiffons pour se protéger des poussières dans les mines romaines, ou les corps retrouvés à Pompéi de personnes ayant manifestement éprouvé la nécessité de se protéger les voies respiratoires par des tissus.

L'utilisation de media fibreux pour la filtration de l'air est aujourd'hui encore très largement répandue. En effet, la plupart des dispositifs de filtration passent par l'utilisation de medium fibreux.

Les filtres à air peuvent être classés selon trois catégories d'utilisation :

- **la purification de l'air utilisé pour le fonctionnement de machines**. Ce type d'utilisation regroupe de très nombreux filtres depuis les micro-filtres utilisés pour protéger les éléments électroniques comme les disques durs, jusqu'aux filtres à air utilisés dans les moteurs thermiques pour protéger les pièces en mouvement de la dégradation provoquée par des aérosols minéraux très abrasifs. Pour ce type de filtre, les performances en termes d'efficacité sont relativement faibles. En revanche, ils doivent offrir une résistance minime à l'écoulement de l'air durant toute leur durée de vie pour ne pas affecter le fonctionnement du dispositif qu'ils protègent. Ces filtres sont en outre soumis à des débits très variables. On trouve également l'utilisation de cyclones (ou microcyclones) pour séparer les particules les plus lourdes et donc les plus susceptibles de détruire des pièces en mouvement).
- **la protection des travailleurs et la purification de l'air intérieur**. Cette catégorie regroupe les équipements de protection individuelle (Brochot 2012) et les filtres d'épuration de l'air intérieur dans les industries (Bémer et al. 2013). Les performances en termes d'efficacité sont ici plus importantes. En effet, un aérosol, même de taille faible, présente des risques non négligeables pour la santé des travailleurs.
- **la protection de l'environnement et des populations**. Les filtres de cette catégorie visent à éviter le rejet de contamination (le plus souvent sous forme d'aérosols solides) dans l'atmosphère. Cette catégorie regroupe aussi bien les filtres à particules utilisés dans l'automobile que les filtres utilisés dans les installations nucléaires afin de protéger l'environnement d'éventuels rejets nocifs. Ces filtres présentent une grande variété, dépendante du contaminant. Les exigences d'efficacité en découlent. Dans le cas des filtres utilisés dans les installations nucléaires, ceux auxquels nous nous intéressons dans ce travail, l'efficacité doit être très importante de même que la résistance aux agressions extérieures (température, pression, agression chimique etc...).

La très grande majorité des dispositifs de filtration utilise un medium fibreux disposé en plis (afin de maximiser la surface d'échange). La géométrie de plissage se caractérise par la hauteur de pli *h*, le pas de plissage *p* et l'angle de plissage *φ (Figure 1*).

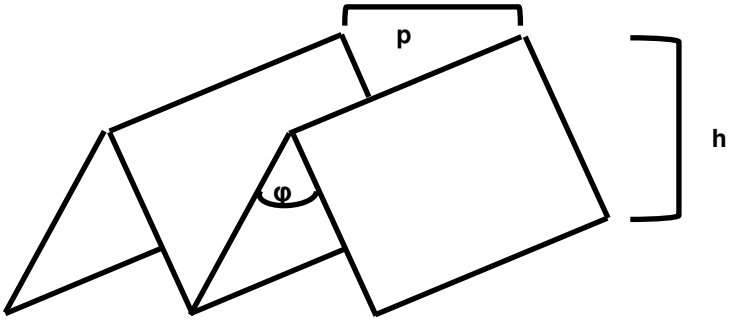


Figure 1 : Schéma de la hauteur h et du pas p d'un pli (Del Fabbro 2001)

Dans le domaine du nucléaire, deux types de conception coexistent :

- **la conception américaine, dite « à plis profonds ».** La propriété de ces filtres est d'utiliser une géométrie de plissage où la hauteur de pli peut atteindre 300 mm. Ces plis sont généralement séparés par des intercalaires.
- **la conception française, dite « à mini plis »**. Les plis ont alors une hauteur généralement comprise entre 20 et 30 mm. Dans ces filtres de type cellule, les nappes de medium plissé sont organisées en dièdre (Figure 2) afin de maximiser la surface de filtration. Une cellule comporte 5 dièdres (parfois jusque 8) et a un débit nominal de 3400 m^3/h et une vitesse nominale de filtration de 2,5 cm/s.

Figure 2 : Photo d'un filtre THE industriel (double dièdres)

La Figure 3 représente un medium fibreux vu au microscope électronique à balayage. On peut y observer le caractère hétérogène du medium en termes d'orientation et de diamètre de fibres. Pour ce type de medium, de nombreux matériaux peuvent constituer les fibres. On citera notamment la cellulose (papier), les matières synthétiques, les fibres métalliques et les fibres de verre. Dans le cas des filtres utilisés dans les installations nucléaires, le medium est constitué de fibres de verre pour la possibilité qu'elles offrent de réaliser des fibres très fines (de l'ordre du micromètre). On utilise un liant organique (moins de 5 % en masse) pour assurer une cohésion entre les fibres.

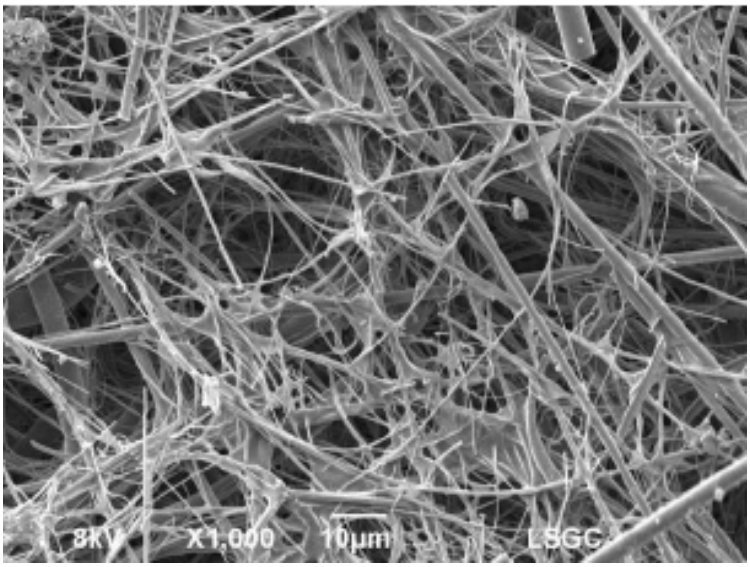


Figure 3 : Filtre plan vu au MEB (Joubert 2009)

2. PERFORMANCES D'UN FILTRE VIERGE

Les performances d'un filtre s'évaluent principalement à partir de deux grandeurs : la perte de charge et l'efficacité.

2.1. Perte de charge

La perte de charge d'un filtre est la diminution de la pression de l'air à sa traversée. Elle dépend de la résistance du filtre et de la vitesse de l'air, et se définit par :

$$\Delta P = P_{amont} - P_{aval} \qquad [1]$$

2.1.1. Filtre plan

Le nombre de Reynolds de pores Re_p permet de caractériser le modèle d'écoulement dans un medium fibreux. Il représente le rapport des forces d'inertie du fluide et des forces de cisaillement visqueux et est fonction de V_f, ρ et μ respectivement la vitesse, la masse volumique et la viscosité dynamique du fluide, A_f étant la surface volumique des fibres et α, la compacité du medium :

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho . V_f}{\mu . A_f . \alpha} \qquad [2]$$

Modèle Laminaire (Re_p<1) ou Darcyen

Il est très largement admis que, pour un medium fibreux plan, le régime d'écoulement (défini par le nombre de Reynolds de pores, ici inférieur à 1) est laminaire et donc que la perte de charge est directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement du fluide. Pour ce cas de

figure, le modèle largement utilisé pour décrire la perte de charge initiale est le modèle de Darcy où l'on considère le fluide porteur comme incompressible. On a donc :

$$\Delta P = \frac{Z}{B}\mu.V_f \qquad [3]$$

Avec B et Z la perméabilité et l'épaisseur du medium, B étant fonction de la compacité α et du rayon des fibres r_f tel que :

$$B = \frac{r_f^{\,2}}{f(\alpha)} \qquad [4]$$

Le terme f(α) trouve plusieurs définitions dans la littérature selon les hypothèses et simplifications considérées. Le modèle empirique de Davies (Davies 1973) est le plus couramment utilisé :

$$\Delta P = 16.\alpha^{3/2}(1+56.\alpha^3).\mu.V_f.\frac{Z}{r_f^2} \qquad [5]$$

Il existe de nombreuses autres expressions de 1/f(α) recensées par Thomas (Thomas 2001). Peu de modèles tiennent compte de la polydispersion des fibres. Sakano et al. (2000) a proposé un modèle considérant la perte de charge totale comme la somme des pertes de charge des différentes fibres composant le medium et tenant compte, de ce fait, de la granulométrie des fibres. Plus récemment, Gervais et al. (2012) a établi un modèle de perte de charge pour des media composés de fibres ayant une répartition de diamètre polymodale. Ce modèle, basé sur une longueur de fibre dépendant de la compacité et la surface spécifique des fibres présente un bon accord avec les valeurs simulées.

Modèle non Darcyen (Re_p>1)

Pour les hautes vitesses de filtration, s'ajoute une composante quadratique à l'équation de Darcy. Le gradient de pression s'exprime alors par :

$$-\frac{dp}{dx} = a.\mu.V_f + b.\rho.V_f^{\,2} \qquad [6]$$

Pour un écoulement laminaire (Re_p<1), on retrouve la loi de Darcy avec b=0 car les effets d'inertie sont considérés négligeables, et a=$\frac{Z}{B}$, la seule résistance à l'écoulement étant celle due aux frottements visqueux. Le second terme inclut les pertes de charge singulières liées aux déviations de l'écoulement autour des fibres. On peut citer la relation de Dupuit-Forchheimer (citée par Miguel 2003) qui est valable pour un nombre de Reynolds local $\mathrm{Re} = \frac{\rho.V_f.\sqrt{B}}{\mu}$ >1 :

$$\Delta P = \frac{\mu.Z}{B}.V_f + \frac{\rho.Z.Y}{\sqrt{B}}V_f^2 \qquad [7]$$

Avec Y facteur inertiel qui peut être défini de façon empirique.

Dans le cas d'un filtre plan, ce modèle est utilisé pour les vitesses de filtration très hautes. Dans le cadre de l'étude du colmatage des filtres THE, où la vitesse nominale est de l'ordre de 2,5 cm/s, nous restons en régime laminaire et donc nous ne considérerons pas ce terme inertiel.

2.1.2. Filtre plissé

La perte de charge d'un filtre plissé vierge résulte de la perte de charge du medium et de la perte de charge due au plissage. Pour un filtre plissé, cette perte de charge peut être vue comme la somme de deux composantes, d'une part la résistance opposée par le medium à l'écoulement du fluide, d'autre part les pertes de charge résultant de la géométrie de plissage du filtre (Rebai et al. 2010, Tatachuk et al. 2008) et des frottements du fluide inhérents.

Plusieurs approches permettent la modélisation de la perte de charge d'un filtre plissé vierge. Del Fabbro (Del Fabbro 2001) propose un modèle complexe, fonction notamment des caractéristiques de plissage h et p et du medium :

$$Log\left(\frac{\Delta P}{Z.R.V_f}\right) = \left(\frac{\mu}{Z^2.R}\right)^{0,7}.\left(460.\log\left(1+\frac{h.Z}{p^2}\right)+\frac{0,7.\left(\frac{h}{p}\right)^2}{\log\left(1+\frac{h}{Z}.\frac{1}{\mathrm{Re}}\right)}\right) \qquad [8]$$

Avec Re le nombre de Reynolds local qui est défini par : $\mathrm{Re} = \frac{\rho.V_f.p}{\mu}$

L'utilisation de ce modèle est limitée par sa complexité et son domaine de validité. On lui préférera celui de Callé-Chazelet et al. (2005) qui considère la perte de charge globale comme la somme de la perte de charge due au medium et celle due au plissage proportionnelle à l'énergie cinétique du fluide :

$$\Delta P_{totale} = \Delta P_{media} + \Delta P_{plissage} \qquad [9]$$

Où $\Delta P_{plissage} = E_c.\xi$ avec ζ le coefficient de perte de charge et $E_c = \frac{\rho}{2}.\left(\frac{S_f}{\Omega}\right)^2.V_f^{\,2}$, l'énergie cinétique du fluide porteur (on note S_f la surface de filtration et Ω la section du filtre plissé), et ΔP_{media} calculée à partir de la loi de Darcy.

A partir des résultats expérimentaux de Del Fabbro (Del Fabbro 2001) et en considérant $S_f = Np.L.2h$ avec L la longueur du pli, et Np le nombre de plis, Callé-Chazelet et al. (2005) sont arrivés à la relation suivante :

$$\Delta P_{totale} = \Delta P_{media} + \frac{0,3336}{p}\left(\frac{h}{p}\right)^2 .V_f^{\,2} \qquad [10]$$

Notons également les travaux de B.J. Tatachuk (2008) et M. Rebai et al. (2010) qui ont utilisé une approche semi empirique afin de modéliser la perte de charge d'un filtre plissé.

D'autres auteurs (Waghode et al. 2005, 2007) ont étudié expérimentalement et numériquement l'influence de la déformation d'un filtre plissé sur sa perte de charge.

En considérant une compression du medium filtrant et la déformation du pli (Figure 4), ils ont déduit une réduction de la surface efficace de filtration et donc une augmentation de la résistance à l'écoulement.

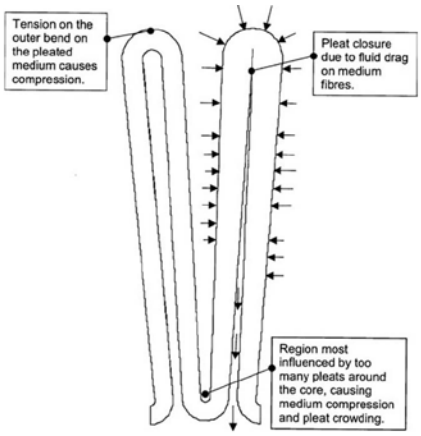


Figure 4 : Schéma des forces de pression s'exerçant sur un pli et annotation sur les régions sensibles à la déformation (Waghode et al. 2005)

Ces déformations doivent être prises en compte pour des valeurs de perte de charge importantes. Ces travaux concernent la filtration liquide, domaine où la perte de charge est sensiblement plus forte. Toutefois, ce phénomène déjà observé indirectement (Hettkamp et al. 2012) peut influencer le comportement aéraulique du filtre et devrait être pris en compte. D'autant plus qu'il a déjà été observé (Gervais 2013) que la perte de charge d'un filtre colmaté chute lorsque l'écoulement est arrêté, ce qui plaide en faveur d'un réarrangement du dépôt qui pourrait être causé par un retour élastique du medium.

La Figure 5 représente l'évolution de la perte de charge en fonction de la vitesse de filtration mesurée pour un filtre plan et un filtre plissé. Cette figure illustre la nécessité de prendre en compte le plissage du medium, dans la détermination de la perte de charge. Dans cet exemple, la différence se fait sentir pour une vitesse de filtration supérieure à 4 cm/s.

Le caractère linéaire de la relation entre perte de charge et vitesse de filtration pour un medium plan permet de conclure sur l'absence de compression du medium pour les vitesses

représentées. Toutefois, pour un filtre plissé, une influence de la déformation des plis n'est pas à exclure.

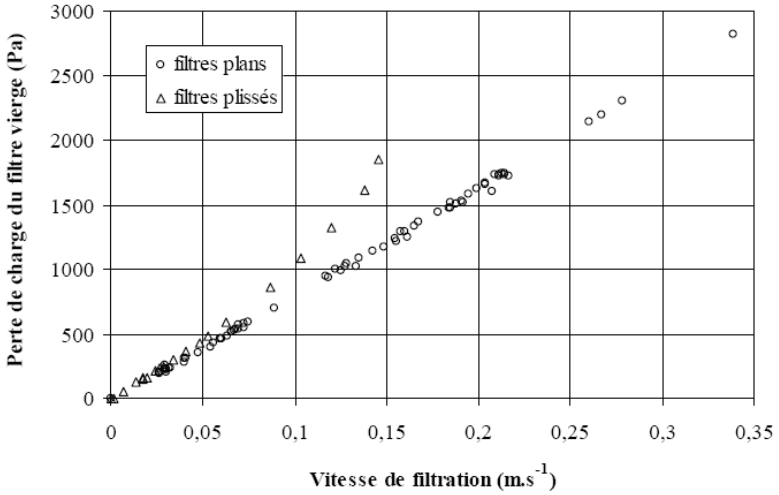


Figure 5 : Courbes de perte de charge mesurées pour un filtre plan et un filtre plissé en fonction de la vitesse de filtration (Joubert 2009)

2.2. Efficacité

L'efficacité d'un filtre est sa capacité à collecter les aérosols du fluide porteur. Il existe de nombreuses expressions ; selon les degrés de séparation, on utilisera l'une ou l'autre.

Rendement

On note le rendement R_0 le rapport de particules collectées sur les particules incidentes :

$$R_0 = \frac{C_{amont} - C_{aval}}{C_{amont}} \qquad [11]$$

C représente la concentration en particules. On exprime généralement R_0 en pourcentage. Le rendement est surtout utilisé pour caractériser les filtres à moyenne efficacité.

Perméance

La perméance P_m est le « complément » du rendement, de la même façon :

$$P_m = \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \qquad [12]$$

Coefficient d'épuration

Le coefficient d'épuration est l'inverse de la perméance. On l'utilise pour les filtres à haute efficacité car il est plus simple d'usage.

$$CE = \frac{C_{amont}}{C_{aval}} \quad [13]$$

3. AEROSOLS NANOSTRUCTURES

Le rôle d'un filtre à air est de séparer la phase solide (ou liquide) de l'air. Cette phase se présente sous la forme d'aérosols, selon Renoux et Boulaud (1998) :

« Un aérosol est un ensemble de particules, solides et/ou liquides, en suspension dans un milieu gazeux et présentant une vitesse de chute négligeable. Dans l'air et dans les conditions normales de température et de pression, le terme aérosol se rapporte donc à des particules dont la dimension est inférieure à 100 µm, les plus fines pouvant atteindre quelques fractions de nanomètres »

Pouvant être d'origine anthropique ou naturelle, ils présentent une grande variété de compositions, formes et tailles. Lors d'une combustion, et notamment dans un cas accidentel d'incendie où les apports en réactif ne sont pas contrôlés, la combustion n'est pas optimale. Il y a, dans la majorité des cas une émission d'aérosols. Ces aérosols présentent une morphologie et une composition typiques. Composés de particules primaires pseudo sphériques, ils se présentent sous la forme d'agrégats[1] (Figure 6), parfois sous une gangue de solvant ou d'élément organique issu de la décomposition des matériaux brûlés (Ouf 2006).

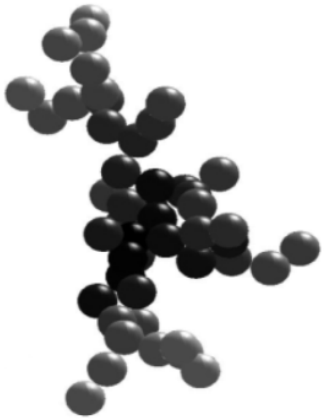


Figure 6 : Représentation d'une particule de suie (Ouf 2006)

De plus en plus d'études mettent en évidence le comportement singulier des agrégats de particules vis-à-vis des phénomènes largement connus et étudiés concernant des particules sphériques (Mackowski 2006, Filipov 2000).

Dans la majorité des cas, le fait de supposer les particules sphériques est une approximation tolérable. Toutefois, dans le cas d'une particule complexe, cette approximation ne représente

[1] Il est courant de voir distingué la notion d'agrégat de celle d'agglomérats (Thomas et al. 2014). La différence réside dans le fait que pour des agglomérats, les particules primaires peuvent être partiellement fusionnées. Dans le cadre de ce travail, cette notion ne sera pas abordée.

que peu la réalité des phénomènes. Dans ce travail, de par l'utilisation de différents types d'aérosols, nous extrapolerons les phénomènes mis en évidences au cas de particules de combustion.

3.1. Diamètres caractéristiques

Pour mieux situer les différents diamètres équivalents dont il sera question par la suite, voici un résumé des valeurs de base en métrologie des particules (Figure 7) :

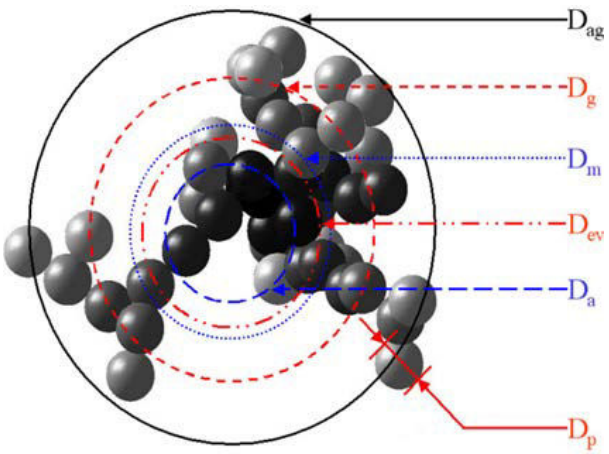


Figure 7 : Représentation des différents diamètres équivalents d'un agrégat (Ouf 2006)

- le diamètre de l'agrégat D_{ag} est le diamètre d'une sphère qui engloberait l'agrégat. Il est issu de l'analyse d'images de microscopie électronique à transmission,

- le diamètre équivalent de mobilité D_m est le diamètre équivalent correspondant à un aérosol sphérique ayant la même mobilité,

- le diamètre équivalent en volume D_{ev} correspond au diamètre qu'aurait la particule contenant le même volume de matière solide si elle était sphérique et sans porosité interne,

- le diamètre équivalent aérodynamique D_a est le diamètre qu'aurait une particule sphérique de densité 1 avec la même vitesse de chute,

- le diamètre de giration D_g rend compte de la répartition des particules primaires. C'est le carré des distances entre les particules primaires et le centre de gravité de l'agrégat,
- D_{pp}, le diamètre des particules primaires qui composent les agrégats, est généralement très peu polydispersé (Ouf 2006). Dans le cas d'une particule effectivement issue d'une réaction de combustion, le diamètre moyen est compris entre une vingtaine et une cinquantaine de nanomètres selon le combustible et le type de flamme. La Figure 8 illustre la distribution du diamètre des particules primaires d'un agrégat réel (Ouf 2006). On remarque ici que la distribution du diamètre des particules primaires est très peu dispersée.

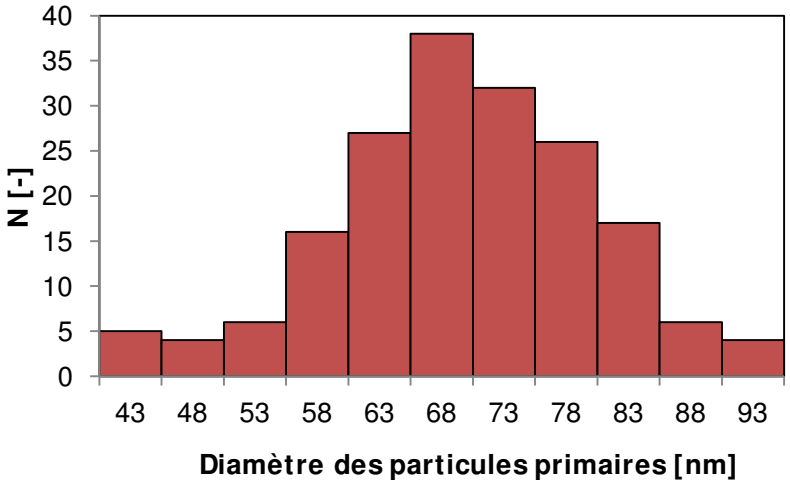


Figure 8 : Distribution granulométrique des particules primaires pour un aérosol issu d'une combustion de toluène (Ouf 2006). N_p, le nombre de particules primaires présentes dans l'agrégat, est très variable dans une situation réelle d'incendie

3.2. Morphologie

Dans la littérature, notamment dans le domaine de la filtration de l'air par des media fibreux, les particules sont très souvent assimilées à des sphères. Parfois, un facteur de forme dynamique χ permet de corriger certains modèles. Le facteur de forme est le rapport du comportement d'une particule sur celui d'une particule sphérique de même diamètre équivalent en volume. La morphologie des agrégats est caractérisée par la relation fractale.

$$N_p = k_f \left(\frac{D_g}{D_{pp}} \right)^{D_f} \qquad [14]$$

Avec D_f la dimension fractale et k_f le préfacteur. D_{pp} est le diamètre des particules primaires, D_g le diamètre de giration et N_p le nombre de particules primaires.

On a également accès par la mesure de la masse de l'agrégat (grâce à un analyseur centrifuge de masse (Olfert et al. 2005) ou à un impacteur) à un nombre de particules primaires par rapport de masse. La dimension fractale D_f, comprise entre 1 et 3, rend compte de la forme de l'agrégat et de sa « compacité ». Pour $D_f \approx 3$, on considère l'agrégat quasi sphérique. Pour $D_f \approx 1$, on a un agrégat en forme de chaînes. La Figure 9 montre des agrégats pour différentes valeurs de dimension fractale.

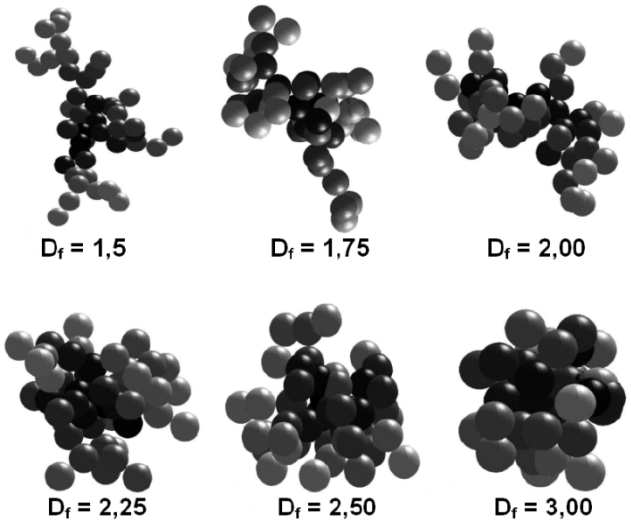


Figure 9 : Différents exemples d'agrégats et valeurs de la dimension fractale associée (Ouf 2006)

Si la particule est de longueur l et que l'on peut reporter N fois une longueur n sur celle-ci, sa dimension fractale est donnée par la relation :

$$D_f = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{l}{n}\right)} \quad [15]$$

Certains auteurs (Ouf et al. 2012, Eggersdorfer et al. 2012 a et b, Park et al. 2004) utilisent la relation puissance entre la masse et le diamètre de mobilité électrique pour caractériser la morphologie des particules. Ce choix permet une mesure plus rapide et simple qui se réalise sur des particules non déposées, donc moins altérées. Toutefois, d'autres auteurs relèvent que cette relation ne permet pas à proprement parler de calculer une dimension fractale (Sorensen 2011) mais un terme appelé « exposant masse/mobilité ». La morphologie fractale des aérosols de combustion influence leur comportement dans un fluide. Les phénomènes relevant de la physique des aérosols diffèrent et de nombreux travaux mettent en évidence cette particularité (Brugière et al. 2014).

Dans le cadre de l'étude de leur filtration, la taille des particules primaires est la donnée primordiale. En effet, elle est responsable de la surface en contact avec le fluide et donc de l'augmentation de la perte de charge du filtre en cours d'utilisation. Le diamètre de mobilité électrique, le diamètre aérodynamique et la dimension fractale permettent de comprendre le comportement des aérosols dans un fluide.

4. FILTRATION DYNAMIQUE SUR UN MEDIUM PLAN

La filtration dynamique définit un processus de séparation où la perte de charge du filtre évolue significativement au cours de son utilisation.

Lors de l'accumulation des particules sur un medium plan, on distingue deux phases d'évolution de la perte de charge (Figure 10) :

- la filtration profonde, où les particules s'accumulent au sein du medium ; l'augmentation de perte de charge est alors due aux changements de structure induits,

- la filtration en surface où l'augmentation de perte de charge est induite par le lit de particules qui se forme à la surface du filtre.

On considère usuellement que l'efficacité de filtration du gâteau de particules est telle que la structure interne du medium colmaté n'évolue plus. Entre ces deux phases, on considère une zone intermédiaire nommée zone de transition.

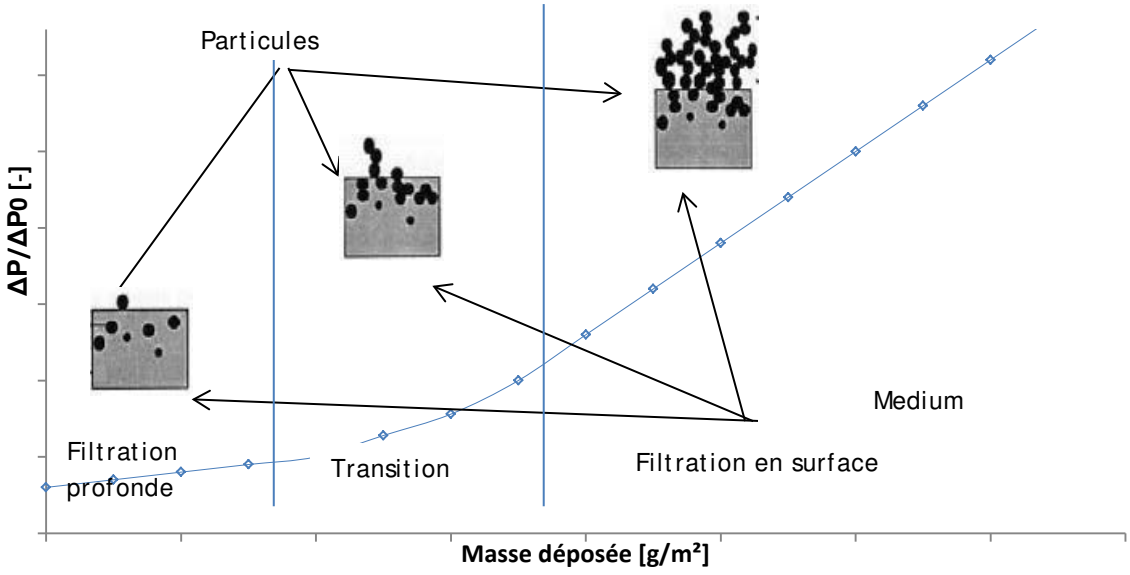


Figure 10 : Evolution de la perte de charge au cours du colmatage

La filtration en profondeur dépend des caractéristiques de l'aérosol et du medium. Elle est donc soumise aux variations et incertitudes inhérentes à l'hétérogénéité du medium. On citait plus haut les caractéristiques du medium (épaisseur, compacité, taille de fibres). Or, celles-ci ne sont pas nécessairement constantes sur toute la surface du filtre. En ce sens, la détermination d'une surface suffisamment importante pour s'affranchir de ces variations est nécessaire. La filtration en surface ne dépend que des caractéristiques des particules, de leur forme, taille et arrangement.

4.1. Filtration profonde

Lors de la filtration profonde, l'accumulation des particules sur les fibres engendre la perte de charge. On distingue deux types de dépôts : le dépôt dendritique et le dépôt stochastique (comme l'illustre la Figure 11).

Les paramètres qui influencent la forme du dépôt sur les fibres et d'une manière plus générale, la filtration profonde sont :

- la diffusion brownienne des particules, caractérisée par le nombre de Peclet, Pe défini par :

$$Pe = \frac{V_f.d_f}{D} \quad [16]$$

avec D le coefficient de diffusion et d_f le diamètre de la fibre

- le rapport d'interception R_i défini par :

$$R_i = \frac{D_p}{d_f} \quad [17]$$

avec D_p, le diamètre des particules,

- l'inertie des particules caractérisée par le nombre de Stokes Stk, défini par :

$$Stk = \frac{\rho_p.V_f.{D_p}^2}{d_f.\mu} \quad [18]$$

Ces paramètres sont ceux qui conditionnent l'efficacité de collecte d'une fibre. La Figure 11 (Kanoaka et al. 1998) illustre la forme du dépôt en fonction de ces trois nombres adimensionnels.

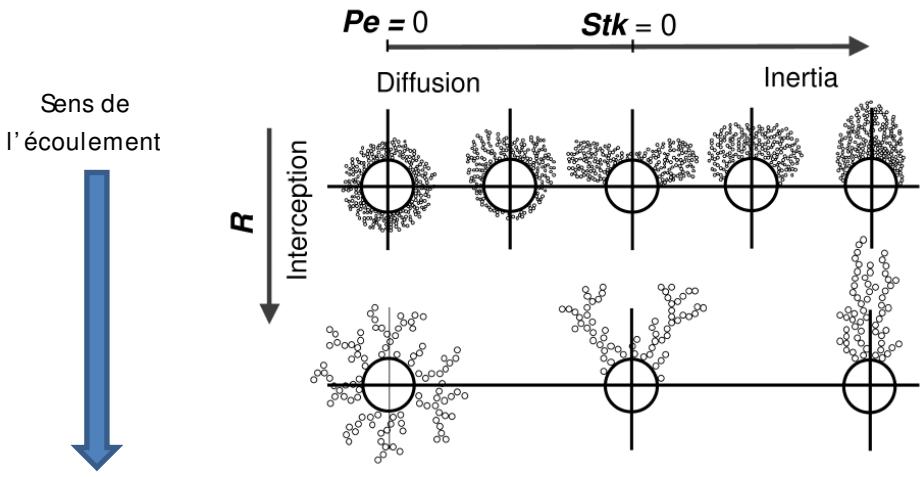


Figure 11 : Différentes structures possibles lors de la séparation de particules solides par une fibre (Kanoaka et al. 1998)

Les différents modèles recensés qui rendent compte de l'évolution de la perte de charge d'un filtre lors de la filtration profonde se basent sur un type de chargement particulier (dendritique ou non).

4.1.1. Modèles de perte de charge basés sur un dépôt dendritique

On citera le modèle de Bergman et al. (1976) qui pose l'hypothèse de deux sources de perte de charge : les fibres et les particules collectées sous forme de dendrites de diamètre égal au diamètre d'une particule sphérique. Dans ce modèle, Bergman distingue la compacité du filtre vierge et celle des particules collectées. Selon ce modèle, les particules sont collectées de manière homogène dans le medium. En s'inspirant du modèle de perte de charge développé par Davies (1973) pour un filtre vierge, il trouve :

$$\Delta P = 64.\mu.V_f.Z.\left(\frac{\alpha}{d_f^2}+\frac{\alpha_p}{D_p^2}\right)^{1/2}\left(\frac{\alpha}{d_f}+\frac{\alpha_p}{D_p}\right) \quad [19]$$

avec α_p la compacité des particules accumulées dans le filtre.

Ce modèle représente correctement la perte de charge pour de faibles vitesses de filtration et lorsque le mécanisme de séparation par diffusion prédomine (cas des aérosols nanométriques).

P. Letourneau et al. (1992) a proposé une modification pour tenir compte du profil de pénétration dans le medium. Il propose d'exprimer le terme α_p en fonction de la profondeur x tel que :

$$\alpha_p(x) = \frac{m_s}{S_f}.\frac{(k.e^{-k.x})}{\rho_p(1-e^{-k.Z})} \quad [20]$$

avec $\frac{m_s}{S_f}$ la masse d'aérosol collectée par unité de surface, et k le facteur de pénétration pour un couple medium/aérosol. Dans ce modèle, k s'incrémente au cours du temps en fonction de la masse de particules collectées et du diamètre de fibre correspondant, déterminé avec la relation de Davies.

La perte de charge devient alors :

$$\Delta P = \int_0^Z \left(64.\mu.V_f\left(\frac{\alpha}{d_f}+\frac{\alpha_{p(x)}}{D_p}\right)\left(\frac{\alpha}{d_f^2}+\frac{\alpha_{p(x)}}{D_p^2}\right)^{1/2}\right)dx \quad [21]$$

Le modèle de Payatakes (1976) part également du principe que le mode de dépôt privilégié est de type dendritique. Ce modèle tient compte de la position des dendrites par rapport à l'écoulement, du nombre de particules composant les dendrites et du profil de pénétration dans le medium. La perte de charge s'exprime par :

$$\Delta P = \Delta P_0(1+\gamma.\alpha_p) \quad [22]$$

avec γ une fonction dépendant de la masse déposée et de l'angle des dendrites par rapport à l'écoulement.

4.1.2. Modèles de perte de charge basés sur un dépôt stochastique

Par extension, le modèle de Davies peut être utilisé pour décrire la perte de charge d'un filtre colmaté.

En partant de l'expression empirique qu'il a développée pour un filtre vierge, et en prenant comme hypothèse un dépôt homogène autour de la fibre, Davies propose une expression de la perte de charge telle que :

$$\Delta P = 64.\left(\alpha + \alpha_p\right)^{\frac{3}{2}}.\left(1 + 56.\left(\alpha + \alpha_p\right)^3\right).\mu.V_f.\frac{Z}{\left(1+\frac{\alpha_p}{\alpha}\right).d_f^2}$$

[23]

Ce modèle ne tient pas compte de la structure du dépôt, de sa rugosité et du profil de pénétration. Il sous-estime quasi systématiquement la perte de charge d'un filtre colmaté.

De la même manière, Juda et Chrosciel (Juda et al. 1970) proposent un modèle de perte de charge considérant une augmentation du diamètre des fibres. Ce modèle souffre des mêmes inexactitudes que celui de Davies. Il comporte, de plus, deux constantes difficiles à déterminer expérimentalement.

Il convient également de citer le modèle de Kanoaka et Hiragi (1990) qui se base sur les coefficients de traînée d'une fibre vierge et d'une fibre chargée de la même manière que le modèle de Juda et Chrosciel. Ces paramètres sont difficiles à déterminer expérimentalement.

4.1.3. Modèles de perte de charge basés sur un medium capillaire

Elmoe et al. (2009) propose un modèle de filtration profonde pour des suies issues de moteurs diesel filtrées dans un milieu capillaire. Dans cette approche, il considère la filtration profonde comme étant le fait de la formation d'un cône de vide à l'extérieur du filtre. Cette approche, pertinente lorsque les aérosols ne s'accumulent pas dans le medium, ne permet pas de rendre compte de manière satisfaisante de l'évolution de perte de charge d'un medium fibreux ou les aérosols s'accumulent à l'intérieur du medium.

4.2. Domaine de transition

La transition entre les deux types de filtration, c'est-à-dire l'obturation des pores de la première couche du medium, a été étudiée selon deux approches. La première approche fait le parallèle avec l'obturation de capillaires (Elmoe et al. 2009). Elle présente l'avantage de comprendre les phénomènes mis en jeu sans avoir recours à des hypothèses trop larges sur la nature du medium. L'autre approche consiste à partir de la détermination du diamètre des pores du medium directement observés sur un medium fibreux (Japuntich et al. 1995, Thomas 2001). Chacune de ces approches présente des avantages et des inconvénients, il convient donc de les aborder toutes les deux sans oublier leurs limites.

4.2.1. Approche pour un medium fibreux

Concernant la phase de transition, les premiers travaux ont été effectués par Japuntich (1993).

Dans une étude expérimentale, il relie le « diamètre des pores » d'un medium fibreux au point de transition et à la perte de charge initiale.

Japuntich propose un modèle de prédiction du point de transition. En partant du principe (démontré expérimentalement) que seuls les pores de la surface du medium jouent un rôle dans la transition vers la filtration en surface et que le diamètre des particules n'en joue aucun, il propose un modèle pour déterminer la masse pour laquelle commence la filtration superficielle. Son approche, simpliste selon ses propres mots, conduit à l'équation :

$$\frac{m}{S_f} = \frac{D_{po}.\rho_p}{1,5} \qquad [24]$$

En considérant $D_{po} = d_f \left(\left(\frac{2\alpha}{\pi} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right)$ [25]

avec $\frac{m}{S_f}$ la masse déposée par unité de surface au point de transition, D_{po} le diamètre des pores en surface de medium et 1,5 une constante déterminée à partir de la masse volumique des particules. Cette constante, déterminée de manière empirique, ne représente pas tous les cas. D'une manière générale, ce modèle ne prédit que très rarement la réalité.

Thomas (2001) se base sur cette approche pour préciser ce modèle. Il propose d'y inclure la compacité du dépôt et obtient la relation suivante :

$$\alpha_{transition} = \frac{\alpha_p.D_{fDavies}}{1,5} \left(\left(\frac{2\alpha}{\pi} \right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \right) \qquad [26]$$

Avec $D_{fDavies}$ le diamètre des fibres défini par la relation de Davies et $\alpha_{transition}$ la compacité pour laquelle la filtration profonde est terminée. Ce modèle donne des résultats en accord avec certains résultats expérimentaux mais représente mal le cas de particules ultra-fines et plus particulièrement celui des particules de suie. Il est intéressant de noter que le diamètre des particules n'apparaît pas dans la relation et semble donc ne jouer aucun rôle sur la masse atteinte lors de la transition. De plus, la compacité des dépôts formés, pourtant particulièrement faible pour des particules ultrafines, n'apparait pas non plus dans cette relation.

4.2.2. Approche capillaire

Elmoe (2009) s'est attaché à simuler l'accumulation de particules dans un capillaire. Cette approche, bien que très éloignée de la filtration par un medium fibreux, permet de mieux se représenter le phénomène de colmatage. Le principe de la simulation est représenté sur la Figure 12.

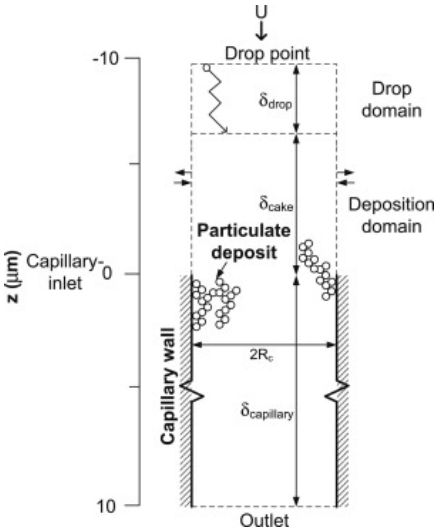


Figure 12 : Schéma de principe de la simulation d'Elmoe pour décrire la formation du gâteau (Elmoe 2009)

Par le biais de ce principe et en faisant varier le nombre de Peclet, Elmoe calcule plusieurs profils d'accumulation des particules jusqu'au moment où le dépôt croît en dehors du capillaire, ce qui correspondrait à la formation du gâteau. Un des résultats intéressants est la formation d'un « cône » à l'entrée du capillaire, comme le représente l'illustration suivante (Figure 13).

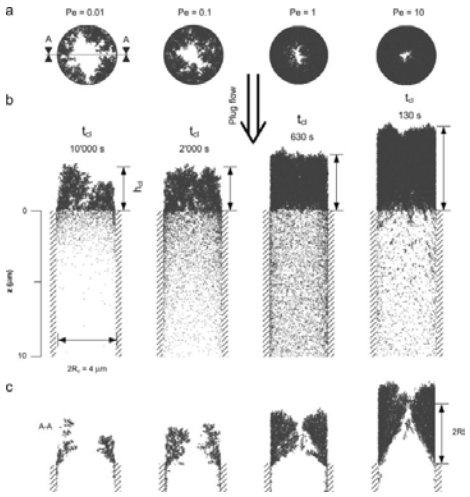


Figure 13 : Différents profils obtenus pour différents nombres de Peclet et des temps de « colmatage » différents (a, vue de dessus, b, vue de côté et c, vue de coupe) (Elmoe 2009)

Notons que ces profils ne sont pas sans rappeler les structures formées par l'accumulation de particules sur une fibre, proposés par Kanoaka et al. (1998) (Figure 11).

Les courbes du profil d'accumulation en fonction de la hauteur présentent, pour un nombre de Peclet élevé, une zone de vide à l'entrée du capillaire (Figure 13 et Figure 14).

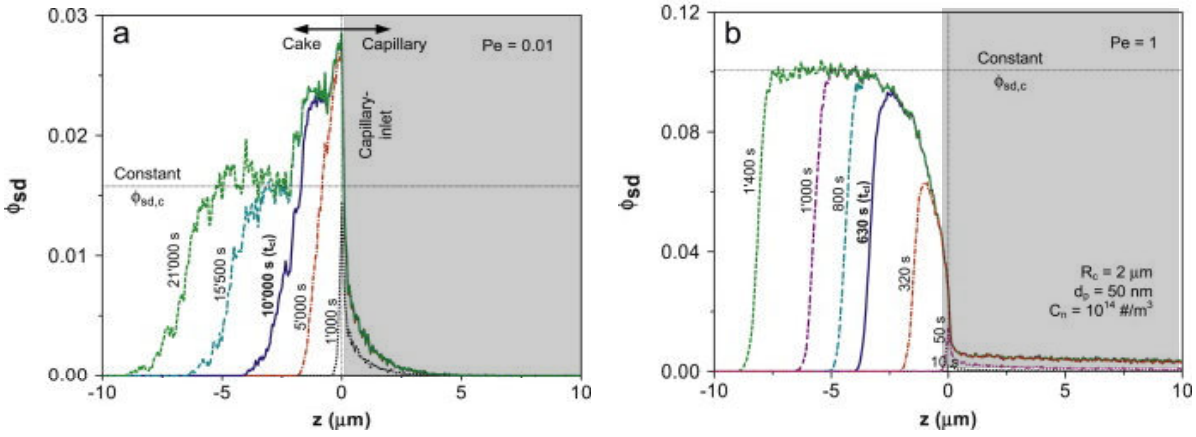


Figure 14 : Courbes représentant la compacité de particules en fonction de la position dans (en gris sur les graphiques) la zone et à l'extérieur du capillaire pour différents temps de colmatage et un nombre de Peclet de 0.01 (a) et de 1 (b) (Elmoe et al. 2009)

Dans la théorie classique de la filtration, cette zone n'est pas prise en compte dans le calcul de la porosité du dépôt. Or, ce paramètre est une entrée très sensible du modèle de perte de charge utilisé pour représenter le gâteau. En dehors de cette interface, la porosité du gâteau semble constante sur son épaisseur.

Enfin, l'observation de la courbe de perte de charge associée montre que la phase de filtration en surface, linéaire, intervient lorsque le capillaire est fermé (Figure 15). Ce point est le plus pertinent pour étudier la transition entre la filtration en profondeur et en surface mais sa détermination reste délicate à partir de la seule évolution de perte de charge.

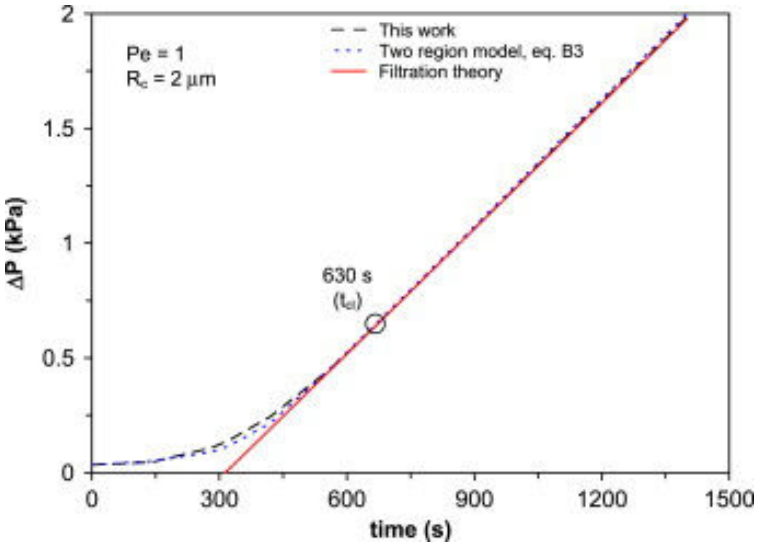


Figure 15 : Courbe de perte de charge associée à la simulation. A 630 s, la courbe devient linéaire. Ce point correspond sur la Figure 14 à l'obturation du capillaire (Elmoe et al. 2009)

4.3. Filtration en surface

La filtration en surface intervient lorsque les pores superficiels du medium sont colmatés. Les particules s'accumulent en surface et se substituent aux fonctions du filtre en occasionnant une augmentation linéaire de la perte de charge. Avant toute chose, il convient de comprendre le phénomène. Diverses approches ont été suivies par les auteurs. Le modèle le plus répandu considère un dépôt homogène clairement limité du medium. D'autres font intervenir des processus plus complexes.

4.3.1. Caractéristiques du gâteau

La perte de charge du gâteau de particules accumulées sur la surface peut être affectée en premier lieu par la porosité, qui a été étudiée par de nombreux auteurs en fonction des paramètres aérauliques, des tailles de particules. Mais d'autres phénomènes peuvent intervenir au cours du colmatage, le principal étant la compression du gâteau.

Porosité du gâteau

Dans le cas de particules supposées sphériques, la porosité du gâteau de particules est une variable très sensible dans tous les modèles de perte de charge. Celle-ci dépend de la force liant les particules (Yu et al. 2003). La principale force étant la force de Van der Waals, la porosité du dépôt dépend de la taille des particules le constituant.

Yu propose une équation empirique liant, pour des particules sèches de diamètre compris entre 10 et 1000 nm, la porosité du dépôt (ε) au diamètre des particules le constituant :

$$\varepsilon = 0{,}394 + 0{,}60.e^{-0{,}4.D_p^{\,0{,}468}} \qquad [27]$$

Il propose également la notion de porosité inter agrégat pour tenir compte de la structure physique du dépôt.

Cette relation s'approche de celle proposée par Penicot (Penicot 1998) pour des aérosols submicroniques (entre 0,18 et 0,4 µm) :

$$\varepsilon = 1 - 0{,}58.\left(1 - e^{\left(-\frac{D_p}{0{,}53}\right)}\right) \qquad [28]$$

Nous remarquons, toutefois, qu'il existe une zone d'ombre autour de l'homogénéité d'un dépôt de particules. Neesse et al. (2009) entre autres, montre par simulation (considérant un phénomène aléatoire), que la porosité du dépôt varie selon sa hauteur. Dans une étude de la compression du gâteau, Jeon et al. (2004) illustre l'effet des forces interparticulaires en faisant varier ces forces via la constante de Hamaker notée H par simulation. La Figure 16 représente les deux organisations du gâteau pour des forces fortes à droite et des forces faibles à gauche.

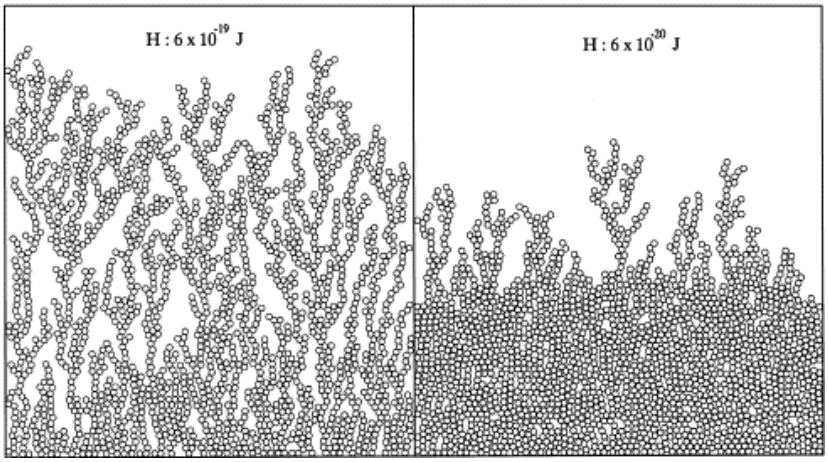


Figure 16 : Influence de la force de liaison des particules sur la porosité du dépôt (Jeon et al. 2004)

Les dépôts de particules pseudo-fractales ont également été étudiés de façon spécifique. Mädler et al. (2006) dans une approche numérique a étudié la porosité et l'épaisseur de dépôts d'agrégats. Il ressort de ses travaux que, comme cela a été mis en évidence précédemment, la porosité augmente lorsque la taille des particules primaires diminue. Dans le cas des particules pseudo-fractales, la dimension fractale joue également un rôle important. La porosité moyenne du dépôt diminue lorsque la dimension fractale augmente (plus les agrégats sont compacts, moins le dépôt est poreux). Enfin, Mädler étudie l'influence du nombre de Peclet et montre que pour des valeurs de nombre de Peclet supérieures à 10, les effets inertiels devenant dominants, le dépôt est plus compact (Figure 17 (a) et (b)).

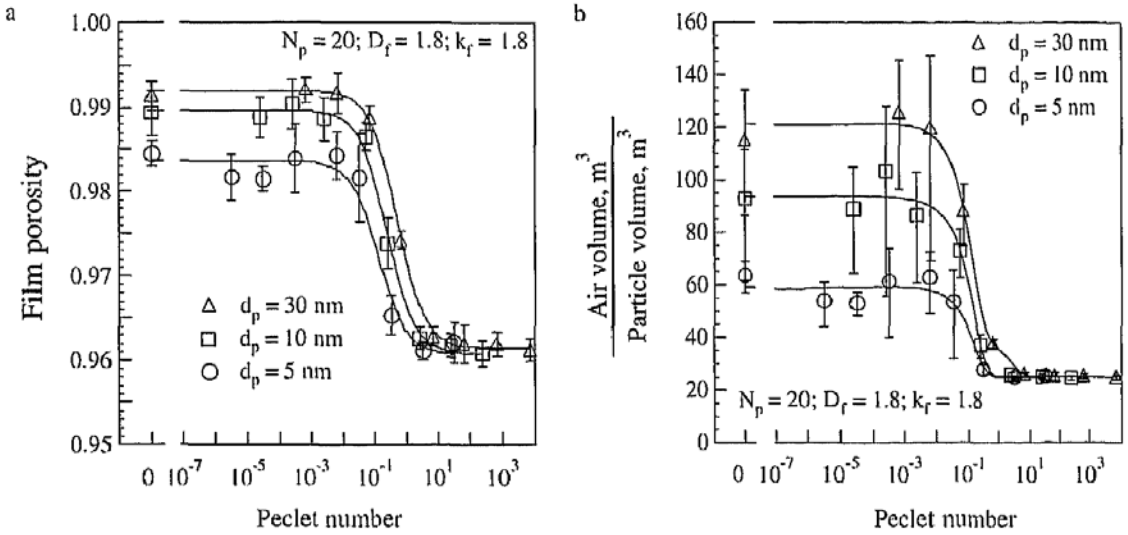


Figure 17 : Porosité des dépôts (a) et rapports des volumes d'air et de particules (b) en fonction du nombre de Peclet et pour différentes tailles de particules primaires (Mädler et al. 2006)

A l'heure actuelle, ces résultats n'ont été clairement observés que par le calcul. Récemment, Thomas et al. (2014) a réalisé sur la base de leurs mesures et des points issus de la littérature,

une corrélation empirique qui lie le nombre de Peclet à la porosité d'un dépôt d'agrégat (Figure 18).

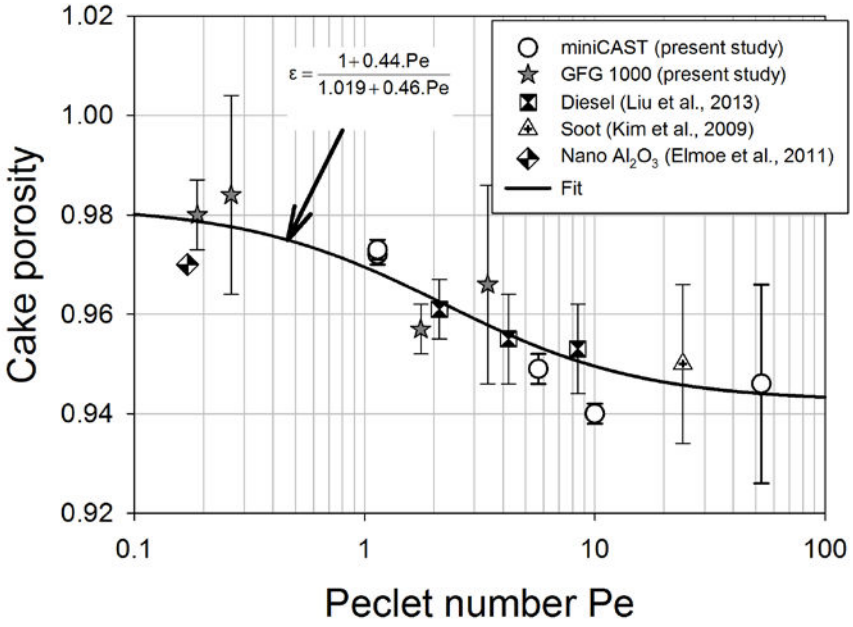


Figure 18 : Porosité de dépôts d'agrégats de carbone en fonction du nombre de Peclet (Thomas et al. 2014)

Les valeurs de porosités recensées dans la littérature sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Valeurs de porosité de dépôt et propriété des particules de suie relevées dans la littérature pour différentes vitesses de filtration

Auteur	Dm [nm]	Dpp [nm]	Vf [cm/s]	ε [-]	Np [1]
Liu et al. 2013	63,8	44,9	0,05	0,961	-
Liu et al. 2013	63,8	44,9	0,1	0,955	-
Liu et al. 2013	63,8	44,9	0,2	0,953	-
Elmoe et al. 2011	-		-	0,97	-
Kim et al. 2009	120	28	0,1	0,95	305

Compression du gâteau

Lorsque la perte de charge augmente, la pression qui s'exerce sur le gâteau peut, dans certains cas, avoir une influence sur son épaisseur et sa compacité par le phénomène de compression. Largement étudié (Schmidt 1995, Jeon et al. 2004), ce phénomène intervient de façon inhomogène sur l'épaisseur du gâteau dans le cas de forces interparticulaires faibles, donc de particules de grand diamètre.

Dans le cadre de notre étude, ce phénomène n'est pas pertinent, nous ne l'expliquerons donc pas de façon détaillée.

4.3.2. Modélisation de la perte de charge du dépôt

Deux grandes catégories de modèles sont généralement employées : les modèles basés sur la relation de Kozeny-Carman qui considèrent un écoulement dans un milieu poreux et les modèles tenant compte de la force de traînée des éléments constitutifs du milieu.

Modèles dérivés des équations de Kozeny-Carman

Lors de la filtration superficielle, l'augmentation de perte de charge est provoquée par l'accumulation des particules à la surface du medium. En absence de phénomène de compression du gâteau, on a donc une progression linéaire correspondant à l'augmentation d'épaisseur du gâteau. Novick et al. (1992) considère la perte de charge d'un filtre colmaté par la somme de la perte de charge du medium colmaté et du dépôt de particules en surface tel que :

$$\Delta P = \Delta P_{medium} + \Delta P_g \qquad [29]$$

La perte de charge du gâteau est calculée à partir de la relation de Kozeny-Carman, en tenant compte de la compacité du gâteau α_g , du coefficient de Cunningham Cu, de la masse déposée et de l'aire spécifique a_g (6/ d_p dans le cas de particules sphériques).

La perte de charge du gâteau est donnée par :

$$\Delta P_g = \frac{h_k.a_g^2.\alpha_g.\mu}{(1-\alpha_g)^3.\rho_p.Cu}.V_f.\frac{m}{S_f} \qquad [30]$$

Avec h_k la constante de Kozeny qui se calcule selon différents modèles répertoriés dans le tableau 2. Ce modèle est basé sur les hypothèses de non compression du gâteau, de compacité considérée constante sur l'épaisseur, et de diamètre de particule constant. La validité de cette approche de type milieu poreux a été étudiée par Mauret et al. (1997) pour des milieux fibreux et acceptée pour des vitesses de filtration faibles.

D'autres auteurs ont proposé d'adapter ce modèle. Endo et al. (1997) propose une adaptation de ce modèle pour tenir compte de la polydispersion des particules constituant le gâteau. Kim et al. (2009) a étudié la résistance à l'écoulement d'un dépôt de particules de suie en utilisant la relation d'Endo. Il ressort de cette étude que la perte de charge du gâteau formé peut être modélisée par cette relation en assimilant le dépôt à un gâteau formé exclusivement de particules primaires. Cette conclusion peut être discutée. Les liaisons entre les particules primaires peuvent être rigides (avec un facteur de recouvrement) selon le processus d'agrégation et donc entraîner une « porosité inter agrégat ». Toutefois, cela reviendrait à considérer que seule la porosité est influencée par le caractère pseudo-fractal des aérosols.

Tableau 2 : Liste des modèles permettant le calcul de la constante de Kozeny et leur domaine d'applicabilité[2]

Modèle	Constante de Kozeny (h_k)	Gamme de validité
Fowler et al. (1940)	$h_k = 5{,}55$	0,4<ε<0,8
Davies (1973)	$h_k = 4\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^{0,5}}\left[1+56(1-\varepsilon)^3\right]$	0,7< ε <0,994
Chen (1982)	$h_k = 4{,}7 + e^{(14(\varepsilon-0,8))}$	0,6< ε <0,99
Carroll (1965)	$h_k = 5 + e^{(14(\varepsilon-0,8))}$	0,68< ε <0,96
Ingmanson et al. (1963)	$h_k = 3{,}5\frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^{0,5}}\left[1+57(1-\varepsilon)^3\right]$	0,4< ε <0,99

D'autres auteurs considèrent nécessaire d'introduire la notion de porosité inter agrégat pour corriger la valeur de la compacité, en tenant compte d'un facteur de recouvrement des particules primaires.

Modèle dérivé de la relation de Davies (Thomas et al. 2014)

Thomas et al. (2014) propose pour les agrégats de particules, un modèle issu de la relation empirique de Davies établie pour un matelas fibreux. Il assimile le lit de particules à un empilement de fibres dont le diamètre serait celui des particules primaires et leur longueur vaudrait 3/2 de la longueur équivalente d'une fibre (le rapport entre le volume d'un cylindre et d'une sphère). En introduisant un coefficient de recouvrement Co, correspondant au « chevauchement des particules primaires » qui composent l'agrégat, il corrige la longueur équivalente.

En utilisant la relation de la force de traînée d'une fibre, il obtient alors :

$$\Delta P_g = \frac{64\,\alpha_g{}^{0.5}\left(1+56\,\alpha_g{}^3\right)}{Cu\;D_{pp}^2\,\rho_P}\;\frac{(1-Co)}{\left[\frac{2}{3}-Co^2\left(1-\frac{Co}{3}\right)\right]}\;\mu\;\frac{m}{S_f}\;Vf \qquad [31]$$

avec Dpp, le diamètre des particules primaires. Développé pour représenter la perte de charge d'un gâteau de particules pseudo-fractales, ce modèle semble bien rendre compte de la réalité.

4.4. Conclusion

Dans cette partie, plusieurs considérations sont importantes. En premier lieu, la durée de la phase de filtration profonde, l'augmentation de la perte de charge et l'apparition de la phase

[2] Données issues du rapport de l'institut de la chimie du papier, Appleton, Wisconsin. Calculation of aerodynamic porosity, specific surface area, and specific volume from Gurley seconds measurements, IPC technical paper series Number 183, juin 1986. Gary H. Knauf and Mahendra R. Doshi

de transition sont liées à la nature du medium et des particules accumulées. La masse de particules atteinte lors du changement de phase de filtration devrait donc être plus importante pour un medium moins compacte et moins efficace.

Aucune étude propre à la filtration de l'agrégat lors de la filtration profonde n'a été recensée. Pourtant, c'est cette phase de la filtration qui se trouve la plus affectée par la nature des particules. La nature du medium doit également faire l'objet d'observations microscopiques pour bien appréhender la filtration profonde.

Enfin, on gardera en mémoire que, dans le seul modèle recensé dans la littérature à propos du point de transition, il n'est fait mention que du diamètre des pores. La complexité du mode de dépôt ainsi que le nombre de paramètres qui semblent influer, incitent donc à revoir ce point et à le repréciser à partir de données expérimentales.

5. FILTRATION DYNAMIQUE SUR UN MEDIUM PLISSE

L'évolution de la perte de charge dans un medium plissé se décompose en trois phases. Il est communément admis que les deux premières sont communes aux filtres THE plans et plissés. La dernière est propre aux filtres plissés et constitue une réduction de la surface effective de filtration. Del Fabbro (2001) a étudié l'influence du plissage des filtres sur l'évolution de la perte de charge. La Figure 19 illustre une courbe typique d'un filtre plissé.

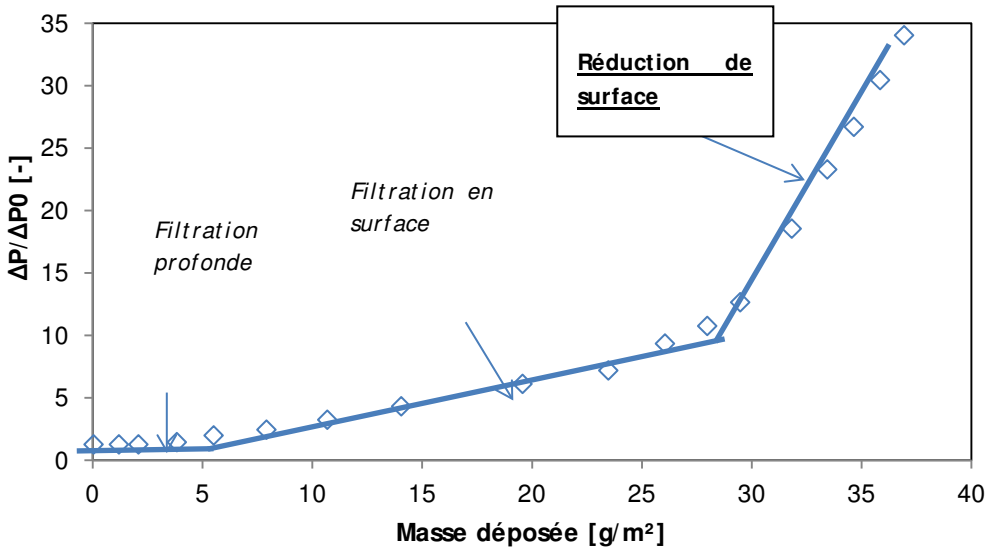


Figure 19 : Courbe de perte de charge d'un filtre plissé (Del Fabbro 2001)

Cette réduction de surface semble inhérente à un dépôt inhomogène au sein du pli. Cette inhomogénéité serait dépendante de la vitesse de filtration pour des particules microniques (Del Fabbro 2001). Il apparait judicieux de s'intéresser à la répartition de l'écoulement dans un pli avant de s'intéresser à la structure du dépôt en son sein.

5.1. Ecoulement et transport des particules

5.1.1. Ecoulement

Pour comprendre les inégalités d'écoulement dans un pli, Del Fabbro a divisé le pli en trois zones, la crête, le milieu et le fond de pli. En découpant ces trois zones d'un filtre colmaté ayant filtré des aérosols de fluorescéine sodée, et en mesurant, par fluorimétrie, la masse déposée pour chacune de ces zones (Figure 20), elle en déduit que, dans le cas d'un filtre THE, l'écoulement est homogène jusqu'à une vitesse de 5 cm/s.

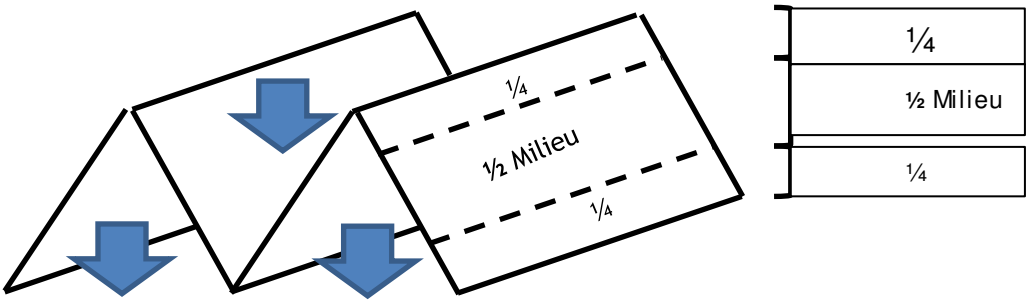


Figure 20 : Schématisation des trois zones à travers lesquelles l'homogénéité de l'écoulement a été mesurée (Del Fabbro 2001)

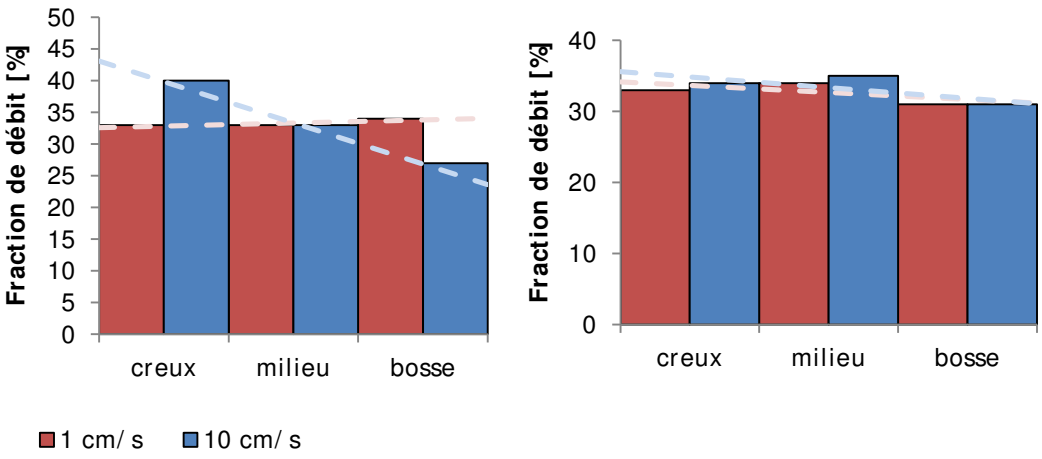


Figure 21 : Répartition expérimentale des écoulements dans un filtre THE (a : h=27 mm, p=3,5 mm et b : h=27,5 mm, p=2,2 mm) (Del Fabbro 2001)

Les mesures de Del Fabbro montrent que, pour une faible vitesse de filtration, la répartition de l'écoulement dans le pli d'un filtre THE (avec une hauteur de 27 mm) reste homogène (Figure 21), ce qui est favorable à un dépôt homogène de particules.

Rappelons que cette inhomogénéité de l'écoulement est également observée sur la courbe de perte de charge du filtre vierge en fonction de la vitesse (figure 5). Le profil de vitesse et de pression serait donc également un point intéressant pour comprendre le colmatage des media plissés.

5.1.2. Trajectoire des particules

La détermination des écoulements dans le pli doit permettre de déterminer le transport des particules en leur sein et donc de mieux comprendre les raisons d'un dépôt inhomogène.

Si l'on fait le parallèle avec les modes de transport des particules lors de la déformation des lignes de courant au voisinage d'une fibre, le nombre de Stokes qui caractérise le rapport de l'inertie sur les forces aérodynamiques ainsi que le nombre de Peclet pour les petites particules devraient nous donner une indication sur les trajectoires des particules.

Des grosses particules seraient, du fait de leur inertie, susceptibles de ne pas suivre les lignes de courant et d'avoir une trajectoire rectiligne. En revanche, pour les petites particules, le phénomène de diffusion, s'il est dominant, entraînera les particules à avoir un mouvement erratique dans le pli. Ces phénomènes complexes sont dépendants de la vitesse du fluide, d'où l'intérêt de calculer un profil de vitesse fiable. De plus, pour les petites particules, les gradients de pression peuvent provoquer un déplacement préférentiel dans certaines zones du pli.

Récemment, une étude expérimentale menée par Gervais et al. (2014) sur la plateforme d'imagerie médicale Nancyclotep a permis de mesurer la répartition des aérosols au sein d'un filtre plissé lors de la première phase de filtration. Pour ce faire, un filtre plissé a été ensemencé avec un aérosol contenant un marqueur radioactif. Les résultats de ces mesures sont représentés sur la Figure 22. On observe tout d'abord une faible accumulation à proximité de la zone pliée où le medium a subi une compression et est donc moins perméable. De plus, on observe un léger déséquilibre de l'accumulation de masse vers l'intérieur du pli. Ces essais ayant été réalisés avec un aérosol de diamètre compris entre 0,3 et 0,5 µm, ayant donc un nombre de Stokes non négligeable, il est probable que l'accumulation en fond de pli soit le fait d'un effet d'inertie dans le déplacement des particules.

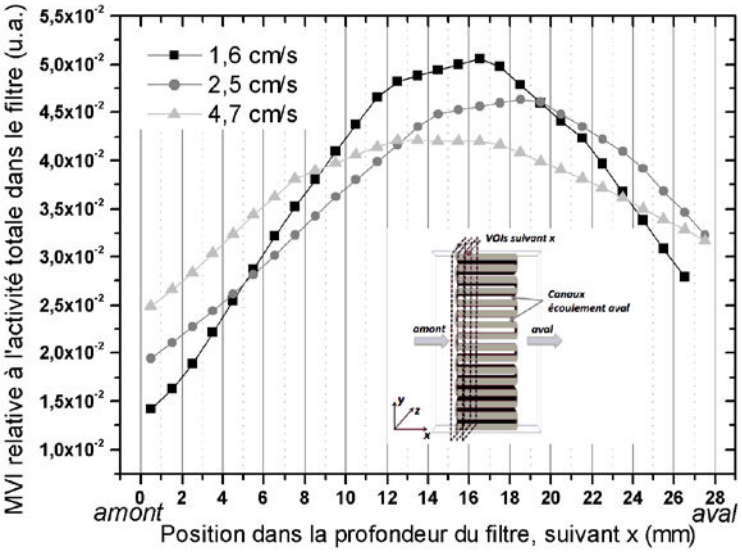


Figure 22 : Mean Voxel Intensity (intensité moyenne par voxel (équivalent 3D du pixel)) en fonction de la profondeur de pli pour un filtre THE (Gervais et al. 2014). L'intensité émise correspond à la masse d'aérosol déposée.

On remarque que pour une vitesse plus importante, la répartition semble plus homogène, ce qui pourrait être dû à des effets de turbulence qui homogénéiseraient le dépôt pour des vitesses plus importantes.

5.2. Réduction de surface

La réduction de surface est un phénomène très peu étudié dans la littérature scientifique. Très complexe dans le cas de filtres à moyenne efficacité du fait de la perméabilité des media et de leur déformation lors du colmatage, cette phase fait l'objet, de modèles empiriques (Hettkamp et al. 2012) (l'importante gamme de vitesse et de taille d'aérosols rencontrées ajoutant encore de la complexité au phénomène).

Du fait de leur meilleure tenue mécanique, les filtres THE à petits plis se prêtent mieux à cette étude. Dans notre cas, la rapidité du colmatage lors de cette phase rend son appréhension nécessaire dans un contexte de sûreté des installations.

5.2.1. Homogénéité du dépôt

Del Fabbro a constaté l'inhomogénéité du dépôt lors des colmatages au chlorure de sodium (particules de 8 µm de diamètre). Les photos (Figure 23) montrent l'état d'un filtre plissé à différents stades du colmatage. Un point intéressant est également la formation de « dendrites » ou d'amas qui influencent la perte de charge du filtre.

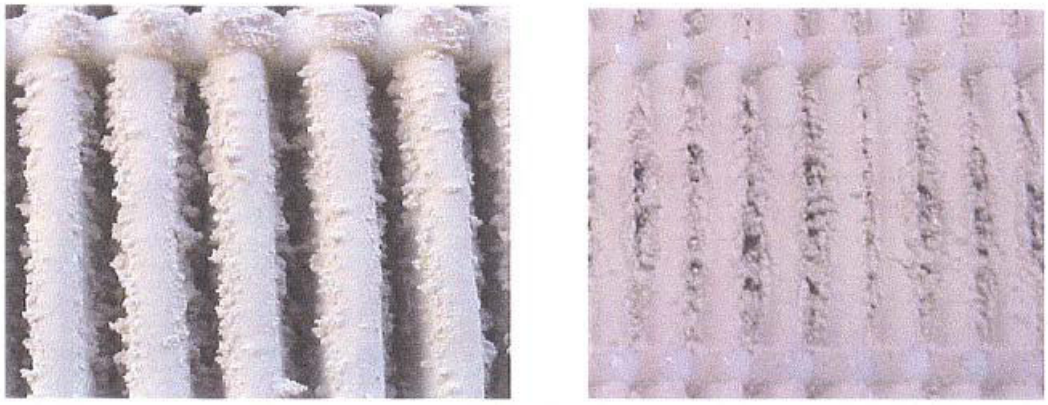


Figure 23 : Photo d'un filtre plissé à deux instants du colmatage par un aérosol de chlorure de sodium de 8 µm et une vitesse de filtration de 1 cm/s (Del Fabbro 2001)

Fotovati et al. (2011) a réalisé une étude numérique du dépôt des particules dans un filtre plissé. Ses résultats concordent avec les observations de Del Fabbro (Figure *24*). Même si un « pont » entre les plis n'a pas été observé, on peut imaginer sa formation au vue des illustrations qu'il a publiées (Figure 25). Cette inhomogénéité, en modifiant les caractéristiques de l'écoulement, entraînerait une augmentation de la vitesse dans les zones « peu colmatées » et donc une augmentation plus rapide de la perte de charge. La formation de dendrites, constatée par ces deux auteurs, serait également un facteur d'augmentation de la perte de charge pour les filtres plissés.

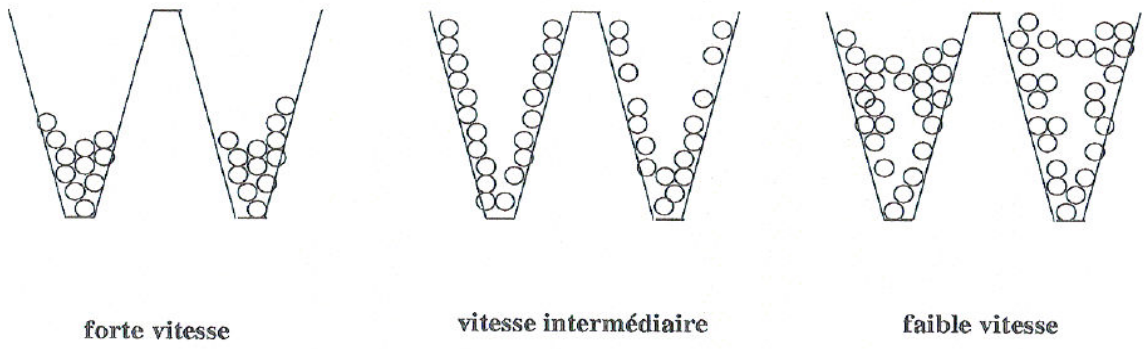


Figure 24 : Répartition des particules dans un pli selon Del Fabbro. L'hypothèse d'une "fermeture du pli" pour expliquer la réduction de surface semble être un cas extrême (Del Fabbro 2001)

Figure 25 : Résultats des simulations CFD pour, de droite à gauche : des aérosols de 3 µm et une vitesse de 20 cm/s, des aérosols de 10 µm et une vitesse de 20 cm/s et des aérosols de 10 µm et une vitesse de 1 m/s. On note également l'influence du type de plis (Fotovati et al. 2011).

Ces études se concentrent sur des aérosols microniques, fortement influencés par la vitesse du fluide et par des effets inertiels. Des particules plus petites sont censées, de par leur masse négligeable et leur traînée faible (Stk faible) ne pas être autant influencées par la vitesse du fluide et donc avoir un dépôt homogène dans le pli. Dans un pli, les gradients de pression et de vitesse peuvent influencer le déplacement des particules. Peu d'études concernent ces effets. Toutefois, il n'est pas à exclure qu'ils aient un impact sur l'évolution de la perte de charge.

Plus recemment, Cheng et al. (2013) montre l'obstruction de pli par la formation de « ponts » lorsque l'on prend en compte la filtration profonde dans une simulation effectuée avec le code de calcul GeoDict©. La Figure 26 montre les differentes étapes du colmatage d'un pli de 27 mm de hauteur à une vitesse de filtration de 2 cm/s et pour des aérosols de diamètre compris entre 0,15 et 6,8 µm. L'influence de cette obstruction sur la perte de charge est difficile à évaluer sur des simulations en deux dimensions, et même si dans cette étude, plusieurs plis sont considérés, ces résultats présentent un accord limité avec l'expérience.

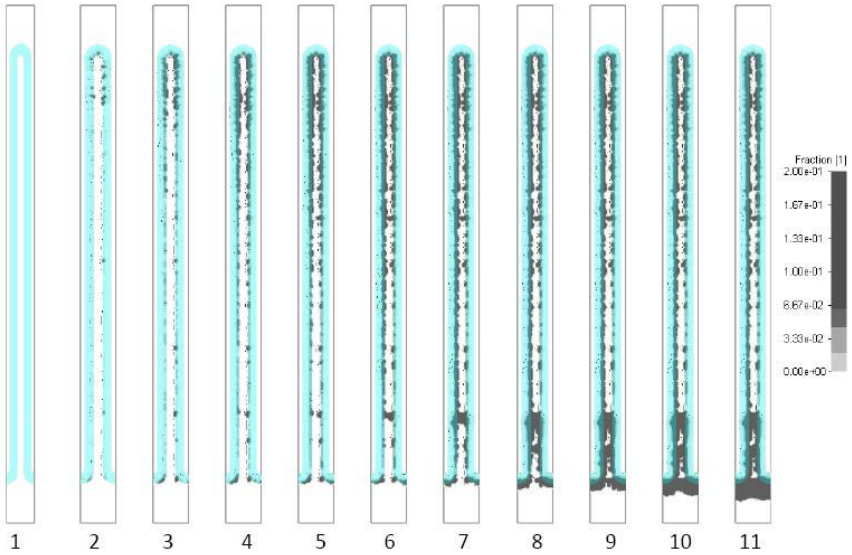


Figure 26 : Illustration des différentes étapes du colmatage d'un pli en tenant compte de la filtration profonde sous GeoDict© (Cheng et al. 2013)

D'autres travaux de simulation montrent ces effets d'obstruction de pli. Saleh et al. (2014), en utilisant un code de calcul similaire arrive également, dans certaines conditions à la formation d'un pont. Dans son étude, Saleh souligne le rôle de la polydispersion des aérosols. La Figure 27 illustre le colmatage d'un pli pour des aérosols monodispersés de 1 µm de diamètre et une vitesse de filtration de 50 cm/s et deux pas de plissage différents.

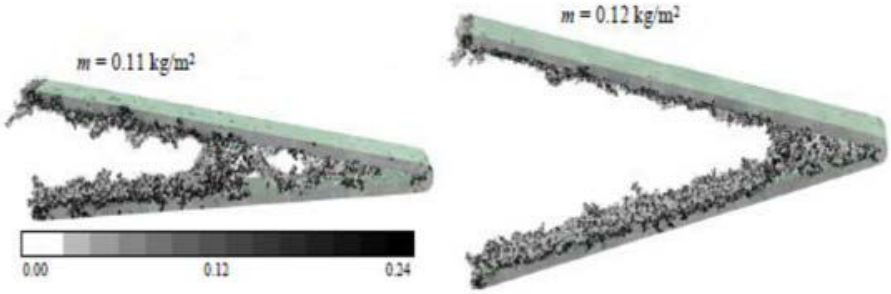


Figure 27 : illustration du dépôt formé dans un pli pour une vitesse de filtration de 50 cm/s et des aérosols de 1 µm de diamètre pour deux pas de plissage différents (Saleh et al. 2014)

5.2.2. Perte de charge des filtres plissés / influence de la vitesse

L'évolution de perte de charge d'un filtre plissé dépend fortement de la vitesse de filtration. De nombreuses études conduites par l'IRSN et le LRGP montrent que plus la vitesse de filtration est faible, plus la résistance aéraulique augmente vite (Mocho et Ouf 2011, Bouilloux et al. 2006, Callé-Chazelet et al. 2007). Les Figure 28 (a), (b), (c) représentent des courbes d'évolution de résistance aéraulique de filtres plissés colmatés respectivement avec des particules de combustion issues de feu de PMMA (a), des particules d'alumine de 2,36 µm de diamètre aérodynamique (b) et des particules d'émeri de 2,7 µm de diamètre aérodynamique (c). Toutes ces courbes présentent des inflexions significatives, signe de l'influence du remplissage de pli sur la perte de charge.

La courbe 28-(d) représente l'évolution de perte de charge de filtres colmatés par des aérosols de fluorescéine sodée de 0,18 µm de diamètre aérodynamique. Au premier abord, elle semble contredire la proposition formulée dans le paragraphe précèdent. Toutefois, on note que ces courbes ne présentent pas d'inflexion, signe que le pli n'est pas encore significativement rempli. Ainsi, durant cette phase, le filtre plissé se comporte comme un filtre plan et la compacité du dépôt croît avec la vitesse de filtration, donc la résistance aéraulique aussi. La relation entre vitesse de filtration et évolution de perte de charge pour des particules identiques permet de penser que le facteur qui diffère sur ces mesures, est la porosité du dépôt (Thomas 2001). Or, à masse égale, un dépôt plus poreux occupera un volume plus important dans le pli, favorisant l'apparition de la troisième phase de filtration. On note d'ailleurs que, sur la Figure 28 (d), sur la courbe représentant l'évolution de perte de charge à la vitesse de filtration qui correspondrait au dépôt le plus poreux, la réduction de surface apparaît en fin d'expérience.

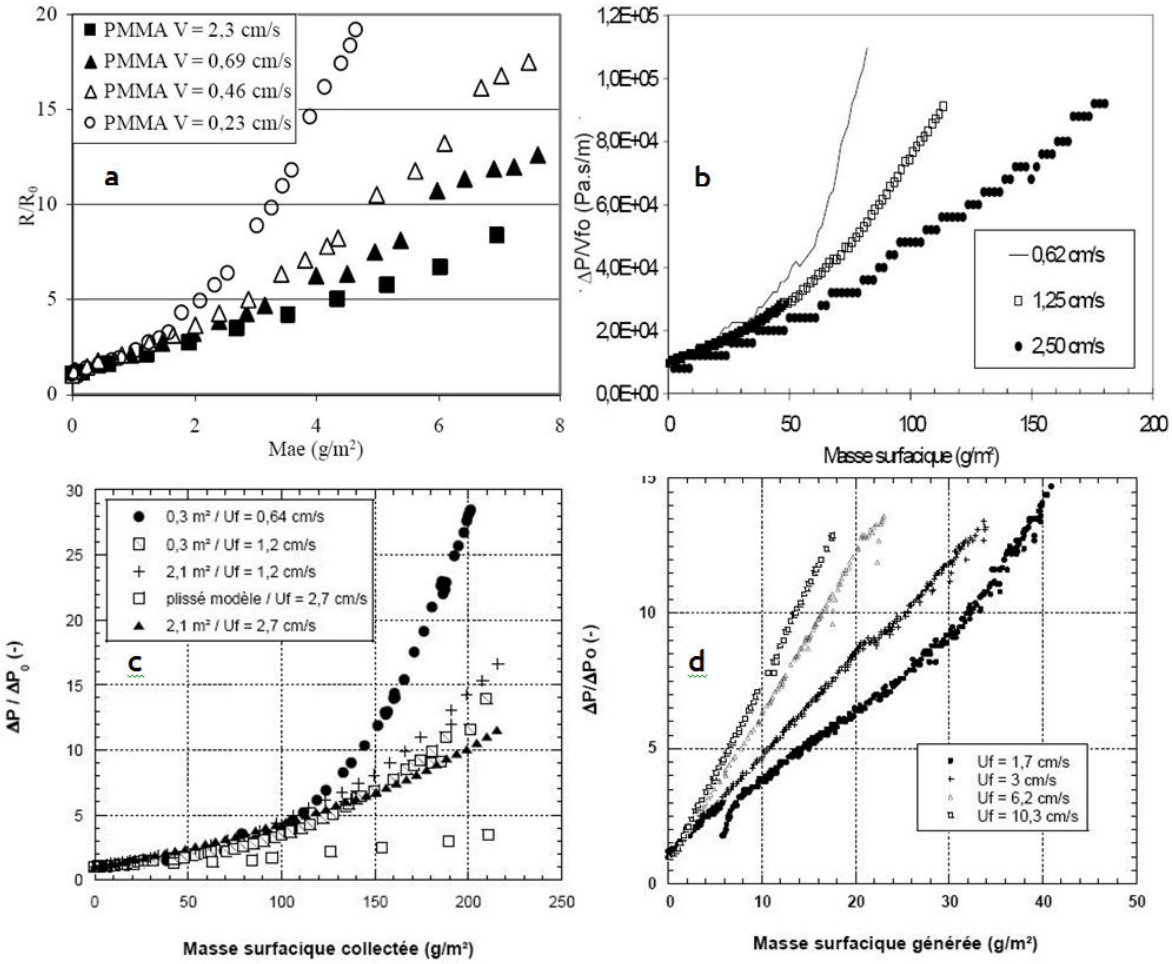


Figure 28 : (a) Courbe d'évolution de résistance aéraulique à différentes vitesses de filtration de filtres plissés THE soumis à des aérosols issus de la combustion de PMMA (Mocho et Ouf 2011). (b) courbe de la perte de charge sur la vitesse de filtration (donc proportionnelle à la résistance aéraulique) en fonction de la masse déposée pour des aérosols d'alumine de 2,36 µm de diamètre aérodynamique (Bouilloux et al. 2006).(c et d) courbes d'évolution de la résistance aéraulique de filtres plissés soumis respectivement, à des aérosols d'émeri de 2,7 µm de diamètre aérodynamique et d'uranine de 0,18 µm de diamètre aérodynamique à différentes vitesses de filtration (performance des filtres plissés (Callé-Chazelet et al. 2007))

Ainsi, ces expériences de colmatage conduites pour des filtres plissés à très haute efficacité nous permettent de montrer les caractéristiques de la réduction de surface :

- elle est liée au volume occupé par le dépôt dans le pli, donc à la taille des particules et à la porosité du dépôt,
- elle n'est pas exclusive aux aérosols pseudo-fractals ni pseudo-sphériques.

On note également, pour les conditions expérimentales considérées que les effets dus à l'inertie des particules ne sont, *a priori*, pas significatifs.

6. CONCLUSION

Cette étude bibliographie nous permet de cerner les points qui doivent être approfondis pour notre sujet d'étude. Dans un premier temps, en ce qui concerne la filtration profonde, on note :

- l'absence de modèle simple dont le domaine de validité est focalisé sur les particules nanostructurées,
- la nécessité de caractériser de manière fiable les media et aérosols en jeu,
- l'absence de modèle phénoménologique permettant de prédire la fin de la filtration profonde,
- la faible documentation expérimentale sur le profil d'accumulation des aérosols dans le medium (en particulier pour des aérosols nanométriques),
- l'absence de modèle permettant de lier perte de charge et profil d'accumulation.

Sur ces deux derniers points, l'approche de Letourneau et al. (1992) est des plus aboutis mais a été conçu pour une applicabilité sur des particules éloignées de celles concernant notre étude.

En ce qui concerne la filtration en surface, on note :

- le faible nombre de travaux expérimentaux sur la porosité des dépôts d'agrégats de particules nanométriques,
- une faible précision des valeurs de porosité disponibles au vu de la sensibilité des modèles de perte de charge existant pour ces dépôts,
- l'absence de modèles permettant de prédire la porosité de dépôts de particules nanométriques ou de morphologie fractale.

Pour les filtres plissés, peu d'études expérimentales visant à comprendre la phénoménologie du colmatage dans les conditions de notre étude sont parues. Les points à mettre en évidence sont :

- le manque de données propres au comportement d'un filtre THE plissé à petits plis soumis à différents régimes d'écoulement,
- le manque de données sur l'accumulation des particules et la formation des dépôts dans un pli pour des faibles vitesses de filtration et des aérosols de très faible dimension.

Ainsi, dans la suite de ce travail, nous avons, dans un premier temps, focalisé notre étude expérimentale sur la mesure du profil de pénétration des aérosols et sur l'influence de ce profil sur l'évolution de perte de charge durant la filtration profonde et l'occurrence de la filtration en surface.

Puis nous avons élaboré des protocoles métrologiques propres à mesurer des dépôts de faible épaisseur afin de permettre l'acquisition rapide de valeurs de porosité. Nous tenterons de corréler ces informations afin d'en extraire une tendance.

Enfin, nous nous sommes intéressés au développement de nouvelles méthodes permettant de mesurer les écoulements, et la formation des dépôts dans un pli, avec comme finalité de comprendre les phénomènes influant la perte de charge d'un filtre plissé au cours de son utilisation.

CHAPITRE II : AEROSOLS ET MEDIA

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des media et des aérosols utilisés dans notre étude. En premier lieu, nous avons caractérisé le comportement aéraulique des différents media en déterminant la résistance aéraulique, propriétés intrinsèques d'un medium qui permet de relier la perte de charge, le débit de filtration et les caractéristiques du gaz.

La résistance aéraulique est dépendante des caractéristiques du medium rappelées ci-dessous :

- **Le diamètre des fibres** qui constituent le medium. Leur diamètre influence la perte de charge du medium vierge mais également son efficacité. Cette efficacité conditionne la pénétration des aérosols au sein du media et donc les premiers instants de son colmatage. Dans cette étude, nous ne nous sommes pas directement concentrés sur l'efficacité de filtration. Le diamètre des fibres ne sera donc pas une donnée directement exploitée par la suite.

- **L'épaisseur du medium** est une caractéristique qui influence de manière proportionnelle sa résistance aéraulique initiale. Cette grandeur intervient également dans l'expression de la pénétration des aérosols dans le medium.

- **La compacité du medium**, qui exprime la fraction volumique disponible au sein du medium pour l'accumulation des aérosols est une donnée particulièrement importante. Elle est un facteur clef durant la phase de filtration profonde. En tant que donnée sensible, la précision de la mesure est importante, mais également la question de son homogénéité dans l'épaisseur du medium (du fait du procédé de fabrication) et l'influence du plissage sur cette grandeur.

Par la suite, les différentes expériences de colmatage ont été effectuées avec des aérosols variés (en fonction des moyens métrologiques employés, des phénomènes que l'on souhaite mettre en lumière ou plus prosaïquement des contraintes expérimentales). Pour les différents aérosols utilisés, nous avons déterminé :

- **Le diamètre des particules**. Ce paramètre conditionne l'évolution de perte de charge d'un filtre lors de son colmatage. La connaissance de cette caractéristique nécessite parfois différentes mesures, en particulier pour des particules pseudo fractales, pour lesquelles le diamètre des particules primaires est plus difficilement accessible que le diamètre de l'agrégat.

- **La morphologie des aérosols nanostructurés** a quant à elle été déterminée afin de comparer les aérosols utilisés d'un point de vue de leur structure. Dans le cas présent, la morphologie des différents aérosols nanostructurés utilisés reste proche.

1. CARACTERISATION DES MEDIA

Deux media constitués de fibres de verre et d'efficacités différentes ont été étudiés : l'un (medium THE) ayant une efficacité de filtration répondant à la classe très haute efficacité, l'autre ayant une efficacité de filtration répondant à la classe haute efficacité (medium HE).

Ces media correspondent à ceux employés dans la fabrication de filtres utilisés dans l'industrie nucléaire. Ils ont été caractérisés en mesurant leur résistance aéraulique, leur distribution granulométrique des fibres par analyse d'image, leur compacité et leur épaisseur de la manière la plus fiable possible. De plus, une nouvelle méthode de mesure pour caractériser la pénétration des aérosols dont la fiabilité croît avec la masse mesurée, a également été développée.

1.1. Résistance aéraulique des filtres vierges

Notée R, il s'agit de la résistance du medium à l'écoulement. Pour un régime d'écoulement laminaire, elle est donnée par la relation ci-dessous et correspond au rapport de l'épaisseur du medium sur sa perméabilité dans le modèle de Darcy (relation [3]) :

$$R = \frac{\Delta P}{V_f.\mu} \qquad [32]$$

avec μ la viscosité dynamique du fluide et V_f la vitesse de filtration.

La Figure 29 illustre la perte de charge des deux media en fonction de la vitesse de filtration, le media HE présente une perte de charge 2,7 fois moindre à vitesse de filtration égale.

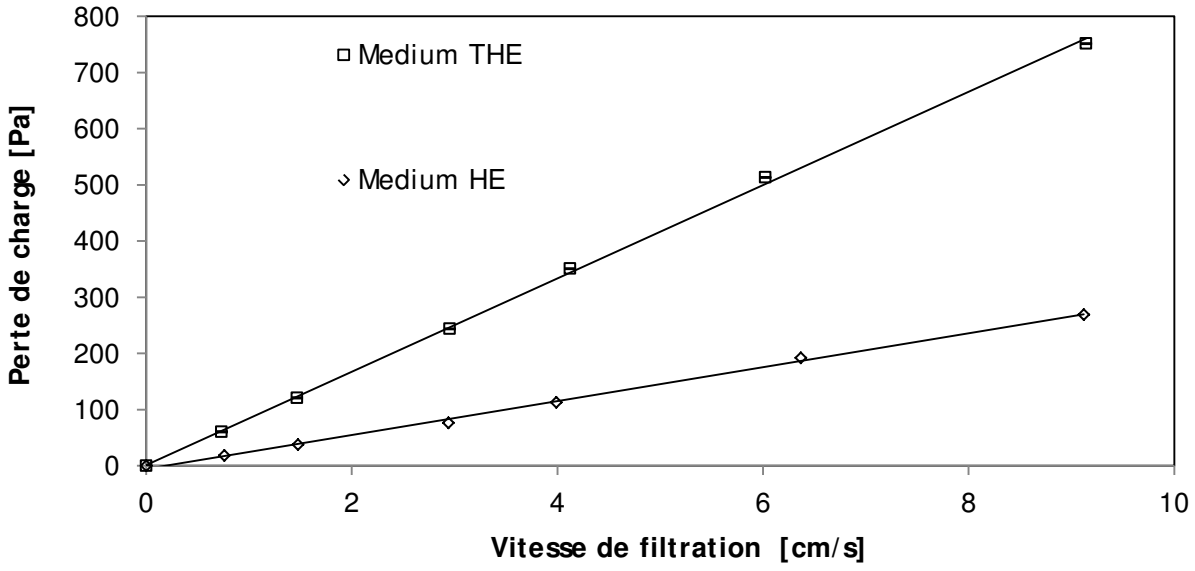


Figure 29 : Perte de charge mesurée en fonction de la vitesse de filtration pour des media THE et HE

Les caractéristiques aérauliques des media utilisés sont regroupées dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Résistance aéraulique des media utilisés

	Résistance aéraulique R
Medium HE	$1,7.10^8$ m^{-1}
Medium THE	$4,6.10^8$ m^{-1}

1.2. Granulométrie des fibres

Les fibres constitutives des media sont définies par leur diamètre. La distribution granulométrique étant, dans la majorité des cas, polydispersée, on utilise souvent la valeur moyenne notée d_f ou une valeur équivalente, le diamètre selon Davies $D_{fDavies}$ (Davies 1973). Ce diamètre est extrapolé de la valeur de la perte de charge du medium vierge. Ce paramètre s'avère particulièrement utile pour la modélisation du colmatage. Toutefois, il ne tient pas compte de la structure réelle du filtre. Ainsi, Penicot (Penicot 1998) estime que $D_{fDavies} \approx 1{,}5.d_f$ (Davies 1973). Dans notre cas, nous avons utilisé une mesure directe du diamètre des fibres. La caractérisation des media filtrants se fait par l'utilisation de l'imagerie par microscopie électronique. Sur cette base, afin de mesurer rapidement et de manière fiable la granulométrie des fibres constituant les media, un outil d'analyse d'image utilisant le logiciel Matlab© a été mis en place. Ce programme présente l'avantage de pouvoir analyser rapidement une grande série d'images et d'en tirer une granulométrie en s'affranchissant des erreurs dues à une mesure manuelle, très chronophage et applicable sur un nombre limité de fibres. Les données nécessaires à la mesure sont :

- le taux de grossissement G (en µm/pix),
- le nombre de lignes horizontales n,
- la taille des images en pixels.

Le programme d'analyse d'images est basé une mesure du diamètre des fibres par trigonométrie. Dans un premier temps, les contrastes des images sont ajustés. Puis l'image est binarisées (1=pixel blanc, 0=pixel noir). Sur cette image, des lignes horizontales équidistantes sont définies. Sur chacune de ces lignes, à chaque intersection avec une fibre, on passe successivement d'un pixel noir à un pixel blanc (croix bleue sur la Figure 30-A) puis d'un pixel blanc à un noir (croix rouge sur la Figure 30-A). Ces points sont enregistrés. On définit le centre du segment ainsi déterminé (point rouge sur la Figure 30-A), puis le point vert défini par le premier pixel de valeur 0 situé à la verticale du centre du segment. A partir de ces points, les longueurs a et b sont déterminées. Puis, en déterminant la longueur de la hauteur du triangle ainsi défini, on remonte au diamètre de la fibre par la relation [33] :

$$d_f = 2.G.\left(\frac{a}{\sqrt{\left(\left(\frac{a}{b}\right)^2+1\right)}}\right) \qquad [33]$$

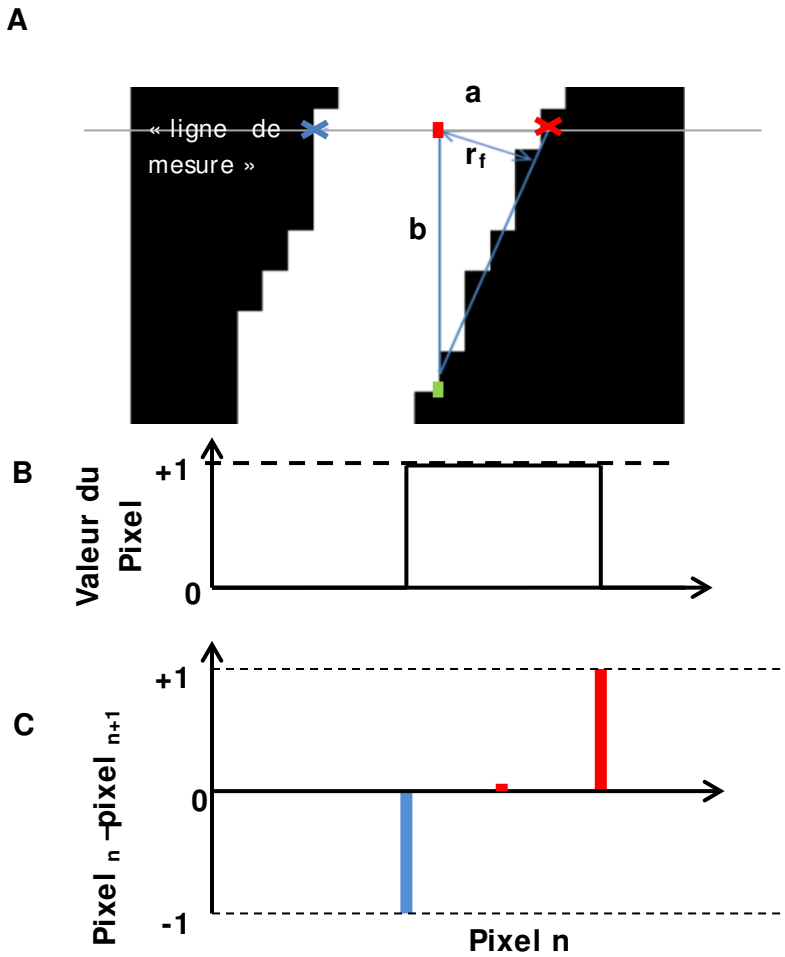


Figure 30 : Méthode de mesure des diamètres de fibre. (A) zoom sur une intersection fibre/ ligne de mesure, (B) valeurs prises par les pixels sur la ligne de mesure (C) principe d'identification des points

A partir de ces données et pour un grand nombre d'images, on obtient une granulométrie des fibres avec une résolution théorique de $\sqrt{2}.G$ (qui correspond à la diagonale d'un pixel, donc l'écart maximal entre la valeur vraie et la valeur numérisée). Le grand nombre de points de mesure permet de réduire l'influence des biais de mesure (bord de l'image, fibres coupées, pliées, etc..). Différents grossissements sont nécessaires pour caractériser un filtre dont les fibres seraient très polydispersées. A partir des valeurs mesurées, une répartition log-normale est ensuite déterminée.

Une comparaison avec des granulométries mesurées manuellement sur un faible nombre de photos (Figure 31) a permis de valider la mesure. Grâce à l'automatisation de la mesure, un nombre beaucoup plus conséquent de fibres peut alors être mesuré afin d'obtenir une mesure statistiquement fiable.

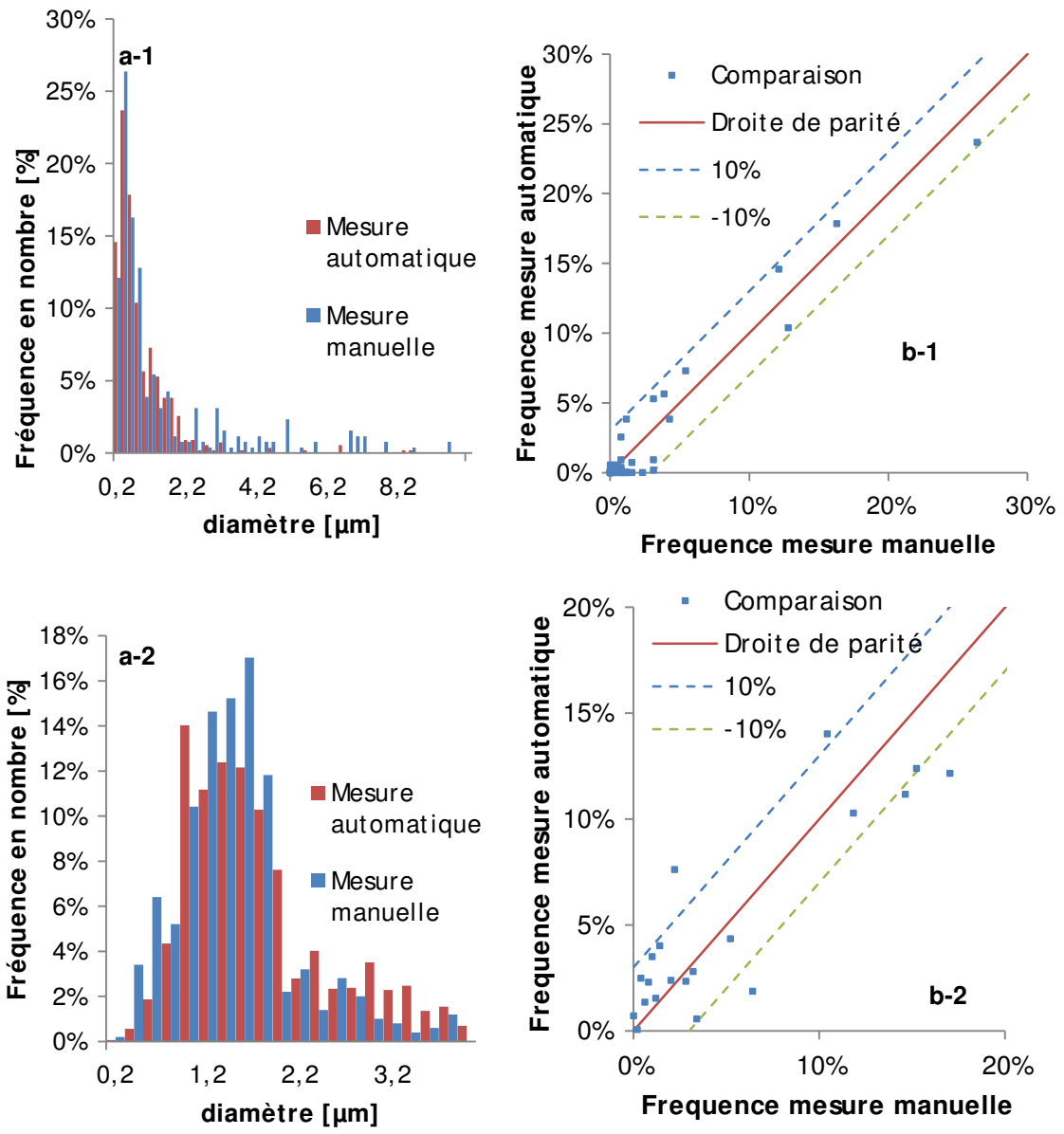


Figure 31 : Répartition granulométrique des diamètres de fibre mesurés manuellement et par analyse d'image pour un medium THE (1) et HE (2) - répartition (a) et comparaison pour chaque classe de diamètre (b)

Les valeurs mesurées par les deux méthodes sont regroupées dans le tableau 4

Tableau 4 : Diamètres et écarts-types de fibres obtenus manuellement et par Matlab©

	Diamètre de fibre manuel	Ecart-type manuel	Diamètre de fibre automatique	Ecart-type automatique
Medium HE	1,7 µm	1,1	1,64 µm	0,9
Medium THE	0,6 µm	1,9	0,59 µm	1,8

1.3. Caractérisation de la compacité et de l'épaisseur

L'épaisseur du medium Z est bien évidemment un paramètre important qui conditionne directement la perte de charge et l'efficacité. Paradoxalement, c'est une grandeur très accessible mais également très difficile à mesurer. On distinguera les mesures par palpation (norme NF EN ISO 9073-2) mais qui, en comprimant le medium, ne permettent qu'une faible précision et les mesures optiques ou « dérivées ». La palpation est certes facile à utiliser, mais elle présente plusieurs inconvénients. Dans un premier temps, la surface palpée est loin d'être négligeable. Ainsi, au lieu d'obtenir une valeur locale d'épaisseur, la mesure rend compte de l'épaisseur maximale de la surface palpée. Dans le cas d'un medium dont la surface n'est pas plane, la mesure peut surestimer l'épaisseur réelle du medium. Cette valeur étant utilisée pour la détermination de la compacité du medium, l'erreur commise y est alors propagée. On notera également l'utilisation de l'observation au microscope (Penicot 1998, Joubert 2009) qui, bien que très précise, implique l'observation d'une zone ayant été soumise à la découpe et donc potentiellement altérée.

La compacité, notée α, représente la fraction solide constituant le medium, tandis que la porosité ε représente la fraction de vide. Elle est un paramètre clé de tous les modèles décrivant le comportement d'un filtre et s'exprime par :

$$\alpha = 1 - \varepsilon = \frac{Gr}{\rho_f . Z} \qquad [34]$$

Avec ρ_f la masse volumique du matériau constituant les fibres et Gr le grammage du medium.

Il existe de nombreux moyens de la mesurer, que ce soit par topomicroscopie ou plus simplement par traitement d'image (Schmidt et al. 1990).

La plupart des méthodes de mesure de la compacité nécessitent la connaissance de nombreux paramètres (masse volumique des fibres, grammage, épaisseur). Ainsi, la précision de cette mesure est souvent influencée par la propagation des incertitudes sur les autres mesures.

En plus de la granulométrie des fibres constitutives du filtre, l'épaisseur et la compacité sont deux paramètres importants en particulier pour la problématique du colmatage. Usuellement, l'épaisseur *Z* du medium est mesurée par palpation. La compacité α est déterminée à partir de cette valeur, du grammage et de la masse volumique du matériau constitutif du medium (relation [34]). En y ajoutant les erreurs sur la masse volumique des fibres et la présence de liant organique dont la proportion et la masse volumique sont inconnues, les paramètres *Z* et α peuvent être erronés. Pour s'affranchir de ces erreurs, une méthode directe d'observation a été utilisée. Cette méthode repose sur l'observation directe d'un medium enrobé dans une matrice organique (résine Struers© Specifix© 20). Les images ont été obtenues en utilisant un microscope électronique à balayage Hitachi SN-3500 avec des détecteurs EDX Bruckers CCD. Les données sont traitées en utilisant le module Quantax© du logiciel utilisateur Esprit©. L'épaisseur locale est mesurée directement en plusieurs points déterminés aléatoirement sur les tranches des échantillons enrobés. Ainsi, la valeur mesurée est la valeur locale, affranchie des biais inhérents aux méthodes par palpation (Figure 32). Pour obtenir une valeur représentative du medium, il est donc nécessaire de moyenner un grand nombre de mesures locales. La compacité du medium est mesurée directement sur les

tranches de medium enrobé. Pour ce faire, une méthode de détection EDX quantitative est appliquée. Dans un premier temps, l'échantillon est enrobé dans une résine Epoxy puis poli afin d'avoir une surface parfaitement lisse (Cette méthode est plus amplement développée dans le paragraphe suivant). Un élément chimique de référence est choisi. Ici, du fait de la composition en fibre de verre des media, nous utilisons l'élément silicium. On sélectionne un point de mesure situé sur une fibre suffisamment épaisse pour que le volume de mesure du faisceau soit intégralement dans le volume de la fibre (Figure 32). Le spectre enregistré pour ce point de mesure sert de référence à la mesure de compacité du medium. Une surface de la tranche du filtre est sélectionnée, le spectre issu de cette surface est utilisé comme mesure de compacité. On peut ainsi en faisant le rapport de la concentration en silicium des deux spectres obtenir une fraction massique de silicium correspondant à la compacité locale du medium.

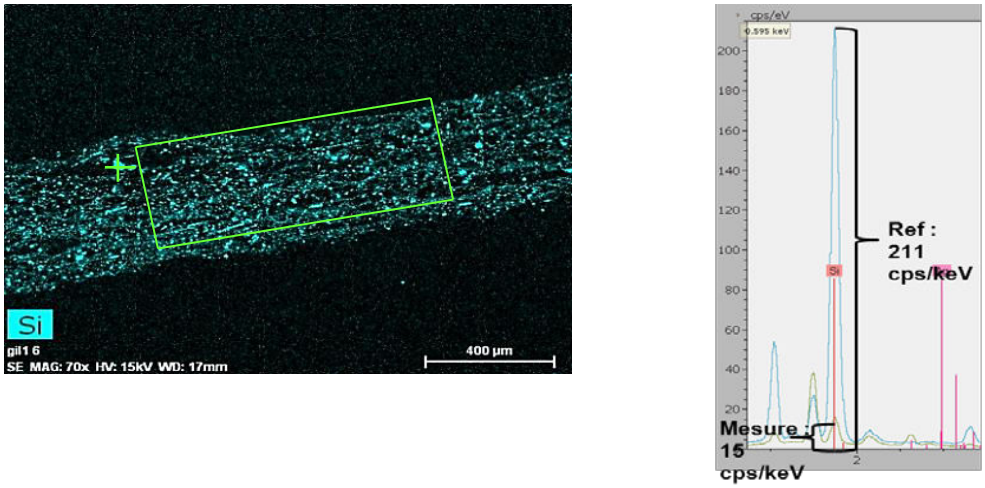


Figure 32 : Illustration de la méthode de détermination de la compacité d'un filtre. (a) cartographie EDX de l'élément silicium sur une tranche de filtre THE, la croix verte représente le point d'acquisition du spectre de référence, le rectangle, la zone de mesure. (b) zoom sur la zone du spectre contenant la raie caractéristique de l'élément silicium. Les annotations représentent la raie de référence et la raie de la zone de mesure.

Cette mesure est directe, elle s'affranchit donc des incertitudes propagées par une méthode de mesure basée sur la palpation et la pesée. Les résultats acquis par cette méthode sont présentés dans le tableau 5 et comparés pour le medium THE aux valeurs obtenues par Joubert (2009).

Tableau 5 : Caractéristiques des media utilisés

		THE	HE
MEB/EDX	**Epaisseur [µm]**	450 ± 90	420 ± 60
	Compacité moyenne [-]	0,078 ± 0,003	0,065 ± 0,004
MEB/Pesée	**Epaisseur [µm]**	521 ± 31*	470 ± 53
	Compacité moyenne [-]	0,071 ± 0,006*	0,059 ± 0,008

* *Joubert (2009)*

L'homogénéité de la compacité du medium a également été mesurée par cette méthode (Figure 33). Les résultats ne montrent pas de gradient de compacité significatif. Les media peuvent donc être considérés comme homogènes.

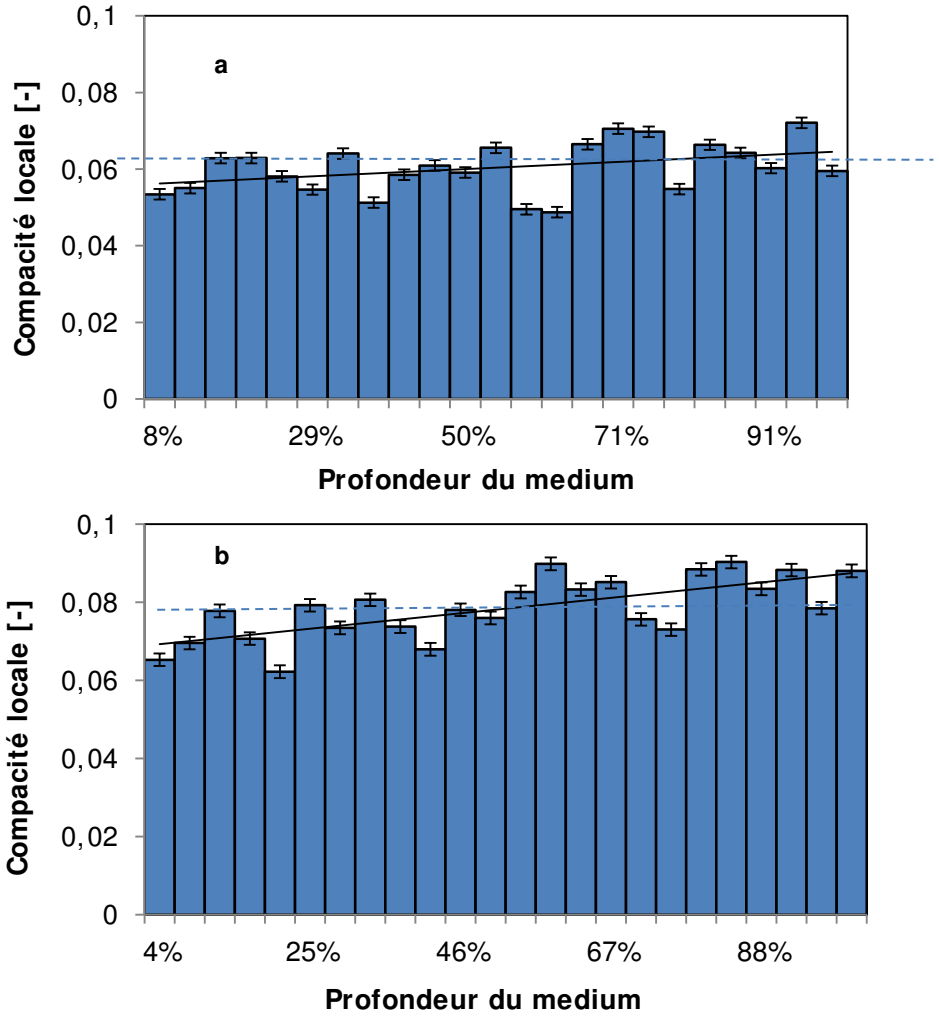


Figure 33 : Mesure du gradient de compacité pour des media THE (a) et HE(b)

La grandeur qui rend compte de l'influence des propriétés physiques du medium (compacité, perte de charge...) est la perméabilité. Cette grandeur est dans le cas de cette étude peu significative. Dans une problématique industrielle, c'est surtout la résistance aéraulique qui est importante en particulier lors du colmatage. Pour cette raison, il n'est ici pas utile d'approfondir le comportement du medium vierge.

1.4. Influence du plissage sur les caractéristiques du medium

La zone plissée du filtre a été observée avec le même protocole opératoire que les médias vierges (Figure 34). Les valeurs de compacité obtenues dans les zones 1 et 2 sont très différentes (0,076 et 0,13). Toutefois, cette zone est très restreinte et on peut constater que le plissage n'influence pas les zones voisines. Ainsi, les caractéristiques du medium plissé ont

été considérées comme identiques à celles du medium plan et nous n'avons pas considéré de changement de caractéristiques du medium, une fois plissé.

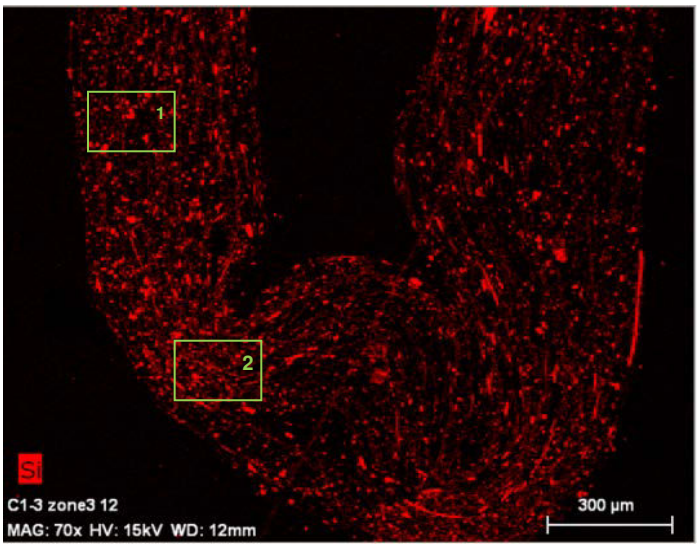


Figure 34 : Vue en coupe de la zone plissée d'un medium. En vert, les zones mesurées. La compacité est de 0,076 dans la zone non affectée (1) et de 0,13 dans la zone compressée (2)

2. CARACTERISATION DES AEROSOLS

Ce travail de recherche s'inscrit dans une démarche dont l'objectif final est de disposer d'un modèle de colmatage de filtres THE industriels par des aérosols de combustion, plus phénoménologique que les corrélations empiriques existantes. Dans ce contexte, l'utilisation d'aérosols issus de la combustion de différents matériaux utilisés en particulier dans l'industrie nucléaire, en vue de colmater les filtres à étudier, aurait pu être une stratégie de recherche. Néanmoins, la réalisation de combustion engendre dans les dispositifs expérimentaux de colmatage, outre la production d'aérosols, des conditions thermodynamiques transitoires qui, conjuguées à la production de vapeur d'eau, peuvent avoir un impact important tant sur la taille et la morphologie des aérosols que sur le comportement aéraulique de l'élément filtrant. Aussi, afin de disposer de conditions expérimentales maitrisées, nous avons choisi d'utiliser non pas des aérosols issus directement de combustion mais de générer des aérosols dont les caractéristiques sont représentatives de ce type d'aérosols. Cela offre, de plus, la possibilité d'utiliser des aérosols de natures différentes en fonction des paramètres que l'on souhaite étudier.

Ainsi, au cours de cette étude, nous avons dans un premier temps utilisé, des aérosols formés par décharge électrique de différents matériaux comme l'argent, le titane et le carbone, dont certains d'entre eux ont une morphologie comparable aux aérosols de combustion. Ces particules nous offrent la possibilité d'appliquer des méthodes de caractérisation basées sur leur composition chimique, notamment la technique de détection MEB/ EDX détaillée dans le paragraphe suivant. L'objectif est d'obtenir des aérosols suffisamment caractérisés et comparables entre eux. L'acquisition de données sur un aérosol nanostructuré est donc nécessaire, en particulier pour pouvoir extrapoler le comportement des particules étudiées à celles massivement produites entre autres, lors d'un incendie. Ces particules sont composées de particules sphériques assemblées selon une morphologie « pseudo-fractale ». Leur

comportement lors de la filtration dépend donc de plusieurs caractéristiques. La collecte des aérosols, leur transport dans l'écoulement sont conditionnés par les propriétés de l'agrégat. La dimension fractale est le paramètre considéré comme caractéristique de la morphologie d'un agrégat. Sa mesure nécessite de recourir à des méthodes d'analyse d'image acquises par microscopie électronique à transmission (Brasil et al. 1999) mais il s'agit alors d'une mesure en deux dimensions ou des méthodes de caractérisation complexes (optique, tomographie électronique..) mais qui, dans notre cas, seraient d'un intérêt limité. En revanche, une fois déposées sur les filtres, c'est le diamètre des particules primaires qui conditionne la surface en contact avec le fluide, donc la résistance offerte à l'écoulement qui conditionne l'élévation de perte de charge. Pour cette raison, nous avons également eu recours à des particules d'alumine qui permettent de former des dépôts présentant un volume important avec une perte de charge ne remettant pas en cause l'intégrité mécanique du filtre. Cet aérosol a principalement été dédié à l'étude de la réduction de surface.

Les informations que nous considérons ici pertinentes pour l'étude de la filtration sont donc :

- le diamètre de mobilité électrique ou le diamètre aérodynamique,
- le diamètre des particules primaires.

La Figure 35 représente le schéma du dispositif utilisé pour mesurer la granulométrie des aérosols dans le banc dédié à la filtration des filtres plans. Toutes les mesures de granulométries ont été effectuées sur les mêmes dispositifs et dans la mesure du possible au même débit que les expériences de colmatage.

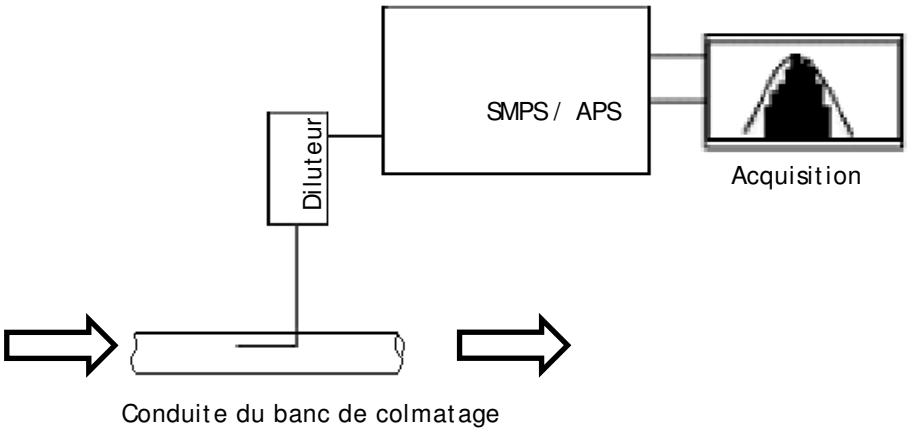


Figure 35 : Schéma du dispositif de mesure de la granulométrie des aérosols

2.1. Aérosols nanométriques ou à structures nanométriques

On trouve usuellement une distinction entre les termes agrégats et agglomérats, la différence entre ces termes réside dans la fusion ou non des particules primaires. Pour un agrégat, on ne considère pas de fusion des particules primaires. Dans ce travail, cette distinction n'est pas essentielle et nous n'utilisons que le terme agrégat.

Balazy et al. (2006) a, par la théorie, mis en évidence la particularité des agrégats en termes d'efficacité de collecte. Etant donné le fait que nous caractériserons par la suite les interactions media/aérosol, l'efficacité de collecte engendre un profil de pénétration de l'aérosol dans le medium différent. En outre, la morphologie des particules est un élément

qui influencera la porosité des dépôts formés dans et sur le medium (Mädler et al. 2006). C'est pourquoi, nous utilisons des particules nanostructurées dans cette étude.

Le générateur Palas GFG 1000 utilise pour produire des aérosols, deux électrodes balayées par un gaz neutre (ici de l'argon), entre lesquelles passe un courant électrique de forte intensité. Initialement, il est utilisé avec des électrodes de carbone. Mais en utilisant des électrodes métalliques, il est possible de générer différents types d'aérosols métalliques (Wentzel et al. 2003, Bau 2008).

2.1.1. Aérosol de carbone

L'aérosol de carbone produit par le générateur GFG 1000 se rapproche le plus de particules de combustion. La principale contrainte liée à ce type d'aérosol de carbone est l'impossibilité d'y trouver un marqueur qui permettrait d'appliquer les méthodes de cartographie EDX, étant donné la composition identique avec la matrice utilisée (résine). Les Figure 36 et Figure 37 représentent respectivement les mesures réalisées à l'aide d'un SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) TSI et d'un MET (Microscope Electronique à Transmission) Jeol-2100F, afin d'être en mesure de déterminer le diamètre de mobilité de l'aérosol et le diamètre des particules primaires le constituant.

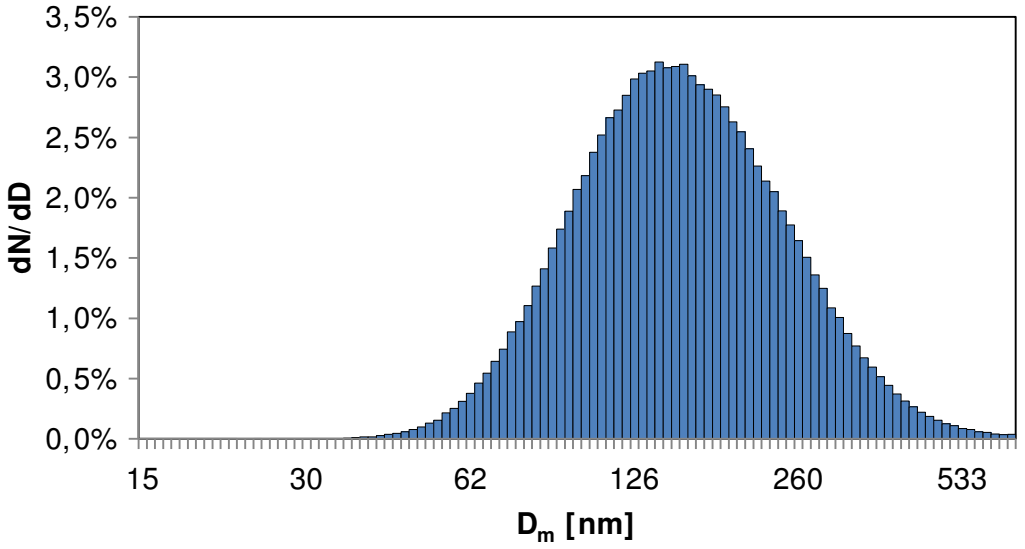


Figure 36 : Distribution granulométrique en diamètre de mobilité électrique de l'aérosol de carbone issu du générateur Palas GFG 1000

Les mesures effectuées à des débits différents ne montrent pas de changements significatifs dans la distribution granulométrique. Le temps de séjour des aérosols dans le banc est trop faible pour influencer significativement le diamètre des agrégats.

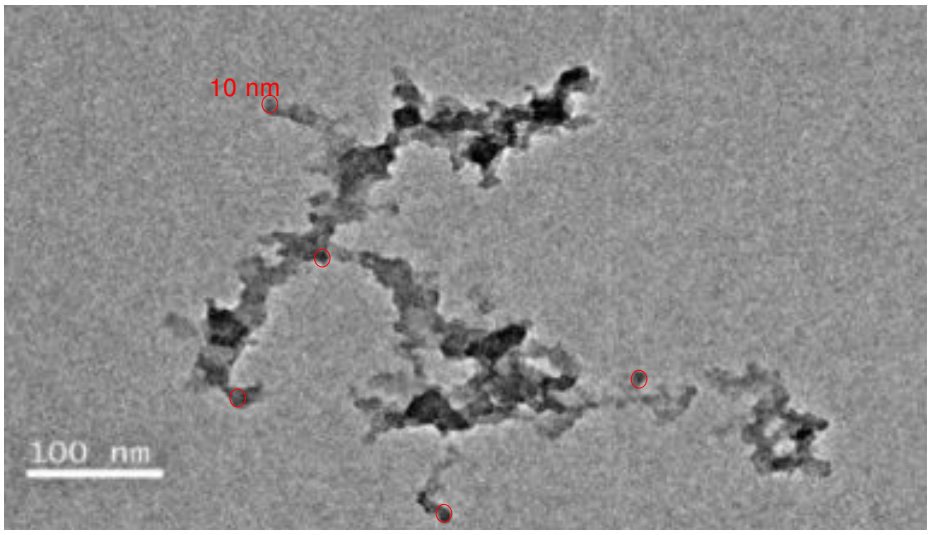


Figure 37 : Image MET d'une particule de carbone générée par le générateur GFG 1000 et particules primaires mesurées (en rouge)

Le tableau 6 présente les résultats des mesures du diamètre de mobilité et du diamètre des particules primaires

Tableau 6 : Caractéristiques de l'aérosol de carbone

D_m [nm]	D_{pp}[nm]	Masse volumique [kg/m^3]
145	10	1950*

**Wentzel et al. 2003*

2.1.2. Oxyde de titane

L'impossibilité d'identifier un élément chimique caractéristique des aérosols de carbone nous a conduit à utiliser un aérosol métallique constitué par des agrégats de particules primaires de diamètres similaires. Les aérosols de titane générés grâce au générateur à décharge Palas GFG 1000 en utilisant des électrodes de titane produits, au vu des données bibliographiques (Kreyling et al. 2011) un aérosol comparable à ceux produits par des électrodes en carbone. D'une part, la distribution du diamètre de mobilité électrique se trouve dans la même gamme. D'autre part, le diamètre des particules primaires est également proche (Figure 39). Une mesure au SMPS (Figure 38) montre que les agrégats de titane formés présentent une distribution granulométrique sensiblement inférieure à celle de l'aérosol de carbone (Figure 36).

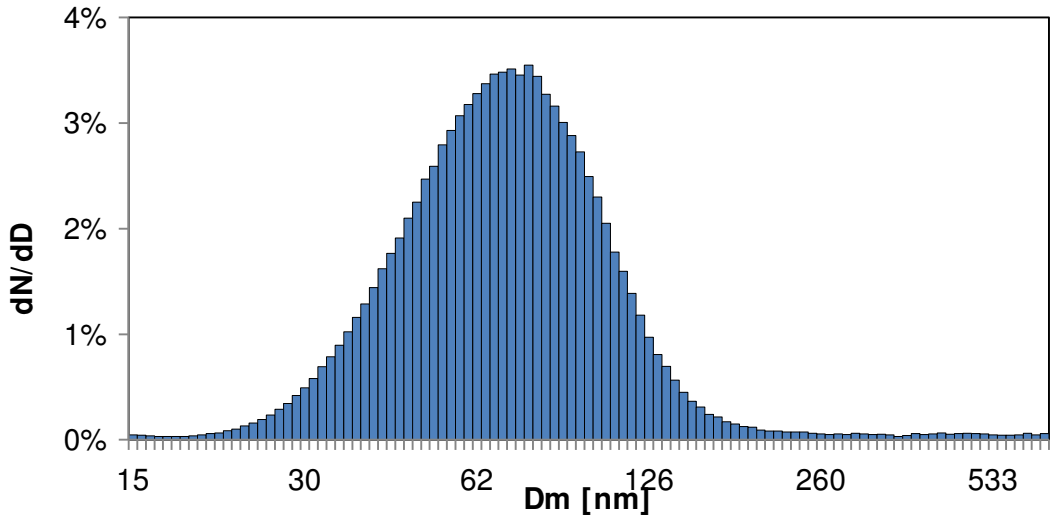


Figure 38 : Distribution granulométrique en diamètre de mobilité électrique de l'aérosol d'oxyde de titane issu du générateur Palas GFG 1000

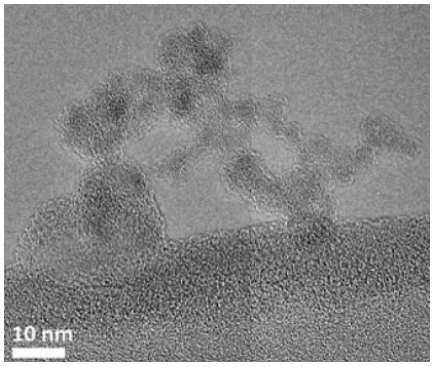


Figure 39 : Image MET d'une particule d'oxyde de titane générée par le générateur Palas GFG 1000 (Kreyling et al. 2011)

Le tableau 7 présente les caractéristiques de l'aérosol d'oxyde de titane.

Tableau 7 : Caractéristiques de l'aérosol de titane

D_m [nm]	D_{pp} [nm]	Masse volumique [kg/m^3]
70	7*	4300

*Kreyling et al. 2011

2.1.3. Argent

La morphologie fractale de l'aérosol joue un rôle évident lors de la formation du dépôt en particulier pour ce qui est de sa porosité. A ce titre, l'utilisation de particules nanométriques d'argent présentant une morphologie particulièrement peu agrégée (Bau 2008) présente un intérêt dans la mise en évidence du rôle de la morphologie dans le colmatage des filtres. Les Figure 40 et Figure 41 présentent respectivement les mesures réalisées à l'aide d'un SMPS Grimm FCE 5710 et d'un MET Jeol-2100F.

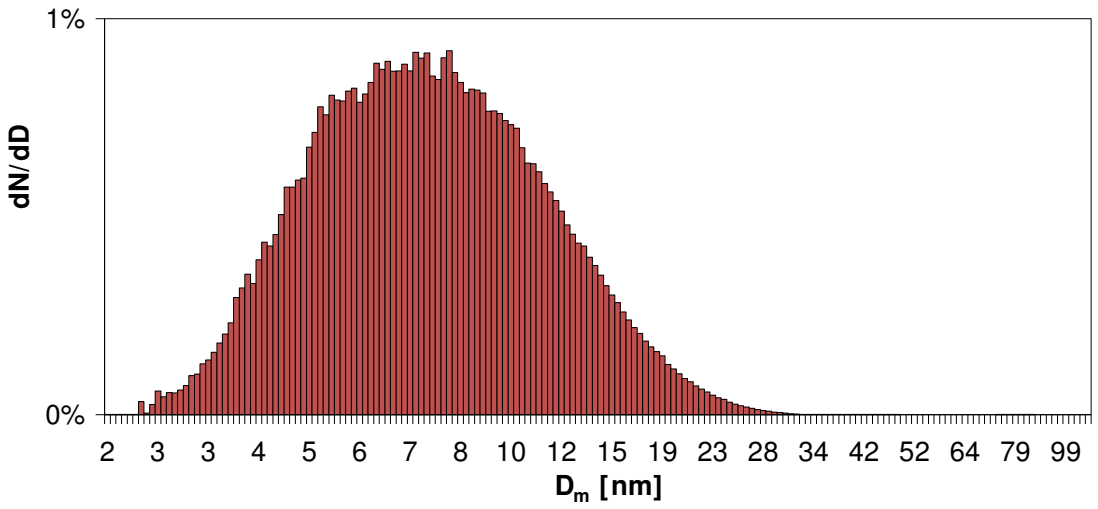


Figure 40 : Distribution granulométrique en diamètre de mobilité électrique de l'aérosol d'argent issu du générateur Palas GFG 1000

Un des intérêts majeurs dans l'utilisation de ces particules réside dans le fait que la granulométrie des particules, mesurées au SMPS est proche de la granulométrie des particules primaires des aérosols de carbone et de titane. La connaissance de la masse volumique du matériau est importante pour déterminer le volume de particules déposées sur le filtre. Cette information nous est donnée par observation directe des plans cristallins des aérosols au microscope électronique à transmission à haute résolution. L'application d'une transformée de Fourier rapide (FFT) à l'image obtenue permet d'obtenir un cliché de diffraction. Cette information nous permet via des abaques de connaitre la nature de l'aérosol et son état.

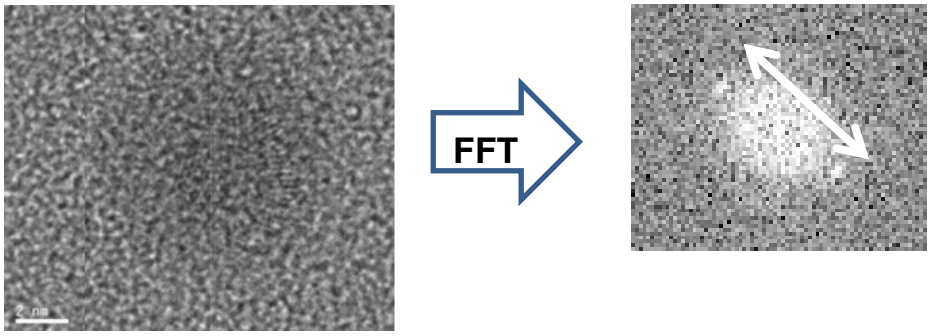


Figure 41 : Illustration des images obtenues par microscopie électronique à transmission. (a) image brute (b) image obtenue par transformée de Fourier

Le tableau 8 présente les caractéristiques de l'aérosol d'argent.

Tableau 8 : Caractéristiques de l'aérosol d'argent

D_m [nm]	Masse volumique [kg/m^3]
8	10490

2.1.4. Fumées de métallisation Zn/Al

Le colmatage des filtres plissés par des particules métalliques générées par le Palas GFG 1000 est impossible. En effet, le débit de génération est nettement insuffisant pour l'étude de filtres présentant une surface de medium importante. De fait, le colmatage significatif de filtres plissés nécessite un temps trop long pour être envisageable dans des conditions satisfaisantes.

Nous avons eu, au cours de ce travail de thèse, la possibilité d'utiliser la génération d'aérosols issus de fumée de métallisation. Le procédé de génération est le même que dans le générateur Palas GFG 1000. La différence principale réside dans le fait que les électrodes sont ici constituées par deux fils métalliques de zinc et d'aluminium et celles-ci ne sont pas balayées par un flux de gaz neutre mais par un jet d'air comprimé. L'ensemble permet de générer des aérosols nanométriques de manière stable et maîtrisée avec une concentration très importante. Le schéma de fonctionnement du banc de génération est illustré Figure 42.

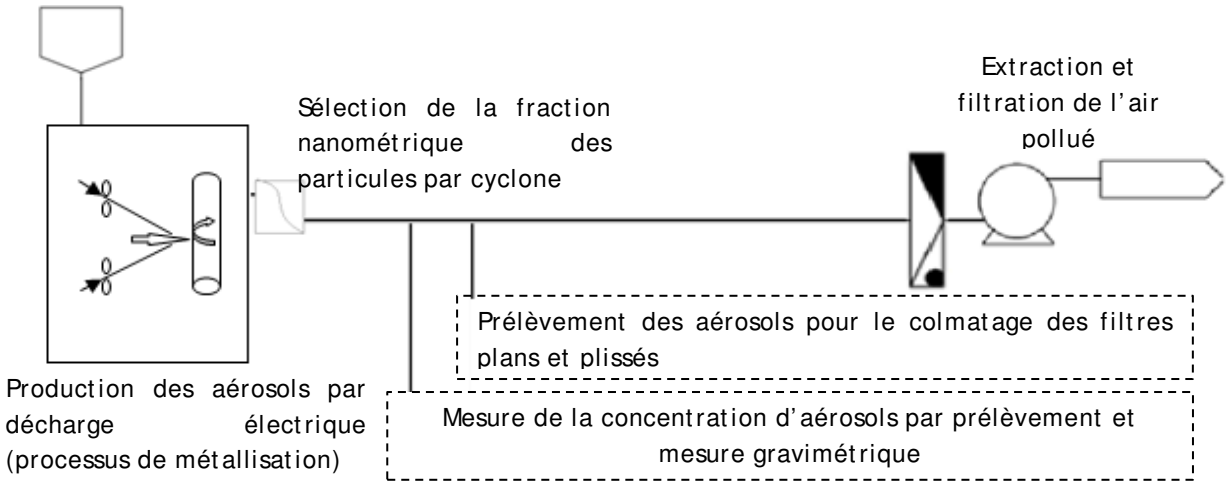


Figure 42 : Illustration schématique du banc utilisé pour la génération d'aérosols nanométriques de Zn/Al en grande quantité

L'aérosol issu de ce banc a été caractérisé par Bémer et al. (2013). Nous reprendrons ici à notre compte des mesures qui ont été effectuées dans le cadre de son étude. La Figure 43 représente une vue au microscope électronique à transmission de l'aérosol métallique produit.

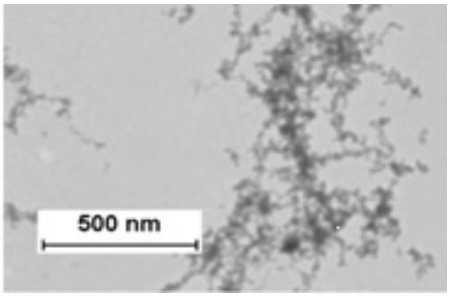


Figure 43 : Illustration au microscope électronique à transmission des particules nanométriques issues de l'électroérosion des fils de zinc et d'aluminium (Bémer et al. 2013)

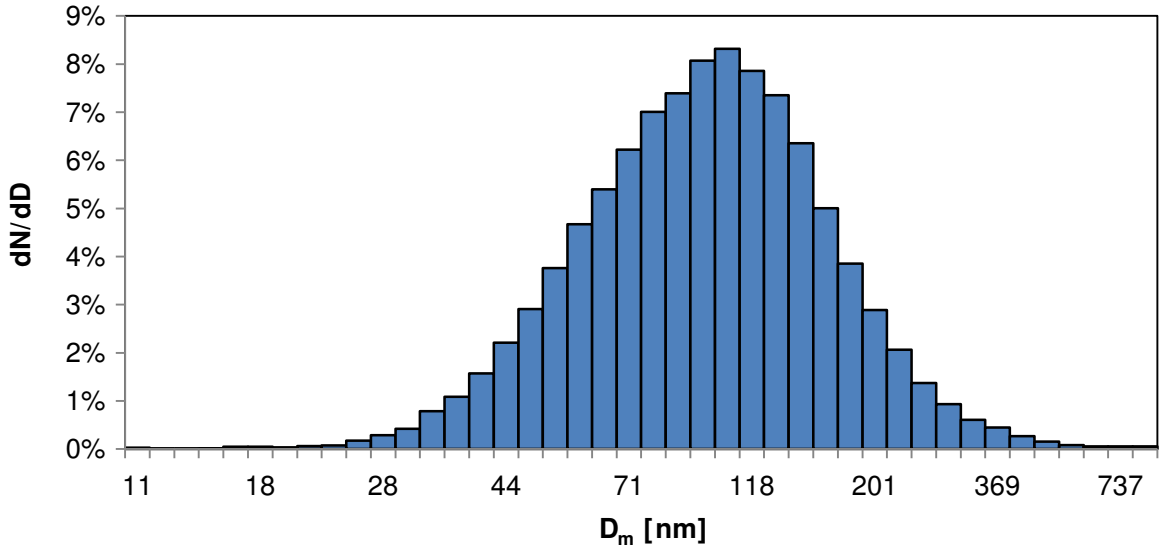


Figure 44 : Distribution granulométrique des aérosols de Zn/Al mesurée au SMPS (Grippari 2012).

La Figure 44 illustre la répartition de diamètre de mobilité électrique des aérosols de Zn/Al. Cette répartition est proche de celle mesurée pour des aérosols de carbone (Figure 36). Le tableau 9 présente les caractéristiques de l'aérosol de zinc / aluminium.

Tableau 9 : Caractéristiques de l'aérosol de Zn/Al

D_m [nm]	D_{pp} [nm]	Masse volumique [kg/m^3]
111	8	5500

2.2. Aérosol submicronique

Alumine

Pour l'étude de la perte de charge d'un medium plissé, les particules d'alumine nous ont permis de former des dépôts moins résistants à l'écoulement et d'observer ainsi la dernière phase de filtration. En effet, ces particules ne présentent pas de dimension nanométrique comme des agrégats de nanoparticules.

Les aérosols d'alumine utilisés sont produits à partir d'une poudre dispersée dans un générateur à piston (Palas RBG 1000). La morphologie des particules est considérée comme identique à celle de la poudre brute. L'utilisation d'un impacteur permet de descendre sensiblement la granulométrie de l'aérosol afin de rester dans une gamme granulométrique inférieure au micromètre. La granulométrie mesurée grâce à un APS est présentée Figure 45 et les caractéristiques regroupées dans le tableau 10.

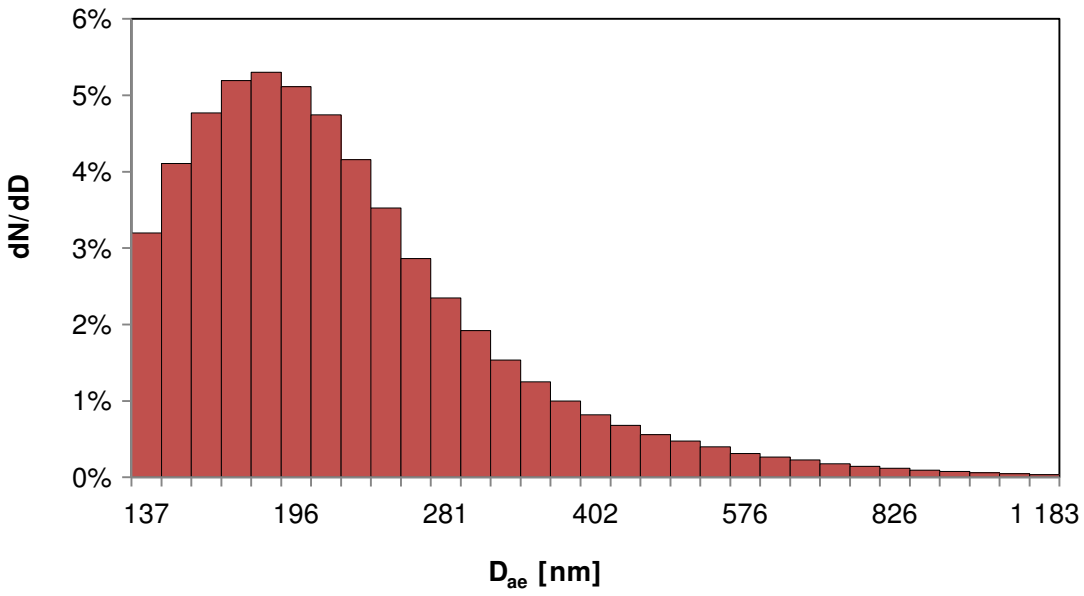


Figure 45 : Granulométrie des aérosols d'alumine mesurée par un APS

Tableau 10 : Caractéristiques de l'aérosol d'alumine

D_m [nm]	Masse volumique [kg/m^3]
250	3970

2.3. Conclusion

Les caractéristiques mesurées pour les deux media qui ont été utilisés au cours de cette étude sont regroupées dans le tableau 11.

Tableau 11 : Récapitulatif des caractéristiques des media

	Diamètre de fibre	Epaisseur	Compacité	Résistance aéraulique
Medium HE	0,59 µm	420 ± 60 µm	0,065 ± 0,004	$1,7.10^8$ m^{-1}
Medium THE	1,64 µm	450 ± 90 µm	0,078 ± 0,003	$4,6.10^8$ m^{-1}

Le medium HE nous a permis de comprendre le rôle que joue la pénétration des particules dans le medium dans l'augmentation de la perte de charge du filtre. Le medium THE a quant à lui été utilisé dans l'étude des filtres plissés. Le fait de disposer de deux media différents permet en outre de mettre en lumière le rôle de paramètres propres au filtre (efficacité, compacité en premier lieu).

Les caractéristiques des aérosols utilisés sont regroupées dans le tableau 12.

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des grandeurs caractéristiques des aérosols

	D_m [nm]	D_{pp} [nm]	Masse volumique [kg/m^3]
C	145	10	1950
Ti	70	7	4300
Zn/Al	111	8	5500
Ag	8	/	10490
Alumine	250	/	3970

Concernant les aérosols utilisés, le sujet de cette étude est de comprendre le phénomène de colmatage par des particules de combustion. Les données expérimentales acquises sur ce type d'aérosol fait état d'une grande complexité.

Outre les problématiques de fraction organique et de condensat présent dans les agrégats qui ne sont pas ici étudiés, ces particules présentent les caractéristiques propres à des particules nanométriques (particules primaires) et à des particules submicroniques.

Ouf (2006) a mesuré à titre d'exemple des particules primaires comprises entre 40 et 65 nm selon la richesse du mélange et la nature du combustible. Dans d'autres études (Kim et al. 2009, Brugière et al. 2014), le diamètre des particules primaires d'agrégats issus de combustion est de 20 nm. Dans ce travail, pour des raisons de contraintes expérimentales, nous avons travaillé avec des agrégats dont les particules primaires mesurent moins de 10 nm. L'étude de ces particules permet en outre de disposer de données et de conclusions sur des cas de figures étendus et particulièrement pénalisants en termes de perte de charge, notamment lors des deux premières phases de filtration.

Le diamètre de l'aérosol de combustion est très variable, il varie de quelques dizaines de nanomètres à plusieurs centaines de nanomètres. Le degré d'agglomération dépend du temps de séjour des particules dans le gaz. Cette dimension influence probablement l'accumulation des particules dans un pli. Pour cette raison, l'aérosol d'alumine, de diamètre plus important, est utilisé pour colmater un medium plissé.

Ainsi, nous disposons de particules qui nous ont permis de comprendre l'influence des dimensions de particules de combustion en termes de surface spécifique et de comportement aéraulique et donc d'investiguer les différents aspects de la filtration sur medium plissé.

CHAPITRE III : ETUDE DU COLMATAGE DES FILTRES PLANS

Rappelons que le colmatage d'un filtre THE utilisé dans les réseaux de ventilation se décompose en trois phases successives que sont la filtration profonde, la filtration en surface puis la réduction de la surface effective de filtration (Figure 19). Les deux premières phases de filtration sont communes aux filtres plans et plissés, ce qui permet de s'affranchir des contraintes liées à l'emploi de medium plissé, notamment en termes d'implantation de l'instrumentation nécessaire à la caractérisation des grandeurs d'influence. Aussi, nous avons choisi d'étudier en premier lieu le colmatage de filtres plans.

L'étude bibliographique a permis de mettre en évidence les paramètres microscopiques pertinents dans l'étude du colmatage d'un filtre plan par un aérosol donné :

- **pour la filtration profonde** (qui inclut la « phase de transition » décrite dans certains travaux), les paramètres identifiés sont le profil de pénétration des aérosols dans le medium et la porosité des dépôts,

- **pour la filtration en surface**, les paramètres d'étude pertinents sont ici la porosité et l'épaisseur du dépôt.

Pour cette étude, nous avons, en premier lieu, réalisé un montage expérimental constituant un banc d'essai aéraulique permettant de colmater des filtres plans dans des conditions maitrisées. En parallèle, nous avons développé de nouveaux moyens métrologiques aptes à la détermination des profils de pénétration des aérosols au sein des media et à la détermination de la compacité et de l'épaisseur des dépôts de particule.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Banc d'essai aéraulique

Le banc aéraulique utilisé pour le colmatage des filtres plans se décompose de la façon suivante (Figure 46). Différents types de générateurs sont utilisés. Ceux-ci ayant un débit de gaz porteur propre, un filtre THE permet d'évacuer l'excédent et de n'en retirer que le débit nécessaire au colmatage du filtre à la vitesse de filtration voulue. Le débit est maintenu constant au cours du colmatage par un débitmètre/régulateur Brooks S5820. La perte de charge du filtre plan est mesurée en continu par un capteur de pression différentielle.

Lors de l'utilisation d'un générateur de type Palas GFG 1000, le gaz porteur peut être composé en partie ou entièrement d'argon (utilisé pour éviter l'oxydation des particules et des électrodes). Sur ce dernier point, un coefficient de correction de débit a donc été mesuré expérimentalement pour les différents points de fonctionnement utilisés sur ce banc afin de maitriser le débit volumique en amont du filtre. Ces coefficients ont été mesurés à l'aide d'un débitmètre à bulle de savon. Celui-ci permet de mesurer directement un débit volumique indépendamment des caractéristiques du gaz porteur. Ces coefficients sont en bon accord avec ceux conseillés par le constructeur (1,39 pour de l'argon pur). Ils seront appliqués pour toutes les expériences réalisées avec le générateur Palas GFG 1000. Pour chaque filtre, la masse accumulée est mesurée par pesée (résolution de la balance utilisée 10^{-5} g) directement après colmatage. L'étuvage des filtres n'est ici pas nécessaire, étant

donné que les générateurs ne fonctionnent qu'avec des gaz séchés et filtrés (air ou argon). La pesée est faite tout de suite après le colmatage pour éviter une reprise d'humidité liée à l'air atmosphérique.

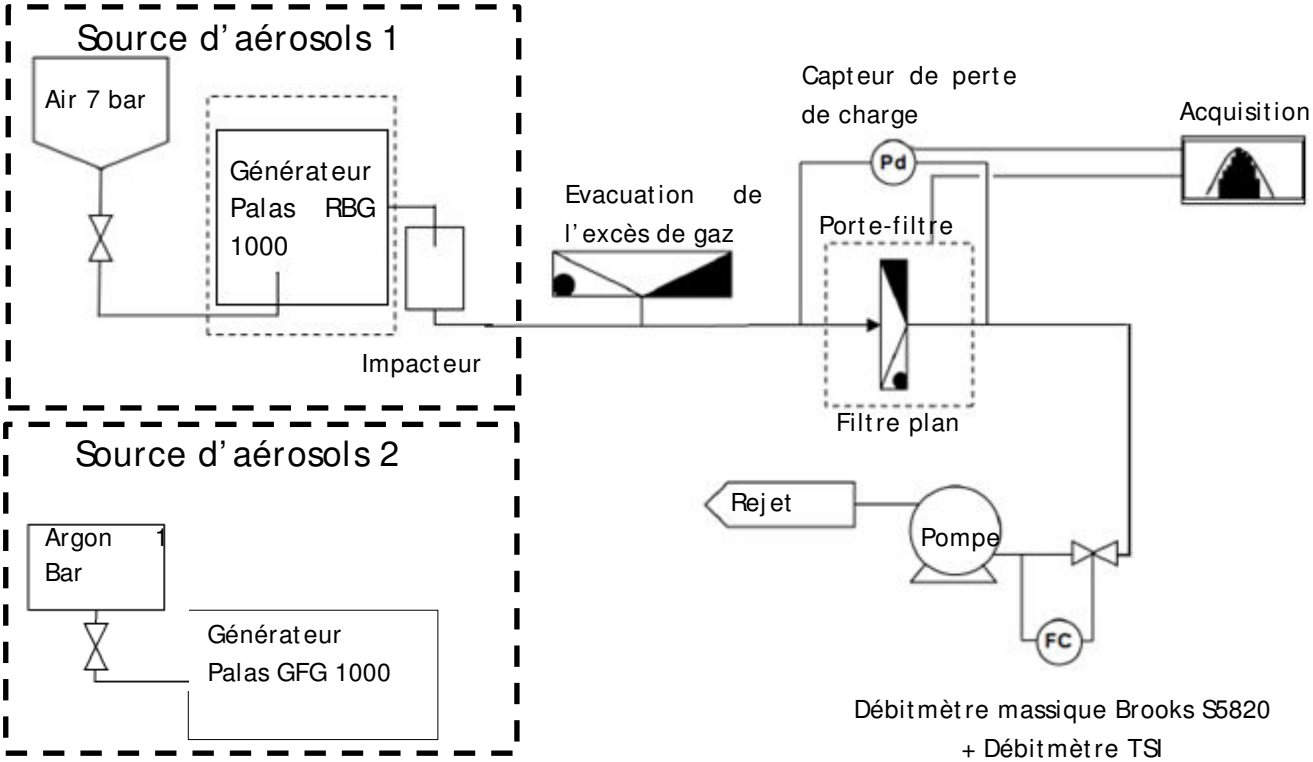


Figure 46 : Schéma de fonctionnement du banc aéraulique utilisé pour le colmatage des filtres plans

L'évolution de la perte de charge d'un filtre plan est la caractéristique observable du comportement d'un filtre lors du colmatage. Elle est l'expression de phénomènes se produisant à plus petite échelle, en premier lieu l'accumulation des particules sur les fibres du medium et l'organisation des dépôts formés dans et sur le medium. Dans ce travail de thèse, deux méthodes principales ont été mises en place avec pour but de mesurer le plus précisément possible ces phénomènes afin d'identifier et de quantifier simplement les paramètres ayant une influence sur le colmatage du filtre. Ainsi, une méthode de mesure de la pénétration des aérosols dans le medium a été développée et un dispositif de mesure de la porosité d'un dépôt de particules a été conçu.

1.2. Mesure du profil de pénétration

1.2.1. Préparation des échantillons

La mesure de pénétration des aérosols dans le medium est fondée sur le fait que le matériau constituant les particules est différent de celui constituant le medium. Une mesure par spectroscopie EDX est donc réalisable et une cartographie permet de distinguer aisément les éléments chimiques constituant le medium et l'aérosol. Pour être correctement exploitable, cette méthode d'analyse nécessite une surface plane, c'est

pourquoi nous avons opté pour une coupe du medium enrobé dans une résine de matérialographie. Pour pouvoir appliquer cette préparation à des filtres chargés en particules et donc particulièrement fragiles, il convient tout d'abord de fixer les particules sur le medium de manière à ne pas perturber le dépôt lors de l'enrobage. Pour ce faire, une méthode décrite par Schmidt et al. (1990) pour la fixation de dépôts d'aérosols en vue de leur observation microscopique a été reprise (Figure 47).

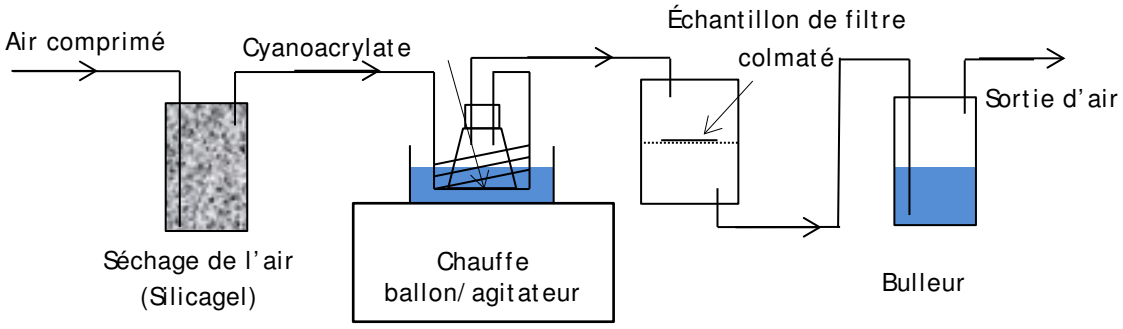


Figure 47 : Schéma du dispositif de fixation des échantillons de filtres colmatés

Ce dispositif de préparation se compose (de gauche à droite sur la Figure 47) d'une arrivée d'air comprimé passant dans un sécheur chimique composé de Silicagel©. L'air sec est ensuite chauffé en passant dans un serpentin de cuivre baignant dans un bain d'eau chauffée à 80°. Cet air passe dans un erlenmeyer contenant une colle de type Cyanoacrylate, baignant lui-même dans le bain d'eau chaude. L'air se charge alors de vapeurs de colle qui se condensent sur l'échantillon de filtre colmaté. Enfin, l'air contenant des résidus de colle est purifié par bullage. Les échantillons ainsi stabilisés sont ensuite enrobés dans une résine de type époxy (Specifix© 20). Le traitement hydrophobe des media nécessite, pour obtenir une bonne imprégnation des échantillons par la résine, un passage rapide à l'étuve (~5 min selon la composition du mélange). Ce traitement préalable, s'il ne supprime pas la formation de bulles de gaz permet néanmoins d'éviter la formation d'une couche d'air rendant impossible la mesure. Les échantillons obtenus sont ensuite poncés automatiquement et polis lors de différentes étapes successives en terminant par un polissage aux particules de diamant afin d'obtenir une surface lisse, plane et non contaminée.

1.2.2. Mesure EDX et traitement des données

L'observation des échantillons préparés est conduite en utilisant un microscope électronique à balayage Hitachi© S3500N équipé de deux détecteurs EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometry) Bruckers© de 30 mm de diamètre. Les tensions d'accélération et les distances de travail ont été déterminées expérimentalement et sont identiques pour chaque mesure (respectivement 15 kV et 15 mm). Le traitement des données EDX a été effectué avec la fonction Quantax© du logiciel Esprit©. Pour chaque profil de pénétration, la fonction de cartographie Hypermap a été utilisée (reposant sur un algorithme de correction PhiRhoZ). L'intensité du signal reçu est adimensionnée par le signal reçu pour toute l'épaisseur du filtre. Les résultats présentés sont relatifs. Nous considérons pour ces mesures que la planéité de l'échantillon n'influence pas la mesure. Afin de différencier les éléments caractéristiques du medium et ceux propres aux aérosols, les éléments présents dans le medium vierge ont été identifiés et leur concentration estimée afin de pouvoir être

distingués des éléments constitutifs des particules. Le spectre mesuré pour un filtre vierge est présenté Figure 48.

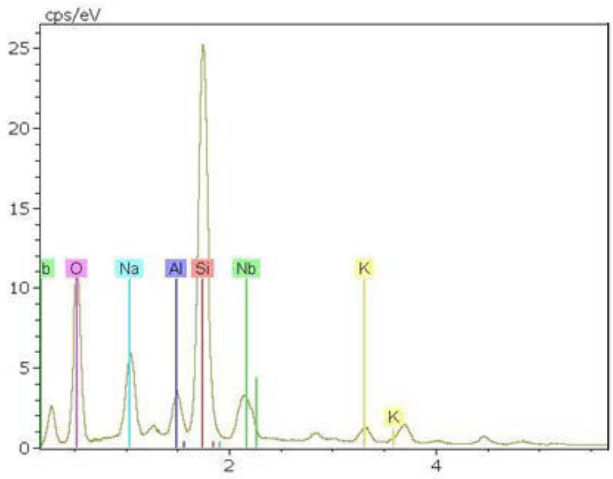


Figure 48 : Spectre obtenu pour la composition d'un medium vierge THE. Les éléments chimiques présents en quantité importante sont annotés.

Ces fibres étant constituées de verre, on retrouve naturellement du silicium, mais également des éléments comme l'oxygène, l'aluminium et le sodium. Au cours de cette étude, nous avons eu recours à des aérosols métalliques. Afin de s'assurer de la faisabilité des mesures avec ce type de particules, la concentration des éléments métalliques constitutifs des particules dans les fibres a été vérifiée constante dans le medium et la valeur mesurée pour le medium vierge a été soustraite lors de la mesure du profil de pénétration. La face amont du filtre est prise comme origine pour la mesure du profil.

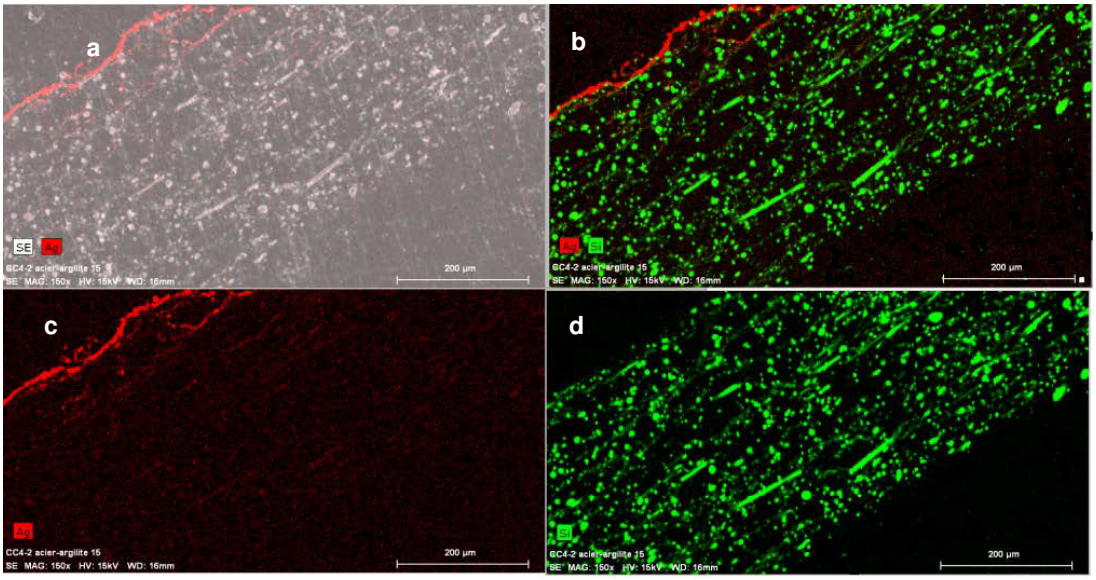


Figure 49 : Illustration de la mesure EDX de pénétration des aérosols pour des filtres plans colmatés avec des aérosols d'argent. (a) image de la tranche de filtre colmaté avec cartographie EDX de l'élément Ag en rouge (b) cartographie EDX de l'échantillon, en rouge Ag et en vert Si. (c) cartographie EDX de l'élément Ag (d) cartographie EDX de l'élément Si

Chaque filtre a été divisé en quatre échantillons sur lesquels vingt profils ont été mesurés, ce qui permet d'avoir 80 mesures par profil de pénétration et limite les erreurs dues à la dispersion des résultats. Le processus ainsi que les zones considérées pour la mesure du profil sont représentés Figure 50.

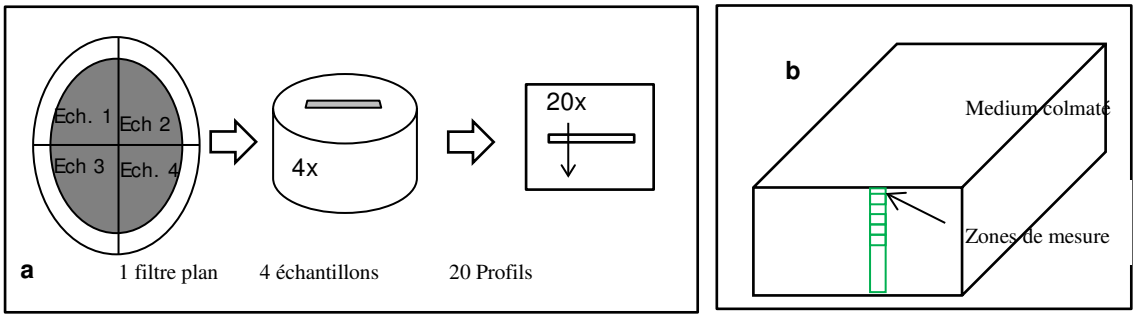


Figure 50 : Illustration de l'échantillonnage des mesures (a) et des zones de mesure de profils de pénétration (b)

Cette méthode de mesure du profil de pénétration des aérosols au sein du medium est décrite dans Bourrous et al. (2014).

1.3. Mesure de porosité

1.3.1. Présentation du dispositif MEGAPAN

La compacité du dépôt des particules est une donnée fondamentale dans le processus de colmatage. Elle conditionne la masse de particules cumulables dans un volume donné (au sein d'un medium poreux par exemple) et la résistance aéraulique de ce dépôt. Dans le présent travail, nous ferons l'hypothèse que la porosité du dépôt accumulé dans le medium, sur les fibres, et à sa surface, est identique. Le mécanisme de dépôt étant majoritairement gouverné par la diffusion brownienne, cette hypothèse semble acceptable. Afin de s'affranchir des incertitudes inhérentes aux mesures *a posteriori* comme la topomicroscopie (Kim et al. 2009) ou des approches purement théoriques (Mädler et al. 2006), nous avons conçu un dispositif de mesure en continu de l'épaisseur d'un dépôt par trigonométrie laser. Cette méthode permet une meilleure précision (car dynamique) et un suivi de l'évolution du dépôt. De la mesure d'épaisseur, nous calculons la porosité en connaissant la masse volumique des particules et la masse déposée sur le filtre.

1.3.2. Principe

Pour mesurer l'évolution de l'épaisseur d'un dépôt de particules, nous avons utilisé une méthode simple de trigonométrie. Un spot laser est projeté à la surface d'une membrane FSLW fluoropore 3 µm (utilisée ici pour sa surface plane) avec un angle ß, le schéma du dispositif MEGAPAN (Mesure de l'Epaisseur du GAteau de PArticules Nanométriques) est présenté Figure 51.

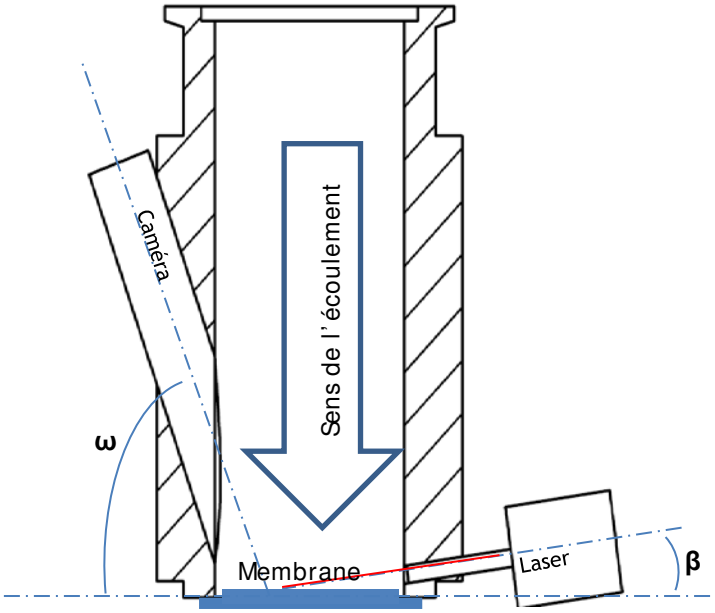


Figure 51 : Schéma du dispositif utilisé pour mesurer la croissance du dépôt de particules

Ce spot est observé en continu par une caméra. Le dispositif complet se présente comme un porte-filtre. Pour la mesure de porosité des dépôts, le medium FSLW est utilisé pour sa planéité et la faible accumulation de particules au sein du medium durant la filtration des aérosols. Le filtre se compose d'un support fibreux recouvert par une couche de téflon sur la face amont. La Figure 52 représente les faces amont et aval de la membrane.

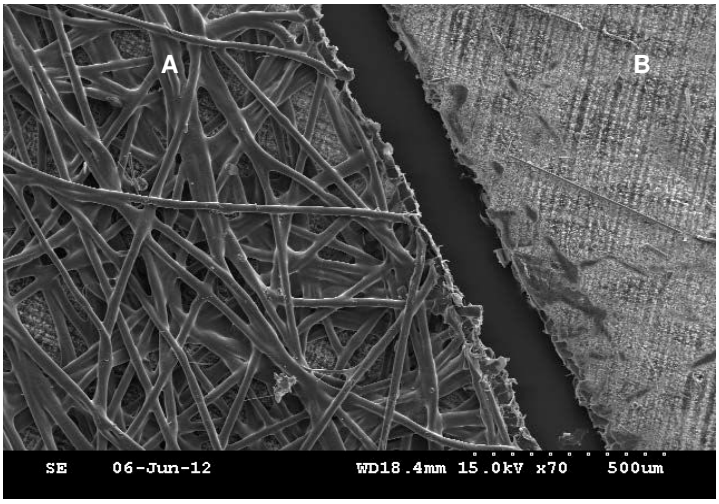


Figure 52 : Image MEB des membranes FSLW utilisées dans le dispositif de mesure de porosité (A) coté aval (B) coté amont

L'ensemble de ce dispositif est mis en place sur le banc de colmatage précédemment décrit afin de déposer des particules à la surface de la membrane. Lorsque le dépôt croît à la surface du medium, le spot se décale d'une valeur t. Cette valeur est le produit de

l'épaisseur du dépôt e_g par l'inverse de la tangente de l'angle ß. En tenant compte du grossissement g induit par la caméra, on a :

$$e_g = \left[t.\left(\frac{\tan(\omega)}{\tan(\beta)}\right)\right].g = t.G \qquad [35]$$

avec G le grossissement global du système. Il est ensuite aisé de remonter à la porosité via la relation suivante :

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{m}{\rho_p.e_g.S_f}\right) \qquad [36]$$

où ε est la porosité, m la masse accumulée, S_f la surface de filtration et ρ_p, la masse volumique du matériau constituant les particules. Cependant, afin de réduire les incertitudes inhérentes à la mesure ponctuelle, la relation 37 a été préférée :

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{1}{\rho_p.Tx.S_f}\right) \qquad [37]$$

avec $Tx = \frac{de_g}{dm}$ le taux de croissance du dépôt (la génération étant vérifiée constante, la masse déposée est proportionnelle au temps). Précisons que l'utilisation de la relation 36 repose sur l'hypothèse de la formation d'un dépôt de particules incompressible, ce qui semble justifié au vu des forces de cohésion des particules nanométriques et de l'évolution linéaire de la perte de charge.

1.3.3. Acquisition et traitement des points expérimentaux

L'extraction des points de mesures d'épaisseur se fait à l'aide d'un programme d'analyse d'images réalisé sous Matlab©. Durant le colmatage, une vidéo de la dérive du spot laser projeté à la surface du dépôt est enregistrée. Cette vidéo est ensuite décomposée en images. Ces images sont converties en niveau de gris et l'intensité des pixels est sommée selon l'axe perpendiculaire à la direction dans laquelle dérive le faisceau. Pour chaque image, le maximum de cette somme est cherché puis enregistré. C'est ce maximum qui déterminera la position du pointeur. L'algorithme de traitement est représenté Figure 53. Chaque expérience est réalisée au moins deux fois afin de s'assurer de la reproductibilité et de la pertinence des données recueillies.

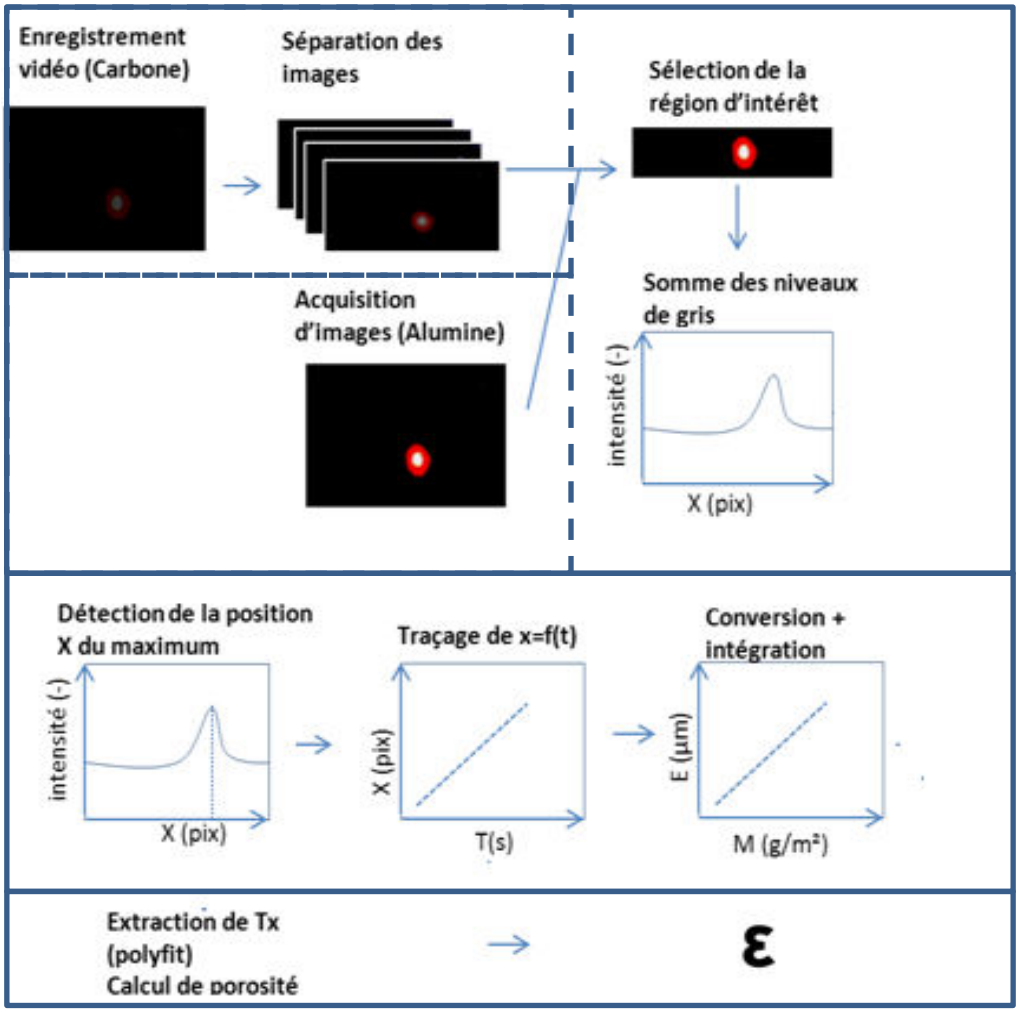


Figure 53 : Différentes étapes de mesure de la porosité par l'instrument MEGAPAN

1.3.4. Traitement du scintillement

Lorsque la luminosité baisse, pour des particules très absorbantes, un effet de scintillement est observable ce qui influence la position du maximum au cours de l'expérience. La résolution de mesure étant de 4,1 µm/pixel, il est nécessaire de s'affranchir de ce scintillement. La mesure est donc intégrée sur plusieurs images. Ainsi, la précision spatiale de cette mesure s'en trouve améliorée mais au détriment de la qualité temporelle. Cela est sans conséquence pour la qualité de la mesure, étant donné le grand nombre d'images disponibles (30 par seconde). La mesure est donc obtenue en sommant l'acquisition sur un pas de temps plus important (entre 1000 et 10000 images selon le scintillement du spot). De cette position est par la suite déduite l'épaisseur du dépôt.

1.3.5. Mise au point et validation de la méthode

Mesure du grossissement G

Dans un premier temps, un étalonnage statique du système a été effectué. Pour ce faire, le dispositif présenté Figure 54 a été utilisé.

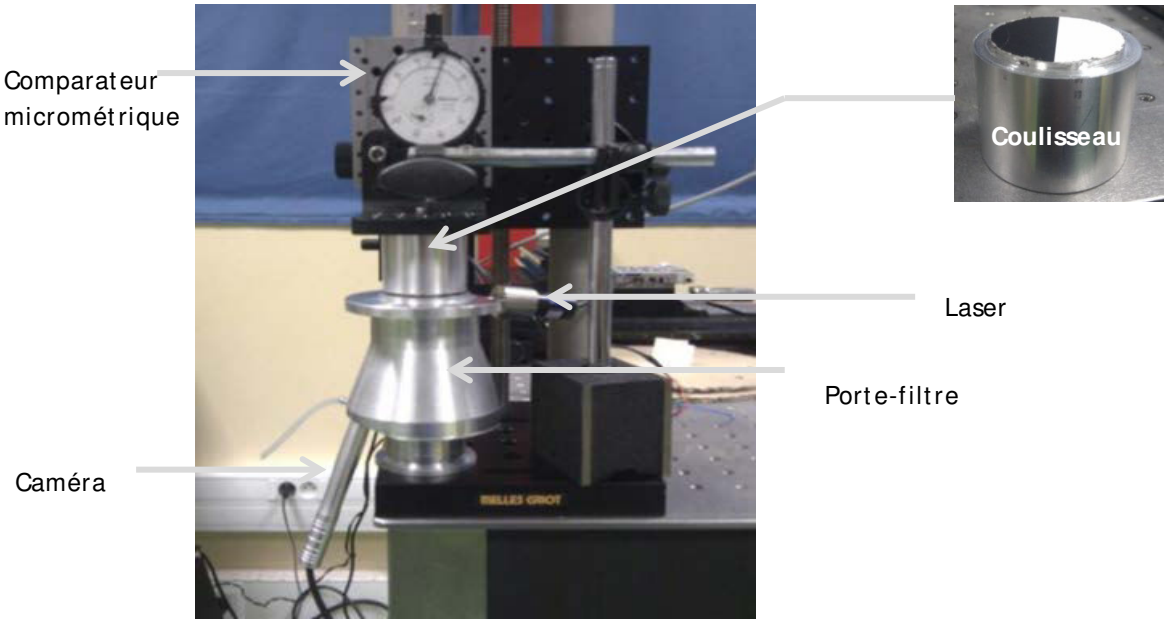


Figure 54 : Photographie annotée du dispositif d'étalonnage statique

Ce dispositif est constitué d'un cylindre coulissant dans le porte-filtre permettant de simuler la croissance d'un dépôt. Le déplacement de ce cylindre est contrôlé par une vis micrométrique et mesuré à l'aide d'un comparateur. Le déplacement de la projection du faisceau est mesuré sur l'image obtenue (Figure 55). La valeur de grossissement G ainsi obtenue est de 4,1 µm / pixel. Cette mesure a également permis de valider le traitement d'image choisi. L'identification du pic d'intensité comme point de mesure a été préférée à une identification morphologique. En effet, l'identification de la forme du spot projeté n'offre pas une précision suffisante car cette forme change lors de la formation du dépôt.

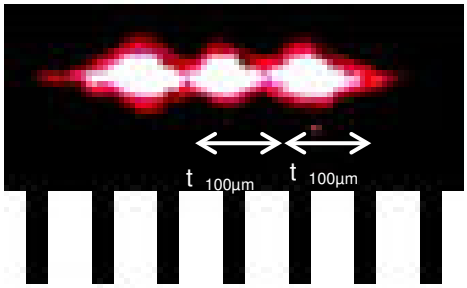


Figure 55 : Déplacement du spot sur la surface projetée pour deux déplacements successifs de 100 µm

Une validation du grossissement a été effectuée directement sur des dépôts de suies et d'alumine (Figure 56, tableau 13) afin de confirmer que la pénétration du faisceau dans le dépôt n'influence pas la qualité de la mesure. Les résultats confirment la valeur de 4,1 µm/ pixel pour ces deux cas de référence.

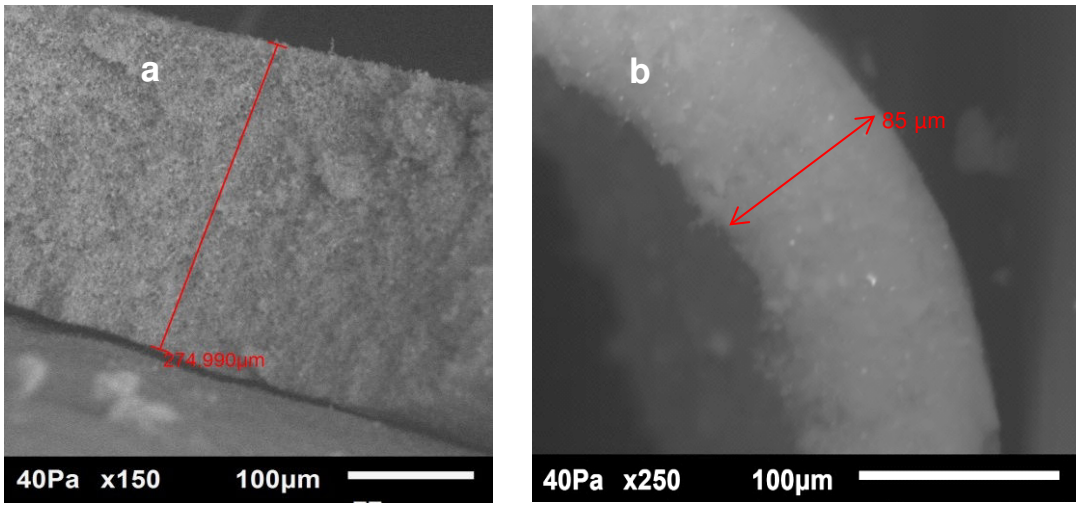


Figure 56 : Mesure au MEB d'un dépôt d'alumine (a) et de carbone (b) pour la validation du dispositif

Tableau 13 : Comparaison des valeurs d'épaisseur obtenues par microscopie et via MEGAPAN

Aérosol	Epaisseur mesurée par MEGAPAN	Epaisseur mesurée par MEB
Alumine	281 µm	274 µm
Carbone	83 µm	85 µm

Evaluation de la réponse du dispositif

Afin de valider le fonctionnement du dispositif et d'évaluer son temps de réponse, le dispositif illustré Figure 57 a été utilisé.

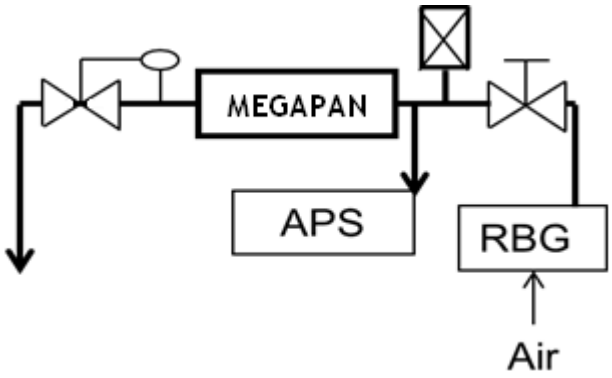


Figure 57 : Schéma du dispositif utilisé pour évaluer la réponse du dispositif lors de l'accumulation de particules

En injectant de façon séquentielle des particules d'alumine à l'aide d'un disperseur de poudre de type Palas RBG 1000, nous avons comparé l'accumulation de particules mesurée

avec un instrument de référence, avec le signal de MEGAPAN. L'instrument servant ici de référence est un granulomètre aérodynamique APS (TSI 3321) monté sur une canne de prélèvement située en amont du dispositif à évaluer.
Le débit est maintenu constant par un débitmètre Brooks S5850 TR. La Figure 58 représente l'épaisseur de dépôt mesurée et le nombre de particules comptées par l'APS.

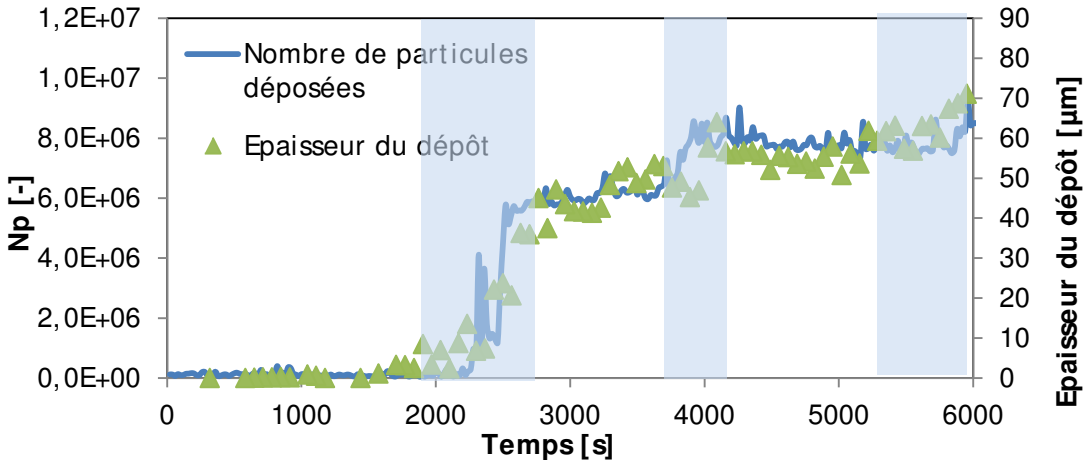


Figure 58 : Courbe d'étalonnage du dispositif expérimental, en bleu le nombre de particules comptées ; en vert, les valeurs d'épaisseur enregistrées. Les zones bleues indiquent l'instant d'injection

La mesure de porosité est alors effectuée au cours du temps en connaissant le débit massique d'aérosols déposés, la masse finale déposée ainsi que la croissance du dépôt. La synchronisation du temps d'acquisition et de la mesure d'épaisseur a été vérifiée expérimentalement par la mesure de l'épaisseur d'un dépôt de particules de porosité constante.

1.3.6. Absorbance du dépôt

Cette validation a permis de valider le principe du dispositif, toutefois, l'absorption du milieu, constante dans le cas de l'alumine (particules blanches et medium blanc), change dans le cas du carbone. Bien que la calibration statique du dispositif ait été effectuée sur une surface noire et sur une surface blanche, la question de l'évolution de ce milieu se pose.
Afin de pouvoir localiser la position du spot laser sur la surface, le programme de traitement des données effectue une somme verticale (selon y sur la Figure 59) des intensités des pixels et y identifie le maximum, dont la position est enregistrée. Cette valeur est moyennée sur un pas de temps donné (afin d'éviter les effets de « scintillement »). Cette identification, présente l'avantage de ne pas dépendre de l'intensité lumineuse transmise et surtout de permettre l'identification d'un seul point, donc de maximiser la précision de mesure.
Le nombre d'images disponibles est d'environ 30 par seconde. En isolant une image des premiers instants du colmatage (donc de la projection du pointeur sur une surface blanche) et une autre issue de la fin du colmatage (donc sur un milieu très absorbant), on peut comparer le signal reçu par MEGAPAN. La Figure 59 illustre les pics d'intensité mesurés par la caméra dans ces deux cas extrêmes, on remarque que la forme du pic reste sensiblement identique et qu'il n'y a pas d'ambiguïté possible sur la position du pointeur. Le dispositif semble donc bien adapté à la problématique pour laquelle il a été conçu.

Dans le cas de particules claires, il est possible d'effectuer le traitement en continu du fait du faible scintillement du spot et du fait de la non atténuation de l'intensité lumineuse par le dépôt.

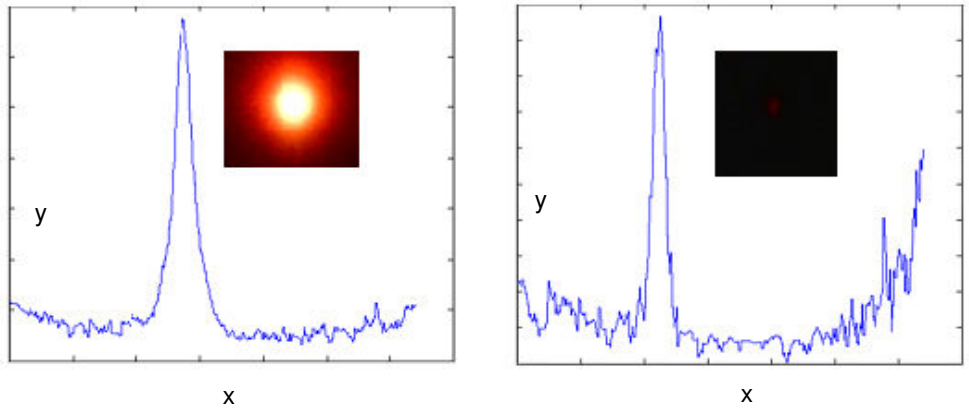


Figure 59 : Illustration du pic d'intensité en début de colmatage (a) et en fin de colmatage (b). L'image acquise par la caméra est représentée sur le graphique.

2. RESULTATS

2.1. Filtration profonde et transition / pénétration des particules

La Figure 60 représente les images effectuées au microscope électronique à balayage d'un filtre plan avant et après le début de la filtration en surface. On peut ici remarquer que les particules forment un dépôt dont la compacité semble constante. De plus, les pores superficiels se ferment de manière homogène. Enfin, lorsque les pores sont obstrués, le dépôt croît en dehors du medium. On peut donc considérer que la filtration profonde prend fin lorsque le volume vide de la première couche du medium est occupé par un dépôt dont les caractéristiques peuvent être assimilées à celle du gâteau de filtration.

Ainsi, étant donné le fait que la filtration en surface prend naissance après saturation de la première couche du medium, une corrélation entre la compacité du media, le profil de pénétration de l'aérosol au sein du medium et le point de transition doit exister.

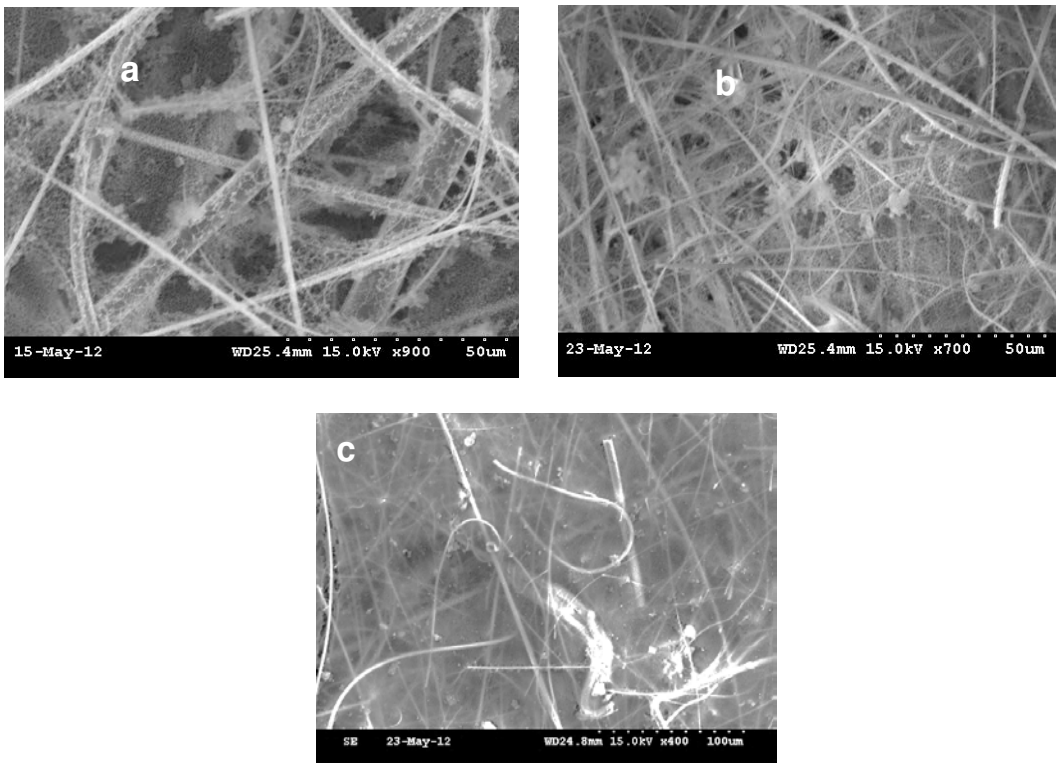


Figure 60 : Photos prises au microscope électronique à balayage de la surface d'un medium THE avant ((a) pour une masse de particules de 0,2 g/m² et (b) pour une masse de 0,6 g/m²) et après (c) le point de départ de la filtration en surface pour un filtre colmaté par des aérosols de carbone

Afin de pouvoir lier des mesures microscopiques (porosité de dépôt et profil de pénétration) à des points de colmatage, il est nécessaire d'avoir une définition satisfaisante et aisément mesurable du point de colmatage. Thomas (2001) propose une définition se basant sur l'intersection des tangentes à l'instant initial et durant la filtration profonde. Walsh (1996) propose de considérer l'intersection de la tangente durant la filtration en surface avec la droite parallèle à l'axe des abscisses. Enfin, Japuntich (1995) considère le début de la croissance linéaire de la perte de charge et c'est cette définition que nous avons choisi de retenir. Ces différentes définitions sont regroupées sur la Figure 61.

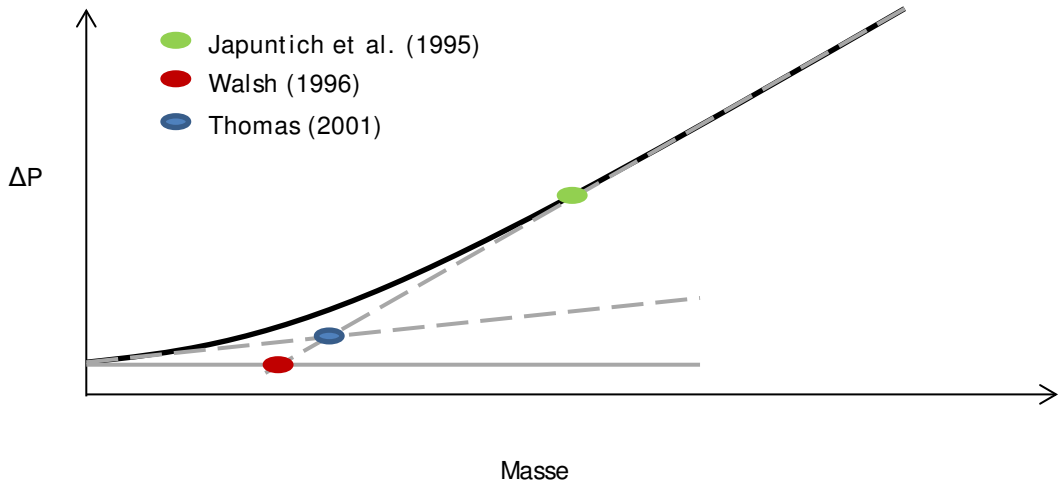


Figure 61 : Illustration des différentes définitions du point de colmatage

Pour déterminer le point de colmatage, nous utiliserons le coefficient de régression linéaire via l'expression 1-R^2 correspondant à une régression affine selon la méthode des moindres carrés, qui tend vers zéro lorsque le gâteau est formé.

De plus, dans cette partie concernant principalement la filtration profonde, l'utilisation d'un filtre HE (moins efficace) permet également d'obtenir des valeurs de concentration de particules plus importante dans le medium et des phases de filtration profonde plus longues et donc de s'affranchir autant que possible des incertitudes. En effet, plus la masse déposée est importante, plus la mesure EDX est précise.

2.1.1. Colmatage par des particules d'argent

La Figure 62 représente la perte de charge d'un filtre HE plan colmaté avec des aérosols d'argent. Comme le décrit la théorie, on distingue la filtration profonde de la filtration en surface. Les droites en pointillés montrent les tangentes décrites par les différents auteurs (Thomas et al. 2001, Japuntich et al. 1995, Walsh et al. 1996) et la courbe bleue représente le coefficient de détermination (1-R^2). En admettant 3 % d'écart[3], dus aux erreurs, on obtient un point de colmatage situé après 3 g/ m².

[3] Valeur estimée pour chaque expérience en fonction de l'écart à la linéarité observée durant la filtration en surface

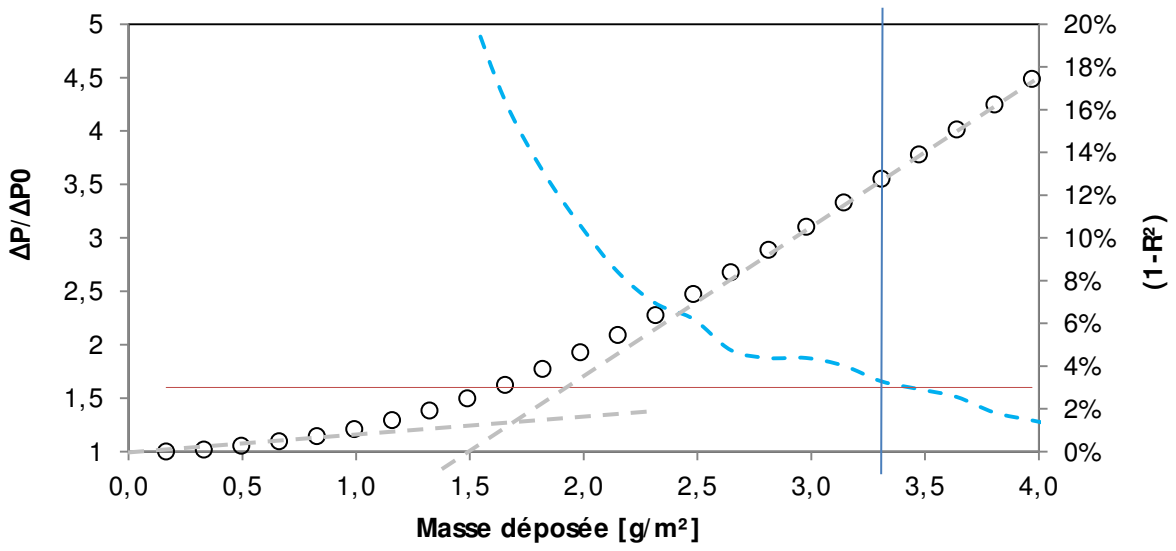


Figure 62 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse d'aérosols déposée et coefficient de détermination pour une vitesse de filtration de 2,5 cm/s

Les valeurs de pénétration des aérosols dans le medium pour ces conditions de filtration, illustrées Figure 63, montrent que l'on retrouve des aérosols jusqu'à environ 150 µm à l'intérieur du medium.

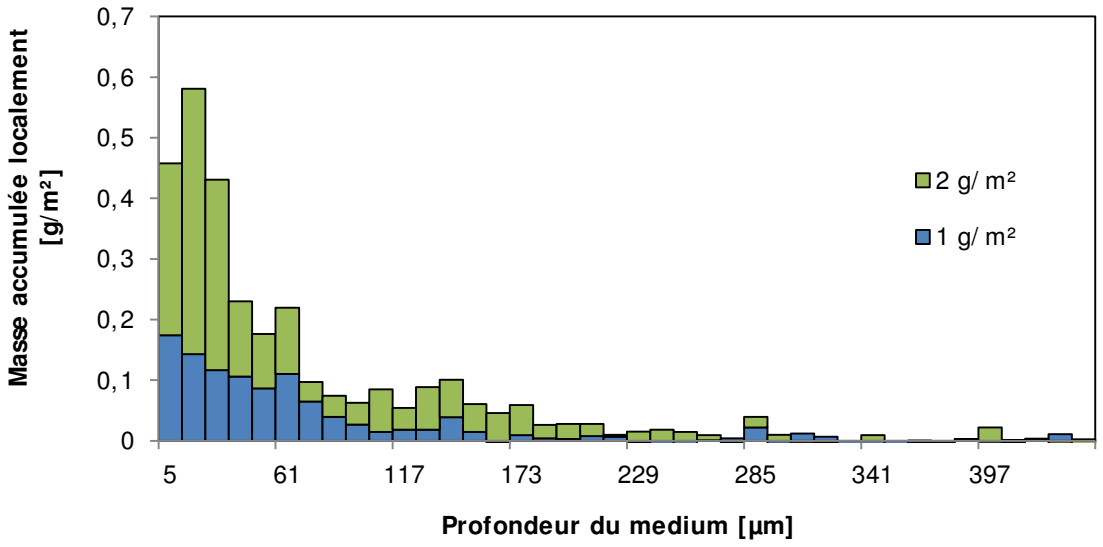


Figure 63 : Masse accumulée localement dans le medium en fonction de la profondeur

Sur cette figure, où les mesures ont été effectuées pour deux valeurs de masse durant la filtration profonde, on remarque tout d'abord que pour une masse de particules plus importante, la quantité présente en profondeur (entre 100 et 200 µm) augmente. A ce stade, la filtration profonde n'est pas achevée. Etant donné que l'efficacité du medium chargé en particules augmente, ce constat est surprenant. En effet, l'efficacité de filtration d'un medium chargé augmente, ce profil devrait donc avoir tendance à devenir plus déséquilibré.

Si l'on représente la distribution de particules présentes dans le medium (Figure 64), on observe, au vu de la dispersion des mesures, peu de différences pour les deux masses considérées. D'après ces résultats, il ne serait pas nécessaire donc de considérer le changement d'efficacité du medium colmaté et il est possible moyennant une erreur faible de considérer une valeur du coefficient de pénétration k constante (relation 20).

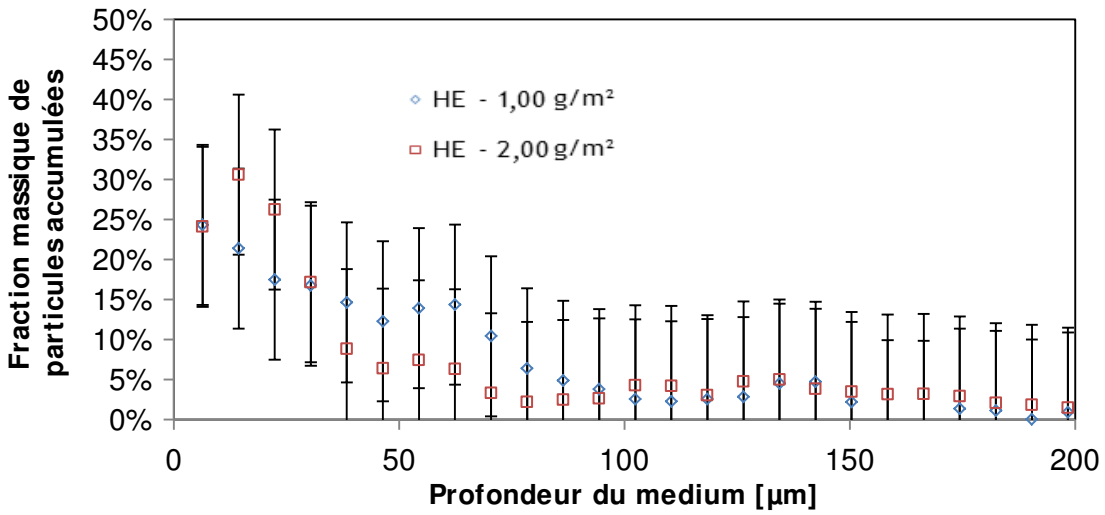


Figure 64 : Répartition des aérosols dans la profondeur du medium HE pour des aérosols d'argent

En reprenant la même démarche avec un medium THE, on obtient les données illustrées Figure 65 et Figure 66.

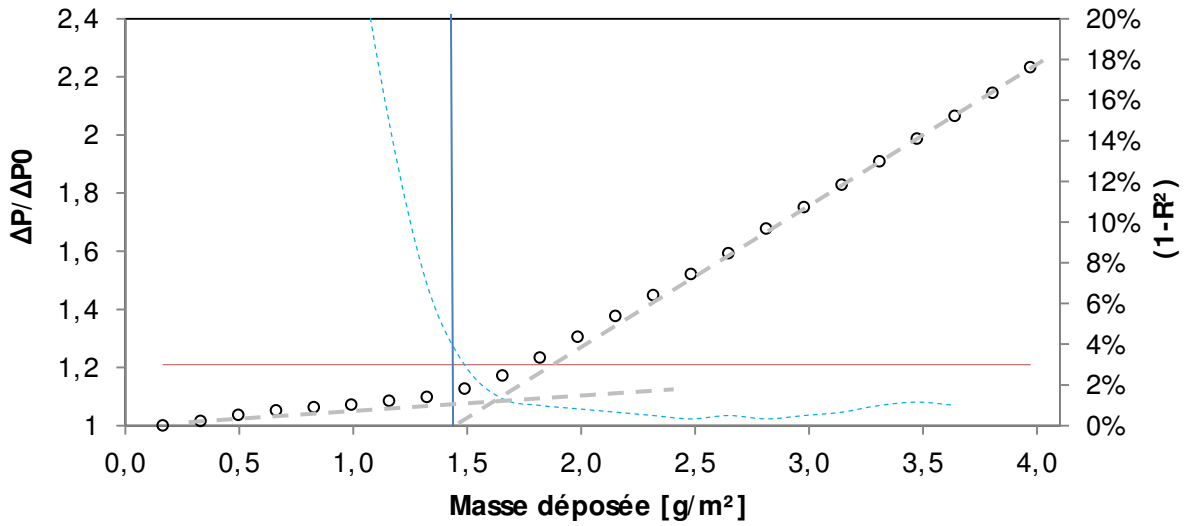


Figure 65 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse d'aérosols déposée et coefficient de détermination pour une vitesse de filtration de 2,5 cm/s.

En admettant 3 %comme valeur de 1-R², on obtient un point de colmatage situé à 1,4 g/m².

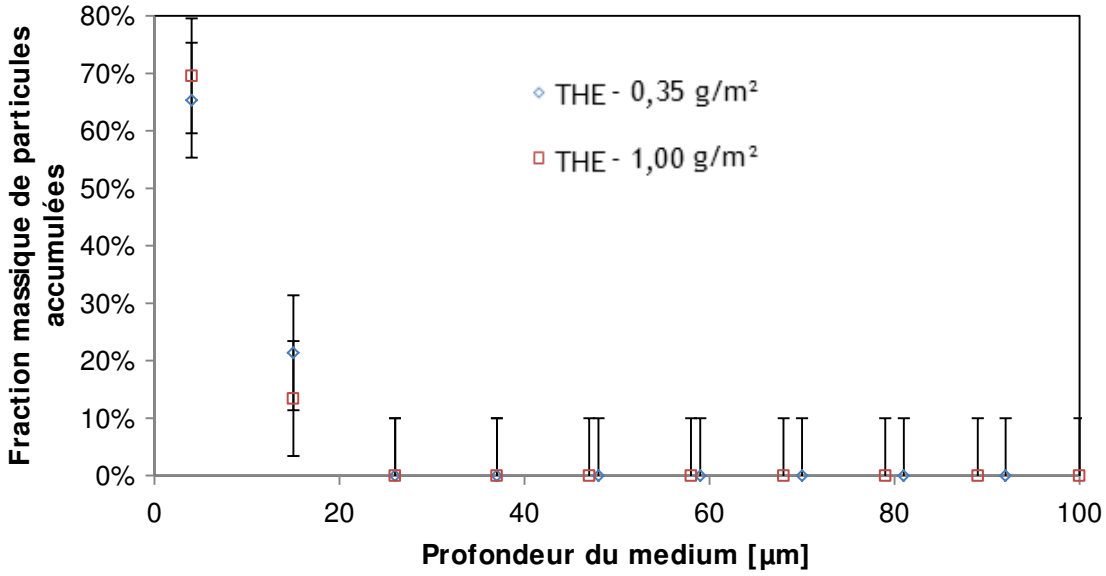


Figure 66 : Répartition des aérosols dans la profondeur du medium THE pour des aérosols d'argent

Ensuite, sans surprise, les aérosols ne pénètrent que très peu, voire pas du tout dans le medium. De plus, cette pénétration s'explique principalement par l'hétérogénéité locale des media. Les particules se retrouvent en profondeur sur des zones restreintes (Figure 67) où le medium est localement moins compact ou lorsque les fibres sont plus grosses en surface. Sur la Figure 67, une fibre d'un diamètre important est à l'origine de cette zone.

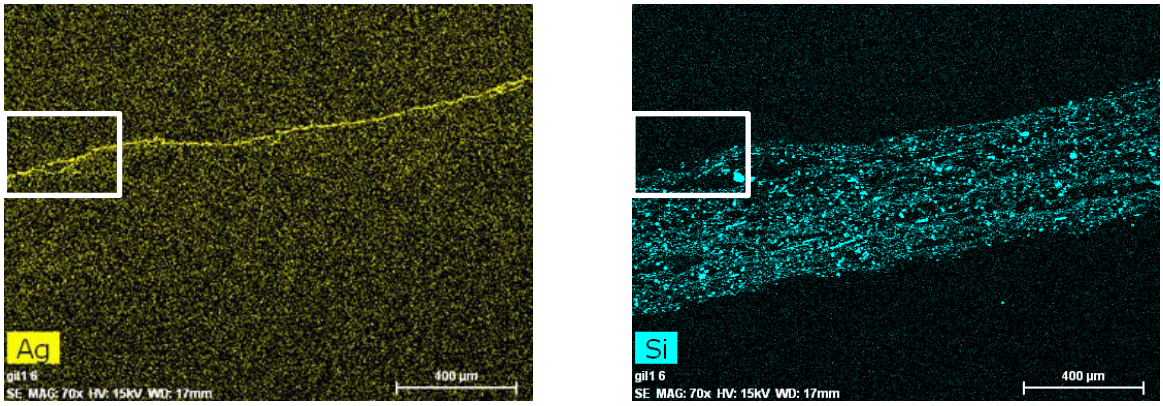


Figure 67 : Visualisation EDX d'une coupe de medium THE colmaté avec un aérosol d'argent (a, élément Ag, b, élément Si). La zone entourée sur chacune des photos illustre le fait que certaines zones sont plus perméables.

Par comparaison entre les filtres HE et THE, on observe que la pénétration des particules dans le medium semble liée à la durée de la filtration profonde. Par la suite, la faible masse accumulée au sein du medium THE nous a conduits dans les expériences suivantes (par commodité expérimentale), à focaliser notre attention sur des media HE.

2.1.2. Colmatage par des particules d'oxyde de titane

Ainsi, la même démarche a été suivie avec un aérosol d'oxyde de titane. La Figure 68 représente l'évolution de perte de charge en fonction de la masse déposée.

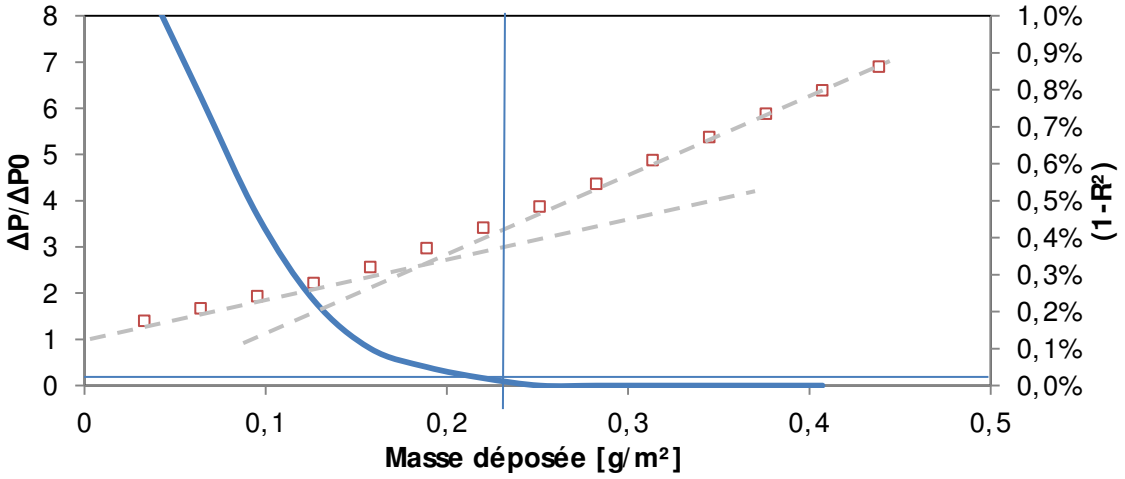


Figure 68 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse d'aérosols déposée et coefficient de détermination pour une vitesse de filtration de 2,5 cm/s

Ici, la filtration profonde s'achève pour une masse significativement plus faible, de l'ordre de 0,2 g/m² (avec 0,02 %d'écart). Même si on considère la masse volumique de l'oxyde de titane par rapport à la masse volumique de l'argent, le volume de particules atteint au point de colmatage reste cinq fois plus important pour l'aérosol d'argent. Ce rapport est à mettre en perspective avec la porosité du dépôt de particules dans le medium qui conditionnera le volume occupé pour une masse donnée de particules et avec la pénétration des particules dans le medium. La Figure 69 illustre la pénétration des particules d'oxyde de titane dans le medium HE. Au vu de la très faible masse déposée, il est difficile d'obtenir une mesure précise par détection EDX. Toutefois, on n'observe pas de très grandes différences avec le profil obtenu pour un aérosol d'argent sur ce medium.

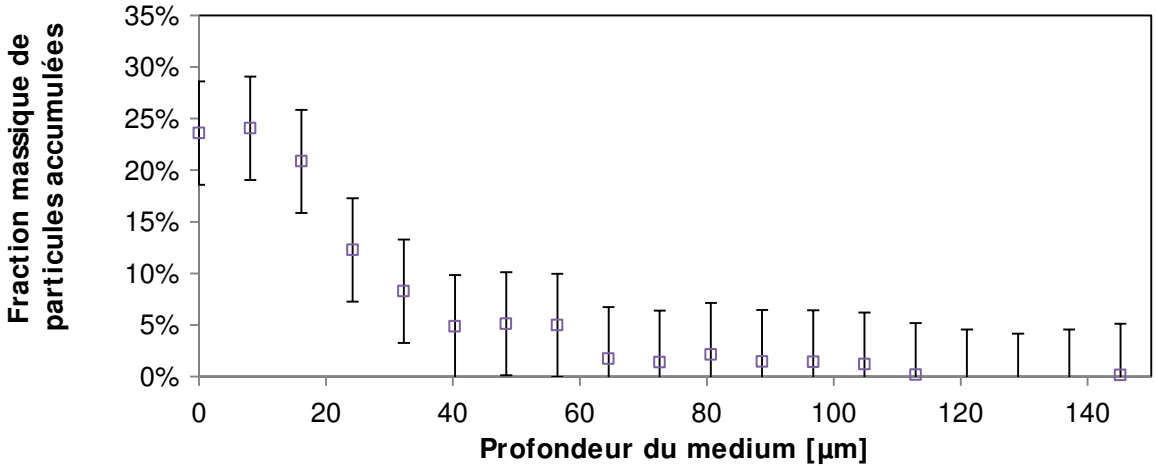


Figure 69 : Répartition de l'aérosol d'oxyde de titane pour une masse de particules collectées de 0,15 g/m² (filtre HE)

De la même manière que pour des aérosols d'argent (Figure 70), la très forte hétérogénéité du medium engendre une stratification du dépôt formé dans le medium. Pour obtenir des profils continus et ne tenant pas compte de ces effets, il est nécessaire de moyenner un grand nombre de profils.

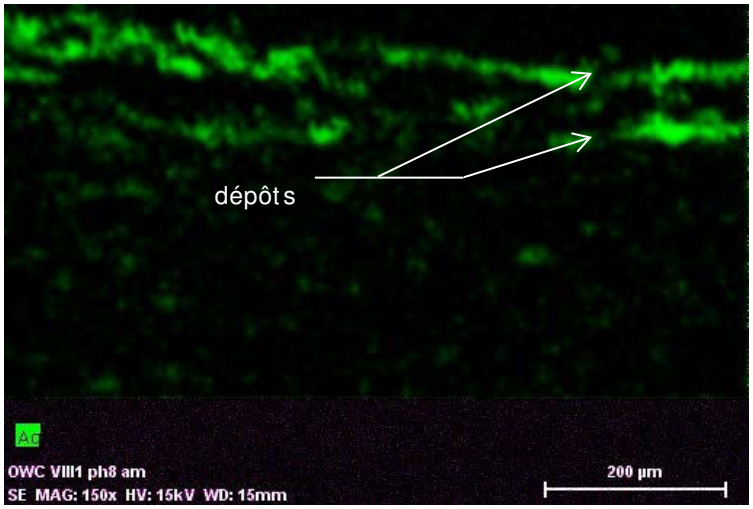


Figure 70 : Cartographie de l'élément argent sur une coupe de medium HE enrobé

2.1.3. Colmatage par des particules d'alumine

Afin d'étendre le domaine d'étude à un aérosol de plus grand diamètre, des mesures ont été conduites avec des particules d'alumine. La Figure 71 représente l'évolution de perte de charge en fonction de la masse déposée.

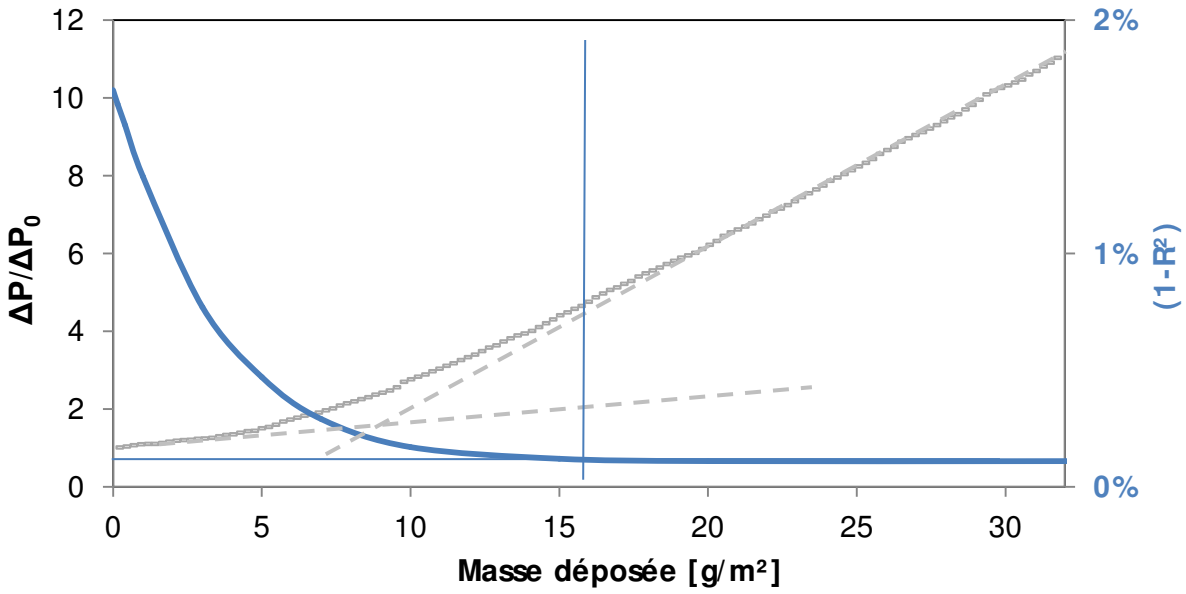


Figure 71 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse d'aérosols déposée et coefficient de détermination pour une vitesse de filtration de 0,8 cm/s

Ici le point de colmatage se situe à 16 g/m² (avec 0,2 % d'erreur). Sensiblement plus que pour les particules précédentes. Etant donné le diamètre des particules considérés et leur

masse volumique, cette valeur est cohérente, en effet, la masse d'un volume donné de dépôt sera plus importante que pour des particules nanométriques. De plus, cela peut s'expliquer par la pénétration des aérosols dans le medium qui est ici significativement plus importante que pour les particules d'argent ou de titane, en raison de l'efficacité de collecte moindre pour cette taille de particules, plus proche de la taille des particules les plus pénétrantes (MPPS). La Figure 72 illustre la pénétration des particules dans le medium pour une masse déposée de 10 g/m² durant la filtration profonde.

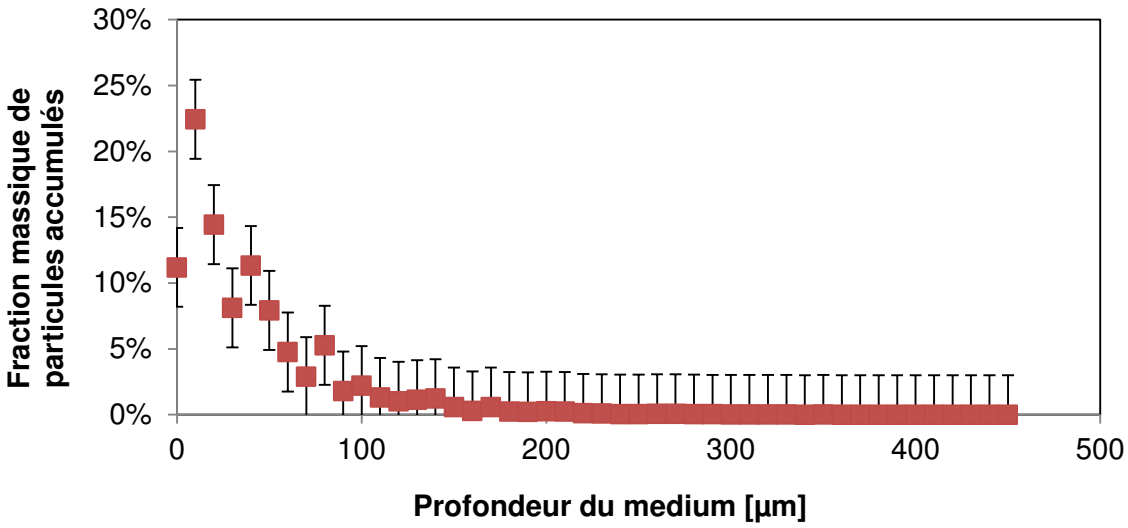


Figure 72 : Profil d'accumulation de particules d'alumine dans un medium HE à une masse de 10 g/m² et pour une vitesse de filtration de 0,8 cm/s

L'hétérogénéité du medium influence les résultats et la dispersion reste non négligeable.

2.1.4. Comparaison avec un modèle analytique d'efficacité initiale

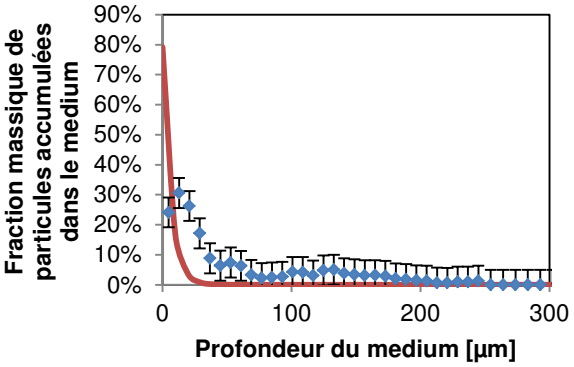
La pénétration des aérosols dans le medium dépend naturellement de l'efficacité de collecte du medium. Il existe plusieurs modèles d'efficacité basés sur l'efficacité de collecte d'une fibre. Il est donc possible calculer l'efficacité locale du medium à partir des modèles d'efficacité basés sur l'efficacité de collecte d'une fibre. Ainsi, sur la base des données regroupées dans le tableau 14, on peut calculer un profil d'accumulation en considérant le medium comme constitué d'une superposition de couches fines. Toutefois, les modèles utilisés ne tiennent pas compte de l'évolution d'efficacité des couches de medium colmatés. Cette approche, ici simplifiée en ne tenant pas compte de l'évolution d'efficacité du filtre chargé en particules a été comparée aux résultats obtenus expérimentalement.

Tableau 14 : Caractéristiques utilisées pour le calcul de pénétration des particules dans le medium

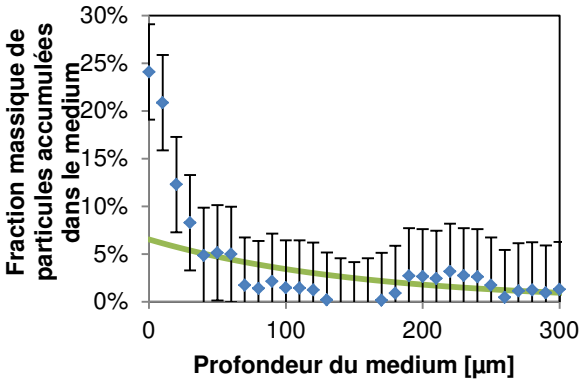
Diamètre de fibre [µm]	1,7
Compacité [-]	0,06
Epaisseur d'une couche [µm]	10
Température [K]	294,15
Constante de Boltzmann [J/K]	$1{,}38065.10^{-23}$
Libre parcours moyen λ [nm]	66

L'épaisseur d'une couche de medium a été fixée à 10 µm de manière à être nettement supérieure au diamètre d'une fibre.

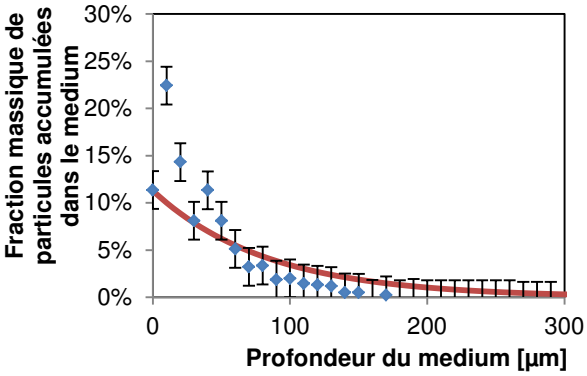
La Figure 73 illustre la comparaison entre les valeurs mesurées et calculées.



Viscosité dynamique [Pa·s]	2,25 10^{-5}
Diamètre de particule [nm]	8
Vitesse de filtration [cm/s]	2,5
Masse volumique des particules [kg/m³]	10490



Viscosité dynamique [Pa·s]	2,25 10^{-5}
Diamètre de particule [nm]	70
Vitesse de filtration [cm/s]	2,5
Masse volumique des particules [kg/m³]	4300



Viscosité dynamique [Pa·s]	1,85 10^{-5}
Diamètre de particule [nm]	250
Vitesse de filtration [cm/s]	0,8
Masse volumique des particules [kg/m³]	3970

Figure 73 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues en appliquant des modèles d'efficacité sur des tranches de medium de 10 µm d'épaisseur avec les paramètres regroupés à droite. (a) particules d'argent (b) particules d'oxyde de titane et (c) alumine

Le profil de pénétration de l'aérosol dans le medium est une caractéristique influente de l'interaction entre le medium et les particules. Certains auteurs en ont déjà déterminé

l'influence lors de la filtration (Thomas et al. 1999). Dans cette partie, les modèles utilisés sont :

- le modèle de Kuwabara (1959) pour le calcul du facteur hydrodynamique,
- les modèles de Stechkina et al. (1966) pour les efficacités de collecte unitaire.

Les comparaisons présentées ici montrent que les profils d'accumulation calculés sur la base d'efficacité initiale de collecte (pour des filtres vierges) ne sont pas en accord avec les valeurs mesurées, bien que la forme des profils soit proche des valeurs expérimentales. Cela peut s'expliquer de différentes manières. Tout d'abord, dans le cas des particules d'argent, ou le calcul sous-estime les pénétrations des aérosols, nous avons remarqué sur les cartographies EDX que certaines zones concentrent des particules en profondeur du medium. Dans ces zones, la masse de particules accumulée se trouve être importante et influence le profil moyen d'accumulation, ici représenté. De plus, la faible masse d'aérosols accumulée rend la détection EDX difficile. Pour les aérosols présentant un diamètre plus important, on peut penser que l'augmentation d'efficacité de collecte du medium chargé a significativement influencé l'accumulation des particules dans le medium, en outre le modèle d'efficacité utilisé ne tient pas compte des effets électrostatiques dont l'influence sur l'efficacité est probablement significative. Enfin, le léger gradient de compacité du medium (Figure 33) peut influencer la pénétration. Dans cette partie, les modèles d'efficacité de collecte n'ont pas été comparés, la polydispersion des fibres et des particules n'a pas été prise en compte. Une approche numérique permettrait de s'affranchir de la mesure pour déterminer le profil de pénétration de l'aérosol dans le medium (Gervais et al. 2014).

Ces résultats nécessitent d'être approfondis mais cela relève plutôt de la problématique de l'efficacité de collecte plutôt que du colmatage.

2.2. Filtration en surface et porosité des dépôts

Dans le cas des particules de faible diamètre et des faibles vitesses de filtration, l'accumulation des particules sur les fibres se fait de manière homogène (Kanoaka et al. 1998) (Figure 11). La porosité des dépôts formés sur les fibres peut être considérée identique à celle du dépôt formé à la surface du filtre. Ainsi, les valeurs de porosité mesurées dans cette partie ne sont pas considérées comme propres à caractériser la filtration en surface.

Pour des raisons pratiques, nous nous sommes concentrés sur des particules d'alumine et de carbone. Pour un aérosol donné, le paramètre qui varie dans un processus de filtration est la vitesse. Nous avons donc mesuré la porosité des dépôts dans la gamme de vitesse rencontrée lors de l'utilisation des filtres industriels.

2.2.1. Aérosol de carbone

MEGAPAN a été développé pour la mesure de dépôts de particules nanostructurées, en premier lieu pour les particules de carbone. Différents aérosols nanométriques métalliques ont également été testés mais la pénétration du faisceau laser dans le dépôt fausse la mesure. La Figure 74 représente les mesures issues de la dérive du faisceau et la pente de la droite associée.

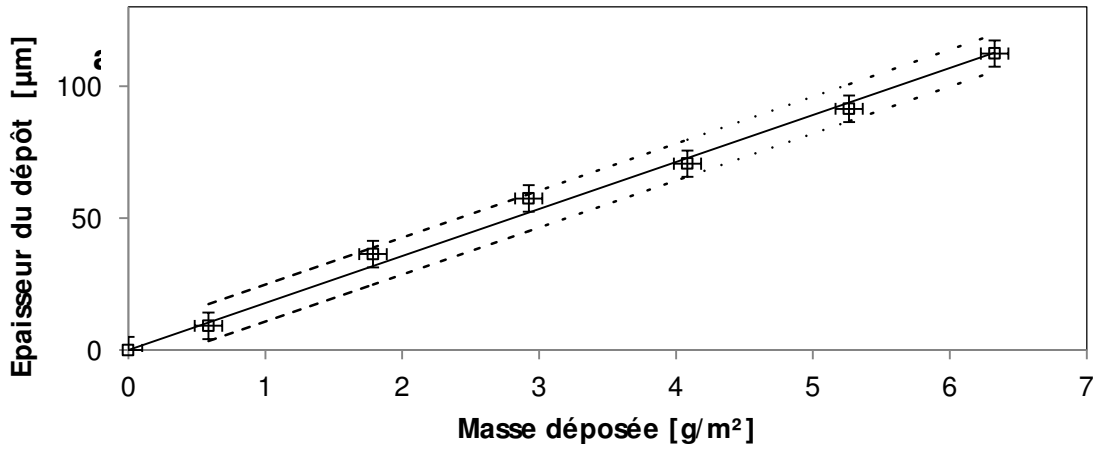


Figure 74 : Epaisseur du dépôt de particules de carbone en fonction de la masse déposée, mesurée par MEGAPAN à une vitesse de 0,8 cm/s

Dans son étude sur la porosité des dépôts d'agrégats, Mädler et al. (2006) met en évidence, par le calcul, le rôle du nombre de Peclet sur la porosité des dépôts d'agrégats. Plus récemment, Thomas et al. (2014), montre également une corrélation entre le nombre de Peclet et la valeur de porosité des dépôts de différents types d'agrégats. Dans un premier temps, nous avons donc balayé plusieurs vitesses de filtration. Ces points ont été acquis à partir de particules de carbone issues d'un générateur Palas GFG 1000 sans air de dilution et avec 1 bar d'argon, afin de maximiser la concentration d'aérosols. Les résultats obtenus présentent une forme inattendue avec la présence d'un minium pour une vitesse de 3 cm/s (Figure 75), que nous pouvons attribuer au très grand nombre de particules primaires composant l'agrégat (environ 1000 dans notre cas et au maximum 300 dans les résultats présents dans la littérature (Thomas et al. 2014)). Ce postulat nécessite, néanmoins, de réaliser des travaux plus approfondis, qui n'ont pas pu être réalisés dans le cadre de cette étude.

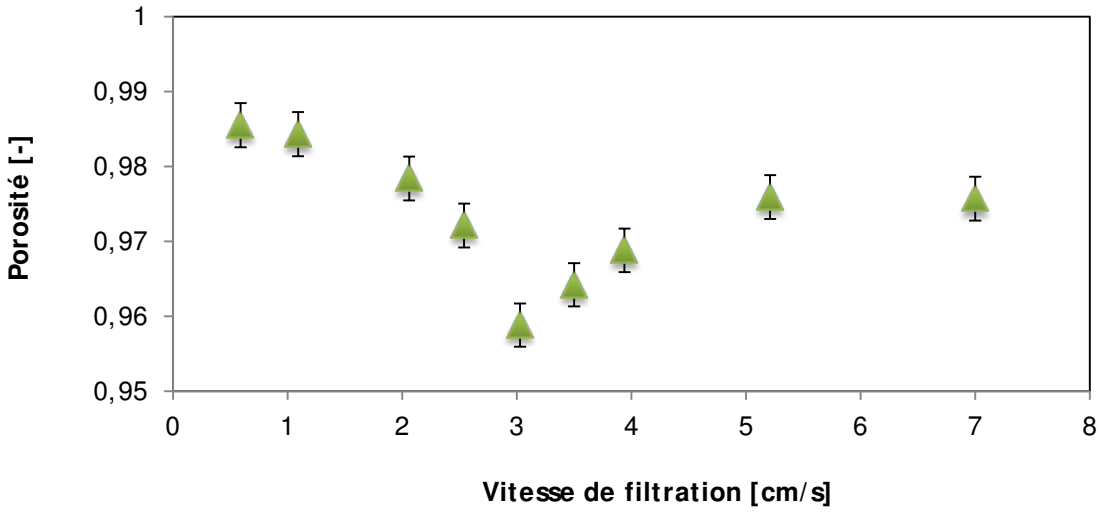


Figure 75 : Porosité des dépôts d'agrégat de carbone générés grâce au générateurs Palas GFG 1000 par le dispositif MEGAPAN

La grandeur qui nous intéresse *in fine* est ici la perte de charge. Pour des particules pseudo fractales, nous avons repris les deux relations principales présentes dans la littérature, le modèle de Kozeny-Novick (Novick et al. 1992) et celui de Thomas et al. (2014). Afin de simplifier ce dernier, nous ne tiendrons pas compte du coefficient de recouvrement étant donné que dans le cas présent, celui-ci est faible. Nous comparerons ici uniquement les résistances spécifiques théoriques K_c des dépôts. Ces résistances spécifiques sont calculées avec les valeurs de porosité mesurées par MEGAPAN par les expressions [38] et [40] respectivement pour le modèle de Kozeny-Novick et de Thomas et al. (2014) :

$$K_c = \frac{h_k.a_g^2.\alpha_g.\mu}{(1-\alpha_g)^3.\rho_p.Cu} \quad [38]$$

avec h_k la constante de Kozeny (selon Chen (1982)) qui vaut :

$$h_k = 4{,}7 + e^{(14.(\varepsilon-0.8))} \quad [39]$$

$$K_c = \frac{64\ \alpha_g{}^{0.5}\ \mu\left(1+56\ \alpha_g{}^3\right)}{Cu\ \ D_{pp}^2\ \rho_P} \quad [40]$$

Ces résultats sont ensuite comparés aux valeurs calculées, en utilisant la relation [41], à partir des données expérimentales de colmatage mesurées à différentes vitesses dans MEGAPAN (perte de charge et masse) :

$$K_c = \frac{S.\Delta Pg}{Vf.m} \quad [41]$$

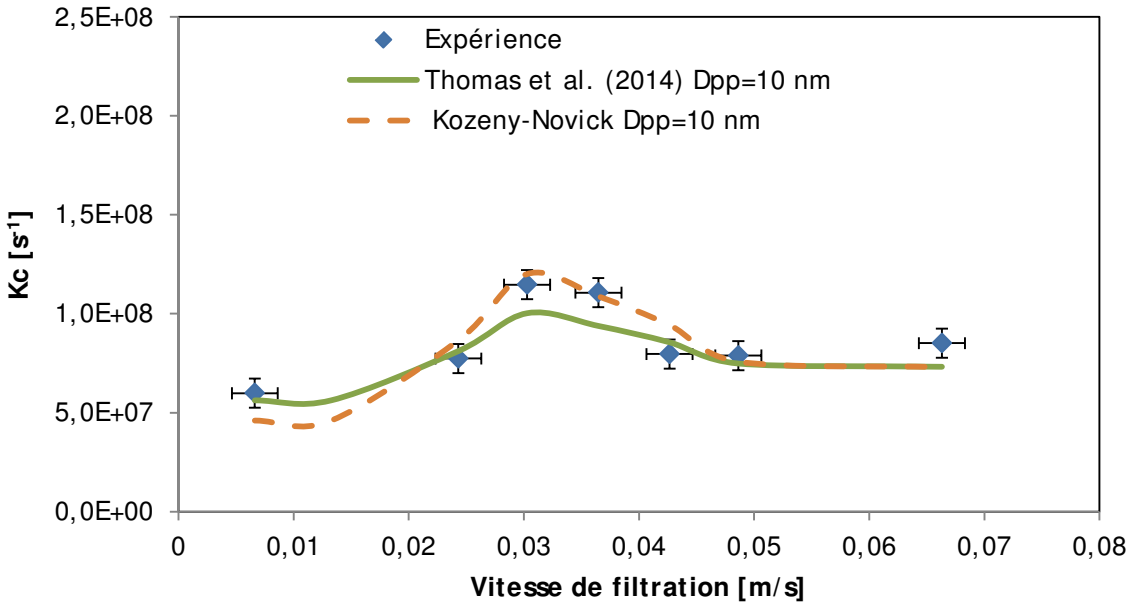


Figure 76 : Valeurs de résistance spécifique des dépôts de carbone accumulés à différentes vitesses de filtration et comparaison avec les valeurs issues des modèles de Kozeny-Novick et Thomas et al. (2014)

Les valeurs de résistance spécifique associées aux valeurs de porosité confirment la tendance observée par MEGAPAN (Figure 76). Ainsi, deux grandeurs mesurées séparément (perte de charge et porosité) confirment la présence d'un minimum de porosité. De plus, ces résultats présentent un bon accord avec les deux modèles pour des particules primaires d'un diamètre de 10 nm. Pour des vitesses de filtration faibles (inférieures à 2,5 cm/s) ou fortes (supérieures à 4 cm/s) le modèle de Thomas et al. (2014) présente un meilleur accord avec l'expérience. Entre 2,5 et 4 cm/s, le modèle de Kozeny-Novick rend mieux compte de la résistance du dépôt. La Figure 77 représente les mêmes points expérimentaux en fonction de la porosité des dépôts. Sur ce graphique, on constate un meilleur accord avec l'expérience du modèle de Thomas et al. (2014) pour des porosités fortes.

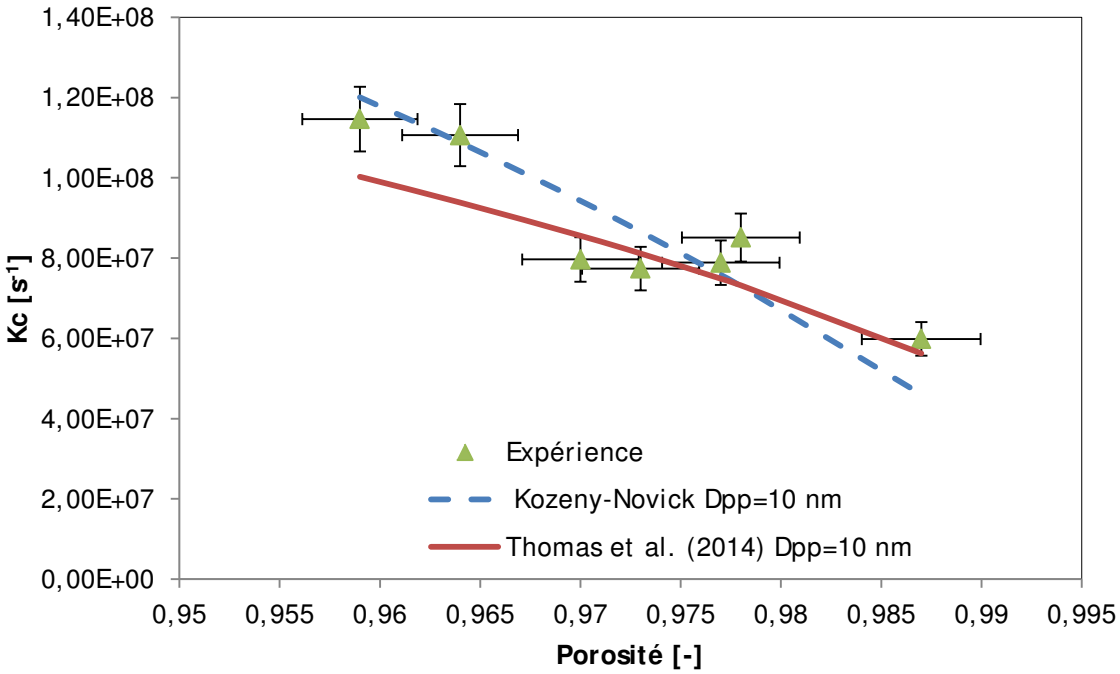


Figure 77 : Résistance spécifique K_c des dépôts mesurés et calculés à partir de modèles de perte de charge pour des particules primaires de 10 nm

2.2.2. Aérosol d'alumine

Plusieurs travaux sont disponibles dans la littérature sur les dépôts d'aérosols pseudo-sphériques. Les nombreuses méthodes de caractérisation utilisées par les auteurs rendent parfois difficile la comparaison. A titre d'exemple, Hettkamp et al. (2011) a utilisé la méthode d'analyse d'image développée par Schmidt et al. (1990). Joubert (2009) a utilisé l'interférométrie pour mesurer l'épaisseur et, à partir de la masse, remonter à une valeur de porosité. Tous ces auteurs n'ont pas noté d'influence de la vitesse de filtration sur la porosité des dépôts. Pour des aérosols d'alumine, nous avons effectué des mesures de porosité de dépôt en utilisant MEGAPAN. Ces mesures ont été faites pour quatre vitesses de filtration. De la même manière que précédemment, la donnée acquise, en plus de la masse, est le taux de croissance (relation [37]).

Contrairement au cas des dépôts de carbone, du fait de dépôts plus épais et de masses accumulées plus importantes, la résolution de mesure permet le calcul de valeurs

instantanées de porosité. Pour ces valeurs de porosité, on observe que dans les premiers instants, la porosité est proche de 1 puis se stabilise autour d'une valeur stable dépendant de la vitesse de filtration (exemple à 0,8 cm/s Figure 78). Ce constat a été fait par d'autres auteurs lors de la compression du dépôt (Schmidt 1995), ce qui n'est ici pas le cas.

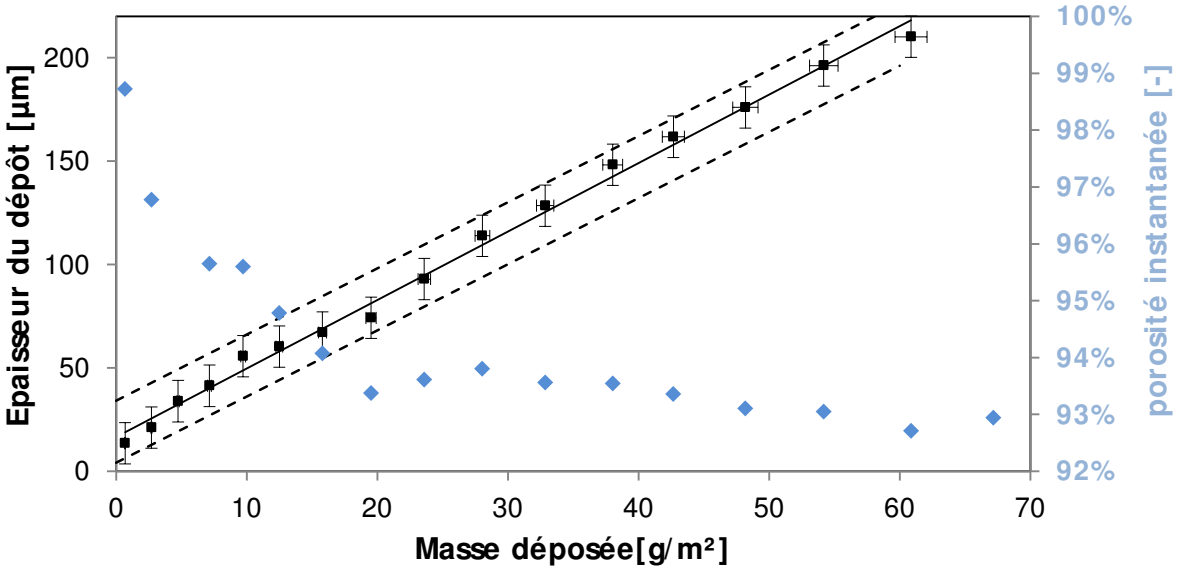


Figure 78 : Croissance du dépôt d'alumine pour une vitesse de filtration de 0,8 cm/s et porosité instantanée associée

Cela peut s'expliquer par le fait que la perméabilité des membranes utilisées n'est pas homogène sur la surface et qu'avant de s'équilibrer, les dépôts initiaux se forment de façon hétérogène (Figure 79).

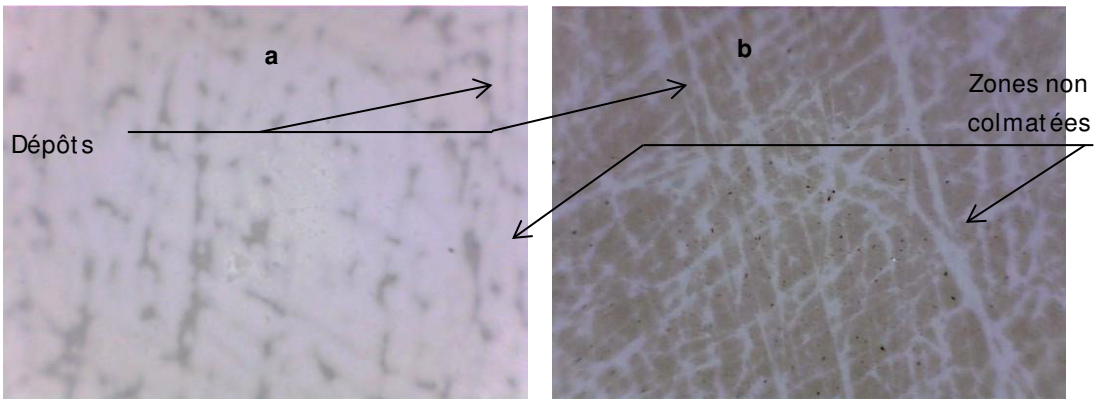


Figure 79 : Illustration de la formation du dépôt dans les premiers instants du colmatage pour des particules d'alumine à 7,3 g/m² (a) et de carbone à moins de 0,1 g/m² (b). Les zones pointées par les flèches ne sont pas chargées en particules

Ce constat conduit à ne prendre en compte que les points acquis après la stabilisation, ceci afin de s'affranchir, autant que faire se peut, des influences du support. Les porosités de dépôts formés à trois vitesses de filtration ont été mesurées et comparées à des valeurs de porosité issues de la littérature (tableau 15). Pour les diamètres de particules considérées dans cette partie, l'inertie est un mécanisme non négligeable. Le nombre de Stokes représente le rapport entre l'énergie cinétique du fluide et l'énergie dissipée par le

déplacement du fluide. C'est un nombre utilisé pour caractériser le comportement d'une particule face à un obstacle. Dans le cas présent, on peut considérer que l'accumulation des particules dépend de la dimension des structures sur lesquelles elles se déposent, donc du diamètre des particules déposées. Ainsi, la Figure 80 représente les valeurs de porosité en fonction du nombre de Stokes. Celui-ci est calculé à partir des vitesses de filtration et en prenant le diamètre d'une particule comme longueur caractéristique selon la relation [42] :

$$Stk = \frac{\rho \cdot Dp \cdot V_f}{18 \cdot \mu} \qquad [42]$$

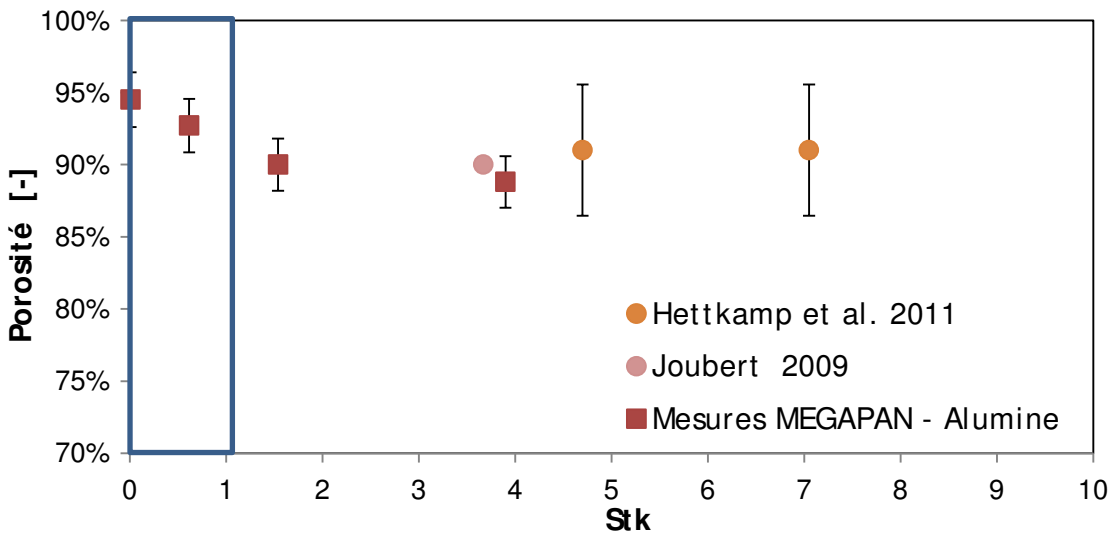


Figure 80 : Valeurs de porosité issues de la littérature en fonction du nombre de Stokes. Encadré en bleu, le domaine d'utilisation d'un filtre THE avec les particules d'alumine utilisées dans cette étude.

Tableau 15 : Valeurs de porosité mesurées et issues de la littérature et conditions opératoires associées

	Vitesse de filtration [cm/s]	Diamètre [nm]	Porosité [-]	Pe	Stk
Mesures MEGAPAN - Alumine	5	250	0,89	257	3,9
	2	250	0,89	102	1,54
	0,8	250	0,927	41	0,62
	0,16	250	0,945	0,8	0,01
Oxyde de titane (pseudo sphérique) (Hettkamp 2011)	4	500	0,91	416	4,7
	6	500	0,91	629	7
	10	500	0,91	1048	11,7
Alumine (Joubert 2009)	7	400	0,9	469	3,6

On observe sur la Figure 80 et dans le tableau 15, pour des aérosols de taille comparable (entre 250 et 500 nm) une influence de la vitesse de filtration avec un seuil de porosité autour de 90 %. Les valeurs mesurées, ici exprimées en fonction du nombre de Stokes, montrent une compacité qui, pour les aérosols d'alumine considérés, oscille entre 94 % et 89 %. Toutefois les points recensés ne sont pas dans la même gamme de nombre de Stokes et de Peclet et ne permettent donc pas de comparaison directe.

On observe que la porosité des dépôts est constante pour une masse accumulée de 20 g/m² (Figure 78). Ces constats conduisent à penser que, dans la gamme granulométrique investiguée, le changement de porosité n'est pas dû à l'adhésion des particules (qui engendre une compression du gâteau) mais à leur transport.

La porosité des dépôts formés va conditionner la perte de charge du filtre plan mais également conditionner le volume occupé par le dépôt. En effet, dans les conditions expérimentales considérées, le volume d'un dépôt d'une masse donnée d'aérosols peut varier d'un facteur 2 (la compacité du dépôt varie entre 0,11 et 0,055).

3. COMPORTEMENT DES FILTRES PLISSES VIS-A-VIS DES PARTICULES NANOMETRIQUES

3.1. Matériel et méthodes

Aujourd'hui, peu de travaux expérimentaux traitant le colmatage des filtres plissés par un aérosol nanométrique sont disponibles. Pour ces particules, les données acquises sur filtre plan peuvent être directement extrapolées au cas des filtres plissés, si l'accumulation des particules se fait de manière homogène sur le medium plissé. Un des phénomènes susceptibles d'engendrer un dépôt hétérogène est la diffusion brownienne de l'aérosol dans le pli. L'Annexe II présente des calculs de dépôt effectués à partir de différents modèles de diffusion entre deux plaques parallèles. D'après ces calculs, si certains modèles prédisent l'absence de dépôts préférentiels, d'autres peuvent le laisser supposer.

Compte tenu du faible débit d'aérosol que produit le générateur Palas GFG 1000, nous avons utilisé un autre moyen de génération. Un banc d'essai, développé par l'INRS (Institut National de Recherche et Sécurité) et dédié à l'étude des fumées émises lors des processus de métallisation, permet la production en grandes quantités d'aérosols nanostructurés et offre donc la possibilité de colmater des filtres plissés jusqu'à des valeurs élevées de perte de charge.

Néanmoins, étant donné la très forte résistance spécifique d'un dépôt de particules nanométriques, il n'est pas possible d'atteindre un volume de dépôt suffisant pour observer une répartition non homogène au sein du pli ayant un impact sur les valeurs de perte de charge avant d'atteindre les valeurs limites d'utilisation des filtres. Ainsi, en plus du suivi de la perte de charge, nous avons eu recours à la même méthode d'observation que pour des filtres plans (échantillon stabilisé et observation MEB/EDX, Cf. III.1.2). De cette manière, nous avons mesuré la masse de particules accumulée à différentes profondeurs de pli, au sein et à la surface du medium. Nous avons donc eu recours à des aérosols métalliques afin de pouvoir appliquer ces mêmes moyens de mesure.

Sur l'installation de l'INRS, nous avons implémenté un dispositif permettant le colmatage d'un filtre plan et d'un filtre plissé dans les mêmes conditions. Le schéma de fonctionnement est présenté Figure 81. Dans chacune des deux lignes, le débit est régulé afin de contrôler la vitesse de filtration : le débit est maintenu constant dans la veine de colmatage du filtre plan par un débitmètre massique régulé (Brooks S 5850) et étant donné le débit de fonctionnement beaucoup plus important dans le filtre plissé, le système de régulation de cette ligne a été conçu à partir d'un débitmètre volumique à diaphragme, placé en amont du filtre (à pression et température constantes). La régulation est assurée par une vanne électropneumatique contrôlée par un système de régulation programmé sous Labview©. Les constantes du système de régulation ont été déterminées expérimentalement en amont pour être adaptées au colmatage dans les conditions souhaitées.

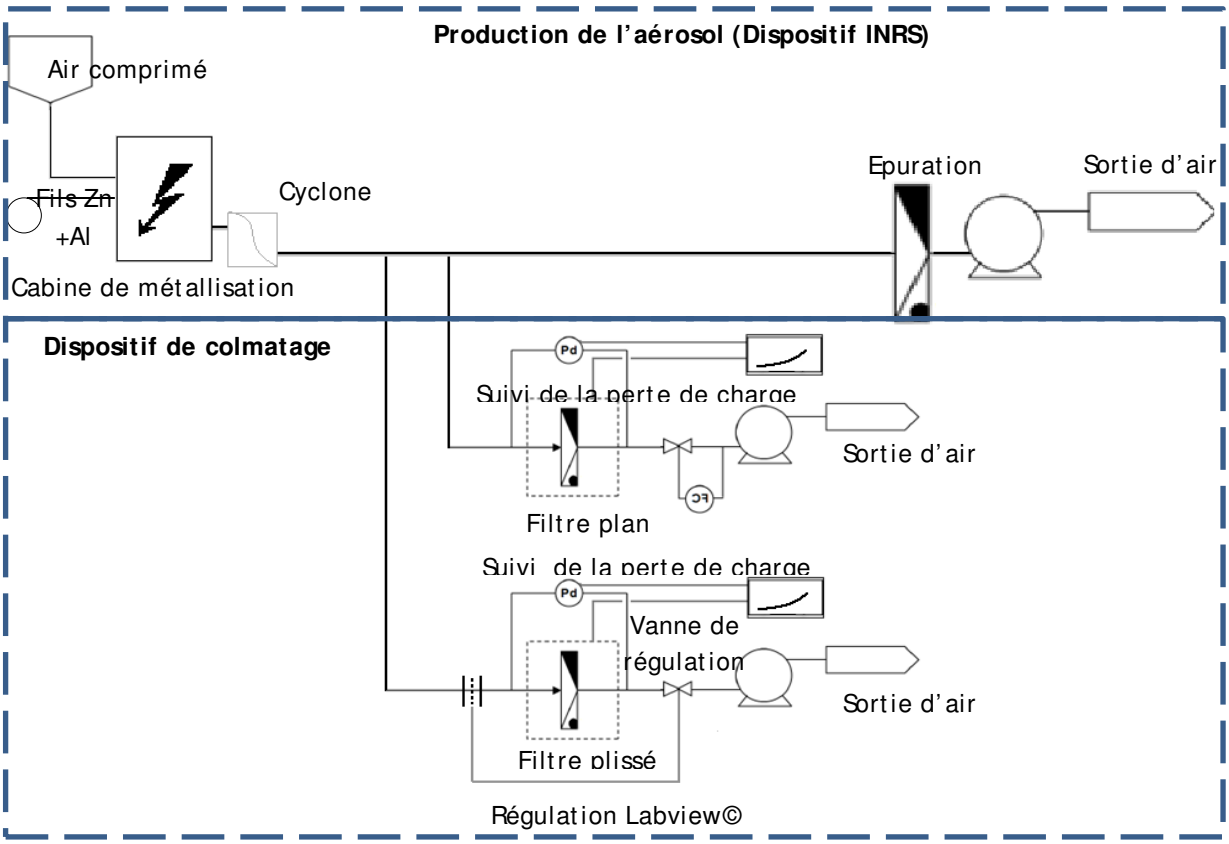


Figure 81 : Schéma de fonctionnement du banc de colmatage de filtres plans et plissés par des aérosols issus d'un processus de métallisation

Une fois les données de colmatage acquises, les masses locales de particules accumulées dans et sur le medium ont été mesurées pour différentes profondeurs dans le pli (à la surface et au sein du medium) en utilisant un medium plissé enrobé. La répartition de particules a été mesurée par EDX, et les masses accumulées dans le medium ont été comparées aux valeurs mesurées sur filtre plan (Bourrous et al. 2014).

3.2. Résultats

Pour valider une absence d'accumulation préférentielle dans un filtre plissé, la démarche expérimentale choisie est basée sur la mesure de perte de charge et sur la méthode de détection EDX présentée précédemment.

Dans un premier temps, un filtre plissé et un filtre plan ont été colmatés en parallèle à la vitesse nominale et à une vitesse de filtration très faible (0,2 cm/s). Durant le colmatage, les évolutions de perte de charge ont été mesurées en continu et comparées. Après stabilisation, un pli entier a été enrobé. Enfin, pour différentes zones d'intérêt, la masse accumulée localement a été mesurée (Cf. III.1.2).

La Figure 82 représente les pertes de charges mesurées à la vitesse nominale et pour un dixième de cette vitesse pour un filtre plan et un filtre plissé. On constate que même pour des pertes de charges importantes, l'évolution de perte de charge du filtre plissé reste linéaire, ce qui ne correspond pas à la « réduction de surface » décrite notamment par Mocho et Ouf (2011) pour des aérosols de combustion.

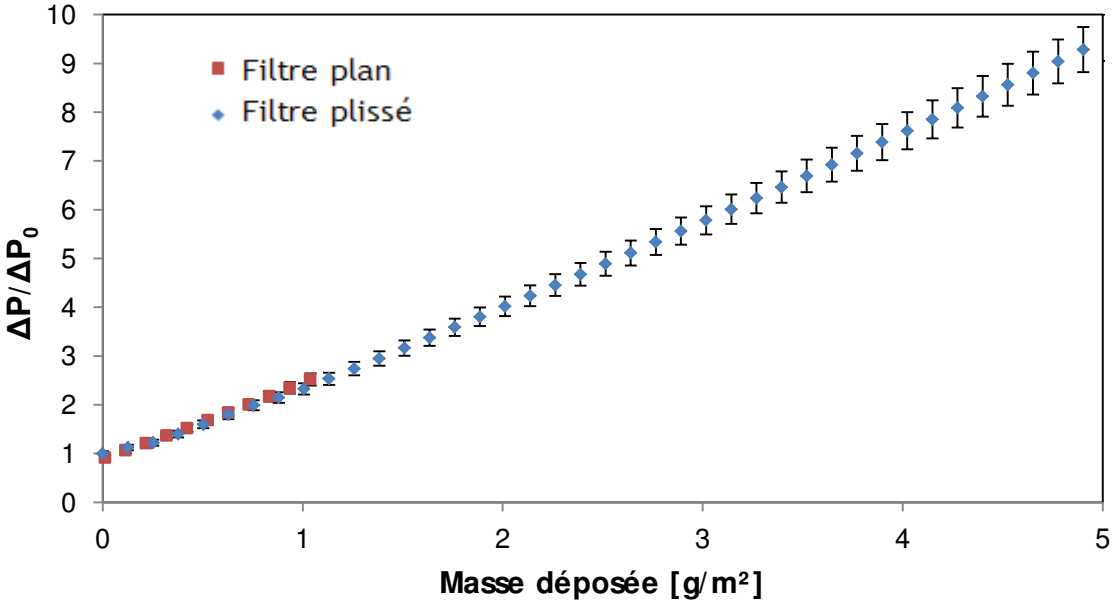


Figure 82 : Comparaison des évolutions de perte de charge pour des filtres plans et plissés colmatés dans les mêmes conditions à un dixième de la vitesse nominale de filtration

Toutefois, ce constat n'exclut pas une accumulation préférentielle en entrée de pli. Il se peut que, même si le dépôt formé n'atteint pas une épaisseur suffisante pour avoir une influence sur la perte de charge, celui-ci ne se forme pas de manière homogène sur la totalité du pli.

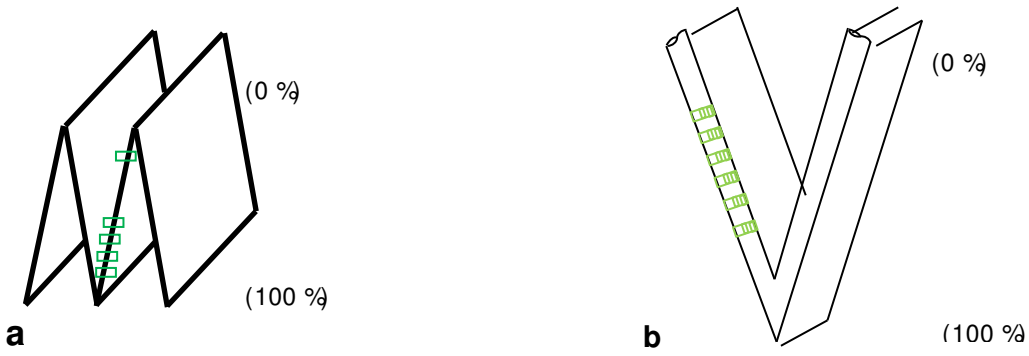


Figure 83 : Zones mesurées dans le pli (a) et au sein du medium dans le pli (b)

La Figure 83 représente les zones de mesures considérées dans un pli. Dans un premier temps, pour s'assurer du comportement identique des filtres plans et des filtres plissés à tout instant de la filtration, le profil d'accumulation moyen des aérosols dans les media plan et plissé a été mesuré (Figure 83-b). La Figure 84 représente le profil d'accumulation moyen des aérosols de zinc-aluminium dans un medium plissé et un medium plan, ces profils sont très proches. De même (Figure 85) si l'on observe à des profondeurs de 5 µm et 15 µm dans le medium, la fraction d'aérosols déposés, il n'apparait pas de différence significative le long du pli.

Ces résultats montrent que le plissage du medium n'influence pas la phase de filtration profonde et nous conforte dans notre hypothèse d'extrapoler le comportement des filtres plans aux filtres plissés pour cette première phase de filtration.

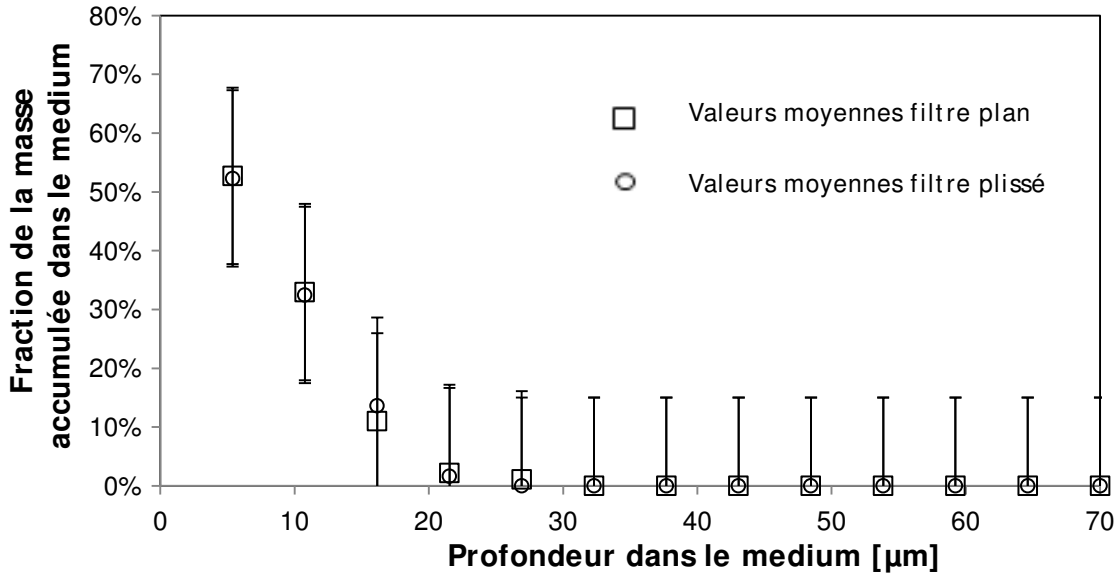


Figure 84 : Répartition dans le medium des particules de Zn/Al pour des filtres plan et plissé

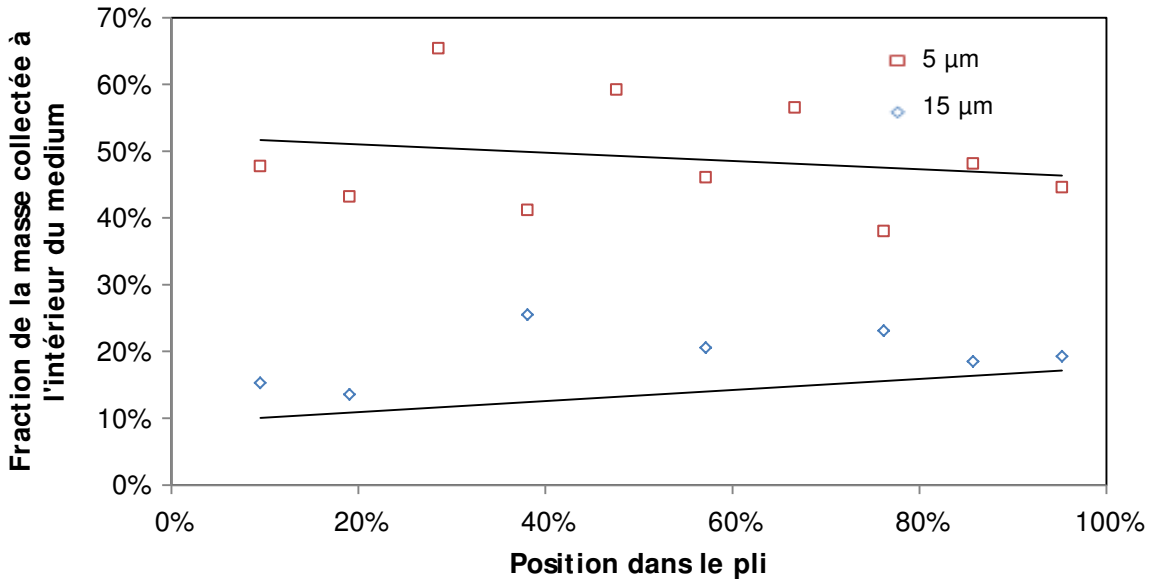


Figure 85 : Répartition des aérosols de Zn/ Al dans le pli à 5 µm et 15 µm de profondeur dans le medium plissé

Par la suite, une mesure à différentes profondeurs du pli a été effectuée pour des zones de mesure incluant la surface du medium (Figure 83-a). La masse accumulée à différentes profondeurs de pli pour deux masses différentes à 0,2 cm/s, représentée Figure 86 ne montre pas de différence significative. Le fond de pli présente ici une légère différence de chargement sur ces deux graphiques, qui provient du fait que, dans cette zone, se rejoignent les dépôts formés sur les faces opposées du pli.

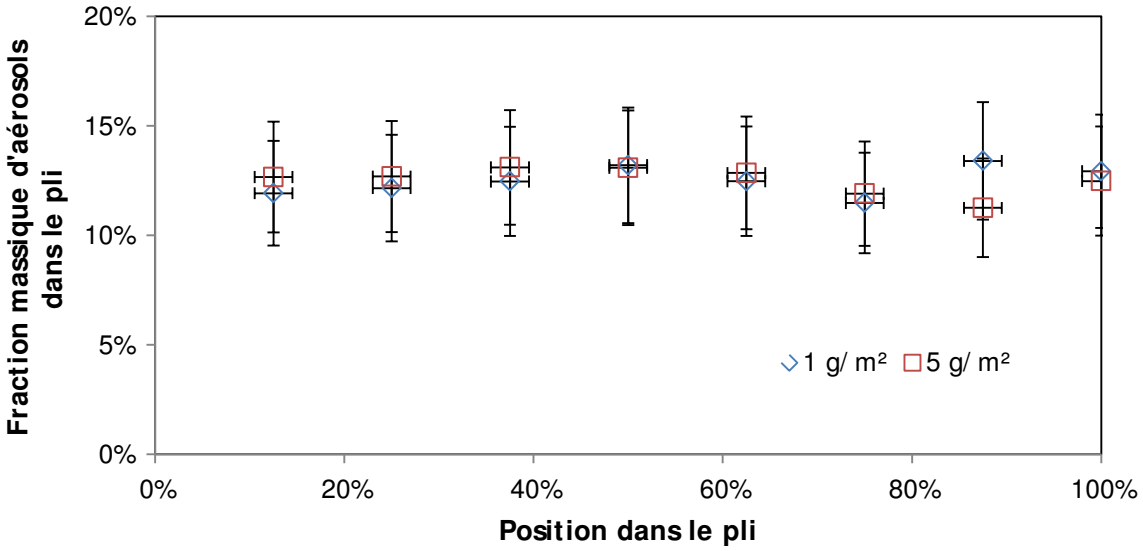


Figure 86 : Répartition des particules de Zn/ Al dans un pli

Ces observations sont valables pour des vitesses de filtration très faibles (0,2 cm/s), elles permettent de conclure sur le fait que, pour des aérosols ultrafins, aucune influence de la diffusion de l'aérosol dans le pli n'est observable pour les masses considérées. Etant donné les très fortes valeurs de perte de charge atteintes (jusqu'à quinze fois la perte de charge

initiale), on peut affirmer que le phénomène de réduction de surface observé par différents auteurs sur des particules microniques ou des aérosols de combustion n'est donc pas dû à la diffusion des particules dans le pli.

4. CONCLUSION

Dans cette partie de l'étude, des moyens de mesure ont été développés et appliqués pour les caractéristiques de chacune des phases de filtration.

Les résultats des mesures de profil de pénétration ne sont pas en accord avec les calculs effectués à partir d'une efficacité unitaire de collecte. Cela peut s'expliquer par une augmentation de l'efficacité de collecte des fibres chargées en aérosol. Cette hypothèse semble crédible au vu des profils mesurés qui se trouvent plus prononcés que ne le prédit le calcul (pour la plupart des aérosols étudiés). Pour le sujet de cette étude, nous nous en tiendrons aux valeurs mesurées et considèrerons le profil de pénétration comme une donnée d'entrée du phénomène de colmatage.

Un instrument de mesure dynamique de la porosité des dépôts de particules a été développé et des mesures ont été effectuées pour des aérosols de carbone et d'alumine, à différentes vitesses de filtration. Les résultats obtenus pour des particules de carbone sont, pour l'instant, surprenants au vu de l'état de l'art sur ce sujet. Une interprétation reste à trouver pour expliquer ce comportement, en s'intéressant notamment aux différences entre les aérosols utilisés dans cette étude et ceux utilisés dans les différentes publications sur le sujet (en termes de nombre de particules primaires notamment). Les mesures de perte de charge pour ces dépôts sont en accord avec les porosités mesurées. Ces valeurs ont été comparées à celles issues de deux modèles de perte de charge, celui de Thomas et al. (2014) et celui de Kozeny-Novick (1992). Il se trouve que le modèle de Thomas et al. (2014) offre un meilleur accord avec les valeurs de porosité supérieures à 96 %

Les porosités mesurées pour des particules submicroniques d'alumine montrent une porosité qui ne varie que pour des vitesses de filtration basses. On a ainsi une porosité qui atteint 94 % à une vitesse de filtration de 0,16 cm/s et qui tend, pour des vitesses de filtration plus élevées, vers 89 % Cette influence de la vitesse a déjà été remarquée par d'autres auteurs (Cheng et Tsai 1998).

Le dernier point soulevé dans ce chapitre est la vérification que les filtres plans et plissés soumis à des aérosols nanométriques, suivent bien le même comportement. Un effet dû à la diffusion brownienne des particules était en effet envisageable. Il se trouve que les mesures effectuées sur des filtres plissés à des vitesses de filtration très basses ne montrent aucun impact de la géométrie du filtre sur le dépôt des particules. De plus, le faible volume occupé par le dépôt et sa très forte résistance spécifique ne permettent pas de réduction de surface suffisante pour influencer la perte de charge. Ainsi, pour le cas d'aérosols nanostructurés, le comportement d'un filtre plissé peut être assimilé entièrement à celui d'un filtre plan.

Pour mettre en évidence la réduction de surface, nous nous sommes donc concentrés, dans le chapitre suivant, sur le colmatage par des particules d'alumine. Pour ce type d'aérosol, la porosité des dépôts est une grandeur qui n'aura pas uniquement une influence sur la perte de charge du dépôt, comme c'est le cas pour un filtre plan. Dans le cas du colmatage

d'un filtre plissé, le volume qu'occupe le dépôt dans le pli conditionne la phase de réduction de surface, qu'il s'agisse de la réduction de surface due à la croissance homogène du dépôt (comme l'ont décrit Hettkamp et al. 2012 ou Del Fabbro (2001)) ou du remplissage non optimal du pli (Del Fabbro 2001). Ainsi, les valeurs de porosité pour des dépôts d'alumine sur des filtres plans ont été utilisées pour l'interprétation des résultats acquis sur des filtres plissés.

CHAPITRE IV : FILTRES PLISSES / OOPS (OBSERVATION OPTIQUE D'UN PLI SIMPLE)

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié la filtration sur filtre plan. De ces expériences, il ressort que l'intérêt d'étudier la filtration d'aérosols nanostructurés sur filtre plissé est faible, si ces aérosols ne possèdent pas de dimension submicronique. En effet, pour ce type de particules, la réduction de surface n'est pas observée, même lorsque la résistance aéraulique du filtre colmaté est très importante et la vitesse de filtration très faible.

En revanche, la filtration de particules submicroniques présente un intérêt certain. A l'heure actuelle, l'augmentation rapide de la perte de charge en fonction de la masse déposée visible pour des aérosols microniques (Callé-Chazelet et al. 2007, Bouilloux et al. 2006) mais également pour des aérosols submicroniques issus de combustion (Mocho et Ouf 2011) n'a pas trouvé d'explication phénoménologique. Ce phénomène intervient pour les vitesses de filtration très faibles mais reste un sujet d'étude majeur car il accélère drastiquement l'obturation des filtres lors du développement de certaines situations accidentelles (incendie notamment), lorsque le colmatage des filtres engendre une diminution des débits de ventilation de l'installation concernée.

De ce fait, afin d'étudier la phénoménologie du remplissage de pli, une observation directe du pli au cours du colmatage dans des conditions bien maîtrisées est nécessaire. Pour ces essais, nous avons utilisé des particules d'alumine afin de pouvoir observer les phénomènes à l'œuvre lors de la réduction de surface. De plus, les informations recueillies sur la porosité des dépôts en fonction de la vitesse de filtration sont des données utiles pour interpréter les résultats obtenus sur filtre plissé.

Les éléments déterminants pour le colmatage qui seront observés sont :

- **le volume disponible dans le pli** qui, en cours d'utilisation, peut varier avec la déformation du medium. En effet, c'est la quantité d'espace disponible qui conditionnera, du moins en partie, la surface active disponible (Del Fabbro et al. 2002),

- **les écoulements dans le pli** dont la forme peut influencer significativement la formation des dépôts et la perte de charge du pli,

- **l'homogénéité du dépôt dans le pli.** Si le dépôt est préférentiellement en entrée de pli, le volume théoriquement disponible pour la formation du dépôt ne sera pas rempli de manière optimale et la perte de charge augmentera plus vite en fonction de la masse déposée. Pour chacun de ces phénomènes, un moyen de mesure spécifique a été développé et implanté sur un dispositif expérimental également spécifiquement dimensionné pour cette étude.

1. EXPERIENCE OOPS

La Figure 87 représente une vue éclatée du dispositif utilisé pour isoler et observer le colmatage d'un pli. Les pièces représentées en couleur sont constituées de PMMA (Polyméthacrylate de méthyle) afin de permettre l'utilisation de méthodes de mesures

optiques. L'ensemble est adaptable pour permettre l'étude d'un seul pli de medium filtrant maintenu par des pièces intercalaires représentées en vert et jaune sur la Figure 87.

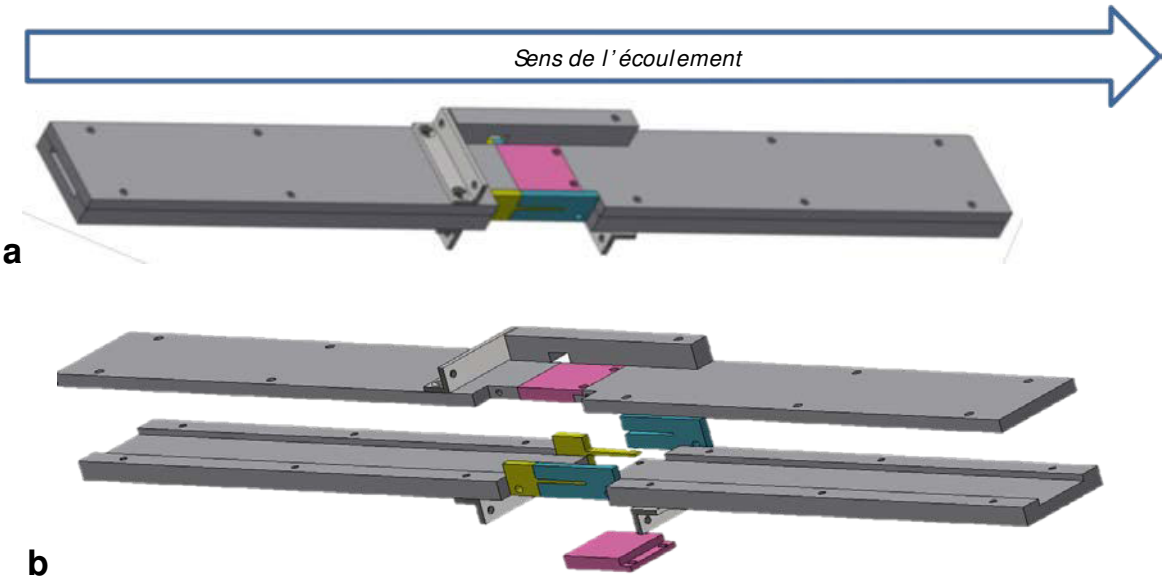


Figure 87 : (a) Vue extérieure de l'expérience OOPS (b) vue éclatée de l'expérience OOPS

Lors de la mise en service du dispositif, l'étanchéité a été vérifiée par traçage gazeux (à l'argon), le medium a été plissé en usine en suivant le même processus de fabrication que les filtres industriels. La géométrie a été mesurée sur un filtre THE enrobé et coupé, afin qu'elle soit la plus fidèle possible. Enfin, la largeur du pli correspond à la distance entre deux séparateurs présents sur le medium plissé mis en œuvre dans les filtres industriels, afin d'obtenir un comportement mécanique identique (Figure 88).

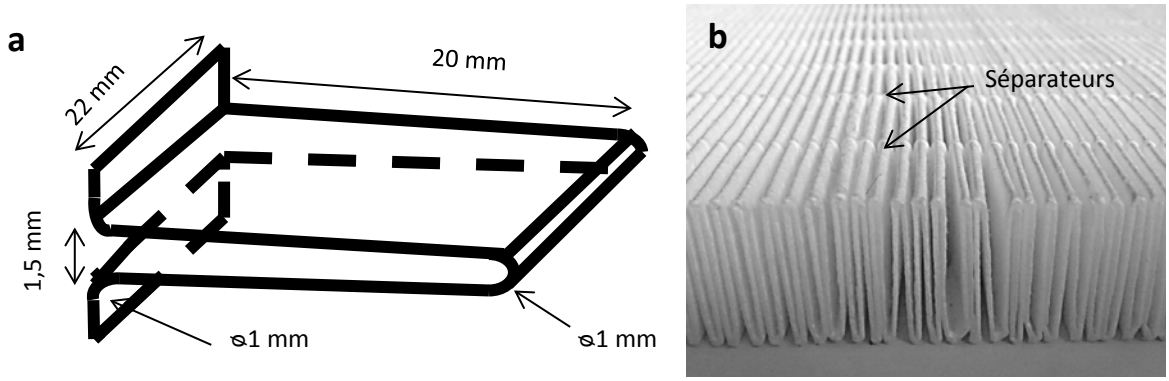


Figure 88 : (a) Géométrie du pli contenu dans le banc (b) photographie d'une nappe de medium plissé

Pour toutes les expériences conduites sur le dispositif, le débit est maintenu constant et la perte de charge est mesurée. La masse déposée est déterminée directement par pesée en fin d'expérience. Chaque essai est répété plusieurs fois, afin, d'une part d'évaluer la répétabilité des expériences, d'autre part de s'assurer de la pertinence des résultats.

Nous avons ici travaillé uniquement avec le medium THE, la filtration en profondeur (qui est le seul instant de la filtration où l'efficacité de filtration du medium influence le colmatage)

ne constituant pas le sujet d'étude dans le présent chapitre. Cela permet en outre de considérer que la masse d'aérosol générée est entièrement collectée par le filtre et donc, de considérer dans le cas d'une génération constante, que la masse déposée est proportionnelle au temps de colmatage.

1.1. Banc aéraulique

Le dispositif OOPS a été mis en place sur le banc de colmatage préalablement utilisé pour le colmatage des filtres plans et décrits dans le chapitre III.

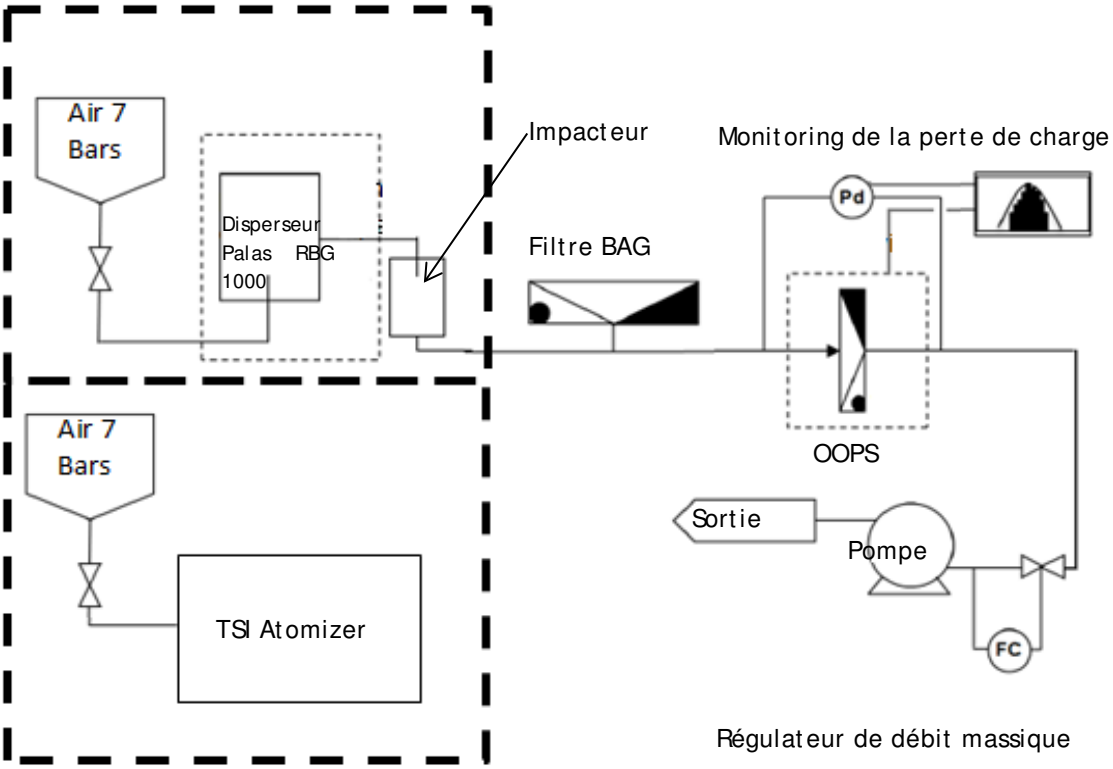


Figure 89 : Schéma du banc d'ensemencement du dispositif OOPS

Rappelons qu'afin de mettre en évidence les phénomènes intervenant lors de la réduction de surface, nous nous sommes focalisés sur des aérosols d'alumine qui ont été produits par le disperseur Palas RBG 1000.

1.2. Perte de charge du filtre vierge

Pour un filtre vierge, nous avons fait état dans la première partie de ce mémoire d'une évolution non linéaire de la perte de charge avec la vitesse de filtration. Ce comportement doit être similaire sur l'expérience OOPS et sur un filtre industriel, afin de valider le choix d'une approche à petite échelle. La Figure 90 représente la perte de charge d'un filtre industriel de type demi-cellule (débit nominal de filtration de 1500 m^3/h soit environ 18 m² de medium filtrant plissé) et celle mesurée sur un seul pli.

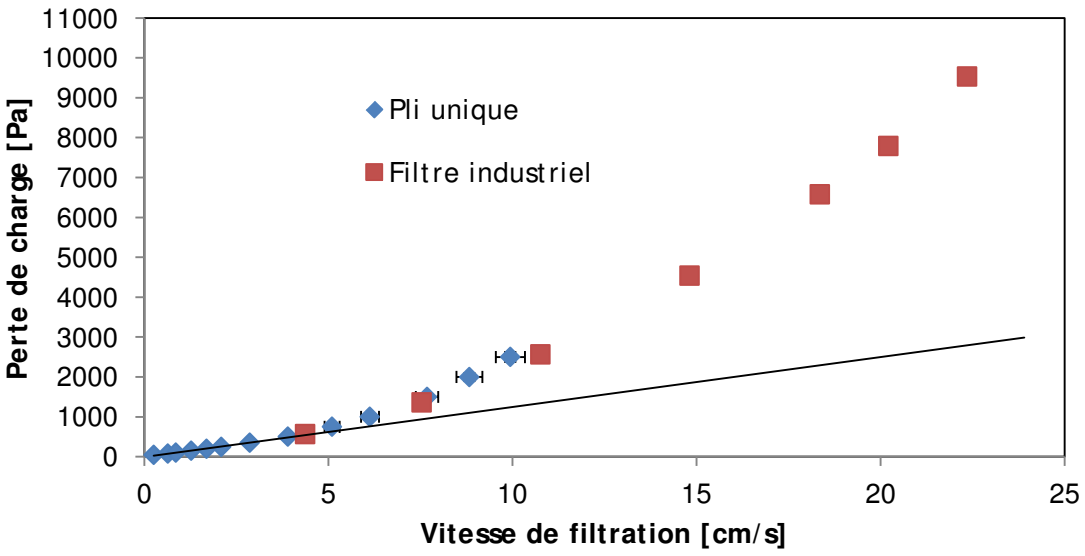


Figure 90 : Valeurs de perte de charge mesurées pour différentes vitesses de filtration pour un filtre demi-cellule et pour un pli unique

Dans la gamme étudiée, ces deux courbes sont très proches. Cela conforte le fait que ce que l'on observe sur un filtre plissé se produit également sur un seul pli et que les essais menés sur un seul pli seront ici pertinents et représentatifs de ceux conduits sur des filtres industriels.

2. DEFORMATION DU PLI

2.1. Matériel et méthode

Lors du passage d'un écoulement dans le pli, la perte de charge qui s'exerce sur le medium peut conduire à sa déformation. Cette déformation peut avoir deux effets observables sur le comportement du pli :

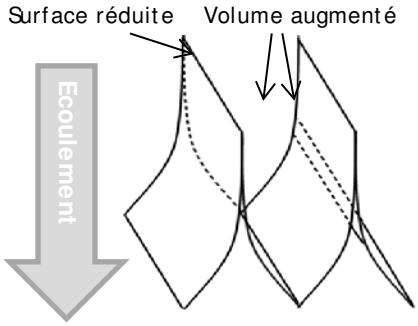


Figure 91 : Schéma du pli déformé

- elle peut conduire à une réduction de la surface effective de filtration, donc à une augmentation de la vitesse de filtration qui se traduit par une augmentation de la perte de charge (notamment pour un filtre vierge),
- en influençant le volume disponible à l'intérieur du pli, elle peut conduire à un comportement différent en cours de colmatage (une augmentation plus lente de la résistance aéraulique du filtre au cours du colmatage) (Figure 91).

Ces deux phénomènes (augmentation de la perte de charge lors de l'utilisation du filtre vierge avec un débit élevé et augmentation de la perte de charge d'un filtre plissé plus rapide à faible vitesse durant le colmatage) sont effectivement observés à l'échelle macroscopique (Figure 28, Figure 90), reste à savoir s'ils sont imputables à une déformation

du medium et si oui, dans quelle mesure. Afin de connaître la déformation du filtre en fonction de la pression qui s'y applique, une mesure en un point (situé à mi-profondeur du pli) a été réalisée. Cette mesure se base sur le concept également utilisé pour la mesure de la croissance de dépôt (Figure 92).

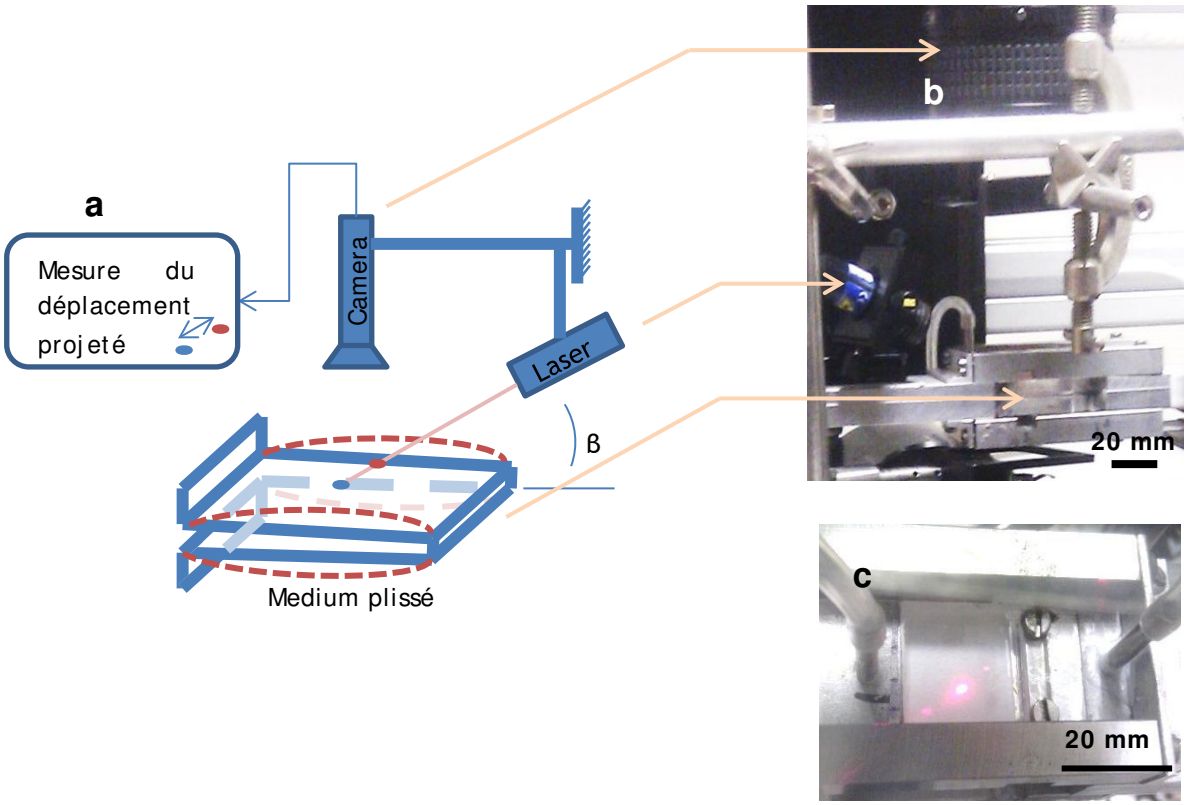


Figure 92 : Illustration schématique de la mesure de déplacement local (a) photo du dispositif (b) photo du spot laser sur le pli (c)

L'étalonnage de ce système a été réalisé à partir d'un étalon usiné dont les dimensions sont connues. Le déplacement a été mesuré en un point central et la déformation en trois dimensions de l'ensemble du pli a été déduite d'un modèle aux éléments finis. Dans ce modèle numérique, la géométrie du pli est identique à celle d'un pli réel (20 mm de profondeur, 22 mm de largeur). Des conditions d'encastrement sont fixées aux bords du medium (zones grises sur la Figure 93) afin de rendre compte de la présence d'intercalaires rigides (séparateurs Cf. Figure 88). La pression est fixée homogène sur la face amont du filtre (en rouge sur l'illustration). Les propriétés du medium sont considérées comme isotropes. La déformation du filtre a été calée sur le déplacement ponctuel mesuré par trigonométrie laser, ce qui évite la caractérisation mécanique du medium.

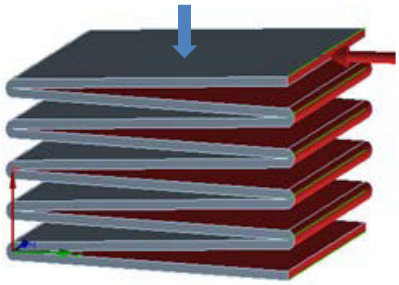


Figure 93 : Représentation numérique du filtre utilisé pour les calculs de déformation avec le champ de pression en rouge, et en bleu, le point sur lequel les valeurs expérimentales de déplacement ont été ajustées.

2.2. Résultats

La mesure effectuée est un déplacement ponctuel, celui-ci est lié à la déformation du medium. Pour cette raison, nous parlerons dans cette partie de la déformation du pli.

Le déplacement du point placé au centre mesuré sur un pli, représenté Figure 94, se fait en deux phases. Dans un premier temps, la déformation est fortement liée à la vitesse de filtration, puis la déformation en fonction de la vitesse diminue, avant de tendre vers une valeur limite.

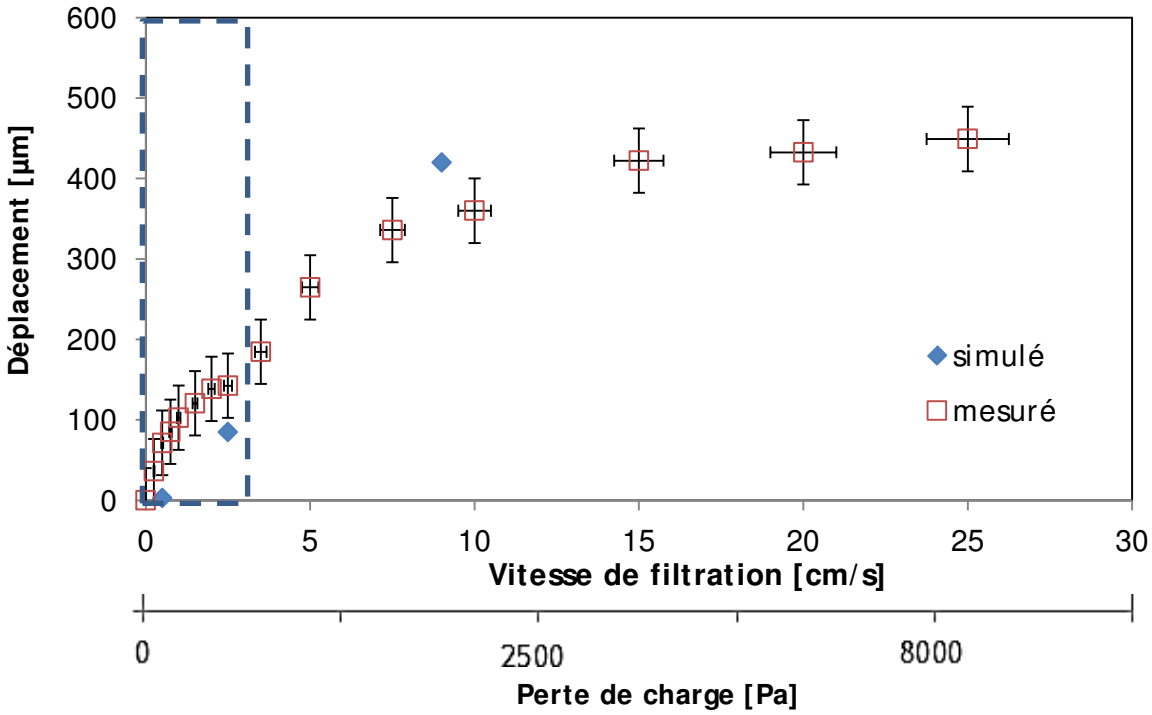


Figure 94 : Déplacement observé au point central du pli en fonction de la vitesse de filtration. La zone de fonctionnement du filtre est encadrée en bleu

Pour la gamme de vitesse de filtration, où l'on observe une relation linéaire entre la perte de charge et la vitesse de filtration, la tenue mécanique du pli est faible. Cela conduit à penser

que pour des vitesses de filtration supérieures, la surface effective de filtration est réduite par le contact des deux faces du pli coté aval. La Figure 95 illustre la forme de la déformation calculée avec le code Ansys© Mechanical, à partir des valeurs de déplacement présentées sur la Figure 94.

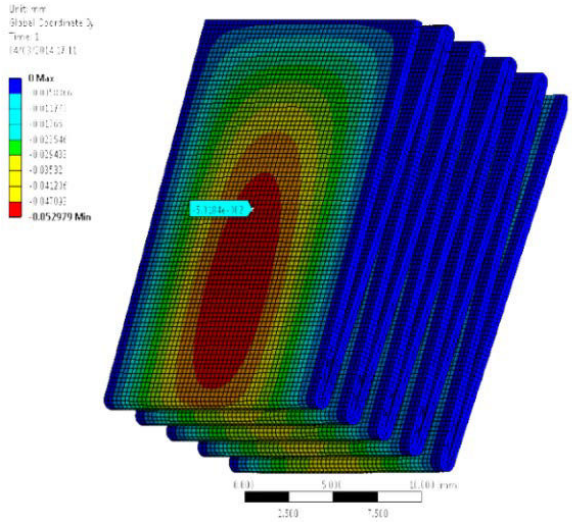


Figure 95 : Zones de déformation du pli soumis à une pression de 250 Pa. En rouge, la zone où la déformation est maximale

Les simulations faites sur l'ensemble du pli à partir de ces points expérimentaux avec le logiciel Ansys© Mechanical, illustrées Figure 96, montrent, en effet, que pour les pertes de charge inférieures à 250 Pa, les faces intérieures du pli n'entrent pas en contact.

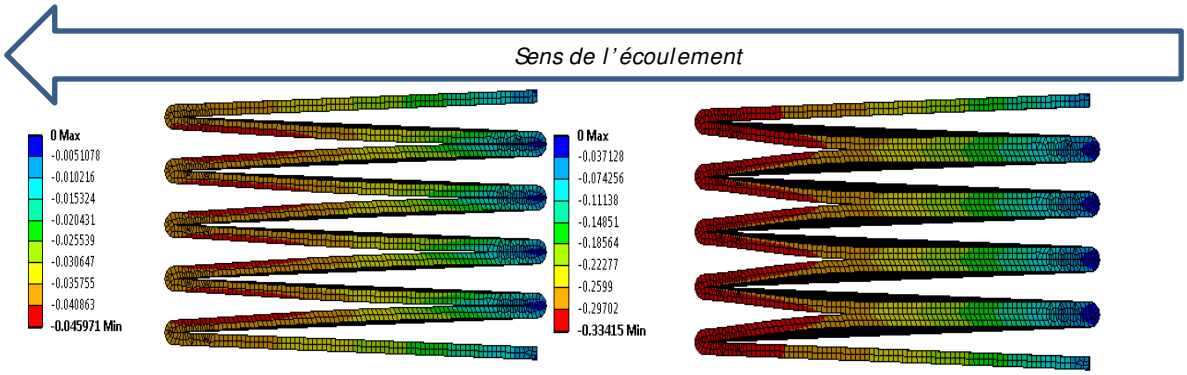


Figure 96 : Illustration de la déformée la vitesse nominale 2,5 cm/s - 250 Pa (gauche) et à 8 cm/s – 2000 Pa (droite)

Il est difficile de déduire d'un modèle numérique la surface réellement « inactive » à cause du modèle lui-même. En effet, celui-ci rend compte de la déformation mais pas de l'interface entre les deux plis. Étant donné que le medium ne présente pas une surface plane mais bombée, la surface réduite ne peut être évaluée par un simple modèle géométrique. Toutefois, en première approximation, à partir des valeurs de perte de charge en fonction de la vitesse de filtration pour un filtre plan et plissé, on peut déduire une réduction de surface équivalente. En effet, en admettant le débit Q et la perméabilité B du medium constants, un régime d'écoulement laminaire qui ne change pas dans la gamme de vitesses considérées, et la surface variable, on a :

$$\Delta P_{plissé} = \frac{Z}{B}\mu V_{fplissé} \quad \text{et} \quad \Delta P_{plan} = \frac{Z}{B}\mu V_{fplan} \qquad [42]\ [43]$$

en admettant Q constant, on a :

$$V_{fplan}S_{plan} = V_{fplissé}S_{plissé} \quad \text{et} \quad \frac{V_{fplan}}{V_{fplissé}} = \frac{S_{plissé}}{S_{plan}} \qquad [44]\ [45]$$

donc

$$R_s = \frac{S_{plan}}{S_{plissé}} = \frac{\Delta P_{plissé}}{\Delta P_{plan}} \qquad [46]$$

Ce rapport est donc représenté Figure 97 en fonction de la vitesse de filtration théorique.

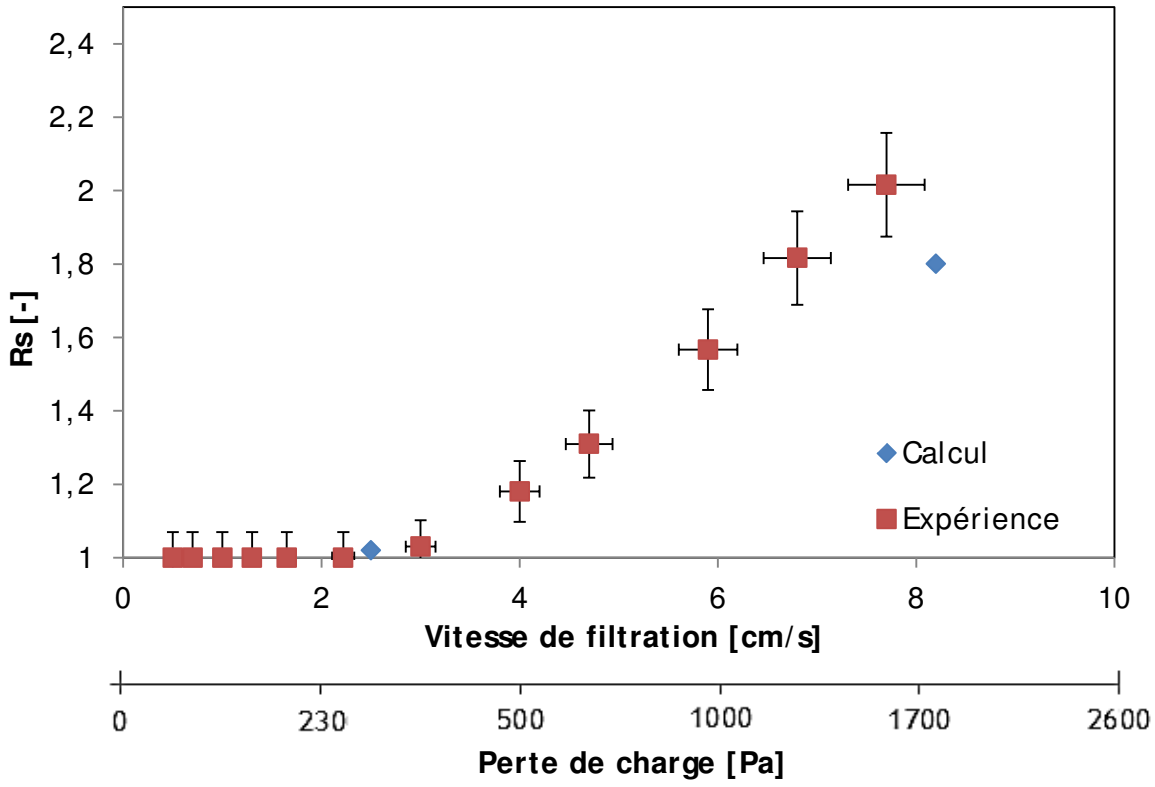


Figure 97 : Rapport des pertes de charge pour un filtre plan et un filtre plissé et comparaison avec la réduction de surface calculée par Ansys© Mechanical

Cette courbe montre que la réduction de surface « équivalente » commence à partir de 3 cm/s. Cela laisse supposer que la tenue mécanique du pli est à l'origine de l'augmentation de résistance aéraulique observée pour des vitesses de filtration importantes sur un filtre plissé vierge.

De plus, même si la réduction de surface déduite des calculs de déformation reste proche des valeurs expérimentales, il reste un écart entre la surface effectivement réduite et les valeurs issues de la courbe de perte de charge. Cela peut s'expliquer par un changement des écoulements dans le pli lorsque celui-ci se déforme.

Des mesures de déformation ont également été effectuées en cours de colmatage. Les valeurs mesurées montrent une absence de déformation lors du colmatage du pli avec un aérosol d'alumine. Ainsi, le phénomène de déformation ne peut expliquer les observations faites sur filtre colmaté que par la géométrie initiale du pli.

3. COLMATAGE

Bien que la distribution granulométrique des particules de carbone produites par le générateur Palas GFG 1000 ne présente pas de dimension submicronique (D_m=140 nm, D_{pp}=10 nm) et ne soit pas favorable à l'apparition de la phase de réduction de surface, il nous a cependant paru nécessaire de réaliser quelques expériences de colmatage avec le dispositif OOPS, afin de disposer de données relatives à des agrégats de nanoparticules confirmant d'une part les observations faites sur filtre plan et sur filtre plissé avec le dispositif de colmatage implanté sur le banc d'essais de l'INRS, d'autre part celles relatives au filtre plissé vierge.

A la suite de ces premiers essais, nous nous sommes focalisés sur le colmatage d'un pli de medium par l'aérosol d'alumine afin d'étudier la réduction de surface propre aux filtres plissés.

3.1. Aérosol nanostructuré - carbone

Des colmatages ont été effectués en utilisant des aérosols de carbone issus du générateur Palas GFG 1000 monté en lieu et place du disperseur Palas RBG 1000 sur la Figure 89. La Figure 98 illustre les différentes courbes montrant les augmentations de résistances aérauliques mesurées pour différentes vitesses de filtration. Les masses déposées ont été obtenues à partir de la masse du filtre pesée avant et après colmatage en considérant une efficacité de 100 %et une génération constante.

Tout d'abord, les valeurs de perte de charge relevées dans ce banc, présentent, pour les faibles vitesses, une certaine dispersion, due à la difficulté de ne pas détériorer le dépôt lors de la pesée du filtre. Ces dispersions représentées sur la figure restent acceptables (Figure 98). Ces résultats ne montrent pas de point d'inflexion correspondant à l'apparition d'un phénomène de réduction de surface, en particulier à 0,25 cm/s. De plus, comme pour les particules de zinc / aluminium, aucune influence importante de la vitesse sur la perte de charge ne peut être observée jusqu'à 2,5 cm/s. On note tout de même une augmentation de perte de charge plus rapide pour une vitesse de 5,6 cm/s. Cela peut s'expliquer par la surface efficace plus faible à cause de la déformation du medium (avant colmatage), tel que décrit précédemment. Cette hypothèse est appuyée par la forme incurvée de la courbe qui laisse penser à un rééquilibrage des débits le long du pli du medium. Notons également que les différences de porosités mesurées des dépôts de carbone dans le chapitre sur les filtres plans, contribuent également à cette élévation plus rapide.

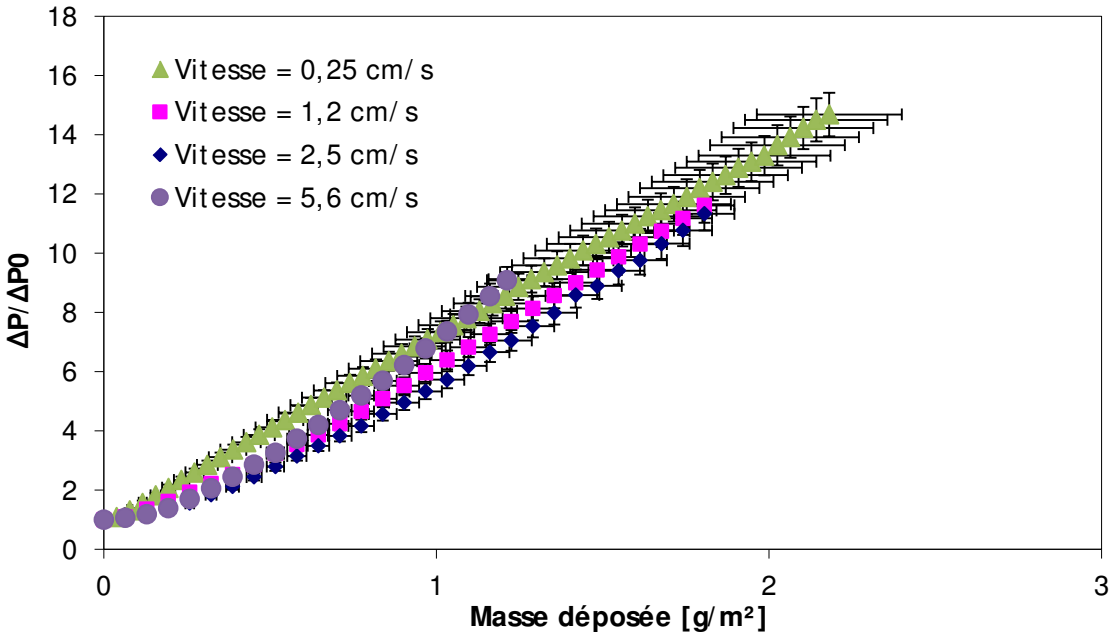


Figure 98 : Evolution de la résistance aéraulique en fonction de la masse déposée pour un pli colmaté avec des aérosols de carbone à différentes vitesses

3.2. Alumine

Les expériences de colmatage menées avec les particules d'alumine (générées par un disperseur à piston Palas RBG 1000) montrent une l'augmentation de la résistance aéraulique du pli colmaté à différentes vitesses de filtration (Figure 99). Cette évolution est similaire à celle obtenue sur un filtre plissé avec des aérosols de combustion (Mocho et Ouf 2011).

Pour une vitesse de filtration égale au dixième de la vitesse nominale du filtre (0,25 cm/s), on observe une accélération de l'augmentation de résistance aéraulique en fonction de la masse, à partir d'une masse de particules déposées d'approximativement 20 g/m². Pour une vitesse cinq fois plus importante, cette masse atteint 40 g/m².

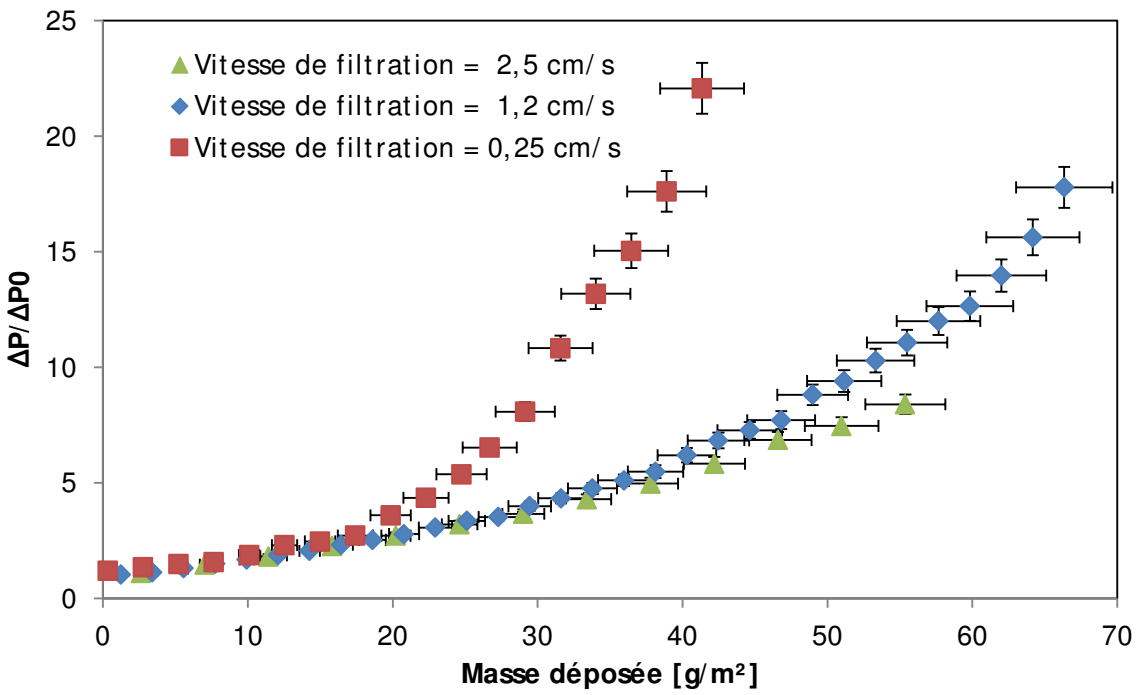


Figure 99 : Courbe d'évolution de la résistance aéraulique en fonction de la masse d'alumine déposée pour différentes vitesses de filtrations

On observe sur les évolutions de résistance aéraulique à 0,25 et 1,2 cm/s, une réduction de surface qui apparait respectivement à environ 20 et 40 g/m². Pour ces masses, on peut calculer le rapport de volume occupé par le dépôt (en connaissant sa porosité) et celui disponible dans le pli en tenant compte de la déformation initiale (mesurée précédemment), comme le propose Hettkamp et al. (2012), à partir des données du tableau 16. Dans tous ces cas de figure, l'inertie des particules en entrée de pli (la zone ou les écoulements sont les plus importants et donc la plus critique) est négligeable (Stk<<1).

L'objectif ici étant de comparer l'efficacité de remplissage de manière qualitative. Il est donc inutile de tenir compte de la géométrie exacte du pli et de sa déformée. Les rapports ainsi calculés, regroupés dans le tableau 17 sont très nettement inférieurs à 1. En d'autres termes, cela signifie que la réduction de surface n'est pas le résultat d'un dépôt homogène dans le pli, tel que le propose Hettkamp et al. (2012) dans son modèle simplifié adapté à ses conditions opératoires.

Tableau 16 : Valeurs utilisées et nombres de Stokes calculés pour différentes vitesses de filtration sur filtre plissé

Vitesse de filtration [cm/s]	Vitesse en entrée de pli [m/s]	Dp [nm]	ρ [kg/m³]	Lc [mm]	μ [Pa.s]	Stk [-]
0,25	0,1	250	3970	1	$1,85\ 10^{-5}$	$1,4.10^{-4}$
1,2	0,5	250	3970	1	$1,85\ 10^{-5}$	$7,3.10^{-4}$
2,5	1	250	3970	1	$1,85\ 10^{-5}$	$1,5.10^{-3}$

Tableau 17 : Mesures utilisées dans le calcul du rapport de volume ($V_{dépôt}$ / V_{pli}) et valeur de ce rapport

masse déposée [g/m²]					
20	**masse déposée dans le pli [g]**	**masse volumique [kg/m³]**	**volume de particules dans le pli [m³]**	**Compacité du dépôt de particules [-]**	**volume de dépôt [m³]**
	0,00176	3970	$4 \cdot 10^{-09}$	0,06	$7,34.10^{-08}$
	largeur de pli [mm]	**profondeur de pli [mm]**	**Pas de plissage [mm]**	**Déformation [µm]**	**volume dans le pli [m³]**
	22	20	1,5	50	$6,82.10^{-07}$
			rapport de volume		
			0,11		
60	**masse déposée dans le pli [g]**	**masse volumique [kg/m³]**	**volume de particules dans le pli [m³]**	**Compacité du dépôt de particules [-]**	**volume de dépôt [m³]**
	0,00528	3970	$1,33.10^{-08}$	0,08	$1,7.10^{-08}$
	largeur de pli [mm]	**profondeur de pli [mm]**	**Pas de plissage [mm]**	**Déformation [µm]**	**volume dans le pli [m³]**
	22	20	1,5	150	$7,20.10^{-7}$
			rapport de volume		
			0,23		

Ce constat nous conduit à envisager qu'un autre phénomène intervient lors du colmatage à très basse vitesse et bouche le pli avant que le volume disponible ne soit rempli de manière optimale. Notons que ce phénomène semble sensible à la vitesse de l'écoulement, étant donné que le pli se trouve obstrué avec un volume deux fois plus faible à 0,25 cm/s.

Les résultats et les taux de remplissage calculés confirment les récents travaux effectués par calcul numérique par Cheng et al. (2013) et Saleh et al. (2014) qui montrent une obstruction du pli qui conduit à un remplissage de pli non optimal (fermeture prématurée du pli due à la formation d'une « arche »), et par conséquent à une réduction de surface prématurée.

4. REMPLISSAGE DU PLI

4.1. Matériel et méthode

La dernière phase de filtration, la réduction de surface, est considérée par certains auteurs comme un remplissage non optimal du pli. Afin de s'assurer de la validité de cette hypothèse, la mesure d'un profil d'accumulation des particules dans le pli s'avère nécessaire. Cette mesure a été effectuée pour des particules de zinc/aluminium au paragraphe 3 du chapitre 2.

La méthode de mesure de répartition par microscopie électronique utilisée pour des dépôts de particules de zinc/aluminium est ici très difficile à mettre en place. En effet, la cohésion du dépôt est nettement moindre et le volume de dépôt accumulé le rend très fragile. Ainsi, manipuler, stabiliser et enrober le pli colmaté sans détruire le dépôt de particules est très difficile et engendrerait des résultats peu fiables.

Jusqu'ici peu de preuves expérimentales de l'hypothèse d'un remplissage non homogène du pli sont disponibles dans la littérature, les expériences effectuées dans le paragraphe précèdent peuvent appuyer cette hypothèse mais doivent être confirmées. Afin de s'assurer de la cause de l'augmentation rapide de résistance aéraulique à faible vitesse, une expérience simple a été mise en place (Figure 100). Afin de connaitre la dynamique locale de chargement du pli, un laser est projeté sur le pli à différentes profondeurs et l'intensité de la lumière transmise est mesurée.

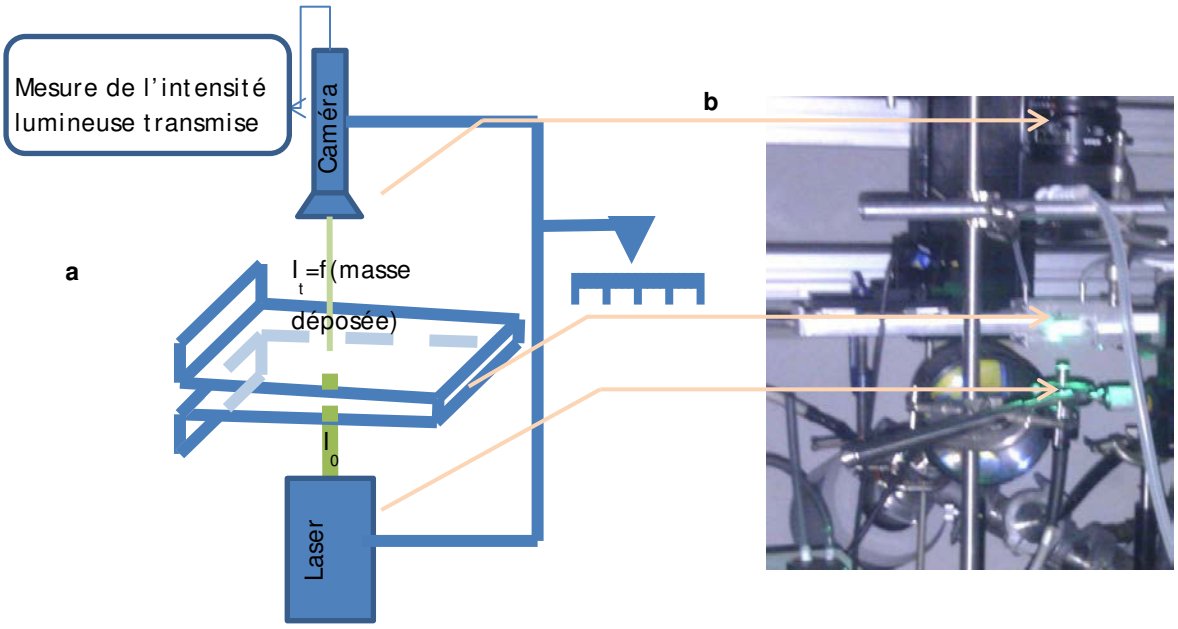


Figure 100 : Schéma (a) et photo (b) du dispositif expérimental

En effectuant ces mesures sur des filtres plans colmatés à différentes masses, une loi de décroissance exponentielle (proche de la loi de Beer-Lambert [47]) a été observée :

$$I_t = I_0 . e^{-\delta L} \qquad [47]$$

avec I_t l'intensité de la lumière transmise, I_0 la lumière incidente, δ le coefficient d'extinction du dépôt et L la longueur du trajet optique. En considérant le coefficient d'extinction du medium constant et étant donné que l'intensité du laser est maintenue constante, on considère I_0 constant. Pour un filtre plissé, que l'on peut considérer comme une superposition de deux filtres plans, le coefficient d'extinction doit être appliqué au carré. L'intensité I_0 est mesurée pour un filtre vierge. Sur la base de ces observations, un coefficient d'extinction a été déduit (Figure 102). La mesure des intensités lumineuses I_0 et I_t se fait à partir d'une caméra dont le niveau de gris est proportionnel à l'intensité du signal lumineux. La détermination est automatisée via Matlab© en appliquant un masque circulaire déterminé à partir du centre du spot transmis sur le filtre vierge, ceci afin de délimiter la zone de mesure et de réduire l'impact de la diffusion multiple de la lumière ayant lieu dans

le pli. La Figure 101 illustre l'image reçue pour un filtre vierge I_0 (droite) et colmaté I_t (gauche).

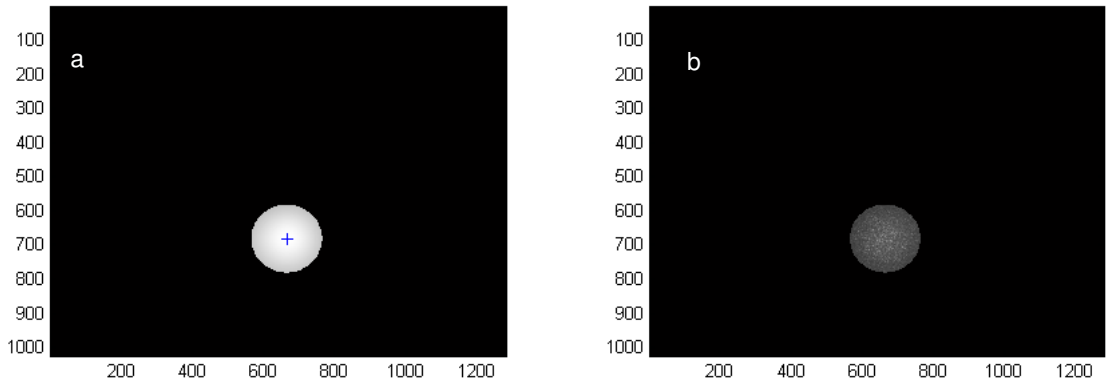


Figure 101: Signal mesuré après traitement par région d'intérêt (ROI Region Of Interest), (a) à t=0, (b) après colmatage

La détermination du coefficient d'extinction a été effectuée sur des filtres plans colmatés dans les mêmes conditions (aux mêmes vitesses de filtration et sur le même banc aéraulique, avec l'aérosol d'alumine) que celle relative au coefficient d'extinction du pli de medium, de manière à obtenir la même structure de dépôt. La courbe d'étalonnage donne un coefficient δ= 0,057 (Figure 102). Appliqué au carré pour un filtre plissé (car deux faces sont colmatées), nous pouvons remonter à une masse locale accumulée dans le pli pour différentes valeurs de perte de charge.

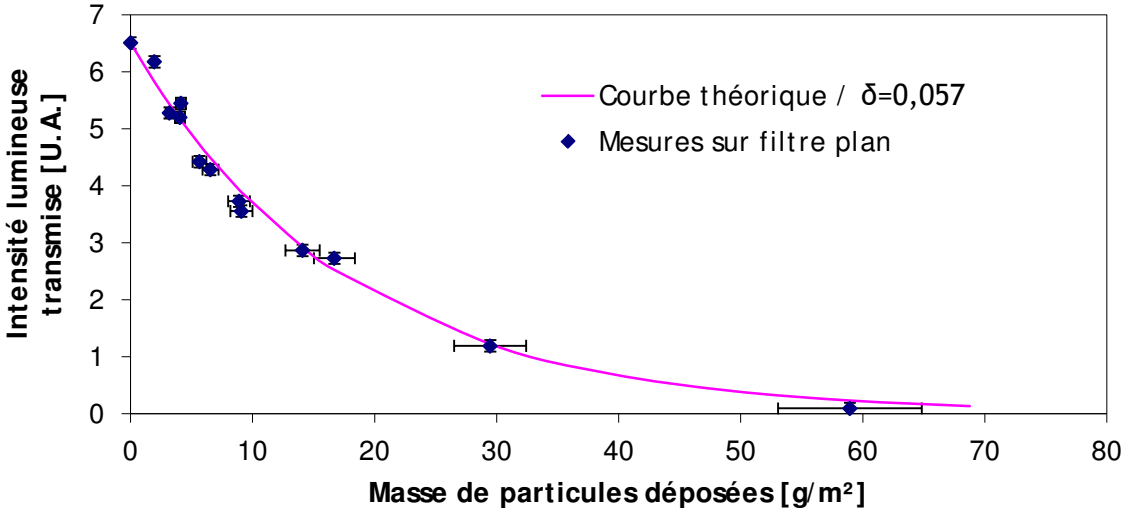


Figure 102 : Courbe de détermination du coefficient d'extinction pour un dépôt formé à une vitesse de filtration de 0,2 cm/s avec des particules d'alumine

Cette approche est valide sous trois conditions :

- la filtration profonde joue un rôle négligeable (même si celle-ci est prise en compte *de facto* dans l'étalonnage, il se peut qu'elle influence différemment le signal reçu dans le cas d'un filtre plissé),

- l'angle du pli est négligeable,
- le dépôt formé dans un pli est identique à celui formé sur un filtre plan.

De plus, il est impossible d'obtenir des mesures dans les zones situées près du bord pour éviter les réflexions qui faussent la mesure (2 premiers millimètres). Ainsi, nous n'exploiterons les résultats que de manière qualitative.

4.2. Résultats

Les évolutions de résistance aéraulique du pli montrent qu'à basse vitesse, une faible masse de particules est nécessaire pour engendrer une réduction de surface importante. En première approximation, les calculs (tableau 17) avaient montré que le remplissage du pli n'était pas complet, pour confirmer ce résultat, une mesure *in situ* du remplissage en utilisant l'absorbance d'un pli a été effectuée à un dixième de la vitesse de filtration (0,2 cm/s) et à la vitesse nominale.

Les vitesses de filtration ont été choisies afin de d'observer la réduction de surface (à 0,2 cm/s) et de pouvoir la comparer à un cas où la perte de charge suit une évolution plus linéaire (2,5 cm/s) (Figure 99). Par comparaison, des différences significatives devraient être visibles sur le profil d'accumulation des particules dans le pli à partir de la masse accumulée pour laquelle on observe la réduction de surface à basse vitesse sur les courbes de perte de charge. La Figure 103 illustre la masse localement accumulée à différentes profondeurs de pli pour différentes valeurs de perte de charge à 0,2 cm/s. Si pour des valeurs de perte de charge faibles, le dépôt est homogène, on observe, dès 114 Pa soit environ 4 fois la perte de charge initiale un déséquilibre qui s'accentue jusque 314 Pa (11 ΔP_0). Enfin, entre 314 et 900 Pa, le dépôt à l'intérieur du pli est quasi nul, l'absorption du pli reste quasiment inchangée, ce qui confirme le bouchage du pli.

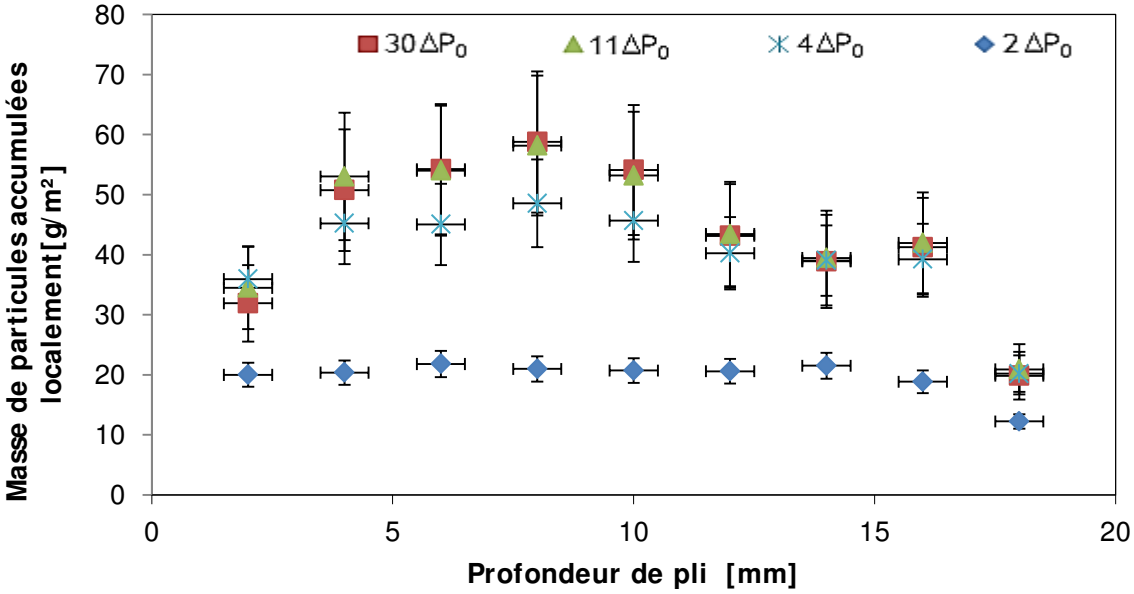


Figure 103 : Masses accumulées localement à différentes profondeurs de pli pour une vitesse de filtration de 0,2 cm/s

On peut toutefois penser que la formation de singularités dans le pli influence la diffusion de la lumière dans le milieu et que de ce fait, l'absorbance du milieu n'est pas uniquement dépendante de la masse accumulée mais également de la rugosité du dépôt et bien sûr de sa porosité qui peut varier dans le pli.

En revanche, la même expérience, effectuée à la vitesse nominale montre que le dépôt formé dans le pli reste homogène et garde la même forme entre trois fois et dix fois la perte de charge initiale (Figure 104).

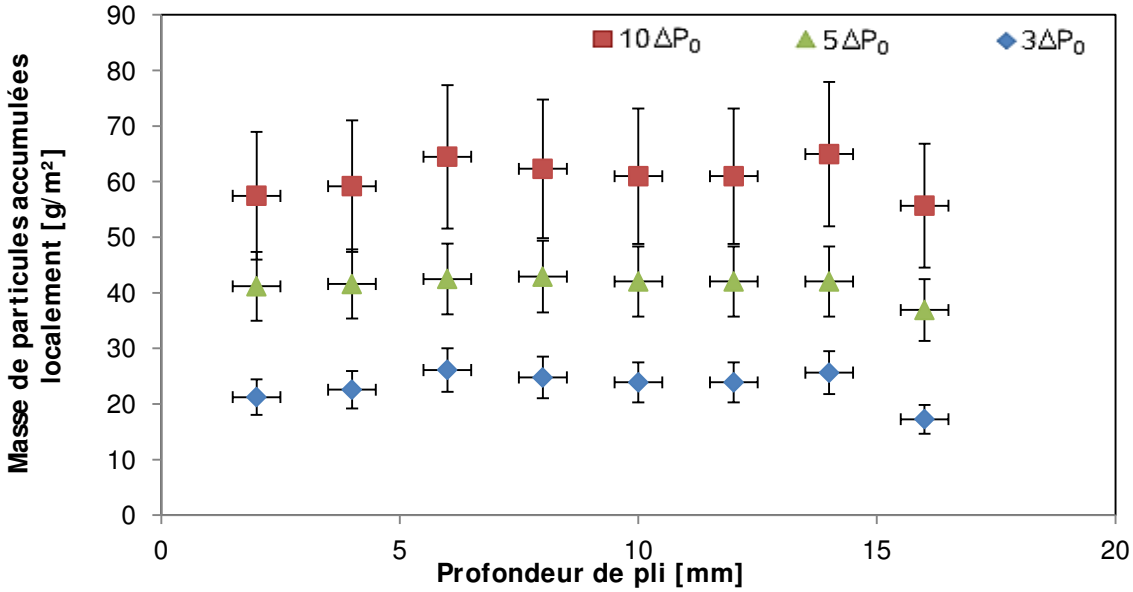


Figure 104 : Répartition des particules dans le pli pour différentes valeurs de perte de charge à une vitesse de filtration de 2,5 cm/s

La comparaison des courbes ainsi obtenues à des vitesses de filtration éloignées montre que le colmatage du pli est significativement différent et confirme les faibles taux d'occupation du dépôt dans le pli calculés à 1,25 et 0,25 cm/s (tableau 17).

Dans la littérature, les travaux de Hettkamp et al. (2013) sur la répartition du dépôt dans le pli pour des aérosols microniques et des vitesses de filtration plus élevées (1 µm de diamètre et 4 cm/s) confortent nos résultats. Les auteurs obtiennent une épaisseur de dépôt constante mesurée par tomographie. Les épaisseurs de dépôt qu'ils relèvent par tomographie sont identiques le long du pli, ce qui conforte les résultats obtenus à 2,5 cm/s.

Les seuls résultats faisant état d'une accumulation hétérogène sont des travaux de simulation numérique (Saleh et al. 2014, Cheng et al. 2013) et les travaux de Del Fabbro (2001) qui n'a pas observé directement le remplissage du pli.

5. OBSERVATION DE L'ENTREE DU PLI

5.1. Matériel et méthode

Le dispositif OOPS permet l'observation de l'intérieur du pli *in situ* sans devoir interrompre son colmatage. La zone la plus probablement sujette à la formation d'un « arche » bouchant prématurément le pli est la zone d'entrée du pli, cette zone est ici directement accessible. De plus, le dispositif développé (Figure 105) permet d'obtenir une visualisation avec un grossissement conséquent et des images nettes, même pour des structures en mouvement.

Cette visualisation offre des possibilités larges. En ce qui concerne l'observation directe de la formation des dépôts par ombroscopie mais également des écoulements dans le pli par PIV voire même, à terme, des déplacements de particules lors du colmatage.

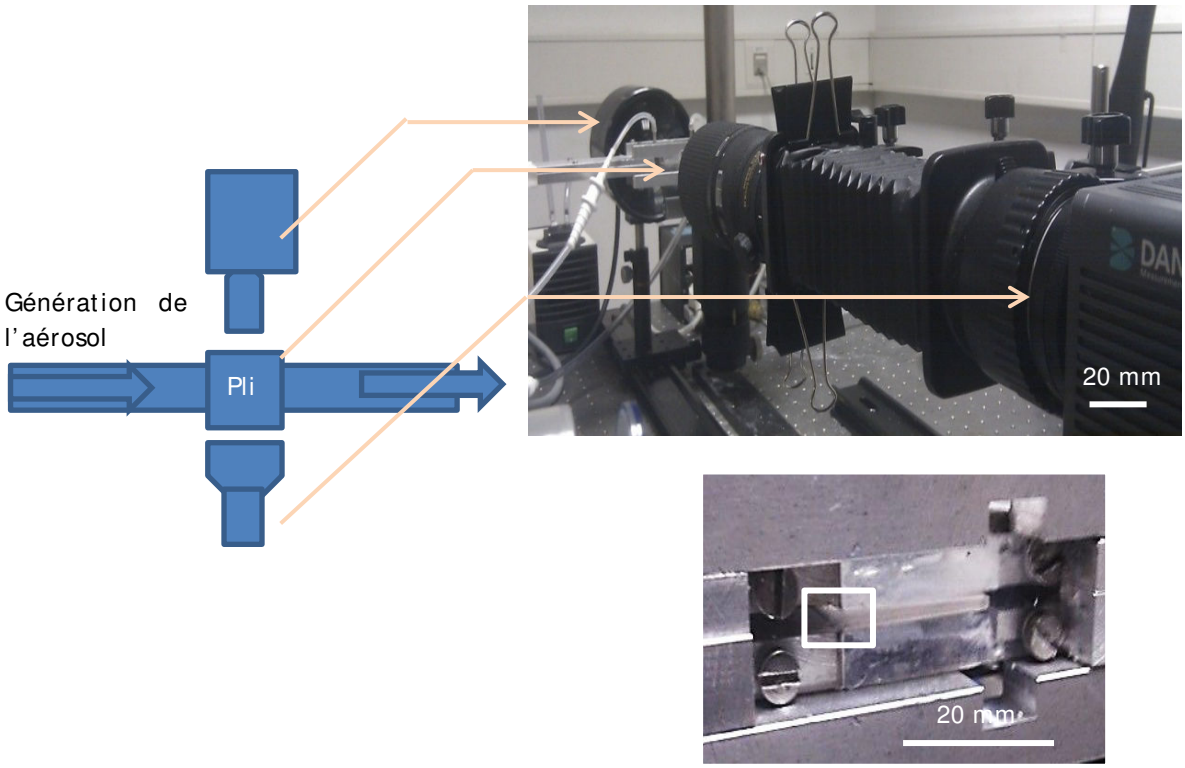


Figure 105 : Schéma vu du haut (a) et photo (b et c) du dispositif d'ombroscopie utilisé

Si, aujourd'hui, les méthodes de calcul CFD permettent de connaitre de manière relativement fiable les écoulements à l'intérieur du pli, l'entrée du pli présente une géométrie qui pourrait perturber l'écoulement et y favoriser un dépôt. Ainsi, la mesure des écoulements par PIV a été appliquée à l'entrée de pli. Le principe de cette technique de mesure repose sur le déplacement de particules dans le fluide (Adrian 1986, Willert et al. 1991). Pour mesurer un champ de vitesse, deux images de l'écoulement sont acquises en un temps très court grâce à une lumière pulsée et une caméra CCD qui y est synchronisée. Ces deux images sont divisées en plusieurs zones d'interrogation qui sont corrélées. La différence de position des particules entre les deux images divisées par le temps entre deux pulses, donne un vecteur vitesse instantané pour chaque zone d'interrogation. Par la suite, des algorithmes corrigent les champs de vitesses selon différents critères (cohérence des vecteurs par rapport aux vecteurs

voisins, degrés de corrélation entre les zones d'interrogation ou la cohérence de l'évolution temporelle de l'écoulement).

Afin de mesurer les champs de vitesses dans le pli, nous avons eu recours à des aérosols liquides de DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate) produits par atomisation. Ces aérosols, couramment utilisés pour la visualisation des écoulements sont, de par leur faible masse et leur forme sphérique, des traceurs de l'écoulement. La visualisation des écoulements dans le pli engendre plusieurs contraintes. D'une part, le fait que l'accumulation de particules solides ou liquides engendre une modification des propriétés du medium et donc des écoulements. L'utilisation d'un aérosol traceur liquide est d'autant plus contraignante que les changements d'écoulements observables dans le cas d'un colmatage par des gouttelettes peuvent significativement différer de ce qui se produit lors du colmatage par des aérosols solides. Pour ces raisons, les écoulements sont mesurés dès les premiers instants. L'injection d'aérosols a lieu après le début de l'acquisition d'images. Etant donné les contraintes de taille du pli et les propriétés diffusantes du medium, constitué de fibres de verre, il est impossible d'utiliser une visualisation classique par nappe laser. La technique d'ombroscopie est donc la plus appropriée dans ce cas. Le plan d'observation est naturellement délimité par la profondeur de champ de l'objectif (50 µm). Afin d'obtenir des visualisations suffisamment nettes des particules et de pouvoir en déterminer le déplacement, un traitement d'image préalable est nécessaire.

5.2. Résultats

5.2.1. Formation des dépôts en entrée de pli

Pour confirmer par une observation directe le fait qu'une obstruction du pli intervient et provoque de manière prématurée une forte augmentation de perte de charge, le dispositif OOPS dispose de hublots d'observation le long du pli.

La Figure 106 représente les images prises à différents instants du colmatage par des particules d'alumine. Ces résultats sont encore préliminaires et demandent à être approfondis. Toutefois, certains constats intéressants peuvent être tirés de ces observations :

- sur la première image, à t=0, donc sur le filtre vierge, on observe en tête de pli, la présence de plusieurs fibres sortant du medium. Ces fibres, jusqu'ici négligées lors du colmatage d'un filtre, semblent jouer un rôle,

- entourées en rouge, on voit certaines fibres se charger sur les images successives et on peut supposer, à terme, qu'elles formeront des ponts qui nuiront au bon remplissage du pli et provoqueront donc une élévation plus rapide de la résistance aéraulique du filtre,

- entourée en bleu, on observe la mise en place d'un cycle de « chargement/réentraînement » d'une fibre (ce phénomène est particulièrement observable sur la fibre entourée en bleu sur la Figure 106 mais les fibres entourées en rouge subissent également un réentraînement continu qui limite leur croissance). Ce phénomène peut expliquer que, pour des fortes vitesses de filtration, le pli se remplit de façon plus optimale. Cela pourrait donc expliquer une partie du phénomène de réduction de surface.

Figure 106 : Vues de l'entrée d'un pli par ombroscopie en cours de colmatage à 2,5 cm/s par des particules d'alumine – entouré en rouge, la formation de « ponts » en bleu, un exemple de cycle de réentraînement

La difficulté est alors de déterminer le diamètre, l'orientation et la concentration de ces fibres « parasites » dans le pli, ou la raison qui provoquerait la formation d'une zone de bouchage. Le caractère aléatoire de ces singularités rend donc l'extrapolation directe des résultats à un filtre plissé industriel délicate. La question de la représentativité statistique se pose alors. Toutefois, on peut admettre que le rapport entre la taille de ces singularités et celle d'un pli est suffisant pour tirer des conclusions sur la phénoménologie du colmatage. A faible vitesse (Figure 107), le réentraînement en entrée de pli n'est pas aussi important et les structures qui obstruent le pli atteignent un volume significativement plus important.

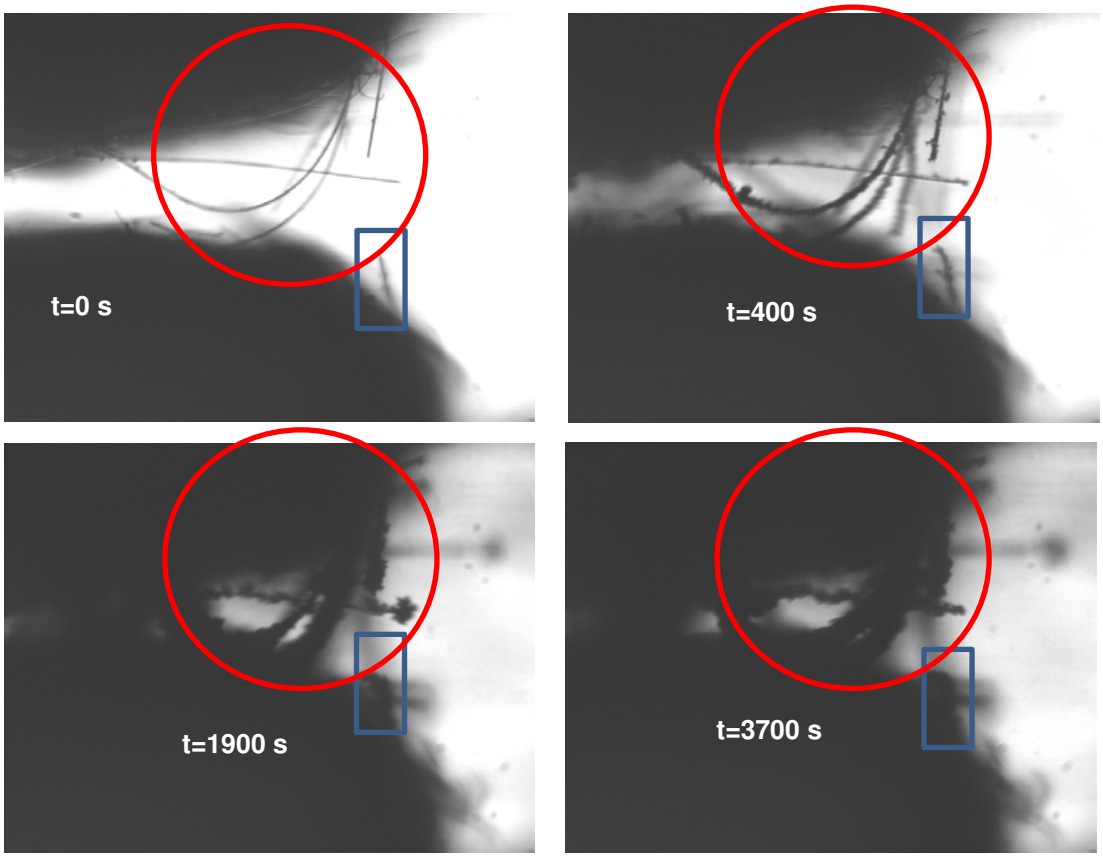


Figure 107 : Images de l'entrée de pli en cours de colmatage à une vitesse de filtration de 0,25 cm/s Les zones entourées se chargent en particules et atteignent un volume important avec un impact limité du réentraînement

Il est impossible d'assister à l'obstruction totale du pli car les images acquises sont des projections de toute la largeur du pli. La lumière est rapidement absorbée par les défauts situés hors du plan focal.

Notons également qu'étant donné le gradient de débit dans un pli, la probabilité de réentraînement diminue avec la profondeur.

Les structures formées en entrée de pli sur des « précurseurs » comme les fibres qui sont visibles sur la zone plissé du medium en tête de pli. On peut comparer le volume occupé par les fibres chargées avec différents types de particules par simple observation du pli sur la Figure 108. Les plis colmatés par un aérosol d'alumine (A) présentent des singularités qui occupent un volume significativement plus important que pour un aérosol métallique de zinc / aluminium ou de carbone (B, C).

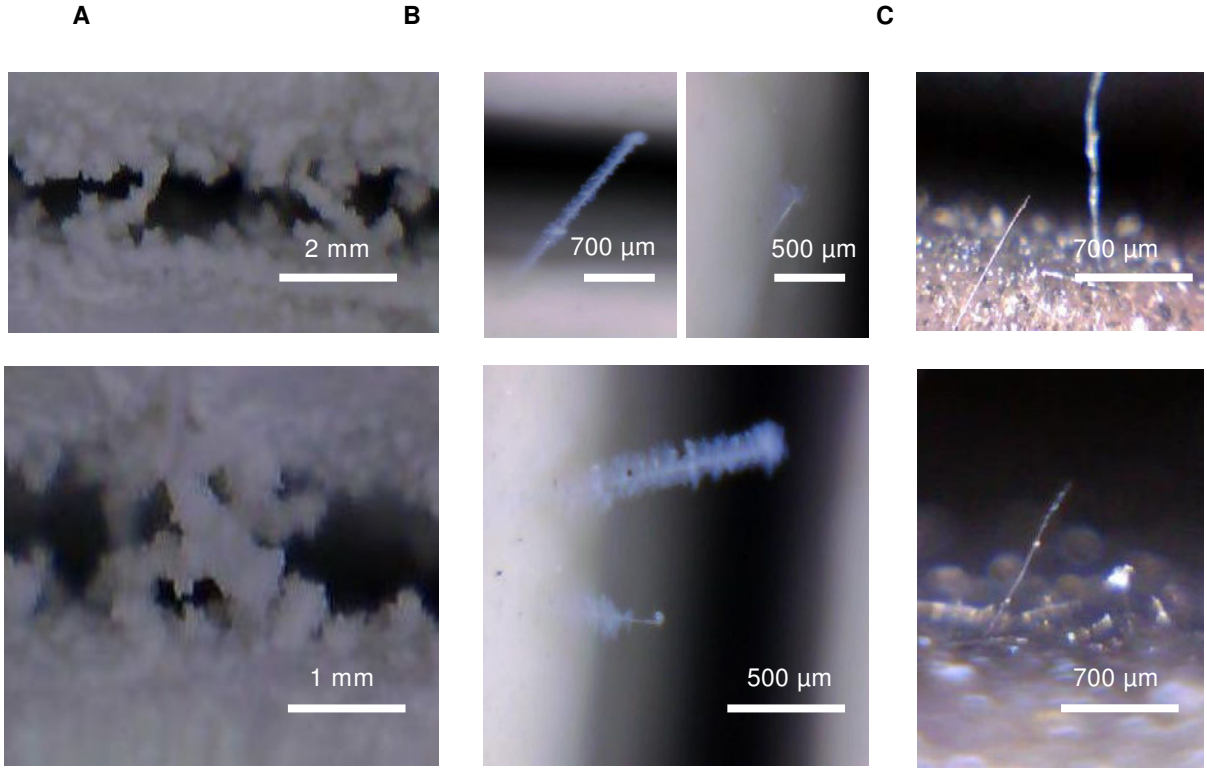


Figure 108 : Photos prises au microscope optique de l'entrée de pli de filtres colmatés à faible vitesse avec (A) des particules d'alumine, (B) des particules de Zn/Al et (C) des particules de carbone. Photos prises pour des filtres colmatés à une vitesse de filtration de 0,2 cm/s

5.2.2. Mesure des champs de vitesse

Des mesures d'écoulement ont été effectuées sur un pli unitaire. A l'heure actuelle, ces résultats doivent être approfondis et reproduits dans plusieurs conditions de vitesse et de colmatage. Toutefois, les premiers résultats montrent la faisabilité de ces mesures avec une résolution importante. La Figure 109 présente les champs de vitesse (a) et les lignes de courant (b) acquis par PIV en entré de pli. A partir des champs de vitesse, les profils de vitesse parallèle et perpendiculaire au pli ont été déterminés et sont également présentés sur la Figure 109.

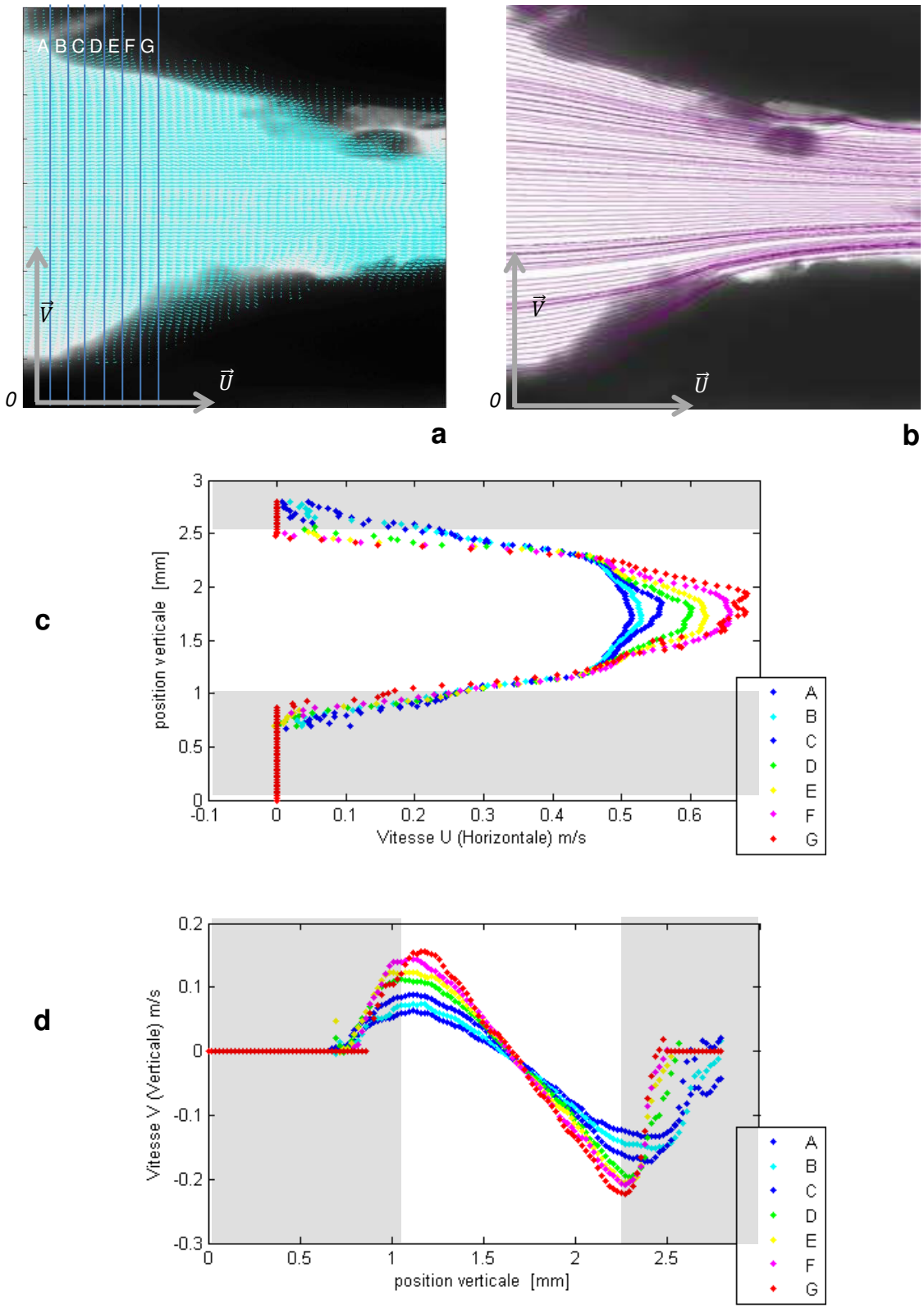


Figure 109 : Champs de vitesse acquis par PIV en entrée de pli (a), lignes de courant dans le pli (b), profil de vitesse selon l'axe parallèle au pli (c), et perpendiculaire (d). Les profils sont représentés pour les lignes A, B, C, D, E et F représentées en (a). (Les zones grisées se trouvent dans des zones où le medium réduit la visibilité de l'ensemencement)

Ces profils montrent des écoulements laminaires et sans tourbillons ce qui va à l'encontre des explications proposées par Gervais (2013) pour expliquer les répartitions d'écoulement qu'il a mesurées dans le pli (Figure 22). On peut également constater qu'une part non négligeable de l'écoulement passe par la zone plissée (Figure 109-c) ce qui confirme que la résistance du medium n'est pas affectée par le plissage de manière importante.

La comparaison de ces valeurs avec des valeurs simulées permettrait d'une part de valider les calculs effectués par des codes de calcul tel que Geodict©, d'autre part d'affiner les modèles. En effet, dans certains travaux de modélisation, la tête de pli est modélisée avec une porosité égale au reste du pli (Cheng et al. 2013) ou est considérée comme non poreuse (condition de mur) (Gervais 2013). A faible vitesse, ces hypothèses jouent un rôle non négligeable dans la représentation de l'obstruction d'un pli. C'est donc dans cette zone que la modélisation doit être la plus proche possible de la réalité.

En reproduisant en deux dimensions la géométrie du pli dans Ansys© CFX (Figure 110) et en renseignant les valeurs de compacité et de perméabilité mesurées, on peut, pour les conditions de filtration données, calculer les écoulements dans le pli et les comparer aux valeurs mesurées.

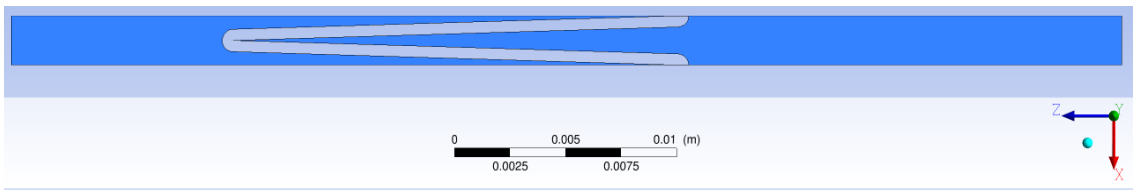


Figure 110 : Représentation de la géometrie du pli sous Ansys© CFX

La Figure 111 illustre les lignes de courant calculées en résolvant les équations de Navier Stokes en régime stationnaire (RANS).

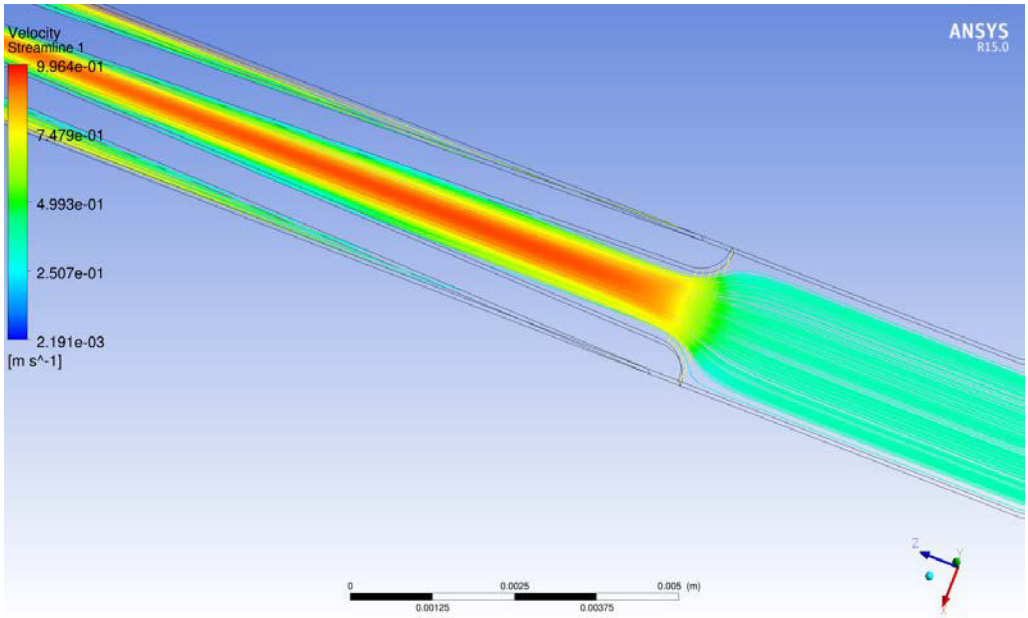
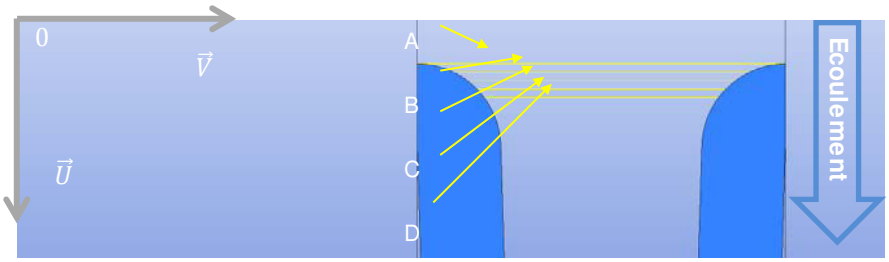
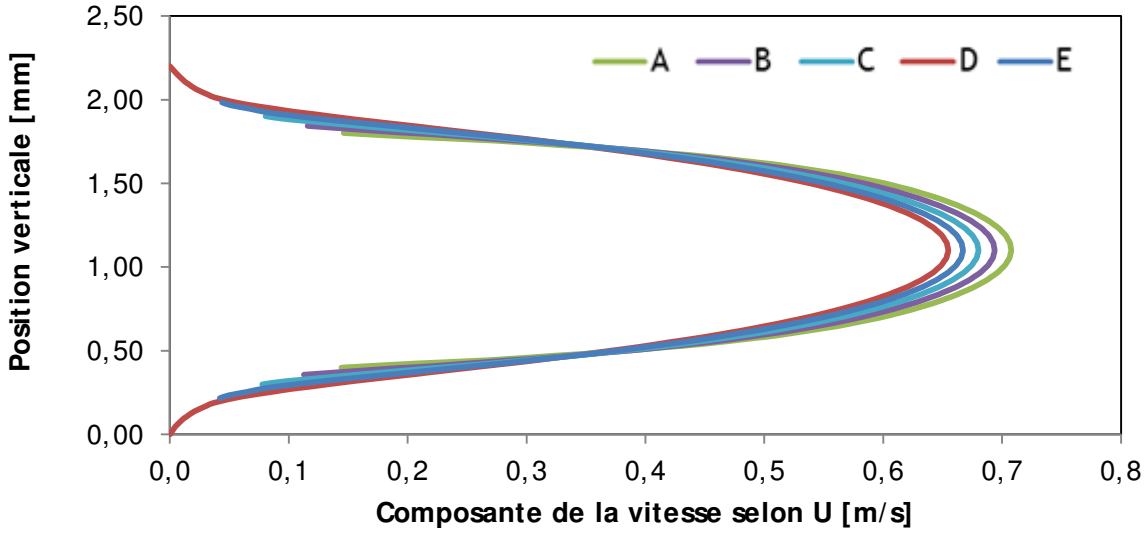


Figure 111 : Lignes de courant calculées sous Ansys© CFX

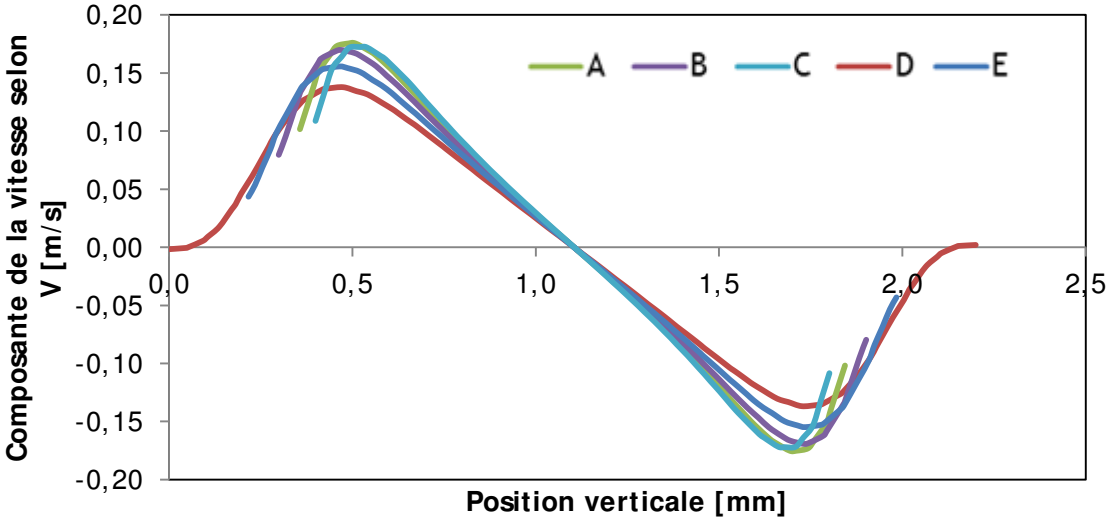
Les vitesses calculées en entrée de pli sont représentées *Figure 112*.



a



b



c

Figure 112 : (a) Lignes sur lesquelles la vitesse calculée par Ansys© CFX est représentée (b) profil de vitesses dans l'axe U (b) profil de vitesse dans l'axe V.

Ces profils de vitesse calculés présentent un bon accord avec ceux mesurés expérimentalement. Malgré tout, pour obtenir une modélisation numérique du colmatage fidèle à la réalité, il est nécessaire d'inclure des paramètres observés et mesurés précédemment qui sont difficilement intégrables dans ce type de modélisation. Ainsi, on peut citer :

- la déformation du medium (lors des premiers instants du cycle de vie d'un filtre) impose de faire évoluer la rigidité du medium en fonction de la masse de particules accumulées et des écoulements,
- la présence de défaut en surface du medium et dans le dépôt qui provoque l'obstruction du pli à faible vitesse,
- la prédiction de la porosité des dépôts formés qui à ce jour reste mesurable mais peu prédictible.

Ces problématiques doivent être surmontées pour, à terme, construire un modèle numérique permettant de s'affranchir d'expériences difficiles à réaliser, chronophages et limitées en termes d'observation.

6. CONCLUSION

Cette partie, dédiée à la spécificité des filtres plissés, a permis de mettre en évidence plusieurs phénomènes intervenant lors de l'utilisation de filtre plissé.

Dans un premier temps, en ce qui concerne le comportement du filtre vierge, il se trouve que, pour des vitesses de filtration ne dépassant pas 3 cm/s, le filtre vierge se comporte comme un filtre plan. Les faibles vitesses d'écoulement dans le pli ainsi que la rigidité du medium ne permet pas une déformation suffisante du medium pour réduire la surface de filtration de manière mesurable sur la perte de charge. Toutefois, dans le cas d'une utilisation du filtre à une vitesse supérieure à 3 cm/s, la réduction de la surface efficace de filtration engendre une perte de charge supplémentaire. Ce changement de surface efficace a naturellement une influence sur la vitesse locale de filtration et donc sur la perte de charge mais également sur l'efficacité de filtration. L'utilisation du calcul numérique permet ici de prédire la forme de la déformée et peut permettre d'accélérer et d'améliorer la conception de nouvelles géométries de plissage pour des filtres THE.

Dans un deuxième temps, en cours de colmatage, l'apparition d'une augmentation rapide de la perte de charge pour une masse donnée de particules (réduction de surface) a été reproduite avec des aérosols d'alumine. L'accumulation des particules dans le medium a été mesurée par extinctiométrie. Conformément aux calculs de remplissage, ces mesures montrent que le pli ne présente pas un profil de remplissage optimal aux faibles vitesses de filtration, et ce, même en tenant compte de la variation de porosité du dépôt avec la vitesse.

L'observation directe de l'entrée de pli lors du colmatage a permis de comprendre les phénomènes pouvant influencer le remplissage du pli. La présence de singularités (dont les plus évidentes sont les fibres brisées lors de la mise en forme du pli) engendre un dépôt qui obstrue le pli prématurément. L'influence de la vitesse sur ce phénomène serait due au réentraînement de ces dépôts vers l'intérieur du pli avant qu'ils n'atteignent un volume suffisant. Ce réentraînement ne pouvant intervenir qu'à partir d'une vitesse « seuil », la réduction de surface prématurée n'intervient que pour des vitesses de filtration faibles.

Enfin, bien que ces mesures soient, à l'heure actuelle, incomplètes, la faisabilité de la mesure des champs de vitesse dans un pli a été démontrée, les premiers résultats offrent une résolution de mesure importante et les perspectives sont ouvertes pour l'étude expérimentale de la filtration des aérosols.

CHAPITRE V : MODELISATION

L'objectif de ce travail de recherche est, à terme, de proposer un modèle phénoménologique permettant de prédire de manière simple, l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé. Sur la base des mesures et observations faites dans les chapitres précédents, un modèle de colmatage de filtres plans est proposé. Ce modèle rend compte des phases de filtration profonde et en surface ainsi que de la transition entre ces phases.

Dans la seconde partie de ce chapitre, des propositions sont faites pour établir un modèle de colmatage de filtre plissé qui puisse tenir compte de l'obstruction du pli. Bien qu'embryonnaire et nécessitant de nouvelles expériences, cette approche se veut la plus fidèle possible des phénomènes réellement observés lors du colmatage d'un pli.

1. FILTRE PLAN

Dans la littérature, différents modèles prédictifs sur l'évolution de perte de charge d'un medium chargé en particules (Davies 1973, Bergman et al. 1976, Letourneau et al. 1992) considèrent le chargement du medium en particules comme un ajout de fibres au medium. Toutefois, ces modèles ne sont pas applicables à des particules très fines. De même, la perte de charge d'un dépôt de particules très poreuses a été modélisée par plusieurs auteurs (Novick et al. 1992, Endo et al. 1997), bien que ces modèles soient d'une pertinence limitée pour des valeurs de porosité très élevées (Mauret et al. 1997, Tien et al. 2012).

Dans le cadre de ce travail, nous avons proposé l'établissement d'un modèle de colmatage qui repose sur les hypothèses suivantes :

- le dépôt au sein du medium et dans les pores superficiels est considéré comme identique au gâteau de filtration obtenu à la surface du medium (compacité α_g=1-ε) ce qui semble une hypothèse raisonnable au vu de l'accumulation de particules fines sur les fibres (Kanoaka et al. 1998),
- le medium est considéré homogène et de compacité α.

La Figure 113 illustre la configuration retenue pour ce modèle.

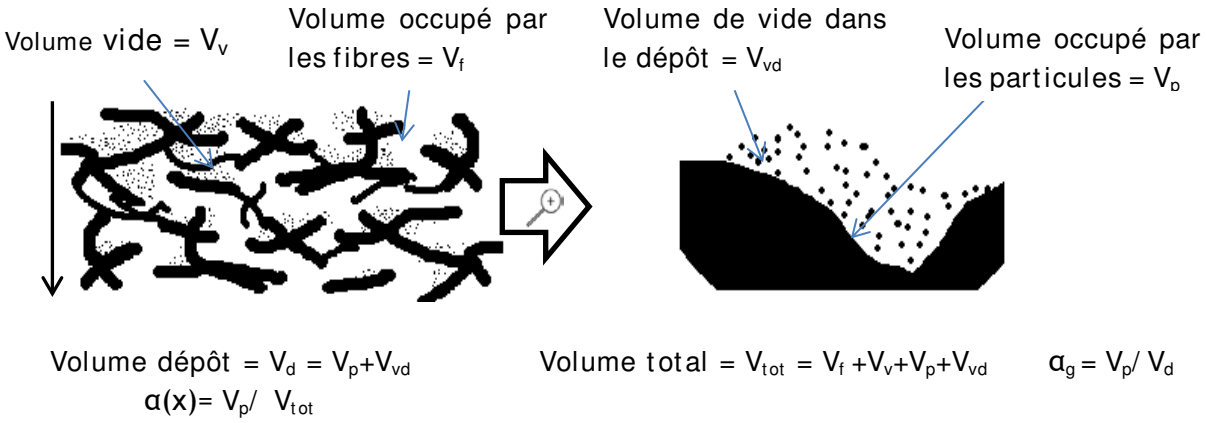


Figure 113 : Illustration de la configuration du modèle

1.1. Point de colmatage

Lors de l'évolution de perte de charge d'un filtre plan, on distingue classiquement deux phases (Thomas et al. 2001). Lors du chargement du medium filtrant, la première couche du medium arrive à saturation et conduit à la formation du dépôt en surface. La masse accumulée dans le filtre à ce stade se définit comme le point de colmatage. Parmi les définitions du point de colmatage (chapitre III), nous retiendrons la définition de Japuntich et al. (1995). En effet, à partir de ce point, peut être directement appliquée la relation liant l'augmentation de l'épaisseur du dépôt à la perte de charge. Au cours du colmatage, les particules s'accumulent au sein du medium selon un profil exponentiel. Ce profil tient une importance forte pour la masse collectée par le filtre durant la filtration profonde. L'expression [20] (dans laquelle le paramètre K dépend de l'efficacité de collecte du medium) sera utilisée pour caractériser la forme de ce profil. La fraction de volume occupée par le dépôt et les fibres pour une profondeur x donnée s'exprime donc par :

$$\alpha_{tot} = \alpha + \left(\frac{\alpha(x)}{\alpha_g}\right) \qquad [48]$$

avec α, la compacité du medium vierge. Le dépôt accumulé au sein du medium présente donc une forme exponentielle et a une porosité α_g. La formation d'un gâteau débute lorsque le dépôt occupe tout le volume vide et donc lorsque α_{tot} atteint la valeur 1. m_{Cp}, la masse atteinte lors du début de la phase de filtration en surface s'exprime donc ainsi :

$$m_{Cp} = \frac{S_f.\alpha_g.\rho.\left(1-e^{-kZ}\right).(1-\alpha)}{k} \qquad [49]$$

1.2. Perte de charge

Pour modéliser la perte de charge du filtre et son évolution, une modélisation de la matrice fibreuse constituant le medium réel est utilisée. Ce milieu équivalent est représenté sur la Figure 114. Il est composé de capillaires identiques creux et cylindriques de diamètre d_{eq}, traversant un parallélépipède solide. La fraction solide (compacité), ainsi que la surface spécifique (rapport de la surface de contact écoulement-fibres sur le volume des fibres) du milieu équivalent, sont fixées identiques à celles du medium réel.

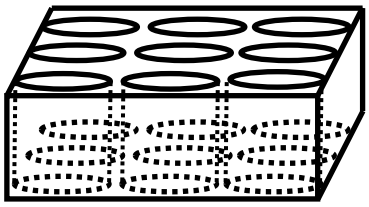


Figure 114 : Représentation schématique du milieu équivalent modélisant un medium fibreux.

Par analogie avec le médium vierge réel, l'écoulement est laminaire dans les capillaires du milieu équivalent vierge. Le débit passant par le capillaire est alors déterminé à partir de la

vitesse de filtration. La perte de charge à travers un capillaire peut donc s'exprimer à partir de la relation de Poiseuille [50] :

$$\Delta P = \frac{128.\mu.Q.Z^*}{\pi.{d_{eq}}^4} \qquad [50]$$

Avec Q, le débit à travers un capillaire tel que $Q = \frac{\pi.d^2.V_f}{4}$, d_{eq} le diamètre d'un capillaire vide et $Z^*=\alpha.Z$, l'épaisseur du milieu équivalent (pour respecter les conditions de compacité et surface spécifique identiques au médium réel).

A partir de l'équation [50], le diamètre d_{eq} des capillaires s'exprime donc :

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{32.V_f.Z*.\mu}{\Delta P_0}} \qquad [51]$$

Durant la phase de filtration profonde, le coefficient de pénétration des aérosols (donc l'efficacité locale de filtration) du médium équivalent est fixé identique à celui du medium réel. L'écoulement à travers un capillaire du medium équivalent en cours de colmatage peut alors être représenté par deux écoulements en parallèle (Figure 115) :

- l'écoulement à travers la section colmatée du capillaire, de débit Q_d,
- l'écoulement à travers la section libre (non colmatée) du capillaire, de débit Q_c, dont le diamètre diminue au fur et à mesure que le dépôt croît.

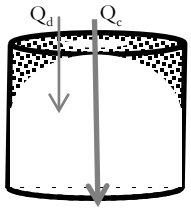


Figure 115 : Capillaire rempli durant la filtration profonde

L'expression [52] relie simplement les différents débits considérés à travers le capillaire :

$$Q = Q_d(x) + Q_c(x) \qquad [52]$$

Le système ainsi présenté dispose d'une perte de charge qui peut être caractérisé par l'un ou l'autre des écoulements décrits ci-dessus. On peut déterminer la répartition des écoulements à partir de la résistance aéraulique propre au dépôt formé dans le capillaire ou de la fraction libre de ce capillaire par des relations connues. Ainsi, pour l'écoulement à travers la section colmatée du capillaire, la perméabilité d'un dépôt de particules est usuellement modélisée dans la littérature par la relation de Kozeny-Novick [53] en utilisant l'expression de Chen (1955) [54] pour la constante de Kozeny h_k.

$$\Delta P_g = h_k \frac{36.\alpha_g.\mu.Q_d.m}{Cu.\varepsilon^3.\rho_p.{D_p}^2.S^2} \qquad [53]$$

$$h_k = 4{,}7 + e^{(14.(\varepsilon - 0{,}8))} \quad [54]$$

Récemment, un modèle de perte de charge pour des dépôts d'agrégats a été développé par Thomas et al. (2014) [55]. Ce modèle est ici utilisé pour le calcul de perte de charge du dépôt dans le cas d'agrégats. Pour simplifier, nous ne considérons pas de coefficient de recouvrement.

$$\Delta P_g = \frac{96\,.\alpha_g{}^{0.5}\,(1+56.\alpha_g{}^3)\,Q_d}{Cu\;D_{pp}^2\,\rho_p\,S^2}.\,\mu.\,m \quad [55]$$

Le diamètre D_{pp} utilisé pour les agrégats est le diamètre des particules primaires.

Concernant la perte de charge engendrée par l'écoulement dans la section libre du capillaire, la relation utilisée est celle de Poiseuille [51] quel que soit le type de particules. À la profondeur x, les paramètres Q et d_{eq} de l'équation [51] sont remplacées par Q_c, le débit passant dans le capillaire (Figure 115) et d_e, le diamètre équivalent de la section libre à la profondeur x. Q_c et d_e dépendent tous deux de x. Ainsi, la perte de charge locale à la profondeur x devient :

$$\Delta P_c(x) = \int_0^x \frac{128.\mu.Q_c(x)}{\pi d_e(x)^4}\,dx \quad [56]$$

avec:

$$Q_c(x) = \frac{\pi.d_e(x)^2.V_f}{4} \quad [57]$$

Dans les expressions [56] et [57], $d_e(x)$ dépend aussi de la porosité du dépôt ε et de la fraction de particules collectées à la profondeur x, α(x) [20]. Ainsi, le diamètre équivalent est exprimé par la relation [58].

$$\pi.\,d_e(x)^2 = \pi.\,d_{eq}{}^2.\left(\frac{1-\alpha(x)}{\alpha_g}\right) \rightarrow d_e(x) = d_{eq}.\sqrt{1-\frac{\alpha(x)}{\alpha_g}} \quad [58]$$

Afin d'obtenir la valeur de perte de charge en fonction de la masse de particules déposées, une discrétisation du problème a été effectuée : le capillaire a été divisé en n tranches, chaque tranche i à une épaisseur z_i (Figure 115). L'épaisseur équivalente Z* du medium vaut $Z^* = \sum_{i=1}^{n} dx_i$. Pour chaque tranche i, la fraction de particule α_i et le diamètre équivalent $d_{e\,i}$ sont calculés ([20] et [58]). De plus, la surface de dépôt $S_{d\,i}$ pour chaque tranche i [60], s'exprime par:

$$S_{d\,i} = \frac{\pi}{4}.\,(d_{eq}{}^2 - d_{e\,i}^2) \quad [59]$$

Pour chaque tranche i:

$$\Delta P_{gi} = h_k\,\frac{36.\alpha_g.\mu.Q_{di}.m_i}{Cu.\varepsilon^3.\rho_p.D_p{}^2 S_{di}^2}$$ avec le modèle de Kozeny-Novick (1992) [60]

ou $\Delta P_{gi} = \frac{96\,\alpha_g{}^{0.5}\left(1+56\,.\alpha_g{}^{3}\right)Q_{di}}{Cu\;D_{pp}^2\,\rho_p\,S_{di}^2}\mu m_i$ avec le modèle de Thomas et al. (2014) [61]

La relation de Poiseuille s'écrit alors pour chaque tranche i :

$$\Delta P_{c\,i} = \frac{128.\mu.Q_{c\,i}}{\pi d_{e\,i}^4} z_i \qquad [62]$$

Pour chaque tranche, en se basant sur le principe d'équilibre des pressions $\Delta P_{c\,i} = \Delta P_{g\,i}$ écrit pour chaque tranche i ([60] à [62]), on peut calculer la répartition des débits dans la section colmatée et dans la section libre du capillaire. A partir de la masse de particules m_i accumulées à la tranche i, on peut alors obtenir la perte de charge du medium durant la filtration profonde. Les expressions ont été implémentées dans Matlab© avec les conditions initiales pour obtenir la variation de perte de charge (ainsi que la masse accumulée au point de colmatage) en fonction de la masse de particules déposée. Enfin, lorsque d_{ei} tend vers 0, le medium est saturé et l'intégralité du gaz passe par le dépôt. La filtration en surface commence alors (Figure 116).

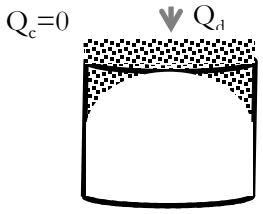


Figure 116 : Capillaire obstrué / filtration en surface

1.3. Comparaison modèle expérience

Le modèle développé a été comparé aux valeurs expérimentales obtenues lors du colmatage de filtres plans avec des aérosols d'alumine et de carbone. Les informations relatives au medium ont été mesurées par les techniques décrites au chapitre II. Le tableau 18 présente les données utilisées pour la confrontation entre l'expérience et le modèle.

Tableau 18 : données d'entrée utilisées pour la comparaison avec des résultats expérimentaux

	Alumine	Carbone
Vitesse de filtration [cm/s]	0,8	0,8
Viscosité dynamique du gaz [Pa.s]	1,8 10^{-5}	2,25 10^{-5}*
Perte de charge initiale [Pa]	20	27
Coefficient de pénétration K [m^{-1}]	21500	60000
Masse volumique des particules [g/cm^3]	3,97	1,95**
Porosité du dépôt [-]	0,927	0,979
Diamètre des particules [µm]	0,25	0,01
Epaisseur du medium [µm]	420	420
Compacité du medium [-]	0,065	0,065

*le gaz porteur est de l'argon du fait de l'utilisation du générateur Palas GFG 1000
**Wentzel et al. 2003

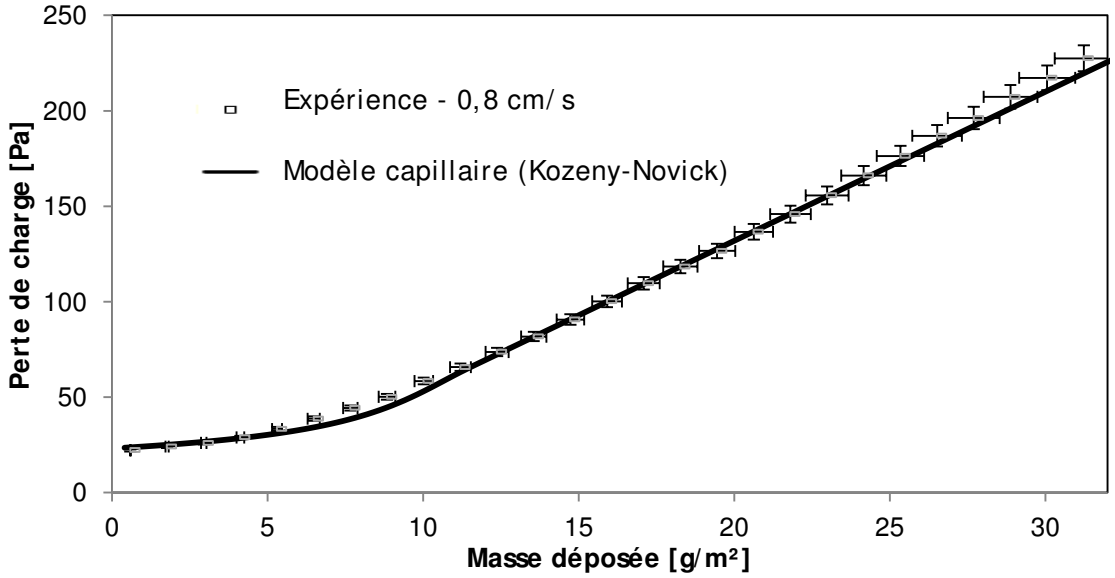


Figure 117 : Comparaison des courbes de colmatage expérimentales et obtenues par le modèle capillaire pour un filtre colmaté par des particules d'alumine à une vitesse de 0,8 cm/s

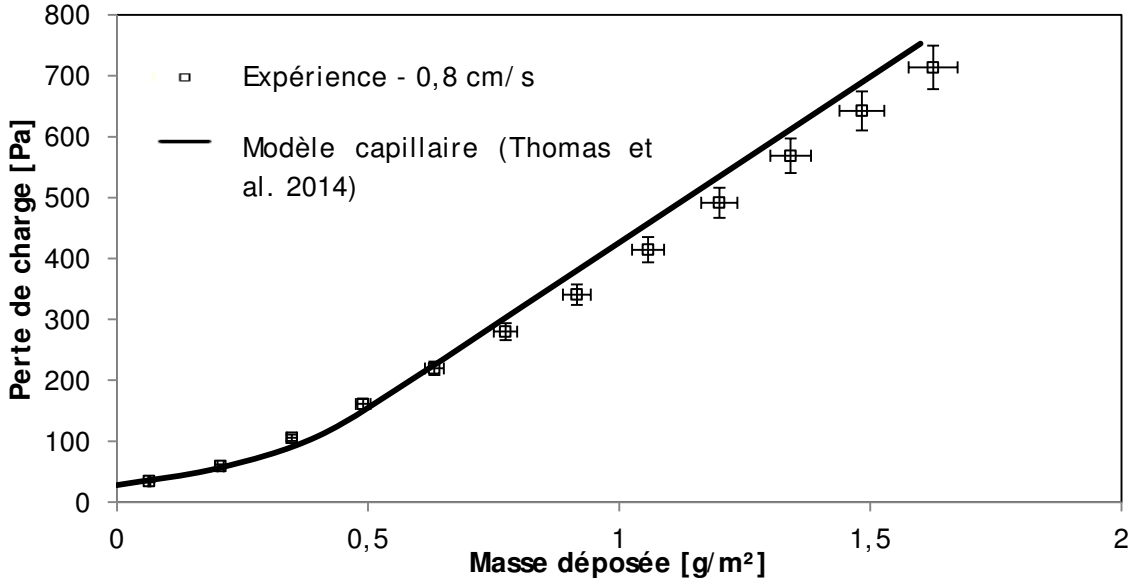


Figure 118 : Comparaison des courbes de colmatage expérimentales et obtenues par le modèle capillaire pour un filtre colmaté par des particules de carbone à une vitesse de 0,8 cm/s

Les Figure 117 et Figure 118 présentent la comparaison des courbes de colmatage expérimentales et obtenues par le modèle capillaire. Dans le cas des aérosols de carbone, le modèle de Thomas et al. (2014) a été utilisé pour le calcul de la perte de charge du gâteau, tandis que pour les aérosols d'alumine, c'est celui de Novick et al. (1992) qui a été utilisé.

Une déviation au modèle peut être observée lors de la phase de filtration en surface. Cela peut s'expliquer par le fait que l'influence du medium sur la structure du gâteau n'a pas été prise en compte et que la structure du dépôt est considérée isotrope. En outre, la polydispersion des particules et la dispersion des caractéristiques du medium n'ont pas été prises en compte.

Malgré tout, pour les deux cas investigués, on observe un accord satisfaisant, en particulier pour la prédiction du point de colmatage.

2. FILTRE PLISSE

Les observations et mesures effectuées sur un medium plissé sur l'expérience OOPS ont conduit à considérer plusieurs phénomènes intervenant dans l'augmentation de résistance aéraulique d'un filtre plissé. Les éléments identifiés qui interviennent avant et pendant le colmatage sont :

- la déformation du medium,
- la réduction de surface due à la croissance du gâteau (Del Fabbro 2001 et Hettkamp et al. 2012),
- l'accumulation préférentielle en entrée de pli à faible vitesse qui conduit à son obstruction.

Dans une problématique de sûreté, la situation la plus pénalisante est le comportement des filtres à basse vitesse. Dans le cas d'un accident, le colmatage du filtre engendre alors une baisse du débit de filtration qui elle-même engendre une accélération du colmatage du filtre.

Nous avons montré qu'à la vitesse nominale, la surface efficace reste optimale. La déformation peut alors ne pas être considérée dans les conditions de fonctionnement sur lesquelles cette étude s'est portée. Ainsi, seules la croissance du dépôt et la fermeture du pli seront considérées.

2.1. Réduction géométrique de la surface

Del Fabbro (2001) a proposé un modèle géométrique pour modéliser la réduction de surface sur un filtre plissé (Figure 119).

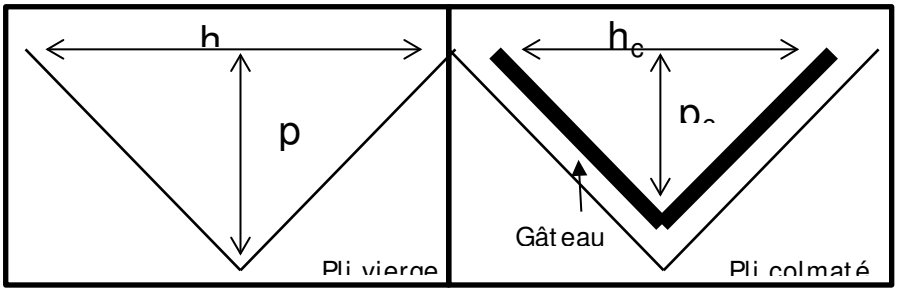


Figure 119 : illustration du modèle de Del Fabbro

En cas d'augmentation homogène du dépôt, le pas de plissage p_c devient (considérant l'angle de plissage très faible) :

$$p_c = p - 2.e_g \qquad [63]$$

avec e_g, l'épaisseur du dépôt et p le pas de plissage initial. De même, la profondeur de pli devient :

$$h_c = h.\left(\frac{\frac{2.m}{S_f}}{p.\rho_p.\alpha_g}\right) \qquad [64]$$

avec m la masse accumulée dans le pli, S_f la surface de medium dans le pli, h, la profondeur initiale de pli, ρ_p et α_g respectivement la masse volumique des particules et la compacité du dépôt.

A partir de ces relations, le taux de réduction de surface efficace devient :

$$Tx_{surf} = \frac{\sqrt{(p^2+h^2)}}{\sqrt{(p-2.e_g)^2+\left(h.\left(\frac{\frac{2.m}{S_f}}{p.\rho_p.\alpha_g}\right)\right)^2}} \qquad [65]$$

En partant de ce constat, la réduction de surface est proportionnelle à la compacité du dépôt.

Pour un filtre plissé, la perte de charge peut alors s'écrire :

$$\Delta P_{redsurf} = Tx_{surf.}(\Delta P_{medium} + \Delta P_g) \qquad [66]$$

A titre d'exemple, le taux de surface perdu par gramme de particules est alors représenté Figure 120 avec des particules de densité 1, en fonction de la compacité des dépôts, qui dans ce cas, serait la seule variable influant la réduction de surface.

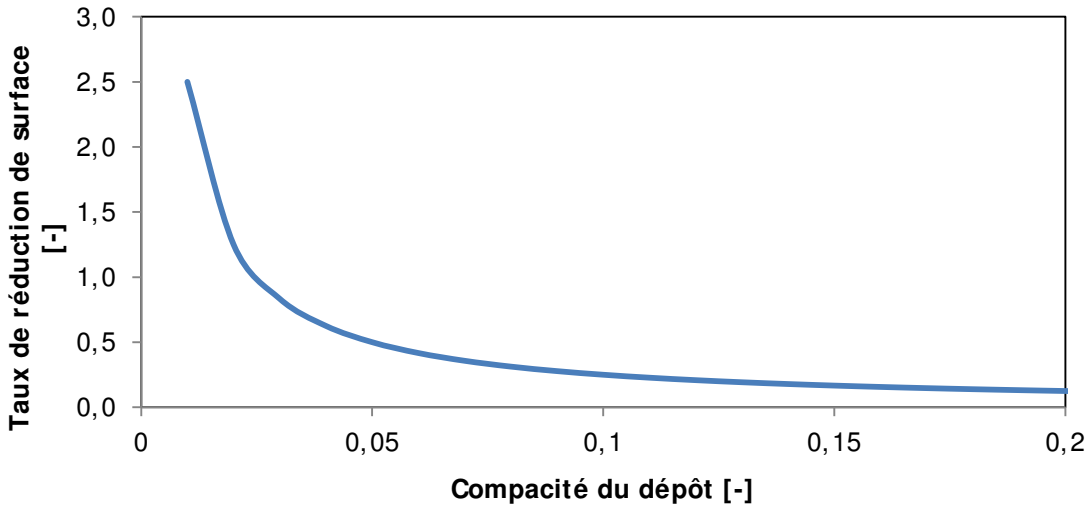


Figure 120 : Taux de réduction de surface d'après le modèle de dépôt homogène de Del Fabbro (2001)

Par régression linéaire, on peut obtenir graphiquement ce taux pour des valeurs expérimentales (à partir de la valeur de la pente durant la réduction de surface). Ainsi, la Figure 121 présente le taux de réduction de surface obtenu en fonction de la vitesse de filtration (car pour ces données, nous n'avons pas accès à la porosité du dépôt par les expériences de la littérature).

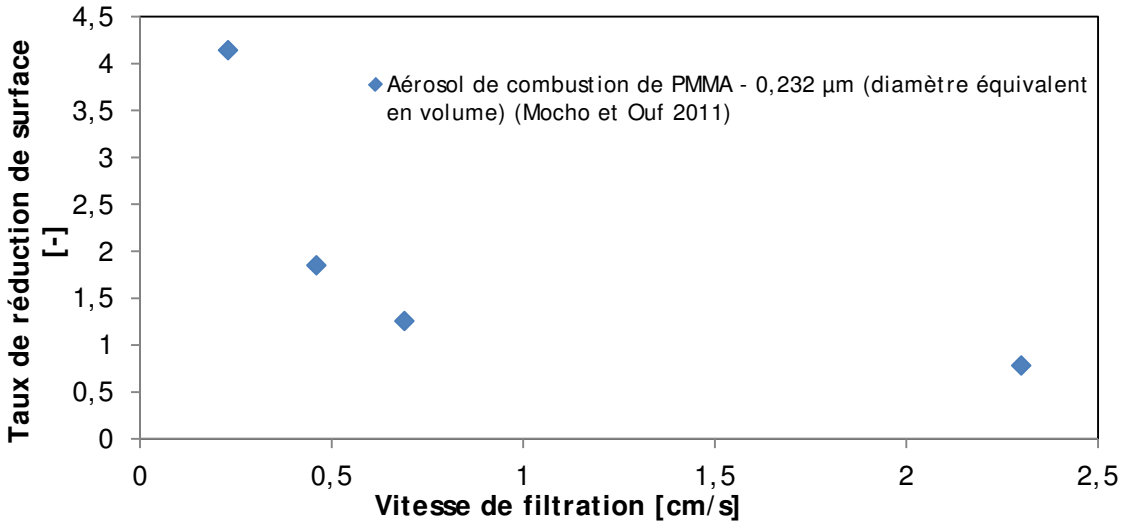


Figure 121 : Taux de réduction de surface relevé pour un colmatage issu de la littérature, effectué par avec des particules issues de la combustion de PMMA en fonction de la vitesse de filtration (Mocho et Ouf 2011)

Pour obtenir des valeurs similaires de taux de réduction de surface, il faudrait que la compacité du gâteau, dans le cas des particules issues de combustion de PMMA, varie d'un facteur supérieur à 10, pour la gamme de vitesse présentée. Or, les courbes de colmatage sont identiques jusqu'à un certain point (Figure 28), ce qui ne serait pas le cas pour des

différences significatives de compacité. En outre, l'absence de dépendance entre la résistance aéraulique de dépôts de particules submicroniques et la vitesse a été prouvée par Thomas (2001), ce qui va dans le sens d'une absence de variation de compacité. En conséquence, la réduction de la surface de filtration ne peut pas être le seul fait d'une variation de la compacité des dépôts, ce qui confirme les observations du pli en cours de colmatage, réalisées dans le chapitre précédent. En effet, ces observations nous ont permis de mettre en évidence un phénomène d'obstruction de pli à basse vitesse.

Sur la base de ces observations, nous proposons de modéliser le dépôt de particules au sein du pli (en hachuré sur la Figure 122) en utilisant une efficacité de collecte E et un seuil de réentraînement R des dépôts.

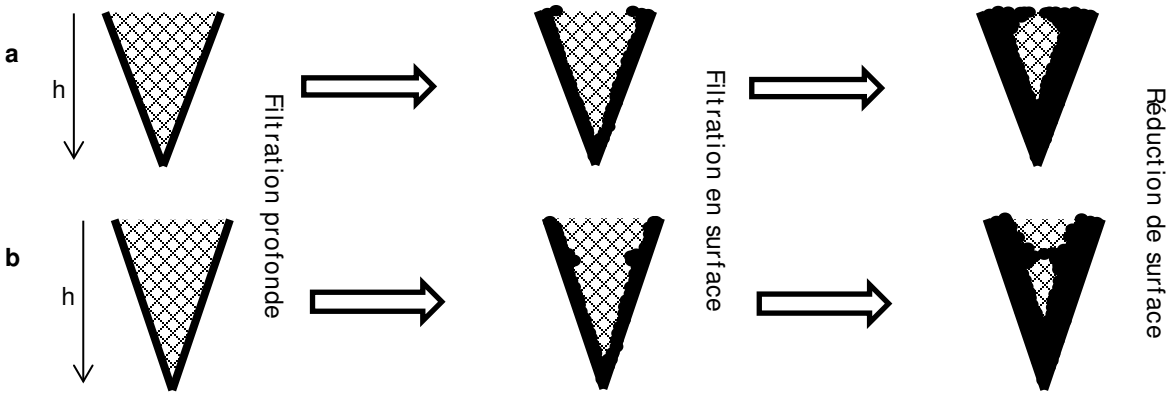


Figure 122 : Illustration de l'obstruction d'un pli à faible vitesse (a) et à une vitesse plus importante (b)

Lors des observations effectuées sur OOPS, notamment celles en entrée de pli, la formation d'amas de particules qui bouchent l'entrée du pli a été constatée à basse vitesse (Figure 107). A plus haute vitesse, ces amas sont continuellement entrainés vers l'intérieur du pli (Figure 106). Ces phénomènes sont corrélés avec l'accroissement de perte de charge, signe d'un bouchage du pli. De plus, bien que ces résultats n'aient pas pu être enregistrés, le fond du pli montre un remplissage faible dès que la vitesse de filtration est inférieure à 1,25 cm/s.

Les expériences conduites par extinctiométrie à 0,25 cm/s montrent également une forme de remplissage hétérogène et une obstruction totale du pli lorsque la perte de charge augmente très rapidement. Cette obstruction, non observée à la vitesse nominale, est le signe de la formation d'une arche lors de la réduction de surface.

2.2. Efficacité de collecte du pli

Dans le cas le plus défavorable, la vitesse de filtration est insuffisante pour provoquer un réentraînement des dépôts dans le pli. Ainsi, de la même manière que les particules s'accumulent dans un capillaire (Figure 115), on peut considérer en première approximation que les particules s'accumulent dans le pli en suivant un profil exponentiel. Si l'on considère une efficacité de collecte propre au pli, on peut donc faire une analogie avec le profil de pénétration dans un medium plan et appliquer la relation [20] avec un coefficient de

pénétration dans le pli que nous nommons k_{pli}. La Figure 123 illustre le pli obstrué à basse vitesse et la forme du profil d'accumulation des particules dans le pli.

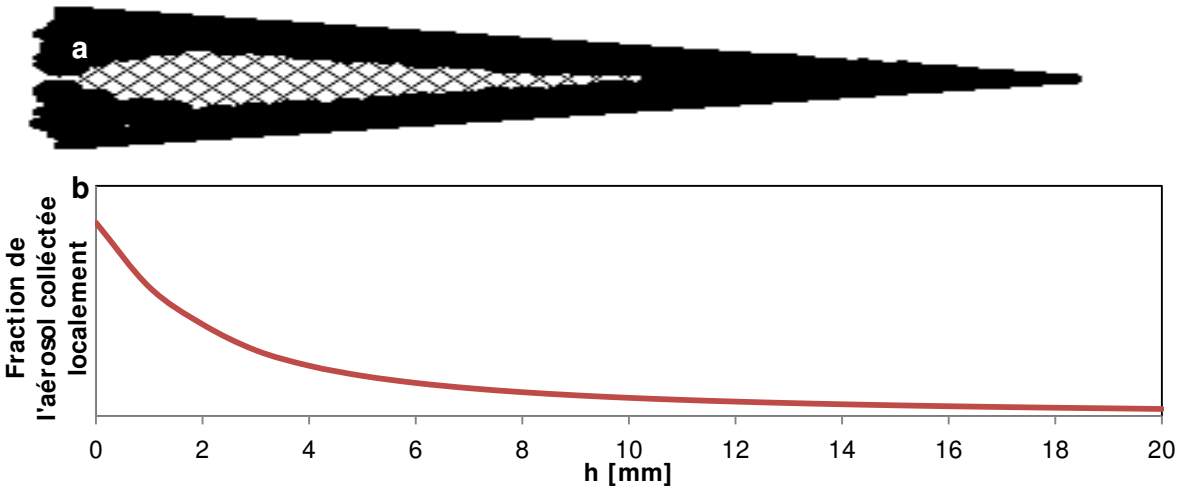


Figure 123 : Illustration du pli colmaté à basse vitesse (a) et la fraction de particules qui y sont collectées (b)

De la même manière que pour déterminer la masse atteinte lors du point de colmatage pour un filtre plan, on peut reprendre l'expression utilisée pour prédire la masse atteinte lors de l'obstruction d'un pli m_{cpli} :

$$m_{Cpli} = \frac{S_{pli}.\alpha_g.\rho.\left(1-e^{-k_{pli}h}\right).(1-\alpha_{pli})}{k_{pli}} \qquad [67]$$

avec S_{pli}, la surface de la nappe de medium plissé, α_{pli}, la fraction de volume occupée par le medium à l'entrée du pli, fonction du pas de plissage et de l'épaisseur du medium. Dans cette expression, il est uniquement nécessaire de fixer la valeur de k_{pli} pour obtenir la masse de particules nécessaire pour boucher le pli.

La principale limite de ce modèle est le fait que la tête du pli présente parfois une forme arrondie. Il est, dans ce cas, difficile d'estimer une valeur de α_{pli} (Figure 34). Il est également difficile d'assigner une valeur à k_{pli} car le débit dans le pli, contrairement à celui dans un medium, n'est pas constant.

Malgré ces constats, il est possible, sur la base de cette expression, de déterminer une valeur critique de m_{cpli} dans le cas le plus défavorable possible (correspondant à une efficacité maximale et à l'absence de réentraînement).

2.3. Réentraînement des dépôts

Les dépôts formés dans le pli par l'accumulation de particules sont soumis à un réentraînement continu lorsque la vitesse est suffisante. L'observation de l'entrée du pli sur l'expérience OOPS montre un réentraînement qui a lieu par « amas ». Ainsi, pour une singularité accumulée à l'entrée du pli, on peut considérer la contrainte de rupture R_m comme dépendante uniquement des forces de cohésion entre les particules et de la compacité du dépôt formé.

La force de trainée qui s'exerce sur une de ces singularité peut s'exprimer par :

$$\overrightarrow{Ft} = \iint_0^{S_s} C.V_{loc}{}^2.dS \qquad [68]$$

Avec C, le coefficient de force de trainée de la singularité, V_{loc}, la composante de vitesse locale de l'écoulement dans la direction du pli et S_s la surface projetée tel que $S_s=f(m, E, \alpha_g)$. La contrainte R_t engendrée par cette force dans le dépôt s'exprime par :

$$Rt = \frac{\overrightarrow{Ft}}{Sec} \qquad [69]$$

avec Sec, la section de la singularité tel que $Sec=f\ (m, E, a_g)$.

Ainsi, pour une singularité donnée, le réentraînement aura lieu si $Rt>Rm$ avant qu'une arche n'ait eu le temps de se former. Or, selon la position dans le pli, la masse nécessaire sera différente (en raison de la forme en V du pli). La Figure 124 illustre la formation d'une arche au sein du pli.

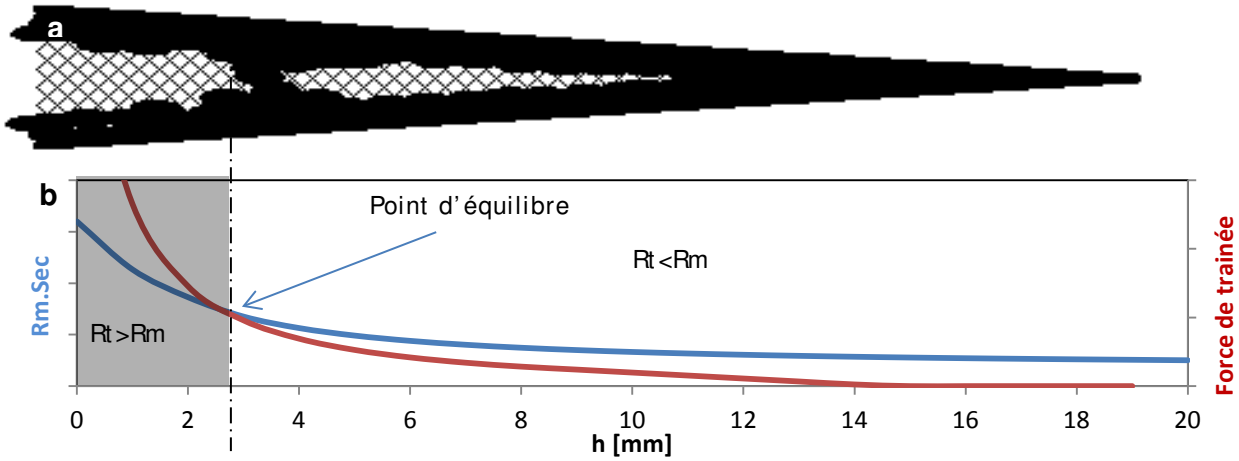


Figure 124 : Illustration de la formation d'une arche dans le pli, (a) schéma de la formation de l'arche, (b) courbe représentant l'équilibre des forces dans le pli, en gris la zone de réentraînement

Il existe donc un point d'équilibre dans le pli où la vitesse de l'écoulement est suffisamment faible pour engendrer une obstruction. Plus ce point est profond, moins la réduction de surface sera importante.

2.4. Perte de charge

A partir des considérations énoncées précédemment, le calcul de la perte de charge via des méthodes analytiques est complexe.

Les éléments rendant complexes ce calcul sont :

- l'obstruction du pli qui intervient dans les trois dimensions,
- les vitesses d'écoulement dans le pli qui sont influencées par le colmatage,

- la rugosité du dépôt (exprimé par un coefficient de friction dans le modèle de Callé et al. 2005) qui engendre une perte de charge additionnelle,
- la réduction de la section de passage de l'air dans le pli qui engendre également une perte de charge additionnelle.

Il est toutefois possible de donner un encadrement de la perte de charge d'un filtre plissé en considérant :

- comme limite haute, un profil d'accumulation des particules dans le dépôt comme maximal et un réentraînement inexistant. Ceci amène à considérer que la perte de charge du filtre n'évolue pas pour des masses inférieures à m_{cpli} (phase de formation de l'arche) puis une évolution de la perte de charge suivant la loi de Kozeny-Novick (1992) ou de Thomas et al. (2014), en considérant la surface de filtration équivalente à la surface frontale du filtre,
- comme limite basse, une croissance homogène du dépôt avec une évolution de la perte de charge qui suit la loi de Del Fabbro (2001).

Le calcul de cet encadrement nécessite une valeur réaliste du profil de pénétration dans le pli k_{pli}, que nous ne sommes pas en mesure de déterminer aujourd'hui, faute de données expérimentales. La Figure 125 illustre néanmoins cette approche.

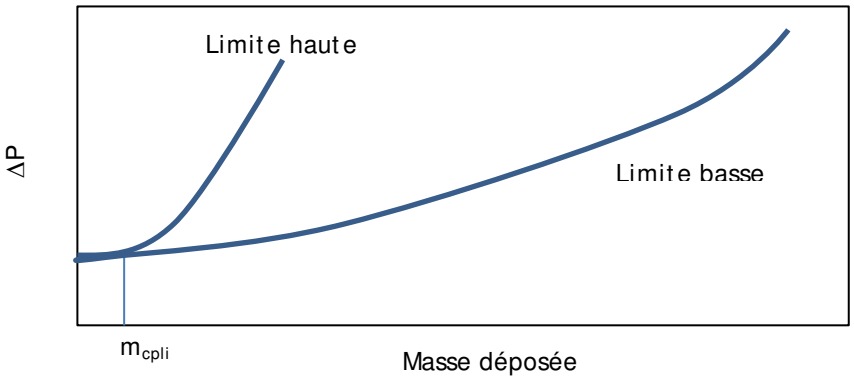


Figure 125 : Illustration de l'encadrement de l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé en cours de colmatage

2.5. Conclusion

A l'heure actuelle, les données expérimentales disponibles sont trop faibles pour quantifier les paramètres qui conditionnent le bouchage du pli. Des expériences analytiques sont nécessaires pour évaluer :

- la forme des singularités (Rapport Ss/ Sec),
- la cohésion des dépôts formés dans le pli R_m,
- l'efficacité de collecte E du pli (et son expression k_{pli}),
- le coefficient de force de trainée C,
- le champ de vitesses en tous points du pli.

Certains de ces paramètres peuvent être déterminés par calcul numérique à partir de données d'expériences à une échelle plus large, une partie de ces informations peut

également être empirique et s'éloigner de la phénoménologie du colmatage. La très grande variété de cas possibles (en particulier ce qui concerne la forme des singularités qui obstruent le pli) nécessitera une approche statistique pour lier les phénomènes œuvrant à petite échelle et les paramètres macroscopiques du colmatage, en particulier la relation résistance aéraulique / masse déposée.

Les principales limites de cette proposition de modèle résident dans sa complexité, en effet, le grand nombre de paramètres à inclure dans le modèle ainsi que la difficulté d'y avoir accès le rend très sensible. Ainsi, la démarche la plus pertinente par la suite serait de limiter le nombre de paramètre d'entrée et de le simplifier pour obtenir un nombre limité de grandeurs d'entrée plus facile à obtenir par l'expérience ou le calcul.

A l'heure actuelle, une modélisation empirique semble donc plus réaliste à court terme. Par la suite, sur une approche combinée calcul/expérience, un rendu phénoménologique du colmatage d'un pli sera envisageable.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail de thèse était d'acquérir de nouvelles données expérimentales et de concourir au développement d'un modèle de colmatage plus phénoménologique que les corrélations empiriques existantes, afin de disposer à terme d'outils prédictifs du colmatage de filtres THE industriels en cas d'incendie.

Pour ce faire, une méthodologie expérimentale spécifique a été déployée d'une part en réduisant l'échelle des expériences pour être capable de mesurer l'ensemble des phénomènes influant la perte de charge des filtres, d'autre part en développant des moyens expérimentaux spécifiques permettant la mise en œuvre d'une instrumentation dédiée à la caractérisation des media filtrants, du dépôt des aérosols et des écoulements d'air associés.

Compte tenu des différentes étapes de colmatage d'un filtre plissé industriel, la démarche retenue dans cette étude a été d'étudier, en premier lieu, le colmatage de filtres plans puis d'étendre nos travaux aux cas des filtres plissés qui présentent une phase propre de réduction de la surface de filtration en fin de colmatage. Les conditions sur lesquelles nous nous sommes concentrés ainsi que les aérosols qui ont été utilisés dans cette étude permettent d'apporter des éléments de compréhension extrapolables au cas de l'incendie. L'étude des faibles vitesses de filtration a permis de mieux comprendre les phénomènes responsables de l'obturation accélérée des filtres industriels lorsque les débits de filtration ne peuvent plus être maintenus en raison du colmatage des filtres. Les aérosols de colmatage des filtres ont été choisis pour leur morphologie et pour leurs différentes caractéristiques dimensionnelles afin de mieux comprendre l'effet des particules de combustion sur les filtres.

La première partie de cette étude, conduite sur des filtres plans, a permis :

- le développement de moyens précis de caractérisation d'un medium fibreux (diamètre de fibre, épaisseur et compacité),
- le développement d'un moyen de mesure de l'interaction medium/aérosol via l'observation de filtre colmaté (en utilisant la méthode de fixation proposée par Schmidt et al. (1990)),
- le développement d'un porte-filtre instrumenté destiné à la mesure continue de dépôts d'aérosol,
- la comparaison des modèles de perte de charge d'un dépôt de particule,
- la construction d'un modèle simple liant les grandeurs caractéristiques d'un filtre colmaté (porosité des dépôts, pénétration de l'aérosol dans le medium et caractéristiques du medium).

Concernant l'étude de la filtration sur filtre plissé, les travaux menés ont permis de mettre au point un banc expérimental permettant d'observer *in situ* le comportement mécanique et le colmatage d'un pli avec des moyens de mesure optique. Les observations ont permis :

- de mesurer un des phénomènes influant la perte de charge d'un filtre vierge soumis à un écoulement (déformation),
- de comprendre les phénomènes à l'œuvre lors de la réduction de surface observable sur les courbes de colmatage,
- de mesurer des grandeurs qui pourront directement être utilisées pour la validation de modèles numériques (champs de vitesse, répartition de particules dans le pli et augmentation de perte de charge),
- de poser les bases d'un modèle phénoménologique de colmatage des filtres plissés.

A l'heure actuelle, de nombreuses expériences restent à faire pour quantifier les paramètres qui conditionnent le colmatage d'un filtre plissé.

A l'échelle du filtre plan, la création d'une base de données sur la porosité des dépôts et la pénétration des particules dans le medium de différents types d'aérosol dans diverses conditions opératoires (vitesse, medium, orientation de l'écoulement) est à envisager. De plus, la compréhension du rôle de la morphologie des particules (dimension fractale, nombre de particules primaires) doit être approfondie.

Le développement de modèles numériques validés permettant de s'affranchir des expériences pour la détermination des nombreux coefficients et paramètres nécessaires constituera l'étape ultime de la compréhension de la filtration sur filtre plan. Si certaines études vont dans ce sens, la modélisation des media et des aérosols pertinents dans le domaine de la sureté nucléaire, reste sujette à caution.

L'étude expérimentale à petite échelle sur filtre plissé nécessite encore beaucoup d'efforts avec le développement d'expériences paramétriques permettant de quantifier l'influence des différents paramètres dans le but d'avoir une compréhension optimale des phénomènes et d'envisager une modélisation numérique fidèle du processus.

D'autres expériences à une échelle plus importante et qui permettraient d'achever la compréhension du phénomène de réduction de surface seraient :

- la modélisation couplée de la déformation du pli et des écoulements en son sein,
- la validation des modèles numériques d'écoulement dans un filtre vierge en utilisant la mesure de champ de vitesse par PIV,
- la réalisation de tomographie 3D en cours de colmatage du pli soumis à différents types d'aérosols afin d'observer la formation et les évolutions des dépôts dans le pli et de les relier à leur expression sur la perte de charge du pli,
- la validation des modèles numériques de formation de dépôt dans un pli,
- la mesure de l'interaction entre les plis et leur déformation pour les très hautes valeurs de perte de charge (l'expérience OOPS a été conçue pour offrir la possibilité d'observer deux plis),

- la modélisation de ces déformations et leur intégration dans les calculs d'écoulement.

Sur la base d'un modèle numérique complet et validé à plusieurs échelles, l'élaboration d'un modèle analytique simplifié pourra être envisagée.

Dans une perspective de sureté, les conditions spécifiques engendrées par un incendie devraient être prises en compte et intégrées dans la modélisation du comportement d'un filtre :

- des mesures doivent être conduites pour quantifier l'interaction du medium avec l'humidité, les vapeurs acides et les rejets d'hydrocarbure,
- l'influence de ces paramètres sur la filtration profonde et sur l'efficacité de filtration,
- le rôle que peuvent jouer ces paramètres sur la formation du gâteau de filtration en termes d'isotropie du dépôt et de porosité,
- l'influence qu'ils auront lors de la filtration sur medium plissé.

D'un point de vue plus global, les constats et les phénomènes qui seront identifiés sur des expériences à petite échelle doivent faire l'objet d'un travail d'interpolation aux filtres industriels. En effet, ces filtres ont une géométrie qui peut influencer leur colmatage (agencement en dièdres ou filtres cylindriques). Enfin, l'étude de l'effet du changement de débit en cours de colmatage (comme cela est le cas dans un réseau de ventilation où aucune régulation du débit n'est présente) reste un point majeur qu'il conviendra d'éclaircir dans de prochaines études.

ANNEXE I

La relation liant la masse des particules à leur mobilité électrique grâce à un tandem DMA – CPMA.

Cette relation nous donne une information sur la morphologie des agrégats et sur le nombre de particules primaires les constituants. En effet, une particule parfaitement sphérique aura une masse proportionnelle (via un facteur k_m) à un diamètre à la puissance 3 tandis que pour une particule filiforme, cette puissance s'approchera plutôt de 2. Cette puissance (que nous noterons D_{mass}) nous servira donc de paramètre morphologique.

$$m_{ag} = K_m . Dm^{D_{mass}}$$

Enfin, étant constitué de particules sphériques de diamètre et de masse volumique connue, on peut connaitre à partir de leur masse le nombre de particules primaires par agrégat via les relations suivantes:

$$N_{pp} = \frac{m_{ag}}{m_{pp}}$$

Avec :

$$m_{ag} = K_m . {D_m}^{D_{mass}}$$

Et :

$$m_{pp} = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_{pp}}{2}\right)^3$$

Avec N_{pp} le nombre de particules primaires, m_{ag} la masse de l'agrégat et m_{pp} la masse d'une particule primaire. La masse des agrégats a été mesurée à l'aide du montage représenté figure 120 qui se compose du générateur Palas GFG 1000, d'un diluteur (VKL 10), d'un analyseur de mobilité électrique (DMA). Ce dernier sélectionne les aérosols selon leur mobilité électrique. Par la suite, le CPMA, qui, pour la gamme de particules sélectionnée mesure une distribution de masse, le CNC (Compteur à noyaux de condensation qui permet le comptage des particules. En reliant la masse des agrégats, au diamètre de mobilité (avec l'hypothèse d'une morphologie similaire selon la taille), on obtient, par régression, la relation qui lie la masse et le diamètre de mobilité électrique.

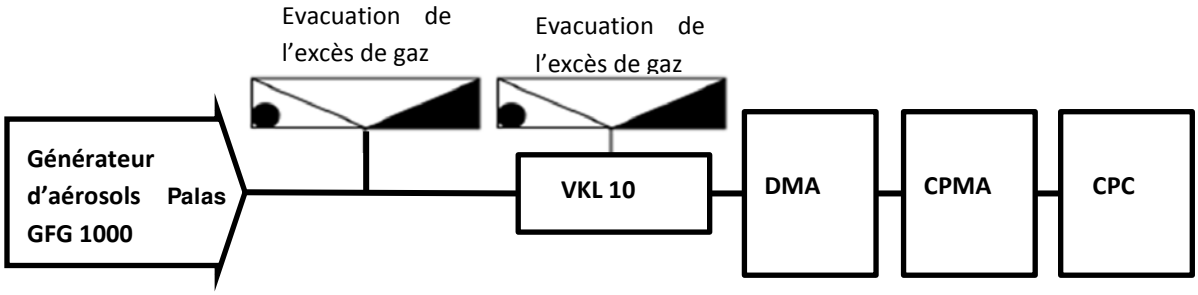


Figure 126 : Schéma du montage utilisé pour caractériser la morphologie des aérosols nanostructurés via la masse volumique effective

La mesure se fait suivant la démarche illustrée figure 123. Pour un diamètre de mobilité donné, on obtient une répartition en masse, c'est la masse moyenne qui sera utilisée dans la relation.

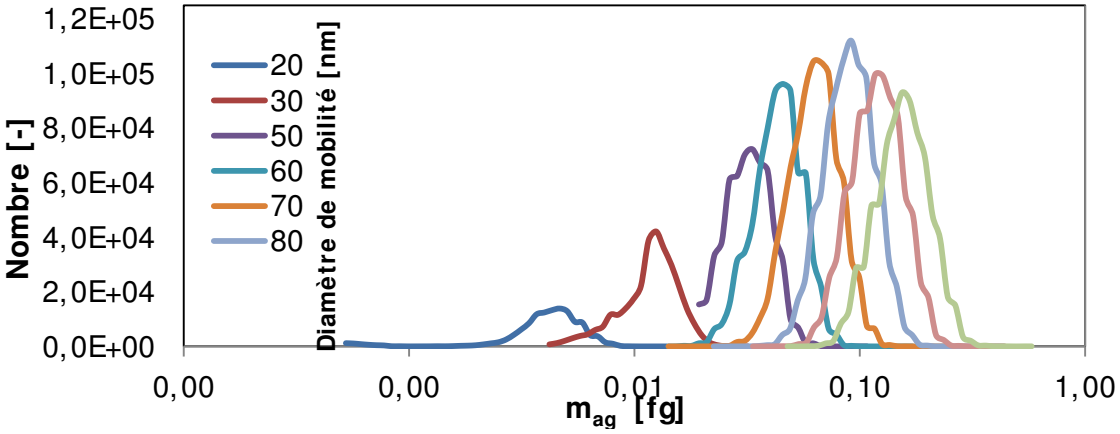


Figure 127 : Répartition en masse des aérosols de carbone mesurés à l'aide du montage DMA - CPMA – CPC pour différents diamètres de mobilité électriques

Les informations issues de ces mesures permettent de comparer les deux aérosols de morphologie « pseudo-fractale ».

Carbone

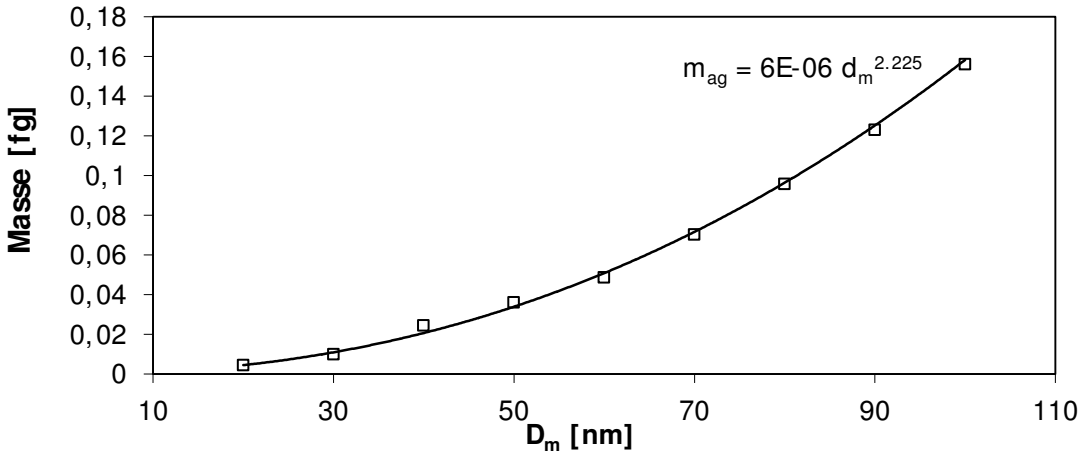


Figure 128 : Représentation de la masse des particules de carbone mesuré à l'aide du CPMA en fonction du diamètre de mobilité électrique

Oxyde de titane

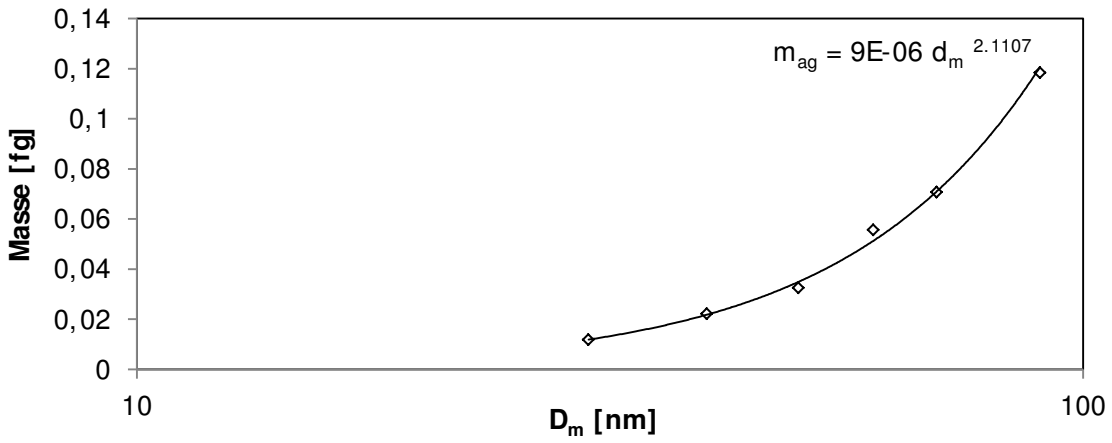


Figure 129 : Représentation de la masse des particules d'oxyde de titane mesuré à l'aide du CPMA en fonction du diamètre de mobilité électrique

Zn/Al

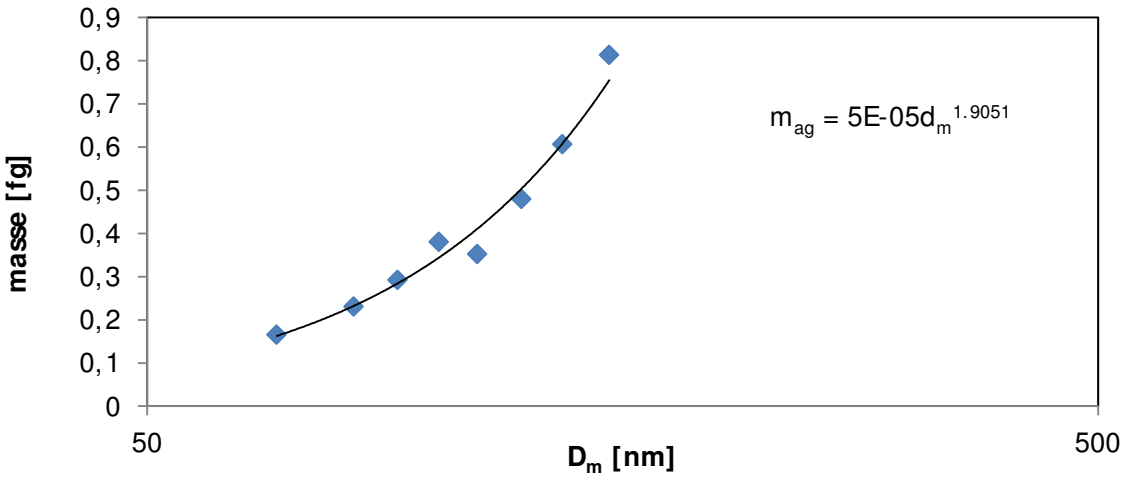


Figure 130 : Masse des aérosols de Zn/Al mesurée à l'aide d'un tandem DMA / ELPI (Grippari 2012).

ANNEXE II

Calculs de diffusion dans un pli

L'accumulation des particules dans le pli due à un mécanisme de collecte similaire à celle modélisée par différents auteurs entre deux plaques varie significativement en fonction du modèle utilisé. Dans ce qui suit, deux modèles ont été comparés.

Modèles

Lee et al. (1999)

Baron et Willeke (2001)

Hypothèses

-Débit passant par le medium homogène sur toute la hauteur du pli

La porosité du medium est considérée homogène, cette hypothèse est justifiée par le fait que le plissage n'affecte le medium que sur une zone très localisée. On considère également que l'inertie du fluide, pour les vitesses considérées, est négligeable au vu de la résistance aéraulique du medium.

-flux laminaire

Le nombre de Reynolds de pli (en prenant P comme longueur caractéristique) prend sa valeur maximale en entrée de pli. A ce niveau, il vaut 100.

-pour Baron et Willeke, aérosol mono dispersé

Seul le modèle de Lee permet de prendre en compte la polydispersion des aérosols.

-fluide incompressible

On considère ici le fluide incompressible. Les calculs numériques montrent une compression du flux en entrée de pli dont nous ne tiendrons pas compte. Les faibles vitesses d'écoulement justifient ce choix.

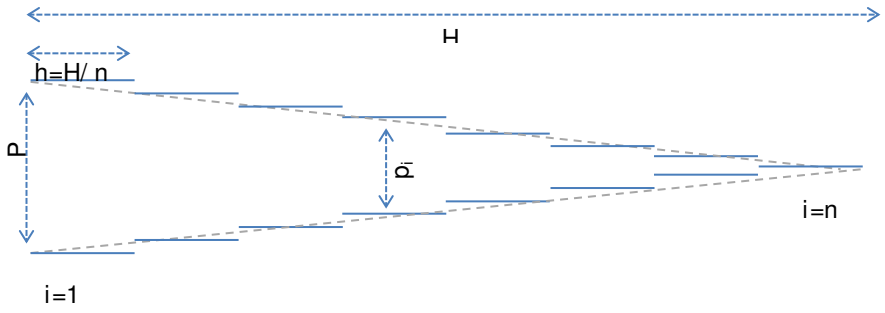
-inertie des particules considérée négligeable

Les faibles vitesses et la taille réduite des particules conduisent à considérer leur inertie négligeable.

Principe

Pli

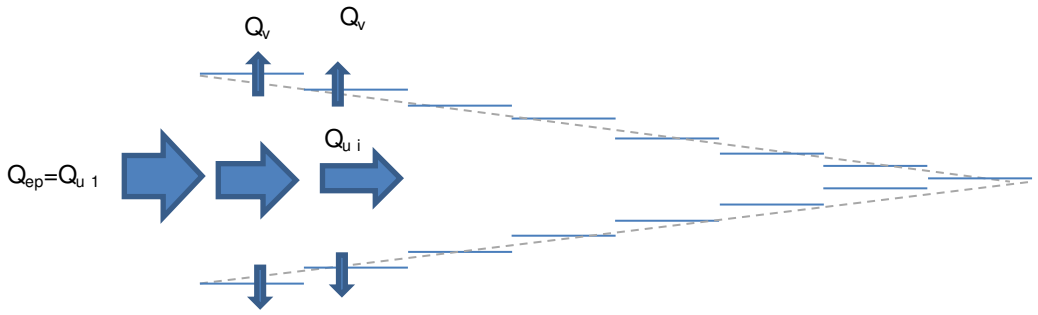
Le pli est découpé en n éléments de longueur n/H considérés parallèles et séparés par une distance $p_i=P-i*(P/n)$



Les derniers éléments ne représentent pas une réalité physique, p_i tend vers 0. De plus on a une géométrie idéale d'un pli qui ne tient pas compte des déformations du medium lors du plissage.

**NB : dans les modèles de B&W et de Hinds, la longueur du pli est considérée égale à 1 m*

Débits



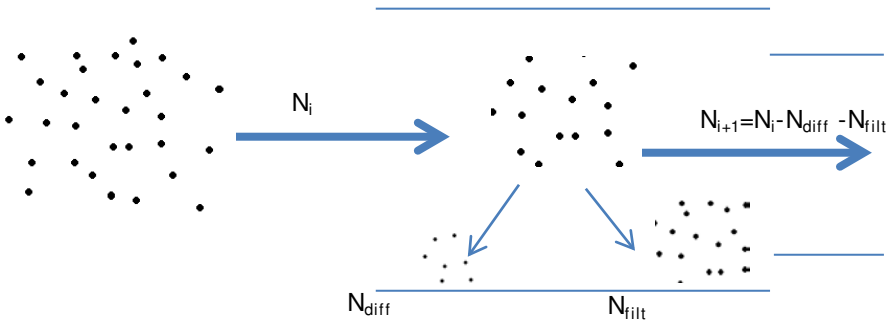
On fixe le débit en entrée de pli Q_{ep} . A chaque pas, on retire le débit qui passe par le medium $Q_v=Q_{ep}/n$. *ainsi, on a* $Q_{u\,i}=Qep-(i*Q_v)$.

Dépôt

Le taux de dépôt est calculé pour chaque pas en fonction des valeurs de p_i et de $Q_{u\,i}$

A chaque pas, le nombre de particules déposées par diffusion est calculé, la concentration est recalculée en fonction du nombre de particules restantes et du débit au pas i.

Pour le pas suivant, le nombre de particules est soustrait au nombre de particules entrantes et la concentration est recalculée :



On a ici C concentration, N_{dif} nombre de particules déposées par diffusion et N_{filt}, le nombre de particules déposées par « traversée du medium ». Tx restant est le taux de dépôt par diffusion.

Résultats (n=100)

Tableau 19 : Paramètres d'entrée du modèle

1	2
Dp=100 nm Vf= 2,1 P=2 mm H=20 mm	Dp=100 nm Vf= 0,21 P=2 mm H=20 mm

Lee et al. 1999 :

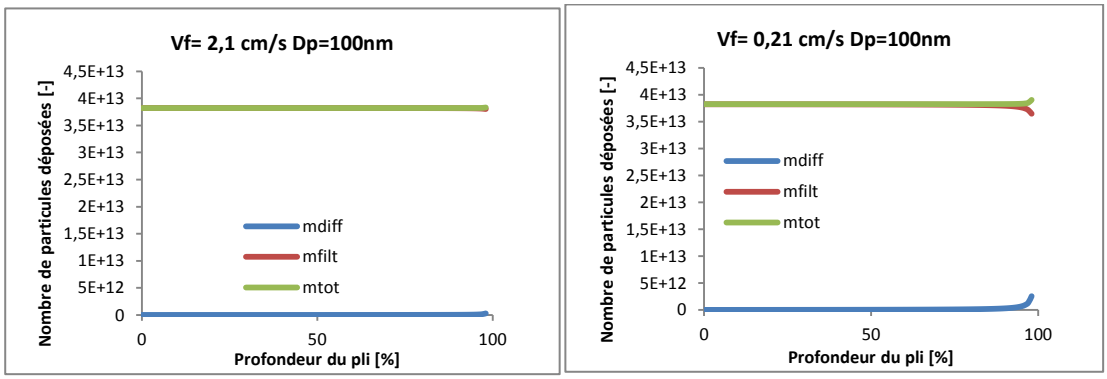


Figure 131 : Répartition des particules dans le pli en considérant un phénomène de diffusion dans le pli d'après le modèle de Baron et Willeke (2001)

B&W.

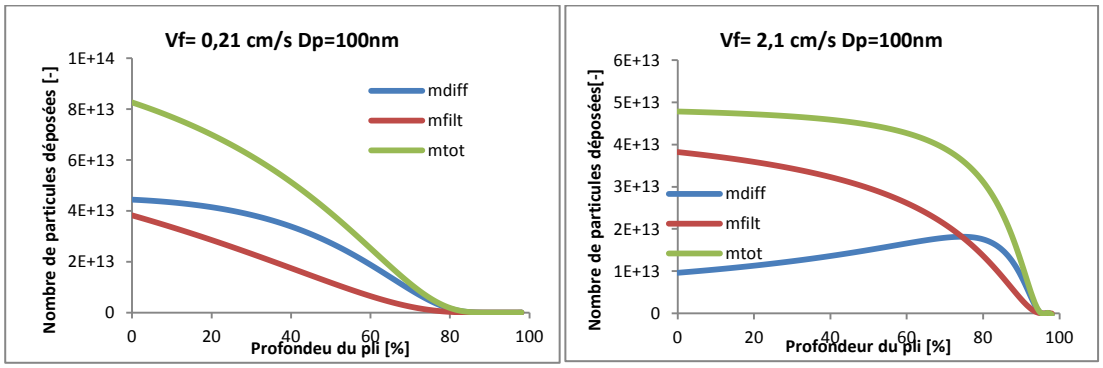


Figure 132 : Répartition des particules dans le pli en considérant un phénomène de diffusion dans le pli d'après le modèle de Baron et Willeke (2001)

ANNEXE III

Incertitudes sur la porosité

Les incertitudes considérées dans la mesure de la porosité des dépôts mesurés par MEGAPAN pnt été effectuées de la manière suivante (illustration Figure 133) :

- par régression linéaire, une droite a été identifiée sur la mesure brute d'épaisseur en fonction du temps. Cette droite constitue la « croissance théorique du dépôt »,
- les écarts entre cette droite idéale et les points expérimentaux ont été exprimés par une loi normale de moyenne 0 et d'écart type σ_p

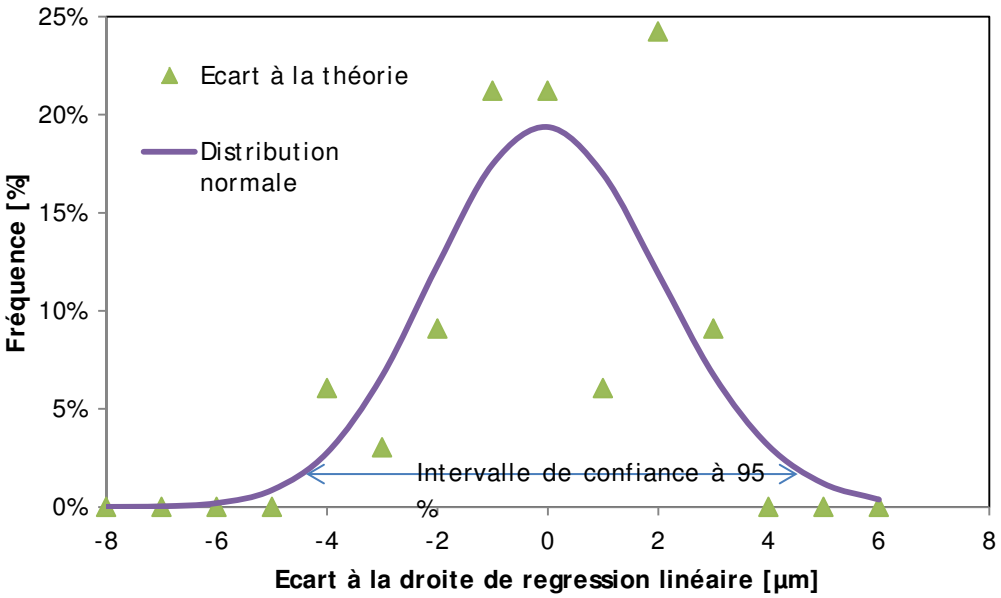


Figure 133 : Distribution de l'écart à la théorie des valeurs d'épaisseur mesurées par MEGAPAN

L'incertitude sur la masse déposée est calculée par la relation suivante :

$$\Delta m = m_f - m_0 \text{ et } \sigma^2_{\Delta \mathrm{m}} = \sigma^2_{m_f} + \sigma^2_{m_0}$$

avec m_f la masse de la membrane colmatée et σ_{mf} l'écart type associé, m_0 la masse de la membrane vierge et σ_{m0} l'écart type associé ainsi, $\sigma_{\Delta m} = 0{,}012mg$.

L'incertitude sur la porosité est quant à elle calculée avec la relation suivante en fonction de l'incertitude sur la masse volumique du matériau composant les dépôts.

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}\right)^2 \sigma_\rho^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial p}\right)^2 \sigma_p^2}$$

ANNEXE IV

MEGAPAN oxyde de titane

Les expériences conduites sur des aérosols d'oxyde de titane ont été réalisées dans les mêmes conditions que pour des particules de carbone. Les résultats obtenus confirment une pénétration du faisceau laser dans le dépôt qui ne permet pas d'obtenir des valeurs de porosité aussi fiables que pour un aérosol de carbone. Le signal d'épaisseur acquis est représenté *Figure 134.*

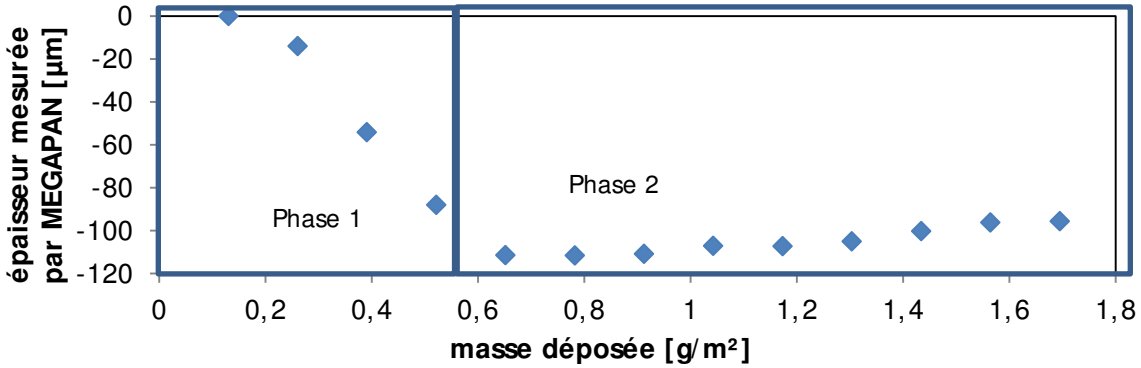


Figure 134 : Valeur d'épaisseur mesurée par MEGAPAN pour un aérosol d'oxyde de titane à un débit de 1,2 cm/s

Ce graphique se divise en deux phases. La première partie peut être interprétée comme un artefact de mesure dû à la pénétration du faisceau dans le dépôt, en revanche la seconde partie serait effectivement lié à la croissance du dépôt. La Figure 135 représente l'interprétation de cette courbe.

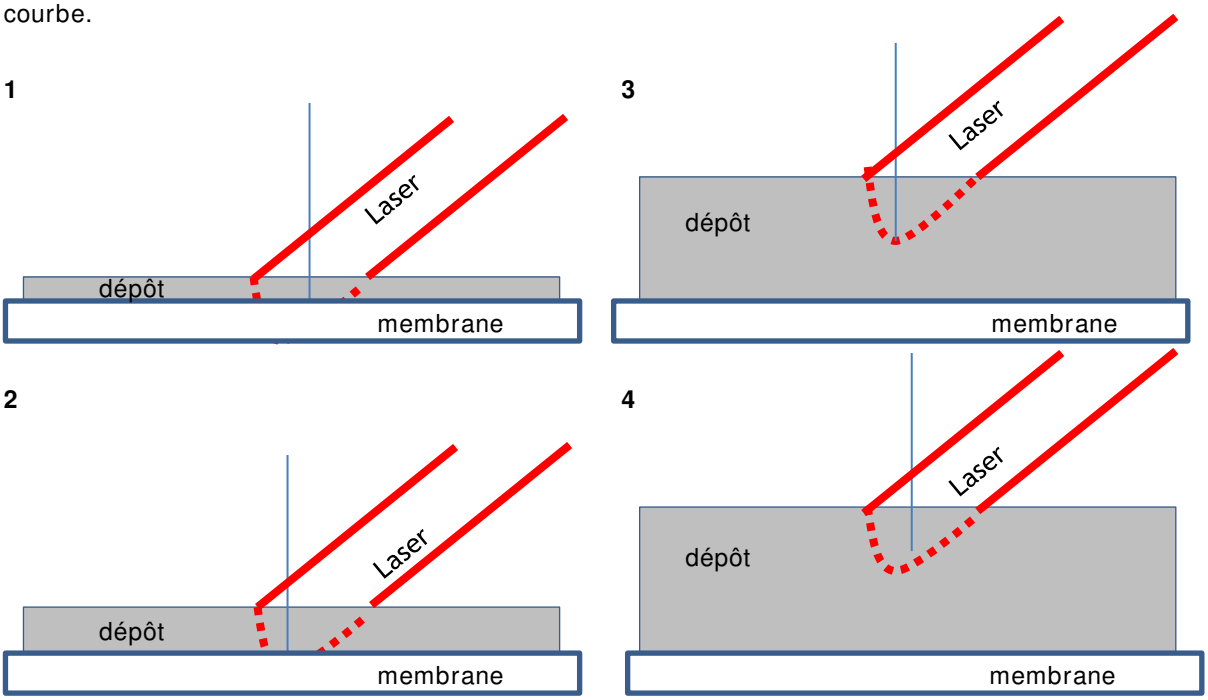


Figure 135 : illustration des effets de la pénétration du faisceau dans un dépôt d'oxyde de titane pour 1 et 2 pour deux épaisseurs différentes de la phase 1 et 3 et 4 pour deux épaisseurs différentes de la phase 2

Si l'on utilise le taux de croissance identifié lors de la seconde phase, on obtient des valeurs de porosité de 98,8 %à 1,2 cm/s et de 99,4 %à 2,5 cm/s.

La comparaison des valeurs de perte de charge en fonction du volume de particules donne des résultats qui tendent à appuyer ces valeurs

REFERENCES

Adrian, R.J., (1986). Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow. International journal of heat and fluid flow 7, Pp. 127-145

Balazy, A., Podgorski, A., (2006) Deposition efficiency of fractal-like aggregates in fibrous filters calculated using Brownian dynamics method. Journal of Colloid and Interface Science 311 (2) , Pp. 323-337

Baron, P.A., Willeke, K., (2001). Aerosol measurement Principles, techniques and applications (2ed). Wiley Interscience

Bau, S., (2008) Etude des moyens de mesure de la surface des aérosols ultrafins pour l'évaluation de l'exposition. Thèse en vue de l'obtention du diplôme de docteur de l'INPL soutenue publiquement le 3 décembre 2008.

Bémer D., Régnier R., Morele Y., Grippari F., Appert-Collin J.-C., Thomas D, (2013) Study of clogging and cleaning cycles of a pleated cartridge filter used in a thermal spraying process to filter ultrafine particles. Powder technology 234, Pp. 1-6

Bergman, W., Taylor, R.D., Miller, A.H., Bierman, A.H., Herbard., H.D, Daaroza, R.A., Lum, B.Y., (1976) Enhanced filtration program at LLL – Progress report ; Lawrence Livermore Laboratory, Livermore California

Bouilloux, L. (2006). BADORIS, document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS), filtres à très haute efficacité (THE). Base de données sur les Barrières Techniques de Sécurité, INERIS.

Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L., Morele Y., (2014) Measurement of the Nanoparticles Distribution in Flat and Pleated Filters During Clogging, Aerosol Science and Technology 48 (4), Pp. 392-400

Brasil, A.M., Farias, T.L. & Carvalho, M.G. (1999). A recipe for image characterization of fractal-like aggregates, *Journal of aerosol Science* 30 (10) Pp. 1379-1389

Brochot, C. (2012) Filtration des nanoparticules, application aux appareils de protection respiratoire. Thèse en vue de l'obtention du diplôme de docteur de l'INPL soutenue publiquement le 11 mai 2012.

Brugière, E., Gensdarmes, F., Ouf, F.X., Yon, J., Coppalle, A., (2014) Increase in thermophoretic velocity of carbon aggregates as a function of particle size. Journal of Aerosol Science 76, Pp. 87-97

Callé, S. , Contal, P., Thomas, D., Bémer, D., Leclerc, D. (2002) Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. Powder Technology 128, (2-3), Pp. 213-217

Callé-Chazelet, S., Remy, J.F., Thomas, D., (2005) Caractérisation du dépôt des aérosols solides sur un medium plissé filtrant à très haute efficacité. Etude du Laboratoire des Sciences du génie chimique de Nancy pour l'IRSN.

Carman, P. (1956). Flow of gases through porous media. Academic Press, New York.

Carroll, C. W., (1965) The Institute of Paper Chemistry, unpublished work

Chen, C.Y.,(1955) Filtration of aerosols by fibrous media, Chemical Revue 55, Pp.595-623

Chen, F. J., (1982) The permeability of compressed fiber mats and the effect of surface area reduction and fiber geometry. Doctoral Dissertation, The Institute of Paper chemistry,Appleton, WI

Cheng, L., Kirsch, R., Wiegmann, A., Gervais, P-C., Bardin-Monnier, N., Thomas, D. (2013) Pleatlab : a pleat scale simulation environment for filtration simulation. Filtech Proceedings, Wiesbaden 2013

Cheng, Y.H., Tsai, C.J., (1998) Factors influencing pressure drop through a dust cake during cake filtration, Aerosol Science and Tachnology 29, Pp. 315-328

Davies, D.C., (1973) Air filtration academic press, London, New York

Del Fabbro L., Laborde J.-C., Merlin P., Ricciardi L., (2002) Air flows and pressure drop modelling for different pleated industrial filters. Filtration and Separation 39, Pp. 35-40.

Del Fabbro, L., (2001) Modélisation des écoulements d'air et du colmatage des filtres plissés par des aérosols solides. These de Doctorat, Université Paris XII

Eggersdorfer, M.L., Grohn, A.J., Sorensen, C.M., McMurry, P.H.,Pratsinis, S.E., (2012a) Mass-mobility characterization of flame-made ZrO2 naerosols: primary particle diameter and extent of aggregation. J Colloid Interface Sci 387:12–23

Eggersdorfer, M.L., Kadau, D., Herrmann, H.J., Pratsinis, S.E., (2012b) Aggregate morphology evolution by sintering: number and diameter of primary particles. Journal of Aerosol Science 46: Pp. 7–19

Elmoe, T.D., Tricoli, A., Grunwaldt, J-D., Pratsinis, S.E., (2009) Filtration of nanoparticles: evolution of cake structure and pressure-drop. Journal of Aerosol Science 40 (11) , Pp. 965-981

Elmoe, T.D., Tricoli, A., Grunwaldt, J-D., Pratsinis, S.E., (2011) Characterization of highly porous nanoparticle deposit by permeance measurements. Powder Technology 207 (1-3), Pp. 279-289

Endo Y., Chen D.R., Pui D.Y.H., (1997) Effect of polydispersity and shape factor during dust cake loading on air filters. Powder Technology 98 (3) , Pp. 241-249

Filipov, A.V., (2000) Drag and torque on Cluster of N Arbitrary Spheres at Low Reynolds Number. Journal of Colloid and interface science 229, 184-195

Fotovati, S., Hosseini, S.A., Tafreshi, H., Pourdeyhimi, B., (2011) Modelling instantaneous pressure drop of pleated thin filter media during dust loading Chemical Engineering Science 66 (18), Pp. 4036-4046

Fowler, Z. L., Hertel, K. L., J. (1940) Appl. Phys., Pp. 11- 496

Gervais, P.-C., Bardin-Monnier, N. et Thomas, D. (2012). Permeability modeling of fibrous media with bimodal fiber size distribution. Chemical Engineering Science, 73(0), Pp. 239–248

Gervais, P.-C., Poussier, S., Bardin-Monnier, N., Karcher, G., Thomas, D. (2014) Combination of Single-Photon Emission and X-Ray Computed Tomography to visualize aerosol deposition in pleated filter. Separation and Purification Technology 126, Pp. 52-61

Gervais, P-C., (2013) Etude expérimentale et numérique du colmatage de filtres plissés. Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur de l'UL soutenue publiquement le 19 Février 2013

Grippari, F., (2012) Caractérisation et filtration des aérosols nanostructurés : application aux fumées de projection thermique des métaux. Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur de l'INPL soutenue publiquement le 14 novembre 2012

Hettkamp P., (2011). Simulation and measurement of dust loading of pleated air filter. In Proc. 24th AFS Conf. (Louiseville, USA).

Hettkamp, P., Kasper, G. et Meyer, J. (2012). Simulation of pressure drop and capacity for pleated air filters loaded with dust, Filtration, 12(3) Pp. 183-192

Hettkamp, P., Meyer, J., Kasper, G., (2013) Surface dust-loading of pleated filters: Comparison of simulation with experiment. Filtech 2013, October 22-24 2013, Wiedsbaden, Germany

ıngmanson, W. L., Andrews, B. D., Tappi, (1963) 46(3) Pp. 150-155

Japuntich, D.A., Stenhouse, J.I.T., Liu, B.Y.H., (1993) Experimental results of solid monodisperse particle clogging of fibrous filters. Journal of Aerosol Science 25 (2), Pp. 385-393

Japuntich, D.A., Stenhouse, J.I.T., Liu, B.Y.H., (1995) Effective pore diameter and monodisperse particle clogging of fibrous Filters. Journal of Aerosol Science 28 (1), Pp. 147-158

Jeon, K.J, Jung, Y.W., (2004) A simulation study on the compression behaviour of dust cakes. Powder Technology 141 (1-2) , Pp. 1-11

Joubert, A., (2009) Influence de l'humidité en filtration Très Haute Efficacité. Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur de l'INPL soutenue publiquement le 13 novembre 2009

Juda, J., Chrosciel, S., (1970) Ein theoritisches Modell der Druckverlusthöhung beim filtrationsvorgane. Staub Reinhaltung der luft,5, Pp. 196-198

Kanoaka, C., (1998) Performance of an air filter at dust-loaded condition. Advances in aerosol filtration, Pp. 323-335

Kanoaka, C., Hiragi, S., (1990) Pressure drop of air filter with dust load. Journal of Aerosol Science 21 (1) , Pp. 127-137

Kim, S.C., Wang, J., Shin, G.W., Scheckmann, J.H., Pui, D.Y.H., (2009) Structural properties and Filter loading Characteristics of soot agglomerates. Aerosol Science and Technology 43(4), Pp. 344-355

Kozeny, J., (1927). Über kapillare leitung des wassers im boden. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, 136:271–306

Kreyling, W.G., Biswas, P., Messing, M.E., Gibson, N., Geiser, M., Wenk, A., Sahu, M., Deppert, K., Cydzik, I., Wigge, C., Schmid, O., Semmler-Behnke, M. (2011) Generation and characterization of stable, highly concentrated titanium dioxide nanoparticle aerosols for rodent inhalation studies. Journal of Nanoparticle Research 13 (2), Pp. 511-524

Kuwabara, S., (1959) The forces experienced by randomly distributed parallel circular cylinder or spheres in a viscous flow at small reynolds number. Journal of the Physical Society of Japan 14, 527-532

Lee, K. W., Kim, S.P., (1999) Analytical Solutions to Diffusional Deposition of Polydisperse Aerosols in Parallel Plate Channels and Circular Tubes, Aerosol Science and Technology, 31 (1), Pp. 56-65

Letourneau, P., Mucley, Ph., Vendel, J., (1992) Effects of the particle Penetration inside the filter medium on the HEPA filter pressure drop. 21st DOE/ NRC nuclear air cleaning conference

Liu, J., Swanson, J.J., Kittelson, D.B., Pui, D.Y.H., Wang, J., (2013) Microstructural and loading characteristics of diesel aggregate cakes. Powder Technology 241, Pp. 244–251.

Mackowski, D.W., (2006) Monte Carlo simulation of hydrodynamic drag and thermophoresis of fractal aggregates of spheres in the free-molecule flow regime. Journal of Aerosol Science 37 (3) , Pp. 242-259

Mädler, L., Anshuman, A.L., Friedlander, S.K., (2006) One step aerosol synthesis of nanoparticle agglomerate films: simulation of film porosity and thickness. Nanotechnology 17 (19), art. no. 001, Pp. 4783-4795

Mauret, E., Renaud, M., (1997) Transport phenomena in multi-particle systems - I. Limits of applicability of capillary model in high voidage beds-application to fixed beds of fibers and fluidized beds of spheres. Chemical Engineering Science 52 (11), Pp. 1807-1817

Miguel, A.F., (2003) Effect of humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles. Journal of aerosol science 32, Pp. 697-711

Mocho, V., Ouf, **F.X.,** (2011) Clogging of industrial pleated high efficiency particulate air (HEPA) filter in the event of fire. Nuclear Engineering Design 241 (5), Pp. 1785-1794

Neesse, TH., Dueck, J., Djatchenko, E., (2009) Simulation of filter cake porosity in Solid/ Liquid separation. Powder Technology 193 (3), 10 August 2009, Pp. 332–336

NF EN 1822-1. Filtres à air à très haute efficacité et filtres à air à très faible pénétration (HEPA et ULPA). AFNOR, 2010

NF EN ISO 9073-2. Méthodes de test pour textiles non-tissés – Parti 2 : mesure d'épaisseur. AFNOR 1995

Novick, V.J., Monson, P.R., Ellison, P.E., (1992), The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters. Journal of Aerosol Science 23 (6), Pp. 657-665

Olfert, J.S., and Collings, N., (2005). New method for particle mass classification – the Couette centrifugal particle mass analyzer. Journal of Aerosol Science 36, Pp. 1338-1352.

Ouf, F.X., (2006) Caractérisation des aérosols émis lors d'un incendie. Thèse de doctorat de l'université de Rouen soutenue publiquement le 17 janvier 2006

Ouf, F.-X., Bescond, A., Bourrous, S., Kacem, A., Noirtin, A., Salm, F., Symonds, J., Nickolaus, C., Yon, J., (2012) Influence de la fraction organique de carbone sur la mesure de la masse volumique effective d'agrégats de suie à l'aide d'un CPMA. Congrès français sur les aérosols 2012, Paris

Park, K., Kittelson, D.B., McMurry, P.H., (2004) Structural properties of diesel exhaust particles measured by transmission electron microscopy (TEM): relationships to particle mass and mobility. Aerosol Sci Technol 38:881–889

Payatakes, A.C., (1976) Model of aerosol particle deposition in fibrous media with dendrite-like pattern. Application on pure interception during period of unhindered growth. Journal of Aerosol Science 13 (6), Pp. 602-604

Penicot, P., (1998) Etude de la performance de filtres à fibres lors de la filtration d'aérosols liquides ou solides submicroniques, Institut National Polytechnique de Lorraine, Thèse de Doctorat

Pranami, G., Lamm, M.H., Vigil, R., (2010) Molecular dynamics simulation of fractal aggregate diffusion, Physical review, E 82

Rebai , M., Prat, M., Meireless, M., Schmitz, P., Baclet R., (2010) A semi analytical model for gas flow in pleated filters. Chemical Engineering Science 65 (9), Pp. 2835-2846

Renoux, A., Boulaud, D., (1998). Les aérosols, physique et métrologie. Tech & Doc éditions. ISBN : 2-7430-0231-X

Sakano, T., Otani, Y., Namiki, N., Emi, H., (2000) Particle collection of medium performance air filters consisting of binary fibers under dust loaded conditions. Separation and Purification Technology 19 (1-2), Pp. 145-152

Saleh, A.M., Fotovati, S., Vahedi Tafreshi, H., Pourdeyhimi B., (2014) Modeling service life of pleated filters exposed to poly-dispersed aerosols. Powder Technology 266 Pp. 79–89

Schmidt, E., Löffler, F., (1990) preparation of dust cakes for microscopic examination. Powder technology 60, Pp. 173-177

Schmidt, E., (1995) Experimental investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media. Filtration & Separation 32, (8), Pp. 789–793

Sorensen, C.M., (2011) The mobility of fractal aggregates: a review. Aerosol Science and Technology 45 Pp. 765–779

Stechkina, I.B., Fuchs, N.A., (1966) Studies on fibrous aerosol filters – I calculation of diffusionnal deposition of aerosols in fibrous filters. Annals of occupational Hygiene 9, Pp. 59-64

Tatachuk, B., (2008) A semi empirical Pressure drop model: Part I - Pleated Filters. HVAC and Research 14 (6), Pp. 841-860

Thomas D., (2001) Etude de la filtration des aérosols par des filtres à fibre, institut polytechnique de Lorraine, Habilitation à diriger les recherches

Thomas, D., Ouf, F.-X., Gensdarmes, F., Bourrous, S., (2014) Pressure Drop Model for Nanostructured Deposits. Separation and purification technology, Submitted

Thomas, D., Contal, P., Renaudin, V., Penicot, P., Leclerc, D., Vendel, J., (1999) Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration Journal of Aerosol Science 30, (2, 1) Pp. 235-246

Tien, C., Ramaro, B. V., (2012) Can filter cake porosity be estimated using Kozeny-Carman equation. Powder Technology 237, Pp. 233–240.

Waghode, A.N., Hanspal, N.S., Wakeman, R.J., Nassehi, V., (2007) Numerical analysis of medium compression and losses infitration area in pleated membrane cartridge filters. Chemical Engineering Communications 194 (8), Pp. 1053-1064

Waghode, A.N., Hanspal, N.S., Wakeman, R.J., Nassehi, V., (2005) **M**edium swelling and pleat crowding effects in cartridge filters. AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings 2005, P. 1589

Walsh, D.C., (1996) Recent advances in the understanding of fibrous filter behavior under solid particle load. Filtration and separation, Pp. 501 – 506

Wentzel, M., Gorzawski, H., Naumann, K.H., Saathoff, H., Weinbruch, S., (2003) Transmission electron microscopical and aerosol dynamical characterization of soot aerosols. Journal of aerosol Science 34, Pp. 1347-1370

Willert, C.E., Gharib, M. (1991). Digital particle image velocimetry. Dept. of Applied Mechanics and Engineering Sciences, R-011, university of California, San Diego, La Jolla, CA 92093, USA

Yu, A.B., Feng, C.L., Yang, R.Y., (2003) On the relationship between porosity and interparticle forces. Powder Technology 130 (1-3), Pp. 70-76

LISTE DES TABLES

Tableau 1 : Valeurs de porosité de dépôt et propriété des particules de suie relevées dans la littérature pour différentes vitesses de filtration 23

Tableau 2 : Liste des modèles permettant le calcul de la constante de Kozeny et leur domaine d'applicabilité 25

Tableau 3 : Résistance aéraulique des media utilisés 36

Tableau 4 : Diamètres et écarts-types de fibres obtenus manuellement et par Matlab© 39

Tableau 5 : Caractéristiques des media utilisés 41

Tableau 6 : Caractéristiques de l'aérosol de carbone 46

Tableau 7 : Caractéristiques de l'aérosol de titane 47

Tableau 8 : Caractéristiques de l'aérosol d'argent 48

Tableau 9 : Caractéristiques de l'aérosol de Zn/Al 50

Tableau 10 : Caractéristiques de l'aérosol d'alumine 51

Tableau 11 : Récapitulatif des caractéristiques des media 51

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des grandeurs caractéristiques des aérosols 52

Tableau 13 : Comparaison des valeurs d'épaisseur obtenues par microscopie et via MEGAPAN 62

Tableau 14 : Caractéristiques utilisées pour le calcul de pénétration des particules dans le medium . 72

Tableau 15 : Valeurs de porosité mesurées et issues de la littérature et conditions opératoires associées 79

Tableau 16 : Valeurs utilisées et nombres de Stokes calculés pour différentes vitesses de filtration sur filtre plissé 97

Tableau 17 : Mesures utilisées dans le calcul du rapport de volume ($V_{dépôt}/V_{pli}$) et valeur de ce rapport 98

Tableau 18 : données d'entrée utilisées pour la comparaison avec des résultats expérimentaux 117

Tableau 19 : Paramètres d'entrée du modèle ..... f

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de la hauteur h et du pas p d'un pli (Del Fabbro 2001) 4

Figure 2 : Photo d'un filtre THE industriel (double dièdres) 4

Figure 3 : Filtre plan vu au MEB (Joubert 2009) 5

Figure 4 : Schéma des forces de pression s'exerçant sur un pli et annotation sur les régions sensibles à la déformation (Waghode et al. 2005) 8

Figure 5 : Courbes de perte de charge mesurées pour un filtre plan et un filtre plissé en fonction de la vitesse de filtration (Joubert 2009) 9

Figure 6 : Représentation d'une particule de suie (Ouf 2006) 10

Figure 7 : Représentation des différents diamètres équivalents d'un agrégat (Ouf 2006) 11

Figure 8 : Distribution granulométrique des particules primaires pour un aérosol issu d'une combustion de toluène (Ouf 2006). N_p, le nombre de particules primaires présentes dans l'agrégat, est très variable dans une situation réelle d'incendie 12

Figure 9 : Différents exemples d'agrégats et valeurs de la dimension fractale associée (Ouf 2006) 13

Figure 10 : Evolution de la perte de charge au cours du colmatage 14

Figure 11 : Différentes structures possibles lors de la séparation de particules solides par une fibre (Kanoaka et al. 1998) 15

Figure 12 : Schéma de principe de la simulation d'Elmoe pour décrire la formation du gâteau (Elmoe 2009) 19

Figure 13 : Différents profils obtenus pour différents nombres de Peclet et des temps de « colmatage » différents (a, vue de dessus, b, vue de côté et c, vue de coupe) (Elmoe 2009) 19

Figure 14 : Courbes représentant la compacité de particules en fonction de la position dans (en gris sur les graphiques) la zone et à l'extérieur du capillaire pour différents temps de colmatage et un nombre de Peclet de 0.01 (a) et de 1 (b) (Elmoe et al. 2009) 20

Figure 15 : Courbe de perte de charge associée à la simulation. A 630 s, la courbe devient linéaire. Ce point correspond sur la Figure 14 à l'obturation du capillaire (Elmoe et al. 2009) 20

Figure 16 : Influence de la force de liaison des particules sur la porosité du dépôt (Jeon et al. 2004) 22

Figure 17 : Porosité des dépôts (a) et rapports des volumes d'air et de particules (b) en fonction du nombre de Peclet et pour différentes tailles de particules primaires (Mädler et al. 2006) 22

Figure 18 : Porosité de dépôts d'agrégats de carbone en fonction du nombre de Peclet (Thomas et al. 2014) 23

Figure 19 : Courbe de perte de charge d'un filtre plissé (Del Fabbro 2001) 26

Figure 20 : Schématisation des trois zones à travers lesquelles l'homogénéité de l'écoulement a été mesurée (Del Fabbro 2001) 27

Figure 21 : Répartition expérimentale des écoulements dans un filtre THE (a : h=27 mm, p=3,5 mm et b : h=27,5 mm, p=2,2 mm) (Del Fabbro 2001) 27

Figure 22 : Mean Voxel Intensity (intensité moyenne par voxel (équivalent 3D du pixel)) en fonction de la profondeur de pli pour un filtre THE (Gervais et al. 2014). L'intensité émise correspond à la masse d'aérosol déposée. 28

Figure 23 : Photo d'un filtre plissé à deux instants du colmatage par un aérosol de chlorure de sodium de 8 µm et une vitesse de filtration de 1 cm/s (Del Fabbro 2001) 29

Figure 24 : Répartition des particules dans un pli selon Del Fabbro. L'hypothèse d'une "fermeture du pli" pour expliquer la réduction de surface semble être un cas extrême (Del Fabbro 2001) 30

Figure 25 : Résultats des simulations CFD pour, de droite à gauche : des aérosols de 3 µm et une vitesse de 20 cm/s, des aérosols de 10 µm et une vitesse de 20 cm/s et des aérosols de 10 µm et une vitesse de 1 m/s. On note également l'influence du type de plis (Fotovati et al. 2011). 30

Figure 26 : Illustration des différentes étapes du colmatage d'un pli en tenant compte de la filtration profonde sous GeoDict© (Cheng et al. 2013) 31

Figure 27 : illustration du dépôt formé dans un pli pour une vitesse de filtration de 50 cm/s et des aérosols de 1 µm de diamètre pour deux pas de plissage différents (Saleh et al. 2014).. 31

Figure 28 : (a) Courbe d'évolution de résistance aéraulique à différentes vitesses de filtration de filtres plissés THE soumis à des aérosols issus de la combustion de PMMA (Mocho et Ouf 2011). (b) courbe de la perte de charge sur la vitesse de filtration (donc proportionnelle à la résistance aéraulique) en fonction de la masse déposée pour des aérosols d'alumine de 2,36 µm de diamètre aérodynamique (Bouilloux et al. 2006).(c et d) courbes d'évolution de la résistance aérauliques de filtres plissés soumis respectivement, à des aérosols d'émeri de 2,7 µm de diamètre aérodynamique et d'uranine de 0,18 µm de diamètre aérodynamique à différentes vitesses de filtration (performance des filtres plissés (Callé-Chazelet et al. 2007)) 32

Figure 29 : Perte de charge mesurée en fonction de la vitesse de filtration pour des media THE et HE 36

Figure 30 : Méthode de mesure des diamètres de fibre. (A) zoom sur une intersection fibre/ligne de mesure, (B) valeurs prises par les pixels sur la ligne de mesure (C) principe d'identification des points 38

Figure 31 : Répartition granulométrique des diamètres de fibre mesurés manuellement et par analyse d'image pour un medium THE (1) et HE (2) - répartition (a) et comparaison pour chaque classe de diamètre (b) 39

Figure 32 : Illustration de la méthode de détermination de la compacité d'un filtre. (a) cartographie EDX de l'élément silicium sur une tranche de filtre THE, la croix verte représente le point d'acquisition du spectre de référence, le rectangle, la zone de mesure. (b) zoom sur la zone du spectre contenant la raie caractéristique de l'élément silicium. Les annotations représentent la raie de référence et la raie de la zone de mesure. 41

Figure 33 : Mesure du gradient de compacité pour des media THE (a) et HE(b) 42

Figure 34 : Vue en coupe de la zone plissée d'un medium. En vert, les zones mesurées. La compacité est de 0,076 dans la zone non affectée (1) et de 0,13 dans la zone compressée (2) 43

Figure 35 : Schéma du dispositif de mesure de la granulométrie des aérosols 44

Figure 36 : Distribution granulométrique en diamètre de mobilité électrique de l'aérosol de carbone issu du générateur Palas GFG 1000 45

Figure 37 : Image MET d'une particule de carbone générée par le générateur GFG 1000 et particules primaires mesurées (en rouge) 46

Figure 38 : Distribution granulométrique en diamètre de mobilité électrique de l'aérosol d'oxyde de titane issu du générateur Palas GFG 1000. 47

Figure 39 : Image MET d'une particule d'oxyde de titane générée par le générateur Palas GFG 1000 (Kreyling et al. 2011) 47

Figure 40 : Distribution granulométrique en diamètre de mobilité électrique de l'aérosol d'argent issu du générateur Palas GFG 1000. 48

Figure 41 : Illustration des images obtenues par microscopie électronique à transmission. (a) image brute (b) image obtenue par transformée de Fourier 48

Figure 42 : Illustration schématique du banc utilisé pour la génération d'aérosols nanométriques de Zn/Al en grande quantité. 49

Figure 43 : Illustration au microscope électronique à transmission des particules nanométriques issues de l'électroérosion des fils de zinc et d'aluminium (Bémer et al. 2013) 49

Figure 44 : Distribution granulométrique des aérosols de Zn/Al mesurée au SMPS (Grippari 2012). ... 50

Figure 45 : Granulométrie des aérosols d'alumine mesurée par un APS 51

Figure 46 : Schéma de fonctionnement du banc aéraulique utilisé pour le colmatage des filtres plans 54

Figure 47 : Schéma du dispositif de fixation des échantillons de filtres colmatés 55

Figure 48 : Spectre obtenu pour la composition d'un medium vierge THE. Les éléments chimiques présents en quantité importante sont annotés. 56

Figure 49 : Illustration de la mesure EDX de pénétration des aérosols pour des filtres plans colmatés avec des aérosols d'argent. (a) image de la tranche de filtre colmaté avec cartographie EDX de l'élément Ag en rouge (b) cartographie EDX de l'échantillon, en rouge Ag et en vert Si. (c) cartographie EDX de l'élément Ag (d) cartographie EDX de l'élément Si 56

Figure 50 : Illustration de l'échantillonnage des mesures (a) et des zones de mesure de profils de pénétration (b) 57

Figure 51 : Schéma du dispositif utilisé pour mesurer la croissance du dépôt de particules 58

Figure 52 : Image MEB des membranes FSLW utilisées dans le dispositif de mesure de porosité (A) coté aval (B) coté amont 58

Figure 53 : Différentes étapes de mesure de la porosité par l'instrument MEGAPAN 60

Figure 54 : Photographie annotée du dispositif d'étalonnage statique. 61

Figure 55 : Déplacement du spot sur la surface projetée pour deux déplacements successifs de 100 µm 61

Figure 56 : Mesure au MEB d'un dépôt d'alumine (a) et de carbone (b) pour la validation du dispositif 62

Figure 57 : Schéma du dispositif utilisé pour évaluer la réponse du dispositif lors de l'accumulation de particules. 62

Figure 58 : Courbe d'étalonnage du dispositif expérimental, en bleu le nombre de particules comptées ; en vert, les valeurs d'épaisseur enregistrées. Les zones bleues indiquent l'instant d'injection 63

Figure 59 : Illustration du pic d'intensité en début de colmatage (a) et en fin de colmatage (b). L'image acquise par la caméra est représentée sur le graphique. 64

Figure 60 : Photos prises au microscope électronique à balayage de la surface d'un medium THE avant ((a) pour une masse de particules de 0,2 g/m² et (b) pour une masse de 0,6 g/m²) et après (c) le point de départ de la filtration en surface pour un filtre colmaté par des aérosols de carbone 65

Figure 61 : Illustration des différentes définitions du point de colmatage 66

Figure 62 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse d'aérosols déposée et coefficient de détermination pour une vitesse de filtration de 2,5 cm/s..... 67

Figure 63 : Masse accumulée localement dans le medium en fonction de la profondeur..... 67

Figure 64 : Répartition des aérosols dans la profondeur du medium HE pour des aérosols d'argent ... 68

Figure 65 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse d'aérosols déposée et coefficient de détermination pour une vitesse de filtration de 2,5 cm/s. 68

Figure 66 : Répartition des aérosols dans la profondeur du medium THE pour des aérosols d'argent .. 69

Figure 67 : Visualisation EDX d'une coupe de medium THE colmaté avec un aérosol d'argent (a, élément Ag, b, élément Si). La zone entourée sur chacune des photos illustre le fait que certaines zones sont plus perméables. 69

Figure 68 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse d'aérosols déposée et coefficient de détermination pour une vitesse de filtration de 2,5 cm/s..... 70

Figure 69 : Répartition de l'aérosol d'oxyde de titane pour une masse de particules collectées de 0,15 g/m² (filtre HE) 70

Figure 70 : Cartographie de l'élément argent sur une coupe de medium HE enrobé 71

Figure 71 : Evolution de la perte de charge en fonction de la masse d'aérosols déposée et coefficient de détermination pour une vitesse de filtration de 0,8 cm/s..... 71

Figure 72 : Profil d'accumulation de particules d'alumine dans un medium HE à une masse de 10 g/m² et pour une vitesse de filtration de 0,8 cm/s 72

Figure 73 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs obtenues en appliquant des modèles d'efficacité sur des tranches de medium de 10 µm d'épaisseur avec les paramètres regroupés à droite. (a) particules d'argent (b) particules d'oxyde de titane et (c) alumine 73

Figure 74 : Epaisseur du dépôt de particules de carbone en fonction de la masse déposée, mesurée par MEGAPAN à une vitesse de 0,8 cm/s 75

Figure 75 : Porosité des dépôts d'agrégat de carbone générés grâce au générateurs Palas GFG 1000 par le dispositif MEGAPAN 75

Figure 76 : Valeurs de résistance spécifique des dépôts de carbone accumulés à différentes vitesses de filtration et comparaison avec les valeurs issues des modèles de Kozeny-Novick et Thomas et al. (2014)..... 76

Figure 77 : Résistance spécifique K_c des dépôts mesurés et calculés à partir de modèles de perte de charge pour des particules primaires de 10 nm 77

Figure 78 : Croissance du dépôt d'alumine pour une vitesse de filtration de 0,8 cm/s et porosité instantanée associée 78

Figure 79 : Illustration de la formation du dépôt dans les premiers instants du colmatage pour des particules d'alumine à 7,3 g/m² (a) et de carbone à moins de 0,1 g/m² (b). Les zones pointées par les flèches ne sont pas chargées en particules. 78

Figure 80 : Valeurs de porosité issues de la littérature en fonction du nombre de Stokes. Encadré en bleu, le domaine d'utilisation d'un filtre THE avec les particules d'alumine utilisées dans cette étude. 79

Figure 81 : Schéma de fonctionnement du banc de colmatage de filtres plans et plissés par des aérosols issus d'un processus de métallisation 81

Figure 82 : Comparaison des évolutions de perte de charge pour des filtres plans et plissés colmatés dans les mêmes conditions à un dixième de la vitesse nominale de filtration 82

Figure 83 : Zones mesurées dans le pli (a) et au sein du medium dans le pli (b) 83

Figure 84 : Répartition dans le medium des particules de Zn/Al pour des filtres plan et plissé. 83

Figure 85 : Répartition des aérosols de Zn/ Al dans le pli à 5 µm et 15 µm de profondeur dans le medium plissé 84

Figure 86 : Répartition des particules de Zn/Al dans un pli. 84

Figure 87 : (a) Vue extérieure de l'expérience OOPS (b) vue éclatée de l'expérience OOPS. 88

Figure 88 : (a) Géométrie du pli contenu dans le banc (b) photographie d'une nappe de medium plissé 88

Figure 89 : Schéma du banc d'ensemencement du dispositif OOPS. 89

Figure 90 : Valeurs de perte de charge mesurées pour différentes vitesses de filtration pour un filtre demi-cellule et pour un pli unique 90

Figure 91 : Schéma du pli déformé. 90

Figure 92 : Illustration schématique de la mesure de déplacement local (a) photo du dispositif (b) photo du spot laser sur le pli (c) 91

Figure 93 : Représentation numérique du filtre utilisé pour les calculs de déformation avec le champ de pression en rouge, et en bleu, le point sur lequel les valeurs expérimentales de déplacement ont été ajustées. 92

Figure 94 : Déplacement observé au point central du pli en fonction de la vitesse de filtration. La zone de fonctionnement du filtre est encadrée en bleu 92

Figure 95 : Zones de déformation du pli soumis à une pression de 250 Pa. En rouge, la zone où la déformation est maximale 93

Figure 96 : Illustration de la déformée la vitesse nominale 2,5 cm/s - 250 Pa (gauche) et à 8 cm/s – 2000 Pa (droite) 93

Figure 97 : Rapport des pertes de charge pour un filtre plan et un filtre plissé et comparaison avec la réduction de surface calculée par Ansys© Mechanical 94

Figure 98 : Evolution de la résistance aéraulique en fonction de la masse déposée pour un pli colmaté avec des aérosols de carbone à différentes vitesses 96

Figure 99 : Courbe d'évolution de la résistance aéraulique en fonction de la masse d'alumine déposée pour différentes vitesses de filtrations. 97

Figure 100 : Schéma (a) et photo (b) du dispositif expérimental 99

Figure 101: Signal mesuré après traitement par région d'intérêt (ROI Region Of Interest), (a) à t=0, (b) après colmatage 100

Figure 102 : Courbe de détermination du coefficient d'extinction pour un dépôt formé à une vitesse de filtration de 0,2 cm/s avec des particules d'alumine 100

Figure 103 : Masses accumulées localement à différentes profondeurs de pli pour une vitesse de filtration de 0,2 cm/s 101

Figure 104 : Répartition des particules dans le pli pour différentes valeurs de perte de charge à une vitesse de filtration de 2,5 cm/s 102

Figure 105 : Schéma vu du haut (a) et photo (b et c) du dispositif d'ombroscopie utilisé 103

Figure 106 : Vues de l'entrée d'un pli par ombroscopie en cours de colmatage à 2,5 cm/s par des particules d'alumine –entouré en rouge, la formation de « ponts » en bleu, un exemple de cycle de réentraînement 105

Figure 107 : Images de l'entrée de pli en cours de colmatage à une vitesse de filtration de 0,25 cm/s Les zones entourées se chargent en particules et atteignent un volume important avec un impact limité du réentraînement 106

Figure 108 : Photos prises au microscope optique de l'entrée de pli de filtres colmatés à faible vitesse avec (A) des particules d'alumine, (B) des particules de Zn/Al et (C) des particules de carbone. Photos prises pour des filtres colmatés à une vitesse de filtration de 0,2 cm/s 107

Figure 109 : Champs de vitesse acquis par PIV en entrée de pli (a), lignes de courant dans le pli (b), profil de vitesse selon l'axe parallèle au pli (c), et perpendiculaire (d). Les profils sont représentés pour les lignes A, B, C, D, E et F représentées en (a). (Les zones grisées se trouvent dans des zones où le medium réduit la visibilité de l'ensemencement) 108

Figure 110 : Représentation de la géometrie du pli sous Ansys© CFX 109

Figure 111 : Lignes de courant calculées sous Ansys© CFX 109

Figure 112 : (a) Lignes sur lesquelles la vitesse calculée par Ansys © CFX est représentée (b) profil de vitesses dans l'axe U (b) profil de vitesse dans l'axe V. 110

Figure 113 : Illustration de la configuration du modèle 113

Figure 114 : Représentation schématique du milieu équivalent modélisant un medium fibreux. 114

Figure 115 : Capillaire rempli durant la filtration profonde 115

Figure 116 : Capillaire obstrué / filtration en surface 117

Figure 117 : Comparaison des courbes de colmatage expérimentales et obtenues par le modèle capillaire pour un filtre colmaté par des particules d'alumine à une vitesse de 0,8 cm/s 118

Figure 118 : Comparaison des courbes de colmatage expérimentales et obtenues par le modèle capillaire pour un filtre colmaté par des particules de carbone à une vitesse de 0,8 cm/s 118

Figure 119 : illustration du modèle de Del Fabbro 120

Figure 120 : Taux de réduction de surface d'après le modèle de dépôt homogène de Del Fabbro (2001) 121

Figure 121 : Taux de réduction de surface relevé pour un colmatage issu de la littérature, effectué par avec des particules issues de la combustion de PMMA en fonction de la vitesse de filtration (Mocho et Ouf 2011) 121

Figure 122 : Illustration de l'obstruction d'un pli à faible vitesse (a) et à une vitesse plus importante (b) 122

Figure 123 : Illustration du pli colmaté à basse vitesse (a) et la fraction de particules qui y sont collectées (b) 123

Figure 124 : Illustration de la formation d'une arche dans le pli, (a) schéma de la formation de l'arche, (b) courbe représentant l'équilibre des forces dans le pli, en gris la zone de réentraînement 124

Figure 125 : Illustration de l'encadrement de l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé en cours de colmatage 125

Figure 126 : Schéma du montage utilisé pour caractériser la morphologie des aérosols nanostructurés via la masse volumique effective ..... a

Figure 127 : Répartition en masse des aérosols de carbone mesurés à l'aide du montage DMA - CPMA – CPC pour différents diamètres de mobilité électriques ..... b

Figure 128 : Représentation de la masse des particules de carbone mesuré à l'aide du CPMA en fonction du diamètre de mobilité électrique ..... b

Figure 129 : Représentation de la masse des particules d'oxyde de titane mesuré à l'aide du CPMA en fonction du diamètre de mobilité électrique c

Figure 130 : Masse des aérosols de Zn/Al mesurée à l'aide d'un tandem DMA / ELPI (Grippari 2012) c

Figure 131 : Répartition des particules dans le pli en considérant un phénomène de diffusion dans le pli d'après le modèle de Baron et Willeke (2001) ..... f

Figure 132 : Répartition des particules dans le pli en considérant un phénomène de diffusion dans le pli d'après le modèle de Baron et Willeke (2001) ..... f

Figure 133 : Distribution de l'écart à la théorie des valeurs d'épaisseur mesurées par MEGAPAN ..... g

Figure 134 : Valeur d'épaisseur mesurée par MEGAPAN pour un aérosol d'oxyde de titane à un débit de 1,2 cm/s ..... h

Figure 135 : illustration des effets de la pénétration du faisceau dans un dépôt d'oxyde de titane pour 1 et 2 pour deux épaisseurs différentes de la phase 1 et 3 et 4 pour deux épaisseurs différentes de la phase 2 ..... h

LISTE DES PUBLICATIONS ET DES COMMUNICATIONS

2012

Congrès :

Communications orales

- **Ouf, F.-X., Bescond, A., Bourrous, S., Kacem, A., Noirtin, A., Salm, F., Symonds, J., Nickolaus, C., Yon, J.,** Influence de la fraction organique de carbone sur la mesure de la masse volumique effective d'agrégats de suie à l'aide d'un CPMA. *Congrès français sur les aérosols 2012, Paris (2012)*

Poster

- **Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L.** Clogging of mini-pleat and plane air filters by nanoparticle aggregates simulating combustion aerosol ; *Ventilation 2012*

2013

Congrès :

Communications orales

- **Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L.** Etude de la phase de filtration profonde et de la transition vers la phase de filtration en surface pour des filtres HE colmatés avec des aérosols nanométriques ; *Congrès français sur les aérosols 2013, Paris (2013)*
- **Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L., Morele Y.,** Etude de la phase de filtration profonde et de la transition vers la phase de filtration en surface pour des filtres THE colmatés avec des aérosols nanométriques ; *Société Française de Génie des Procédés (2013)*
- **Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L., Morele Y.,** Measurement of the aerosol repartition in a pleat for an HEPA filter clogged with nanometric particles ; *FILTECH (2013)*

2014

Revue :

- **Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L., Morele Y.,** Measurement of the nanoparticles distribution in flat and pleated filters during clogging ; *Aerosol Science and Technology (2014)*
- **Thomas, D., Ouf, F.X., Gensdarmes, F., Bourrous, S., Bouilloux , L.** Pressure Drop Model for Nanostructured Deposits ; *Separation and purification technology (in press)*
- **Gervais P.-C., Bourrous, S., Dany, F., Bouilloux, L., Ricciardi, L.** Simulations of the filter media performances from microtomography-based calculation domain. Experimental and analytical confrontation. *Computational fluids dynamics (Submitted)*
- **Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Lemaitre, P., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L.** Measurement and modelling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles ; *Chemical engineering journal (submitted)*

Congrès :

Communications orales

- **Bourrous S., Bouilloux L., Lemaitre P., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L.** Optical study of the clogging and deformation of a HEPA filter pleat ; *Fluid particle separation European congress (2014)*
- **Bourrous S., Bouilloux L., Lemaitre P., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L.** Optical observation of a single pleat during loading ; *Aerosol Technology Karlsruhe (2014)*
- **Gervais, P.-C., Bourrous, S., Dany, F., Bemer, D., Bouilloux, L., Ricciardi, L.** Simulations of filter media performances from microtomography-based calculation domain ; *GeoDict user Meeting (2014)*

Poster

- **Bourrous S., Bouilloux L., Lemaitre P., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L.** Optical methods to understand the phenomenology of the clogging of a HEPA filter pleat ; *Fluid particle separation European congress (2014)*

A venir

Congrès :

Communications orales

- **Gervais P.-C., Bourrous, S., Dany, F., Bouilloux, L., Ricciardi, L.** Simulation des performances de filtration de medias fibreux à partir de domaines de calcul issus de microtomographies **;** *Congrès français sur les aérosols 2015, Paris (2015)*
- **Bourrous S., Bouilloux L., Ouf F.-X., Lemaitre, P., Appert-Collin J.-C., Thomas D., Tampère L**. Développement d'un dispositif de mesure en continue de la croissance d'un dépôt de nanoparticules *Congrès français sur les aérosols 2015, Paris (2015)*

Abstract:

Experimental study of plane and pleated HEPA filters clogged by particles simulating a combustion aerosol

In nuclear facilities, airborne particles are the vector of most of the radiological contamination. For this reason, pleated HEPA filters are one of the containment devices which are actively studied by the IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) to ensure the safety of nuclear exploitation. To avoid contamination of the environment, the understanding of the behavior of the filters especially in accidental situation has to be as exhaustive as possible. The most probable accident and the most penalizing for the containment devices is fire which leads to a massive soot particle production. In this case, the clogging of the filters is a problematic which has to be taken into account. Up to now, an empirical correlation has been developed to predict the pressure drop increase. The empirical nature of this correlation doesn't allow its use in all situations. A phenomenological understanding and model of the clogging is then necessary. The following PhD work aims to reduce the pressure drop evolution to physical observations for each step of the clogging in order to model it on the most physical basis as possible. To do so, the study has been divided in two parts. The first one focusing on the behavior of flat filter by measuring the penetration of particles inside the medium and the porosity of the deposit formed on its surface. In the second part a small scale experiment based on a single pleat has been developed. Accumulation of the particles inside the pleat has been directly observed, deformation of the pleat as well as airflow in the pleat (using a PIV method) has been measured. During these experiments, pressure drop has been monitored and the measured parameters have been linked to the pressure drop evolution. Finality is to build a simple analytical model to predict the pressure drop evolution of the filters as a function of the deposited mass, the aerosol characteristics and the ventilation conditions. The main perspective opened by these results is the validation of complete numerical models to overcome the experimental limits. The logical extension of this work will be the study of the interaction of a clogged filter with temperature, air moisture and chemical aggression.

Résumé :

Etude du colmatage des filtres THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion

Dans les installations nucléaires, les particules en suspension sont le vecteur d'une grande partie de la contamination radiologique. Pour cette raison, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) étudie les filtres THE (Très Haute Efficacité) plissés qui sont l'un des dispositifs permettant assurer la sécurité de l'exploitation nucléaire. Pour éviter les rejets dans l'environnement, la compréhension du comportement des filtres en particulier dans la situation accidentelle doit être aussi exhaustive que possible. L'accident le plus probable et le plus pénalisant pour les dispositifs de confinement est l'incendie qui conduit à une production massive de particules de suie. Dans ce cas, le colmatage des filtres est un problème qui doit être pris en compte. Jusqu'à présent, une corrélation empirique a été développée pour prédire l'augmentation de perte de charge. Toutefois, le caractère empirique de cette corrélation ne permet pas son utilisation dans toutes les situations. Une compréhension phénoménologique et un modèle de colmatage est alors nécessaire. Le travail de thèse qui suit vise à lier l'évolution de la perte de charge à des observations physiques pour chaque étape du colmatage. Pour ce faire, l'étude a été divisée en deux parties. La première se focalise sur le comportement du filtre plan en mesurant la pénétration de particules à l'intérieur du medium et la porosité du dépôt formé sur sa surface. La deuxième partie consiste en une expérience à petite échelle basée sur un seul pli. L'accumulation de particules à l'intérieur du pli a été directement observée, de plus, la déformation du pli ainsi que les écoulements d'air dans le pli (en utilisant une méthode de PIV) ont été mesurés. Au cours de ces expériences, la perte de charge a été mesurée et les paramètres mesurés ont été liés à l'évolution de la perte de charge. La finalité est de construire un modèle analytique simple afin de prédire l'évolution de la perte de charge des filtres en fonction de la masse déposée, des caractéristiques de l'aérosol et des conditions aérauliques. La principale perspective ouverte par ces résultats est la validation des modèles numériques complets pour surmonter les limites expérimentales. Le prolongement logique de ce travail sera l'étude du comportement d'un filtre colmaté soumis à des contraintes de température, d'humidité et aux agressions chimiques de produits de combustion.