



HAL
open science

Impact sur le colmatage en régimes transitoire et permanent des écoulements d'air induits par le plissage des médias filtrants THE

Youssef Alilou

► **To cite this version:**

Youssef Alilou. Impact sur le colmatage en régimes transitoire et permanent des écoulements d'air induits par le plissage des médias filtrants THE. Génie des procédés. Université de Lorraine, 2018. Français. NNT : 2018LORR0047 . tel-01836219

HAL Id: tel-01836219

<https://theses.hal.science/tel-01836219v1>

Submitted on 12 Jul 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.



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>

Impact sur le colmatage en régimes transitoire et permanent des écoulements d'air induits par le plissage des médias filtrants THE

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 02 mars 2018

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

Spécialité Génie des Procédés et des Produits

Par

Youssef ALILOU

Composition du jury :

<i>Présidente :</i>	Prof. Evelyne GEHIN	Professeur, Université Paris-Est Créteil, Université Paris 12 UPEC
<i>Rapporteurs :</i>	Dr. Jean-Francis BLOCH	Maître de Conférences HDR, Institut National Polytechnique, Grenoble
	Prof. Philippe SCHMITZ	Professeur, Institut National des Sciences Appliquées, Toulouse
<i>Examineurs :</i>	Prof. Dominique THOMAS	Professeur, Université de Lorraine, Directeur de thèse
	Dr. Nathalie BARDIN-MONNIER	Maitre de Conférences, Université de Lorraine, Co-directrice de thèse
	Dr. Soleiman BOURROUS	Ingénieur de recherche, IRSN, Gif-sur-Yvette
<i>Invités :</i>	Dr. Andreas WIEGMANN	CEO, Math2Market GmbH, Kaiserslautern, Allemagne
	M. Thomas GÉLAIN	Ingénieur de recherche, IRSN, Gif-sur-Yvette

REMERCIEMENTS

Ce mémoire marque la fin d'un peu plus de trois années de recherche au sein de l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. Les travaux présentés dans ce manuscrit n'auraient jamais pu avoir lieu sans l'aide et le soutien de plusieurs personnes. Ainsi, je voudrais remercier toutes les personnes qui ont pu contribuer au bon déroulement de ma thèse.

Je tiens à remercier avec beaucoup de respect Thomas Gélain qui s'est montré d'une disponibilité sans faille et qui a su encadrer mes travaux tout en restant parfaitement ouvert à mes initiatives. Je remercie également Philippe Nerisson pour ses qualités humaines, ses nombreux conseils et son implication dans mes travaux même après son départ à Cadarache. J'adresse mes sincères remerciements à ces deux personnes à la fois, pour avoir accepté de me confier ce travail de recherche.

Je remercie tout particulièrement Soleiman Bourrous avec qui j'ai partagé mon bureau pendant les tous premiers mois et qui est devenu par la suite, mon co-encadrant. Je le remercie d'avoir su partager, grâce à son dynamisme et sa motivation, ses connaissances scientifiques et techniques, qui m'ont été d'une très grande utilité pour mener à bien ces travaux et d'une aide irremplaçable dans les différents choix stratégiques de ce projet. Ce fût un très grand plaisir d'apprendre à ses côtés grâce à ses qualités humaines indescriptibles.

J'adresse mes sincères remerciements à Laurent Bouilloux pour m'avoir accueilli dans son service et pour l'intérêt qu'il a montré pour mon travail de recherche. Je remercie chaleureusement Alain Brunisso d'avoir contribué à créer un environnement de travail très agréable au sein de son laboratoire et pour m'avoir fourni des conditions de travail propices à mon épanouissement.

J'adresse mes sincères remerciements à Dominique Thomas pour avoir accepté de diriger ces travaux de recherche. Tout au long de ma thèse j'ai pu profiter de son expérience et ses compétences techniques, ce qui a largement contribué au bon déroulement de cette thèse. Je remercie chaleureusement Nathalie Bardin-Monnier d'avoir accepté de codiriger ces travaux de recherche. Ses compétences techniques, qu'elle a pu partager avec moi, malgré la distance qui sépare nos lieux de travail respectifs, sa disponibilité permanente et sa gentillesse immense ont rendu le travail à ses côtés un vrai plaisir. Je remercie également Augustin Charvet, Olivier Dufaud, Loïc Wingert, Jean-Cristophe Appert-collin, Charly Koenig et toutes les personnes que j'ai pu rencontrer au sein du Laboratoire des Réactions et Génie des Procédés.

Je tiens également à remercier Laurent Ricciardi pour l'intérêt qui a voulu porter à mes travaux. Son honnêteté intellectuelle et sa rigueur ont contribué significativement à l'amélioration du contenu des différentes publications réalisées au cours de ma thèse. Je remercie Jean Claude Laborde pour l'intérêt qu'il a porté pour mon travail, qui s'est clairement manifesté durant nos conversations animées sur la filtration. Je tiens à remercier Pascal Lemaitre pour les aides précieuses qu'il m'a porté en mécanique des fluides expérimentale pour sa disponibilité et aussi pour avoir partagé ses connaissances avec spontanéité. Mes remerciements vont également à Emmanuel Porcheron pour ses nombreux conseils qui m'ont été très utiles.

J'adresse mes remerciements à Evelyne Géhin de l'université de Paris-Est Créteil pour avoir accepté de présider le jury de thèse.

J'ai l'honneur de remercier Jean-Francis Bloch de l'institut national polytechnique de Grenoble et Philippe Schmitz de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse pour avoir accepté de faire partie de ce jury et d'en être les rapporteurs.

Un grand merci aux personnes qui ont fait le quotidien de ces trois années. Je pense à Mathieu avec qui les discussions lors des pauses cafés ont été parfois très animés mais incontestablement très enrichissante. Je pense aussi à Nadia que je remercie pour sa bonne humeur et sa gentillesse. Je remercie aussi Florent et sa grande « classe », Déborah, Coco et ses macarons qu'on attend toujours, Jonathan avec qui j'ai partagé mon bureau pendant ces derniers mois, Yohan, Jérôme, Victor et Nicolas. Une spéciale pensée aux thésards du SCA Benjamin, Alexis, Laura, Salima. Je n'oublie pas non plus les personnes du 89, FX pour son soutien et ses encouragements, Grégoire, Jean-Christophe pour son implication dans les journées de thèse, Sylvain B et F, Anne Laure, Audrey et François G, les ex-SCA Antony, Frédéric et Anoir. Je pense également à Catherine (R et M) et Geneviève, pour leur gentillesse et leur efficacité sur toutes les questions administratives.

Je remercie très chaleureusement tous les membres de ma famille, mes parents et deux frères qui, malgré la grande distance qui nous sépare, m'ont témoigné un soutien permanent et sans faille contribuant ainsi à la bonne réalisation de ce travail. Je vous aime, simplement. Merci de m'avoir permis d'être celui que je suis maintenant; Je vous dédie ce mémoire.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	II
REMERCIEMENTS	II
NOMENCLATURE	I
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	3
1. INTRODUCTION	3
2. GENERALITES SUR LA FILTRATION	3
2.1. Caractéristiques des filtres plissés.....	3
2.1.1. Conception des filtres plissés	3
2.1.2. Grandeurs physiques caractéristiques des médias fibreux	4
2.2. Performance d'un filtre plissé.....	6
2.2.1. Efficacité.....	6
2.2.2. Perte de charge.....	6
2.3. Aérosols et fluide porteur	7
2.3.1. Aérosols.....	7
2.3.2. Fluide porteur.....	8
2.3.3. Réentraînement des aérosols.....	8
2.3.4. Rebond des aérosols.....	9
2.4. Mécanismes de collecte	10
2.4.1. Diffusion.....	10
2.4.2. Impaction.....	10
2.4.3. Interception.....	10
2.5. Classification des filtres utilisés en ventilation nucléaire.....	10
3. AEREAULIQUE D'UN FILTRE VIERGE.....	11
3.1. Perte de charge d'un filtre plan.....	11
3.2. Perte de charge d'un filtre plissé.....	12
3.2.1. Modèles analytiques.....	13

3.2.2. Modèles numériques	15
3.3. Déformation des plis d'un filtre THE	19
4. PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE PLAN AU COURS DU COLMATAGE	20
4.1. Colmatage en profondeur	20
4.2. Colmatage en surface	22
4.2.1. Porosité du dépôt	22
4.2.2. Les modèles de perte de charge	22
4.3. Colmatage en profondeur et en surface	23
5. PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE PLISSE AU COURS DU COLMATAGE	24
5.1. Approche numérique avec description Lagrangienne	24
5.1.1. Résolution complète écoulement-transport	24
5.1.2. Approximation de l'écoulement	26
5.2. Approche empirique	27
6. CONCLUSION	29
CHAPITRE II : AÉRAULIQUE D'UN FILTRE PLISSE THE	31
1. INTRODUCTION	31
2. NOTATIONS	32
3. ÉTUDE EXPERIMENTALE DES ECOULEMENTS D'AIR DANS UN FILTRE PLISSE THE	33
3.1. Introduction	33
3.2. Banc expérimental	33
3.2.1. Présentation de la technique utilisée	33
3.2.2. Descriptif du banc expérimental	34
3.2.3. Algorithme de traitement des images	37
3.2.4. Post-traitement des vecteurs de vitesse	39
3.2.5. Validation des essais	39
3.3. Résultats expérimentaux	40
3.3.1. Adimensionnement du champ de vitesse	41

3.3.2. Profils de vitesse	41
3.4. Conclusion	43
4. ETUDE NUMERIQUE DES ECOULEMENTS D'AIR DANS UN FILTRE PLISSE THE ET VALIDATION DES CODES DE CALCUL	43
4.1. Introduction	43
4.2. Simulations avec le logiciel ANSYS CFX®	43
4.2.1. Domaine de calcul	44
4.2.2. Paramètres de simulation	45
4.2.3. Résultats et comparaisons	46
4.3. Simulation avec le logiciel GeoDict®	48
4.3.1. Domaine de calcul	48
4.3.2. Paramètres de simulation	49
4.3.3. Résultats et comparaisons	49
4.4. Conclusion	52
5. MODELISATION DES ECOULEMENTS D'AIR ET DE LA PERTE DE CHARGE DANS UN FILTRE PLISSE THE	52
5.1. Introduction	52
5.2. Modélisation des écoulements d'air dans un pli de filtre plissé THE.....	53
5.2.1. Détermination de la vitesse moyenne u	53
5.2.2. Détermination de la fonction f	55
5.2.3. Détermination de la vitesse globale	56
5.3. Modélisation de la perte de charge à travers un pli	59
5.3.1. Hypothèses du modèle	59
5.3.2. Caractéristiques du fond de pli	61
5.3.3. Représentativité du filtre complet	63
5.3.4. Principe du modèle.....	64
5.4. Conclusion	65

6. VALIDATION DU MODELE A L'ECHELLE DU FILTRE	66
6.1. Validation à l'échelle d'un filtre THE	66
6.1.1. Installation CATFISH	66
6.1.2. Essai et comparaison	66
6.1.3. Validation à l'échelle de filtres THE avec des données de la littérature	68
6.2. Extension du modèle à des filtres à moyenne efficacité	70
6.2.1. Application du modèle à des filtres ME	70
6.3. Étude de sensibilité	72
6.3.1. Filtres THE	72
6.3.2. Filtres ME	74
7. CONCLUSION	76
CHAPITRE III : COLMATAGE DES FILTRES PLISSES THE	78
1. INTRODUCTION	78
2. ÉTUDE EXPERIMENTALE DU COLMATAGE D'UN PLI DE FILTRE PLISSE THE	79
2.1. Introduction	79
2.2. Banc expérimental	79
2.2.1. Description du banc expérimental	79
2.2.2. Aérosols de colmatage	80
2.2.3. Caractéristiques du générateur de particules	81
2.3. Résultats expérimentaux	82
2.3.1. Mesure de la porosité (branche 3)	82
2.3.2. Évolution de la perte de charge du gâteau formé sur filtre plan (branche 4)	86
2.3.3. Évolution de la perte de charge du pli au cours du colmatage (branche 1)	87
2.4. Conclusion	88
3. ETUDE NUMERIQUE DU COLMATAGE D'UN PLI DE FILTRE PLISSE THE	89
3.1. Introduction	89

3.2. Simulation numérique du colmatage avec le code de Calcul GeoDict®	89
3.2.1. Mise en place des simulations GeoDict®	89
3.2.2. Résultats des simulations GeoDict®	91
3.2.3. Porosité macroscopique	100
3.3. Simulation numérique du colmatage à l'aide de ANSYS CFX®	104
3.3.1. Principes de simulation	104
3.3.2. Algorithme	106
3.3.3. Résultats préliminaires	107
3.4. Conclusion	108
4. MODELISATION DU COLMATAGE D'UN FILTRE PLISSE THE	109
4.1. Introduction	109
4.2. Formulation générale de la perte de charge d'un dépôt inhomogène selon Kozeny-Carman	109
4.3. Principe et hypothèse du modèle	110
4.3.1. Perte de charge du média (ΔP_d)	111
4.3.2. Perte de charge du gâteau (ΔP_g)	111
4.3.3. Perte de charge du plissage (ΔP_f)	112
4.3.4. Implémentation du modèle	113
4.4. Validation du modèle	113
4.4.1. Comparaison avec les résultats expérimentaux	113
4.4.2. Influence de la perte de charge due au plissage	117
4.4.3. Influence de la porosité macroscopique	118
4.5. Conclusion	119
5. CONCLUSION	120
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	121
REFERENCES	A
ANNEXE I	E
ANNEXE II	F

ANNEXE III	G
ANNEXE IV	H
ANNEXE V	J
LISTE DES FIGURES	L
LISTE DES TABLEAUX.....	S

NOMENCLATURE

Lettres latines

<i>a</i>	Constante de la perte de charge en régime turbulent	$[kg.m^{-3}.s^{-1}]$
<i>A</i>	Coefficients de calcul du coefficient de Cunningham	$[\]$
<i>a_n</i>	Éléments de la suite décrivant l'écoulement	$[\]$
<i>A_H</i>	Constante de Hamaker	$[J]$
<i>b</i>	Constante de la perte de charge en régime turbulent	$[m^2]$
<i>Bi</i>	Bilan des forces extérieures exercées sur le fluide	$[N]$
<i>B</i>	Coefficients de calcul du coefficient de Cunningham	$[\]$
<i>Co</i>	Constante de calcul de la porosité	$[\]$
<i>c₁</i>	Coefficient empirique	$[m^3.kg^{-1}]$
<i>c₂</i>	Coefficient empiriques	$[m^8.kg^{-2}.s^{-2}]$
<i>C_{amont}</i>	Concentration en particules en amont du filtre	$[m^{-3}]$
<i>C_{aval}</i>	Concentration en particules en aval du filtre	$[m^{-3}]$
<i>CE</i>	Coefficient d'épuration	$[\]$
<i>C</i>	Coefficient de calcul du coefficient de Cunningham	$[m]$
<i>Cu</i>	Coefficient de Cunningham	$[\]$
<i>C_d</i>	Coefficient de traînée	$[\]$
<i>c</i>	Largeur du pli	$[m]$
<i>D</i>	Coefficient de diffusion	$[m^2.s^{-1}]$
<i>D_{em}</i>	Diamètre équivalent en masse	$[m]$
<i>D_{ev}</i>	Diamètre équivalent en volume	$[m]$
<i>d</i>	Diamètre équivalent aérodynamique	$[m]$
<i>D_m</i>	Diamètre équivalent de mobilité	$[m]$
<i>D_{st}</i>	Diamètre équivalent de Stokes	$[m]$
<i>D_{pp}</i>	Diamètre de particules primaires	$[m]$
<i>dt</i>	Temps infinitésimal	$[s]$
<i>d_p</i>	Diamètre de particule	$[m]$
<i>D_p</i>	Diamètre des pores	$[m]$
<i>d_f</i>	Diamètre des fibres	$[m]$
<i>dP</i>	Perte de charge locale	$[Pa]$
<i>dx</i>	Distance infinitésimal	$[m]$
<i>e</i>	épaisseur du média	$[m]$

\vec{e}_x	Vecteur unitaire dans la direction du pli	[]
\vec{e}_y	Vecteur unitaire orthogonale à \vec{e}_x	[]
E	Rendement (ou efficacité)	[]
F_c	Facteur de recouvrement	[]
E_{vdw}	Energie de Van der Waals	[J]
E_c	Énergie cinétique	[J]
F_{VDW}	Force de Van der Waals	[N]
F_T	Force de trainée	[N]
f	Fonction mathématique	[]
G	Grammage	[kg.m ⁻²]
h_k	Constante de Kozeny	[]
h	L'ouverture du pli selon la profondeur	[m]
K_n	Nombre de Knudsen	[]
k	Perméabilité	[m ²]
L_{eff}	Longueur effective du pli	[m]
L	Longueur du pli	[m]
L_m	Longueur du média	[m]
l_0	Distance caractéristique	[m]
m_s	Masse surfacique	[m ²]
$m_{média}$	Masse du média	[kg]
n_1	Nombre de particule par volume du premier mode	[cm ⁻³]
N_v	Nombre de voxels constituant le dépôt	[]
n	Nombre entier	[]
n_2	Nombre de particule par volume du deuxième mode	[cm ⁻³]
n_t	Nombre total de particules par volume	[cm ⁻³]
o	Ouverture au fond du pli	[m]
p	Pas du pli	[m]
P_m	Perméance du filtre	[]
P_{amont}	Pression en amont du filtre	[Pa]
P_{aval}	Pression en aval du filtre	[Pa]
Pe	Nombre de Peclet	[]
P_a	Pression de l'air à l'entrée du pli	[Pa]
P_i	Pression de l'air avant l'entrée dans le média	[Pa]
P_v	Pression de l'air à la sortie du pli	[Pa]
P_{ref}	Pression de référence	[Pa]

Q	Débit surfacique	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
Q_f	Débit de filtration surfacique	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
R	Résistance du filtre	$[m^{-1}]$
R_i	Rapport d'interception	[]
Re	Nombre de Reynolds	[]
r_f	Diamètre des fibres	$[m]$
R_p	Coefficient caractérisant la distribution de particules utilisée	$[m^2]$
Rs	Rapport de la réduction de surface	[]
$resnorm$	Écart relatif	[]
Stk	Nombre de Stokes	[]
s	Variable décrivant le fond du pli	[]
Sc	Surface de contrôle	$[m^2]$
S_f	Surface de filtration	$[m^2]$
T	Résultante des forces appliquée à Sc	$[N]$
$S_{média}$	Surface du média	$[m^2]$
t	Temps	$[s]$
S_{vi}	Surface vide dans la couche i	$[m^2]$
S_{gi}	Surface du gâteau dans la couche i	$[m^2]$
u	Composante de la vitesse selon \vec{e}_x	$[m \cdot s^{-1}]$
\bar{u}	Vitesse moyenne	$[m \cdot s^{-1}]$
U	Vitesse adimensionnée	[]
v	Deuxième composante de la vitesse \vec{e}_y	$[m \cdot s^{-1}]$
v_f	Vitesse locale de filtration	$[m \cdot s^{-1}]$
v_i	Vitesse en entrée du pli	$[m \cdot s^{-1}]$
V_f	Vitesse moyenne de filtration à travers le filtre	$[m \cdot s^{-1}]$
V_{ox}	Taille du voxel	$[m]$
V_a	Vitesse caractéristique de l'air	$[m \cdot s^{-1}]$
V_n	Vitesse nominale de filtration	$[m \cdot s^{-1}]$
vi	Fonction du vide	[]
V	Vitesse de l'air au sein du pli	$[m \cdot s^{-1}]$
v_p	Vitesse des particules	$[m \cdot s^{-1}]$
w	Épaisseur du dépôt	$[m]$
x, y	Coordonnées cartésiennes	$[m]$
y_1	Coordonné maximale du média	$[m]$
y_0	Coordonné minimale du média	$[m]$

Y	Ordonnée adimensionnée	[]
Z	Épaisseur du média	[m]
z_0	Distance minimale de contact	[m]
z	Distance entre deux particules	[m]

Lettres grecques

α	Compacité du dépôt	[]
α_p	Compacité du dépôt	[]
α_i	Fraction volumique de particules dans le voxel i	[]
α_i	Fraction volumique de particules dans le voxel i	[]
γ_i	Proportion de particule pour le mode i	[]
δ	Porosité macroscopique	[]
α_m	Compacité du média	[]
ΔP	Perte de de charge du filtre (ou du pli)	[Pa]
ΔP_0	Perte de charge initiale du filtre	[Pa]
ΔP_g	Perte de charge du dépôt	[Pa]
ΔP_{ko-ca}	Perte de charge du dépôt calculé avec la loi de Kozeny-Carman	[Pa]
ΔP_d	Perce de charge du média	[Pa]
ΔP_f	Perte de charge du plissage	[Pa]
ΔP_r	Perte de charge régulière	[Pa]
Δp_f	Perte de charge due au plissage	[Pa]
ε_m	Porosité du média	[]
ε_{moy}	Porosité moyenne du dépôt	[]
ε_0	constante utilisée pour le calcul de la porosité	[]
μ	Viscosité dynamique de l'air	[$Pa \cdot s$]
ρ_p	Masse volumique des particules	[$kg \cdot m^{-3}$]
ρ	Masse volumique du fluide	[$kg \cdot m^{-3}$]
ρ_f	Masse volumique des fibres constituant le média	[$kg \cdot m^{-3}$]
σ	Écart type	[]
φ	Angle d'ouverture du pli	[°]
Ω	Section du filtre	[m^2]
λ	Libre parcours moyen	[m]
ζ	Coefficient de perte de l'énergie cinétique	[]
C	Coefficient de perte de charge	[]

INTRODUCTION GENERALE

La filtration est une technique qui permet de collecter des particules solides ou liquides en suspension dans l'air par passage du gaz porteur au travers d'un milieu poreux, généralement constitué de fibres. Ces médias sont habituellement plissés afin d'augmenter la surface de filtration tout en minimisant le volume du filtre. Ils sont largement utilisés dans le domaine de l'épuration de l'air (chambre d'admission moteur, salles blanches, confinement nucléaire...) de par leur simplicité d'usage et de maintenance.

Les filtres à très haute efficacité (THE) offrent une efficacité minimale proche de 100% au détriment cependant, d'une perte de charge initiale importante et donc d'une dépense énergétique non négligeable au cours de leur utilisation. Dans les installations nucléaires françaises, ce type de filtre est utilisé dans les réseaux de ventilation pour assurer le confinement de la matière radioactive. Ils constituent ainsi, la barrière ultime avant un rejet potentiel de contaminant aéroporté dans l'atmosphère. Cette voie constitue le principal vecteur de transfert de contamination dans l'industrie nucléaire.

Pour la majorité des utilisations, la durée de vie d'un filtre est conditionnée par une perte de charge maximale au-delà de laquelle il n'est plus possible de maintenir le débit ou par une chute de son efficacité. Il doit alors être remplacé par un filtre neuf. Dans une situation accidentelle conduisant à la production excessive de particules (incendie, fuite de contaminant), une opération de remplacement des filtres ne peut être effectuée durant l'accident. Le dépôt de particules sur le filtre entraîne une augmentation rapide de la perte de charge et par la suite une chute du débit d'extraction ou, dans le cas extrême, une rupture du média filtrant. Ainsi, afin de prendre les mesures nécessaires visant à maintenir le confinement de l'installation, la prédiction du comportement de ces composants de sûreté est essentielle. Dans cette optique, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) et le LRGP (Laboratoire Réactions et Génie des Procédés) ont conduit différents projets de recherche visant à caractériser le comportement et l'évolution des performances (efficacité et perte de charge) des filtres THE en situations nominale et accidentelle.

Ce projet de recherche vise à développer un modèle prédictif permettant de caractériser l'évolution de la résistance aérodynamique d'un filtre plissé THE au cours de son colmatage dont les écoulements d'air sont une composante essentielle. L'étude de la perte de charge d'un filtre a fait l'objet de plusieurs axes de recherche au sein de l'IRSN et du LRGP.

A l'heure actuelle, des modèles physiques décrivant l'évolution de la perte de charge ont été développés et validés sur des filtres plans mais peu intègrent la géométrie du filtre (plissage). Cette étude vise à pallier ce manque et porte essentiellement sur les écoulements au sein des filtres THE plissés qui vont conditionner la résistance à l'écoulement et l'évolution de la perte de charge au cours du colmatage.

L'étude des filtres plissés peut s'envisager à quatre échelles :

- échelle des fibres : à cette échelle, l'étude porte sur les écoulements autour des fibres et leur interaction avec les particules. Elle est plus adaptée à des études de mode de collecte (efficacité unitaire) ;
- échelle du média : cette échelle est plus adaptée à l'étude de la perméabilité du média et à son efficacité en prenant en compte la poly-dispersion des fibres, leur orientation et la porosité du média ;

- échelle du pli : ce niveau permet de caractériser l'écoulement en amont du média plissé et d'étudier la formation du dépôt à la surface du média. En termes de perte de charge, cette échelle est représentative du filtre complet ;
- échelle du filtre : cette échelle est adaptée aux études visant à développer des corrélations empiriques pour caractériser le fonctionnement du filtre installé dans un réseau de ventilation.

Dans la présente étude, l'échelle étudiée est celle du pli. Ce choix est justifié par deux principales raisons :

- la caractérisation des écoulements : seule l'étude de l'écoulement de l'air dans le canal du pli nous intéresse, en effet, l'écoulement en amont du filtre peut être assimilé à un écoulement en conduite, ce qui est bien documenté dans la littérature ;
- la caractérisation du colmatage : en comparaison avec un filtre complet, la masse nécessaire pour colmater un pli est nettement moins importante, ce qui représente un gain de temps sur le plan expérimental et numérique.

Afin de décomposer la problématique, l'approche retenue sera de se focaliser, d'une part sur l'écoulement de l'air au sein d'un pli, d'autre part sur la formation du dépôt de particules à la surface du média plissé. De ce fait, la stratégie adoptée pour le déroulement de la thèse repose sur deux axes principaux avec une double approche : expérimentale et numérique à l'échelle du pli. Dans une première partie, l'accent est mis sur l'aérodynamique d'un filtre vierge. La seconde partie concerne la formation du dépôt au sein du pli.

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude bibliographique. Après un bref rappel de la théorie de la filtration, nous avons dressé un état des connaissances sur les interactions média-particules. Ensuite, un bilan sur les modèles analytiques et numériques d'évolution de la perte de charge des filtres plan et plissé vierges et au cours du colmatage a été réalisé. Sur cette base, une stratégie d'étude a été définie afin de répondre pleinement à la problématique du projet.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude de l'écoulement de l'air au sein d'un pli de filtre plissé THE. En se basant sur des techniques de diagnostics optiques, des mesures de champs de vitesse ont été entreprises et ont, par la suite, servi à la validation des codes de calcul. Un modèle semi-analytique permettant de décrire les écoulements d'air au sein du canal d'écoulement du pli a été proposé et validé sur la base de mesures de perte de charge de filtres THE vierges.

Dans le troisième chapitre, l'attention est portée sur le colmatage du filtre. Un banc expérimental permettant de caractériser le dépôt de particules formé sur le filtre ainsi que l'élévation de sa perte de charge, a été développé. Afin d'obtenir les paramètres caractérisant la croissance du dépôt au cours du colmatage, dont la mesure reste difficile, un couplage expérimental-numérique a été mis au point pour obtenir un maximum de données nécessaires à la modélisation. Enfin, un modèle simple de colmatage prenant en compte le plissage du média est présenté et validé sur la base de mesures expérimentales.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

1. INTRODUCTION

Ce chapitre présente un état de l'art sur la filtration des aérosols solides par des médias fibreux. Tout d'abord, l'accent est porté sur les phénomènes entrant en jeu lors d'un processus de filtration à différents niveaux (aérosols, fluide porteur, filtre). Ensuite, la modélisation de la perte de charge initiale du filtre ainsi que son évolution au cours du colmatage sont abordées.

2. GENERALITES SUR LA FILTRATION

2.1. Caractéristiques des filtres plissés

2.1.1. Conception des filtres plissés

Un filtre plissé (Figure 1) se compose d'une armature en acier galvanisé ou inoxydable (cas des filtres standards utilisés dans les réseaux de ventilation) et parfois en polymère (cartouches filtrantes, boîtes à gants...). Le lut, placé à l'intérieur de l'armature, assure l'étanchéité entre le média filtrant et cette dernière. Il est en matière minérale ou matière plastique (chlorure de polyvinyle, polyuréthane, silicone), le joint d'étanchéité amont-aval placé autour de l'armature se compose de néoprène, fibres de verre, ou silicone. Les médias plissés sont généralement fibreux (cf. Figure 2 pour des médias en fibre de verre). La composition de ces différents éléments dépend des exigences inhérentes à leur utilisation (température de fonctionnement, efficacité attendu, etc...).

Le recours au plissage des médias permet d'augmenter la surface de filtration tout en limitant l'encombrement. Dans le domaine nucléaire, les formats de plissage sont de deux types (Bouilloux, 2006 ; Joubert, 2009) :

- le plissage à petits plis (figure 1), utilisé dans l'industrie française. La nappe fibreuse est plissée sur une hauteur de 20 à 50 mm, les plis étant entretoisés par l'intermédiaire de fils ou de bandelettes ;
- le plissage à plis profonds (cf. Figure 3), utilisé principalement outre-Atlantique. La nappe fibreuse est plissée en accordéon sur toute la profondeur du filtre. les plis sont entretoisés par l'intermédiaire de séparateurs gaufrés, généralement en aluminium.

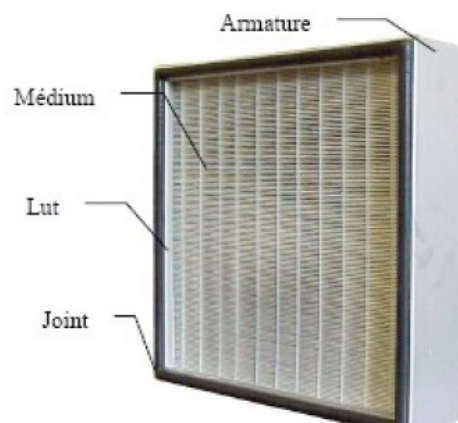


Figure 1 : filtre plissé avec un média THE (Bouilloux 2006)

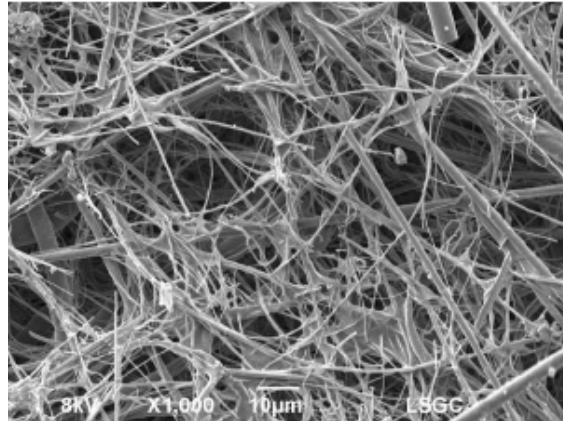


Figure 2 : filtre THE plan vu au MEB (média en fibre de verre ; Joubert, 2009)

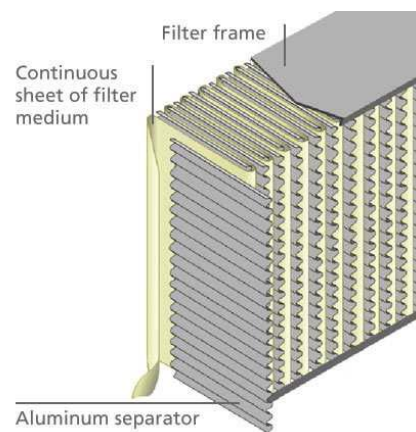


Figure 3 : plissage à plis profonds (BD biosciences, 2012))

Le plissage se caractérise par : la hauteur du pli L , le pas p (ou l'angle de plissage φ) comme l'illustre la Figure 4 :

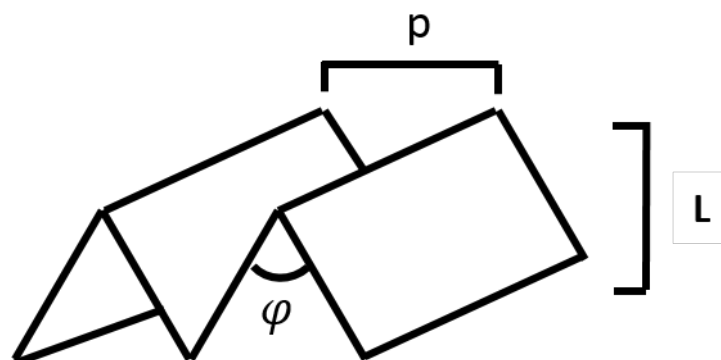


Figure 4: schéma des caractéristiques d'un pli de filtre plissé

2.1.2. Grandeurs physiques caractéristiques des médias fibreux

Diamètre des fibres :

Les fibres sont généralement poly-dispersées (Figure 2) et sont caractérisées par leur diamètre moyen largement utilisé dans la modélisation du colmatage. Certains auteurs (Davies, 1973; Penicot, 1998) l'ont estimé à partir de la résistance aéraulique du média, d'autres (Bourrous,

2014) l'ont caractérisé expérimentalement à partir d'une observation directe du média par des techniques de microscopie. L'exploitation des images a longtemps été réalisée manuellement, mais aujourd'hui le traitement numérisé des clichés permet d'améliorer la validité statistique de ces mesures.

Épaisseur

L'épaisseur du média est un paramètre important qui conditionne la perte de charge du filtre. Par exemple, Bourrous (2014) a utilisé une méthode directe d'observation, reposant sur l'observation d'un média enrobé dans une matrice organique par un microscope électronique à balayage muni de détecteurs EDX (Figure 5). Elle permet d'obtenir des épaisseurs locales sur un plan de coupe transversal du média à condition de pouvoir détecter un élément chimique spécifique des fibres.

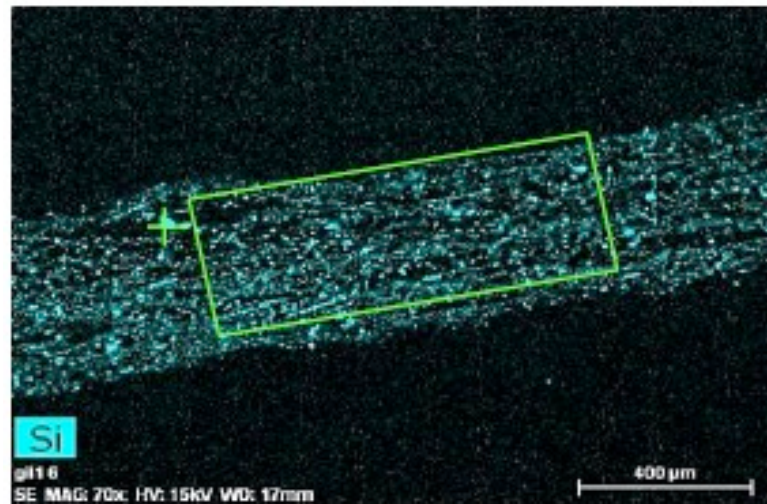


Figure 5 : cartographie de l'élément silicium (principal constituant du média des filtres THE à petits plis CAMFIL) sur une tranche du média (Bourrous, 2014)

Grammage

Le grammage G ($kg \cdot m^{-2}$) exprime le rapport entre la masse du média et sa surface. Il prend en compte la densité des fibres et la compacité du média.

$$G = \frac{m_{media}}{S_{media}} \quad \text{Équation 1}$$

Compacité

La compacité d'un média α_m est le rapport entre le volume occupé par les fibres sur le volume total du média. Elle s'exprime par :

$$\alpha_m = \frac{\text{Volume des fibres}}{\text{Volume total}} = \frac{G}{\rho_f Z} \quad \text{Équation 2}$$

Avec ρ_f ($kg \cdot m^{-3}$) la masse volumique des fibres et Z (m) l'épaisseur du média.

Il existe de nombreux moyens pour mesurer α_m . Citons par exemple la micro-tomographie ou l'observation directe par un MEB (Bourrous, 2014). La porosité est définie par son complément :

$$\varepsilon_m = 1 - \alpha_m \quad \text{Équation 3}$$

2.2. Performance d'un filtre plissé

La performance d'un filtre est caractérisée par deux grandeurs : l'efficacité et la perte de charge.

2.2.1. Efficacité

L'efficacité d'un filtre est sa capacité à collecter les aérosols transportés par le fluide porteur. Il existe de nombreuses expressions pour définir cette grandeur. Selon les utilisations et le niveau d'efficacité recherché, on utilisera l'une ou l'autre. On peut notamment définir :

Rendement

Le rendement E est le rapport de la concentration des particules collectées sur la concentration des particules incidentes (amont du filtre) :

$$E = \frac{C_{amont} - C_{aval}}{C_{amont}} \quad \text{Équation 4}$$

$C(m^{-3})$ représente la concentration en particules. E est exprimé, en général, en pourcentage. Il est surtout utilisé pour caractériser les filtres à moyenne efficacité.

Perméance

La perméance P_m est le complément du rendement, définie comme :

$$P_m = \frac{C_{aval}}{C_{amont}} \quad \text{Équation 5}$$

Coefficient d'épuration

Le coefficient d'épuration CE est l'inverse de la perméance. Il est surtout utilisé pour les filtres de très haute efficacité :

$$CE = \frac{C_{amont}}{C_{aval}} \quad \text{Équation 6}$$

2.2.2. Perte de charge

La perte de charge d'un filtre est la différence de pression de l'air traversant le filtre entre l'amont et l'aval :

$$\Delta p = p_{amont} - p_{aval} \quad \text{Équation 7}$$

Elle est équivalente à une perte d'énergie et dépend du débit de filtration. La résistance aéraulique est la résistance à l'écoulement induite par la présence du filtre dans un réseau de ventilation. On définit cette résistance comme le rapport entre la perte de charge Δp et la vitesse de filtration $V_f = \frac{Q}{S_f}$ (le débit traversant le filtre ramené à la surface de filtration) au travers du filtre multipliée par la viscosité dynamique du fluide μ . Elle s'exprime en m^{-1} :

$$R = \frac{\Delta p}{V_f \mu} \quad \text{Équation 8}$$

Il s'agit d'une grandeur qui ne dépend pas du débit de filtration, elle est intrinsèque au filtre.

2.3. Aérosols et fluide porteur

« Un aérosol est un ensemble de particules, solides et/ou liquides, en suspension dans un milieu gazeux et présentant une vitesse de chute négligeable » (Renoux et Boulaud (1998)). Par abus de langage, on peut assimiler une particule à un aérosol.

2.3.1. Aérosols

2.3.1.1. Diamètres caractéristiques

La loi de distribution en taille des aérosols suit le plus souvent, une loi normale ou lognormale, dans ce cas, le diamètre des aérosols est assimilé au diamètre médian. Il convient également de distinguer la distribution en nombre ou en masse qui diffère sensiblement pour un même aérosol. La majorité des aérosols présentent une morphologie complexe. Par exemple, les particules minérales notamment (SiO_2 , Al_2O_3 etc...) ne présentant pas une forme parfaitement sphérique (cf. Figure 6) :

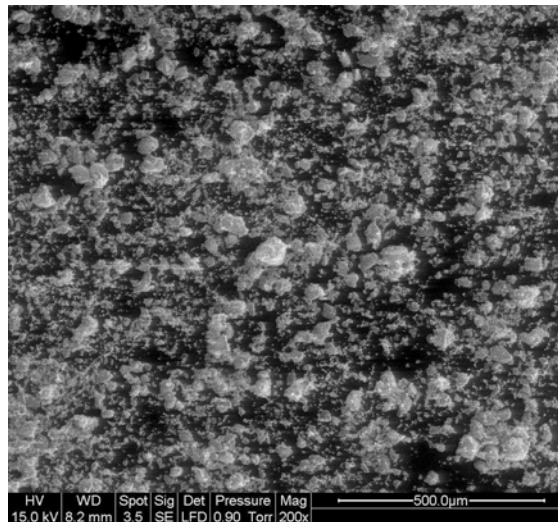


Figure 6 : vue MEB des particules d'alumine Al_2O_3 type UCV-12 (Delcour, 2014)

Selon le domaine d'étude, on utilise plusieurs diamètres caractéristiques. Les plus utilisés sont les suivants :

- le diamètre équivalent en masse D_{em} correspond au diamètre qu'aurait la particule contenant la même masse, si elle était sphérique ;
- 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 est le diamètre qu'aurait une particule sphérique de densité unitaire avec la même vitesse de chute ;
- le diamètre équivalent de mobilité D_m est le diamètre équivalent correspondant à un aérosol sphérique ayant la même mobilité électrique ;
- le diamètre de Stokes D_{st} est le diamètre d'une particule sphérique de même masse volumique et ayant la même vitesse de chute ;

Le comportement d'une particule dans un fluide dépend des caractéristiques qui régissent son interaction avec ce fluide. Au premier titre se trouve sa force de traînée et son inertie. Le

diamètre aérodynamique rend compte de ces deux points. De plus, lors de sa mesure par un appareil dédié, il intègre la morphologie de la particule. Il est souvent utilisé dans les simulations numériques pour décrire la croissance du dépôt ou dans les modèles qui caractérisent l'évolution de la perte de charge d'un dépôt.

2.3.2. *Fluide porteur*

Pour appréhender le comportement d'un fluide, on distingue deux échelles :

- le domaine continu dans lequel le fluide est considéré comme un continuum, les phénomènes physiques propres au fluide sont régis par les lois de la mécanique des milieux continus. Les trajectoires des particules portées par ce fluide sont déterministes ;
- le domaine moléculaire pour lequel, à l'échelle nanométrique, le fluide est considéré comme un milieu discret où chaque molécule suit une trajectoire erratique selon son agitation thermique et ses collisions avec les autres molécules.

Le nombre de Knudsen K_n qui représente le rapport entre le libre parcours moyen λ et une longueur caractéristique du système notée l_0 permet de définir le régime à considérer.

$$K_n = \frac{\lambda}{l_0} \quad \text{Équation 9}$$

Le libre parcours moyen (la distance moyenne qu'une molécule parcourt sans subir de collision) vaut pour l'air 66,4 nm dans les conditions normales de pression et de température. Dans la présente étude, afin de considérer les phénomènes intervenant à l'échelle d'une particule l_0 est prise égale à son diamètre.

Les équations de la mécanique des fluides sont valables pour les faibles valeurs du nombre de Knudsen ($K_n \ll 1$).

Dans le domaine moléculaire, où le nombre de Knudsen est largement supérieur à 1, les particules sont petites (de l'ordre du nanomètre à la dizaine de nanomètre) devant λ . Par les chocs incessants avec les molécules du gaz, celles-ci subissent des déplacements aléatoires décrits par la théorie cinétique des gaz.

Pour des particules de taille intermédiaire ($K_n \sim 1$), dont le diamètre est compris entre la dizaine de nanomètre et le micromètre, le comportement est extrapolé du domaine moléculaire ou du domaine continu. Pour ceci, le facteur de Cunningham C_u fait la transition entre ces deux régimes. Il lie ces deux domaines en prenant en compte le glissement des particules sur la paroi. Cunningham (1910) a proposé d'utiliser une expression exponentielle à trois constantes empiriques pour exprimer ce facteur.

$$C_u = 1 + K_n(A + B \cdot \exp(-\frac{C}{K_n})) \quad \text{Équation 10}$$

Ce facteur est égal à 1 pour les faibles valeurs de K_n et augmente avec le nombre de Knudsen (quand le diamètre des particules devient plus petit).

2.3.3. *Réentraînement des aérosols*

Au cours du colmatage, les particules déposées peuvent être réentraînées par le fluide porteur. Ce phénomène dépend du ratio entre les forces d'adhésion et les forces aérodynamiques.

Les forces qui agissent en faveur de la fixation peuvent être de nature électrostatique, capillaire ou cohésive (force de Van der Waals) (Alloul-Marmor, 2002). En raison de la taille

des particules étudiées, en air sec et non chargées électriquement, on s'intéressera essentiellement à la force de Van der Waals.

Les forces favorisant le réentraînement des particules sont les forces aérodynamiques. Si ces forces sont supérieures à celles de l'adhésion, la particule est remise en suspension.

- Force de Van der Waals : c'est la combinaison de trois forces : Les forces de dispersion (forces de London), les forces de dipôles induits (forces de Debye) et les forces de dipôles permanents (forces de Keesom). Elles sont dues au fait qu'à l'échelle atomique, les molécules ou atomes constituant la matière peuvent être assimilés à des dipôles oscillants ayant une charge locale. Généralement, les forces de Van der Waals sont assimilées aux forces de dipôle que l'on exprime pour deux corps sphériques (particules) de diamètres d_{p1} et d_{p2} par :

$$F_{VDW} = \frac{A_H}{12z^2} \frac{d_{p1}d_{p2}}{d_{p1} + d_{p2}} \quad \text{Équation 11}$$

Où A_H est la constante de Hamaker propre à la nature chimique des particules et z la distance entre les surfaces des particules.

- La force de traînée : cette force entraine la particule dans l'écoulement fluide, elle s'exprime pour une particule sphérique et dans le cas des écoulements laminaires sous la forme :

$$F_T = 3\pi\mu d_p V_a \quad \text{Équation 12}$$

Où V_a est la vitesse relative des particules, C_d le coefficient de traînée, d_p le diamètre des particules, ρ la masse volumique du fluide et μ sa viscosité.

2.3.4. Rebond des aérosols

Au moment de son contact avec le média (ou le cas échéant le dépôt), la particule peut, selon son énergie cinétique, rebondir et être réentraînée par l'écoulement. Afin d'étudier la pertinence de la prise en compte du rebond des particules au cours du colmatage, il est nécessaire de comparer l'énergie cinétique de la particule au moment du contact, avec son énergie d'adhésion avec une autre particule du même type ou avec une fibre. Comme pour l'étude de la remise en suspension des particules, on considère que l'énergie d'adhésion est principalement liée à celle de Van-der-Waals. Elle peut s'écrire selon Hamaker (1937) sous la forme :

$$E_{vdw} = \frac{A_H d_p}{12 z} \quad \text{Équation 13}$$

La distance minimale de contact généralement admise est égale à $z_0 = 0,4 \cdot 10^{-9} m$, la constante de Hamaker A_H est comprise entre 10^{-19} et $10^{-20} J$ (Thomas et al. 2017). Le rapport entre l'énergie cinétique de la particule et son énergie d'adhésion est égal :

$$\frac{E_{vdw}}{E_c} = \frac{A_H}{\pi \rho_p z_0 v_p^2 d_p^2} \quad \text{Équation 14}$$

Dans la suite des travaux, l'Équation 14 sera utilisée pour justifier notre choix par rapport à la prise en compte du phénomène de rebond des particules.

2.4. Mécanismes de collecte

Les particules sont collectées par différents types de mécanismes, en fonction de leur taille et des paramètres aérauliques. Dans la filtration de l'air, on peut distinguer trois principaux mécanismes : la diffusion, l'impaction et l'interception.

2.4.1. Diffusion

Ce type de capture est significatif pour des particules de faible diamètre ($d_p < 0,4 \mu\text{m}$). Sous l'agitation brownienne, elles peuvent venir au contact des fibres et y adhérer. On introduit le nombre adimensionnel de Peclet (cf. Équation 15) pour caractériser ce type de collecte. Ce nombre compare le transfert par convection au transfert par diffusion. Plus le nombre de Peclet est faible, plus la séparation par diffusion est importante.

$$Pe = \frac{V_a d_f}{D} \quad \text{Équation 15}$$

Où V_a est la vitesse de l'écoulement, d_f le diamètre de la fibre, et D le coefficient de diffusion de la particule dans le fluide.

2.4.2. Impaction

Ce type de mécanisme concerne les particules massives ($d_p > 1 \mu\text{m}$). En raison de son inertie, une particule est déviée de la ligne de courant, elle contourne la fibre et vient s'impacter à la surface de cette dernière. L'efficacité de ce mode de collecte est caractérisée par le nombre de Stokes :

$$Stk = \frac{C_u \rho_p V_a d_p^2}{18 \mu d_f} \quad \text{Équation 16}$$

Où C_u est le coefficient de Cunningham, ρ_p est la masse volumique des particules, d_p est le diamètre des particules, μ est la viscosité dynamique de l'air. Plus le nombre de Stokes est important plus la séparation par impaction est efficace.

2.4.3. Interception

Ce mécanisme concerne les particules de tailles « moyennes » (entre $0,4 \mu\text{m}$ et $1 \mu\text{m}$). Elles sont peu soumises à la diffusion brownienne et pas suffisamment « grosses » pour être déviées des lignes de courant. Une particule est interceptée par une fibre lorsqu'elle s'approche de celle-ci à une distance inférieure à son rayon. Ce mécanisme, indépendant de la vitesse de filtration, est fonction du rapport R_i entre le diamètre de la particule et le celui de la fibre tel que :

$$R_i = \frac{d_p}{d_f} \quad \text{Équation 17}$$

2.5. Classification des filtres utilisés en ventilation nucléaire

Il existe plusieurs normes pour la classification des filtres THE. Dans le domaine nucléaire français, les filtres sont classés selon leur efficacité par une norme européenne NF-EN-1822, mais les conditions opératoires sont fixées par la norme française NF-EN-ISO 1670.

Cette norme (NF-EN-1822) impose aux filtres d'avoir un minimum d'efficacité globale et locale (en tout point), comme illustré dans le Tableau 1.

Classe du filtre	Valeur locale		Valeur globale	
	Efficacité [%]	Pénétration [%]	Efficacité [%]	Pénétration [%]
E10	≥ 85	≤ 15		
E11	≥ 95	≤ 5		
E12	≥ 99,5	≤ 0,5		
H13	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
H14	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
H15	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025
H16	≥ 99,99995	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025
H17	≥ 99,999995	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,001

Tableau 1 : classification des filtres THE en fonction de leur efficacité (NF-EN-1822)

3. AÉRAULIQUE D'UN FILTRE VIERGE

3.1. Perte de charge d'un filtre plan

En mécanique des fluides, afin de caractériser un écoulement, le nombre adimensionnel de Reynolds, noté Re , est couramment utilisé. Il représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces de frottement visqueux. Dans le cas d'un écoulement à travers un filtre plan et lorsqu'on raisonne à l'échelle macroscopique, la longueur caractéristique est prise égale à la racine de la perméabilité, on a :

$$Re = \frac{\rho V_f \sqrt{k}}{\mu} \quad \text{Équation 18}$$

Où ρ ($kg.m^{-3}$) est la masse volumique du fluide, k (m^2) perméabilité du média, V_f (m/s) la vitesse de l'air à travers le média (vitesse de filtration), μ ($Pa.s$) la viscosité dynamique du fluide.

Pour le type de média fibreux THE utilisé et dans les conditions normales de fonctionnement (en ventilation nucléaire où la vitesse de filtration est inférieure à $3 cm/s$), le régime d'écoulement est laminaire ($Re \ll 1$). Pour ce régime d'écoulement, la loi de Darcy s'applique. La perte de charge est une fonction linéaire de la vitesse d'écoulement qui correspond à la vitesse de filtration. On a donc :

$$\Delta p = \frac{Z}{k} \mu V_f \quad \text{Équation 19}$$

La perméabilité est une fonction de la compacité α_m et du rayon des fibres r_f telle que :

$$k = \frac{r_f^2}{f(\alpha_m)} \quad \text{Équation 20}$$

Différents types de modèles existent dans la littérature pour estimer la fonction $f(\alpha_m)$. Elle dépend de l'orientation des fibres par rapport à l'écoulement.

Pour un écoulement au travers d'un arrangement aléatoire de fibres (cas des filtres THE étudiés), Thomas (2001) a recensé les modèles suivants pour le rapport $\frac{1}{f(\alpha_m)}$ (Tableau 2).

Auteur	Expression de $\frac{1}{f(\alpha_m)}$	Commentaires
(Chen, C.Y., 1955)	$\pi \frac{\ln(C_1 \alpha_m^{-0.5})(1 - \alpha_m)}{16 \alpha_m C_2}$	C_1 et C_2 constantes fonction de l'orientation des fibres. Expérimentalement : $C_1 = 0,34$, $C_2 = 6,1$.
(Spielman, 1968) (Goren, 1968)	$\frac{1}{4\alpha_m} = \frac{1}{3} + \frac{5\sqrt{k}K_1\left(\frac{r_f}{\sqrt{k}}\right)}{6 r_f K_0\left(\frac{r_f}{\sqrt{k}}\right)}$	Pour $\alpha_m < 0,75$. K_1, K_0 fonctions de Bessel modifiées d'ordres 0 et 1.
(Davies, 1973)	$\frac{1}{16\alpha_m^{\frac{3}{2}}(1 + 56\alpha_m^3)}$	Ce modèle reste encore le plus utilisé $0,006 < \alpha_m < 0,3$
(Jakson, 1986) (Henry, 1983)	$\frac{3}{20\alpha_m} (-\ln\alpha_m - 0,931 + 0(\ln\alpha_m)^{-1})$	
(Henry, 1983) (Arman, 1983)	$\frac{1}{2,446\alpha_m + 38,16\alpha_m^2 + 138,9\alpha_m^3}$	

Tableau 2 : modèles recensés pour $\frac{1}{f(\alpha_m)}$ (Thomas, 2001)

Aucune de ces expressions ne permet de prédire l'ensemble des valeurs expérimentales de la perméabilité pour un filtre industriel. En effet, elle dépend également :

- de la polydispersion des fibres constituant le filtre dont le comportement aérodynamique ne peut être caractérisé par le seul diamètre moyen des fibres,
- du liant du média et d'autres traitements industriels qui perturbent l'écoulement,
- selon le processus de fabrication, des irrégularités peuvent exister au sein du même média et impacter sa perméabilité.

Quand la vitesse de filtration devient plus importante, le modèle de Darcy n'est plus suffisant pour modéliser la perte de charge. Un terme quadratique est alors ajouté pour prendre en compte les effets inertiels. La perte de charge s'exprime alors par :

$$\Delta p = aZV_a + b\rho V_a^2 \quad \text{Équation 21}$$

3.2. Perte de charge d'un filtre plissé

Afin d'augmenter la surface de filtration d'un filtre, le média est plissé. Cette opération engendre une réduction de la section de passage de l'écoulement et conduit à une perte de charge supplémentaire qui augmente avec la vitesse de filtration. Ainsi pour un filtre plissé, la perte de charge globale peut être considérée comme la somme de la perte de charge du média et celle due au plissage. En conséquence, l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé n'est pas linéaire. Pour un filtre THE à petit plis (CAMFIL), la contribution du plissage à la perte de charge devient significative à partir d'une vitesse de filtration de 5 cm/s (Figure 7).

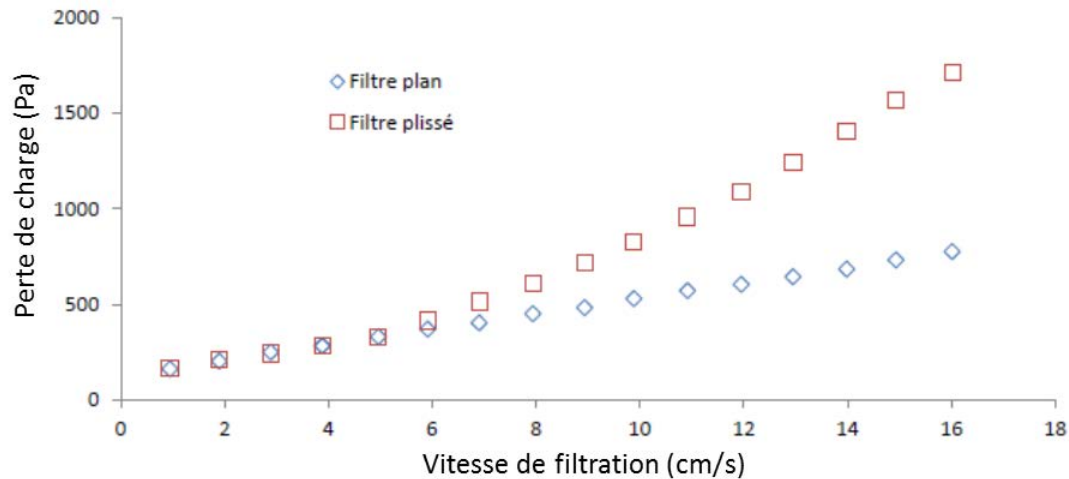


Figure 7 : évolution de la perte de charge d'un filtre plissé THE à petits plis (CAMFIL) en fonction de la vitesse de filtration (Bourrous, 2014)

La perte de charge initiale du filtre est un paramètre important qui conditionne la dépense énergétique du filtre et rentre en jeu lors de la phase conception. Elle détermine aussi le seuil à partir duquel la perte de charge augmente au cours du colmatage. Plusieurs études ont été réalisées dans le but de modéliser cette perte de charge, selon des approches analytiques ou numériques.

3.2.1. Modèles analytiques

3.2.1.1. Le modèle de Del Fabbro (2002)

Del Fabbro (2002) a suivi une analyse adimensionnelle pour estimer la perte de charge au travers d'un filtre plissé vierge qui est exprimée sous la forme suivante :

$$\log\left(\frac{\Delta P}{ZRV_f}\right) = \left(\frac{\mu}{Z^2R}\right)^{0,7} \left(460 \log\left(1 + \frac{LZ}{p^2}\right) + \frac{0,7\left(\frac{L}{p}\right)^2}{\log\left(1 + \frac{L}{Z} \frac{1}{Re}\right)}\right) \quad \text{Équation 22}$$

Avec $L(m)$ la hauteur du pli, $p(m)$ le pas de plissage du filtre, $Z(m)$ l'épaisseur du média filtrant, $R(m)$ la résistance aéraulique du média filtrant, $V_f(m)$ la vitesse de filtration.

Ainsi, nous pouvons vérifier que lorsque le rapport L/p tend vers 0, le « modèle » se rapproche de celui de Darcy (filtre plan). L'utilisation de ce modèle, purement empirique, reste limitée à son domaine de validité comme illustré sur la Figure 8 qui représente une comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales.

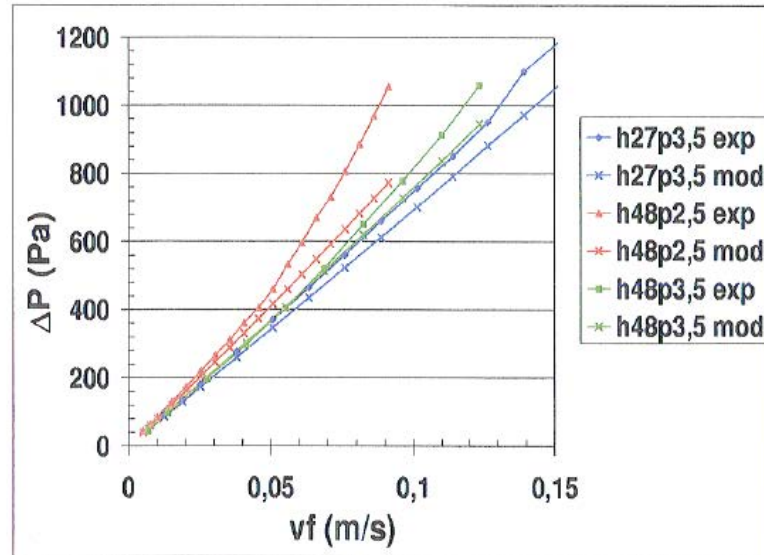


Figure 8 : comparaison de l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE entre les données expérimentales et celles données par le modèle de Del Fabbro (2001)

3.2.1.2. Le modèle de Callé-Chazelet (2007)

Dans ce modèle la perte de charge du filtre plissé est considérée comme la somme de deux contributions : celle du média filtrant et celle des effets géométriques sur l'écoulement. La première contribution est modélisée par la loi de Darcy $\Delta p = \frac{z}{k} \mu V_f$. La valeur de $\frac{z}{k}$ (résistance aéraulique) est déterminée expérimentalement sur le même média mais en géométrie plane. La deuxième contribution concernant la perte de charge Δp_f due aux changements géométriques est supposée proportionnelle à l'énergie cinétique du fluide à la traversée du pli :

$$\Delta p_f = \zeta \frac{\rho}{2} \left(\frac{S_f}{\Omega} \right)^2 V_f^2 \quad \text{Équation 23}$$

Cette perte de charge se calcule par rapport à la vitesse en amont du filtre $\frac{S_f}{\Omega} V_f$, avec :

ζ le coefficient de perte de charge, Ω la section du filtre (m^2), S_f (m^2) la surface du média plissé.

En approximant la surface du média plissé et en se basant sur des données expérimentales, le modèle devient :

$$\Delta p_f = \frac{0,3336}{p} \left(\frac{L}{p} \right)^2 V_f^2 \quad \text{Équation 24}$$

La comparaison entre ce modèle et des résultats expérimentaux de Del Fabbro (2002) montre un accord satisfaisant. Ce modèle, basé sur un bilan d'énergie, repose sur une base plus physique que celui de Del Fabbro. Néanmoins, bien qu'il soit à la source de la perte de charge due au plissage, l'écoulement n'est pas considéré dans ce modèle. En effet, la prise en compte de la seule vitesse de filtration n'est pas suffisante pour rendre compte des éventuelles évolutions du champ de vitesse dans le filtre et donc de son influence sur la perte de charge.

3.2.2. Modèles numériques

3.2.2.1. Principe de la simulation numérique

L'écoulement de l'air au sein des filtres est régi par les équations de Navier-Stokes (NS). La simulation numérique des écoulements repose sur la résolution de ces équations via des schémas numériques en utilisant des algorithmes qui peuvent être implémentés et résolus à l'aide de stations de calcul. L'équation de quantité de mouvement s'écrit en régime stationnaire sous la forme :

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla P + \mu \Delta u + Bi \quad \text{Équation 25}$$

Où u est la vitesse, P est la pression, μ la viscosité dynamique, ρ la masse volumique, et Bi le bilan des forces extérieures exercées sur le fluide.

Pour réaliser une simulation numérique, le maillage du domaine de calcul (discrétisation en espace) constitue la première étape, puis l'équation est résolue à l'échelle de chaque maille et peut se faire selon trois approches principales :

Simulation directe DNS (Direct Numerical Simulation) :

Toutes les structures (de toutes les tailles) de l'écoulement sont résolues explicitement, ainsi le nombre de mailles nécessaire est très grand et nécessite des moyens de calculs importants. Cette méthode est rarement utilisée dans un contexte industriel.

Simulations LES (Large Eddy Simulation) :

Les équations de NS sont filtrées, seules les « grandes » structures de l'écoulement sont résolues explicitement, les plus petites sont prises en compte en utilisant des modèles dits de « sous maille ».

Simulation RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) :

Les équations de NS sont moyennées, on cherche à calculer des champs moyens de vitesse et de pression. Cette méthode est beaucoup plus économique en termes de moyens de calcul mais fait intervenir un nouveau terme : le tenseur de Reynolds. Ce dernier caractérise les fluctuations de la vitesse autour de la vitesse moyenne du fluide.

Cette méthode ajoute donc une nouvelle inconnue au problème. Les modèles de turbulence permettent la fermeture du problème, on en cite :

- modèle $k - \varepsilon$: c'est un modèle largement utilisé à deux équations (l'énergie cinétique turbulente k et son taux de dissipation ε). Ce modèle est mieux adapté aux zones de cisaillement libre (loin des parois) avec des faibles gradients de pression (Bardina et al. 1997).
- modèle $k - \omega$: aussi largement utilisé que le modèle précédent, il introduit deux équations pour k et ω qui peut être considéré comme le rapport k/ε et représente l'inverse du temps caractéristique de la dissipation de l'énergie cinétique turbulente. Ce modèle semble être mieux adapté pour le traitement proche paroi (Wilcox, 2008).
- modèle $k - \omega$ SST : c'est une combinaison des deux modèles précédents, le modèle $k - \omega$ est utilisé en proche paroi tandis que le modèle $k - \varepsilon$ est appliqué dans les zones de cisaillements internes.
- modèle RSM (Reynolds Stress Model) : C'est une méthode qui n'utilise pas de viscosité turbulente (Hypothèse de Boussinesq, Frsich (1995)) mais se base sur une résolution

complète du tenseur de Reynolds. Contrairement aux modèles précédents, c'est un modèle à six équations.

Il existe des méthodes hybrides pour la résolution des équations de NS. Par exemple l'approche DES (Detached Eddy Simulation) combine les modèles RANS et LES. En proche paroi l'écoulement est résolu suivant une approche RANS, et en zone interne la méthode LES est utilisée.

Pour des écoulements laminaires où le nombre de Reynolds est ~ 1 , le terme inertiel est négligé, il n'y a pas besoin d'utiliser un modèle de turbulence. Pour des nombres de Reynolds largement supérieurs à 1, l'écoulement est turbulent, la prise en compte d'un modèle de turbulence est indispensable.

Pour un filtre plissé, par analogie aux expressions du nombre de Reynolds considéré dans le cas des écoulements au sein des conduits, on considère l'ouverture de pli comme longueur caractéristique. Ainsi on a :

$$Re = \frac{\rho v_i p}{\mu} \quad \text{Équation 26}$$

Où v_i est la vitesse moyenne en amont du filtre et p le pas du filtre. L'écoulement dans un pli de filtre plissé présente un nombre de Reynolds dont la valeur varie entre son maximum en entrée de pli (régime de transition $1 < Re < 1000$) et 0 en fond de pli.

La simulation numérique a été utilisée pour l'étude de l'écoulement dans les filtres plissés (Chen et al. 1995; Subrenat et al. 2003; Nassehi et al. 2005; Rebai et al. 2010; Fotovati et al. 2011, Saleh et al. 2014, Zhunagbo et al. 2014, Théron et al. 2017) et permet d'accéder aux champs de vitesse et de pression de l'air dans le canal du pli et par conséquent à la perte de charge due au plissage.

3.2.2.1. Les travaux numériques recensés

Zhuangbo et al. (2014) s'est intéressé à la prédiction de la perte de charge d'un filtre plissé vierge. En considérant un écoulement turbulent en amont et en aval du filtre et la loi de Darcy pour l'estimation de la perte de charge liée à l'écoulement au travers du média, il a évalué la performance de différents modèles de turbulence (RANS, DES, LES). Ces modèles ont été comparés à des valeurs de perte de charge issues de la littérature, ainsi qu'à d'autres résultats obtenus sur son propre dispositif expérimental.

Le banc expérimental développé permet de mesurer le profil de vitesse dans le pli, des anémomètres ont été placés à différents endroits du pli (X_i, Y_i sur la Figure 9). Notons qu'il observe un profil de vitesse bimodal sur une section droite du pli (Figure 10).

Il conclut que l'approche DES est la plus adaptée pour la prédiction de la perte de charge et de l'écoulement au sein du filtre.

Les vitesses de filtration investiguées dans ce travail sont comparables à la vitesse nominale de filtration de nos filtres THE (CAMFIL), toutefois la technique de mesure utilisée ne peut être appliquée à cause des faibles dimensions de nos filtres THE à petits plis.

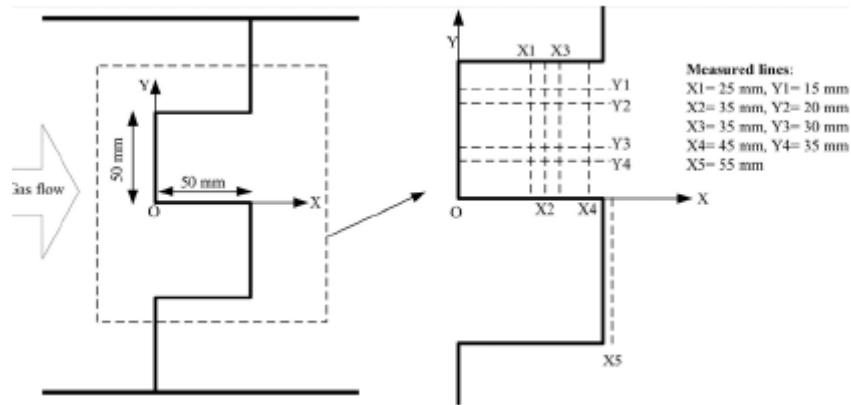


Figure 9 : géométrie du pli et différents emplacements des points de mesure (Zhuangbo, 2014)

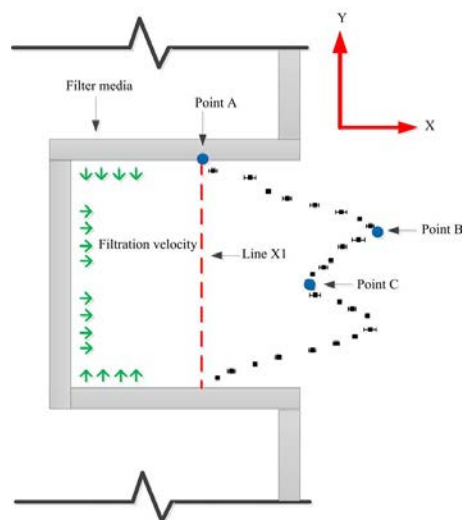


Figure 10 : profil de vitesse au sein d'un pli rectangulaire (Zhuangbo, 2014)

Théron (2017) a combiné des simulations numériques (CFD) à des expériences pour évaluer l'influence des paramètres géométriques du pli sur la perte de charge du filtre et sur la vitesse de l'air à proximité du média. Les filtres testés de moyenne efficacité ont une épaisseur de 2 mm, une porosité de 92% et un diamètre de fibres de 13 μm . La perméabilité est de l'ordre de 10^{-9}m^2 . Des simulations numériques d'écoulement d'air au sein de ces filtres ont été menées en utilisant différents modèles de turbulence. Des mesures de perte de charge en fonction de la vitesse de filtration ont permis de valider les modèles $k - \varepsilon$ et RSM . Les résultats numériques confirment qualitativement les données de la littérature dans la mesure où, à surface égale, la perte de charge diminue avec l'augmentation de l'écartement du pli ou la diminution de sa hauteur.

Les profils de vitesse longitudinale au sein des plis semblent être « trop » aplatis et ressemblent à des profils d'écoulements largement turbulents. Ceci reste tout à fait attendu étant donné l'utilisation d'un modèle $k - \varepsilon$ ou RSM . Au vu des vitesses de filtration investiguées, il paraît plus judicieux de faire une comparaison avec un modèle laminaire et un modèle de turbulence type $k - \omega SST$ (plus adapté à des écoulements de transition). La validation des simulations numériques a été réalisée sur la base de mesures expérimentales de perte de charge, ce qui reste insuffisant pour conclure quant à la pertinence des modèles de turbulence utilisés.

Rebai (2010) a développé un modèle semi-analytique pour l'écoulement du fluide au sein d'un filtre plissé, en se basant sur des solutions de similitude («Similarity Solutions») de l'équation de Navier-Stokes dans les canaux formés par le plissage du média filtrant (Figure 11). Ces équations établies par Terill (1965), concernent l'écoulement dans des conduites à parois poreuses. Il constate que selon son modèle, la vitesse de filtration n'est pas constante, elle augmente le long du pli. Cela est susceptible d'avoir un impact sur le dépôt de particules dans le pli et engendrera un dépôt préférentiel au fond.

Une comparaison avec les résultats expérimentaux a montré que ce modèle est adapté aux grandes vitesses de filtration mais reste sensible à la perméabilité du média au fond des plis.

La résolution du jeu d'équations ainsi développé constitue une bonne approche (rapide et physique) d'estimation de la perte de charge du filtre vierge mais nécessite une caractérisation expérimentale du fond de pli pour compléter ce travail.

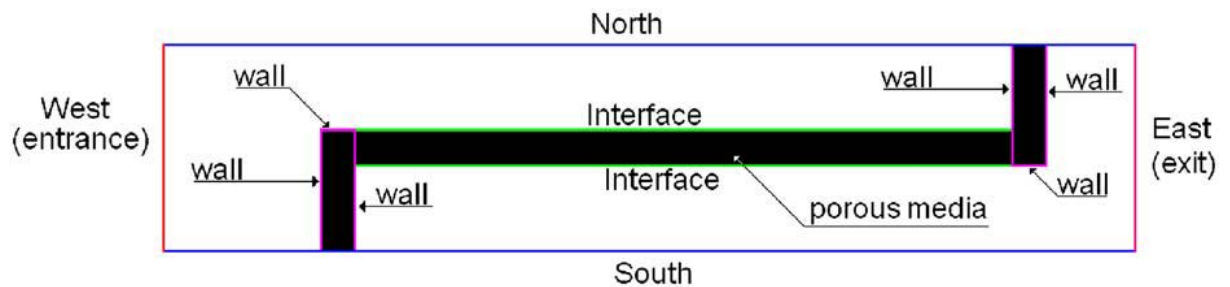


Figure 11 : domaine de calcul (Rebai, 2010)

Le tableau suivant représente un résumé des travaux numériques recensés sur la simulation numérique des écoulements dans un filtre plissé :

Auteur	Perméabilité du média (m^2)	Géométrie du filtre	Vitesse	Modèle d'écoulement
Theron et al. (2017)	$\sim 10^{-9}$	Triangulaire : $L = 20 - 40\text{mm}$, $p = 11,3 - 10,2 - 19,8\text{ mm}$	$V_f = 0,1 - 0,8\text{ cm/s}$	RSM, $k-\epsilon$
Feng et al. (2014)	$8,33 \cdot 10^{-13}$	Rectangulaire : $L = 50\text{ mm}$, $p = 50\text{ mm}$	$V_f = 7,2\text{ cm/s}$	LES, DES, LRN- $k-\epsilon$, $k-\epsilon$ standard, $v2f$
Fotovati et al. (2011)	$5,02 \cdot 10^{-10} - 3,1 \cdot 10^{-10}$	Triangulaire : $L = 25,4\text{ mm}$, $p = 2,1 - 6,4\text{ mm}$	$V_i = 0,05 - 0,5\text{ m/s}$	Laminaire
Fotovati et al. (2011)	$2,78 \cdot 10^{-12} < k < 6,92 \cdot 10^{-12}$ $1,51 \cdot 10^{-11} < k < 4,4 \cdot 10^{-10}$ $2,25 \cdot 10^{-11} < k < 5,58 \cdot 10^{-10}$	Rectangulaire et triangulaire : $L = 52,4\text{ mm}$, $p = 1,3 - 8,5\text{ mm}$	$V_i = 0,2 - 1\text{ m/s}$	Laminaire

Rebai et al. (2010)	$3,36 \cdot 10^{-11}$	Rectangulaire et plissé : $L = 25 - 51 \text{ mm}$, $p = 12,65 - 8,33 - 6,25 \text{ mm}$	$V_f = 0,39 \text{ m/s}$	Résolution d'équations de similitude
Tronville et Sala (2003)	$7,5 \cdot 10^{-12}$	Triangulaire : $L = 27 - 48 \text{ mm}$, $p = 2 - 3,5 \text{ mm}$	$V_i = 0,5 - 2 \text{ m/s}$	RSM, k- ϵ , RNG-k- ϵ
Chen et al. (1995)	$7,25 \cdot 10^{-13} < k$ < $1,1 \cdot 10^{-11}$	Rectangulaire : $L = 22 - 133 \text{ mm}$, $p = 1,2 - 8,5 \text{ mm}$	$V_f = 0,13 - 1,3 \text{ m/s}$	Laminaire

Tableau 3 : résumé des études numériques réalisées

Bilan :

Les modèles analytiques se basant sur des paramètres déterminés expérimentalement (Del Fabbro, 2001 ; Callé Chazelet et al 2005 ; Sothen et Tatarchuk 2008) ne prennent en compte que les paramètres géométriques du filtre et la vitesse de filtration sans considération d'éventuelles variations le long du pli. Or, la perte de charge due au plissage est directement liée à la nature de l'écoulement dans le canal du pli.

Les simulations numériques d'écoulements permettent de calculer la perte de charge mais utilisent des modèles de turbulence dont l'utilisation dépend des paramètres géométriques du filtre et du débit d'écoulement. Il est nécessaire de réaliser une validation expérimentale afin de juger de la pertinence du modèle numérique utilisé.

Bien qu'elle soit performante, une simulation numérique, selon le modèle utilisé, peut durer relativement longtemps et nécessiter des ressources informatiques importantes. En revanche, la résolution d'équations de similitude permet d'obtenir l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé vierge en plus des champs de vitesse dans un délai court. Elle peut constituer une base pour un modèle de perte de charge qui prend en compte l'impact de l'écoulement sur l'évolution de la perte de charge.

3.3. Déformation des plis d'un filtre THE

Lorsqu'un filtre est soumis à un écoulement, il peut subir une déformation du fait de la pression exercée par le fluide sur le média. Bourrous (2014) s'est intéressé à ce phénomène pour un filtre vierge THE (CAMFIL). Le déplacement a été mesuré en un point central du pli et la déformation en trois dimensions de l'ensemble du pli a été déduite d'un modèle aux éléments finis (cf. Figure 12). Des conditions d'encastrement ont été placées aux bords du média. Les propriétés du média ont été considérées comme isotropes.

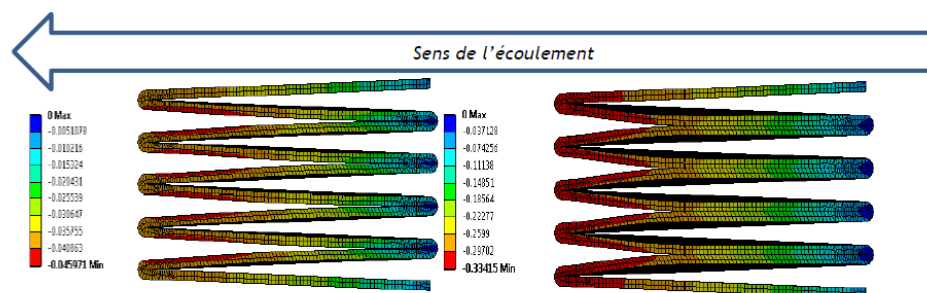


Figure 12 : illustration de la déformation des plis à la vitesse nominale de filtration à gauche et à une vitesse de 8 cm/s à droite

Les simulations permettent de conclure que pour des faibles vitesses (vitesse nominale de filtration), il n'y a pas de contact entre les plis. Au vu du modèle numérique, ces résultats ne constituent qu'une étude préliminaire. Une étude en prenant en compte des conditions limites de vitesse serait plus adaptées.

4. PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE PLAN AU COURS DU COLMATAGE

La perte de charge d'un filtre augmente et évolue significativement au cours de son utilisation. Prédire la perte de charge au cours du colmatage d'un filtre en fonction de la masse d'aérosols collectée est un enjeu majeur dans la communauté de la filtration. En effet, disposer de modèles robustes permettrait d'une part de s'affranchir d'expériences longues et coûteuses, d'autre part d'alimenter les codes de calcul dédiés à l'étude de ce type de phénomène. Deux phases principales sont à distinguer pour l'évolution de la perte de charge, lors de tout processus de filtration d'aérosol sur un média plan, la filtration profonde et la filtration en surface (cf. Figure 13).

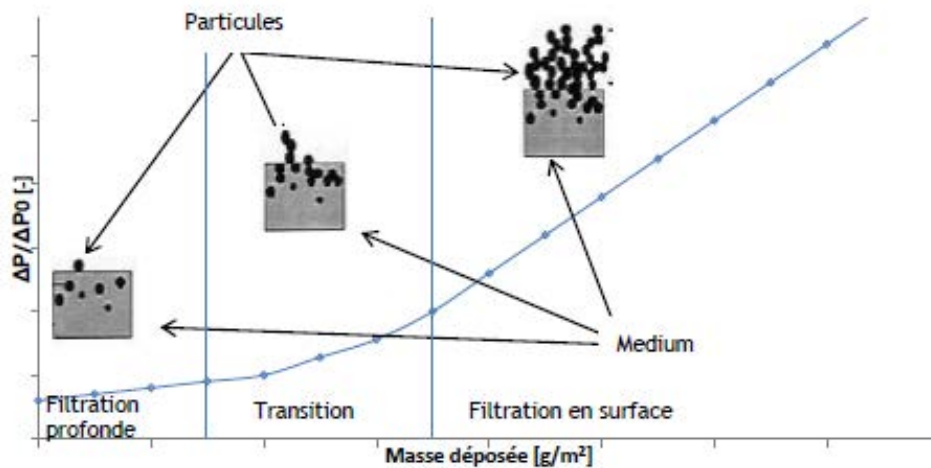


Figure 13 : schématisation de l'évolution de la perte de charge au cours du colmatage (Bourrous, 2014)

4.1. Colmatage en profondeur

Au cours de cette phase, les particules s'accumulent au sein du média, les caractéristiques structurales du milieu fibreux sont donc modifiées, et accroissent la perte de charge du filtre. C'est une phase pilotée par les caractéristiques des aérosols et du média (celles du média ne sont pas constantes au cours de cette phase étant donnée la formation du dépôt sur les fibres).

Deux types de dépôt sont à distinguer lors de cette phase : le dépôt stochastique et le dépôt dendritique (cf. Figure 14). Les forces d'interaction entre les particules, le rapport d'interception et le régime d'écoulement définissent le mode de dépôt. Plus les forces d'interaction sont fortes, plus le dépôt sera sous forme de dendrites. Cette accumulation

dépend également du mécanisme de dépôt. La position et donc la forme du dépôt en sont donc dépendantes.

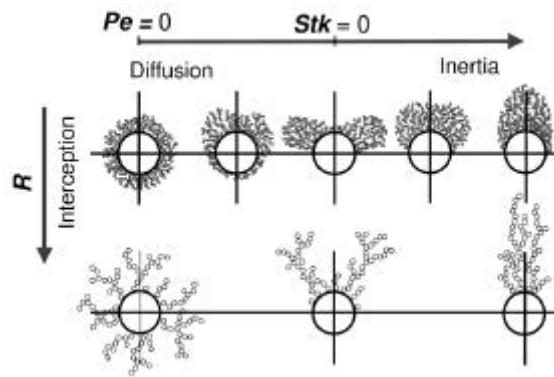


Figure 14 : différentes structures possibles lors du dépôt (Kanoaka et al., 1998)

Davies (1973) propose une expression pour la perte de charge d'un filtre durant la filtration profonde:

$$\Delta P = 64(\alpha + \alpha_m)^{\frac{3}{2}}(1 + 56(\alpha + \alpha_m)^3)\mu V_f Z \frac{1}{(1 + \frac{\alpha}{\alpha_m})d_f^2} \quad \text{Équation 27}$$

Où α est la compacité du dépôt et α_m la compacité du média, μ la viscosité du fluide, V_f la vitesse de filtration, Z l'épaisseur du média, d_f le diamètre de fibres.

Ce modèle fait l'hypothèse d'un dépôt homogène autour de la fibre, et suppose que le rayon du dépôt évolue proportionnellement avec le rapport entre la compacité du dépôt et la compacité du média. Ce modèle ne tient pas compte de la structure du dépôt, il sous-estime généralement la perte de charge d'un filtre colmaté.

Dans le cas des médias de faible compacité, Bergman (1976) propose d'exprimer la perte de charge par :

$$\frac{\Delta P}{Z} = 64 \mu V_f \left(\frac{\alpha_m}{d_f^2} + \frac{\alpha}{d_p^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\alpha_m}{d_f} + \frac{\alpha}{d_p} \right) \quad \text{Équation 28}$$

Où μ est la viscosité, ΔP la perte de charge, Z l'épaisseur, α la compacité du dépôt, V_f la vitesse du fluide, d_p le diamètre des particules collectées et α_p la compacité du média. Selon ce dernier modèle, les particules sont collectées de manière homogène dans le média. Il représente correctement la perte de charge pour les faibles vitesses de filtration et lorsque le mécanisme de diffusion prédomine.

Pour améliorer le modèle de Bergman, Letourneau (1992) ne considère plus un dépôt homogène le long du média, mais un profil de pénétration des aérosols au sein du média. Il propose une loi de distribution exponentielle décroissante en fonction de la profondeur dans le média.

Pour des filtres THE, les travaux antérieurs notamment ceux de Pénicot (1998) et Bourrous (2014) ont démontré que la phase de filtration en profondeur se fait rapidement et que le filtre atteint une efficacité de 100% au bout de quelques grammes par m^2 déposés sur le filtre. Elle peut donc être négligée dans l'étude de la filtration THE.

4.2. Colmatage en surface

Lorsque les pores superficiels du média sont obturés, les particules s'accumulent à la surface du filtre et forment un gâteau, conduisant à une augmentation linéaire de la perte de charge. Diverses approches existent pour décrire ce phénomène, en supposant un dépôt homogène à la surface du filtre ou en suivant des processus plus complexes.

4.2.1. Porosité du dépôt

La porosité du dépôt conditionne la masse de particules qu'on peut déposer dans un volume donné. Par conséquent, la détermination de ce paramètre est indispensable à toute étude de colmatage. Dans la littérature, la porosité s'écrit généralement, pour des particules microniques sous la forme (Hoffmann et al. 1995) :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + (1 - \varepsilon_0)\exp(-Co\rho_p d_p) \quad \text{Équation 29}$$

Où ε_0 et Co sont des constantes, ρ est la masse volumique des particules et d_p leur diamètre. Yu (1992) propose une équation empirique, pour des particules sèches entre 10 et 1000 nm :

$$\varepsilon = 0,394 + (1 - 0,4)e^{-0,4d_p^{0,468}} \quad \text{Équation 30}$$

En réalisant une caractérisation par microscopie confocale d'un dépôt de particules (sphériques) de polystyrène de diamètre (1,3 μm , 2 μm , 2,6 μm , et 5,2 μm) sur des fibres de 8 et 30 μm , Kasper (2010) propose la corrélation suivante :

$$\varepsilon = 0,36 + (1 - 0,36)e^{-0,29\rho_p d_p} \quad \text{Équation 31}$$

Neesse et al. (2009) a montré par simulation numérique qu'il est possible d'avoir une évolution de la valeur de la porosité du dépôt aussi selon son épaisseur.

Dans le cas des particules nano-structurées, Thomas (2014) a réalisé des mesures de porosité et en utilisant le nombre de Peclet, il a développé la corrélation suivante :

$$\varepsilon = \frac{1 + 0,44Pe}{1,019 + 0,46Pe} \quad \text{Équation 32}$$

4.2.2. Les modèles de perte de charge

4.2.2.1. Modèle basé sur une assimilation du dépôt à un lit granulaire

Novick (1992) dans un article présentant les effets de la masse d'aérosols collectée par des filtres THE sur la perte de charge, utilise la loi de Kozeny-Carman (1937) pour calculer la perte de charge du gâteau qui assimile le gâteau de particules à un lit granulaire homogène :

$$\Delta P_g = h_k \mu \frac{a_g^2 \alpha^2}{(1 - \alpha)^3} V_f w \quad \text{Équation 33}$$

Avec a_g la surface spécifique égale à $\frac{6}{d_p}$ pour une sphère de diamètre d_p , α la compacité du gâteau, w l'épaisseur du gâteau et h_k le coefficient de Kozeny-Carman, compris entre 4,5 et 5 pour un empilement de sphères.

Diverses hypothèses ont été formulées pour l'élaboration de ce modèle : la compacité est supposée constante sur toute l'épaisseur et le diamètre de particules est supposé constant, ce qui n'est pas le cas dans une situation réelle de colmatage.

La loi de Kozeny-Carman est basée sur la loi d'écoulement de Poiseuille qui fait l'hypothèse d'un régime continu, ce modèle est donc principalement dédié aux particules microniques et peut être transposable aux particules submicroniques en utilisant le coefficient du Cunningham.

4.2.2.2. Modèles basés sur la force de traînée

Une seconde approche pour la modélisation de la perte de charge durant la phase de filtration en surface est celle basée sur la force de traînée subie par les particules qui constituent le dépôt. En effet, la perte de charge est égale à la somme des forces de traînée appliquées aux particules rapportée à la surface de filtration.

Le modèle d'Endo (1997) se base sur ce principe et propose de prendre en compte une polydispersion des particules constituant le dépôt et s'écrit sous la forme :

$$\Delta P = \frac{18\mu}{R_p} \frac{\alpha vi(\alpha)}{(1-\alpha)^2} V_f w \quad \text{Équation 34}$$

Où R_p est un paramètre prenant en compte la distribution des particules supposées suivre une loi lognormale, μ la viscosité dynamique, α la compacité du dépôt, V_f est la vitesse de filtration, w est l'épaisseur du dépôt et vi est la fonction du vide qui prend en compte le recouvrement des particules au sein du dépôt.

Kim (2009) a réalisé une étude sur la résistance à l'écoulement d'un gâteau de particules formé de suies en se basant sur la relation d'Endo (1997). Il conclut que la perte de charge peut être modélisée par cette relation en considérant que le dépôt est exclusivement formé de particules primaires.

Thomas (2014), en utilisant la relation de Davies, propose un modèle pour les dépôts d'agrégats. Il considère le lit de particules comme un empilement de chainettes dont le diamètre serait celui des particules primaires. Il introduit un facteur de recouvrement F_c correspondant au «chevauchement des particules primaires», pour corriger la longueur équivalente des chainettes. En utilisant la relation de la force de traînée d'une fibre, il obtient :

$$\Delta P_g = \frac{64\sqrt{\alpha}(1+56\alpha^3)}{Cu d_p^2 \rho_p} F_c \mu m_s V_f \quad \text{Équation 35}$$

Où α est la compacité, Cu le coefficient du Cunningham, d_p est le diamètre des particules, ρ_p est la masse volumique des particules, μ est la viscosité, m_s est la masse surfacique déposée sur le média et V_f la vitesse de filtration.

Ce modèle semble bien rendre compte de la réalité pour les particules pseudo-fractales. Il peut être adapté pour décrire le colmatage des filtres plissés par des agrégats issus de combustion.

4.3. Colmatage en profondeur et en surface

Thomas (2001) a réalisé une étude consacrée au colmatage des filtres THE par des aérosols submicroniques. En considérant des dépôts dendritiques, Il a développé un modèle dynamique permettant de prédire l'évolution de la perte de charge et de l'efficacité du filtre durant les phases de filtration en profondeur et en surface en prenant en compte l'hétérogénéité du dépôt à l'intérieur du média fibreux.

Le filtre est divisé en N couches discrètes homogènes d'épaisseur dz . Ainsi, à l'instant t , la compacité du dépôt pour une couche j s'exprime par :

$$\alpha(j, t) = \frac{\text{Volume de particules collectées sur la couche } j}{\text{Volume de la couche}} \quad \text{Équation 36}$$

Les particules déposées au sein des fibres constituent des dendrites, considérées comme de nouvelles fibres collectrices de diamètre égal au diamètre moyen des particules. En traversant chaque couche, les particules sont donc collectées soit par les dendrites déjà déposées, soit par les fibres du média.

A l'instant initial, l'ensemble du débit traverse les fibres. A chaque pas de temps, la masse de particules est déduite de l'efficacité de collecte de chaque couche, en utilisant le modèle de Payet (1991) (diffusion, interception). La perte de charge de chaque couche est calculée à partir du modèle de Bergman (1978) modifié en intégrant le terme $(1 + 56\alpha^3)$ de la formule de Davies. Pour obtenir la perte de charge globale, la somme des pertes de charge propres à chaque couche est effectuée à chaque instant.

Ce modèle a été confronté à des résultats expérimentaux couvrant une gamme de vitesse de filtration entre 5 et 20 *cm/s* pour deux tailles de particules différentes 0,18 et 0,40 μm . La comparaison montre un assez bon accord avec le modèle développé. Notons aussi que ce modèle prédit avec précision le point de transition entre les phases de filtration en profondeur et en surface.

Bilan :

Le développement d'un modèle prédictif de filtration en surface par des média plans, qui constitue la base de tout modèle de réduction de surface (colmatage des filtres plissés), reste une tâche très difficile vu la large gamme de conditions opératoires et de types d'aérosols. Par exemple, le modèle de Thomas (2014) considère une collecte sous forme dendritique et ne peut donc être appliqué à des particules microniques. De même, le modèle d'Endo fait l'hypothèse d'un dépôt homogène en termes de porosité et de géométrie ce qui n'est pas toujours le cas pour un filtre plissé (Saleh et al. 2014).

5. PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE PLISSE AU COURS DU COLMATAGE

Pour les filtres plissés, au-delà d'une certaine masse surfacique déposée, on constate une augmentation rapide de la perte de charge, non linéaire, due non seulement à la réduction de la surface de filtration, mais également à un dépôt hétérogène des particules au sein du pli. Cette inhomogénéité dépend des conditions aérauliques pour des particules microniques. Dans ce qui suit, on décompose les travaux recensés dans la littérature selon deux approches : numériques et analytiques.

5.1. Approche numérique avec description Lagrangienne

5.1.1. Résolution complète écoulement-transport

Une des méthodes pour simuler l'évolution de l'épaisseur du dépôt au cours d'un processus de colmatage, consiste à réaliser des simulations numériques d'écoulement au sein d'un filtre, puis à injecter un groupe de particules appelé « batch » dans le domaine de calcul et à calculer leur trajectoire. Ces particules, au voisinage de la surface du média, se déposent sur les fibres selon un modèle de dépôt (décrivant l'interaction entre les particules et le média ou le cas échéant le dépôt). Ce processus est réitéré jusqu'au remplissage du pli. Ainsi pour chaque particule, le principe fondamental de la dynamique est appliqué. En général, la force de traînée

de type Stokes est appliquée aux particules. Par conséquent, le mouvement des particules est régi par l'équation suivante :

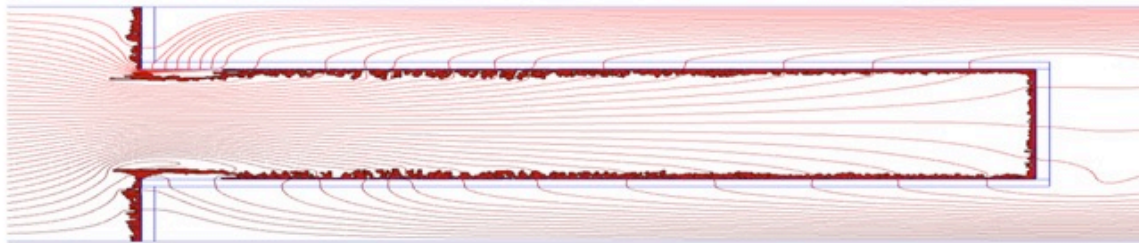
$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_u} (\vec{V}_a - \vec{v}_p) \quad \text{Équation 37}$$

Avec \vec{V}_a la vitesse du fluide et \vec{v}_p la vitesse de la particule

Fotovati (2011) a suivi cette approche dans le but d'évaluer l'impact de la structure du dépôt de particules sur l'évolution de la perte de charge, pour des filtres à plis triangulaires et rectangulaires industriels. Les résultats montrent que la vitesse d'évolution de la perte de charge diminue en augmentant la densité de plis. À débit constant à travers le filtre, un grand nombre de plis engendre une augmentation de la vitesse dans les plis, provoquant une hétérogénéité du dépôt et une augmentation rapide de la perte de charge. Pour des particules d'un diamètre supérieur à $10 \mu\text{m}$ et une vitesse en entrée entre 0,2 et 1 m/s , le gâteau a tendance à se former au fond du pli lorsque la densité des plis est importante (cf. Figure 15).

En suivant cette approche numérique, les particules se déposent si la distance entre les centres de masse des particules est inférieure à leurs diamètres. Cette approche peut entraîner la formation de dendrites de taille irréaliste (cf. Figure 15-b). En effet, les contraintes aérodynamiques subies par une dendrite augmentent avec la croissance de sa taille conduisant à un éventuel réentraînement au fond du pli (réorganisation du dépôt), ce qui n'est pas pris en compte dans cette approche.

a



b



Figure 15 : formation de dépôt dans des plis rectangulaires et triangulaires. a- 4plis/inch b- 20 plis/inch 1 m/s et un diamètre de particules de $10 \mu\text{m}$ (Fotovati et al. 2011)

Saleh (2014) a utilisé cette méthode numérique pour la modélisation de la perte de charge et l'efficacité de collecte pour un filtre plissé exposé à une distribution polydispersée d'aérosols. La Figure 16 résume l'algorithme suivi dans cette simulation. On peut citer, parmi les résultats obtenus, que la durée de vie d'un filtre peut être améliorée en augmentant la densité de plis, néanmoins la relation n'est pas linéaire. Par exemple, en augmentant la densité de pli d'un facteur 2, la durée de vie du filtre est rallongée d'un facteur supérieur à 2 quand il est colmaté par des particules polydispersées ($1 - 10 \mu\text{m}$) et d'un facteur inférieur à 2 quand il est colmaté par des particules monodispersées (1 et $10 \mu\text{m}$) pour des vitesses en entrée du filtre de $0,5 \text{ m/s}$. Cette méthode est plus adaptée à des études au cas par cas ; les résultats obtenus ne permettent pas de donner des conclusions générales.

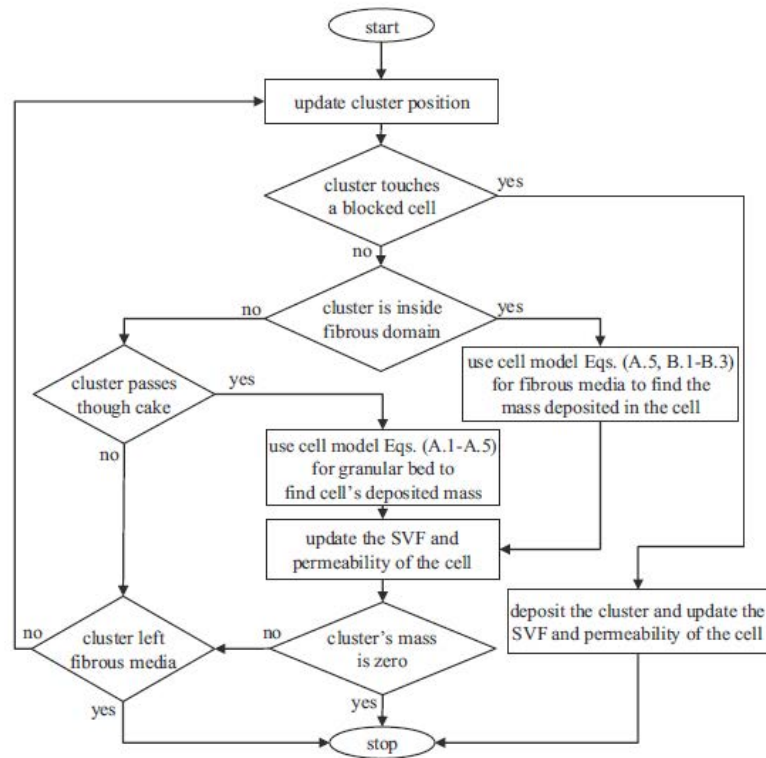


Figure 16 : schéma démonstratif de l'algorithme suivi (Saleh et al. 2014)

5.1.2. Approximation de l'écoulement

Dans l'approche précédente, le temps de calcul nécessaire pour le remplissage complet du pli est généralement très grand ce qui représente un frein à l'utilisation d'une telle méthode. La complexité de la simulation est due principalement au calcul des champs de vitesse et de pression à chaque injection de batch. L'approximation des champs de vitesses par des modèles analytiques permet de réduire très largement ce temps de calcul.

Saleh et al. (2014) présente un modèle semi-numérique pour la prédiction de l'efficacité de collecte, ainsi que la perte de charge pour des filtres rectangulaires et triangulaires, en résolvant l'équation de la trajectoire des particules (Équation 37). La loi d'écoulement est déduite de la vitesse moyenne de l'écoulement au sein du canal (bilan de matière), et en s'aidant de simulations numériques directes réalisées au préalable. La porosité du dépôt est calculée selon (Kasper et al, 2010, Équation 31).

On constate que pour de grands nombres de Stokes, il y a une préférence pour l'accumulation au fond du pli. On retiendra aussi parmi ces résultats (issus d'une étude paramétrique) que les filtres à plis rectangulaires montrent des performances plus élevées que les filtres à plis triangulaires pour des dépôts d'aérosols épais.

Dans ce travail, l'évolution de l'épaisseur du dépôt (cf. Figure 17) est une donnée d'entrée constituant ainsi une hypothèse très forte. En effet, la géométrie du dépôt est dépendante de la nature de l'aérosol colmatant et des conditions aérauliques.

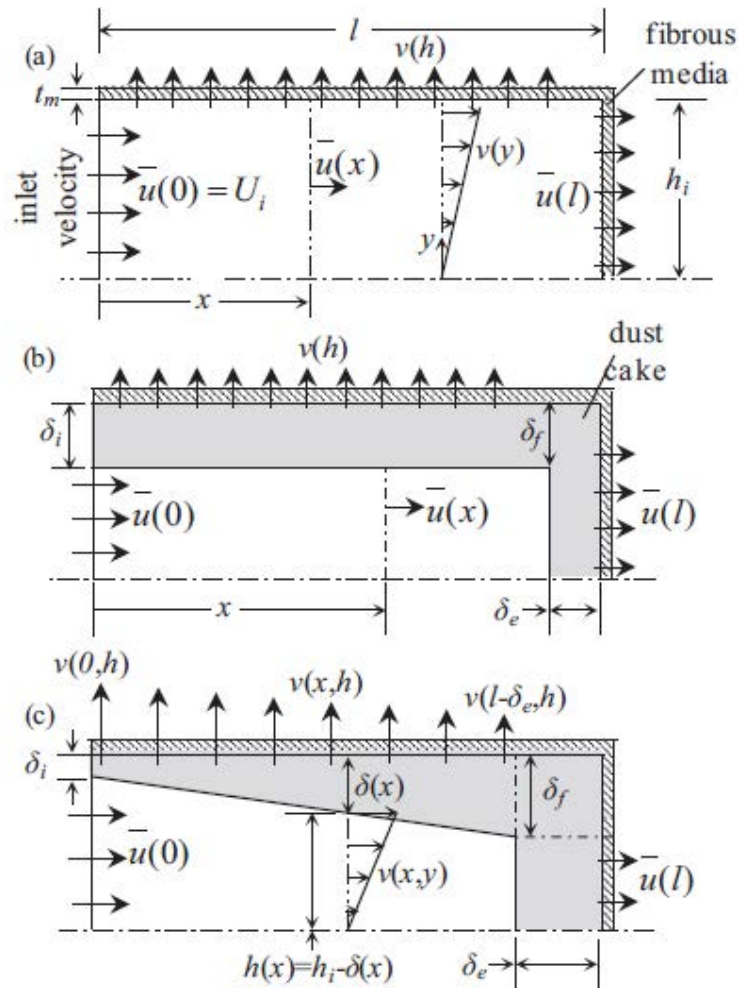


Figure 17 : différentes configurations du dépôt de particules (Saleh et al. 2014)

Bilan :

Les simulations numériques présentées constituent une démarche intéressante et prometteuse pour étudier le colmatage d'un filtre plissé THE. Néanmoins, un manque en termes de validation expérimentale a été relevé. En effet, cette étape reste incontournable pour évaluer la performance des outils numériques.

La porosité du dépôt des particules sur la surface du filtre qui constitue une donnée d'entrée indispensable des simulations numériques, vient généralement de corrélations empiriques dont le domaine de validité est très limité.

5.2. Approche empirique

Mocho et Ouf (2011) ont réalisé des mesures expérimentales de colmatage de filtre THE. Les aérosols utilisés pour le colmatage des filtres sont des aérosols issus de la combustion de polyméthacrylate de méthyle (PMMA), de polycarbonate bisphénol A (LEXAN), de polychlorure de vinyle (PVC) et d'autres éléments électriques présents dans les installations nucléaires françaises. La Figure 18 présente l'évolution du rapport R/R_0 en fonction de la masse déposée sur le filtre pour différentes vitesses de filtration (avec R la résistance aéraulique du filtre au cours du colmatage et R_0 la résistance aéraulique du filtre vierge).

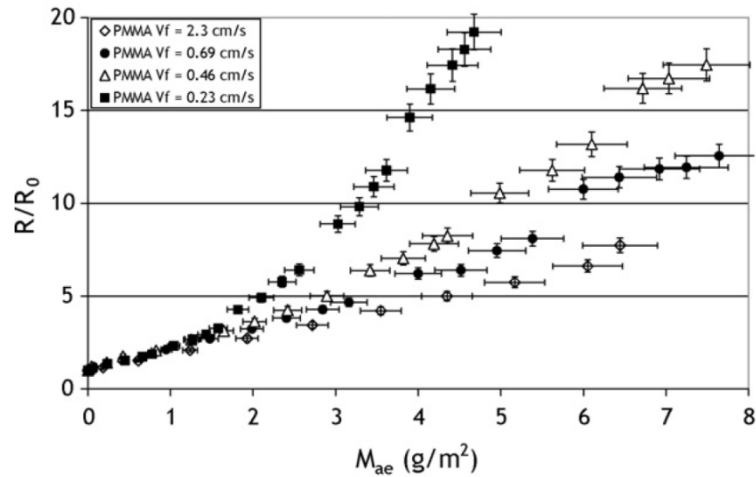


Figure 18 : influence de la vitesse de filtration sur le colmatage d'un filtre THE (combustible PMMA (Mocho et Ouf 2011))

Différentes réalisations expérimentales avec différents types d'aérosols et de vitesses de filtration ont permis de développer une corrélation qui permet de prédire le rapport R/R_0 :

$$\frac{R}{R_0} = 1 + c_1 \frac{m_s}{d_p} + c_2 \left(\frac{m_s}{V_f d_p} \right)^2 \quad \text{Équation 38}$$

Avec c_1 et c_2 deux constantes empiriques, $m_s(g/m^2)$ la masse déposée sur le filtre, $V_f(m/s)$ la vitesse de filtration, et d_p (m) le diamètre des particules.

Un essai d'incendie (vitesse de filtration non constante) à échelle réelle a été réalisé dans le but de comparer la corrélation empirique avec les mesures expérimentales du rapport R/R_0 (Figure 19).

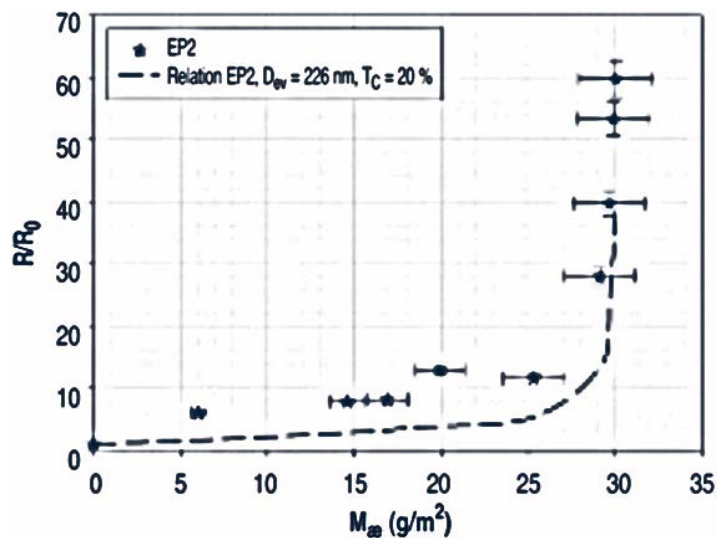


Figure 19 : comparaison entre la corrélation empirique et les données expérimentales de colmatage pour des particules produites lors d'un essai d'incendie (Ouf et Mocho 2014).

Cette corrélation développée initialement pour des vitesses de filtration constantes rend assez bien compte du processus du colmatage lors de la diminution du débit de filtration et est en bon accord avec les résistances aérauliques mesurées expérimentalement.

Hettkamp et al. (2012) a développé un modèle analytique simple pour prédire le colmatage des filtres plissés en supposant que l'épaisseur du dépôt évolue de manière uniforme. Ainsi il suppose que l'écoulement n'a pas d'influence sur la géométrie de formation du dépôt.

En parallèle, il réalise des simulations numériques de colmatage de filtres plissés par des particules de $4 \mu m$ et suivant une vitesse en amont du filtre de $0,8 m/s$. La comparaison entre les simulations numériques et les résultats issus du modèle montrent un accord quasi-parfait.

Cette approche, bien que simple, a permis de construire un modèle efficace. Néanmoins, cette validation a été effectuée dans le cas d'une distribution monodispersée, ce qui n'est pas le cas dans une configuration réelle de colmatage. En effet, selon la gamme de vitesses de filtration étudiée, la distribution en taille des particules a un impact sur la forme géométrique du dépôt.

6. CONCLUSION

Cette étude bibliographique a permis de dresser un aperçu des phénomènes entrant en jeu lors d'un processus de filtration et de dresser un état de l'art concernant les travaux existants, traitant de l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé. En résumé :

Aéroulque du filtre :

L'écoulement de l'air au sein des plis d'un filtre constitue un facteur important lors du processus de colmatage. La prise en compte de l'aéroulque semble, par conséquent, indispensable pour la construction d'un modèle phénoménologique de perte de charge. Actuellement, on ne dispose pas de modèles physiques permettant de modéliser le champ de vitesse de l'air dans un pli THE. Pour un filtre plissé THE vierge, la perte de charge en fonction de la vitesse de filtration ne suit pas une évolution linéaire mais augmente rapidement à partir d'une certaine vitesse de filtration. On estime qu'une perte de charge additionnelle due au plissage du média est à la source de cette augmentation. Plusieurs études ont été réalisées afin de caractériser l'écoulement de l'air, ces études sont principalement numériques et n'ont pas été validées expérimentalement.

Colmatage du filtre :

Le colmatage des filtres THE dans les conditions de ventilation nucléaire reste peu étudiée dans la littérature. Cette phase, caractérisée par une forte augmentation de la perte de charge est conditionnée par la forme et la structure du dépôt en plus de la réduction de la surface effective de filtration. Au cours du colmatage, des structures particulières ou dendritiques se forment et participent à une perte supplémentaire de la surface de filtration. Selon les conditions opératoires, une réorganisation du dépôt peut se produire rendant le processus de formation transitoire. Il ne peut donc être considéré comme une suite d'événements permanents, ce qui complexifie toute étude de colmatage. Plusieurs méthodes numériques basées sur le suivi Lagrangien des particules existent afin d'étudier le colmatage d'un filtre. Néanmoins, un manque au niveau de la validation expérimentale a été mis en évidence. Par ailleurs, la porosité du dépôt reste une donnée d'entrée essentielle pour les modèles de simulation numérique.

Démarche de travail :

À la suite de cette étude bibliographique, une démarche visant à construire un modèle physique de colmatage des filtres plissés THE a été établie. Sur la base des constatations précédentes, elle repose sur :

- une caractérisation de l'écoulement d'air au sein des plis de filtre plissé THE,
- la modélisation de la perte de charge qui en découle (plissage),
- l'étude de l'hétérogénéité du dépôt de particules sur le filtre en s'appuyant sur des mesures expérimentales,
- le développement d'un modèle de perte de charge couplant l'aéraulique du filtre avec la perte de surface et le changement de géométrie du milieu du fait de la formation du dépôt et la validation de ce modèle sur des cas réels.

CHAPITRE II : AERAULIQUE D'UN FILTRE PLISSE THE

1. INTRODUCTION

La filtration des aérosols par un média fibreux est un processus complexe faisant intervenir différents phénomènes physiques. Parmi ces phénomènes, l'écoulement d'air au sein du pli avant la traversée du média. Dans les canaux des filtres, le plissage du média contraint l'écoulement du gaz ce qui se traduit par une perte de charge additionnelle dans le cas du filtre vierge.

Au cours du colmatage, le gâteau de particules formé à la surface du filtre modifie la géométrie du plissage, ainsi, la contribution de la perte de charge due au plissage à la perte de charge globale du filtre va varier au fur et à mesure de la croissance du dépôt. Il apparait donc indispensable d'estimer cette perte de charge pour l'élaboration d'un modèle phénoménologique de colmatage.

L'étude des écoulements d'air au sein des filtres, ou plus généralement dans des conduits à parois poreuses, a fait l'objet de plusieurs études théoriques, numériques et expérimentales. Citons Terrill et *al.* (1965) qui a initié l'étude théorique de l'écoulement dans les conduits à parois poreuses. En utilisant des équations dites de « similitude », il simplifie les équations de Navier-Stokes en équations aux dérivées partielles résolubles via des schémas numériques simples. Ces travaux ont été repris dans des études de filtration par Oxarango et *al.* (2004) et plus récemment par Rebaï et *al.* (2010), qui a développé un modèle semi-analytique permettant de calculer le champ de vitesse et de pression dans des plis rectangulaires et triangulaires. Le modèle est sensible au fond du pli (en raison de la géométrie et de la perméabilité) et est plus adapté à des écoulements à grandes vitesses. D'autres travaux purement numériques ont été réalisés dans ce sens (Rebaï (2007), Fotovati et *al.* (2011), Gervais (2013), Saleh et *al.* (2014), Théron et *al.* (2017)).

La validation expérimentale des approches numériques sur la base de champs de vitesse reste une étape obligatoire. Dans ce chapitre, on présentera le banc expérimental permettant de mesurer les champs de vitesse dans un pli de filtre plissé THE, ainsi que les mesures expérimentales réalisées. Elles serviront à la validation des codes de calcul utilisés et au développement d'un modèle de perte de charge initiale des filtres plissés vierges.

Les mesures et les simulations numériques présentées dans ce chapitre sont réalisées à l'échelle du pli. En termes d'écoulement et de perte de charge, c'est une échelle représentative du filtre complet. En plus, cette réduction d'échelle permet de maîtriser les conditions opératoires (débit et surface effective utilisée pour la filtration) et de séparer les phénomènes physiques étudiés. On peut ensuite, comme proposé à la fin du chapitre, valider le modèle de perte de charge à l'échelle du filtre complet.

2. NOTATIONS

Dans ce chapitre, on considère les notations suivantes:

- 1) Toutes les études expérimentales et numériques sont réalisées sur le filtre THE à petit plis (CAMFIL). C'est ce filtre que l'on désignera par filtre THE.
- 2) On désigne par le « pli » l'ensemble du média et du canal d'écoulement (cf. Figure 20).

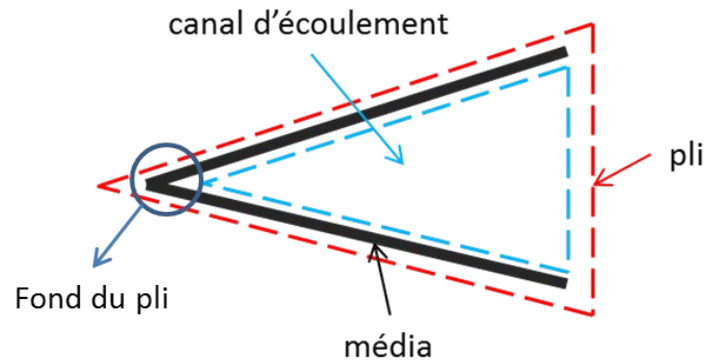


Figure 20 : schéma représentatif du pli

- 3) On désigne par le fond du pli l'endroit où sa section devient nulle (cf. Figure 20)
- 4) La vitesse de filtration V_f désigne la vitesse moyenne de filtration, c'est le rapport entre le débit et la surface de filtration traversée par ce débit. Elle représente la vitesse de l'air au sein du média.
- 5) La vitesse locale de filtration v_f est la vitesse de l'air au sein du média à une position donnée du média.
- 6) La vitesse en entrée du pli v_i est le rapport entre le débit qui traverse le pli et sa section d'entrée.
- 7) V_n désigne la vitesse nominale de filtration. Elle est égale à 2 cm/s et représente la vitesse d'écoulement d'air dans les réseaux de ventilation des installations nucléaires françaises.

3. ÉTUDE EXPERIMENTALE DES ECOULEMENTS D'AIR DANS UN FILTRE PLISSE THE

3.1. Introduction

La caractérisation des écoulements dans les filtres plissés constitue une étape nécessaire pour la compréhension des phénomènes physiques qui rentrent en jeu lors d'un processus de colmatage. Des caractérisations expérimentales de vitesses ponctuelles ou à la surface du filtre ont pu être recensées dans la littérature.

Citons par exemple Gervais (2013) qui, en analysant par tomographie le dépôt d'aérosols traceurs de l'écoulement sur la surface de filtres plissés THE a pu caractériser l'écoulement à proximité du média. C'est une méthode intéressante, mais elle ne permet de caractériser l'écoulement qu'à proximité du média. Aussi Zuhangbo et al (2014) a réalisé des mesures dans des plis rectangulaires en utilisant des anémomètres à fil chaud. Cette méthode, intrusive, ne peut être utilisée dans le cas des filtres plissés THE du fait de leur faible ouverture.

Face aux différentes lacunes des différentes approches recensées, il nous a fallu développer notre propre dispositif adapté à la géométrie du filtre étudié pour la mesure du champ de vitesse au sein du pli avec une résolution spatiale très fine.

3.2. Banc expérimental

3.2.1. Présentation de la technique utilisée

La PIV (Particle Imaging Velocimetry) est une technique optique permettant de mesurer des champs de vitesse instantanée dans un milieu fluide. Une nappe laser éclaire un fluide ensemencé par des particules qui diffusent la lumière ; un doublet d'images séparées par un intervalle de temps dt est enregistré par une caméra et la mesure de la vitesse est déterminée à partir du déplacement, entre ces deux images, des particules fines qui ensemencent l'écoulement (Adrian et al 2011).

La Figure 21 représente un exemple d'images PIV obtenues entre deux instants t et $t + dt$. En mesurant le déplacement des particules (points blancs) durant cet intervalle de temps dt , la vitesse du fluide peut être déterminée. Les particules concernées doivent être assez « petites » pour suivre l'écoulement mais suffisamment « grosses » pour être détectées par la chaîne de traitement.

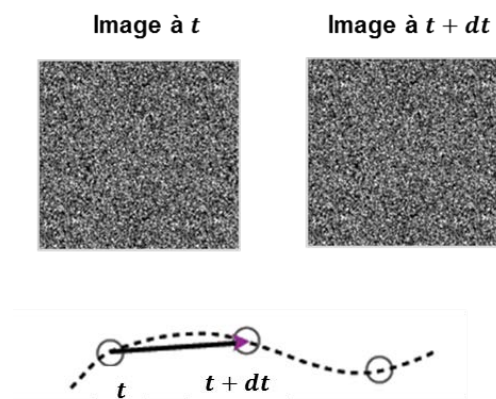


Figure 21 : déplacement des particules entre deux images prises entre t et $t + dt$

Pour être traceuses de l'écoulement, les particules doivent avoir un nombre de Stokes Stk inférieur à 1. Le nombre de Stokes (rappelé dans l'Équation 39) est un nombre adimensionnel qui compare les forces d'inertie et les forces de frottement visqueux appliquées à une particule.

$$Stk = \frac{\rho_p V_a d_p^2}{18\mu l_0} \quad \text{Équation 39}$$

où ρ_p est la masse volumique des particules ($kg.m^{-3}$), V_a la vitesse caractéristique du fluide ($m.s^{-1}$), d_p le diamètre des particules (m), μ la viscosité du fluide ($Pa.s$) et l_0 une distance caractéristique (m).

Les images sont discrétisées en fenêtres d'interrogations, puis un calcul mathématique de corrélation est réalisé dans le plan de Fourier permettant de calculer le déplacement moyen des particules. Le déplacement moyen sur chaque fenêtre d'interrogation correspond au pic de corrélation (cf. Annexe I pour plus de détails). Cette technique a été retenue pour mesurer les champs de vitesse dans le pli du filtre THE.

3.2.2. Descriptif du banc expérimental

Le média utilisé est celui des filtres THE. Il est plissé par le même processus industriel que celui utilisé pour la fabrication des filtres présents dans les réseaux de ventilation des installations nucléaires françaises, il nous a été fourni par la société CAMFIL. Sa géométrie est présentée sur la Figure 22. Ses caractéristiques sont rappelées dans le Tableau 4.

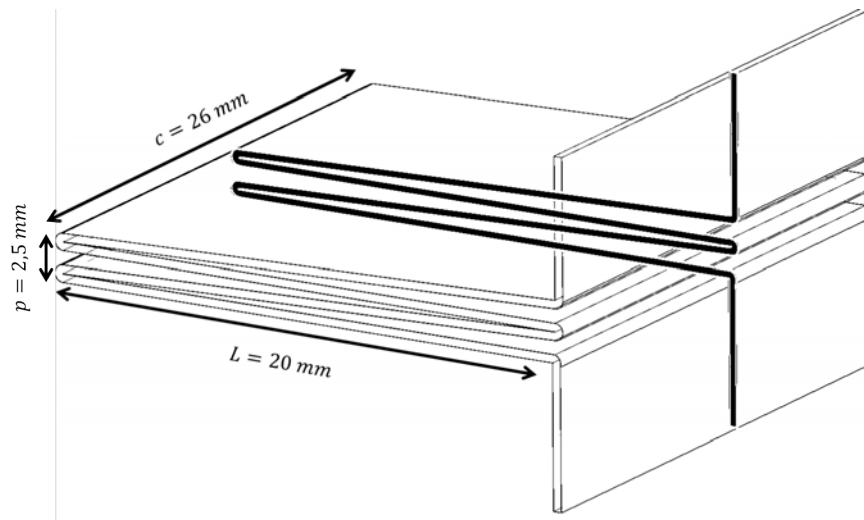


Figure 22 : géométrie du pli du filtre

Diamètre des fibres [μm]	0,59
Épaisseur [μm]	450
Compacité [-]	0,078
Grammage [$g.m^{-2}$]	92
Pas du pli	2,5 mm
Longueur du pli	20 mm

Tableau 4 : caractéristiques d'un média THE utilisé dans les filtres de marque CAMFIL (Bourrous, 2014)

Un dispositif a été développé, permettant de maintenir des plis du filtre entre des intercalaires transparents (en PMMA) permettant de réaliser des diagnostics optiques tout en respectant la géométrie du pli. Ce dispositif est présenté sur la Figure 23.

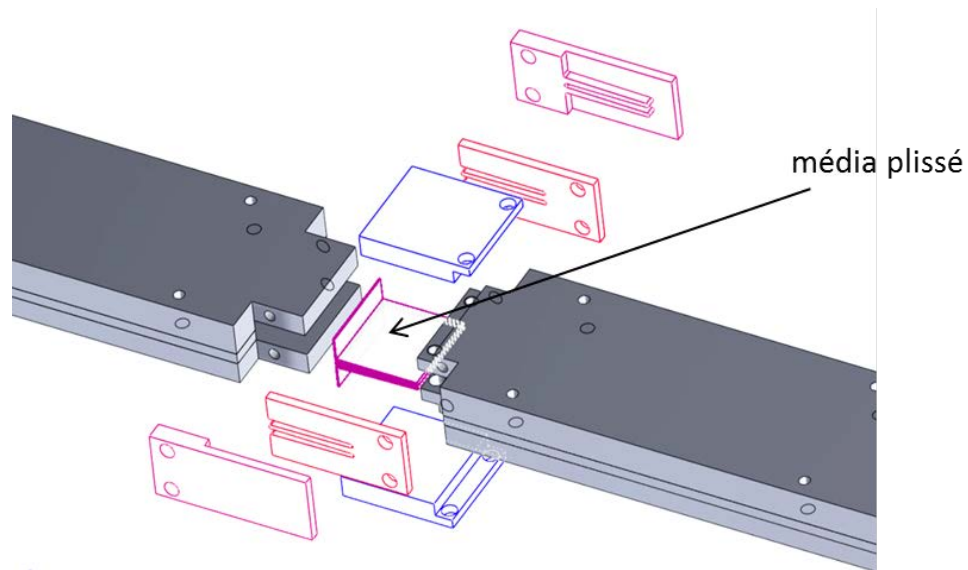


Figure 23 : dispositif de maintien des plis de filtre THE

Pour éviter les effets de parois sur l'écoulement d'air et être le plus représentatif possible de l'écoulement au sein des plis du filtre plissé THE, la zone de maintien contient un pli avec deux demi-plis de part et d'autre. Les mesures de champs de vitesses se feront sur le pli central (cf. Figure 24).

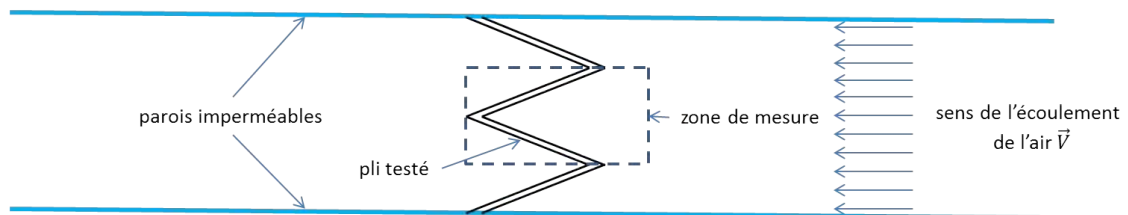


Figure 24 : schématisation de l'emplacement des plis du filtre testé

La Figure 25 représente la distribution granulométrique de la taille des aérosols utilisés Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) mesurée par un APS (TSI 3321). Les caractéristiques de ces particules sont présentées dans le Tableau 5.

Le nombre de Stokes (Équation 39) de ces particules est calculé en utilisant comme taille caractéristique l'ouverture du pli ($2,5\text{ mm}$), la vitesse en amont du filtre comme vitesse caractéristique et le diamètre aérodynamique mesurée par l'APS comme diamètre de particule. Le nombre de Stokes maximal (correspondant à la vitesse maximale de filtration étudiée, soit 4 cm/s et une vitesse en amont du pli $v_i = 0,72\text{ m/s}$) est égal à $0,003$. Ces particules peuvent donc être considérées comme traceuses de l'écoulement et utilisées pour l'ensemencer. Le Tableau 5 regroupe leurs caractéristiques.

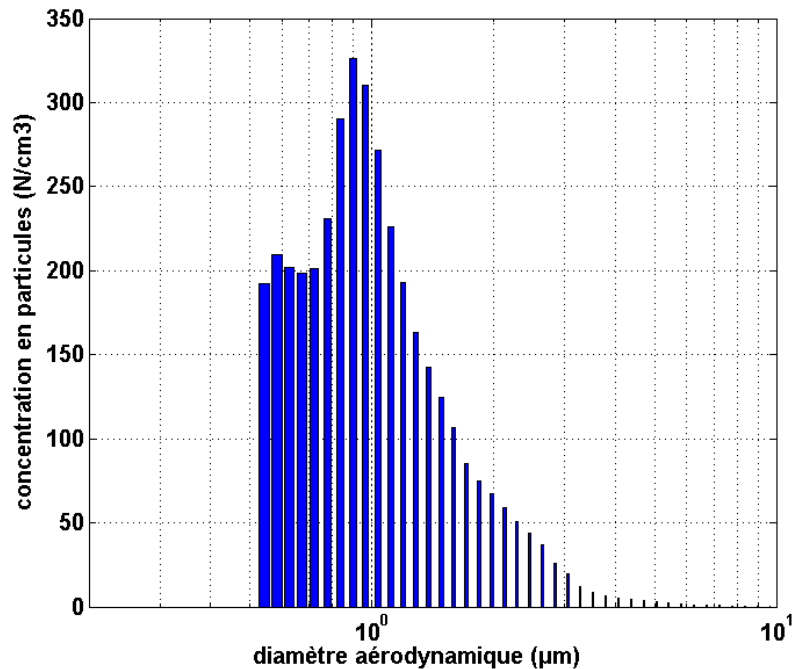


Figure 25 : distribution granulométrique des particules de DEHS mesurée par un APS (diamètre aérodynamique)

formule chimique	$C_{26}H_{50}O_4$
masse volumique (kg/m^3)	912
masse molaire (g/mol)	426,69
diamètre médian	0,93 μm
diamètre moyen	1,10 μm
écart-type géométrique	1,2
mode	0,89 μm

Tableau 5 : caractéristiques des particules d'ensemencement (DEHS)

Le domaine de mesure est de $20 \times 1,25 \text{ mm}^2$; à cette échelle, une technique de PIV classique reste difficile à mettre en place. Pour contourner cette difficulté, une méthode dérivée, appelée Shadow-PIV, a été mise en œuvre. Elle consiste à mesurer le déplacement de l'ombre des particules illuminées par un laser en éclairant frontalement, via un diffuseur (élargisseur de faisceau), l'espace entre les plis du filtre (canal d'écoulement).

La Figure 26 présente le banc expérimental développé pour étudier l'écoulement d'air dans le pli. Le générateur d'aérosols utilisé est un atomiseur TSI (Model 9306). Ces aérosols sont envoyés vers un volume tampon qui alimente le dispositif. Le système optique est composé d'une caméra (Andor : Neo, sCMOS) avec une résolution de 2560×2160 , équipée d'un objectif macro (MP-E 65mm, f/2.8, 1-5x) et un grossissement 5:1 (vérifié avec une table de calibration). La taille du pixel est de $6,5 \mu m$ avec une résolution spatiale de $1,3 \mu m$. Les

particules de DEHS sont illuminées avec un laser Nd:YAG pour figer leur déplacement. La durée du flash est de 9 ns.

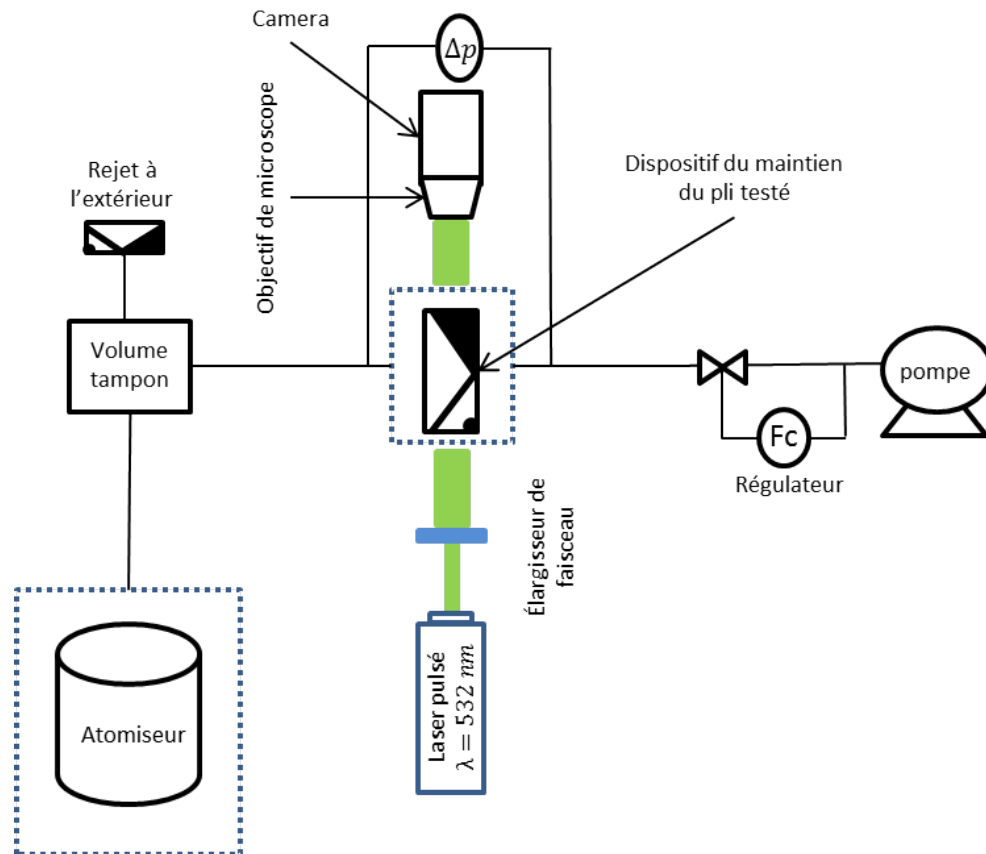


Figure 26 : banc expérimental de mesure des champs de vitesse dans un pli de filtre THE

Durant chaque expérience, le nombre d'images (N) acquises est limité par la mesure de la perte de charge du filtre. En effet, les particules utilisées pour l'ensemencement de l'écoulement sont collectées par le média avec pour conséquence un risque de colmatage et donc de modification de l'écoulement au sein du pli. Ainsi, il est important, durant les mesures, de maintenir la résistance aéraulique du média la plus constante possible. C'est la raison pour laquelle l'augmentation de la perte de charge du pli, suivie par un capteur (GE DRUCK LPX5480), a été limitée à 5 % de la perte de charge initiale. Au-delà de cette valeur, le filtre testé est remplacé par un filtre vierge.

3.2.3. Algorithme de traitement des images

La Figure 27 présente un exemple d'image réalisée au cours de l'expérience. L'utilisation des images brutes ne permet pas d'obtenir des pics de corrélation distincts dans le plan de Fourier. Ainsi, un algorithme de traitement d'images a été développé pour augmenter numériquement la concentration des particules et améliorer leur contraste et donc le rapport signal/bruit. Ce traitement s'applique sur le nombre N de doublets d'images acquises durant l'expérience et se fait en deux étapes.

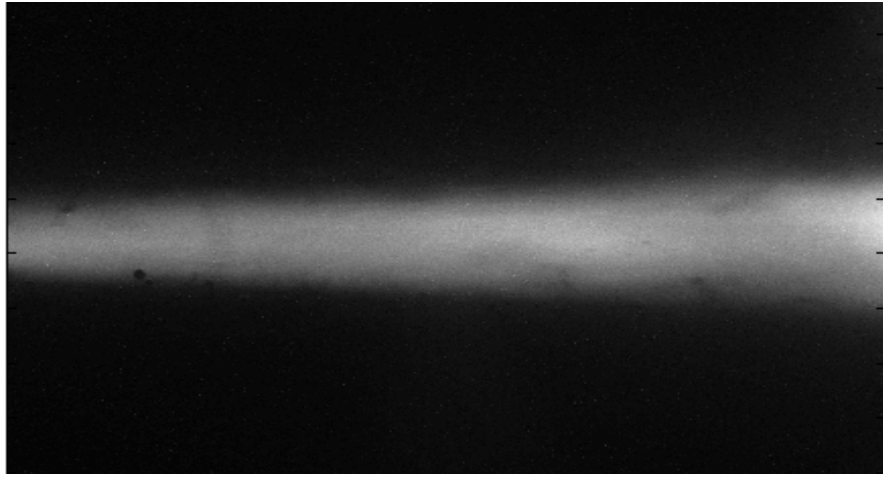


Figure 27 : exemple d'image obtenue (en noir le média et en blanc l'air + particules)

Tout d'abord, les doublets d'images enregistrées sont moyennés. L'image obtenue représente l'image de fond (image sans particules). Ensuite, deux filtres sont appliqués aux images. Le premier filtre est utilisé pour éliminer la partie de l'image obstruée par le média, la prise en compte de cette région dans les calculs de corrélation dégrade la précision des vecteurs de vitesse. Le deuxième filtre est spatial et est adapté aux tailles des particules ; il permet d'agrandir (flouter) les particules. Une opération mathématique de division de toutes les images par l'image de fond permet d'augmenter le rapport signal/bruit (voir Figure 28). A ce stade, seules les particules sont visibles sur les images résultantes.

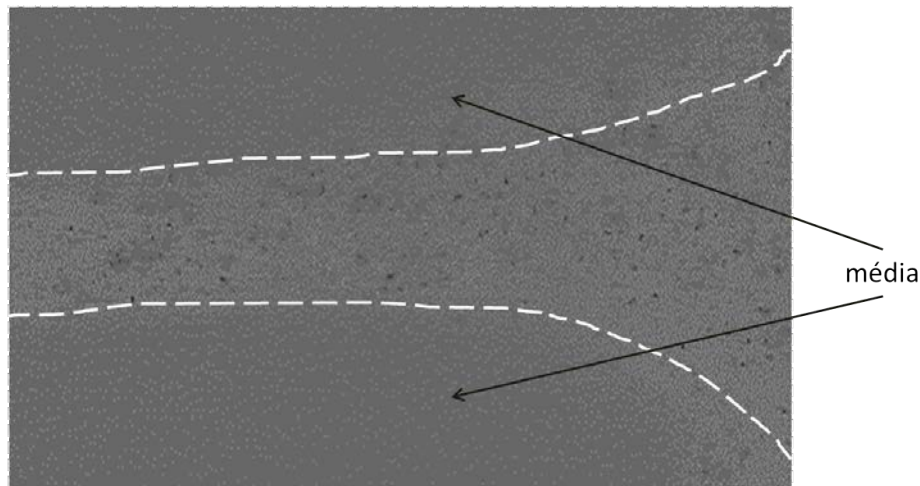


Figure 28 : image après la première étape (application des filtres + division)

La deuxième opération consiste à faire une sommation glissante d'images dans le but d'augmenter la concentration des particules. Cette sommation garde le même nombre N de doublets initiaux. La Figure 29 schématise cette sommation. Le couple (A_i, B_i) représente un doublet d'image (frame), le déplacement des particules est calculé entre ces deux images. Le pas de temps dt entre A_i et B_i est de $10 \mu s$. La sommation glissante des images est réalisée en utilisant un nombre N^* de frames initiales (cf. Figure 29). N^* peut varier d'un essai à un autre (de 5 à 15). En effet, la sommation d'images permet d'augmenter la concentration de particules mais augmente aussi le taux de bruit dans les images résultantes. Une valeur optimale de N^* est à déterminer pour chaque essai.

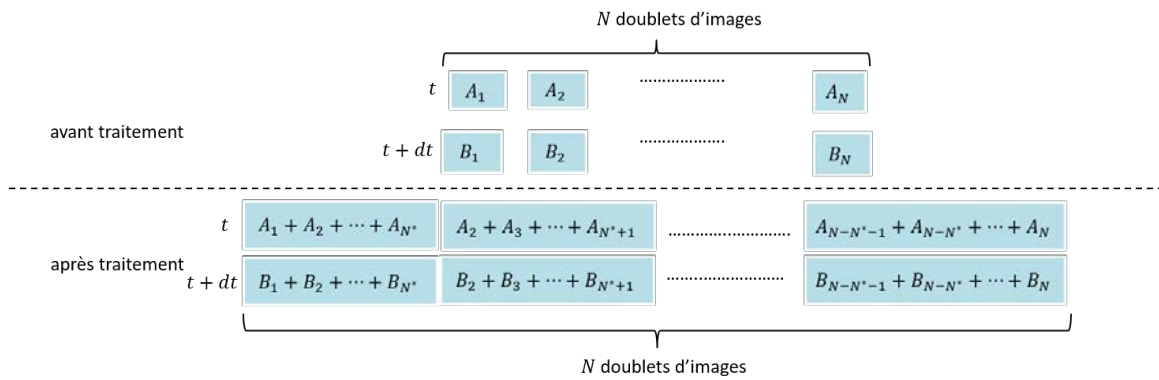


Figure 29 : schématisation de la sommation glissante d'images

Notons que la sommation d'images ne modifie pas les vitesses des particules. En effet si on considère deux frames (A_1, B_1) et (A_2, B_2) , une particule p_1 qui s'est déplacée de d_1 entre A_1 et B_1 , dans le couple formé par $(A_1 + A_2, B_1 + B_2)$ le déplacement de la particule p_1 est toujours égal à d_1 parce que l'écoulement est permanent (le temps de relaxation est estimé à quelques microsecondes).

Les images résultantes sont traitées par le logiciel DANTEC DYNAMIC STUDIO 2016, afin de calculer les déplacements des particules traceuses de l'écoulement et d'en déduire les champs de vitesse. Les paramètres optimaux du calcul de corrélation sont :

- la taille de la zone de corrélation ou *region of interest* (ROI) : calcul itératif (adaptive PIV) partant de 50×50 (*pixel*²),
- le nombre de particules minimum dans chaque ROI : 4,

Les critères de validité sont définis par :

- le rapport signal sur bruit : $> 3,6$,
- le rapport du pic primaire sur le pic secondaire : > 3 .

3.2.4. Post-traitement des vecteurs de vitesse

Une moyenne des champs de vitesse obtenus est réalisée. Notons que cette opération n'a pas d'influence sur la précision des résultats, car l'écoulement est stationnaire. Ceci permet d'estimer l'incertitude des résultats en calculant la dispersion des vecteurs de vitesse autour des vecteurs moyens.

Cette moyenne ne peut être effectuée sur tous les champs de vitesse calculés. En effet, l'application des critères de validité du champ de vitesse rend les vecteurs qui ne les respectent pas nuls. L'utilisation de ces vecteurs pour le calcul de la moyenne fausserait les résultats. Ces vecteurs sont alors éliminés et sur chaque ROI, la moyenne des vecteurs de vitesse est calculée si et seulement si, au moins vingt vecteurs de vitesse sont fiables (respectent les critères de validité).

La dispersion des vecteurs de vitesse par rapport au champ moyen est calculée en utilisant le nombre de vecteurs initialement trouvés pour réaliser la moyenne.

Tous les traitements d'images et post-traitements des vecteurs de vitesse ainsi que le traçage des profils de vitesse ont été automatisés à l'aide d'un programme numérique développé.

3.2.5. Validation des essais

La mise en place du filtre dans le système de maintien peut engendrer un pincement du média au niveau des encastrements et conduire à une perte de la surface de filtration. Afin de vérifier que l'air passe par la totalité de la surface du média pendant l'expérience, un système

permettant le dépôt de particules sur le filtre (après son utilisation) a été développé (voir Figure 30). Il se compose d'un générateur de particule de carbone (GFG-1000), d'un régulateur de débit (Model 5850E/B1A1B10) et d'une pompe. Le pli utilisé dans chaque expérience est ensuite placé dans ce système et colmaté. Les nanoparticules de carbone sont de couleur noire. La vérification se fait de manière visuelle. Après le colmatage du filtre, un essai est validé si toute la surface disponible pour la filtration est noire de manière homogène (vérification visuelle).

Toutes les expériences sont répétées trois fois avec des médias de filtres THE différents, pour s'assurer de la reproductibilité des résultats.

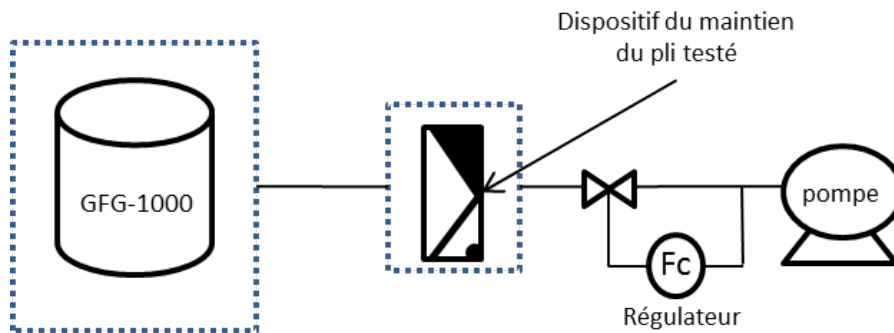


Figure 30 : système de dépôt de nanoparticules de carbone sur le filtre

3.3. Résultats expérimentaux

Le traitement réalisé sur les images, couplé à l'utilisation d'un programme de PIV, permet d'obtenir les champs de vitesse. Les mesures sont réalisées pour trois vitesses de filtration différentes ($Vn/2$, Vn , $2Vn$ avec $Vn = 2 \text{ cm/s}$). La Figure 31 représente un exemple de champ de vecteurs de vitesse dans le pli pour la vitesse nominale de filtration Vn (ce qui correspond à un débit de $2,48 \text{ l/min}$ à travers le pli).

Étant limité par la résolution de la caméra, cet exemple de champ de vitesse, mesuré sur 6 mm à l'entrée du pli, a été obtenu sur deux essais différents. La résolution spatiale du champ de vitesse est satisfaisante ($\sim 50 \text{ vecteurs/mm}$) et permet de représenter finement les profils de vitesse.

Cette figure montre qu'en entrée de pli, l'écoulement contourne le média et subit une contraction engendrant une augmentation importante de la vitesse dans le canal du pli.

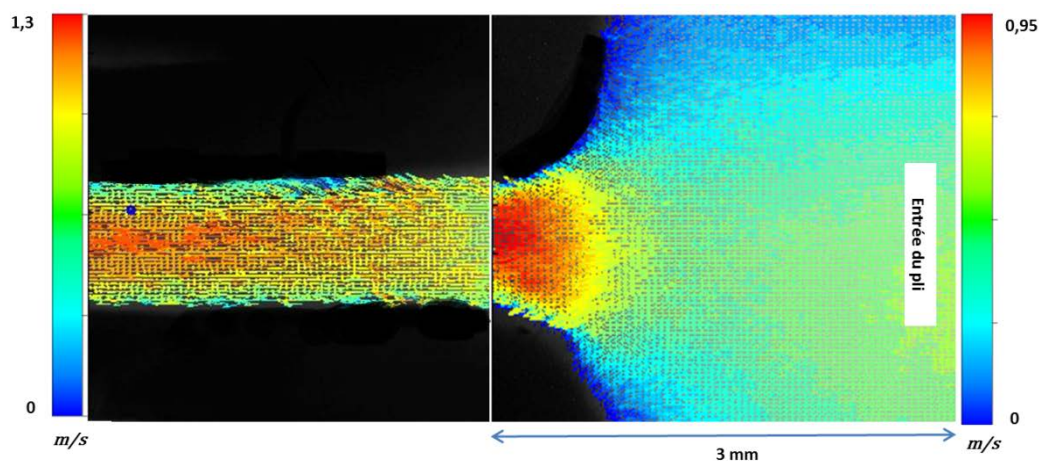


Figure 31 : exemple de champ de vitesse dans deux portions de pli pour une vitesse nominale de filtration

3.3.1. Adimensionnement du champ de vitesse

Les medias THE présentent des irrégularités au niveau de leur surface qui peuvent modifier localement l'écartement du pli. Afin de surmonter ce problème, des profils adimensionnés sont considérés.

La vitesse d'air au point (x, y) est notée \vec{V} et définie en fonction des composantes horizontales et verticales de la vitesse, respectivement $u(x, y)$ et $v(x, y)$:

$$\vec{V}(x, y) = u(x, y)\vec{e}_x + v(x, y)\vec{e}_y \quad \text{Équation 40}$$

Où \vec{e}_x et \vec{e}_y sont respectivement les vecteurs unitaires dans la direction de l'axe de symétrie du pli et dans la direction perpendiculaire.

Sur chaque section du pli, la vitesse longitudinale $u(x, y)$ est adimensionnée par la vitesse moyenne $\bar{u}(x)$. Ainsi, on définit la vitesse longitudinale adimensionnée $U(x, y)$ par le rapport :

$$U(x, y) = \frac{u(x, y)}{\bar{u}(x)} \quad \text{Équation 41}$$

La vitesse moyenne est définie par :

$$\bar{u}(x) = \frac{1}{h(x)} \int_{y_0(x)}^{y_1(x)} u(x, y) dy \quad \text{Équation 42}$$

y_0 (respectivement y_1) est la petite (respectivement grande) coordonnée selon \vec{e}_y du média en x . $h(x)$ représente l'écartement du pli en x , tel que :

$$h(x) = y_1(x) - y_0(x) \quad \text{Équation 43}$$

La position axiale est adimensionnée par la hauteur du pli L . La coordonnée y est adimensionnée pour avoir des valeurs comprises entre 0 et 1, tel que :

$$0 < Y(x) = \frac{y_1(x) - y}{h(x)} < 1 \quad \text{Équation 44}$$

Les paramètres géométriques sont regroupés dans la Figure 32.

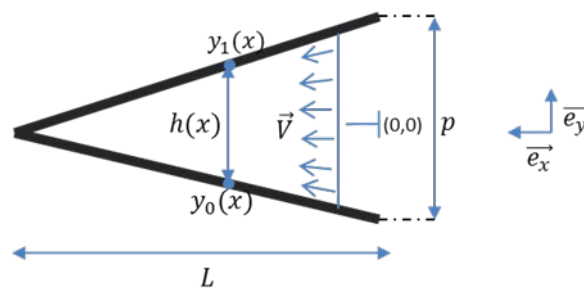


Figure 32 : schéma représentant les paramètres géométriques du pli

3.3.2. Profils de vitesse

La Figure 33 représente l'évolution du profil de vitesse adimensionnée sur plusieurs sections du pli. Tous les profils se superposent. C'est également le cas pour les autres vitesses de filtration étudiées ($Vn/2$, $2Vn$). Les résultats expérimentaux correspondant à ces vitesses de filtration sont présentés en Annexe II.

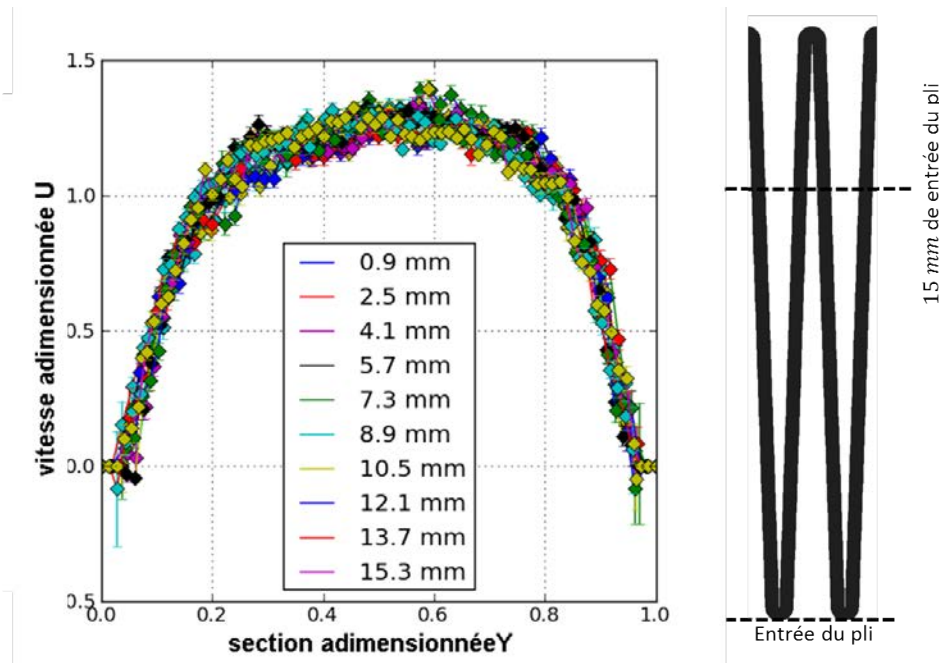


Figure 33 : profils de vitesse adimensionnée à différentes distances de l'entrée du pli pour la vitesse nominale de filtration

On peut constater aussi que les profils de vitesse adimensionnés ne sont pas paraboliques, en comparaison, par exemple, avec le modèle d'écoulement de Lücke et *al.* (1995). Ce dernier a développé un jeu d'équations modélisant l'écoulement à faible nombre de Reynolds (le cas présent) dans un canal de pli avec des médias THE. Le profil de vitesse longitudinal est un polynôme en Y^2 , ce qui n'est pas le cas dans notre étude. Cette approche a été aussi suivie par Granger et *al.* (1989), Yu et *al.* (1992) et Thomas et *al.* (2002). En revanche, Berman (2011) a développé un modèle théorique polynomial non quadratique (de degré 6) pour la vitesse longitudinale dans le canal du pli, ce qui est plus proche de nos résultats. Il retrouve asymptotiquement, pour une vitesse de filtration nulle, un écoulement de Poiseuille (quadratique).

Ce profil non-parabolique a été aussi obtenu dans des études numériques plus récentes mais pour des vitesses de filtration plus grandes que celles étudiées ($> 10 \text{ cm/s}$) et des filtres de moyenne efficacité (Rebaï et al 2010, Saleh et al 2014, Théron et al.2017).

Dans nos propres conditions opératoires, on peut donner deux raisons pouvant être à l'origine de cette forme aplatie du profil de vitesse :

- contrairement aux écoulements dans les conduits non poreux, la vitesse à proximité du média est non nulle et le gradient de la vitesse longitudinale (u) est moins important. Ainsi, la quantité de mouvement diffuse du milieu du canal ($Y \sim 0,5$) vers les bords plus rapidement que dans le cas d'un conduit, engendrant une vitesse homogène dans la partie centrale du canal ($Y \sim 0,5$) et donc la forme «plate» du profil de vitesse.
- cette forme du profil de vitesse est une caractéristique des écoulements turbulents. Ainsi ce profil « plat » peut être expliqué par un régime d'écoulement non laminaire mais plutôt transitionnel. Notons que la transition entre un régime laminaire et turbulent dans le cas des conduits non poreux se fait généralement pour des nombres de Reynolds entre 1000 et 2000, alors que dans notre configuration, pour une vitesse nominale de filtration, le nombre de Reynolds est autour de 100. Il se peut que pour les écoulements impliquant des domaines à la fois poreux et fluides, le passage de l'écoulement d'un régime laminaire à un régime turbulent se fasse pour des bas nombres de Reynolds.

Toutefois, ces deux explications peuvent nous sembler contradictoires. En effet, la première consiste à considérer que la quantité de mouvement diffuse plus facilement dans un canal poreux, ainsi les perturbations donnant naissance à l'apparition de la turbulence dans l'écoulement sont dirigées vers les parois poreuses jouant en faveur d'un retardement de la transition vers un écoulement turbulent. Il est donc difficile d'expliquer avec certitude l'origine de la forme non-parabolique des profils de vitesse.

3.4. Conclusion

Grâce à une technique de vélocimétrie laser, des mesures de champs de vitesse d'écoulement d'air au sein d'un pli de filtre plissé THE ont été réalisées avec une bonne résolution spatiale. En décrivant les profils de vitesse obtenus par des paramètres adimensionnés, on a mis en évidence un caractère particulier de l'écoulement à travers le pli : l'auto-similarité. C'est un résultat important qui nous facilitera la modélisation mathématique de l'écoulement par la suite.

À des distances supérieures à 15 mm de l'entrée du pli, le volume disponible à l'écoulement devient faible ($< 0.3 \times 5 \text{ mm}^2$) pour avoir des pics de corrélations bien distincts et donc des vecteurs de vitesse valides. Ceci est dû d'une part à un nombre de particules non suffisant pour l'utilisation de la technique de vélocimétrie laser, et d'autre part à la faible luminosité au fond du pli. En effet, les images sont acquises à mi-largeur du pli (plan focal de la caméra), toute irrégularité à la surface du média se trouvant derrière le plan de mesure (du côté du laser) influence la quantité de lumière incidente et engendre des zones sombres dans l'image acquise. Au fond du pli ce phénomène est accentué et détériore fortement la qualité des images.

La caractérisation de l'écoulement en proche-média constitue une limite de la technique de mesure utilisée. En effet, la vélocimétrie laser se base sur la mesure du déplacement de particules traceuses de l'écoulement ; dans notre cas, à proximité du média, la majorité des particules utilisées pour l'ensemencement de l'écoulement sont collectées (efficacité proche de 100 %) ; par conséquent, leur trajectoires sont déviées des lignes de courant de l'air. Elles ne sont donc pas traceuses de l'écoulement à cet endroit. Ainsi, on obtient des valeurs nulles de la vitesse longitudinale en proche média (cf. Figure 33, Figure 112, Figure 113).

Afin de caractériser la totalité de l'écoulement dans le pli (à proximité du média et au fond du pli), nous avons eu recours à la simulation numérique qui nous permettra après une phase de validation, d'obtenir un champ complet de vitesse dans le pli.

4. ETUDE NUMERIQUE DES ECOULEMENTS D'AIR DANS UN FILTRE PLISSE THE ET VALIDATION DES CODES DE CALCUL

4.1. Introduction

Comme présenté précédemment, des mesures expérimentales de champs de vecteurs de vitesse ont été obtenues dans un pli de filtre THE. À l'aide de deux codes de calcul différents, nous allons simuler l'écoulement d'air dans la même configuration que les expériences. Les mesures expérimentales serviront de base pour la validation de ces logiciels. Notre choix s'est porté sur deux logiciels : ANSYS CFX® et GeoDict®.

4.2. Simulations avec le logiciel ANSYS CFX®

ANSYS CFX® est un logiciel commercial se basant sur la méthode des volumes finis pour résoudre les équations de Navier-Stokes. Les schémas utilisés sont des schémas implicites de deuxième ordre.

4.2.1. Domaine de calcul

Pour réaliser les simulations CFD, un domaine de calcul est d'abord défini (géométrie). Il représente le dispositif expérimental utilisé pour la mesure de vitesse d'écoulement (Figure 23). Ce dernier est réalisé à l'aide du logiciel ANSYS Design Modeler® (Figure 34). Il est divisé en deux domaines : un domaine fluide représentant l'air avec ses caractéristiques à 20°C et un deuxième domaine poreux, représentant le média THE du filtre. Le Tableau 6 résume les caractéristiques du fluide et du milieu poreux utilisées.

Masse volumique d'air	$1,2 \text{ kg/m}^3$
Viscosité dynamique d'air	$1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$
Perméabilité du média	$1,19 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$
Épaisseur du média	$0,45 \text{ mm}$

Tableau 6 : caractéristiques du fluide et du milieu poreux utilisées dans les simulations

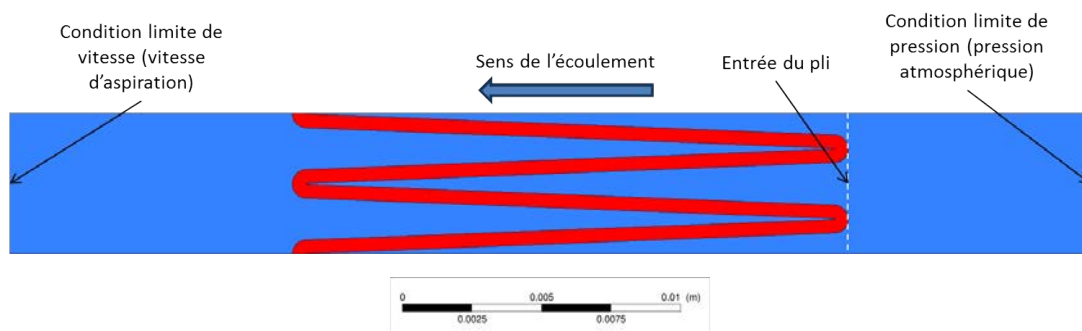


Figure 34 : domaine de calcul et conditions limites utilisées (en bleu l'air et en rouge le média)

Le maillage a été réalisé à l'aide du logiciel ANSYS ICEMCFD®. Une étude de convergence au maillage a été réalisée pour déterminer les tailles de mailles optimales permettant d'avoir une solution indépendante et un écoulement établi en entrée de pli. La Figure 35 représente les profils de vitesse en entrée de pli sur deux sections différentes. Elle montre qu'à la taille choisie du domaine amont (10 mm), l'écoulement est établi tout en s'écoulant avec un profil de Stokes (ce qui est caractéristique d'un écoulement dans un conduit à faible nombre de Reynolds). Cette étude permet de trouver une taille minimale du domaine fluide pour avoir un nombre minimal de mailles.

On ne cherche pas à résoudre finement les structures d'écoulement dans le média (milieu poreux où la vitesse et la pression sont liées par la loi de Darcy), seul le saut de pression à travers le média nous intéresse. Ainsi, un maillage « grossier » dans le domaine poreux a été volontairement choisi. La taille des éléments du média est choisie afin d'avoir 5 mailles en épaisseur. En conséquence, les maillages fluides et poreux ne sont pas continus. Pour lier ces deux maillages non conformes, une interface est définie pour garantir une continuité de la vitesse et de la pression entre les cellules de contact de ces deux domaines. Dans la zone du dépôt (dans le canal du pli), la taille des mailles est inférieure à 50 µm. Le nombre total d'éléments est de l'ordre de 376 000 (hexaèdres). La Figure 36 représente le maillage final adopté pour la suite des calculs.

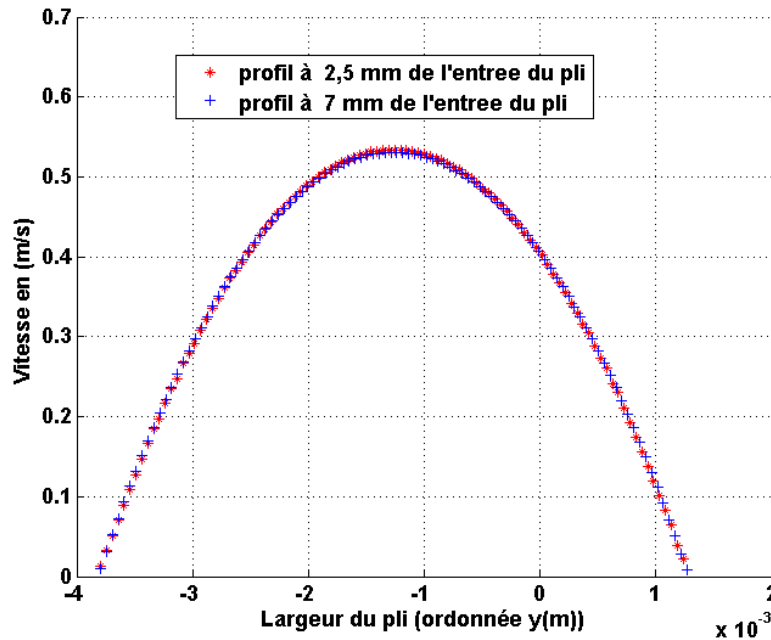


Figure 35 : comparaison de profils de vitesse à 2,5 et 7 mm de l'entrée du pli

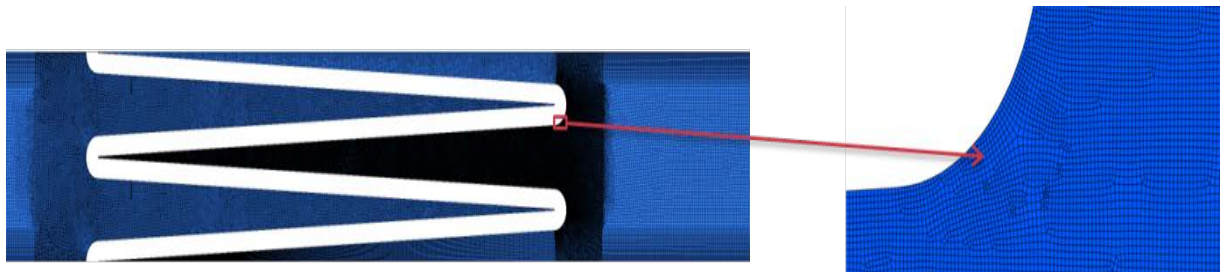


Figure 36 : le maillage fluide utilisé pour les calculs ANSYS CFX®

4.2.2. Paramètres de simulation

Le média fibreux est modélisé par un milieu poreux homogène. La résolution se fait à l'échelle macroscopique. L'écoulement y est modélisé par l'équation de Navier-Stokes, à laquelle un terme permettant de prendre en compte la résistance du média à l'écoulement est ajouté. Par analogie avec l'équation de Darcy, ce terme est proportionnel à la vitesse et l'équation de Navier-Stokes (NS) devient l'équation de Navier-Stokes-Brinkman :

$$\rho(u \cdot \nabla)u + \mu/k u = -\nabla P + \mu \Delta u + Bi \tag{Equation 45}$$

Le nombre de Reynolds dans le média est calculé en prenant comme longueur caractéristique la racine carrée de la perméabilité :

$$Re = \frac{\rho V_f \sqrt{k}}{\mu} \tag{Equation 46}$$

Par analogie au diamètre hydraulique considéré pour estimer le nombre de Reynolds dans les conduits, on prend l'ouverture du pli comme longueur caractéristique de l'écoulement dans le canal du pli. La vitesse caractéristique considérée est la vitesse en entrée du pli v_i . Ainsi le nombre de Reynolds devient :

$$Re = \frac{\rho v_i p}{\mu} \tag{Equation 47}$$

Les valeurs numériques du Reynolds en fonction de la vitesse de filtration sont résumées dans le Tableau 7. Elles montrent que le nombre de Reynolds poreux (du média) reste toujours inférieur à 1 et justifie le choix d'un modèle laminaire dans le domaine poreux.

Dans le domaine fluide, les valeurs numériques du nombre du Reynolds sont comprises entre 40 et 160. Ce sont des valeurs relativement basses pour considérer un régime turbulent d'écoulement (en comparaison avec les écoulements en conduit où le Reynolds de transition est entre 1000 et 2000). Néanmoins, les résultats expérimentaux (cf. 3.3.2) ont montré un profil non-parabolique, comme dans le cas de Lücke et al. (1995) qui a fait l'hypothèse d'un écoulement laminaire, mais un profil aplati qui s'approche des profils de vitesse obtenus par Théron et al. (2017) qui a considéré des écoulements turbulents. Par précaution, on utilisera dans les simulations numériques un modèle de turbulence $k - \omega SST$, adapté aux écoulements transitionnels à bas Reynolds.

Vitesse de filtration	Nombre de Reynolds dans le média	Nombre de Reynolds dans le pli
$Vn/2$	$\ll 1$	40
Vn	$\ll 1$	80
$2Vn$	$\ll 1$	160

Tableau 7 : valeurs du nombre de Reynolds dans le pli et dans le média

Taille des domaines amont-aval	50 mm
Taille d'élément	15 μm – 80 μm
Perméabilité	$1.19 \cdot 10^{-12} m^2$
Modèle d'écoulement	Navier-Stokes Brinkman
Modèle de turbulence	$k - \omega SST$
Conditions limite en entrée	0 Pa
Condition limite en sortie	0,36 m/s

Tableau 8 : paramètres des calculs avec ANSYS CFX®

4.2.3. Résultats et comparaisons

La Figure 37 représente une cartographie du champ de vitesse au sein du pli. À proximité du pli, l'écoulement rencontre un obstacle (le média) et se comprime. Une grande partie du débit d'air contourne la zone de plissage et s'engouffre dans le canal plissé, engendrant une importante augmentation de la vitesse et par conséquent une diminution de la pression d'air que l'on cherchera à modéliser par la suite.

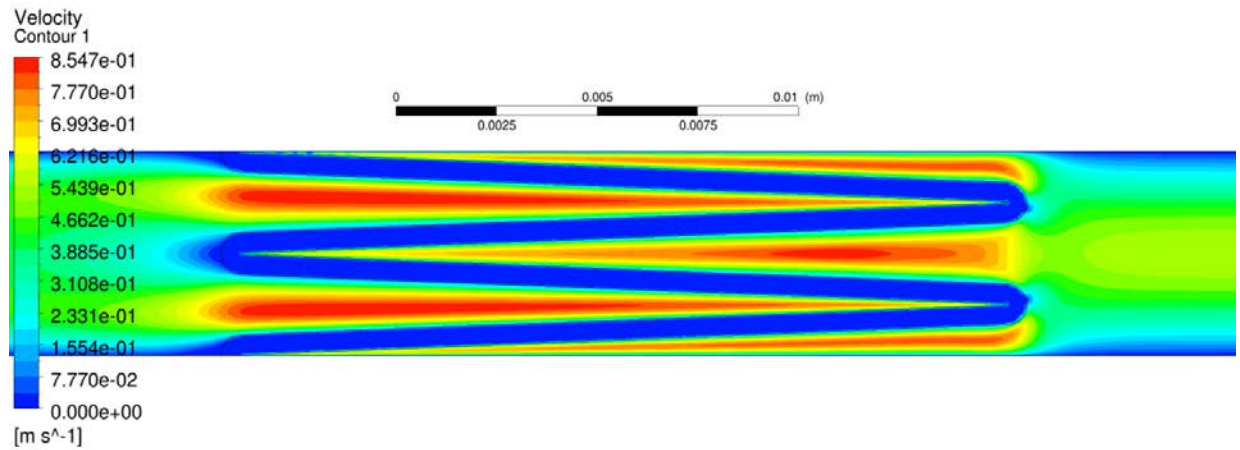


Figure 37 : champ de vitesse dans le canal d'écoulement du pli pour une vitesse de filtration (ANSYS CFX®)

La Figure 38 représente une comparaison des profils de vitesse longitudinale adimensionnée U à différentes distances de l'entrée du pli (0 mm, 2 mm, 7 mm, 10 mm, 15 mm et 17 mm). On peut constater que tous les profils se superposent, ainsi les résultats numériques issus d'ANSYS CFX® confirment les résultats expérimentaux dans le sens de l'auto-similarité.

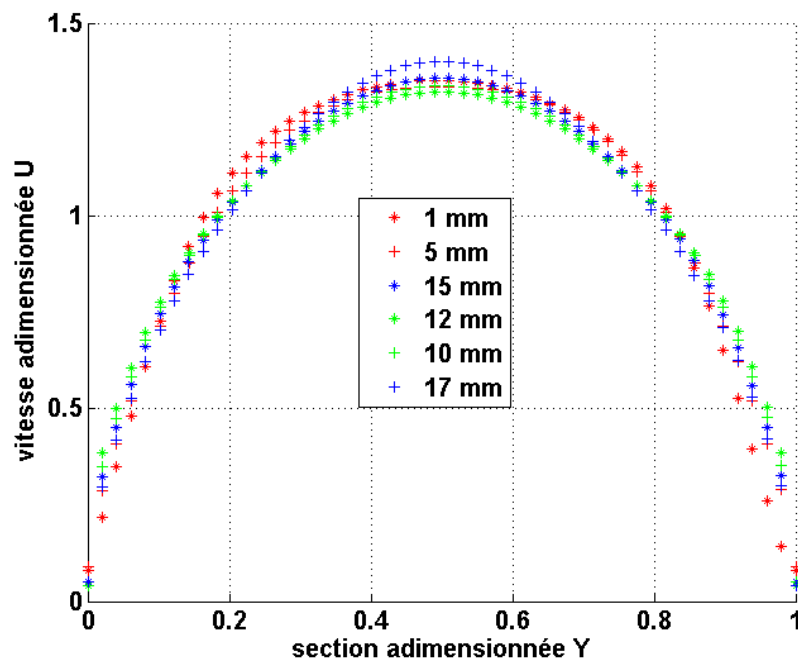


Figure 38 : profils de vitesse adimensionnée (U) à différentes distances de l'entrée du pli pour une vitesse nominale de filtration (ANSYS CFX®)

Les simulations numériques réalisées ont été menées en utilisant un modèle de turbulence $k - \omega SST$. Afin de lever le doute sur son utilisation, il a été comparé à un modèle laminaire et donne des résultats similaires en termes de profil de vitesse et de perte de charge. Le modèle $k - \varepsilon$ donne des profils de vitesse « trop » aplati et surestime la perte de charge (202 Pa pour une vitesse nominale de filtration comparée à 173 Pa pour un modèle laminaire et 176 Pa pour un modèle $k - \omega SST$).

La Figure 39 représente l'évolution numérique et expérimentale de la vitesse adimensionnée U en fonction de Y sur une section à 10 mm de l'entrée du pli. Pour les raisons de similitude, la comparaison se fait sur une seule section. Au vu de cette comparaison, le modèle numérique utilisé dans ANSYS CFX® est validé et peut donc être utilisé dans la suite des travaux.

Les résultats numériques présentent des profils semblables aux résultats expérimentaux et sont en bon accord. Notons qu'à proximité du média, un léger décalage existe entre les résultats expérimentaux et numériques. Ceci est très probablement lié à la technique de mesure qui a tendance à sous-estimer la vitesse du fluide (pour plus de détail cf. 3.4). On peut aussi constater qu'à une distance de 17 mm de l'entrée du pli, l'aplatissement du profil de vitesse devient moins important qu'à l'entrée du pli. En effet, à proximité du fond du pli, le domaine disponible pour l'écoulement est faible et tend vers zéro, ainsi, la forme parabolique du profil de vitesse est potentiellement liée au passage de l'écoulement d'un régime transitionnel à un régime laminaire.

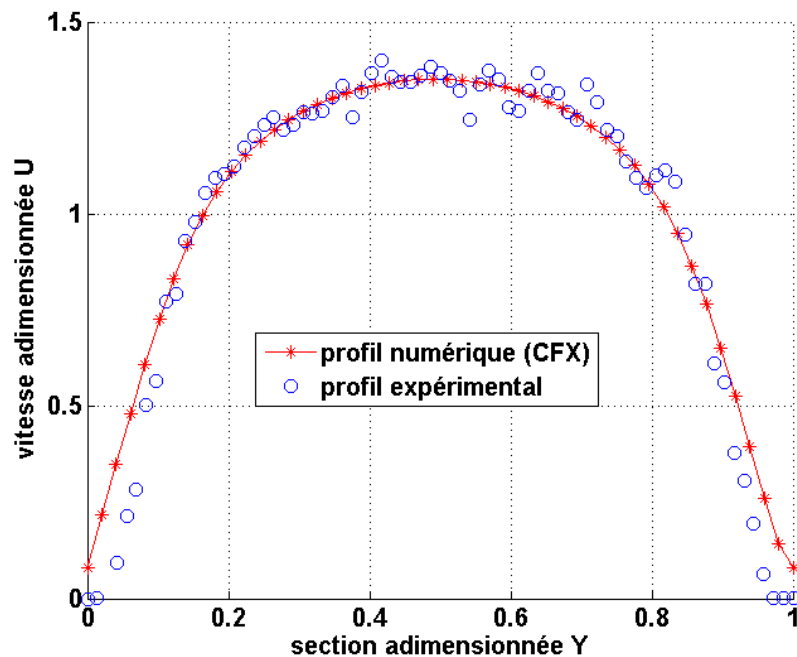


Figure 39 : comparaison des profils de vitesse adimensionnée à 10 mm de l'entrée du pli entre les résultats expérimentaux et numérique (ANSYS CFX®) pour une vitesse nominale de filtration

4.3. Simulation avec le logiciel GeoDict®

4.3.1. Domaine de calcul

GeoDict® (*GEOmetric design and property prediction*) est le deuxième code de calcul utilisé. C'est un logiciel dédié aux études d'écoulement et de transport de particules dans les milieux poreux. Ce logiciel sera principalement utilisé par la suite pour caractériser la formation du dépôt au sein d'un filtre plissé THE, sa validation par rapport à l'écoulement est par conséquent une étape nécessaire.

Le domaine de calcul est discrétisé sous forme de mailles cubiques appelées voxels. La définition des paramètres géométriques du pli se fait à l'aide du module PleatDict. La génération du maillage est également réalisée avec le module PleatDict dans lequel seule la

taille du voxel est à paramétrer. Aucun raffinement local du maillage n'est possible, la taille du maillage choisi est donc égale à la taille de la plus petite échelle résolue du domaine d'écoulement. Cette contrainte engendre un nombre important de mailles et augmente le temps de calcul (compensée par des schémas numériques performants). La Figure 40 représente le domaine de calcul. Les caractéristiques géométriques sont représentées dans la Figure 22.

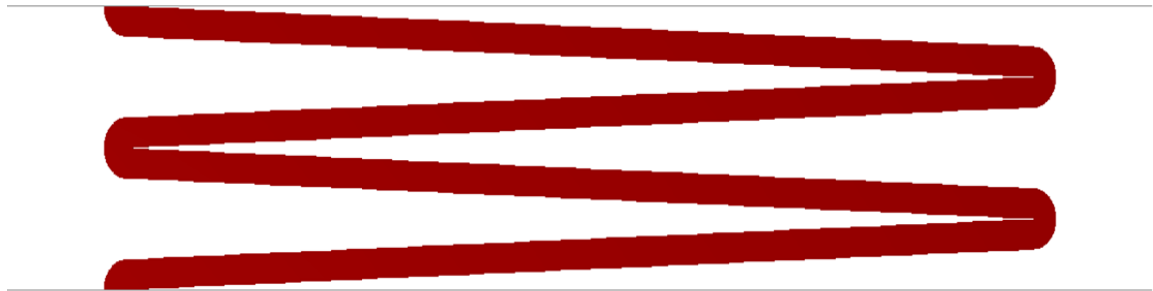


Figure 40 : domaine de calcul considéré pour les simulations GeoDict® (le média en rouge)

4.3.2. Paramètres de simulation

Les voxels peuvent être poreux ou fluides (perméabilité infinie), ceux du média sont poreux (perméabilité finie). Les caractéristiques du média et de l'air ont été listées précédemment dans le Tableau 6. Les mêmes études préliminaires réalisées avec ANSYS CFX® permettant de déterminer les paramètres optimaux de simulations ont été menées avec GeoDict®.

Contrairement à ANSYS CFX®, la turbulence des écoulements n'est pas modélisée. Dans le milieu fluide, l'équation de Navier-Stokes est résolue en négligeant le terme inertiel (Stokes) ou de façon directe (en gardant tous les termes). Ce deuxième cas nécessite un temps de calcul beaucoup plus important à cause du terme inertiel (terme non linéaire de l'équation de Navier-Stokes). Dans le milieu poreux, un terme modélisant la résistance à l'écoulement est ajouté, à travers la perméabilité. Ainsi, on peut définir deux modèles :

- le modèle de Navier-Stokes-Brinkman (NSB) :

$$\rho(u \cdot \nabla)u + \frac{\mu}{k}u = -\nabla P + \mu\Delta u + Bi \quad \text{Équation 48}$$

- le modèle de Stokes-Brinkman (NS) :

$$\frac{\mu}{k}u = -\nabla P + \mu\Delta u + Bi \quad \text{Équation 49}$$

Avec u la vitesse du fluide ($m \cdot s^{-1}$), μ la viscosité dynamique ($Pa \cdot s$), P la pression (Pa), Bi les forces extérieures appliquées et k la perméabilité (m^2).

Au vu des travaux réalisés précédemment, afin de ne pas négliger une éventuelle présence de la turbulence dans l'écoulement, on utilisera directement un modèle Navier-Stokes-Brinkman.

4.3.3. Résultats et comparaisons

Pour réduire le temps de calcul, le nombre de mailles doit être diminué. Ceci peut être réalisé à deux niveaux :

- la taille du voxel : pour l'équation de Navier-Stokes-Brinkman, la taille des éléments doit être aussi petite que la taille des plus petites structures de l'écoulement. Trouver cette taille consiste à diminuer progressivement la taille des voxels jusqu'à obtenir des résultats indépendants du maillage ;

- la taille en amont et en aval du domaine : la zone d'établissement de l'écoulement doit être assez grande pour que l'écoulement soit établi en entrée de pli comme en sortie du pli. Des études ont été menées pour définir la plus petite zone nécessaire à l'établissement de l'écoulement et ont abouti à la définition d'une taille de 10 mm (en entrée et en sortie du pli).

Une étude préliminaire permettant d'obtenir une taille optimale de voxel a été réalisée. La Figure 41 illustre l'influence du maillage sur les résultats numériques qui montre que les profils de vitesse commencent à se superposer à partir d'une taille de voxel de $5 \mu\text{m}$. Finalement, cette taille a été retenue pour les simulations numériques avec GeoDict®

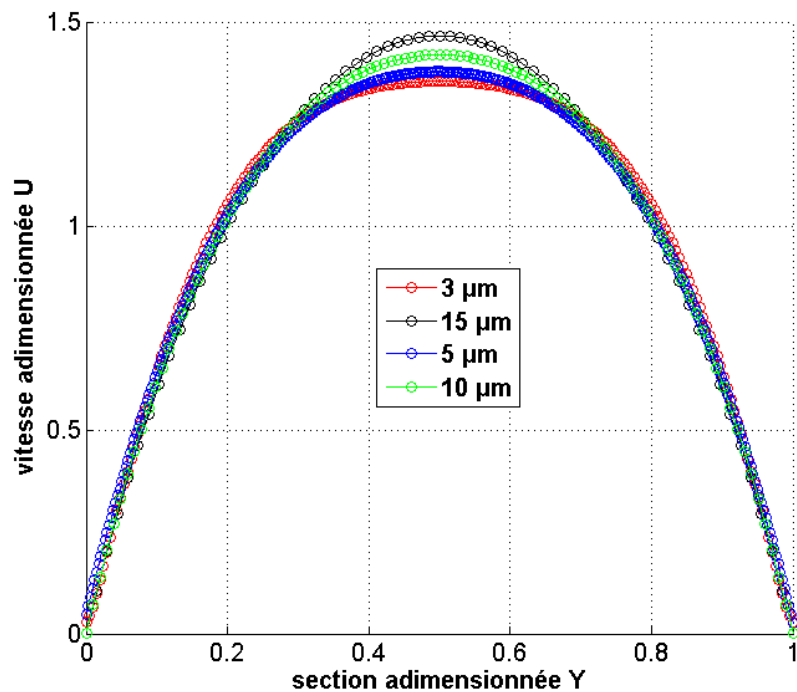


Figure 41 : comparaison des profils de vitesse adimensionnée à 10 mm de l'entrée du pli pour quatre tailles de voxel ($15 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m}$) et pour une vitesse nominale de filtration et un modèle NSB (GeoDict®)

Le Tableau 9 résume tous les paramètres choisis, déduits à partir des études préliminaires réalisées. Les profils adimensionnés de vitesse U sont tracés sur différentes sections du pli (Figure 42). Ces profils se superposent et confirment ainsi ce qui a été observé auparavant (profils auto-similaires).

Taille des domaines amont-aval	10 mm
Taille du voxel	$5 \mu\text{m}$
Modèle d'écoulement	Navier-Stokes-Brinkman
Condition limite en entrée	0 Pa (pression relative)
Condition limite en sortie	Vitesse d'aspiration

Tableau 9 : paramètres des calculs avec GeoDict®.

La Figure 43 représente la comparaison entre les résultats numériques d'ANSYS CFX®, de GeoDict® et de l'expérience pour une vitesse nominale de filtration sur une section du pli (à

7 mm de l'entrée du pli). Les profils adimensionnés sont en bon accord, ainsi GeoDict® est validée.

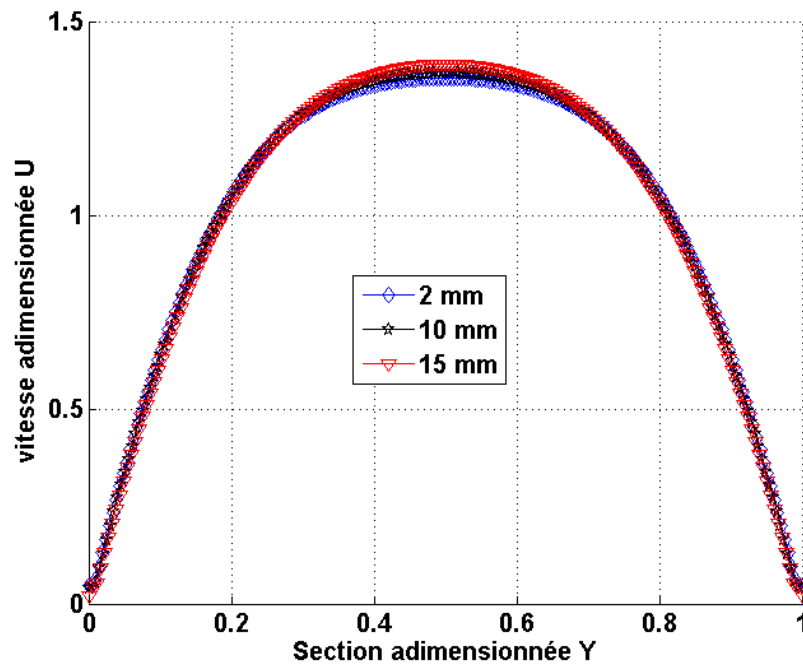


Figure 42 : comparaison des profils de vitesse adimensionnée à 2 mm, 10 mm et 15 mm de l'entrée du pli (GeoDict®)

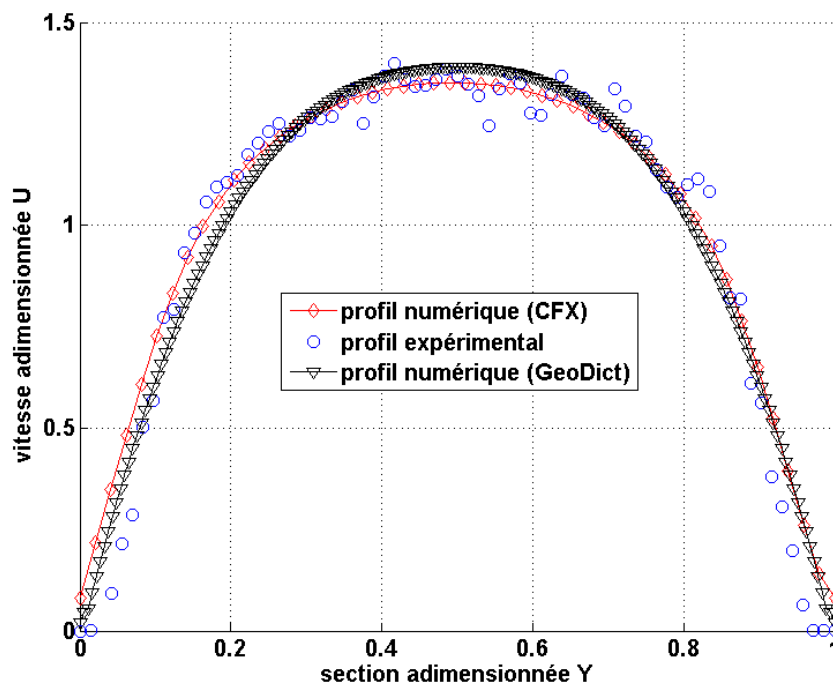


Figure 43 : comparaison des profils adimensionnés issus d'ANSYS CFX®, de Geodict® et des expériences à 7 mm de l'entrée du pli pour une vitesse nominale de filtration

4.4. Conclusion

Les simulations numériques des écoulements d'air dans un pli de filtre THE ont été réalisées dans le but d'évaluer les performances des codes de calcul ANSYS CFX® et GeoDict®. À l'issue de cette étude, les paramètres numériques optimaux permettant d'avoir des résultats les plus proches possibles des mesures expérimentales ont pu être déterminés. Ces deux logiciels sont donc validés et peuvent être utilisés par la suite pour une caractérisation plus approfondie de l'écoulement et pour la simulation de la formation du dépôt sur filtre au cours du colmatage.

5. MODELISATION DES ECOULEMENTS D'AIR ET DE LA PERTE DE CHARGE DANS UN FILTRE PLISSE THE

5.1. Introduction

L'air avant la traversée du média, transite par un canal dont la section diminue le long du pli, cette restriction entraîne une augmentation de la vitesse et donc une contraction de l'écoulement, comme le montre les cartographies de vitesse en entrée de pli (cf. Figure 37). En conséquence, une perte de charge supplémentaire s'ajoute à la perte de charge due à l'écoulement au sein du média et se traduit par une perte de pression entre l'entrée du canal d'écoulement du pli et sa sortie.

La modélisation physique de cette perte de charge dite de « plissage » est importante et ceci pour deux raisons :

- conception des filtres plissés : l'établissement d'un modèle de perte de charge permettant de décrire l'apport de l'écoulement d'air dans la perte de charge globale du filtre est un moyen de déterminer les paramètres géométriques optimaux afin de minimiser la perte de charge initiale du filtre et ainsi de se passer de simulations numériques ou d'essais expérimentaux fastidieux et coûteux ;
- modélisation du colmatage : la formation du dépôt de particules sur la surface du filtre modifie la géométrie de la zone de l'écoulement dans le pli, en conséquence, la perte de charge due au plissage va évoluer également au cours du colmatage. De ce fait, la modélisation physique de cette dernière nous paraît indispensable pour la construction d'un modèle phénoménologique de colmatage.

Plusieurs études théoriques ont été effectuées pour la modélisation des écoulements d'air dans des conduits à parois poreuses.

Terrill et al (1965) a utilisé une approche basée sur les équations de similitude de Navier-Stokes pour le calcul du champ de vitesse et de pression. Ces études ont été reprises par d'autres auteurs comme Benmachou et al. (2003), Oxarango et al. (2004), Rebai et al (2010). Ce dernier utilise les équations de similitude pour calculer les champs de vitesse dans des plis rectangulaires et triangulaires en faisant l'hypothèse d'un champ de vitesse affine et un écoulement laminaire. il en déduit les pertes de charge correspondantes. Son modèle est très sensible aux caractéristiques du fond de pli (géométrie, perméabilité) considérées et ne retranscrit pas tout à fait les mesures expérimentales.

En utilisant les codes de calcul « validés » par les résultats expérimentaux, une étude plus approfondie de l'écoulement d'air dans le filtre est effectuée. Ce qui nous permettra d'accéder à des paramètres dont l'obtention expérimentale reste difficile notamment la vitesse locale de filtration. Un modèle d'écoulement est proposé et ensuite validé. À la fin de ce chapitre, un modèle de perte de charge est proposé et appliqué à des filtres THE complets avec des géométries différentes puis étendu aux filtres ME.

5.2. Modélisation des écoulements d'air dans un pli de filtre plissé THE

On a pu constater que les profils adimensionnés se superposent sur toutes les sections du pli (Figure 33) et pour les trois vitesses de filtration. Ainsi, on peut écrire la vitesse sous la forme d'un produit de la vitesse moyenne et d'une fonction que l'on cherchera à déterminer :

$$u(x, y) = \bar{u}(x) \times f\left(\frac{y_1(x) - y}{h(x)}\right) \tag{Equation 50}$$

Où $\bar{u}(x)$ est la vitesse moyenne à la position x , $y_1(x)$ la coordonnée de la position haute du média en x , $h(x)$ l'écartement du pli en x et f une fonction monovariante (voir Figure 44). Dans cette relation, deux inconnues existent : la vitesse moyenne \bar{u} et la fonction f .

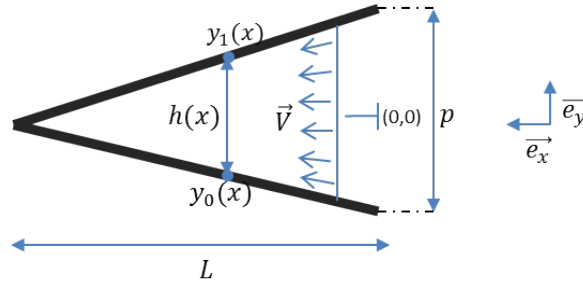


Figure 44 : schéma représentant les paramètres géométriques du pli

5.2.1. Détermination de la vitesse moyenne \bar{u}

On considère un domaine infinitésimal contenu entre x et $x + dx$ (Figure 45). Soit $Q(x)$ le débit traversant le pli à la position x . Entre les deux positions x et $x + dx$, le débit de filtration $Q_f(x)$ passant en x (débit passant par le média) est égal à la différence des débits passant entre x et $x + dx$ (principe de conservation de la masse cf. Figure 45). Ainsi on peut écrire :

$$Q(x) - Q(x + dx) = -dQ(x) = Q_f(x) \tag{Equation 51}$$

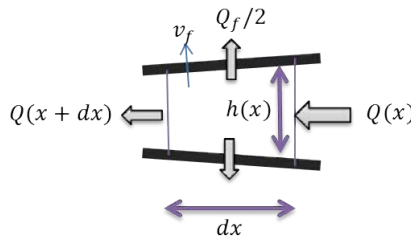


Figure 45 : schématisation des débits surfaciques passant dans le canal du pli

Soit $v_f(x)$ la vitesse locale de filtration traversant le pli en x , définie comme la vitesse normale au média. L'équation peut être réécrite sous la forme :

$$dQ(x) = -2v_f(x)dx \tag{Equation 52}$$

c est la longueur dans la direction perpendiculaire au pli (largeur du pli). Le débit d'air $Q(x)$ dans le pli est directement lié à sa vitesse moyenne $\bar{u}(x)$ et à la hauteur $h(x)$, en intégrant entre 0 et x , on trouve :

$$\bar{u}(x)h(x) = \int_0^x -2v_f(x)dx + \bar{u}(0)h(0) \tag{Equation 53}$$

La résolution de l'équation précédente dépend de la vitesse locale de filtration v_f .

Del Fabbro (2001) et Gervais (2013) en analysant un dépôt de particules traceuses de l'écoulement sur la surface du filtre, ont démontré que pour des filtres THE, on peut considérer une vitesse de filtration uniforme le long du pli. Néanmoins, certains auteurs (Raber *et al.* 1982, Rebaï *et al.* 2010) pour des grands nombres de Reynolds, l'ont considéré comme un paramètre susceptible d'évoluer le long du pli et de suivre une loi parabolique pour Thomas *et al.* (2002), Yu *et al.* (1992).

Afin de lever le doute sur l'évolution de ce paramètre indispensable pour la modélisation de l'écoulement, nous utiliserons les simulations numériques. Dans ces dernières, le média fibreux est représenté par un milieu poreux homogène et isotrope. Le calcul de la vitesse sur la surface du média se fait par égalisation des flux entre le fluide et le média. Or, en réalité la vitesse de l'air à proximité immédiate du média dépend du diamètre des fibres et des caractéristiques du média, ce qui n'est pas pris en compte dans la simulation numérique. La vitesse à l'interface média-fluide obtenue par les simulations numériques ne constitue qu'une approximation de la vitesse locale de filtration. Quant au produit $\bar{u}h$ (Équation 52), il est directement lié à la vitesse locale de filtration. C'est l'évolution de ce terme que nous allons utiliser pour investiguer l'évolution de la vitesse de filtration.

La Figure 46 et la Figure 47 représentent les évolutions du produit $\bar{u}h$ obtenues avec ANSYS CFX® puis avec GeoDict® en fonction de la position x dans le pli pour trois valeurs de la vitesse moyenne de filtration (V_f) (1,38 cm/s et 2 cm/s puis 1,8 cm/s). Elles montrent que l'évolution de ce terme, pour les trois vitesses de filtration, est linéaire en fonction de la position dans le pli. En d'autres termes, la vitesse de filtration v_f est constante le long du pli. Ainsi, en utilisant la même équation et en écrivant $v_f(x) = cte = V_f$, on peut écrire une relation simple pour la vitesse moyenne de l'air au sein du pli :

$$\bar{u}(x) = \frac{-2V_f x + \overline{u(0)}h(0)}{h(x)} \quad \text{Équation 54}$$

Le produit $\overline{u(0)}h(0)$ peut ensuite être exprimé en fonction de la vitesse de filtration.

$$\overline{u(0)}h(0) = \bar{u}(0)p = 2V_f \sqrt{\frac{p^2}{4} + L^2} \sim 2V_f L \quad \text{Équation 55}$$

Ainsi, on obtient :

$$\bar{u}(x) \sim \frac{2V_f(L - x)}{h(x)} \quad \text{Équation 56}$$

On remarque que cette expression est simple, validée numériquement et expérimentalement et ne nécessite que la connaissance de la vitesse moyenne de filtration qui est un paramètre défini par l'utilisateur.

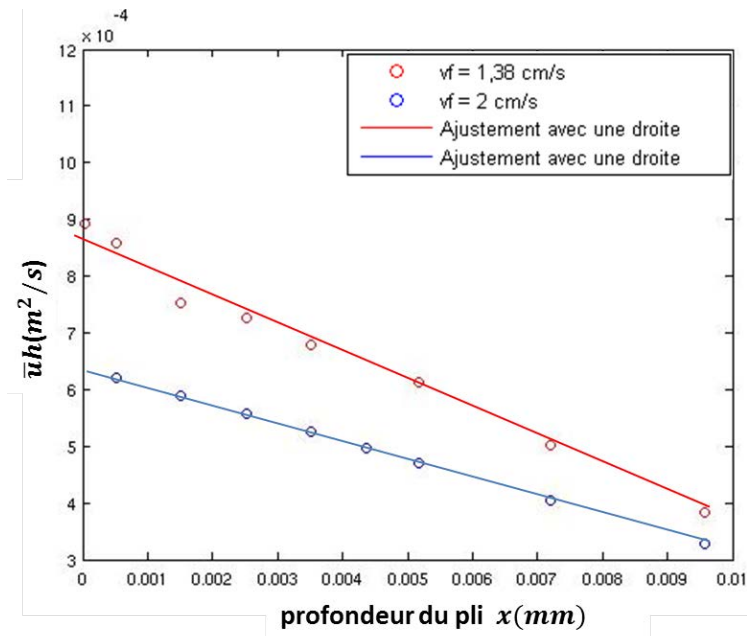


Figure 46 : évolution du débit surfacique $\bar{u}h$ le long du pli pour deux vitesses moyennes de filtration obtenu avec ANSYS CFX® ($V_f = 1,38$ cm/s et $V_f = 2$ cm/s)

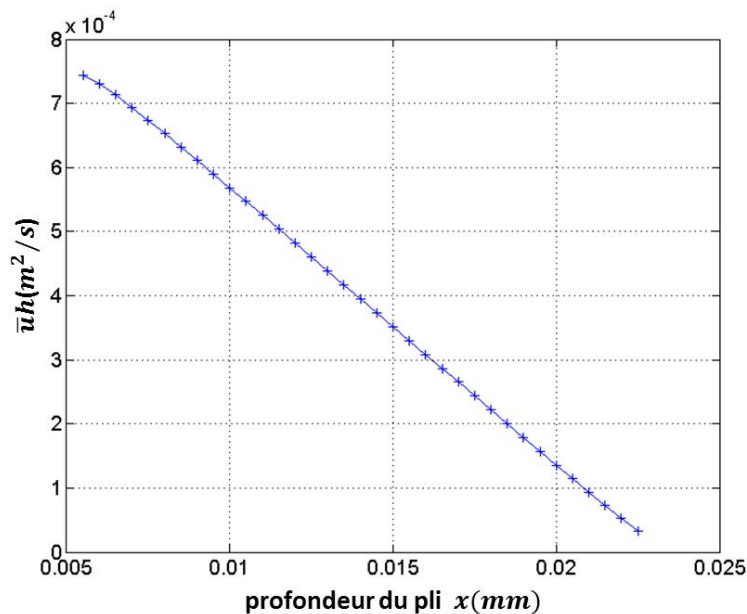


Figure 47 : évolution du débit surfacique $\bar{u}h$ à différentes profondeurs dans le pli (GeoDict®) pour une vitesse moyenne de filtration de 1,8 cm/s

5.2.2. Détermination de la fonction f

Après la détermination de la vitesse moyenne d'air dans le pli, l'étape suivante est la détermination de la fonction f . L'approche utilisée est mathématique et repose sur la résolution des équations de Navier-Stokes. C'est l'équation NS qui régit l'écoulement d'air au sein du pli sous sa forme incompressible et en régime permanent. Tous les termes sont considérés :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \text{grad} \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} P + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V} \tag{Equation 57}$$

Soit $x \in [0, L]$, $\forall y \in [y_1(x), y_2(x)]$ on a :

- $P(x, y) = P(x)$: la pression est uniforme sur une section du pli
- $\vec{V}(x, y) = u(x, y)\vec{e}_x + v(x, y)\vec{e}_y$
- $u(x, y) = \bar{u}(x) \times f\left(\frac{y_1(x)-y}{h(x)}\right)$

En utilisant l'équation de la conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{Équation 58}$$

La composante orthogonale de la vitesse v s'écrit sous la forme :

$$v(x, y) = \int_0^y \left[-\frac{d\bar{u}}{dx} f\left(\frac{y_1 - y}{h}\right) - \bar{u} \frac{(y_1' h - h'(y_1 - y))}{h^2} f'\left(\frac{y_1 - y}{h}\right) \right] dy \quad \text{Équation 59}$$

Notons que $\forall x, v(x, 0) = 0$, en remplaçant u et v par leurs expressions dans l'équation de NS (Équation 57) et en projetant sur \vec{e}_y . Le gradient de pression s'annule parce que la pression ne dépend que de x , ainsi on peut écrire :

$$\begin{aligned} & \left(\bar{u} \frac{h'}{h} y \frac{d\bar{u}}{dx} - \bar{u} h' \frac{d\bar{u}}{dx} \right) f^2\left(\frac{y}{h}\right) + \left(-\bar{u} \frac{d^2\bar{u}}{dx^2} - \bar{u} \frac{h'}{h} \frac{d\bar{u}}{dx} + h \left(\frac{d\bar{u}}{dx}\right)^2 \right) f\left(\frac{y}{h}\right) \int_0^y f\left(\frac{t}{h}\right) dt \\ & + \bar{u}^2 \frac{h'^2}{h^3} f f' \left(\frac{y}{h}\right) - \bar{u} \frac{h'}{h^2} \frac{d\bar{u}}{dx} f' \left(\frac{y}{h}\right) - \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{d^3\bar{u}}{dx^3} - 2 \frac{h'}{h} \frac{d^2\bar{u}}{dx^2} \right) \int_0^y f\left(\frac{t}{h}\right) dt \\ & - \frac{2\mu h' y}{\rho h} \frac{d^2\bar{u}}{dx^2} f\left(\frac{y}{h}\right) + \frac{\mu y^2 h'^2}{\rho h^3} \frac{d\bar{u}}{dx} + \frac{\mu d\bar{u}}{\rho dx} f' \left(\frac{y}{h}\right) - \frac{\mu \bar{u} h'}{\rho h^3} f'' \left(\frac{y}{h}\right) = 0 \end{aligned} \quad \text{Équation 60}$$

On obtient l'équation dont les inconnues sont $f, \int f, f', f''$. En s'inspirant des travaux théoriques déjà réalisés et présentés précédemment, notamment ceux de Terrill (1982) où il propose une solution analytique de l'écoulement dans un conduit à parois poreuses. On propose une solution s'écrivant sous la forme :

$$f(x) = \sum_{n \geq 0} a_n (x - a)^{2n} \exp((x - a)^{2n}) \quad \text{Équation 61}$$

Où $(a_n)_{n \geq 0}$ est une suite d'éléments qui reste à déterminer. En remplaçant l'expression de f par l'Équation 61 dans l'Équation 60, on vérifie qu'en effet f représente une solution et une relation de récurrence entre les termes de la suite $(a_n)_{n > 0}$, apparait :

$$\frac{a_{n+1}}{a_n} = \frac{\tau \sin(\beta n + \gamma)}{n^4} \quad \text{Équation 62}$$

ainsi on a $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$, c'est une suite tendant vers 0. Seuls les seize premiers termes seront utilisés dans la représentation de cette suite ($n = 16$).

Notons que suivant ce raisonnement, l'unicité de la solution n'est pas démontrée. τ, β, γ sont des constantes et ne dépendent ni de la vitesse de filtration ni de la géométrie du filtre, néanmoins ils sont propres aux filtres THE (cf. Annexe III).

5.2.3. Détermination de la vitesse globale

En utilisant l'Équation 61 et en remplaçant par la vitesse moyenne $\overline{u(x)}$ et la fonction f , la composante longitudinale de la vitesse peut être écrite sous la forme :

$$u(x, y) = \frac{2v_f(L-x)}{h(x)} \sum_{n \geq 0} a_n \left(\frac{y_1(x) - y}{h(x)} - a \right)^{2n} \exp \left(\left(\frac{y_1(x) - y}{h(x)} - a \right)^{2n} \right) \quad \text{Équation 63}$$

Pour le calcul de la deuxième composante de la vitesse, on utilise l'équation de continuité, on a (en prenant en compte que $\forall x \in [0, L], v(x, 0) = 0$) :

$$v(x, y) = \int_0^y \left[-\frac{d\bar{u}}{dx} f \left(\frac{y_1 - y}{h} \right) - \bar{u} \frac{(y_1' h - h'(y_1 - y))}{h^2} f' \left(\frac{y_1 - y}{h} \right) \right] dy \quad \text{Équation 64}$$

Avec

$$f'(x) = \sum_{n \geq 1} 2na_n (x - a)^{2n-1} \exp \left((x - a)^{2n} \right) (1 + (x - a)^{2n}) \quad \text{Équation 65}$$

La Figure 48 représente l'évolution de la composante longitudinale de la vitesse adimensionnée par la vitesse moyenne (f). La comparaison de ce profil avec un profil issu d'ANSYS CFX® nous permet de conclure que ce modèle approxime relativement bien la vitesse longitudinale.

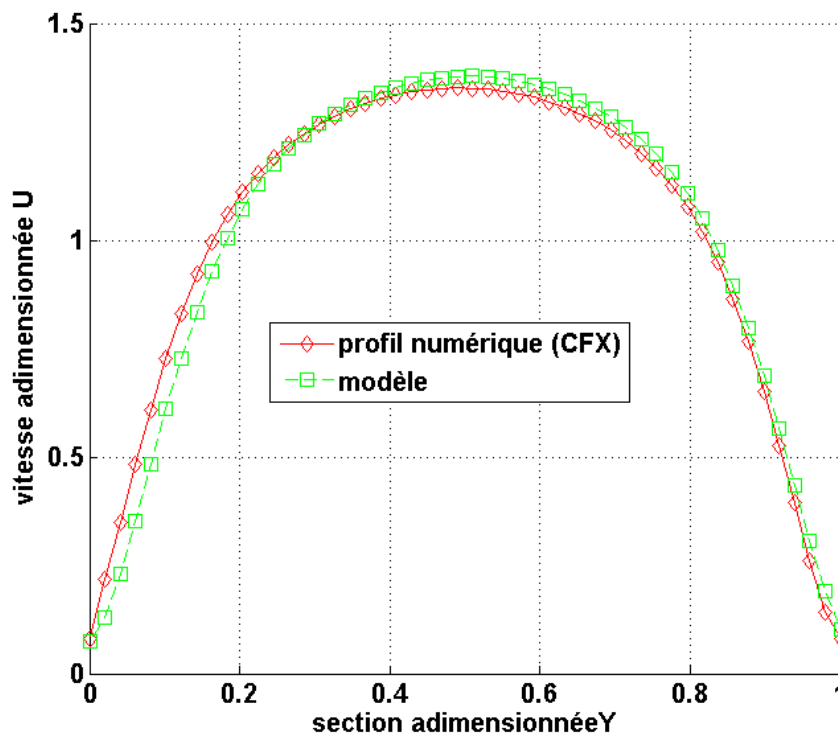


Figure 48 : comparaison entre le profil numérique (U) issu d'ANSYS CFX® et du modèle sur une section à 8 mm de l'entrée du pli et pour une vitesse nominale de filtration

Sur la Figure 49, la deuxième composante v de la vitesse est représentée. La comparaison réalisée montre un bon accord entre le modèle théorique et les résultats numériques. Notons que la forme du profil ne présente que deux points d'inflexion au lieu de quatre pour les écoulements dans des conduits non poreux à sections variables.

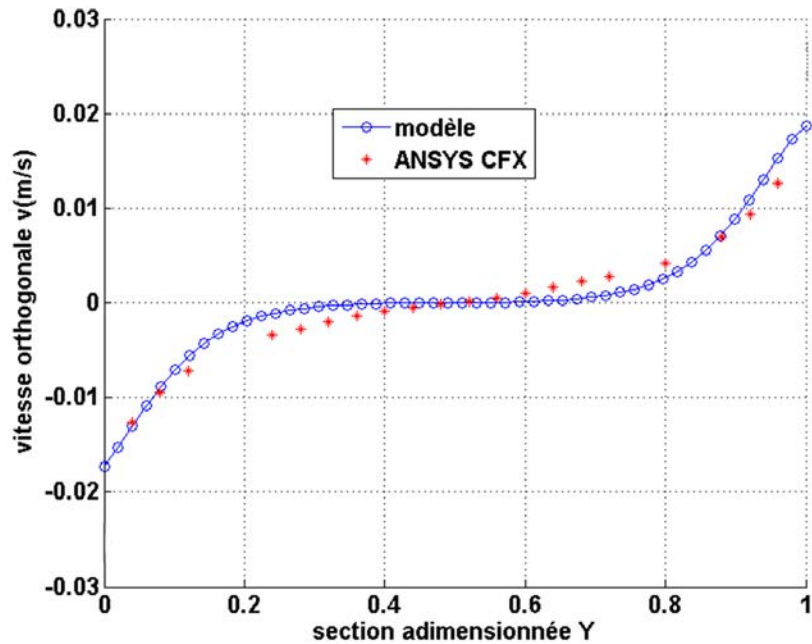


Figure 49 : comparaison entre la vitesse orthogonale v issue d'ANSYS CFX® et du modèle sur une section à 8 mm de l'entrée du pli et pour une vitesse nominale de filtration

La Figure 50 résume tous les travaux réalisés sur l'écoulement d'air au sein des filtres plissés. Elle représente une comparaison, sur une section du pli, des profils numérique, expérimental, et théorique.

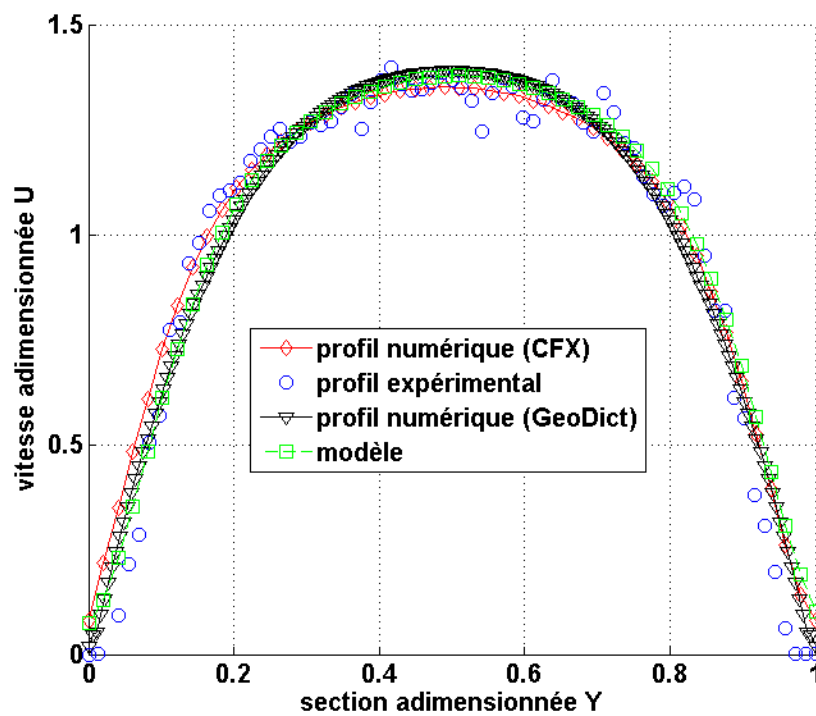


Figure 50 : comparaison des profils longitudinaux de vitesse (U) issus de GeoDict® (en noir), d'ANSYS CFX® (en rouge), du modèle théorique (en vert) et de l'expérience

5.3. Modélisation de la perte de charge à travers un pli

5.3.1. Hypothèses du modèle

L'écoulement d'air dans un pli de filtre génère une perte de charge. Elle se traduit par une diminution de la pression d'air entre l'amont et l'aval du pli et résulte de deux contributions :

- l'écoulement d'air dans le média : dans la plage des nombres de Reynolds considérée, cette contribution est modélisée par une loi de Darcy :

$$\Delta P_d = \frac{\mu e}{k} V_f \quad \text{Équation 66}$$

avec μ la viscosité dynamique d'air ($Pa.s$), k la perméabilité constante le long du pli, e l'épaisseur du média et V_f la vitesse de filtration. L'épaisseur est considérée constante le long du pli.

- la perte de charge additionnelle due au plissage du média (ΔP_f) : en effet, la restriction de la section du canal d'écoulement engendre une perte de l'énergie qui se traduit par une perte de pression le long du pli ; c'est cette contribution que l'on cherche à modéliser.

Pour mettre en évidence cette décomposition de perte de pression, à l'aide du code de calcul ANSYS CFX®, une simulation numérique du champ de pression à travers le pli a été réalisée pour une vitesse moyenne de filtration de 2,4 cm/s. L'évolution de la pression sur une section médiane traversant le pli, est représentée sur la Figure 51-a). On constate qu'effectivement la pression diminue en allant vers le fond du pli à cause de la contraction de l'écoulement (canal d'écoulement cf. Figure 51-b) avant de chuter brutalement au sein du média (cf. Figure 51-c).

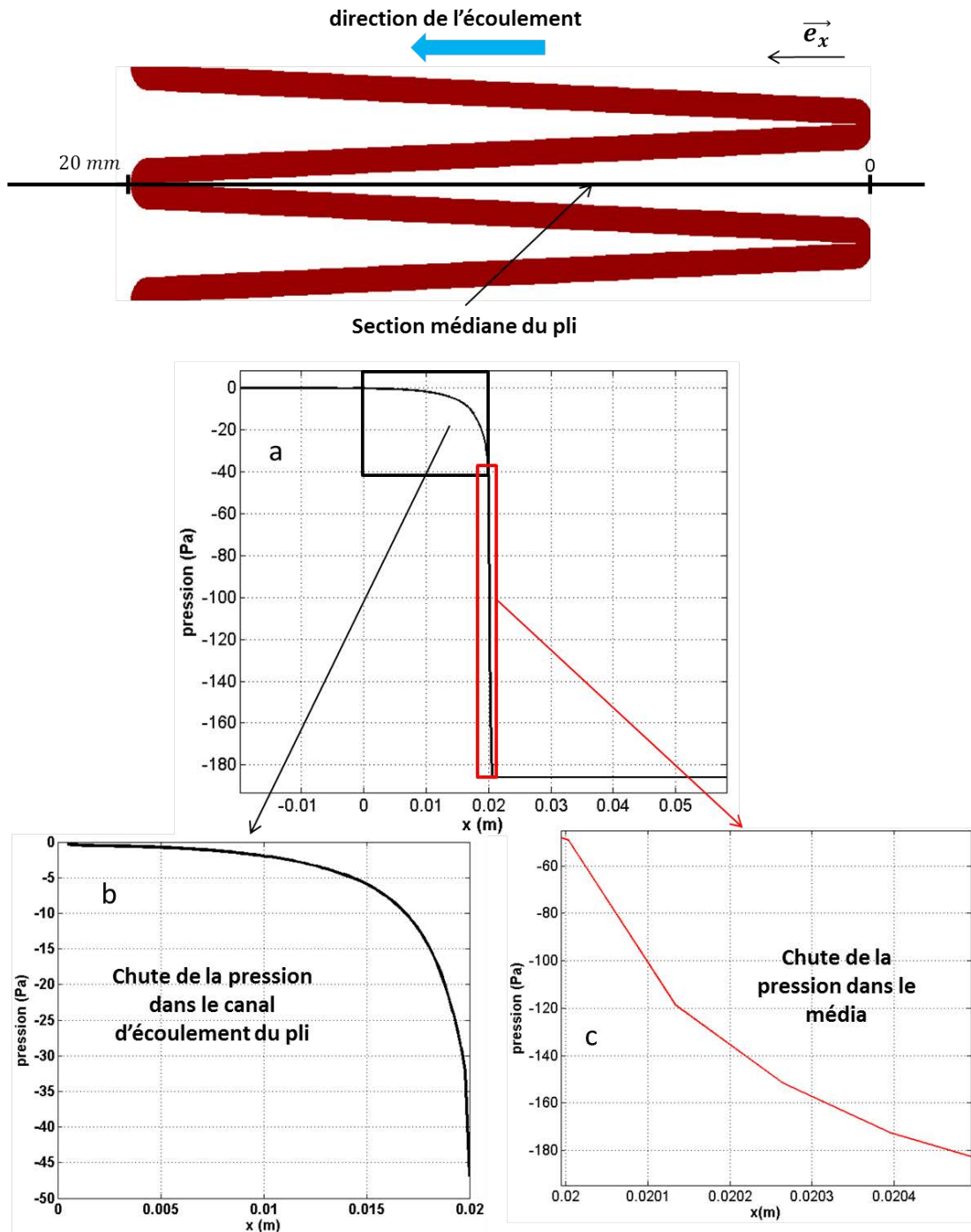


Figure 51 : évolution de la pression sur une section médiane du pli obtenue avec ANSYS CFX® : (a) sur la totalité de la section médiane, (b) dans le canal d'écoulement, (c) au sein du média

Ainsi, la perte de charge du pli est égale à :

$$\Delta P = P_a - P_v = (P_a - P_i) + (P_i - P_v) = \Delta P_f + \Delta P_d \quad \text{Équation 67}$$

Avec P_a la pression de l'air en entrée du pli, P_i la pression de l'air avant son entrée dans le média et P_v la pression de l'air à la sortie du pli (cf. Figure 52)

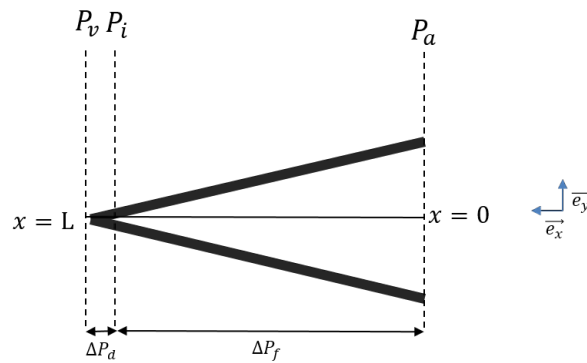


Figure 52 : schéma explicatif des grandeurs de pression considérées

La perte de charge provenant des frottements d'air avec le média (perte de charge régulière) est négligée à cause de la faible longueur du pli (2 cm). Elle peut être écrite sous la forme

$$\Delta P_r = C \frac{L \rho v_i}{p} \frac{v_i}{2} \quad \text{Équation 68}$$

avec C coefficient de perte de charge. L est la longueur du pli, p est le pas du pli, ρ est la masse volumique d'air, v_i est la vitesse en entrée du pli. Pour une vitesse nominale de filtration cette perte de charge est égale à $0,3 P_a$ et peut donc être négligée. On considère que la pression de l'air n'est pas modifiée en amont et en aval du pli. Ceci est illustré sur la Figure 51-a) où on peut constater une pression constante en amont et en aval du pli.

5.3.2. Caractéristiques du fond de pli

Les caractéristiques (géométrie et perméabilité) du fond du pli constituent les paramètres sensibles dans les modèles de perte de charge numériques (qui le prennent en compte) (Cheng et al., 2013, Rebaï et al., 2010). A cause du processus industriel du plissage du média, le fond du pli n'est pas exactement en forme de V (Bouilloux, 2006).

Afin de caractériser la géométrie du fond de pli, nous avons eu recours à la tomographie. Le même dispositif utilisé pour maintenir les plis du filtre THE a été fabriqué en plexiglass pour permettre une visualisation tomographique. Cette démarche a été réalisée grâce à une collaboration avec la société Novitom. La taille du pixel est de l'ordre de $10 \mu\text{m}$ et permet d'obtenir une représentation assez fine de la géométrie du fond de pli. La Figure 53 représente une coupe tomographique du fond de pli. Le fond de pli n'est pas en forme de V mais plus en forme de U.

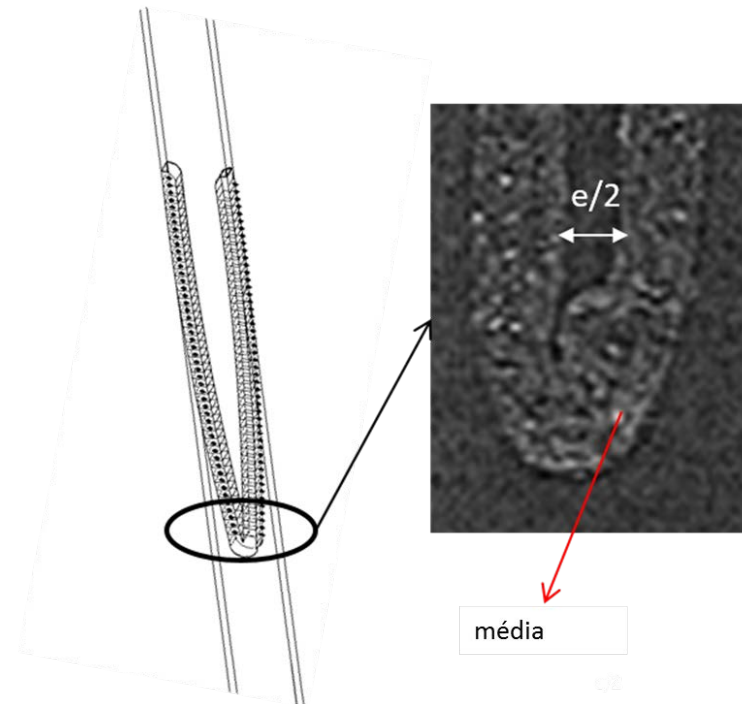


Figure 53 : micro-tomographie du fond de pli

Bourrous (2016) a développé une méthode permettant de mesurer la compacité du média THE. Il a réalisé des clichés en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB) muni de détecteurs EDX. En analysant l'élément chimique du silicium, principal constituant du média, il obtient des images précises du média. La Figure 54 représente une image obtenue du fond de pli THE en utilisant cette méthode. On constate également que le fond de pli est en forme de U.

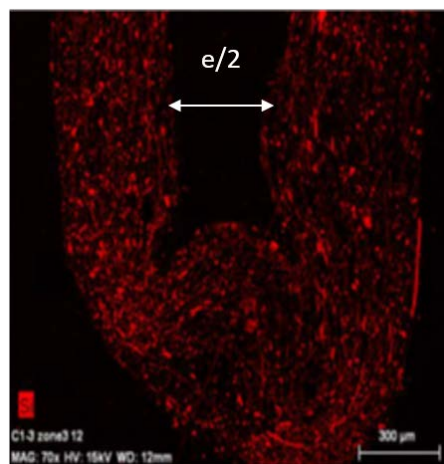


Figure 54 : image MEB de l'élément silicium d'un fond de pli de filtre THE (Bourrous, 2014)

Pour prendre en compte cette caractéristique géométrique du fond de pli deux possibilités existent :

- considérer une valeur non nulle pour l'écartement du pli en $x = L$;
- considérer une longueur effective du pli inférieure à la valeur réelle $L_{eff} < L$.

C'est la deuxième possibilité qu'on utilisera dans ces travaux. Après traitement de cartographies MEB de fond de pli en média THE (élément silicium caractéristique du média), il

a été constaté que l'écartement du pli o_{THE} au fond du pli est proche de la moitié de l'épaisseur du média :

$$o_{THE} = \frac{e_{THE}}{2} \quad \text{Équation 69}$$

En exploitant la géométrie du pli du filtre (Figure 55), on obtient:

$$\frac{e/2}{p} = \frac{L - L_{eff}}{L} \quad \text{Équation 70}$$

Ce qui donne :

$$L_{eff} = L \left(1 - \frac{e}{2p} \right) \quad \text{Équation 71}$$

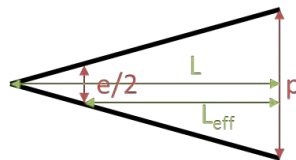


Figure 55 : schématisation de la longueur effective

5.3.3. Représentativité du filtre complet

Le modèle développé vise à calculer la perte de charge d'un filtre complet, Néanmoins, dans notre démarche de modélisation, nous avons considéré un pli unique dont l'écoulement se fait vers le fond (pli d'entrée), alors que dans un filtre complet, l'écoulement se fait aussi dans le sens inverse : du fond du pli vers son entrée (pli de sortie) (cf. Figure 56).

Afin de caractériser l'écoulement dans l'autre sens du pli (pli de sortie) nous avons volontairement choisi, sur le plan expérimental et numérique, de considérer un élément du filtre contenant un pli dont l'écoulement se fait vers le fond, avec deux demi-plis de part et d'autres (formant ainsi un pli d'entrée et deux plis de sortie) et donc de prendre en compte l'écoulement dans les deux sens.

En utilisant la simulation numérique du champ de pression réalisée dans le paragraphe 5.3.1, l'évolution de la pression sur une section médiane d'un pli de sortie est tracée sur la Figure 57 et comparée avec celle d'un pli d'entrée.

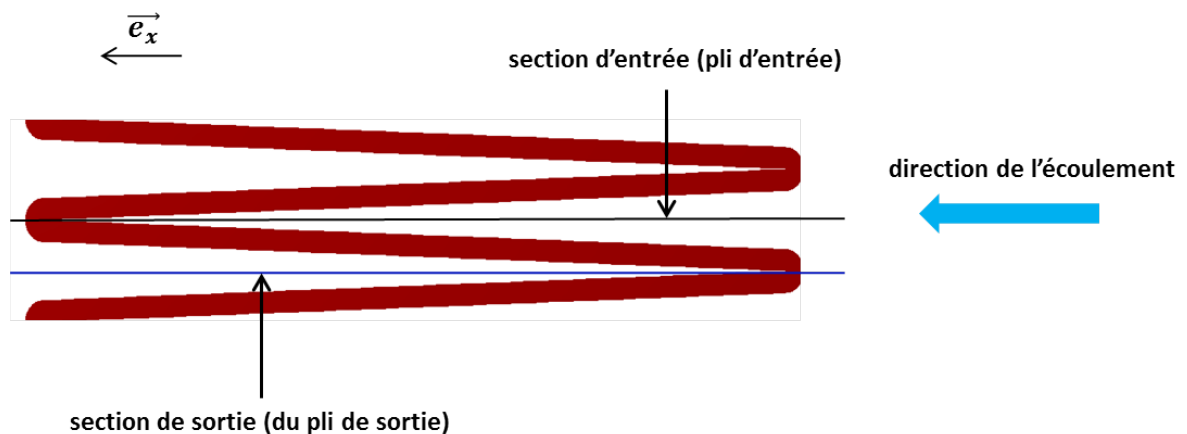


Figure 56 : Schéma explicatif des plis d'entrée et de sortie par rapport à la direction de l'écoulement

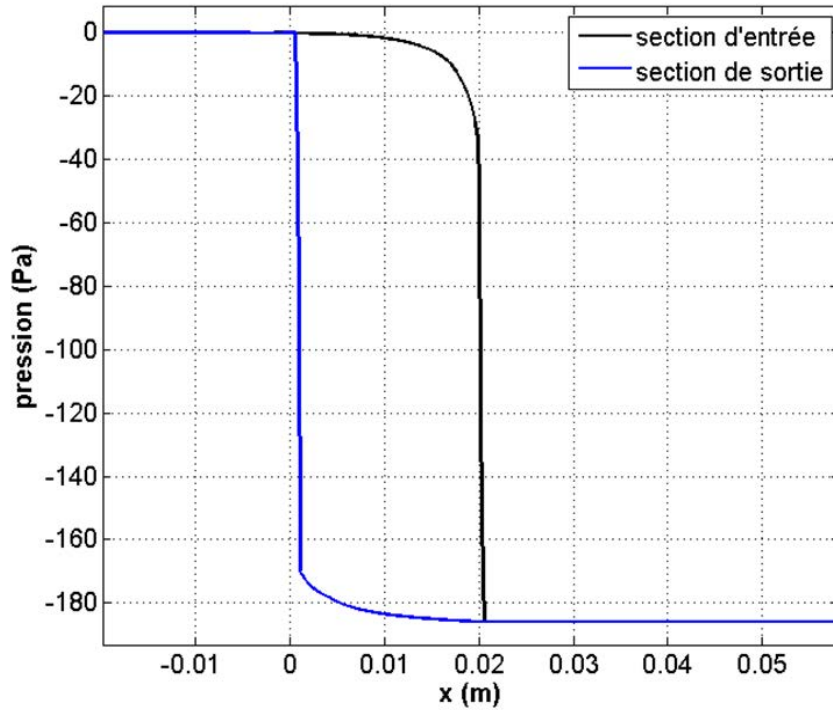


Figure 57 : évolution de l'évolution de la pression le long de la section d'entrée et de sortie (ANSYS CFX®)

Ainsi, on peut constater que l'écoulement dans le sens inverse (pli de sortie) génère aussi une perte de pression dont la valeur est égale à celle engendrée par un pli d'entrée. En conséquence, le calcul de la perte de charge d'un filtre plissé THE revient au calcul de la variation de pression à travers un pli unique dont l'écoulement se fait vers le fond. Notre démarche de modélisation est donc validée.

5.3.4. Principe du modèle

On considère une surface de contrôle S_c comprise entre x et $x + dx$ délimitée par les traits pointillés rouges (Figure 58). Pour un écoulement stationnaire, le principe de conservation de la quantité de mouvement (en 2D) donne :

$$\frac{d}{dt} \iint_S \rho \vec{V} dS = \int_{1+2+3+4} \rho \vec{V} \vec{n} dl \tag{Equation 72}$$

Avec \vec{V} le vecteur de vitesse d'air et ρ sa masse volumique.

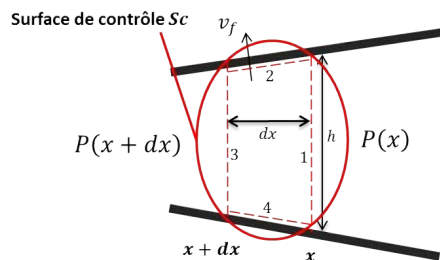


Figure 58 : schématisation de la surface de contrôle S_c utilisée dans le modèle

La dérivée particulière de la quantité de mouvement de S_c correspond à la résultante des forces \vec{T} subies par S_c . L'air contenu dans S_c est principalement sujet à des forces de pression. En amont (x), la pression subie par S_c contribue à l'écoulement. Quant à l'aval ($x + dx$), S_c subit

une contre poussée. La résultante des forces appliquées à Sc projetée sur la direction de l'écoulement par unité de longueur peut être écrite sous forme de :

$$\vec{T} \cdot \vec{e}_x = P(x + dx)h(x + dx) - P(x)h(x) \quad \text{Équation 73}$$

Sachant que :

$$\vec{T} \cdot \vec{e}_x = \int_{1+2+3+4} \rho \vec{V} \vec{V} \vec{n} dl \cdot \vec{e}_x \quad \text{Équation 74}$$

En décomposant l'intégrale de l'Équation 74 et en remplaçant la vitesse par son expression (Équation 63) dans chaque limite de la surface de contrôle, il vient alors :

$$P(x + dx) = \frac{1}{h(x + dx)} \left[P(x)h(x) - \rho \bar{u}^2(x) \int_{y_0(x)}^{y_1(x)} f^2 \left(\frac{y_1(x) - y}{h(x)} \right) dy \right. \\ \left. + \rho \bar{u}^2(x + dx) \int_{y_0(x+dx)}^{y_1(x+dx)} f^2 \left(\frac{y_1(x+dx) - y}{h(x + dx)} \right) dy + 2\rho \bar{u}(x) V_f f(0) dx \right] \quad \text{Équation 75}$$

L'Équation 75 représente une relation entre $P(x)$ et $P(x + dx)$. L'utilisation d'une boucle itérative de $x = 0$, jusqu'à $x = L_{eff}$, avec un pas de discrétisation de :

$$dx = \frac{L}{100} \quad \text{Équation 76}$$

permet d'obtenir la pression en $x = L_{eff}$. Ainsi la perte charge due au plissage peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta P_f = P(x = 0) - P(x = L_{eff}) \quad \text{Équation 77}$$

Cette perte de charge ne dépend pas de la pression en entrée ($P(x = 0)$), seule la différence de pression nous intéresse, on prend :

$$P(x = 0) = 0 \quad \text{Équation 78}$$

Finalement la perte de charge est calculée en utilisant l'Équation 67.

5.4. Conclusion

La perte de charge initiale d'un filtre plissé THE est la somme de la perte de charge du média et celle due à son plissage. Cette dernière est engendrée par les frottements des particules fluides entre elles lors de l'écoulement d'air à travers le canal d'écoulement du pli.

Un modèle analytique de l'écoulement d'air a été développé et validé par les codes de calcul validés auparavant, puis en se basant sur un modèle itératif, la pression au fond du pli a pu être calculée.

Le modèle de perte de charge a été développé pour un pli unique, sa validation à l'échelle du filtre reste une étape indispensable. Dans la suite, nous utiliserons des données expérimentales de perte de charge de filtres plissés déterminées lors de cette étude ou issues de la littérature pour valider ce modèle.

6. VALIDATION DU MODELE A L'ECHELLE DU FILTRE

6.1. Validation à l'échelle d'un filtre THE

6.1.1. Installation CATFISH

Le banc expérimental CATFISH disponible à l'IRSN (Caractérisation Analytique de la Filtration sous Humidité de filtres THE à petits plis) a été conçu pour une description analytique de la filtration sous humidité des filtres THE plissés et plans. Ce banc permet de contrôler et réguler un débit allant de 30 à 200 m^3/h , une température, de 8 à 100 °C et une humidité de 0% au point de saturation (selon la température considérée). La Figure 59 représente une description de ce banc expérimental. La perte de charge au niveau du filtre testé est enregistrée en continu. Le débit traversant le filtre est mesuré avec un débitmètre à ultrasons.

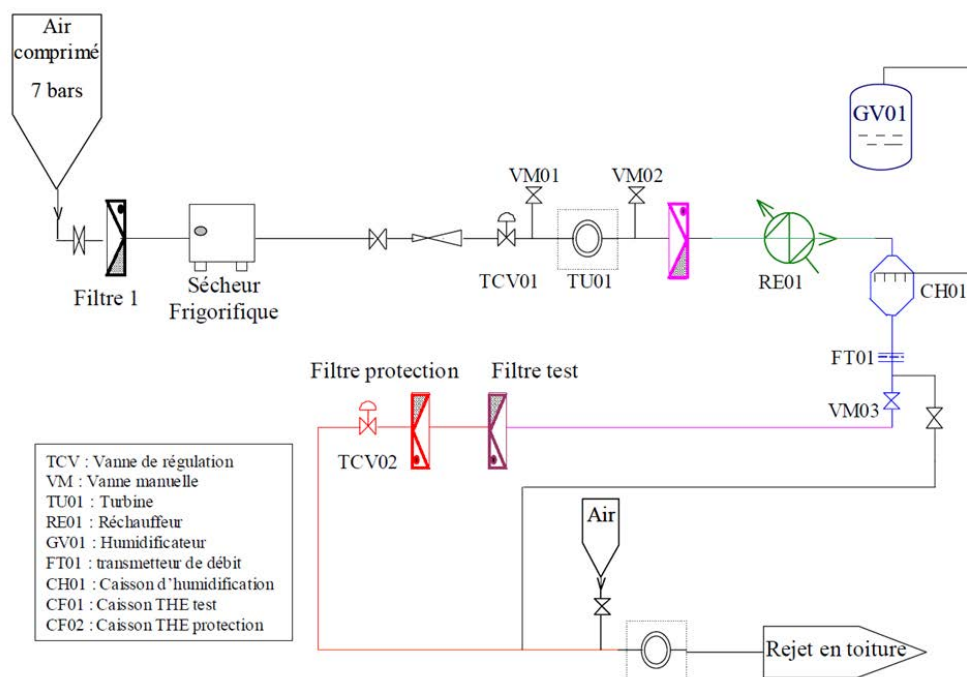


Figure 59 : schématisation du banc expérimental CATFISH (Joubert, 2009)

6.1.2. Essai et comparaison

En utilisant l'installation expérimentale CATFISH, des mesures expérimentales de l'évolution de la perte de charge initiale du filtre THE en fonction de la vitesse de filtration ont été réalisées. Les caractéristiques du filtre utilisé sont résumées dans le Tableau 4.

La Figure 60 présente une comparaison entre les valeurs expérimentales de perte de charge et les valeurs issues du modèle dans la gamme [0 – 15 cm/s]. On constate que les résultats théoriques (issus du modèle) sous-estiment légèrement les valeurs expérimentales.

L'incertitude représentée sur la Figure 60 ne prend en compte que les incertitudes relatives aux instruments de mesures. Néanmoins, pour un filtre plissé, la perte de charge initiale peut varier d'un filtre à un autre. Cet écart peut être expliqué par le fait que :

- Les filtres sont fabriqués en grande partie manuellement ainsi, la quantité de lut mise en place dans chaque filtre peut sensiblement varier modifiant, par conséquent, la surface de filtration.

- Les caractéristiques du média (compacité, diamètre des fibres) peuvent évoluer au sein du média d'un filtre et modifier donc, la perte de charge initiale du filtre.

Joubert (2009) a mesuré l'incertitude relative à la dispersion des valeurs de perte de charge initiale de filtre THE pour une vitesse de filtration de 2,38 cm/s, elle trouve :

$$\Delta P_0 = 235 \pm 6 \text{ Pa}$$

Équation 79

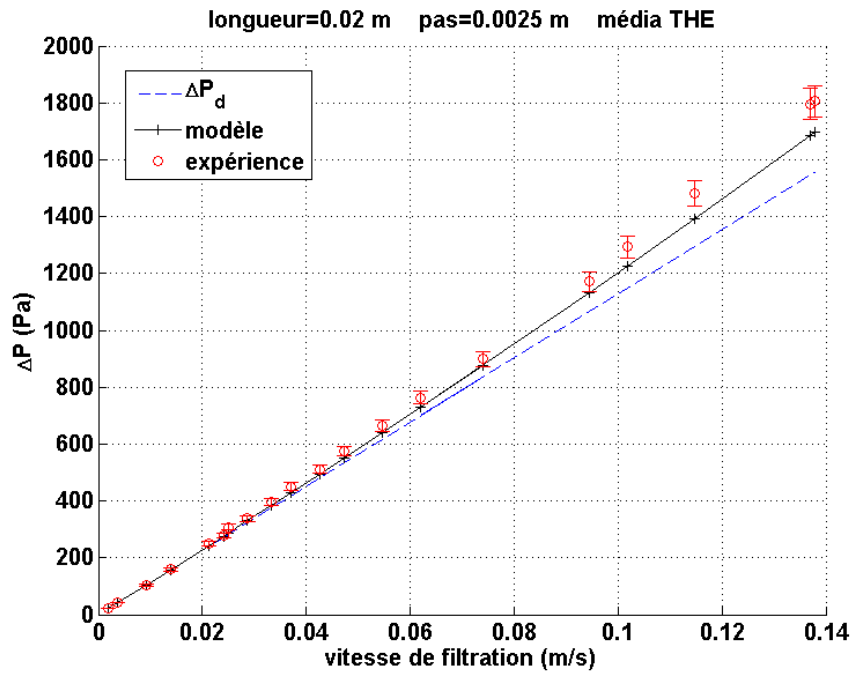


Figure 60 : comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales pour un filtre THE (CAMFIL) avec $L = 20 \text{ mm}$, $p = 2,5 \text{ mm}$. En noir le modèle, en rouge les résultats expérimentaux, en bleu la perte de charge du média seul (ΔP_d)

La Figure 61 représente la même comparaison que celle réalisée sur la Figure 60 en considérant que l'incertitude relative à la dispersion des valeurs de la perte de charge initiale évolue linéairement avec la vitesse de filtration. En utilisant cette incertitude, les valeurs théoriques de perte de charge sont en bon accord avec les valeurs expérimentales.

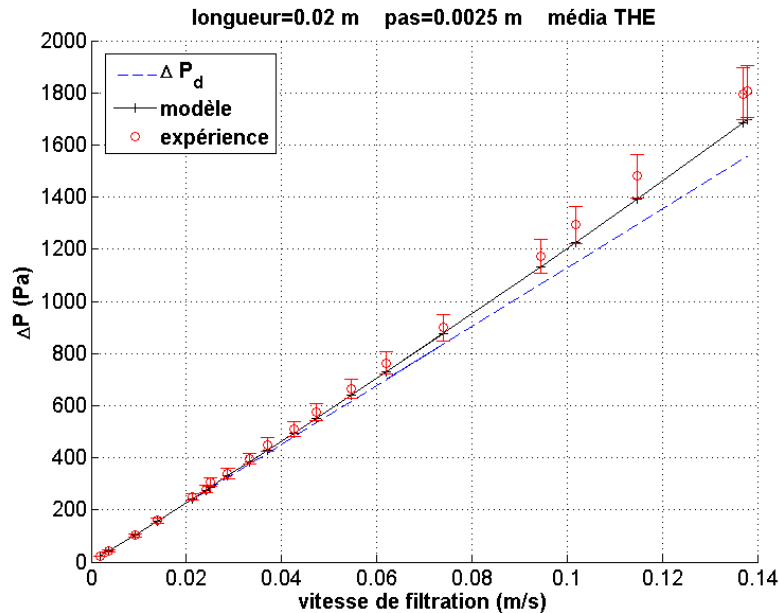


Figure 61 : comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales pour un filtre THE (CAMFIL) avec $L = 20 \text{ mm}$, $p = 2,5 \text{ mm}$, en prenant en compte la dispersion des valeurs initiales de pertes de charge. En noir le modèle, en rouge les résultats expérimentaux, en bleu la perte de charge du média seul (ΔP_d)

6.1.3. Validation à l'échelle de filtres THE avec des données de la littérature

Afin de tester les performances du modèle de perte de charge sur une gamme plus large de filtres THE, des données de la littérature sont utilisées. Del Fabbro (2001) a réalisé des mesures de perte de charge initiale de divers filtres plissés THE avec des géométries de pli différentes en faisant varier la vitesse de filtration. Les filtres THE utilisés sont fabriqués avec un média en fibres de verre dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 10.

Classe	THE (H14)
Média	Fibre de verre
Épaisseur du média	0,45 mm
Porosité	0,92
Perméabilité	$1,19 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$

Tableau 10 : caractéristiques du filtre étudié (Del Fabro 2001)

La Figure 62 représente une comparaison du modèle avec les valeurs expérimentales de Del Fabbro (2001). Le modèle est en parfait accord avec les données expérimentales sauf pour le cas ($L = 48 \text{ mm}$; $p = 3,5 \text{ mm}$). Dans ce dernier cas, le modèle surestime légèrement les valeurs expérimentales. À l'heure actuelle, on ne dispose plus de ce type de filtre, il est donc difficile de donner une explication au décalage ainsi constaté. Néanmoins, on peut remarquer que, pour ce type de filtre, la longueur et le pas sont maximaux (par rapport aux filtres déjà étudiés). La Figure 63 représente un diagramme de parité qui résume les résultats obtenus pour les filtres THE. Sauf pour le cas $L = 48 \text{ mm}$; $p = 3,5 \text{ mm}$, toutes les valeurs sont comprises dans le domaine $\pm 5 \%$.

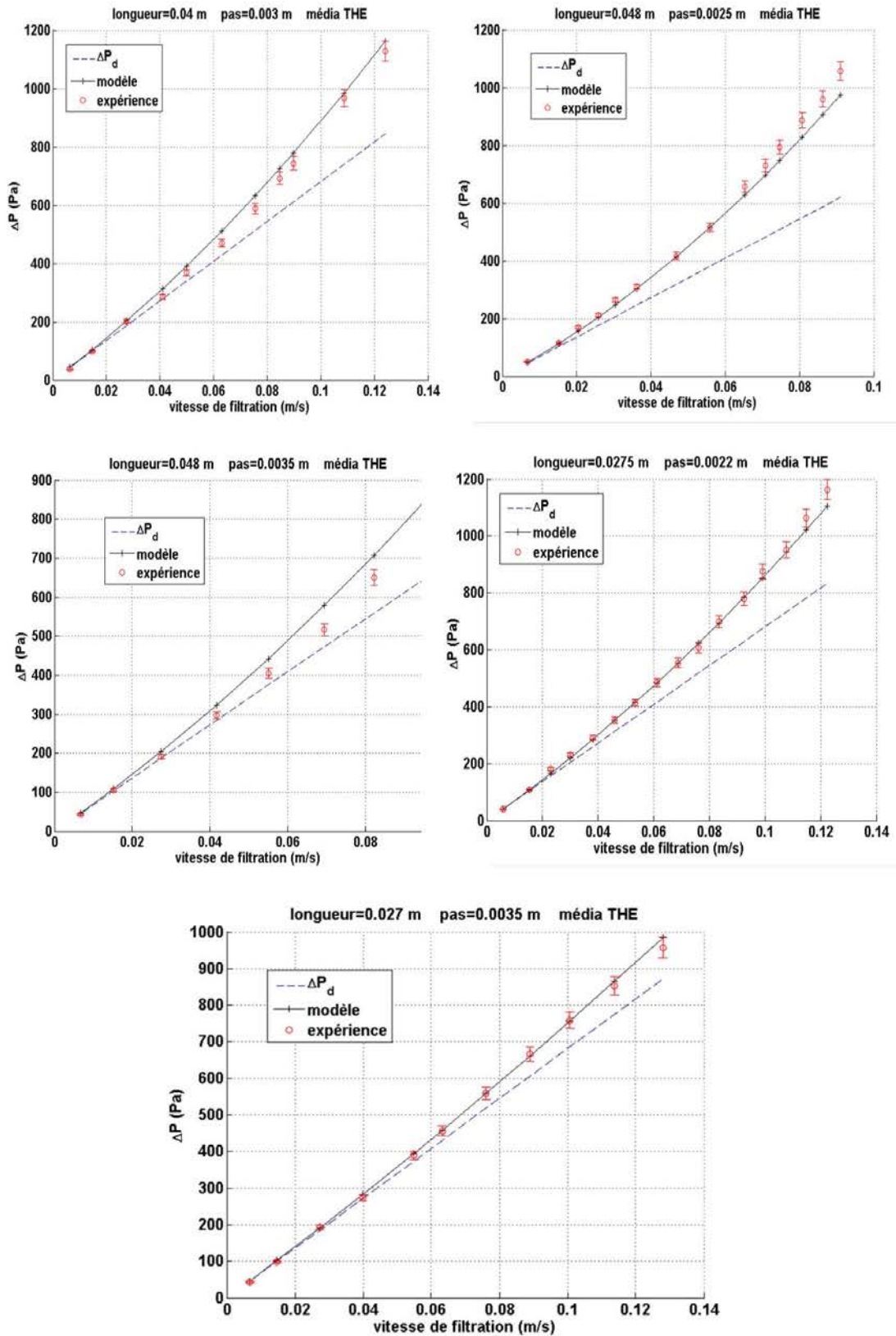


Figure 62 : comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales pour des filtres THE (CAMFIL) de géométries différentes. En noir le modèle, en rouge les résultats expérimentaux, en bleu la perte de charge du média seul (ΔP_d)

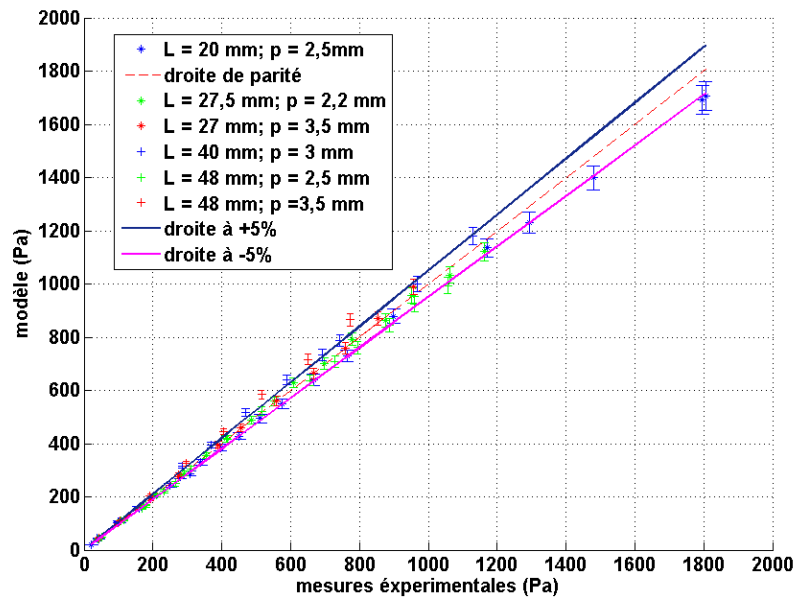


Figure 63 : diagramme de parité du modèle appliqué aux filtres THE

6.2. Extension du modèle à des filtres à moyenne efficacité

6.2.1. Application du modèle à des filtres ME

Le modèle de perte de charge a été développé pour les filtres THE en fibres de verre utilisés dans les installations nucléaires françaises dit « à petits plis ». Il a été montré dans le paragraphe précédent que ce modèle donnait de bons résultats pour des plis de caractéristiques différentes mais avec le même média fibreux. Afin d'étendre la validation du modèle de perte de charge initiale, nous l'appliquerons à des filtres à moyenne efficacité dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 11 :

Classe	ME
Média	Cellulose
Épaisseur du média	0,55 mm
Porosité	0,88
Perméabilité	$3,76 \cdot 10^{-11} m^2$

Tableau 11 : caractéristiques des filtres à moyenne efficacité (ME)

Les médias ME sont plus perméables que ceux utilisés pour la fabrication des filtres THE, l'écartement du fond de pli n'est donc pas le même que celui des filtres THE. On suppose que dans le cas des filtres ME, le fond du pli est aussi sous forme de U et que son ouverture par rapport à celle des filtres THE est liée aux racines des perméabilités (prises comme longueur caractéristique) :

$$o_{ME} = o_{THE} \times \sqrt{k_{THE}/k_{ME}} \tag{Equation 80}$$

Ou o_{ME} (respectivement o_{THE}) est l'écartement du fond de pli des filtres ME (respectivement des filtres THE) et k_{ME} (respectivement k_{THE}) est la perméabilité des filtres ME (respectivement des filtres THE). Notons que pour les filtres ME, Del Fabbro (2001) a démontré que la répartition de l'écoulement est hétérogène le long du pli, ce qui se traduit par une vitesse de filtration

non constante. Ceci est en contradiction avec l'une des hypothèses du modèle. Néanmoins, comme la perte de charge est calculée en intégrant sur toute la profondeur du pli, cette hétérogénéité de l'écoulement pourrait être compensée entre l'entrée et le fond du pli (effet de lissage). C'est ce que l'on souhaite vérifier avec cette comparaison. La Figure 64 représente la comparaison du modèle avec les données expérimentales de Del Fabbro, (2001).

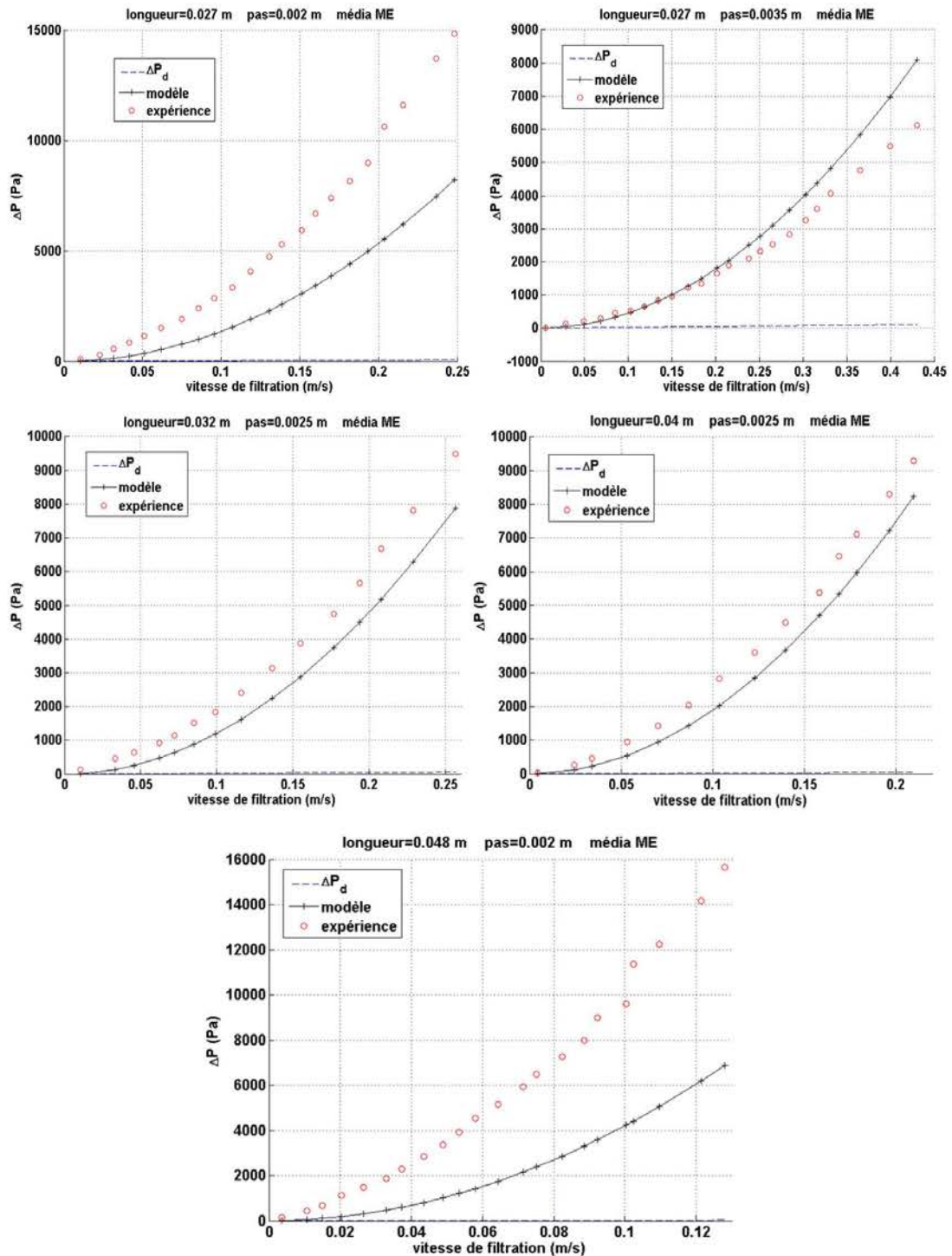


Figure 64 : comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales pour des filtres ME de géométries différentes. En noir le modèle, en rouge les résultats expérimentaux, en bleu la perte de charge du média seul (ΔP_d)

Contrairement aux filtres THE, le modèle théorique ne concorde pas parfaitement avec les mesures expérimentales, dont il est relativement éloigné pour l'ensemble des cas, surtout pour le cas ($L = 27 \text{ mm}, p = 2 \text{ mm}$) et ($L = 48 \text{ mm}, p = 2 \text{ mm}$). Cette différence peut être expliquée par deux raisons :

- la vitesse de filtration : Il est probable que l'hypothèse faite précédemment relative à la compensation de l'écoulement entre l'entrée et le fond du pli ne soit pas vérifiée (due à l'inhomogénéité de l'écoulement dans le cas des filtres ME) ;
- le fond de pli peut aussi expliquer la différence entre les valeurs expérimentales et le modèle théorique. Dans notre modèle, en se basant sur des images microscopiques de média THE en fibres de verre, l'écartement du fond de pli a été caractérisé expérimentalement puis pris égal à la moitié de l'épaisseur. Quant au comportement du fond de pli ME, il a été approximé en utilisant celui des médias THE. Une caractérisation similaire du fond de pli ME reste donc à réaliser.

La Figure 65 représente un diagramme de parité qui résume les résultats obtenus pour les filtres ME.

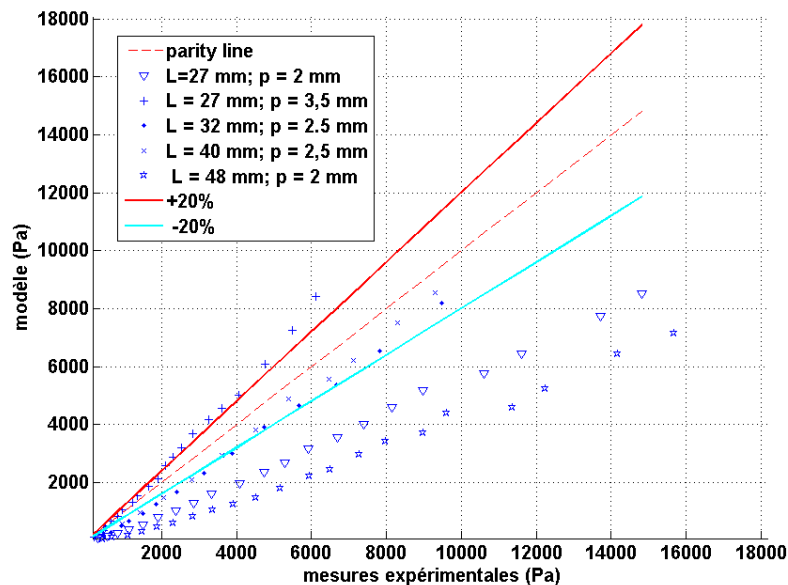


Figure 65 : diagramme de parité du modèle appliqué aux filtres ME

6.3. Étude de sensibilité

6.3.1. Filtrés THE

La géométrie et la nature du fond du pli sont des paramètres qui influencent l'évolution de la perte de charge d'un filtre vierge ou au cours de son utilisation. Dans notre cas, le fond du pli n'étant pas parfaitement triangulaire, on a considéré une largeur de fond de pli égale à $e/2$, e étant l'épaisseur du filtre. Ainsi, pour quantifier l'impact de la largeur du fond du pli sur les résultats du modèle de perte de charge, une étude de sensibilité à ce paramètre a été réalisée. Pour ce faire, on réécrit la largeur du fond du pli sous la forme e/s , avec s un paramètre pouvant varier de 1 à l'infini, sachant que pour des grandes valeurs de s , la géométrie du fond de pli tend vers un triangle parfait. Ainsi la longueur effective (Équation 71) peut se réécrire sous la forme suivante :

$$L_{eff} = L \left(1 - \frac{e}{sp} \right) \tag{Equation 81}$$

La Figure 66 représente l'évolution de la perte de charge appliqué à un filtre THE à petits plis (Tableau 10) en fonction de la vitesse de filtration pour différentes valeurs de s . Cette figure montre qu'en augmentant la valeur de s , le taux d'évolution de la perte de charge augmente aussi. On peut donc en conclure qu'un fond de pli en forme de U joue en faveur d'une diminution de la perte de charge initiale du filtre plissé THE. Ainsi, il est possible de minimiser la perte de charge initiale du filtre, tout en gardant la même surface de filtration, en formant des plis avec un fond sous forme de U.

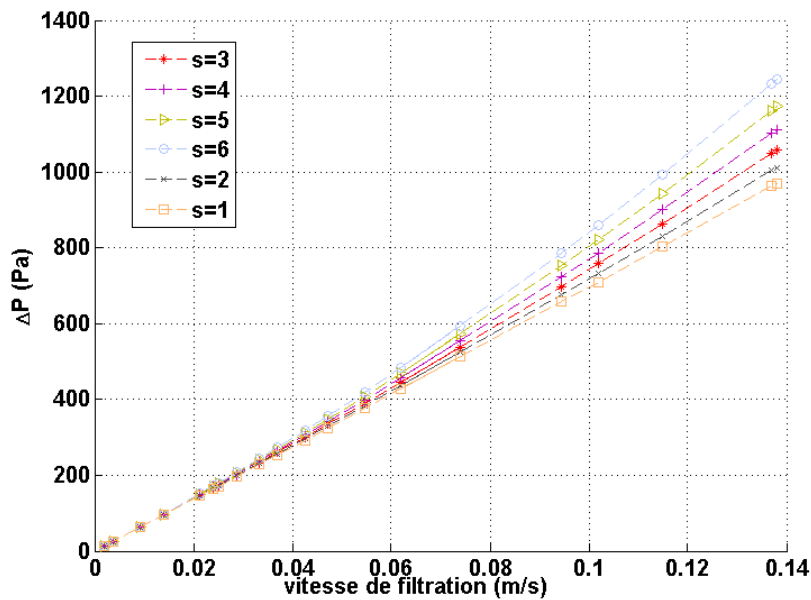


Figure 66 : évolution de la perte de charge d'un filtre THE selon le modèle développé en fonction de la vitesse de filtration pour s allant de 1 à 6

Pour quantifier l'écart entre les différentes courbes de perte de charge correspondantes à différentes valeurs de s (Figure 66), on définit pour chaque valeur de s , une erreur intégrale (*resnorm*) qui représente l'écart entre le modèle appliqué en prenant une valeur de s comprise entre 1 et 6 et le modèle appliqué avec une valeur de référence considérée comme étant $s = 3$. *resnorm* s'écrit sous la forme suivante :

$$resnorm(s) = \frac{\int \Delta P(s = 3) dV_f - \int \Delta P(s) dV_f}{\int \Delta P(s = 3) dV_f} \tag{Equation 82}$$

Notons que *resnorm* dépend de l'intervalle d'intégration. L'écart relatif *resnorm* est tracé sur la Figure 67. On en conclut que pour des valeurs comprises entre 1 et 4, ce qui correspond à un rapport de $\frac{L_{eff}}{L}$ compris entre 85% et 95%, l'écart relatif reste inférieur à 5%.

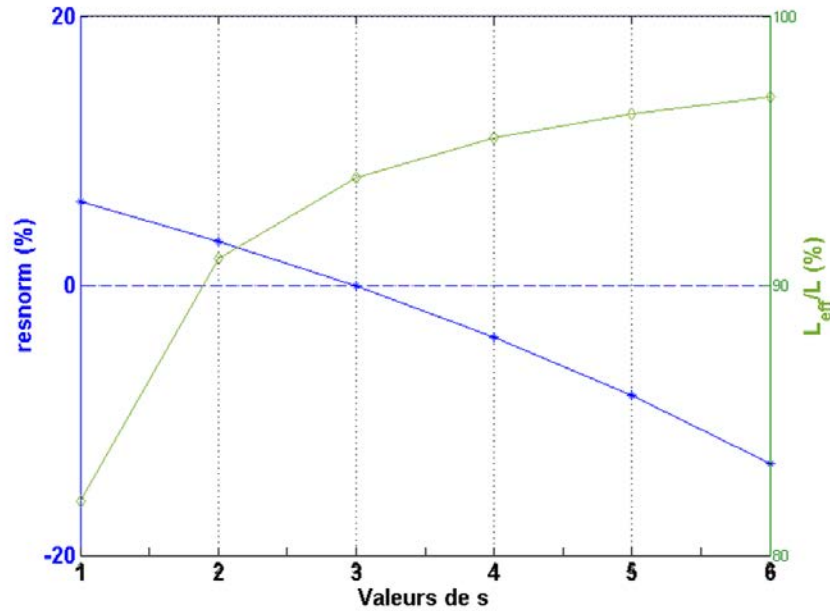


Figure 67 : en bleu : écart relatif entre la perte de charge issue du modèle pour une longueur effective en fonction de s et la perte de charge de référence ($s = 3$). En vert : évolution du rapport L_{eff}/L en fonction de différentes valeurs de s .

6.3.2. Filtrés ME

Nous avons pu constater dans le paragraphe précédent que le modèle n'arrive pas à reproduire les valeurs expérimentales de perte de charge pour les filtres ME, surtout dans le cas d'un pas de 2 mm. Parmi les hypothèses qui peuvent expliquer cet écart, le fond du pli. Dans ce modèle, seul son aspect géométrique est considéré.

Contrairement aux filtres THE où le fond de pli THE a été caractérisé par analyse des clichés MEB et tomographiques, le fond de pli des filtres ME a été déduit de celui des filtres THE à partir de l'Équation 80. Afin d'étudier la sensibilité du modèle par rapport à ce paramètre dans le cas des filtres ME, l'écart relatif intégral (*error*) entre le modèle et les valeurs expérimentales a été considéré.

$$error(s) = \frac{\int \Delta P_{exp} dV_f - \int \Delta P(s) dV_f}{\int \Delta P_{exp} dV_f} \quad \text{Équation 83}$$

Où ΔP_{exp} est la perte de charge expérimentale issue des données de Del Fabbro (2001), et ΔP la perte de charge issue du modèle appliqué avec la longueur effective de l'Équation 81. Notons que, comme pour *resnorm*, cette erreur dépend de l'intervalle d'intégration.

La Figure 68 représente cet écart pour des filtres ME de géométrie $L = 27 \text{ mm}, p = 2 \text{ mm}$ et $L = 48 \text{ mm}, p = 2 \text{ mm}$ (correspondant aux cas les plus défavorables). On peut en déduire l'existence d'une plage de valeurs optimales permettant de s'approcher de la perte de charge expérimentale (pour des valeurs de s entre 16 et 17). Ces valeurs optimales restent empiriques mais peuvent être utilisées dans les études de conception des filtres pour minimiser la perte de charge initiale.

Une étude plus poussée de caractérisation reste à réaliser pour confirmer la pertinence de l'utilisation de ces valeurs, l'étude des filtres vierges ME n'étant pas une finalité dans cette thèse, cette étude n'a pas été menée à son terme.

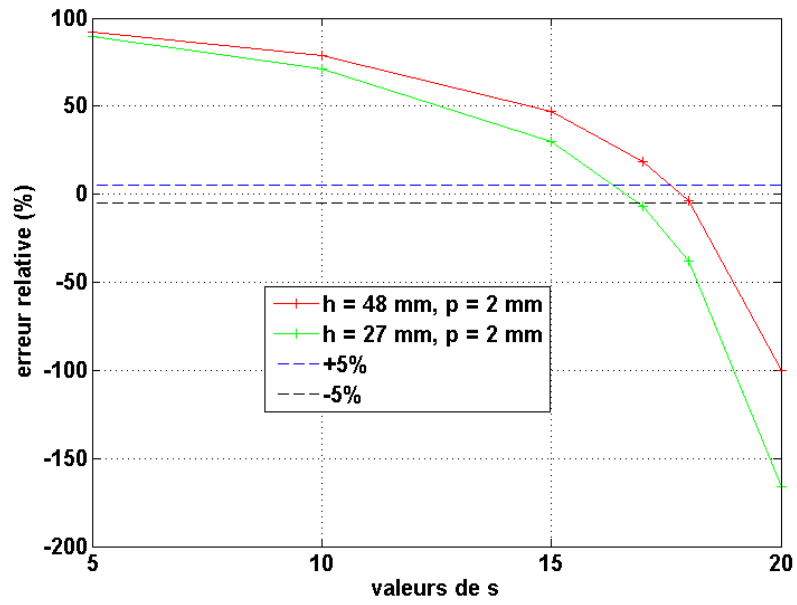


Figure 68 : l'écart relatif intégral (*error*) entre le modèle et les valeurs expérimentales de Del Fabbro (2001) pour des filtres ME de géométrie $L = 27 \text{ mm}, p = 2 \text{ mm}$ et $L = 48 \text{ mm}, p = 2 \text{ mm}$ pour des valeurs de s allant de 5 à 20

7. CONCLUSION

L'aéraulique des filtres plissés est un facteur important qui conditionne les performances initiales des filtres et leur évolution au cours du colmatage. Plusieurs études ont déjà été réalisées dans ce sens, mais peu d'entre elles sont couplées avec des validations expérimentales. Dans cette partie, on s'est intéressé au cas particulier d'un filtre plissé THE.

En premier lieu un dispositif expérimental a été développé pour mesurer les champs de vitesse dans le canal d'écoulement du pli. Le protocole expérimental est basé sur une technique de vélocimétrie laser (PIV) couplée avec des algorithmes de traitement d'images. La description de l'écoulement par des paramètres adimensionnés nous a permis de mettre en évidence une caractéristique importante de l'écoulement dans les filtres THE qu'est l'auto-similarité. Les profils de vitesse dans le canal d'écoulement sont « aplatis » et ne sont pas paraboliques, ceci est probablement dû au régime transitionnel de l'écoulement malgré les faibles valeurs de nombre de Reynolds.

La mesure du champ de vitesse à proximité immédiate du média constitue l'une des limites de la technique utilisée. Aussi, au fond du pli, il a été difficile de réaliser des mesures fiables du champ de vitesse. Afin de pallier ce problème, nous avons eu recours à la simulation numérique.

Les simulations numériques ont été menées avec les codes de calcul ANSYS CFX® et GeoDict®. Dans le cas d'ANSYS CFX®, afin de prendre en compte un éventuel aspect turbulent de l'écoulement, un modèle $k - \omega SST$ a été considéré. Quant à GeoDict®, un modèle de Navier-Stokes-Brinkman a été considéré pour la même raison. La comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux a montré un accord très satisfaisant. Une fois validés, ces logiciels ont été utilisés pour étudier l'écoulement dans le pli : la vitesse de filtration ainsi que l'écoulement au fond du pli ont été caractérisés.

La combinaison des résultats expérimentaux et numériques a permis de développer un modèle semi-analytique de l'écoulement d'air dans un pli puis de le valider sur la base de données expérimentales. Ensuite, en se basant sur le théorème de la conservation de la quantité de mouvement appliqué à un domaine infinitésimal, un modèle permettant de décrire l'évolution de la pression dans le canal d'écoulement et donc de prédire la perte de charge initiale du pli en fonction de la vitesse de filtration, a été développé.

Le modèle de perte de charge a été confronté à des mesures expérimentales pour des filtres de géométries différentes et pour deux types de médias (ME et THE). Globalement, pour les filtres THE utilisés dans l'industrie nucléaire française, le modèle est prédictif et est en très bon accord avec les résultats expérimentaux dans la gamme des débits de filtration investiguée.

Pour les filtres ME, l'accord entre les résultats du modèle et les résultats expérimentaux est moins satisfaisant, vraisemblablement parce que l'hypothèse d'une vitesse de filtration constante le long du pli n'est pas valable pour un filtre ME, du fait de sa plus faible perméabilité. Des phénomènes de déformation ainsi que les caractéristiques du fond de pli, pourraient également entrer en jeu et expliquer en partie les écarts constatés. Néanmoins, des valeurs empiriques caractérisant le fond de pli ME ont été déterminées pour adapter ce modèle aux filtres ME.

La perte de charge initiale d'un filtre est un paramètre déterminant dans la construction d'un filtre. Ce modèle est simple d'utilisation et rapide en termes de temps de calcul. Il permet d'évaluer les paramètres géométriques optimaux d'un filtre THE pour minimiser la perte de charge initiale et pourrait présenter un intérêt pour les fabricants de filtres.

In fine, le but étant toujours de modéliser le colmatage, il est nécessaire de prendre en considération l'hétérogénéité de la vitesse de filtration le long du pli et d'implémenter un modèle d'évolution de celle-ci en fonction de paramètres pertinents. En effet, dans le chapitre suivant qui porte sur le colmatage, ce modèle sera adapté et utilisé pour un scénario de colmatage.

CHAPITRE III : COLMATAGE DES FILTRES PLISSES THE

1. INTRODUCTION

Au cours du colmatage d'un filtre plan les particules se déposent au sein du média puis à sa surface formant ainsi un gâteau. En comparaison avec les filtres plans, la formation du dépôt sur les filtres plissés conduit à une diminution de la surface effective de filtration et donc à une augmentation plus rapide de la perte de charge.

Au cours du colmatage, selon la configuration expérimentale, la perte de charge évolue rapidement et semble être influencée par un dépôt non homogène de particules à la surface du média plissé. Bourrous (2014) a mis en évidence l'apparition de ponts de particules à l'entrée du pli engendrant une diminution drastique du volume disponible au dépôt. Saleh et al. 2014 ont implémenté des routines dans le logiciel ANSYS Fluent® et ont simulé la formation du gâteau sur des plis triangulaires. Ils ont constaté également l'apparition d'un dépôt inhomogène à la surface du média pour des vitesses en entrée du pli de $0,5 \text{ m/s}$ et des particules sphériques de $1 \mu\text{m}$.

Dans ce chapitre, on propose une étude de colmatage des filtres plissés THE à petits plis de type CAMFIL. De façon similaire au chapitre précédent, l'étude se fait à l'échelle du pli et s'étale sur deux volets, l'un expérimental et l'autre numérique.

Dans la première partie, un banc expérimental a été développé, permettant de mesurer l'évolution de la perte de charge d'un pli de filtre plissé THE soumis à un aérosol colmatant dont les caractéristiques et la génération sont parfaitement maîtrisées. On cherchera à évaluer en temps réel les paramètres physiques qui entrent en jeu dans les modèles de colmatage. En particulier, la porosité, qui reste une des données les plus sensibles pour évaluer l'évolution de la perte de charge. Elle sera déterminée en temps réel avec un dispositif spécifique.

Dans la seconde partie, on utilisera le code calcul GeoDict®, dont le module FlowDict a été validé précédemment sur la base de mesures expérimentales, afin de simuler la formation du dépôt au cours du colmatage. L'utilisation des données expérimentales permettra de tester les performances de ce code de calcul en l'utilisant dans la même configuration que celle étudiée expérimentalement. On proposera ensuite une méthode numérique de simulation du colmatage de plis THE, en se basant sur le logiciel ANSYS CFX® également validé dans le précédent chapitre.

Dans la dernière partie, les données expérimentales et numériques seront utilisées conjointement pour la modélisation de l'évolution de la perte de charge des filtres plissés THE étudiés.

2. ÉTUDE EXPERIMENTALE DU COLMATAGE D'UN PLI DE FILTRE PLISSE THE

2.1. Introduction

Aujourd'hui, peu de travaux expérimentaux traitant du colmatage des filtres plissés THE par des particules microniques à faible vitesse de filtration sont disponibles dans la littérature. C'est la raison pour laquelle, un banc expérimental de colmatage à l'échelle du pli par des particules d'alumine a été développé afin de fournir les données nécessaires à la validation des codes de calcul ainsi qu'à la modélisation analytique du colmatage.

2.2. Banc expérimental

2.2.1. Description du banc expérimental

Le dispositif expérimental développé pour étudier l'évolution de la perte de charge au cours du colmatage est présenté sur la Figure 69.

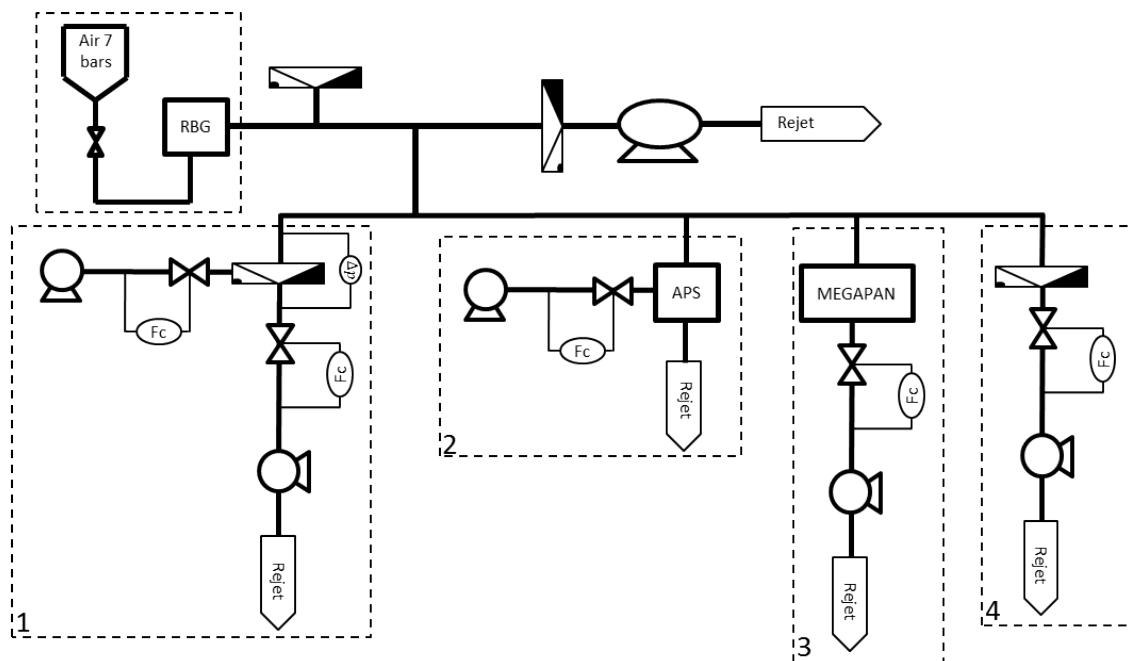


Figure 69 : schéma explicatif du banc expérimental de colmatage

Des particules d'alumine sont générées par un disperseur de particules (Palas® RBG-1000). Un débit est imposé dans la gaine principale via une turbine. Le débit principal est ensuite divisé en quatre branches via un « flow splitter (TSI) » ; ce dernier assure une répartition égale d'aérosols dans les quatre branches du banc expérimental (1, 2, 3 et 4) de la façon suivante :

- branche 1 : elle contient le pli THE testé (Figure 23) ; l'évolution de sa perte de charge est enregistrée au cours du temps (Furness® CO332) (on utilise le même dispositif de maintien du pli que pour l'étude de l'aéraulique) ;
- branche 2 : elle est constituée d'un APS (Aerosol Particle Sizer TSI 3321) permettant de mesurer la distribution granulométrique des aérosols au cours du temps ;

- branche 3 (MEGAPAN) : elle permet de mesurer la porosité du dépôt des particules formé sur une membrane de diamètre 36 mm (Fluoropore®, PTFE, diamètre de pore de 0,2 µm),
- branche 4 : elle est constituée d'un filtre THE plan (36 mm de diamètre avec le même média que celui du pli testé) et permet de mesurer la masse de particules déposées sur le pli testé à la fin de chaque essai ; l'évolution de la perte de charge du gâteau formé sur le filtre plan est enregistrée (Furness® CO332).

Toutes les branches sont traversées par le même débit massique d'aérosols. Les vitesses de filtration à travers le pli testé, le média utilisé pour la mesure de la masse et de la porosité sont identiques. Ceci est réalisé grâce à une combinaison de dilutions et de régulations de débits. Sur la branche 1 le débit provenant de la gaine principale est dilué puis maintenu constant avec un contrôleur (BROOKS® 5850S /T10019/005). Sur les branches 3 et 4 les débits sont maintenus constants grâce à des contrôleurs de débits (BROOKS® 5850S /T90027/001, BROOKS® 5850S /T90027/005). Le débit aspiré par l'APS est imposé par cet instrument (5 l/min), l'air est dilué et régulé par un contrôleur de débit (BROOKS® 5850S/T10019/013).

2.2.2. Aérosols de colmatage

On cherche à colmater le filtre par des aérosols microniques, ainsi des particules d'alumine Al_2O_3 (SPM102 DURMAX) ont été choisies. Le diamètre aérodynamique de ces aérosols a été mesuré en utilisant un APS. La Figure 70 représente la distribution granulométrique en nombre de ces aérosols.

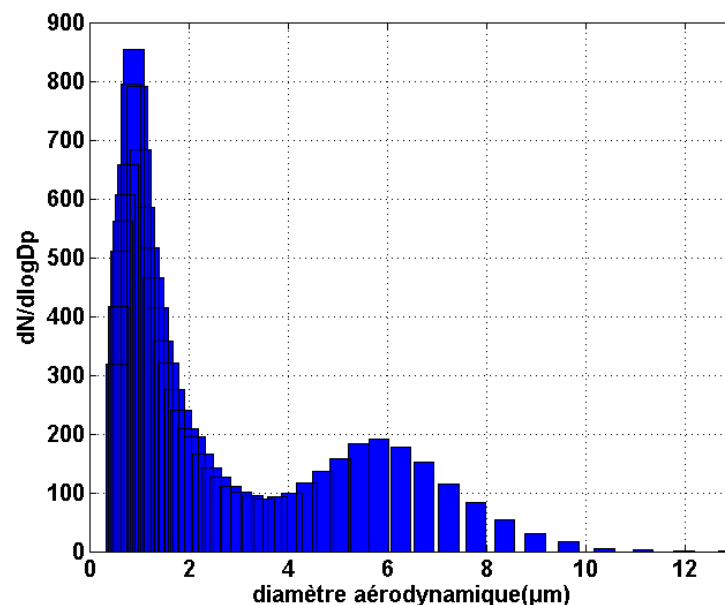


Figure 70 : distribution granulométrique des aérosols d'alumine SPM102 mesurée par un APS

La distribution granulométrique de ces particules peut être représentée par une loi log-normale à deux modes :

$$f(\ln(d)) = \sum_{i=1}^2 \frac{n_i}{n_t} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_i} \exp\left(-\frac{\ln(d) - \ln(d_i)}{2 \ln \sigma_i^2}\right) \quad \text{Équation 84}$$

Avec $f(Ind)$ la densité de présence des particules de taille d , σ_i l'écart type et d_i le diamètre moyen, $\frac{n_i}{n_t}$ la proportion du mode i avec $n_1 + n_2 = n_t$ tel que :

$$\sigma_1 = 1,5; \sigma_2 = 1,2; d_1 = 0,8 \mu\text{m}; d_2 = 5,8 \mu\text{m}; \frac{n_1}{n_t} = 0,94$$

La Figure 71 représente une photographie de ces aérosols obtenue par microscope électronique à balayage (MEB). Ces particules ne sont pas sphériques mais présentent des formes aléatoires, ceci s'explique par le processus de fabrication. En effet la poudre SPM102 est obtenue par broyage.

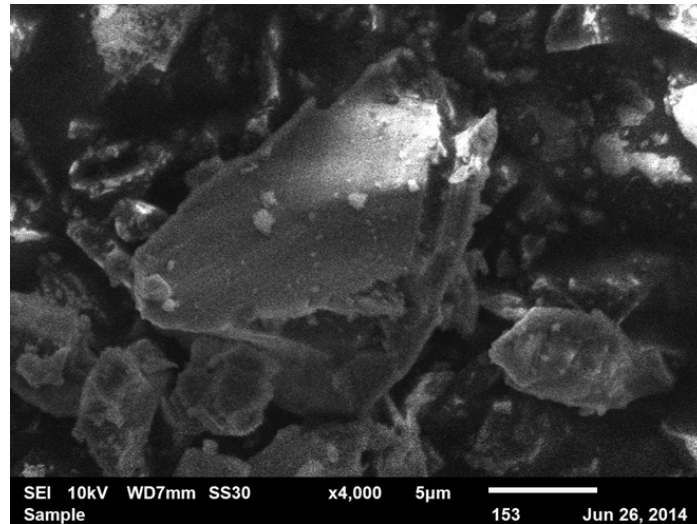


Figure 71 : image obtenue par un microscope électronique à balayage (MEB) de la poudre SPM102

2.2.3. Caractéristiques du générateur de particules

Le générateur de particules utilisé est un générateur à brosse tournante (Palas RBG-1000). Il est composé d'un piston motorisé dans lequel la poudre est placée, ce dernier est surmonté d'une brosse tournante soumise à un jet d'air. Le piston fait monter la poudre vers la brosse pour être dispersée par un jet d'air (cf. Figure 72).

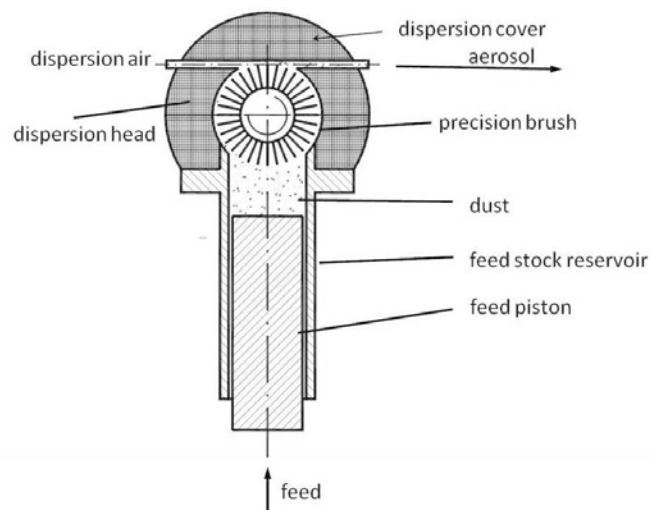


Figure 72 : représentation schématique du principe de fonctionnement du RBG (site Palas)

Le taux de génération des particules par le RBG dépend du mode de remplissage du piston, ainsi pour avoir une génération constante, le remplissage doit être le plus homogène possible. Un protocole de remplissage a donc été défini. Il repose sur un remplissage du piston en plusieurs étapes, en ajoutant à chaque fois, la même masse et en appliquant la même pression pour tasser la poudre dans le piston.

La poudre d'alumine est conservée dans une étuve afin d'éviter la formation d'agglomérats pouvant apparaître à cause de l'humidité. Afin de caractériser l'évolution temporelle de la concentration massique de l'alumine générée au cours du temps, les distributions granulométriques mesurées à l'aide de l'APS ont été converties en masse. La Figure 73 représente l'évolution temporelle de la masse d'alumine générée. On peut constater que le taux de génération est constant, ce qui facilitera la conversion entre le temps et le masse déposée lors des essais.

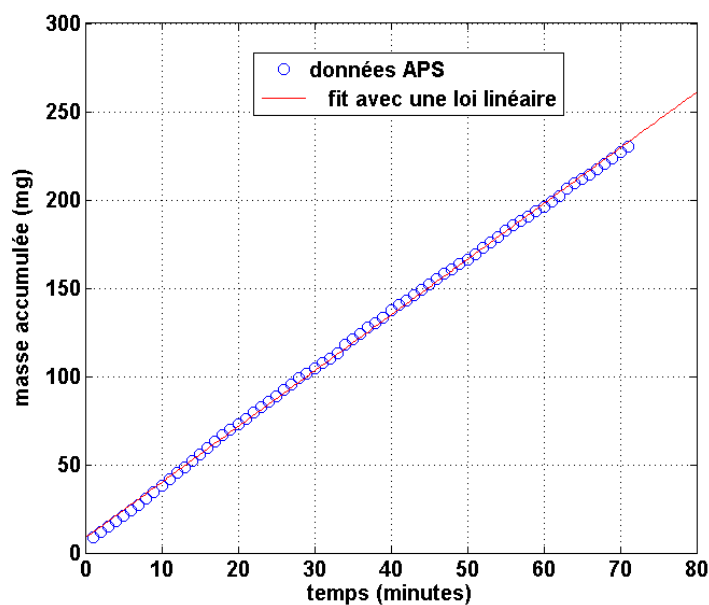


Figure 73 : évolution de la masse générée de particules d'alumine au cours du temps par le RBG

2.3. Résultats expérimentaux

2.3.1. Mesure de la porosité (branche 3)

La porosité est un paramètre clé qui intervient dans tous les modèles de colmatage existants. Elle conditionne la masse de particules nécessaire pour le remplissage du filtre plissé et influence fortement la résistance aéraulique du dépôt. La mesure de la porosité est réalisée à l'aide du dispositif MEGAPAN (Bourrous, 2014).

La mesure repose sur une technique optique. Les particules sont déposées sur une membrane (Fluoropore®, PTFE, diamètre de pore de $0,2 \mu\text{m}$ et de diamètre 36 mm) qui repose sur une surface poreuse parfaitement plane. Un laser est dirigé vers la membrane et une caméra prend des images du spot laser. Au fur et à mesure que le dépôt se forme sur la membrane, le spot se décale vers la droite (cf. Figure 74). En mesurant le déplacement du spot laser, on peut alors obtenir l'évolution de l'épaisseur au cours du temps. La porosité est donc déduite de la relation suivante :

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_s}{\rho_p \frac{dw}{dt} \Delta t} \quad \text{Équation 85}$$

Avec m_s la masse déposée sur le filtre par unité de surface, ρ_p , la masse volumique des particules d'alumine, $\frac{dw}{dt}$, l'évolution de l'épaisseur du dépôt de particules au cours du temps et Δt la durée de l'essai.

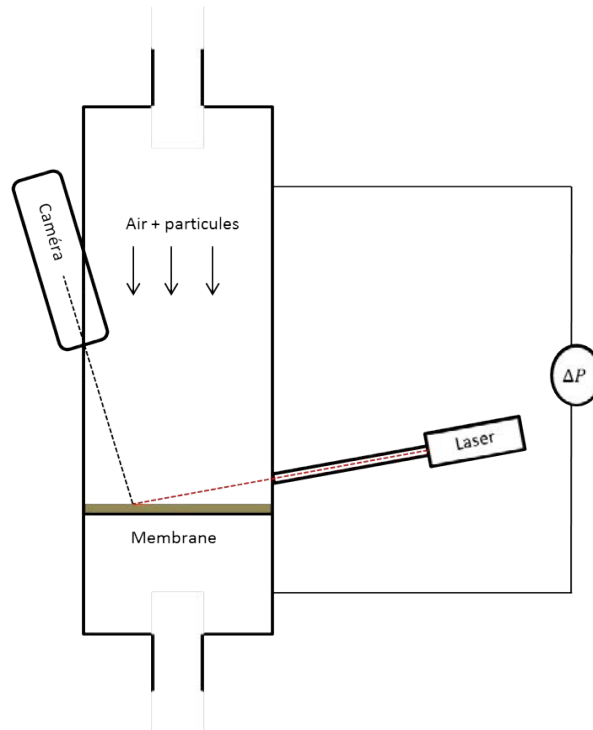


Figure 74 : schéma explicatif du dispositif utilisé pour la mesure de la porosité

L'utilisation du taux de croissance de l'épaisseur du dépôt permet d'améliorer la précision de la mesure. La porosité obtenue est donc, une valeur moyenne qui peut être considérée comme constante si le dépôt est incompressible. Le lecteur intéressé pourra se rapporter aux travaux de Bourrous (2014).

Les mesures de porosité ont été réalisées pour cinq vitesses de filtration différentes exprimées en fonction de la vitesse nominale : $Vn/10, Vn/5, Vn/2, Vn, 2Vn$. La Figure 75 représente l'évolution de l'épaisseur du dépôt des particules d'alumine sur la membrane pour une vitesse de filtration de $Vn/10$ et deux essais différents. Les courbes obtenues pour les autres valeurs peuvent être consultées en annexe IV. Le bruit présent sur cette figure est principalement dû à la diffusion de la tâche lumineuse à la surface de la membrane ce qui génère des fluctuations de la valeur de l'épaisseur. À chaque essai, une régression linéaire a été appliquée aux données expérimentales puis la porosité a été calculée en utilisant l'Équation 85.

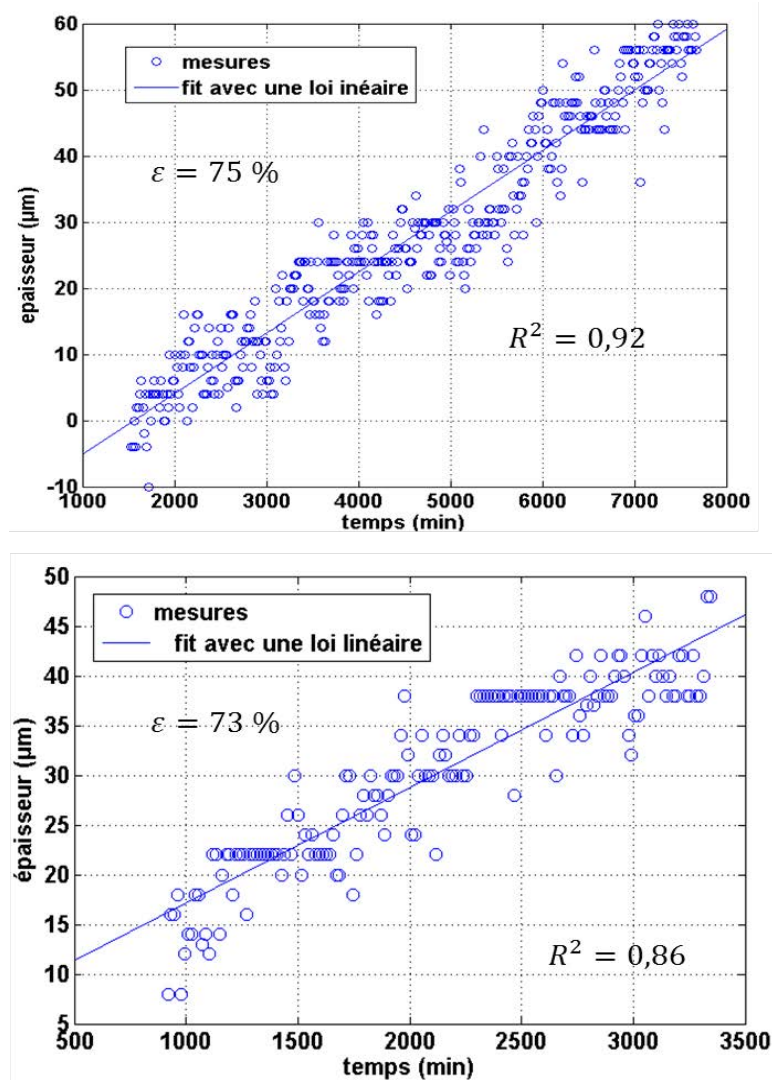


Figure 75 : évolution de l'épaisseur du dépôt formé sur la membrane en fonction du temps pour deux essais différents (vitesse de filtration de $Vn/10$).

La Figure 76 représente l'évolution de la porosité en fonction de la vitesse de filtration pour les particules d'alumine. Les valeurs de porosité sont comprises entre 60% et 75%. La porosité est plus grande pour les vitesses les plus petites. Cette tendance s'explique par l'inertie des particules. En effet, pour des vitesses importantes, les particules, du fait de leur inertie, forment un dépôt avec un rangement plus « compact ». Cette figure montre que la porosité diminue jusqu'à atteindre un seuil autour de 60%.

Pour chaque vitesse de filtration la barre d'erreur (Figure 76) correspond à la dispersion des valeurs de porosité lors des essais. On peut constater que ces erreurs peuvent aller jusqu'à 10% pour $2Vn$, ce qui représente une marge d'erreur non-négligeable.

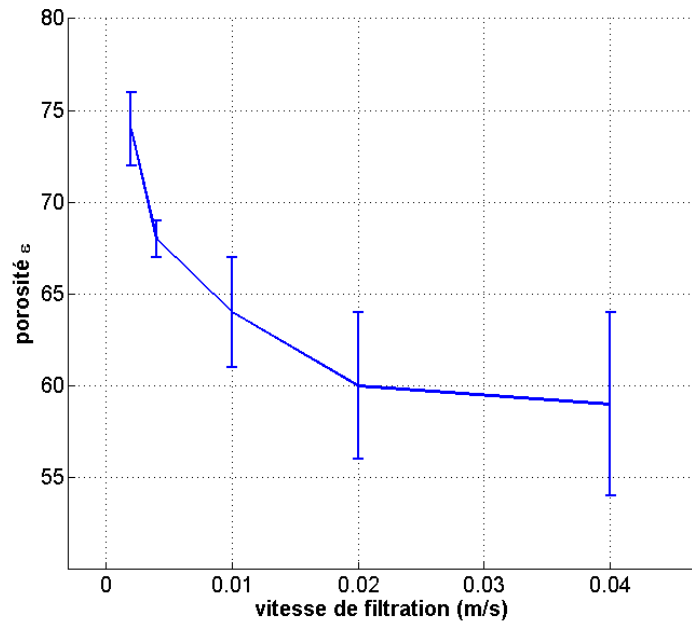


Figure 76 : évolution de la porosité en fonction de la vitesse de filtration

Dans la gamme des vitesses de filtration investiguée, la diffusion brownienne des particules peut être négligée ($Pe \sim 10^8$ pour la plus petite taille des particules et aux plus petites vitesses de filtration), ainsi la formation du dépôt dans cette configuration est principalement pilotée par l'inertie des particules. La porosité du dépôt de ces particules peut s'écrire en fonction de vitesse de filtration sous la forme suivante :

$$\varepsilon = 0,45V_f^{0,0778} \quad \text{Équation 86}$$

La Figure 77 représente une comparaison entre les données expérimentales et l'Équation 86. Cette relation représente assez fidèlement l'évolution de la porosité dans la gamme des vitesses de filtration investiguées, mais ne peut être appliquée que dans le cas très particulier de ces aérosols.

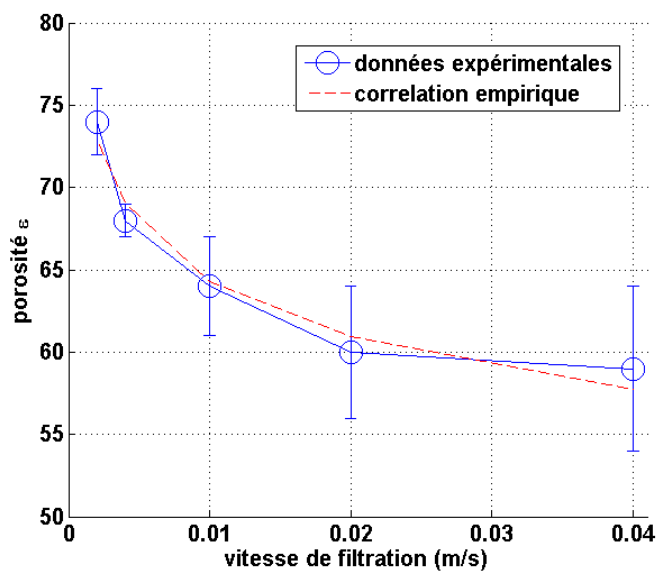


Figure 77 : comparaison entre la relation empirique et les données expérimentales

2.3.2. Évolution de la perte de charge du gâteau formé sur filtre plan (branche 4)

Afin de modéliser l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé au cours du colmatage par ce type de particules, la caractérisation de la perte de charge du dépôt formé sur filtre plan est une étape nécessaire.

La Figure 78 montre l'évolution de la perte de charge du gâteau ($\Delta P - \Delta P_0$) pour $Vn/2$ (les courbes correspondantes aux autres vitesses de filtrations sont regroupées dans l'Annexe V). Comme attendu, l'évolution de perte de charge du gâteau suit une loi linéaire. Notons que les pics d'augmentation de la perte de charge qui apparaissent sur la Figure 78 correspondent aux moments de rechargement de piston.

Deux types de modèle existent pour modéliser la perte de charge d'un dépôt formé de particules microniques sur filtre plan :

- dans le premier type, la perte de charge est liée à la force de trainée subie par le dépôt. Le modèle d'Endo (1997) en fait partie. Bien qu'il soit adapté à des distributions polydispersées, il est souvent utilisé dans le cas de dépôts relativement aérés ($\varepsilon > 70\%$)
- dans le deuxième type, le dépôt est assimilé à un lit granulaire. Le modèle de Kozeny-Carman (1937) s'inscrit dans ce cadre. Il est bien adapté à des dépôts avec des valeurs de porosité supérieure à 40% mais il ne prend en compte que des distributions monodispersées.

Le modèle de Kozeny-Carman semble être bien adapté au type de particules étudiées. En suivant la même démarche de modélisation que celle d'Endo *et al.* (1997) et d'Endo *et al.* (1998), nous avons modifié le modèle de Kozeny-Carman pour prendre en compte des distributions bimodales. Il s'écrit pour un dépôt de particules d'épaisseur w , de compacité α dont la distribution granulométrique suit une loi lognormale, sous la forme:

$$\Delta P = h_k \mu \frac{36\alpha^2}{(1-\alpha)^3} R_p V_f w \quad \text{Équation 87}$$

Où V_f est la vitesse de filtration et R_p est un nouveau paramètre introduit par les calculs et décrit la distribution granulométrique utilisée, il est égal à :

$$R_p = \frac{\frac{n_1}{n_t} d_1 \exp\left(\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_1\right) + \frac{n_2}{n_t} d_2 \exp\left(\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_2\right)}{\frac{n_1}{n_t} d_1^3 \exp\left(\frac{9}{2} \ln^2 \sigma_1\right) + \frac{n_2}{n_t} d_2^3 \exp\left(\frac{9}{2} \ln^2 \sigma_2\right)} \quad \text{Équation 88}$$

Où σ_1, σ_2 sont les écarts types de la distribution, d_1, d_2 sont les diamètres moyens, n_1, n_2 correspondent au nombre de particules de chaque mode pour un nombre totale de particules n_t . Dans le cas des particules monodispersées, on retrouve le modèle de Kozeny-Carman, avec :

$$R_p = \frac{1}{d_p^2} \quad \text{Équation 89}$$

La constante de Kozeny est déterminée par l'Équation 90 (Caroll, cité par Chen (1982)) valable pour des valeurs de compacité de dépôts inférieures à 0,42 :

$$h_k(\alpha) = 5 + \exp(14(0,2 - \alpha)) \quad \text{Équation 90}$$

La Figure 78 représente la comparaison entre ce modèle et les résultats expérimentaux. Le modèle reproduit de manière assez satisfaisante les résultats expérimentaux, il sera utilisé par

la suite dans la modélisation du colmatage par ce type de particules. Les courbes de comparaison correspondantes aux autres vitesses de filtration sont disponibles en annexe V.

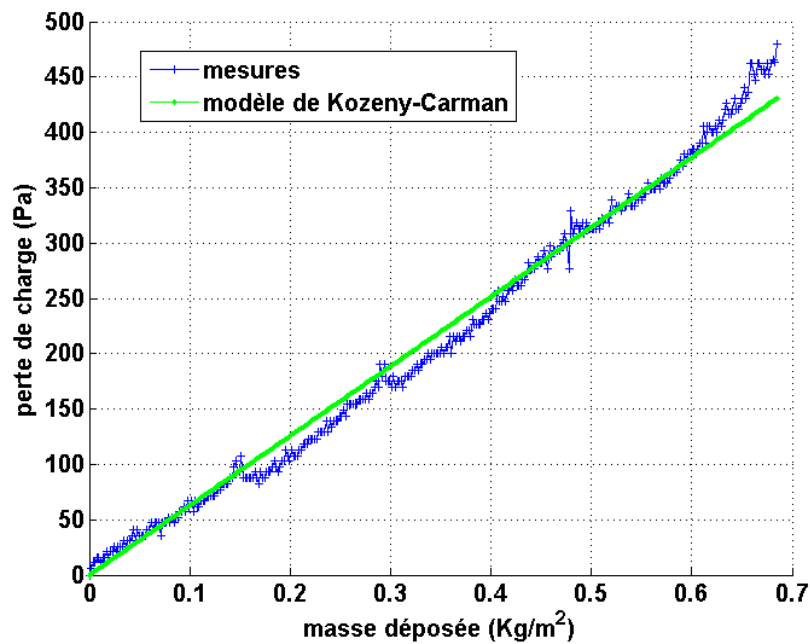


Figure 78 : comparaison de la perte de charge du gâteau formé sur le filtre plan (branche 4 du banc expérimental) avec le modèle de Kozeny-Carman adapté, pour une vitesse de filtration de $V_n/2$

2.3.3. Évolution de la perte de charge du pli au cours du colmatage (branche 1)

La Figure 79 représente l'évolution du rapport entre la perte de charge initiale d'un pli et de sa perte de charge au cours du colmatage pour différentes vitesses de filtration. Dans cette figure, pour chaque valeur de masse déposée, la barre d'erreur représente la dispersion des valeurs de perte de charge obtenues lors des différents essais. Pour chaque vitesse de filtration les essais ont été réalisés au moins trois fois.

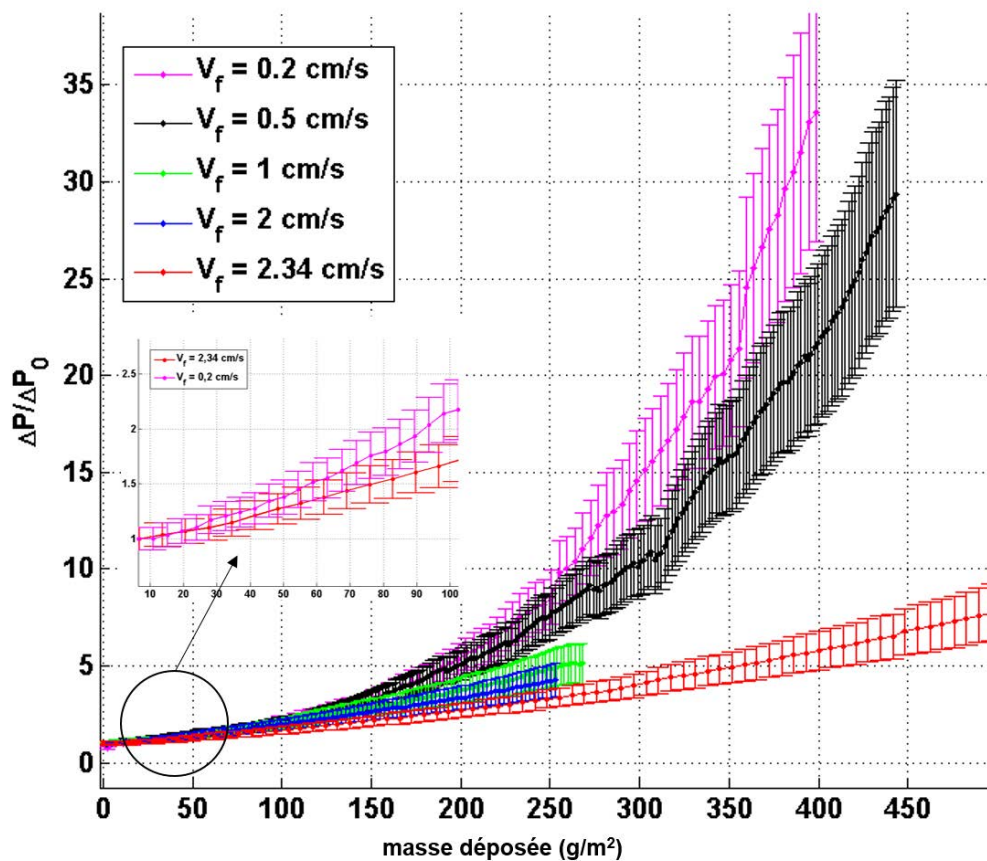


Figure 79 : évolution de la perte de charge (adimensionnée par la perte de charge initiale) d'un pli de filtre THE au cours du colmatage pour différentes vitesses de filtration

Ces résultats expérimentaux confirment les tendances déjà observées dans la littérature (Del Fabbro (2001), Joubert (2009), Bourrous (2014)) : le pouvoir colmatant augmente avec la diminution de la vitesse de filtration. Ce phénomène peut s'expliquer par deux mécanismes qui interviennent au cours du processus de colmatage de manière simultanée :

- La porosité du dépôt de particules diminue avec l'augmentation de la vitesse de filtration. Ainsi pour des faibles vitesses le pli peut supporter moins de particules que pour de plus grandes vitesses. Ceci a d'ailleurs été démontré dans le paragraphe précédent pour ces particules d'alumine.
- Une inhomogénéité du dépôt peut se produire au cours du colmatage conduisant à une perte additionnelle de la surface de filtration, occasionnant ainsi une augmentation rapide de la perte de charge (Saleh et al. 2014).

2.4. Conclusion

Le banc expérimental développé a permis de fournir des mesures de perte de charge d'un pli de filtre plissé THE au cours du colmatage. Les courbes de colmatage ainsi obtenues présentent un écart expliqué en partie par la porosité du dépôt. À ce stade, l'approche utilisée, ne permet de caractériser que l'influence de la porosité du dépôt sur la perte de charge du pli. Quant à la géométrie du dépôt, nous utiliserons la simulation numérique avec le code de calcul GeoDict® pour analyser la croissance du gâteau formé à la surface du média.

3. ETUDE NUMERIQUE DU COLMATAGE D'UN PLI DE FILTRE PLISSE THE

3.1. Introduction

L'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé au cours du colmatage est complètement déterminée si l'on connaît la structure du dépôt (porosité) et l'évolution de son épaisseur le long des plis (géométrie du dépôt).

Afin de caractériser l'évolution de la géométrie du dépôt sur un média THE plissé, nous avons eu recours à la simulation numérique, ainsi, le code de calcul GeoDict® a été utilisé pour simuler la croissance du dépôt sur un pli de filtre plissé THE.

À la fin de ce chapitre, on proposera une méthode numérique basée sur le code de calcul ANSYS CFX® permettant de simuler numériquement la formation du dépôt sur un média plissé.

3.2. Simulation numérique du colmatage avec le code de Calcul GeoDict®

3.2.1. Mise en place des simulations GeoDict®

3.2.1.1. Paramètres numériques

Le code de calcul GeoDict® permet de simuler le dépôt de particules sur des milieux poreux (médiats). Le suivi des particules se fait avec une approche Lagrangienne : un groupe de particules (batch) est injecté à l'entrée du domaine de calcul puis transporté par l'écoulement d'air jusqu'au dépôt à la surface du média. A la fin de chaque batch, la perméabilité de chaque voxel est modifiée par le dépôt.

Dans les simulations réalisées, les particules considérées sont des particules sphériques avec une masse volumique de 3950 Kg/m^3 (masse volumique de l'alumine). Au regard de la taille des particules ($> 1\mu\text{m}$), la diffusion brownienne sera négligée. Pour la même raison, le coefficient de Cunningham sera toujours égal à l'unité. À cause de la faible pénétration des particules dans le média THE utilisé (Bourrous, 2014), la filtration en profondeur est négligée.

La taille des voxels est définie à $10 \mu\text{m}$. Cette taille est supérieure à celle choisie lors des simulations de l'écoulement ($5 \mu\text{m}$) mais elle permet d'avoir des temps de calcul acceptables. Le modèle de Navier-Stokes-Brinkman (NSB) est utilisé pour la modélisation de l'écoulement.

Le nombre des particules contenues dans chaque batch doit être limité afin de ne pas saturer les voxels. En effet, un voxel ne peut pas contenir un volume de particules supérieur à son propre volume. En revanche, un batch contenant « peu » de particules entraînerait un temps CPU important. Il est donc important d'optimiser ce nombre de particules par batch. Un nombre optimal de particules peut être approximé en prenant en compte le volume maximal que les voxels libres à la surface du média peuvent supporter. Ainsi en prenant en compte ces considérations, pour un dépôt de porosité ε , si N_b est le nombre des particules contenues dans le batch, on a :

$$N_b \sim \frac{N_v(1 - \varepsilon)V_{ox}^3}{V_p} \quad \text{Équation 91}$$

Avec N_v est le nombre de voxels libres à la surface du média, V_p est le volume de la particule et V_{ox} la taille du voxel.

3.2.1.2. Modèle de collision

Le modèle de collision définit l'interaction entre les particules et le dépôt (les voxels poreux). Dès lors qu'une particule entre en contact avec un voxel poreux, sa trajectoire est modifiée selon deux possibilités :

- la particule est collectée et disparaît du domaine de calcul. La masse du voxel est recalculée en conséquence (*Caught at first touch model*) ;
- la particule rebondit sur le voxel et repart avec une énergie cinétique inférieure (choc élastique). Elle se dépose quand sa vitesse est suffisamment petite comparée à sa force d'adhésion (Hamaker model) ou quand elle atteint une vitesse nulle (Sievieng model).

Pour choisir le modèle le plus adapté à la configuration étudiée, il suffit de comparer l'énergie cinétique de la particule au moment du contact avec son énergie d'adhésion. Dans notre configuration, l'énergie d'adhésion des particules (entre elles) est liée principalement aux forces de Van-der-Waals, selon Hamaker (1937), elle peut être écrite sous la forme :

$$E_{vdw} = \frac{A_H d_p}{12 z} \quad \text{Équation 92}$$

Où d_p est le diamètre de la particule, A_H la constante d'Hamaker, z la distance entre les surfaces des particules, la constante de Hamaker A_H est prise égale à $7,9.10^{-20}J$ (Churaev, 2000). Le rapport entre l'énergie d'adhésion de la particule et son énergie cinétique obéit à :

$$\frac{E_{vdw}}{E_c} = \frac{A_H}{\pi \rho_p z_0 v^2 d_p^2} \quad \text{Équation 93}$$

Où ρ_p est la masse volumique des particules et v la vitesse de la particule au moment du contact avec le voxel. La distance minimale de contact est généralement prise, pour l'alumine, égale à $z_0 = 0,4.10^{-9}m$. Le tableau regroupe des valeurs de ce rapport pour différentes vitesses pour des particules d'alumine de $1 \mu m$, la vitesse considérée étant celle de filtration (vitesse à proximité du média).

Le Tableau 12 montre que pour les vitesses de filtration considérées, les particules d'alumine ont une énergie cinétique négligeable devant leur énergie d'adhésion. Des auteurs comme (Kasper et al. 2010, Konstandopoulos et al. 2006) ont démontré qu'on peut tout à fait négliger ce phénomène dans notre configuration. Par conséquent, dans toutes les simulations numériques réalisées, on considère un modèle « *Caught at first touch* ».

Vitesse	Valeur numérique du rapport
$2Vn$	10
$Vn/10$	3779

Tableau 12 : différentes valeurs du rapport entre l'énergie cinétique et l'énergie d'adhésion des particules d'alumine de diamètre $1 \mu m$

3.2.1.3. Remise en suspension des particules

Au cours du colmatage, selon la taille des particules, un phénomène de remise en suspension des particules peut se produire. Ce dernier est évalué en considérant le rapport entre la force d'adhésion des particules F_{vdw} et la force de trainée F_T appliquée aux particules par l'écoulement d'air. Ce rapport est égal à :

$$\frac{F_{VDW}}{F_T} = \frac{A_H}{72\pi\mu V_f z_0^2} \quad \text{Équation 94}$$

Avec A_H est la constante de Hamaker, μ est la viscosité de l'air, z_0 est la distance minimale d'adhésion et V_f est la vitesse de filtration. Le Tableau 14 illustre les valeurs numériques de ce rapport. La force d'adhésion est largement dominante devant la force de trainée, elle sera négligée.

Vitesse	Valeur numérique du rapport
$2V_n$	2880
$V_n/10$	57594

Tableau 13 : différentes valeurs du rapport entre la force d'adhésion et la force de trainée pour des particules d'alumine de diamètre $1 \mu m$

3.2.2. Résultats des simulations GeoDict®

3.2.2.1. Cas d'une distribution monomodale

On se propose ici de caractériser la formation du dépôt construit par des particules dont la distribution est monomodale à l'aide du code de calcul GeoDict®. La distribution granulométrique des particules suit une loi lognormale. Le Tableau 14 résume les paramètres de la simulation numérique.

Nombre de particules par batch	40000
Diamètre moyen	$1 \mu m$
Écart type géométrique	1,2
Fréquence de calcul de l'écoulement	3 batchs
Porosité du dépôt	80%
Vitesse de filtration	$V_n, V_n/2, V_n/10$

Tableau 14 : paramètres de la simulation GeoDict®

On cherche à travers cette simulation à évaluer l'influence de la vitesse de l'écoulement sur l'évolution de la géométrie du dépôt formé sur le pli. On considère donc, une porosité de dépôt unique pour les trois vitesses de filtration, égale à 80 %. C'est une valeur proche de celle des porosités mesurées précédemment mais légèrement plus grande pour économiser le temps de calcul. La Figure 80 représente la formation du gâteau de particules au cours du colmatage. Le dépôt se forme de manière homogène sur la totalité du pli.

Afin de caractériser le taux de perte de la surface de filtration engendrée par l'accumulation du dépôt au sein du pli, on introduit un facteur R_s défini, pour une masse déposée, de la manière suivante :

$$R_s = \frac{\text{surface réelle de filtration}}{\text{surface initiale de filtration}} \quad \text{Équation 95}$$

Dans Équation 95 la surface réelle de filtration (ou surface du dépôt) est déterminée selon les résultats de GeoDict®. Elle est calculée en utilisant les coordonnées des voxels qui se trouvent à la surface du dépôt. La définition de ce paramètre nous permet de caractériser de manière quantitative la formation du dépôt, contrairement aux études réalisées auparavant (Del Fabro 2001, Bourrous 2014, Hettkamp 2011) où on se contentait de décrire de façon qualitative l'évolution du dépôt (dépôt préférentiel au fond ou au à l'entrée du pli). La Figure 81 représente l'évolution de ce rapport en fonction de la masse déposée sur le média plissé.

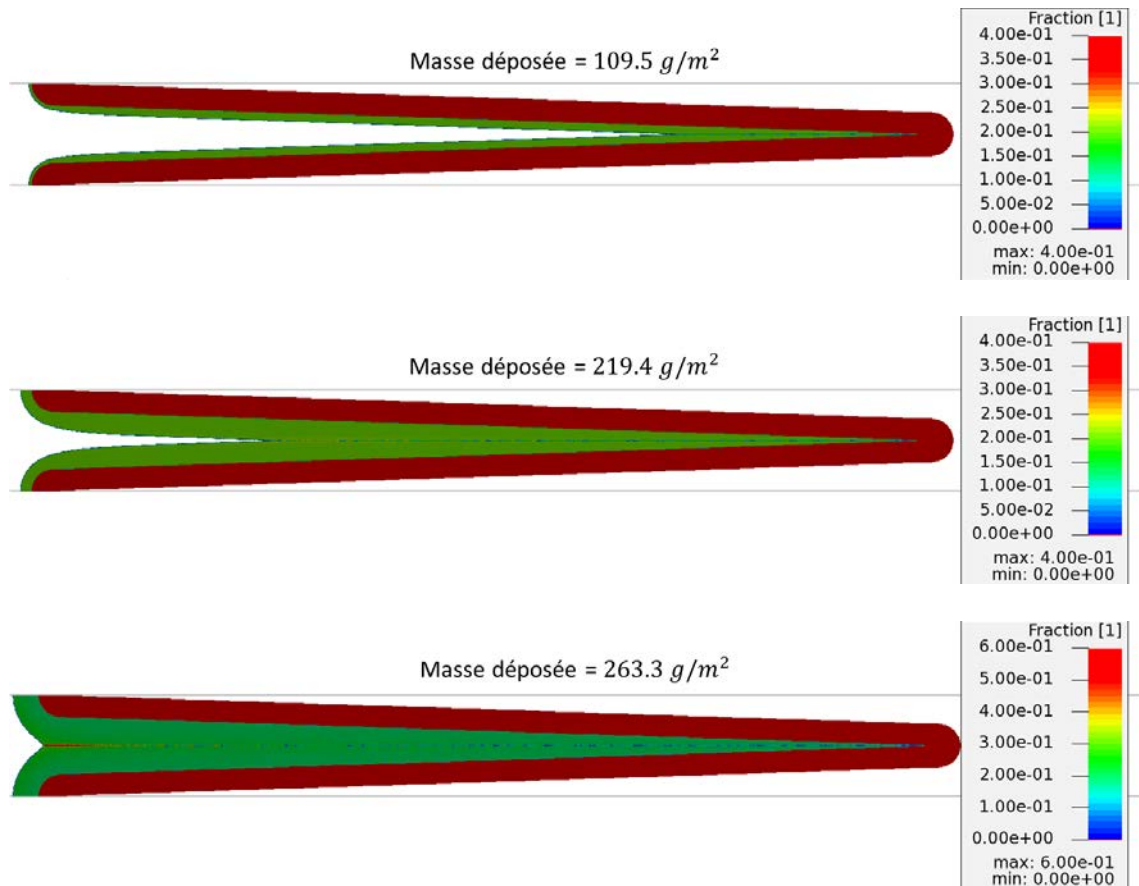


Figure 80 : formation du dépôt (fraction volumique des particules d'alumines) au cours du colmatage pour différentes masses déposées à une vitesse de filtration de $V_n/10$

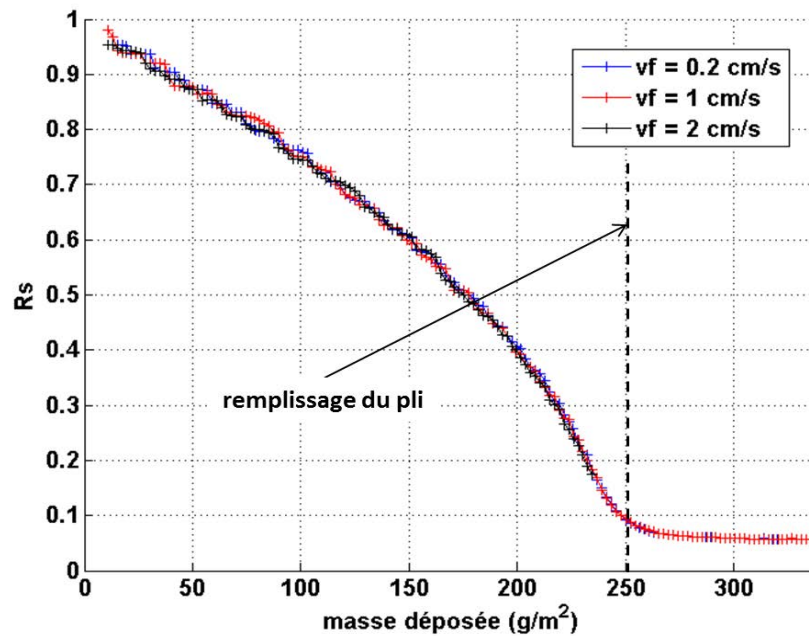


Figure 81 : évolution du rapport de la réduction de surface (R_s) en fonction de la masse déposée sur le média plissé

La surface de filtration diminue puis atteint une valeur constante quand le pli est complètement rempli. A ce stade, la filtration se fait en surface, la surface de filtration est réduite à son maximum et égale à la section d'entrée du pli. En réalité, on n'atteint jamais cette phase, théoriquement le média ne peut supporter la perte de charge engendrée.

La Figure 81 montre que la réduction de surface de filtration se fait de la même manière pour les trois vitesses de filtration : il n'y a pas eu formation de structures particulières (dendrites, arches) pouvant conduire à une réduction rapide de la surface de filtration. Autrement dit pour cette taille de particule, la vitesse de filtration et de fait l'inertie des particules n'a pas d'influence sur la croissance du dépôt.

On définit un dépôt homogène comme un dépôt qui garde un angle constant au cours du colmatage (égal à celui de l'ouverture du pli φ). Dans ce cas, le rapport de réduction de surface R_s peut s'écrire en fonction de la masse surfacique déposée sous la forme :

$$R_s = 1 + \frac{m_s}{\rho_p(1-\varepsilon)L} \left(\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \frac{1}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \quad \text{Équation 96}$$

Où m_s est la masse surfacique déposée, ρ_p la masse volumique des particules, ε la porosité du dépôt, L la longueur du pli et α l'ouverture du pli. La Figure 82 représente une comparaison de l'évolution du rapport R_s pour un dépôt homogène et un dépôt issu des simulations GeoDict®. Jusqu'à 150 g/m^2 approximativement, le dépôt peut être considéré comme homogène. Au-delà de cette valeur, l'angle formé par le dépôt croît fortement jusqu'à atteindre 180° où la surface de filtration est réduite au maximum.

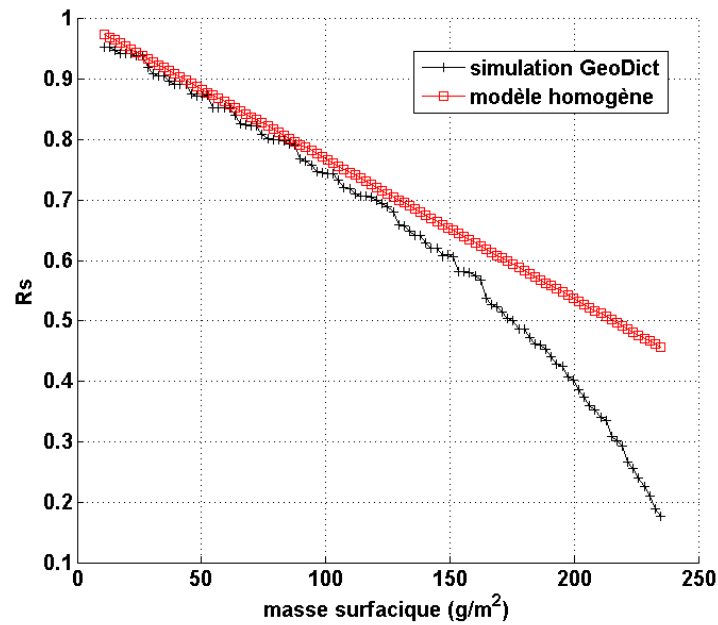


Figure 82 : comparaison du rapport de réduction de surface R_s pour un dépôt homogène et le dépôt issu des simulations numériques pour une vitesse nominale de filtration

La Figure 83 illustre l'évolution de la perte de charge du pli adimensionnée par la perte de charge initiale, au cours du colmatage pour trois différentes vitesses de filtrations ($V_n, V_n/2, V_n/10$). Comme attendu, les trois courbes se superposent : Il n'y a pas eu d'influence de l'inertie des particules sur la formation géométrique du dépôt et donc le taux d'évolution de la perte de charge est identique pour les trois cas.

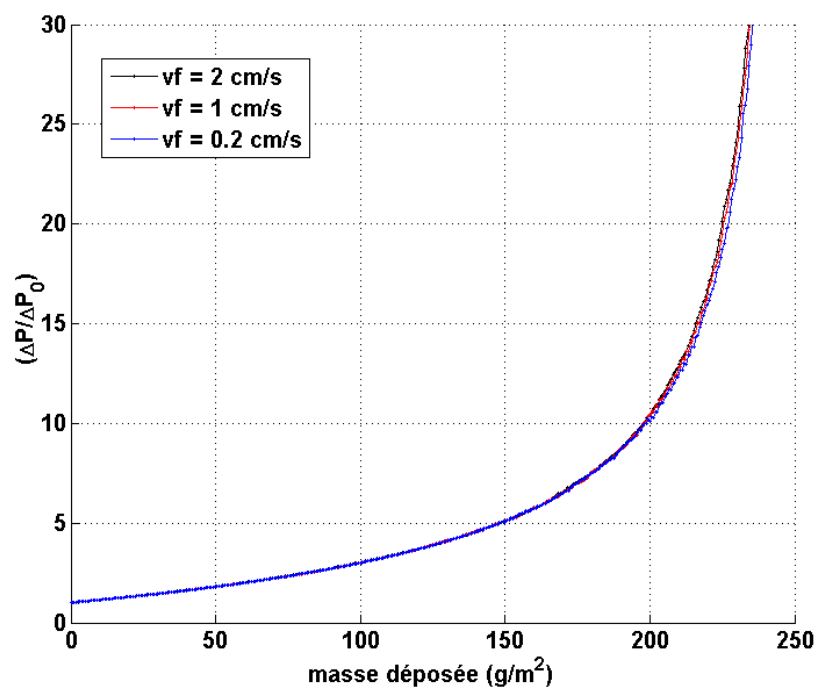


Figure 83 : évolution de la perte de charge du pli selon la masse déposée pour trois vitesses de filtration différentes

Afin de tester l'influence de la taille des particules sur la géométrie du dépôt formé sur la surface du pli, les mêmes simulations numériques ont été réalisées avec une distribution granulométrique différente (cf. Tableau 15).

La Figure 84 représente une comparaison du rapport de réduction de surface pour deux diamètres moyens différents. On en conclut que pour des distributions granulométriques monomodales avec un faible écart type, la réduction de surface suit une loi unique.

Nombre de particules par batch	40000
Diamètre moyen	2 μm
Écart type géométrique	1,2
Fréquence de calcul de l'écoulement	3 batches
Porosité du dépôt	80%

Tableau 15 : paramètres de la simulation GeoDict®

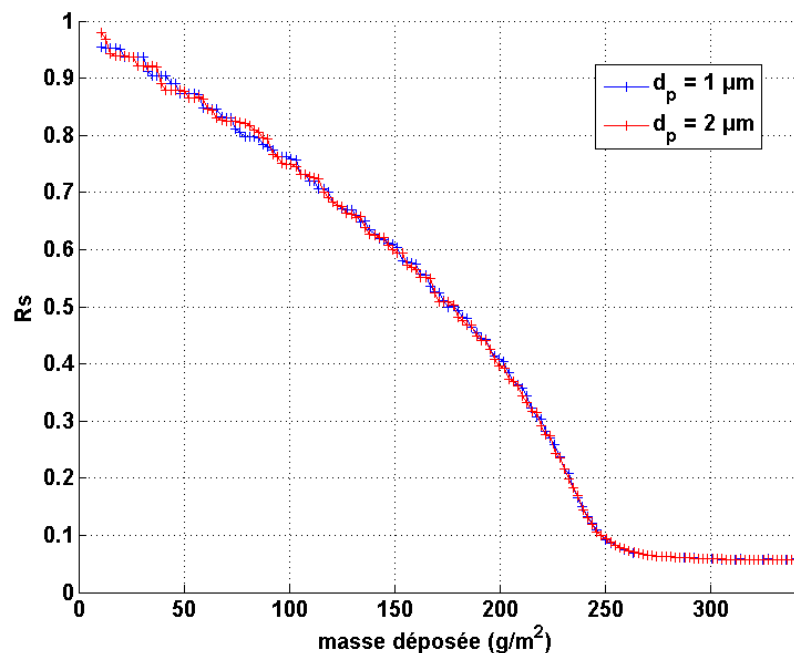


Figure 84 : évolution du rapport de la réduction de surface (R_s) en fonction de la masse déposée pour deux diamètres moyens différents

3.2.2.2. Cas d'une distribution polymodale

Afin d'évaluer l'influence de la distribution en taille des particules sur le colmatage des médias plissés, on réalise des simulations numériques de colmatage avec des particules ayant la densité d'alumine dont la distribution est bimodale. Comme dans le cas précédent (3.2.2.2), la porosité du dépôt est considérée constante afin d'identifier l'influence seule de la taille sur la formation du dépôt. On considère deux distributions avec des modes de proportions différentes (Cas 1 et Cas 2 voir Tableau 16 et Figure 85) pour deux vitesses de filtration différentes (V_n et $V_n/10$).

Paramètre	Cas 1	Cas 2
Diamètre moyen 1	1 μm	1 μm
Écart type	1,2	1,2
Diamètre moyen 2	5 μm	5 μm
Écart type	1,2	1,2
Proportion en nombre du 1 ^{er} mode	50%	70%
Proportion en nombre du 2 ^{ème} mode	50%	30%
Porosité du dépôt	60%	60%
Particules par batch	2000	2000

Tableau 16 : distributions granulométriques des particules utilisées dans les simulations

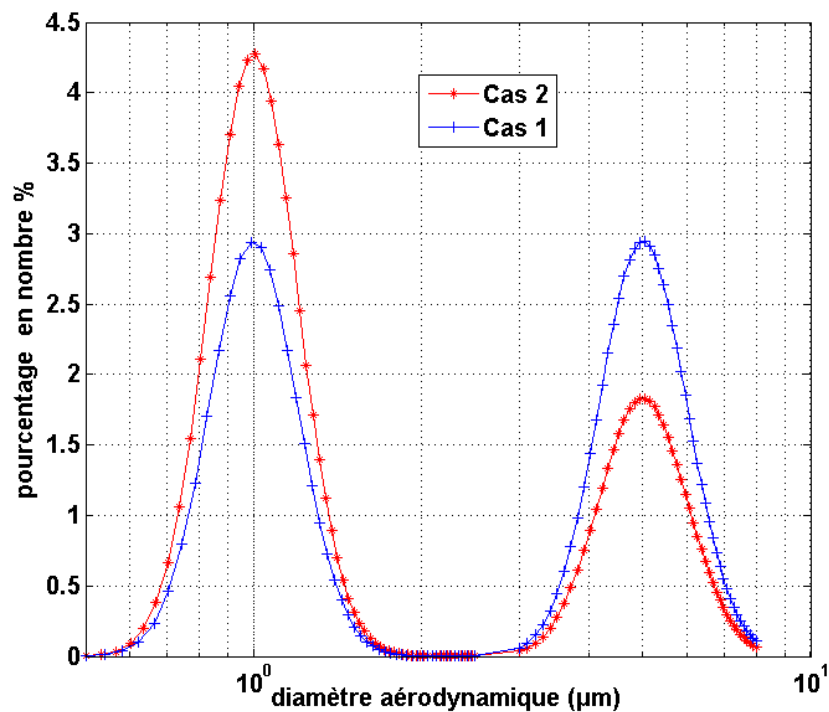


Figure 85 : distribution granulométrique en nombre pour les des deux cas

La Figure 86 représente l'évolution du facteur de réduction de surface, pour les différentes simulations numériques effectuées.

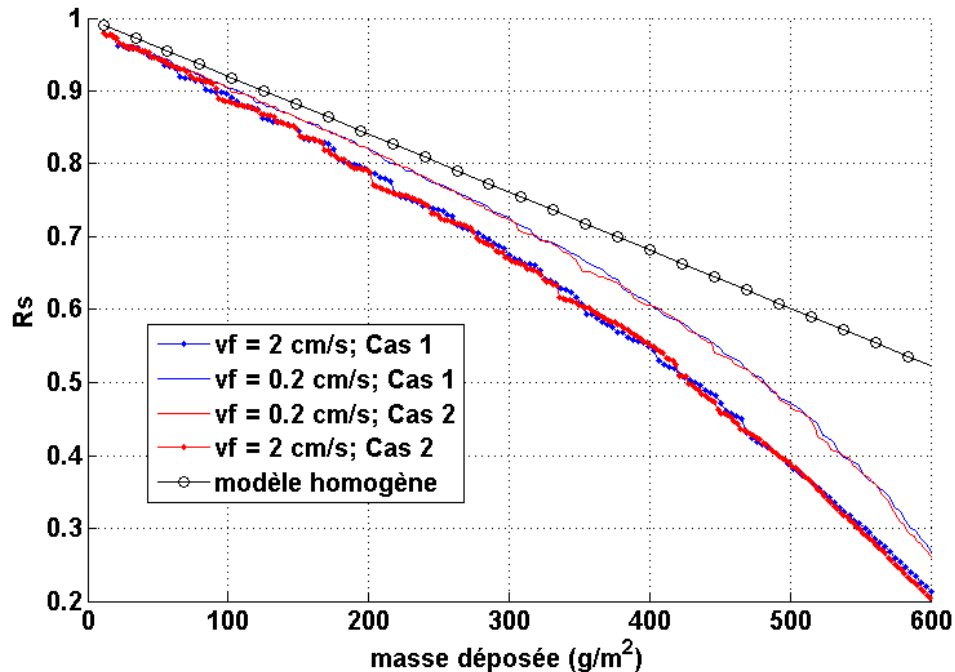


Figure 86 : évolution du rapport de la réduction de surface (R_s) en fonction de la masse déposée sur le média plissé pour deux vitesses de filtration différentes (V_n , $V_n/10$) et deux distributions granulométriques différentes (Cas 1, Cas 2)

Contrairement à celles réalisées auparavant, en utilisant une distribution monomodale avec des diamètres inférieurs à $2 \mu m$, la réduction de la surface de filtration dépend ici de la vitesse de filtration et est plus rapide pour la plus grande valeur (2 cm/s). Dans les deux cas, l'écart avec la courbe du dépôt homogène est plus important que celui pour les simulations précédentes (avec des diamètres $< 2 \mu m$). Cette différence peut être expliquée par deux phénomènes :

- L'inertie des particules :

L'inertie des particules est liée à leur vitesse, leur taille et leur densité ($\sim \rho d^3 v^2$). Dans les cas 1 & 2, les distributions de particules utilisées contiennent des particules de grande taille ($\sim 5 \mu m$). Ainsi, au cours du colmatage, du fait de leur inertie, ces particules ont tendance à s'accumuler au fond du pli formant un dépôt préférentiel à cet endroit, augmentant par conséquent le taux de réduction de la surface de filtration comme dans le cas de Hettkamp (2011) et Fotovati (2011).

- La polydispersion des particules

La polydispersion des particules induit une inhomogénéité dans la formation du dépôt. En effet, en allant de plus en plus au fond du pli, le nombre des particules de plus grande taille qui arrivent à la surface du média, devient de plus en plus important : les « grosses particules » n'arrivent pas à suivre les lignes de courant s'engouffrent vers le fond du pli. Ainsi, à porosité égale, les différents voxels ne se remplissent pas de la même manière formant par conséquent, un dépôt inhomogène. Des espaces moins remplis ou vides peuvent donc apparaître et contribuer à une diminution plus rapide de la surface de filtration.

Les deux phénomènes cités précédemment sont couplés : La polydispersion des particules génère des espaces plus remplis que d'autres au sein du dépôt créant ainsi une inhomogénéité (cf. plus loin à 3.2.3 Figure 91). À échelle locale, ces zones peuvent être considérées comme

des dendrites et donc des zones préférentielles de dépôt par impaction (par analogie avec les modes de collecte des médias poreux). L'impaction des particules croît avec la vitesse de filtration et accentue donc le taux de perte de la surface de filtration.

L'utilisation de deux proportions différentes des modes des particules ((50%,50%) et (70%,30%)), n'y a pas eu d'impact significatif sur la croissance du dépôt et donc sur l'évolution de la résistance aéraulique du filtre (cf. Figure 87).

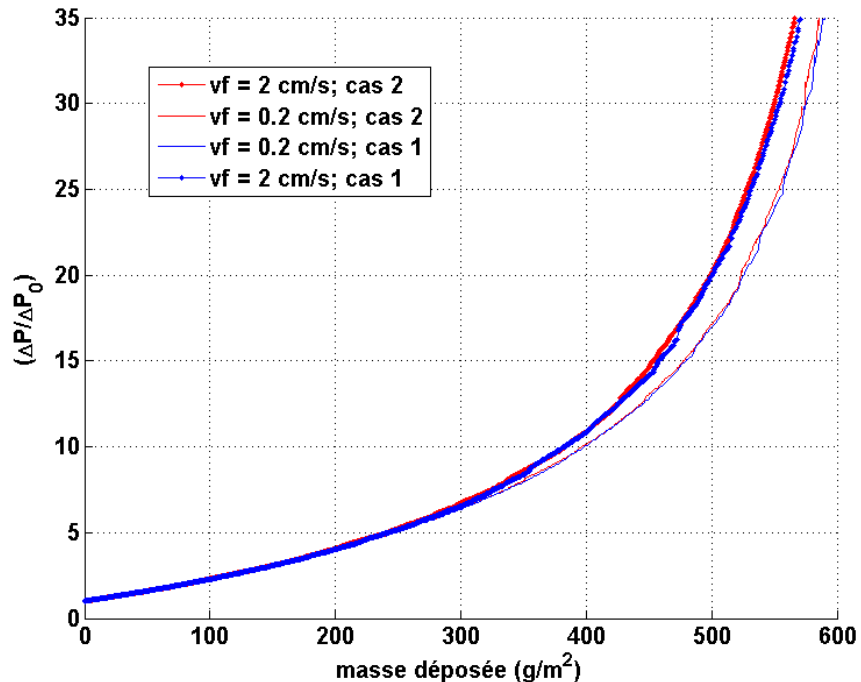


Figure 87 : évolution de la perte de charge pour deux vitesses de filtration différentes (V_n , $V_n/10$) et deux distributions granulométriques différentes (cas 1, cas 2)

3.2.2.3. Comparaison avec les résultats expérimentaux

On propose dans cette partie de comparer les résultats de GeoDict® avec les données expérimentales obtenues dans la section précédente (2.3.3). Des simulations numériques ont été réalisées en reprenant pour chaque vitesse de filtration la distribution granulométrique utilisée au cours de l'essai expérimental. Le tableau suivant résume les caractéristiques de la distribution granulométrique utilisée.

Vitesse de filtration (cm/s)	Premier mode (μm)	Écart type	Fraction en nombre (γ_1)	Deuxième mode (μm)	Écart type	porosité
0,2	0,8	1,5	0,95	5,9	1,2	74 %
2,34	0,83	1,5	0,86	5,8	1,2	60 %

Tableau 17 : distributions des particules d'alumine utilisées dans les simulations numériques

La comparaison a été réalisée pour deux vitesses de filtration différentes :

- vitesse de filtration de 2,34 cm/s :

Comme le montre la Figure 88, les résultats issus de la simulation numérique sont en bon accord avec les résultats expérimentaux.

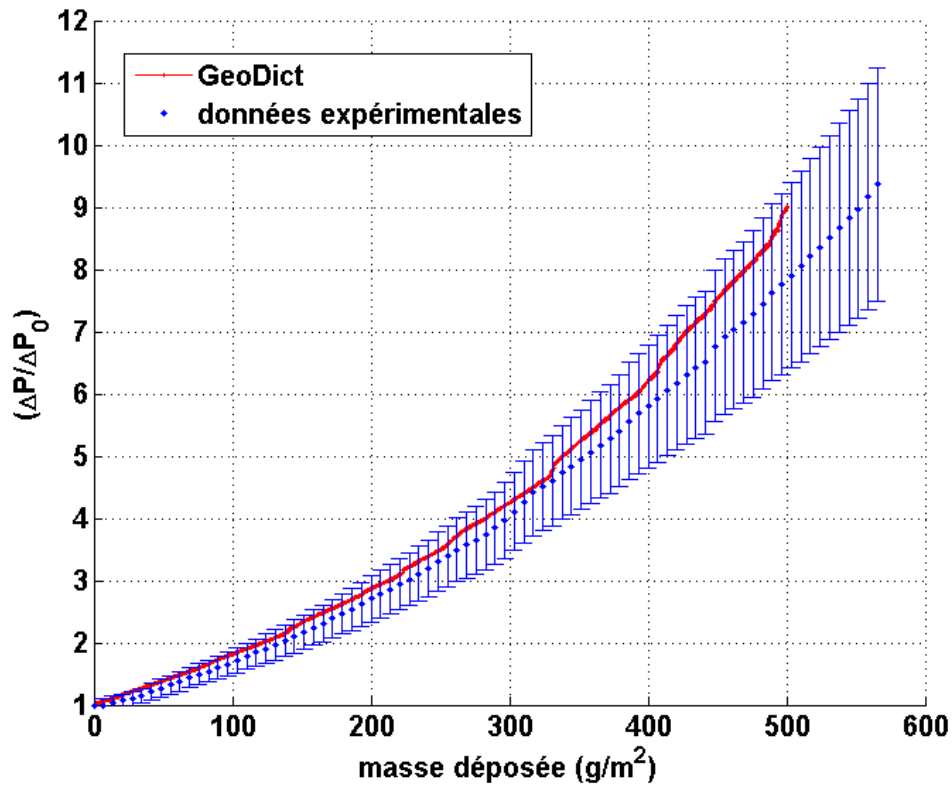


Figure 88 : comparaison des résultats numériques issus de GeoDict® avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 2,34 cm/s

- faible vitesse de filtration (0,2 cm/s) :

La Figure 89 représente une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux pour une vitesse de filtration de 0,2 cm/s. Pour des masses inférieures à 320 g/m², les valeurs correspondent aux résultats expérimentaux. Néanmoins à partir de cette masse les valeurs numériques surestiment les données expérimentales.

L'écart constaté peut être imputé à une éventuelle réorganisation du dépôt au cours du colmatage, non prise en compte dans la simulation. En effet, dans un processus réel de colmatage, l'accumulation du dépôt à proximité des zones contenant des espaces vides engendre une augmentation des contraintes aérauliques appliquées à ces endroits (forces de trainée) conduisant à une fragilisation du dépôt : des structures formées se désintègrent et des fragments de dendrites peuvent être entraînés au fond du pli. Ainsi, des espaces initialement vides se remplissent, ce qui diminue le taux d'évolution de la réduction de la surface de filtration au cours du colmatage. Ce phénomène se traduit par des brèves chutes de perte de charge (cf. Figure 89) et diminue le taux d'évolution de la perte de charge au cours du colmatage.

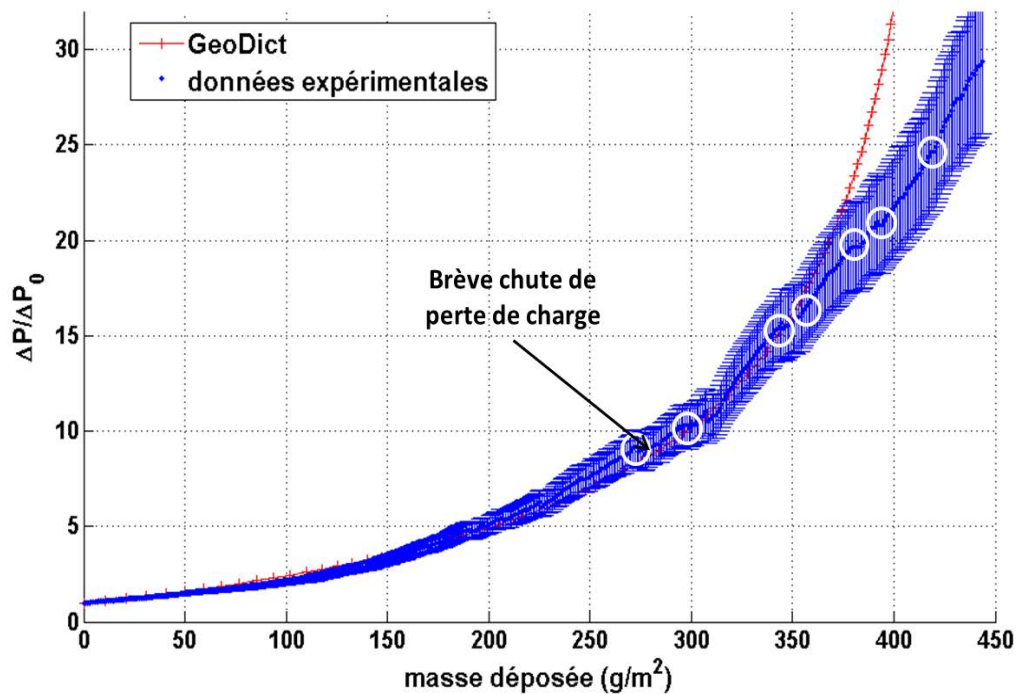


Figure 89 : comparaison des résultats numériques issus de GeoDict® avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 0,2 cm/s

3.2.3. Porosité macroscopique

Au cours du colmatage d'un pli de filtre THE, Bourrous (2014) a constaté la formation de dendrites à l'entrée du pli engendrant son obstruction (cf. Figure 90). Ces dendrites semblent se former sur les fibres à la surface du média.

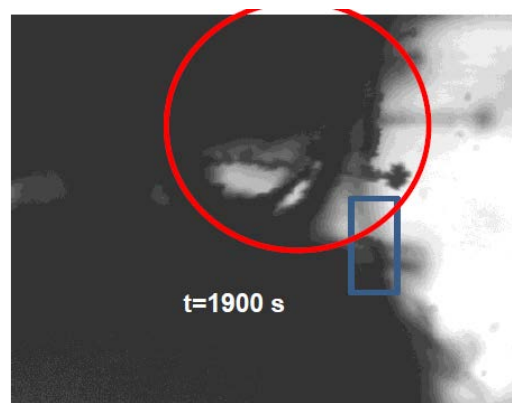


Figure 90 : image de l'entrée de pli au cours du colmatage à une vitesse de filtration de 0,25 cm/s (Bourrous 2014)

D'autres travaux numériques montrent aussi la formation de dendrites sur toute la longueur du pli pour des particules microniques (Saleh et al. 2014). La formation de ces dendrites influence le taux de perte de surface de filtration au cours du colmatage. La caractérisation précise de son évolution au cours du temps reste indispensable pour la modélisation du colmatage.

Précédemment nous avons démontré que la structure du dépôt peut contenir des espaces vides augmentant ainsi le volume apparent du dépôt et occasionnant par conséquent une réduction supplémentaire de la surface de filtration (cf. Figure 91). De ce fait, considérer le seul

paramètre de la porosité ε n'est désormais plus suffisant pour caractériser un dépôt sur un média plissé.

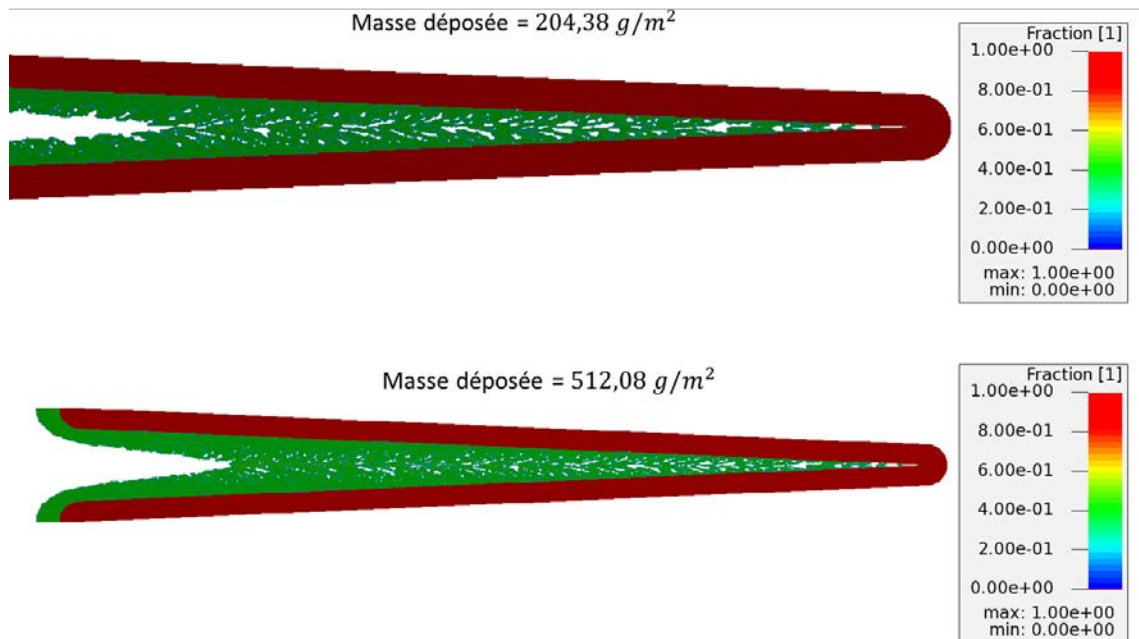


Figure 91 : formation du dépôt à deux instants différents (pour les conditions de simulation cf. Tableau 17— vitesse de 2,34 cm/s)

L'apparition de ce vide dans le dépôt vient s'ajouter au vide qui constituerait le dépôt s'il est étagé formé sur filtre plan (caractérisé par la porosité ε). Ainsi, il peut être caractérisé par une porosité additionnelle qu'on appellera porosité macroscopique, notée δ . Pour faciliter la compréhension de la définition de ce paramètre, on considère la Figure 92 qui schématise un dépôt {gâteau + vide} formé à la surface d'un média plissé.

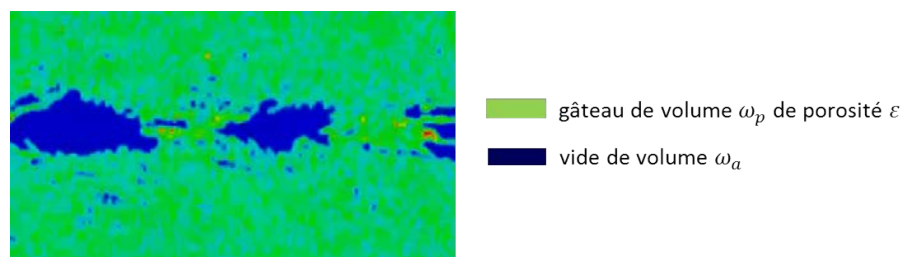


Figure 92 : schématisation d'un dépôt {gâteau + vide}

δ est défini comme le rapport entre l'espace vide (ω_a) contenu dans le dépôt et le volume total de ce dernier ($\omega_a + \omega_p$) :

$$\delta = \frac{\omega_a}{\omega_a + \omega_p} \quad \text{Équation 97}$$

Du fait de sa définition, ce paramètre peut être calculé si et seulement si le dépôt n'est formé que par deux types de voxels :

- voxels vides
- voxels ayant atteint la porosité limite ε

Or, dans les simulations numériques (comme dans un processus réel de colmatage), des voxels ayant une valeur intermédiaire de porosité existent au sein du dépôt. Pour surmonter ce problème, on l'assimile à un dépôt fictif ayant la même porosité moyenne ε_{moy} , dans ce cas, δ peut être calculée de la manière suivante :

$$\delta = 1 - \frac{1 - \varepsilon_{moy}}{1 - \varepsilon} \quad \text{Équation 98}$$

Où :

$$\varepsilon_{moy} = 1 - \frac{\sum_1^{N_v} \alpha_i}{N_v} \quad \text{Équation 99}$$

Avec α_i la fraction volumique du dépôt contenu dans chaque voxel et N_v le nombre total de voxels constituant le dépôt. La porosité macroscopique dépend de la masse déposée sur le filtre. Ainsi pour rendre compte de son évolution au cours du temps, elle est calculée au sein du dépôt formé à la fin de chaque batch (cf. Figure 93). Les coordonnées du dépôt sont déterminées via des programmes numériques, à la fin de chaque batch, implémentés en langage Python au sein de GeoDict®.

L'implémentation directe de routines dans le code de calcul GeoDict® sans passer par un logiciel tierce (pas de relecture les résultats) réduit drastiquement le temps de traitement des données.

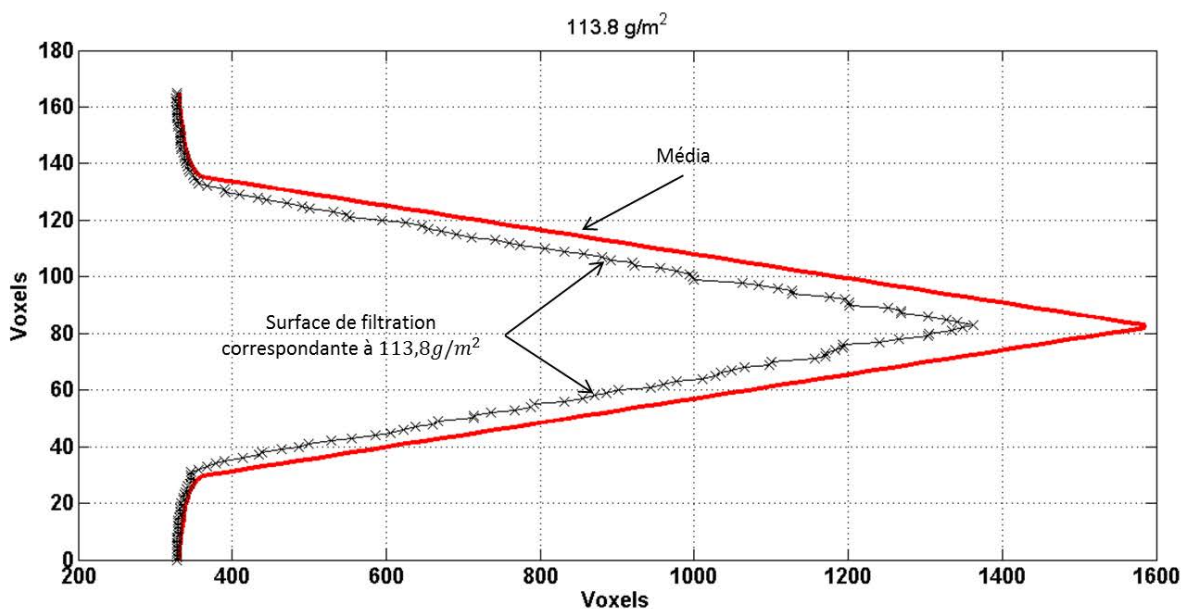


Figure 93 : schématisation de la surface du dépôt pour une masse déposée de $113,8 \text{ g/m}^2$

La Figure 94 représente l'évolution de δ en fonction de la masse déposée sur le filtre pour deux vitesses de filtrations $0,2 \text{ cm/s}$ et 2 cm/s (configuration expérimentale). Aux premiers instants de colmatage, la porosité δ atteint sa valeur maximale et est égale pour les deux vitesses de filtration. En effet, pour les premières couches, le dépôt de particules au fond du pli se caractérise par un important taux de vide dû à son étroitesse. Le dépôt à ce stade semble dépendre de la taille des particules et de la géométrie du fond du pli mais pas de la vitesse de filtration. Ensuite la porosité macroscopique diminue et atteint 26% dans le cas de la vitesse nominale de filtration et 18% pour la vitesse de $0,2 \text{ cm/s}$.

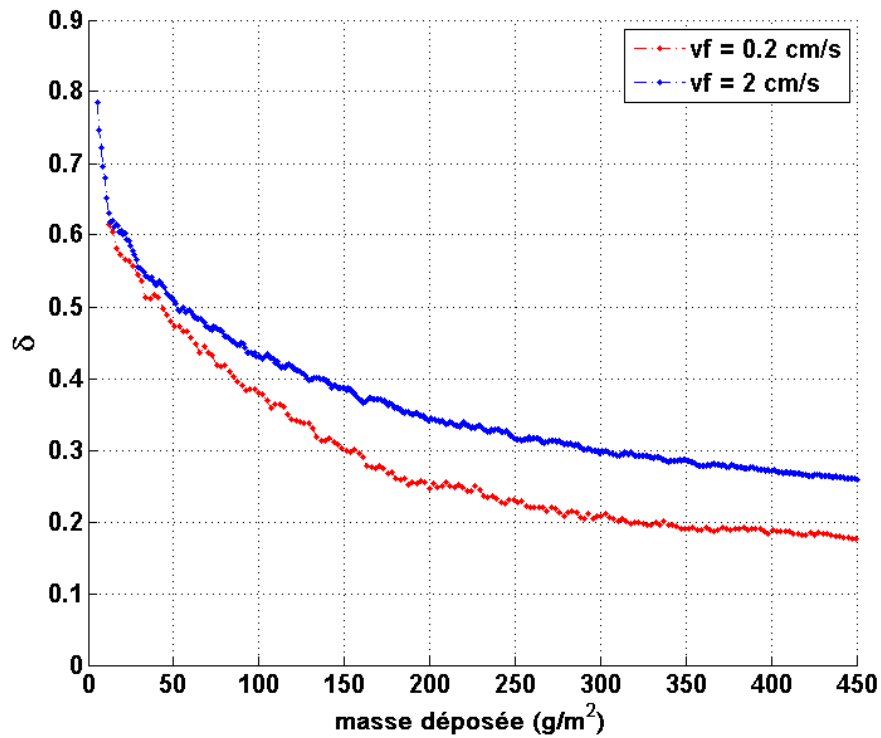


Figure 94 : évolution de la porosité macroscopique en fonction de la masse déposée pour deux vitesses de filtration (configuration expérimentale cf. Tableau 17)

La Figure 95 représente l'évolution de la porosité macroscopique calculée dans le cas des simulations réalisées précédemment (Tableau 17).

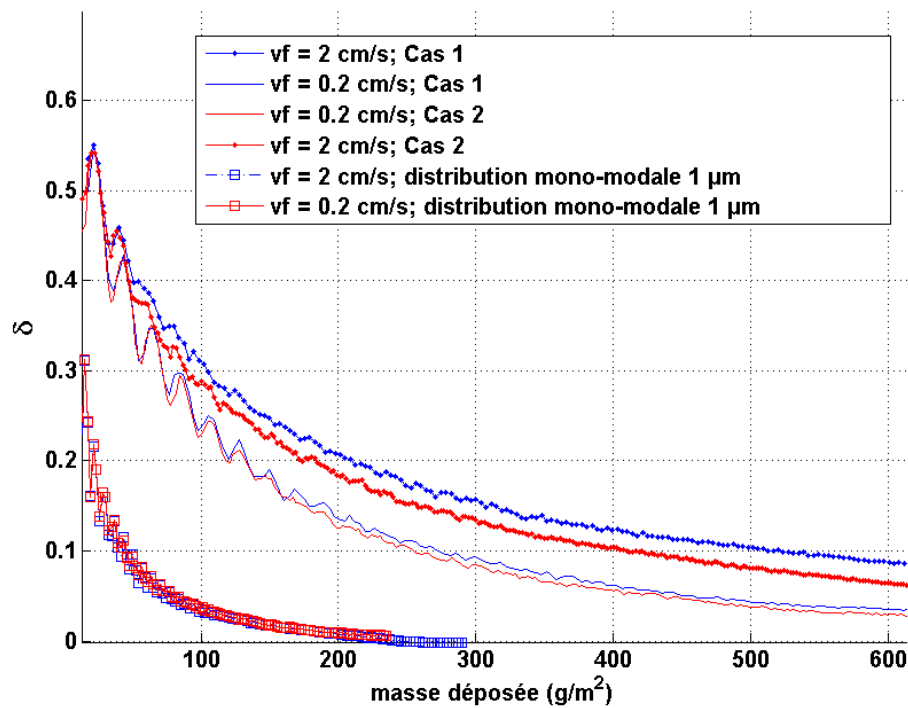


Figure 95 : évolution de la porosité macroscopique en fonction de la masse déposée pour différentes vitesses de filtration et distributions granulométriques utilisées dans les simulations précédentes (Tableau 17)

Pour les distributions bimodales, la porosité macroscopique varie entre 50% et 10% pour la vitesse nominale de filtration et jusqu'à 5% pour la vitesse de 0,2 cm/s. Dans le cas 2 (70% du mode (1 μ m)), δ diminue plus rapidement, ceci est potentiellement dû à la présence majoritaire de particules de petite taille pour lesquelles, on a constaté une formation de dépôt plus homogène.

La diminution constatée de la porosité macroscopique au cours du colmatage, est accentuée par l'augmentation de la vitesse de filtration mais semble ne pas avoir un impact significatif sur l'évolution de la résistance aéraulique du dépôt (cf. Figure 87).

Pour les distributions monomodales de 1 μ m, le dépôt n'est pas parfaitement homogène : pour les premières couches de dépôt, la porosité δ atteint une valeur de 25% puis diminue rapidement et s'annule.

Sur la Figure 95 on peut constater que les chutes de δ sont directement suivies par une augmentation de cette dernière, engendrant une allure oscillante de la courbe d'évolution de la porosité macroscopique. En effet, quand deux dendrites entrent en contact un volume important, initialement destiné au dépôt, est perdu, ce qui se traduit par une augmentation rapide de δ , ensuite l'écoulement se fait de part et d'autre de cette formation particulière, les particules se déposent alors autour de cette formation, ce qui engendre une diminution de δ . La suite de ces deux phénomènes au cours du colmatage se traduit par des fluctuations au niveau de la porosité macroscopique.

Au fur et à mesure que les particules se déposent sur le filtre la porosité macroscopique diminue. Le taux de diminution est plus important pour les petites vitesses de filtration. En effet, par analogie avec les modes de collecte par les fibres, l'impaction des particules sur les irrégularités formées à la surface du dépôt croît avec l'augmentation de la vitesse de filtration.

À la fin de la phase de la réduction de surface (remplissage du pli et passage à une filtration en surface), la valeur de la porosité moyenne ε_{moy} devient constante. Ainsi, la porosité macroscopique diminue jusqu'à atteindre une valeur limite.

3.3. Simulation numérique du colmatage à l'aide de ANSYS CFX®

La comparaison entre les résultats issus de codes de calculs différents constitue une étape importante de la validation de ces derniers. Dans cette partie nous proposerons une plateforme numérique permettant de simuler la croissance du dépôt de particules sur un média plissé THE.

La validation d'ANSYS CFX® par rapport à l'écoulement a été réalisée dans des travaux antérieurs (chapitre précédent), Il convient donc de se baser sur ce code de calcul pour le développement de la plateforme numérique.

3.3.1. Principes de simulation

3.3.1.1. Domaine de calcul

En se basant sur la même approche que celle utilisée dans GeoDict®, un batch (ensemble) de particules est injecté dans le domaine de calcul, puis transporté par l'écoulement (via un calcul ANSYS CFX®). Arrivées sur le média (ou le dépôt déjà constitué), elles modifient les caractéristiques aérauliques des cellules dans lesquelles elles se déposent et disparaissent du domaine de calcul.

La première étape consiste à définir une zone de dépôt dans le canal d'écoulement du pli. En se basant sur les coordonnées du domaine poreux utilisé dans les simulations ANSYS CFX®, une interface primaire est déterminée et permet de faire la liaison entre le média et le dépôt. La zone de dépôt est ensuite discrétisée suivant un maillage « virtuel » (cf. Figure 96). L'épaisseur de cette zone ainsi que les paramètres géométriques du maillage sont des données d'entrée.

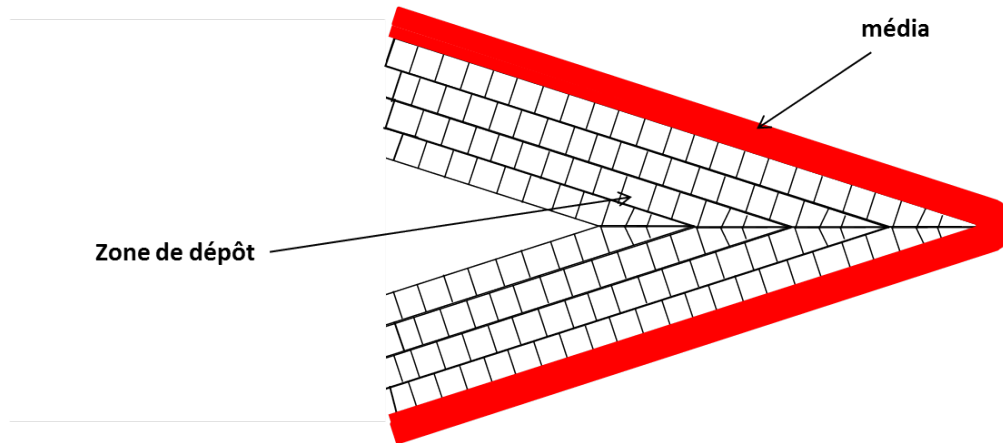


Figure 96 : schéma représentant le média et la zone de dépôt

3.3.1.2. Fraction volumique du dépôt

On définit pour chaque cellule de la zone du dépôt une fraction volumique des particules. Une cellule est considérée comme bloquée si elle atteint le volume (donc une masse) maximal de particules qu'elle peut contenir. Ce volume est défini par la porosité du dépôt (ϵ) considérée comme une donnée d'entrée des calculs. Ainsi la croissance du dépôt est caractérisée par l'évolution des fractions volumiques locales.

Quand une particule arrive à la surface d'une cellule, deux cas se présentent :

- si la cellule n'est pas bloquée, la particule est déposée à l'intérieur. La masse contenue dans cette cellule et sa perméabilité sont modifiées en conséquence en suivant le modèle de Kozeny-Carman.
- si la cellule est bloquée, la particule est déposée dans la cellule adjacente (celle traversée directement avant le contact avec la cellule bloquée)

La filtration en profondeur est négligée dans nos calculs, autrement dit toutes les cellules constituant le média sont bloquées. Cette hypothèse est acceptable pour des filtres THE pour lesquels la filtration en profondeur est un phénomène marginal. La Figure 97 représente une explication schématique du processus du dépôt utilisée dans la plateforme.

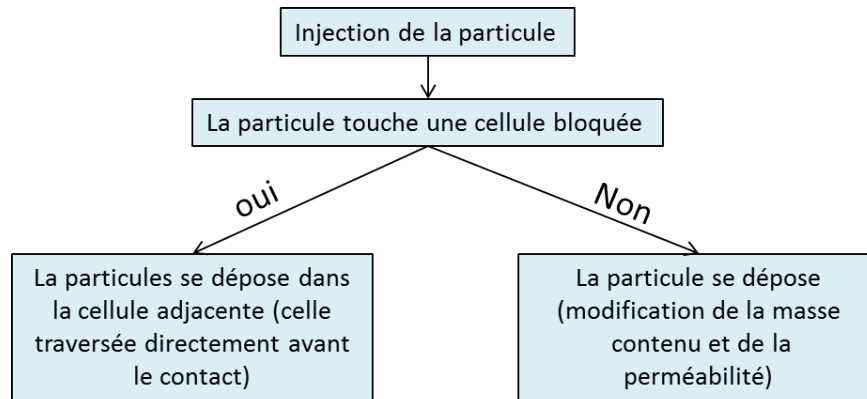


Figure 97 : schématisation du processus du dépôt implémenté dans la plateforme

3.3.1.3. Multiplicité des particules

Afin de diminuer le temps de calcul, la multiplicité des particules est utilisée. Cette méthode numérique consiste à considérer que chaque particule représente un nombre N de particules. Ainsi, pour déposer Nb particules sur le filtre, au lieu de calculer Nb trajectoires, seulement Nb/N trajectoires sont calculées. Ceci permet de réduire fortement le temps CPU, Néanmoins, une utilisation non réfléchie de ce paramètre peut influencer la forme géométrique du dépôt. Ce nombre dépend aussi de la taille des cellules de la zone du dépôt. La multiplicité est une donnée d'entrée définie par l'utilisateur.

Le flux des particules à travers les cellules de la zone du dépôt se fait via des routines écrites en PERL sous ANSYS-CFDPost®. La génération du maillage ainsi que toutes les opérations de calcul contenues dans la plateforme se fait via des routines écrites en Python (2.6.6). L'échange de données entre ANSYS CFX®, ANSYS-CFDPost®, et les autres routines se font via des fichiers formatés ASCII.

3.3.2. Algorithme

La première étape du calcul consiste à lire le maillage du média (ANSYS CFX®) et définir l'interface primaire. En se basant sur ce dernier, un maillage de la zone du dépôt est réalisé. Les porosités (nulle ou issues d'autres calculs) des cellules du dépôt sont initialisées. Notons que la géométrie du domaine est la même que celle utilisée dans les simulations précédentes (cf. 4.2.1)

Les valeurs de porosité des mailles de la zone du dépôt (ANSYS CFX®) sont calculées par interpolation de celles du maillage virtuel et intégrées dans ANSYS CFX®. Les perméabilités correspondantes se déduisent des porosités en utilisant une loi de Kozeny-Carman (Équation 88). Ensuite les particules sont injectées dans le domaine. Leurs trajectoires sont calculées avec un calcul ANSYS CFX®.

À la fin du calcul des trajectoires des particules, les débits massiques à travers la surface du dépôt sont calculés ce qui permet de mettre à jour les valeurs de la porosité dans le maillage virtuel.

Lors du calcul de la masse de particules déposée dans une cellule du maillage virtuel, il est possible de dépasser la valeur maximale définie par la porosité du dépôt. Une étape de validation est donc réalisée et permet de déplacer l'excès de particules à la cellule adjacente.

La Figure 98 représente une schématisation de l'algorithme suivi pour la réalisation du calcul.

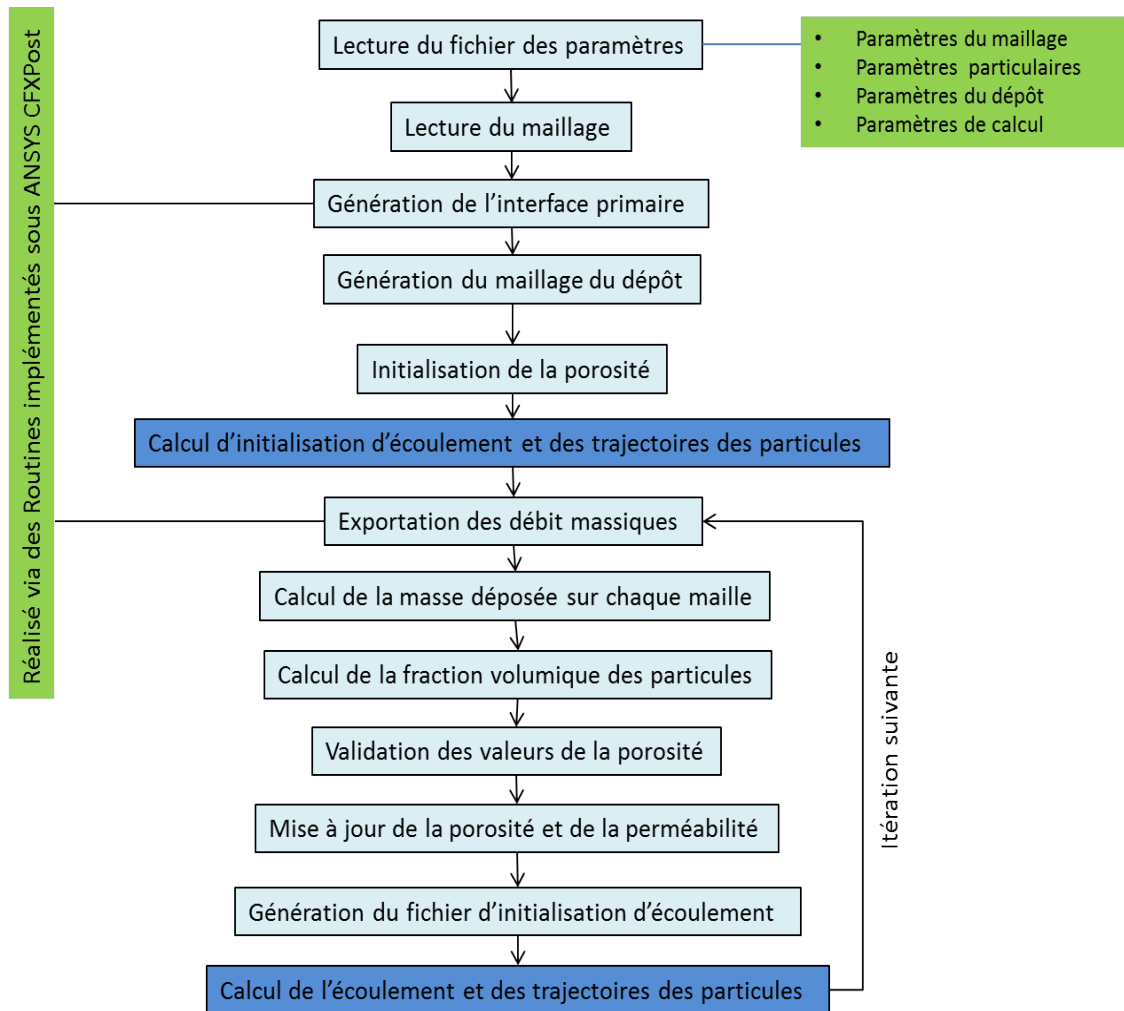


Figure 98 : schéma représentant l'algorithme utilisé dans la plateforme de simulation numérique de la formation du dépôt dans le pli

3.3.3. Résultats préliminaires

A ce stade, les résultats obtenus sont préliminaires. La Figure 99 représente l'évolution de la perte de charge d'un pli de filtre plissé THE au cours du colmatage par un aérosol d'alumine pour une vitesse nominale de filtration (V_n), en utilisant la plateforme numérique. Les résultats numériques obtenus ne sont pas suffisants pour réaliser une validation.

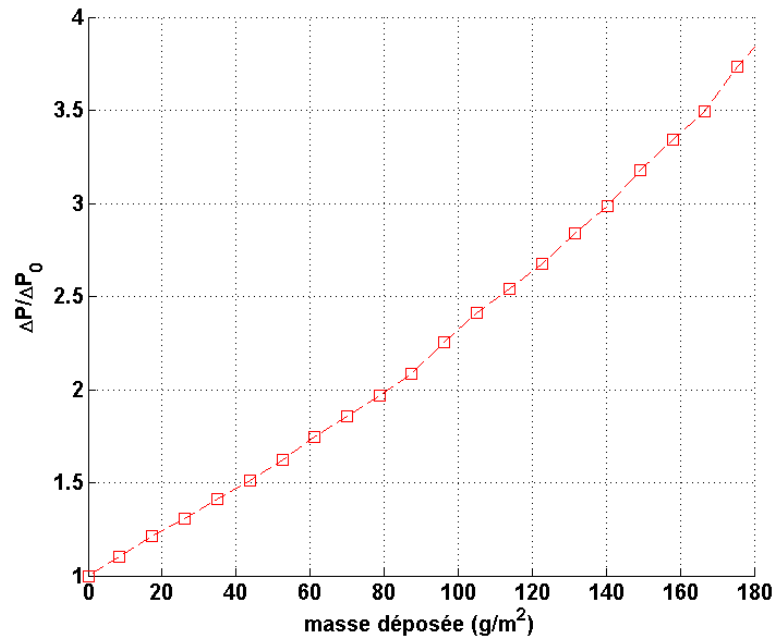


Figure 99 : évolution de la perte de charge du média plissé de filtre THE au cours du colmatage par un aérosol d'alumine pour une vitesse nominale de filtration en utilisant la plateforme numérique développée

3.4. Conclusion

L'utilisation de la simulation numérique pour la caractérisation du colmatage d'un média plissé THE, nous a été d'une grande utilité. En effet, avec le code de calcul GeoDict®, la croissance du dépôt a été caractérisée au cours du temps. Il a été démontré que le dépôt des particules de diamètre $< 2 \mu m$ sur les médias plissés se fait en exploitant la totalité du volume disponible dans la zone de l'écoulement du pli. Au contraire, dans le cas des distributions de particules polymodales, des espaces vides apparaissent au sein du dépôt conduisant à une perte plus rapide de la surface de filtration. Un nouveau paramètre : porosité macroscopique, a été introduit pour caractériser quantitativement cette inhomogénéité. Une comparaison des résultats numériques de perte de charge (GeoDict®) avec des données expérimentales a montré un accord satisfaisant.

Parallèlement à ces travaux, une plateforme numérique permettant de simuler la formation du dépôt à la surface d'un média plissé a été développée avec ANSYS CFX®. Elle constitue une base solide pour le développement dans des travaux futurs, d'un outil numérique ayant comme objectif la simulation du colmatage.

La simulation numérique est un outil performant qui permet de caractériser finement la perte de charge d'un filtre plissé. Néanmoins, le temps nécessaire pour la mise en place de la simulation et du calcul peut être relativement long. Il est aussi indispensable de disposer de moyens de calcul performants pour la réalisation de ce genre de simulations. Ces contraintes peuvent représenter un frein à l'utilisation de la simulation numérique dans ce domaine. Dans ce qui suit, tout en se basant sur les résultats expérimentaux et numériques, nous allons développer un modèle simple et rapide de colmatage des filtre plissés THE.

4. MODELISATION DU COLMATAGE D'UN FILTRE PLISSE THE

4.1. Introduction

Dans la littérature, différents modèles permettant de prédire l'évolution de la perte de charge d'un dépôt sur filtres plans, existent pour des particules microniques (Endo et al. 1997) comme pour des particules très fines (Thomas et al. 2011; Bourrous et al. 2016). Ces modèles restent applicables dans le cas des filtres plissés pour des très faibles masses déposées, où l'impact du dépôt sur la surface effective de filtration est négligeable.

Au cours du colmatage, l'évolution de la perte de charge est pilotée d'une part, par la géométrie et la structure du dépôt (ε, δ), d'autre part par la perte de charge due au rétrécissement du canal d'écoulement du pli. Par conséquent, les modèles géométriques de colmatage tels que ceux développés par Del Fabbro 2001 ou Hettkamp 2011, qui ne prennent pas en compte l'inhomogénéité du dépôt et son évolution temporelle au cours du colmatage, ne sont pas suffisants pour caractériser la résistance aéraulique du filtre surtout pour les particules inertielles (taille et masse volumique élevées, vitesse de filtration importante).

Dans ce travail, un modèle décrivant l'évolution de la perte de charge d'un filtre plissé THE au cours du colmatage à débit constant, est proposé. L'approche utilisée se base sur la modélisation de chaque contribution à la perte de charge. Tout d'abord nous commençons par formuler la perte de charge pour un dépôt inhomogène en se basant sur le modèle de Kozeny-Carman.

4.2. Formulation générale de la perte de charge d'un dépôt inhomogène selon Kozeny-Carman

Le modèle développé dans ce travail repose sur une adaptation du modèle de Kozeny-Carman développé initialement pour un dépôt sur filtre plan. Nous allons adapter ce modèle à une situation plus générale : pour des particules (distribution polymodale et lognormale) et des dépôts inhomogènes en épaisseur et en porosité.

On considère des particules dont la distribution granulométrique est polymodale (N modes) lognormale telle que :

$$f(\ln d) = \sum_{i=0}^N \gamma_i f_i(\ln d) \quad \text{Équation 100}$$

où,

$$f_i(\ln d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_i} \exp \left(- \left(\frac{\ln d - \ln d_i}{\sqrt{2} \ln \sigma_i} \right)^2 \right) \quad \text{Équation 101}$$

avec,

$$\sum_{i=0}^N \gamma_i = 1 \quad \text{Équation 102}$$

avec d_i les diamètres moyens, σ_i les écarts types géométriques, γ_i la fraction en nombre de chaque mode de particules. En suivant le même raisonnement appliqué en 2.3.2, la perte de charge du dépôt formé par ces particules sur filtre plan, d'épaisseur w , de compacité α et traversé par l'air avec une vitesse de filtration V_f , peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta P_{ko-ca} = h_k \mu \frac{36\alpha^2}{(1-\alpha)^3} R_p V_f w \quad \text{Équation 103}$$

Et

$$R_p = \frac{\sum_0^N \gamma_i d_i \exp\left(\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_i\right)}{\sum_0^N \gamma_i d_i^3 \exp\left(\frac{9}{2} \ln^2 \sigma_i\right)} \quad \text{Équation 104}$$

Considérant un dépôt inhomogène formé sur un média quelconque comme représenté sur la Figure 100.

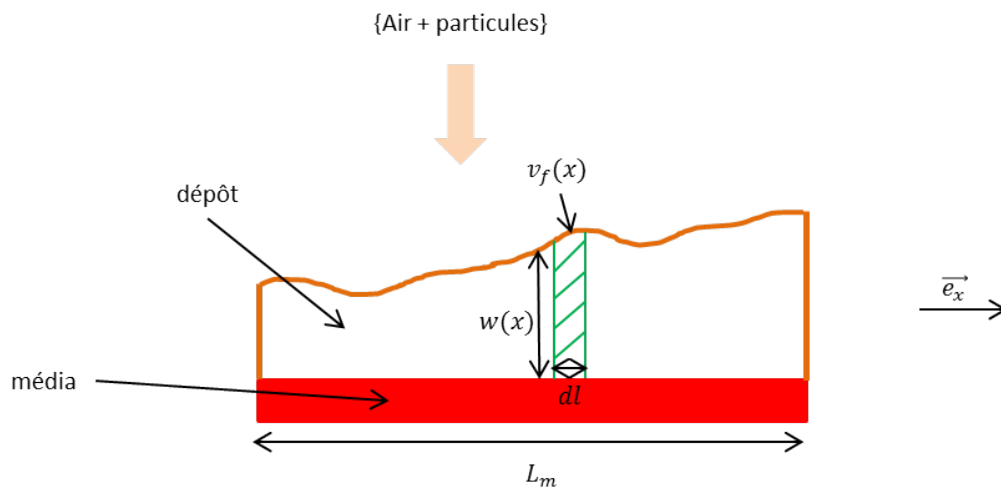


Figure 100 : schéma illustratif d'un dépôt inhomogène

Soit ΔP_g la perte de charge du gâteau, la force de trainée appliquée au dépôt par l'écoulement d'air par unité de longueur s'écrit sous la forme :

$$F = \Delta P_g L_m = \int_0^{L_m} dP_{ko-ca} dx \quad \text{Équation 105}$$

Avec dP_{ko-ca} est la perte de charge que subit la tranche infinitésimale (en vert sur la Figure 100) en x de largeur dl , d'épaisseur locale $w(x)$, de porosité $\alpha(x)$, traversée par une vitesse $v_f(x)$ et L_m est la longueur du média. La substitution de l'Équation 103 appliquée localement dans l'Équation 105 conduit à une expression de la perte de charge ΔP_g :

$$\Delta P_g = \frac{36R_p h_k \mu}{L_m} \int_0^{L_m} \frac{\alpha(x)^2}{(1-\alpha(x))^3} v_f(x) w(x) dx \quad \text{Équation 106}$$

4.3. Principe et hypothèse du modèle

Considérant un dépôt sur filtre plissé comme représenté sur la Figure 101. La perte de charge globale du filtre est la somme de trois contributions :

- la perte de charge du média noté ΔP_d ;
- la perte de charge du gâteau formé sur la surface du filtre ΔP_g ;
- la perte de charge engendrée par la forme plissée du dépôt notée ΔP_f

Ainsi la perte de charge du filtre ΔP est égale à :

$$\Delta P = \Delta P_d + \Delta P_g + \Delta P_f \quad \text{Équation 107}$$

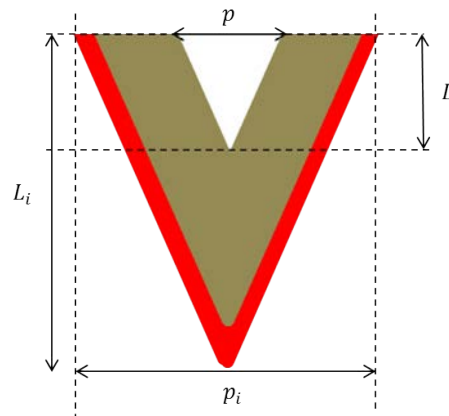


Figure 101 : schématisation d'un dépôt sur un filtre plissé avec les paramètres géométriques le caractérisant

4.3.1. Perte de charge du média (ΔP_d)

Au sein du média, le nombre de Reynolds est égal :

$$Re = \frac{\rho V_f \sqrt{k}}{\mu} \quad \text{Équation 108}$$

Où ρ est la masse volumique du fluide, V_f est la vitesse de filtration, k est la perméabilité du média et μ représente sa viscosité. Dans la configuration de filtration dans les installations nucléaire française où la vitesse nominale de filtration est de 2 cm/s le $Re \ll 1$. Cette perte de charge est modélisée par une loi de Darcy (voir chapitre précédent).

4.3.2. Perte de charge du gâteau (ΔP_g)

Pour cette contribution on se base sur l'Équation 106 qui représente une formule générale de la perte de charge adaptée à un dépôt quelconque. On décompose le dépôt en couches élémentaires uniformes contenant chacune une masse dm et ayant une épaisseur w_i comme montré sur la Figure 102.

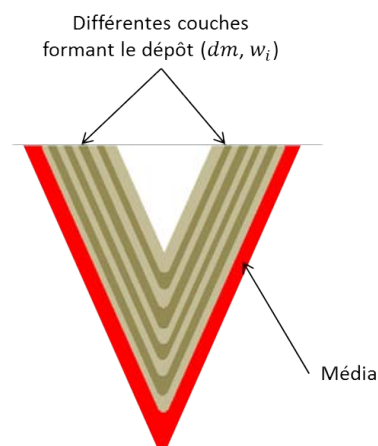


Figure 102 : décomposition du dépôt en couches

On considère que sur toute la couche i la compacité α_i est constante et est traversée par l'air à une vitesse V_{fi} . Pour chaque couche élémentaire i , d'épaisseur w_i la perte de charge correspondante est notée ΔP_{gi} , ainsi, sous ses hypothèses :

$$\Delta P_{gi} = h_k \mu \frac{36\alpha_i^2}{(1-\alpha_i)^3} R_p V_{fi} w_i \quad \text{Équation 109}$$

Le paramètre R_p décrit la distribution des particules, il est donc constant pour toutes les couches, h_k est la constante de Kozeny, on utilise la corrélation de Carroll citée par (Chen, 1982) :

$$h_k(\alpha) = 5 + \exp(14(0,2 - \alpha)) \quad \text{Équation 110}$$

Il a été démontré précédemment que le dépôt formé sur un média plissé peut contenir des espaces vides engendrés par une inhomogénéité de la formation du dépôt. Ce vide a été caractérisé par la porosité macroscopique δ (cf. 3.2.3). Ainsi, dans notre modèle chaque couche représente l'ensemble {gâteau + vide} (cf. Figure 103). La proportion du vide est calculée en utilisant la porosité macroscopique δ , de la manière suivante :

$$S_{vi} = \frac{\delta}{1-\delta} S_{gi} \quad \text{Équation 111}$$

Avec S_{vi} est la surface du vide contenu dans la couche i , et S_{gi} celle du gâteau dans la même couche. On raisonne en termes de surface étant donné que le modèle est développé en 2D. Notons que l'ajout de cette espace vide n'influence pas les pertes de charge élémentaires ΔP_{gi} , en revanche, la masse d'aérosols que le filtre peut contenir est réduite.

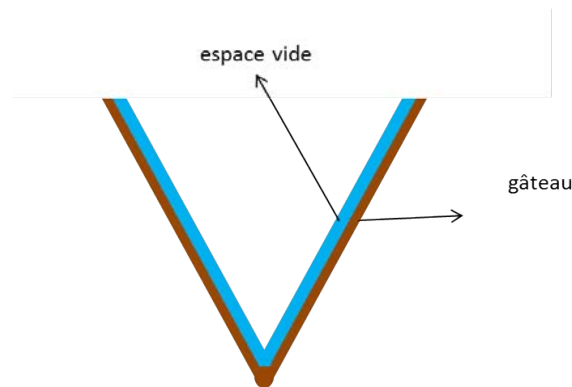


Figure 103 : schématisation de la construction d'une couche i

La perte de charge ΔP_g du gâteau est donc égale à la somme des pertes de charge propres à chaque couche (ΔP_{gi}) :

$$\Delta P_g = \sum_1^N \Delta P_{gi} \quad \text{Équation 112}$$

Où N est le nombre de couches qui constituent le dépôt.

4.3.3. Perte de charge du plissage (ΔP_f)

Dans le premier chapitre, Il a été démontré que lors de son écoulement dans le canal du pli, l'air perd une partie de son énergie. En effet la section de passage de l'écoulement rétrécit et

des forces de frottements entre les particules du fluide augmentent ce qui engendre une élévation de la perte de charge.

À un instant donné du colmatage, correspondant à un dépôt sur filtre comme celui représenté sur la Figure 101, on peut considérer que l'ensemble {média plissé + dépôt} est un filtre de pas p , initialement p_i et de hauteur L , initialement L_i (cf. Figure 101). Le modèle ainsi développé pour un filtre vierge, qui dépend des paramètres géométriques et de la vitesse de filtration V_f , peut être réutilisé dans le cas d'un filtre au cours du colmatage.

4.3.4. Implémentation du modèle

Tout d'abord la perte de charge du média ΔP_d est calculée. La deuxième étape consiste à décomposer le dépôt en couches. Chaque couche est représentée par une épaisseur w_i (la masse correspondante se déduit à travers la porosité ε). Afin d'obtenir une fine résolution, l'épaisseur choisie correspond à une masse de $1 \mu\text{g}$. Le débit traversant le filtre est constant est égal à Q . Après l'ajout de chaque couche élémentaire i la surface effective de filtration se réduit, le débit étant constant, la vitesse de filtration est recalculée.

La porosité est fonction de la vitesse de filtration et est recalculée à chaque itération. La perte de charge du gâteau ΔP_g est calculée en effectuant la somme de toutes les pertes de charge élémentaires.

La perte de charge due au plissage ΔP_f est déterminée en prenant en compte la surface de filtration calculée à la dernière itération. La Figure 104 résume toutes les étapes précédemment décrites.

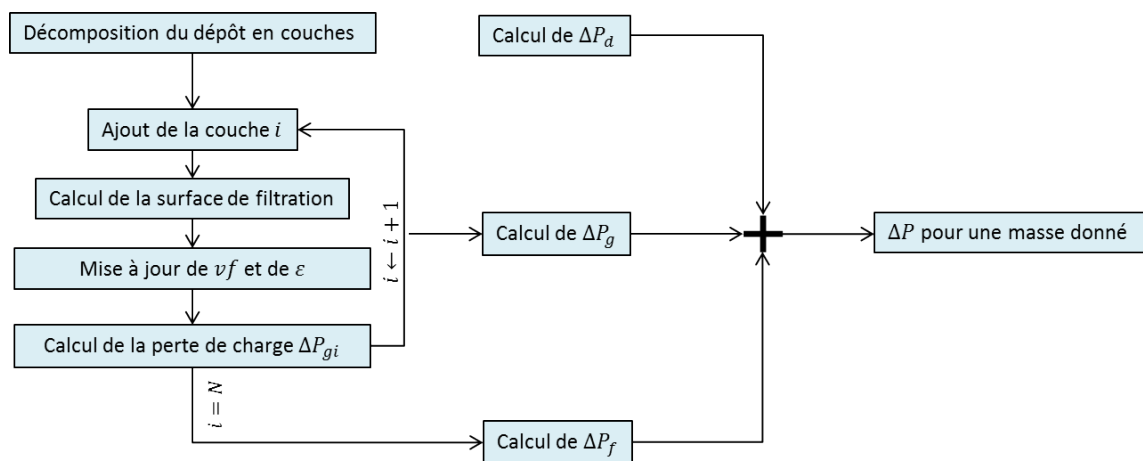


Figure 104 : algorithme de calcul

4.4. Validation du modèle

4.4.1. Comparaison avec les résultats expérimentaux

Afin de valider le modèle de perte de charge, les résultats expérimentaux de la section 2.3 sont utilisés. La distribution de la taille des particules utilisée dans l'expérience est bimodale, ainsi le facteur R_p dans l'équation est réduit à :

$$R_p = \frac{\gamma_1 d_1 \exp\left(\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_1\right) + (1 - \gamma_1) d_2 \exp\left(\frac{1}{2} \ln^2 \sigma_2\right)}{\gamma_1 d_1^3 \exp\left(\frac{9}{2} \ln^2 \sigma_1\right) + (1 - \gamma_1) d_2^3 \exp\left(\frac{9}{2} \ln^2 \sigma_2\right)} \quad \text{Équation 113}$$

Dans les expériences réalisées le débit de filtration utilisé peut influencer la distribution granulométrique des particules qui arrivent sur le média, ainsi le ratio γ_1 , les modes de la distribution et l'écart type peuvent évoluer d'une expérience à une autre. Le tableau suivant regroupe les différentes valeurs de ces paramètres en fonction de la vitesse de filtration :

Vitesse de filtration (cm/s)	Premier mode (μm)	Écart type	Fraction en nombre (γ_1)	Deuxième mode (μm)	Écart type
0,2	0,8	1,5	0,95	5,9	1,2
0,5	0,8	1,5	0,95	5,9	1,2
1	0,8	1,5	0,93	5,8	1,2
2	0,8	1,5	0,91	5,9	1,2
2,34	0,8	1,5	0,86	5,8	1,2

Tableau 18 : caractéristiques des particules utilisées dans les expériences menées

Pour chaque configuration, la détermination de la porosité macroscopique nécessite la réalisation d'une simulation numérique avec le code de calcul GeoDict® dont le temps de calcul peut être relativement long. Faute de temps, les simulations ont été réalisées pour trois vitesses de filtration : $V_n, V_n/2, V_n/10$. Pour le cas $V_n/4$ (respectivement $2,34 \text{ cm/s}$) la porosité macroscopique est égale au cas de $V_n/10$ (respectivement au cas de V_n)

Les Figure 105, Figure 106, Figure 107, Figure 108 et Figure 109 montrent une comparaison entre les résultats issus du modèle développé et les mesures expérimentales réalisées pour différentes vitesses de filtration.

- Cas de **0,2 cm/s**

Pour la plus petite vitesse de filtration, à savoir $0,2 \text{ cm/s}$ (Figure 105), la courbe représentative du modèle est globalement en bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Pour des masses déposées inférieures à 250 g/m^2 et supérieures à 350 g/m^2 , un très bon accord existe entre les mesures et le modèle. En revanche entre les deux valeurs, le modèle sousstime légèrement l'expérience.

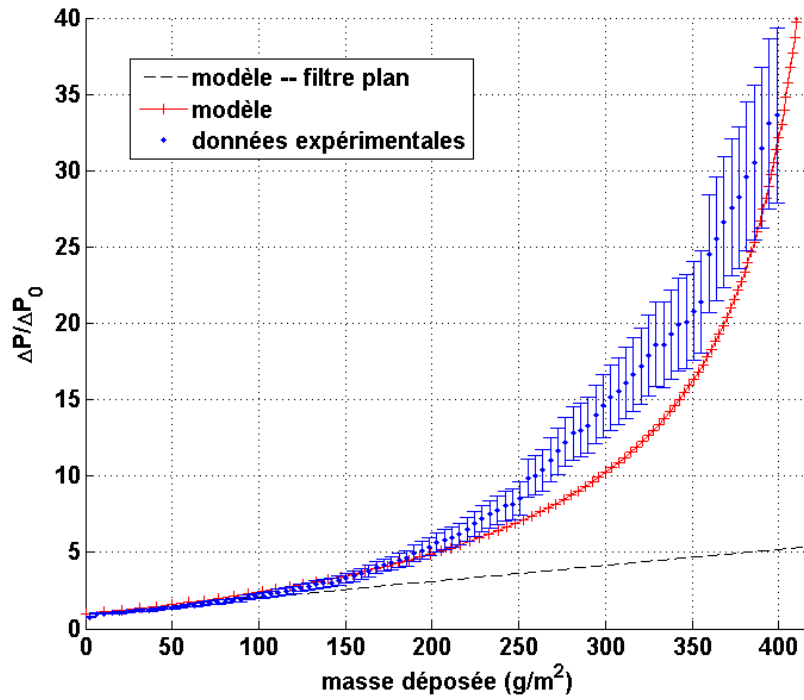


Figure 105 : Comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 0,2 cm/s ($Vn/10$)

- Cas de 0,5 cm/s

Dans ce cas, la Figure 106 nous montre que la courbe théorique reconstitue parfaitement les mesures expérimentales

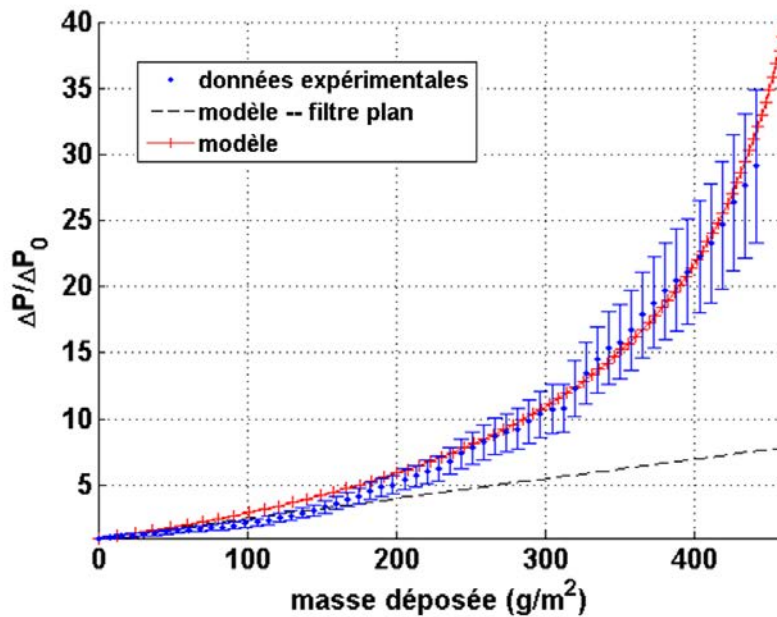


Figure 106 : comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 0.5 cm/s ($Vn/4$)

- Cas de 1 cm/s et 2 cm/s

Pour les vitesses de 1 et 2 cm/s, les résultats théoriques sont en assez bon accord avec les résultats expérimentaux. Néanmoins, on ne dispose que d'une petite gamme de mesures par comparaison aux autres cas.

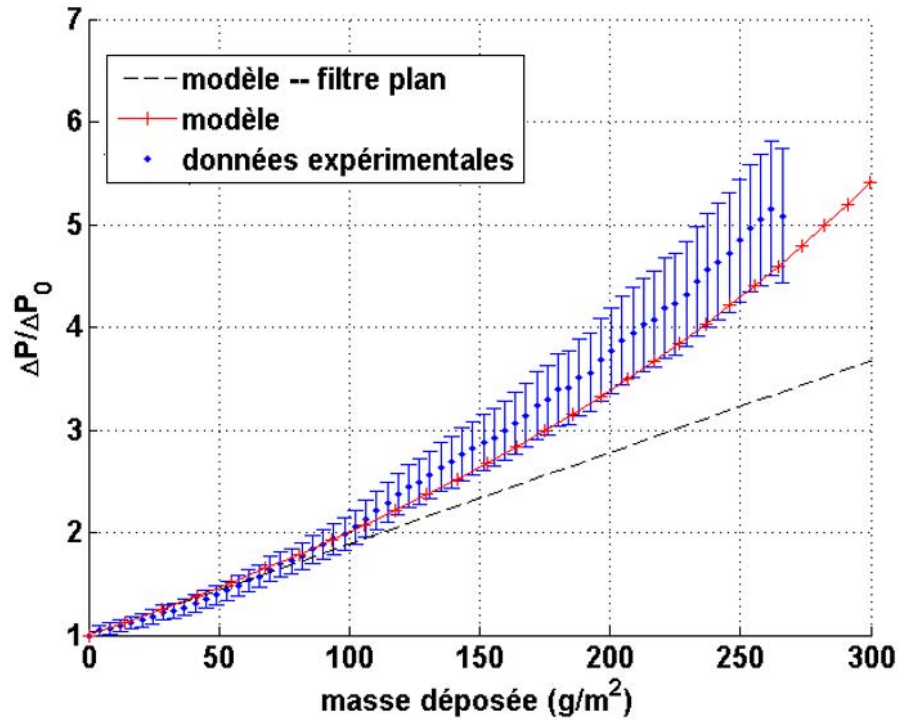


Figure 107 : comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 1 cm/s ($Vn/2$)

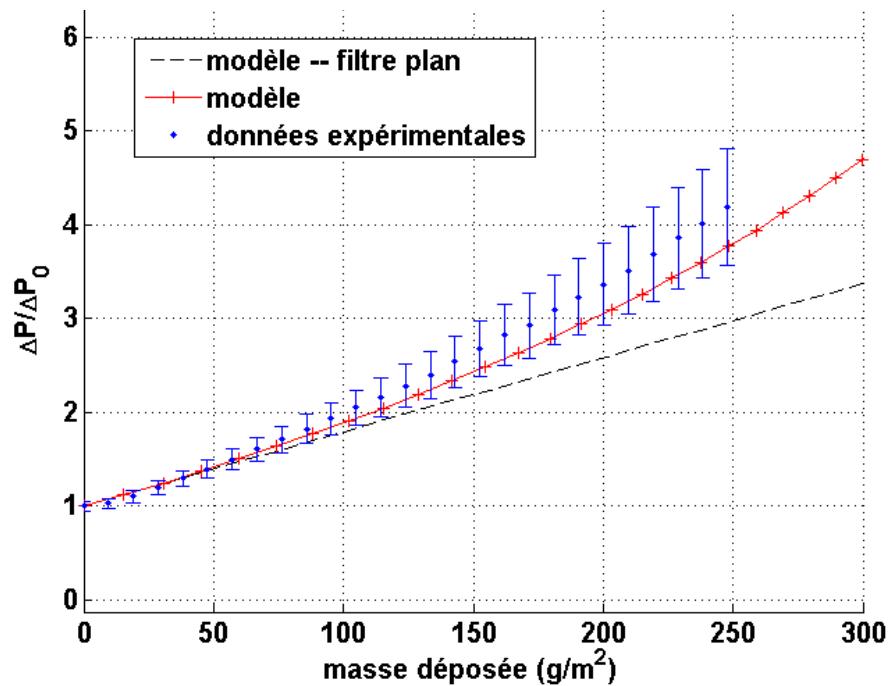


Figure 108 : comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 2 cm/s (Vn)

- Cas de 2,34 cm/s

Dans le cas de la plus grande vitesse de filtration, à savoir 2,34 cm/s, les mesures expérimentales couvrent une large gamme jusqu'à 560 g/m² et concordent bien avec les résultats issus du modèle théorique.

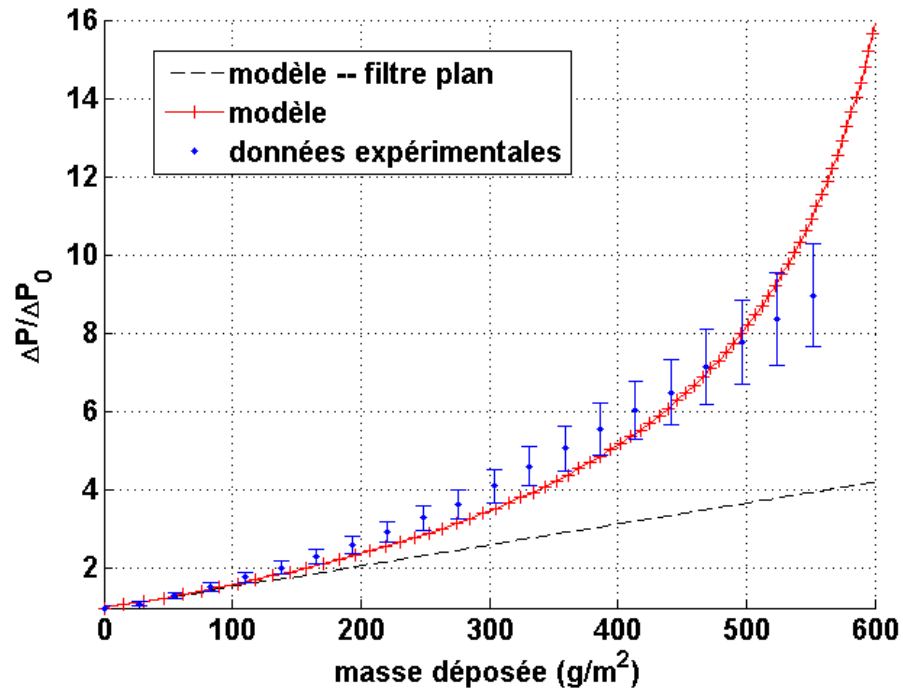


Figure 109 : comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 2,34 cm/s (1,17 Vn)

Globalement, au vu de ces comparaisons réalisées avec les résultats expérimentaux on peut conclure que le modèle théorique ainsi développé est en assez bon accord avec les résultats expérimentaux.

4.4.2. Influence de la perte de charge due au plissage

Afin d'évaluer la contribution de la perte de charge due au plissage (ΔP_f) dans la perte de charge globale, on trace pour une vitesse nominale de filtration, l'évolution de la perte de charge avec et sans prise en compte de ΔP_f (cf. Figure 110).

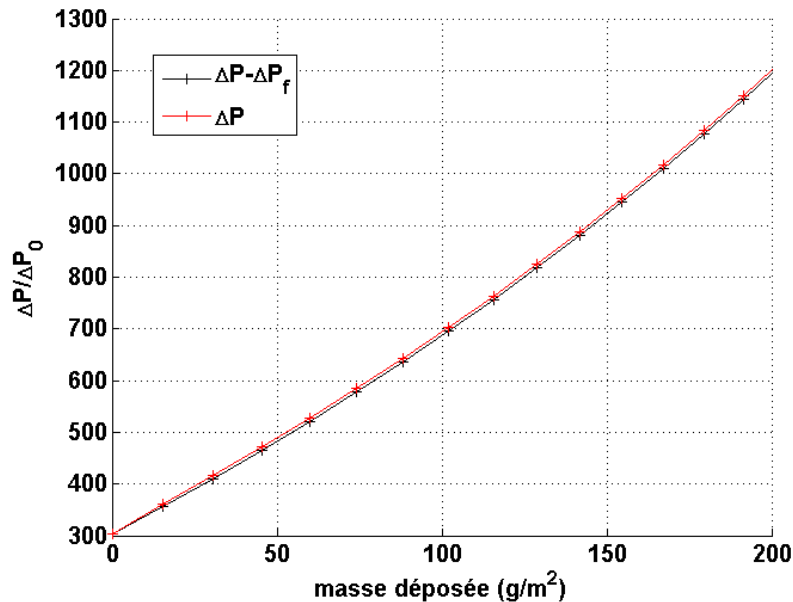


Figure 110 : comparaison de l'évolution de la perte de charge avec et sans prise en compte de la perte de charge due au plissage

Ainsi, on peut constater que dans la gamme des vitesses de filtration considérée, la perte de charge ΔP_f n'a pas d'influence significative sur la perte de charge du filtre. Elle peut tout à fait être négligée.

4.4.3. Influence de la porosité macroscopique

La porosité macroscopique est un paramètre important qui conditionne la croissance du dépôt et donc l'évolution de la résistance aérouique du filtre au cours du colmatage. Afin de quantifier la sensibilité du modèle à ce paramètre, on considère, à titre d'exemple, deux valeurs constantes de δ : 20% et 30%.

La Figure 111 représente l'évolution de l'écart relatif entre les deux résistances aérouiques correspondantes aux deux valeurs 20% et 30% en fonction de la masse déposée sur le filtre. L'écart relatif évolue d'une manière exponentielle au cours du colmatage. Un écart de 10% induit une erreur relative de 27% au moment du remplissage du pli. On en déduit que ce modèle est fortement sensible à la porosité macroscopique.

Dans ce travail, la porosité macroscopique a été déterminée par des simulations numériques en utilisant le code de calcul GeoDict®. Il est nécessaire de rassembler une banque de données propre à ce paramètre pour une étude physique plus poussée sur l'origine de l'apparition du vide au sein du dépôt formé par des particules de grandes tailles et/ou pour des distributions bimodales.

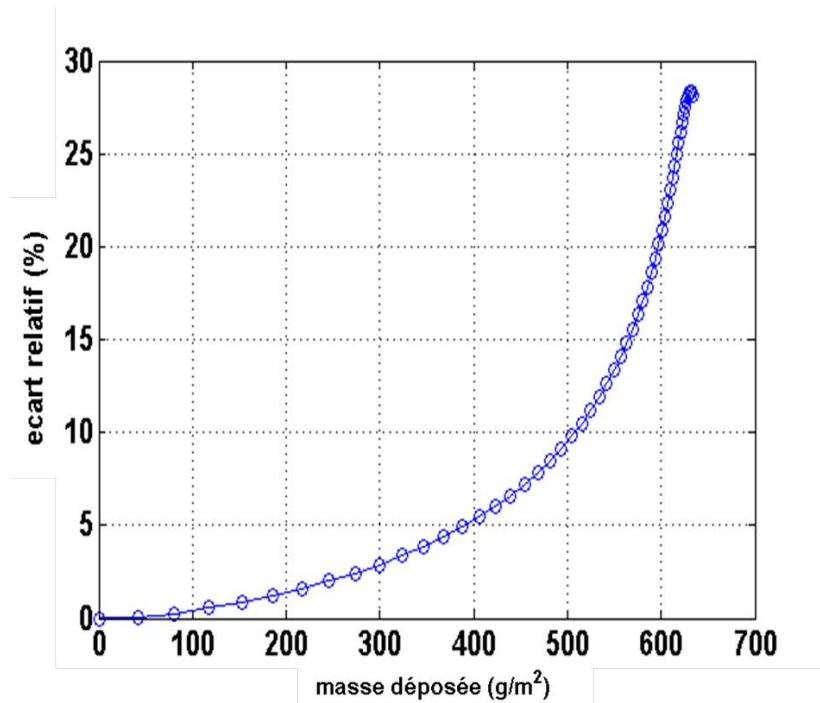


Figure 111 : évolution de l'écart relatif entre les pertes de charge issue du modèle appliqué dans la configuration de l'essai expérimental de 2 cm/s pour des porosités macroscopiques de 20% et 30%

4.5. Conclusion

Un modèle physique de colmatage des filtres plissés THE a été proposé. Il se base sur une adaptation du modèle de Kozeny-Carman dédié aux dépôts sur les filtres plans. Ce modèle prend en compte la réduction de la surface effective de filtration au cours du colmatage et aussi l'inhomogénéité du dépôt caractérisé par la porosité macroscopique.

Une comparaison aux résultats expérimentaux montre un accord assez satisfaisant. Néanmoins, ce modèle nécessite une donnée d'entrée sensible et difficile à déterminer. En effet la porosité macroscopique évolue au fur et à mesure de la croissance du dépôt et dépend de la vitesse de filtration mais aussi de la taille des particules, de leur distribution granulométrique et de leur densité.

5. CONCLUSION

Une double approche expérimentale et numérique a été utilisée pour étudier le phénomène de colmatage des filtres THE à petits plis (CAMFIL) utilisés dans les installations nucléaires françaises.

Tout d'abord un banc expérimental de colmatage par des particules d'alumine à l'échelle du pli a été développé. Il a été utilisé pour fournir des données propres sur la résistance aéroulque du filtre et la porosité du dépôt à différentes vitesses de filtration. Ensuite des simulations numériques en utilisant le code de calcul GeoDict® ont été réalisées pour tester l'influence de la distribution granulométrique des particules et la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge du filtre.

Pour un filtre plan, le dépôt est caractérisé par sa porosité ε et n'est pas influencé par la forme plane de la surface de filtration. En revanche, dans le cas d'un dépôt sur un média plissé, la structure du dépôt est impactée surtout au fond du pli où la section de passage de l'air est très faible. Ceci est confirmé par les simulations numériques qui montrent l'apparition d'une inhomogénéité dans la formation du dépôt surtout pour les particules inertielles. Cette inhomogénéité s'accroît avec l'augmentation de la vitesse de filtration. Ainsi pour prendre en compte la perte de surface de filtration engendrée par un tel dépôt, un paramètre nommé porosité macroscopique (δ) a été introduit. Il caractérise le volume non utilisé lors du colmatage induit par les irrégularités qui se forment à la surface du dépôt au cours du colmatage. Ainsi, pour caractériser un dépôt sur filtre plissé, il est nécessaire de déterminer sa porosité macroscopique δ en plus de sa porosité ε .

Un modèle de colmatage de filtre plissé THE a été développé en se basant sur le modèle de Kozeny-Carman et en prenant en compte la réduction de la surface effective de filtration et l'inhomogénéité du dépôt, à travers la porosité macroscopique. Une confrontation avec les résultats expérimentaux a montré un bon accord.

Néanmoins, le modèle de colmatage nécessite deux données d'entrée sensibles :

- La porosité du dépôt, accessible par les essais expérimentaux devant être réalisés pour chaque configuration (vitesse de filtration et distribution des particules)
- La porosité macroscopique accessible par les simulations numériques et dépend de la vitesse de filtration, la taille des particules et aussi de la géométrie du plissage.

La caractérisation du colmatage revient donc à la maîtrise de ces deux porosités. Dans ce travail de thèse, la porosité macroscopique du dépôt n'a été caractérisée que par les simulations numériques, il convient de réaliser des essais expérimentaux pour valider les résultats numériques en utilisant notamment la technique de la tomographie (Gervais et al.2013, Hettkamp 2011).

L'un des objectifs de cette thèse était de tester l'influence des écoulements d'air sur le colmatage des filtres plissés THE dans le cas des faibles vitesses de filtration ($\sim V_n$). Un modèle permettant de quantifier la perte de charge due au plissage a été développé et validé dans le cas des filtres vierges puis implémenté dans le modèle de colmatage. Il nous permet de conclure qu'il n'y a pas d'influence significative de la perte de charge de l'écoulement due à la forme plissé du dépôt.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les filtres plissés THE sont fréquemment employés dans le domaine du traitement de l'air, notamment dans les installations nucléaires où ils constituent la barrière ultime avant un rejet potentiel de substances polluantes dans l'environnement. Les médias constituant ces filtres sont de géométrie plissée offrant ainsi une surface de filtration plus importante que les filtres plans tout en minimisant le volume occupé. Cette forme plissée du média implique cependant des contraintes supplémentaires à l'écoulement d'air, se traduisant par une contraction de ce dernier dans les canaux d'écoulement des plis.

L'objectif de ce travail de thèse était de contribuer à l'amélioration des connaissances concernant le colmatage des filtres plissés THE tout en donnant une attention particulière aux écoulements à travers les plis du filtre et leur impact sur la formation du dépôt au cours du colmatage. Cette thèse s'inscrit dans un axe de recherche de l'IRSN visant à développer à terme des outils prédictifs du colmatage des filtres THE industriels en situations nominale et accidentelle.

La démarche qui a été retenue pour la réalisation de cette thèse repose sur deux étapes complémentaires. En premier lieu, on s'est focalisé sur la caractérisation des écoulements au sein du filtre vierge et leur influence sur la perte de charge initiale d'un filtre. En deuxième lieu, on s'est intéressé à l'évolution de la résistance aéraulique du filtre au cours du colmatage. Une méthodologie expérimentale spécifique a été utilisée pour la mesure des phénomènes intervenant puis couplée avec une approche numérique permettant de dépasser les contraintes imposées par la mesure expérimentale.

Un banc expérimental permettant de mesurer le champ de vitesse traversant le canal d'écoulement d'un pli de filtre THE, en se basant sur une technique de vélocimétrie laser, a été développé. En décrivant les profils de vitesse par des paramètres adimensionnés, on a pu déterminer une caractéristique d'autosimilarité de l'écoulement dans le canal d'un filtre plissé THE.

La mesure des champs de vitesse à proximité du média ou du fond du pli constitue l'une des limites de la méthode expérimentale ainsi, afin de caractériser l'écoulement dans ces deux zones, nous avons eu recours à la simulation numérique à l'aide de deux codes de calcul ANSYS CFX® et GeoDict®, validés au préalable. L'exploitation de l'autosimilarité des profils de vitesse a permis de développer un modèle semi-analytique d'écoulement.

Contrairement à un filtre plan, la perte de charge d'un filtre plissé ne résulte pas que de l'écoulement au sein du média mais aussi de son passage dans le canal du pli. Elle est liée à une contraction de l'écoulement et se manifeste par une perte de pression dans le canal. L'utilisation du principe de la conservation de la quantité de mouvement a permis de modéliser la perte de charge initiale d'un filtre plissé THE. Le modèle développé a été ensuite comparé à des mesures réalisées sur des filtres plissés THE et ME avec des géométries différentes. Cette comparaison montre un accord assez satisfaisant dans le cas des filtres THE.

Dans le cas des filtres ME, l'accord est moins satisfaisant. En effet, ce modèle se base sur une caractérisation de l'écoulement dans un cas très particulier de filtre plissé THE à petits plis avec un média constitué de fibres de verre. Pour des médias ME plus perméables, il est probable que l'écoulement ne soit pas homogène comme dans le cas de nos filtres THE. L'écart entre le modèle et les résultats expérimentaux peut aussi être imputé aux caractéristiques géométriques et/ou structurelles des médias ME au fond du pli.

Bien qu'elle soit propre aux filtres plissés THE en fibres de verre, la méthode utilisée pour l'élaboration du modèle de perte de charge initiale constitue une démarche solide pour l'étude de n'importe quel type de filtre. Elle peut être résumée en trois étapes :

- réalisation des mesures de champs de vitesse dans le canal d'écoulement du pli du filtre plissé considéré, en utilisant le même banc expérimental développé ;
- modélisation de l'écoulement au sein du pli en se basant sur les résultats expérimentaux ;
- utilisation de la relation liant la vitesse et la pression développée dans le cadre de cette thèse et qui reste valable à n'importe quel type de média à condition de l'alimenter avec un modèle d'écoulement approprié.

Dans la deuxième partie de la thèse, on s'est focalisé sur le colmatage des filtres plissés THE. De manière identique à la première partie, l'échelle de l'étude a été réduite à celle du pli. Un banc expérimental dédié à la mesure de l'évolution de la perte de charge et de la porosité du dépôt, a été développé. Ensuite des calculs simulant la croissance du dépôt à l'aide du code de calcul GeoDict® ont été réalisés.

Pour des particules d'alumine de tailles inférieures à $2\ \mu\text{m}$ et des vitesses au voisinage de la vitesse nominale de filtration, le dépôt se forme en utilisant tout le domaine disponible dans le canal d'écoulement du pli. En revanche, pour des distributions granulométriques multimodales contenant des particules d'alumine de taille supérieure à $5\ \mu\text{m}$ le dépôt se caractérise par l'apparition d'espaces vides dans le dépôt et conduisant à une perte plus rapide de la surface de filtration. La différence entre les modes de dépôt est liée à l'inertie des particules et aussi à une distribution granulométrique contenant différentes tailles de particules (ce qui est le cas dans une situation réelle de colmatage). Ce phénomène qui apparaît pour des particules « inertielles » ressemble au phénomène d'impaction par analogie aux modes de dépôt sur les médias fibreux.

Un nouveau paramètre a été introduit pour caractériser l'inhomogénéité de la formation du dépôt sur le média plissé. C'est la porosité macroscopique, elle rend compte du volume non utilisé par le dépôt au sein du canal d'écoulement du pli. C'est un paramètre qui évolue au cours du colmatage. Au début, il ne semble dépendre que de la taille des particules et de la géométrie du plissage, ensuite, au fur et à mesure que le dépôt se forme, une dépendance à la vitesse de filtration apparaît.

Un modèle prenant en compte l'inhomogénéité du dépôt à travers la porosité macroscopique et la réduction de la surface de filtration a ensuite été développé. Il a montré une bonne aptitude à reproduire les mesures expérimentales de perte de charge de média plissé THE. Le modèle peut aussi être appliqué à des dépôts de nanoparticules, il suffit de considérer un modèle de perte de charge dédié aux dépôts de nanoparticules sur filtre plan au lieu du modèle de Kozeny-Carman. Le modèle développé nécessite néanmoins, deux données d'entrée indispensables : la porosité du dépôt et la porosité macroscopique auxquelles il est fortement sensible.

En conséquence, une suite logique de ce travail serait de caractériser ces deux paramètres et surtout la porosité macroscopique sur laquelle on ne dispose pas, à l'état actuel des connaissances, de données suffisantes. Dans cette thèse, une approche purement numérique a été utilisée pour la caractérisation de ce paramètre très influent, il peut être judicieux de réaliser des visualisations micro-tomographiques afin, d'une part de valider l'approche numérique et d'autre part de fournir une banque de données nécessaire à la compréhension de l'origine physique de la formation d'un dépôt inhomogène.

Contrairement à l'étude du filtre vierge, la validation du modèle de colmatage n'a été réalisée qu'à l'échelle du pli, une comparaison du modèle avec les résultats expérimentaux pour des dépôts de particules microniques et nanométrique paraît essentielle pour une éventuelle amélioration de ce dernier.

REFERENCES

- Adrian J., Ronald, Jerry Westerweel, (2011), Particle image velocimetry, Cambridge university press.
- Alloul-Marmor, L. (2002), Réentraînement par écoulement d'air d'une contamination particulaire déposée sur une surface, application au cas d'un tas de poudre. Thèse de doctorat, Université de Paris XII.
- Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J. (1997), "Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development", NASA Technical Memorandum, 110446.
- BD biosciences (2012), HEPA filter in the in the bioprotect IV. <http://www.Bdbiosciences.com/instruments/bioprotect/index.jsp>.
- 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.
- Berman A.S. (1953), Laminar flow in channels with porous walls. Journal of Applied Physics, 24(9), pp.1232-1235
- Benmachou K., Schmitz P., Meireles M. (2003), Dynamical clogging of a pleated filter: Experimental and theoretical approaches for simulation. In Filtech Europa, II, pp. 50-57.
- Bouilloux, L. (2006), Filtres à Très Haute Efficacité (THE). Fiche technique de la base BADORIS relative à une barrière de sécurité (BTS), INERIS
- Bourrous, S., Bouilloux, L., Ouf, F. X., Lemaitre, P., Nerisson, P., Thomas, D., & Appert-Collin, J. C. (2016), Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles. Powder Technology, 289, pp. 109-117.
- Bourrouss S., (2014), Étude de colmatage THE plans et à petits plis par des agrégats de nanoparticules simulant un aérosol de combustion, thèse de doctorat, Université de Lorraine
- Callé-Chazelet, S., Thomas, D., Rémy, J., Artous, S. et Bouilloux, L. (2007), Performances de filtration des filtres plissés. In Récents progrès en génie des procédés (Paris, France), numéro 96 SFGP.
- Carman P.C. (1937), Fluid flow through granular beds. Transactions, Institution of Chemical Engineers, London, 15, pp. 150-166.
- Chen, D., Pui, D. H. et Liu, B. H. (1995), Optimization of pleated filter designs using a finite-element numerical model. Aerosol Sci. Technol., 23(4), pp. 579-590.
- Chen, F., (1982), The permeability of compressed fiber mats and the effect of surface area reduction and fiber geometry. Thèse de doctorat, The Institute of Paper Chemistry, Appleton.
- Cheng, L., Kirsch, R., Wiegmann, A., Gervais, P., Bardin-monnier, N., Thomas, D., (2013), PLEATLAB : a pleat scale simulation environment for filtration simulation. Proceedings of the FILTECH Conference, Filtech Exhibitions Germany, Meerbusch.
- Churaev N.V., (2002), Liquid and vapour flows in porous bodies: surface phenomena, CRC Press, Amsterdam.

- Cunningham, E. (1910), On the velocity of steady fall of spherical particles through fluid medium, Proceedings of the royal society. A 83357
- Davies, D.C. (1973), Air filtration academic press, London, New York
- Del Fabbro (2001), Modélisation des écoulements d'air et du colmatage des filtres plissés par des aérosols solides, Thèse de doctorat de l'université de Paris XII
- 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.
- Delcour. S. (2014), Étude des mécanismes physico-chimiques de mise en suspension de contaminants particulaires lors de la dégradation thermique de matériaux représentatifs des installations nucléaires, thèse de doctorat, Institut des sciences et technologies Paris Tech
- 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.
- Endo Y., Chen D.R., Pui D.Y.H. (1998), Bimodal aerosol loading and dust cake formation on air filters. Filtration & Separation, pp. 191-195
- Feng, Z., Long, Z., & Chen, Q. (2014), Assessment of various CFD models for predicting airflow and pressure drop through pleated filter system. Building and Environment, 75(2000), pp. 132-141.
- Fotovati, S., Hosseini, S., Tafreshi, H. V. et Pourdeyhimi, B. (2011), Modeling instantaneous pressure drop of pleated thin filter media during dust loading. Chemical Engineering Science, 66(CES-D-11-00420), pp. 4036-4046.
- Frisch U. (1995), Turbulence; the legacy of A. N. Kolmogorov, Cambridge University Press, Cambridge
- Gervais, P.-C., (2013), Étude expérimentale et numérique du colmatage de filtres plissés. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Hamaker H .C. (1937), the london--van der waals attraction between spherical particles. Physica IV no 1, pp. 1058-1072.
- Hettkamp, P. (2011), Simulation and measurement of dust loading of pleated air filter. In Proc. 24th AFS Conf. (Louisville, USA).
- Hoffmann, A. C., & Finkers, H. J. (1995), A relation for the void fraction of randomly packed particle beds. Powder Technology, 82(2), pp. 197-203.
- Joubert, A. (2009), Performances des filtres plissés à Très Haute Efficacité en fonction de l'humidité relative de l'air. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Kanoaka, C., (1998), Performance of an air filter at dust-loaded condition. Advances in aerosol filtration, pp. 323-33.
- Kasper, G., Schollmeier, S., & Meyer, J. (2010), Structure and density of deposits formed on filter fibers by inertial particle deposition and bounce. Journal of Aerosol Science, 41(12), pp. 1167-1182.
- 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
- Konstandopoulos, A.G. (2006), Particle sticking/rebound criteria at oblique impact Journal of Aerosol Science, 37 (3), pp. 292-305.

- 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.
- Lücke, T., Fissan, H., (1995), The prediction of filtration performance of high efficiency gas filter elements. *Chemical Engineering Science* 51 (8), pp. 1199-1208.
- Mocho, V., & Ouf, F. X. (2011), Clogging of industrial pleated high efficiency particulate air (HEPA) filters in the event of fire. *Nuclear Engineering and Design* 241 pp.1785-1794.
- Nassehi, V., Hanspal, N., Waghode, A., Ruziwa, W. et Wakeman, R. (2005), Finite-element modelling of combined free/porous flow regimes: simulation of flow through pleated cartridge filters. *Chemical Engineering Science*, 60(4) pp. 995 - 1006
- Neesse, TH., Dueck, J., Djatchenko, E. (2009), Simulation of filter cake porosity in Solid/Liquid separation. *Powder Technology* 193 (3), pp. 332-336.
- Novick, V.J., Monson, P.R., Ellison, P.E., (1992), The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters. *J. Aerosol Sci.*, Vol. 23, No. 6, pp. 657-665.
- Ouf, F.X., (2006), Caractérisation des aérosols émis lors d'un incendie. Thèse de doctorat de l'université de Rouen.
- Oxarango, L., Schmitz, P., & Quintard, M. (2004), Laminar flow in channels with wall suction or injection: A new model to study multi-channel filtration systems. *Chemical Engineering Science*, 59(5), pp. 1039-1051.
- Payet, S. (1991). Filtration stationnaire et dynamique des aérosols liquides submicroniques. Thèse de doctorat, Université Paris XII.
- Penicot, P. (1998) Étude de la performance de filtres a fibres lors de la filtration d'aérosols liquides ou solides submicroniques, Institut National Polytechnique de Lorraine, Thèse de Doctorat
- Rebaï, M., Prat, M., Meireles, M., Schmitz, P. et Baclet, R. (2010), A semi-analytical model for gas flow in pleated filters. *Chemical Engineering Science*.
- Raber R.R. (1982), Pressure drop optimization and dust capacity estimation for a deep-pleated industrial air filter using small sample data. In *World Filtration Congress III*, pp. 52,
- Reeks, M.W., Hall D. (2001), Kinetic models for particle resuspension in turbulent flows: Theory and measurement *Journal of Aerosol Science*, 32 (1), pp. 1-31
- Renoux, A., Boulaud, D., (1998), Les aérosols, physique et métrologie. Tech & Doc éditions. ISBN : 2-7430-0231-X
- Saleh, A. M., & Vahedi Tafreshi, H. (2014), A simple semi-numerical model for designing pleated air filters under dust loading. *Separation and Purification Technology*, 137, pp. 94-108.
- Sothen, R. A., & Tatarchuk, B. J. (2008), A Semi-Empirical Pressure Drop Model: Part I - Pleated Filters. *HVAC&R Research*, 14(6), pp. 841-860.
- Subrenat, A., Bellettre, J. et Cloirec, P. L. (2003), 3-d numerical simulations of flows in a cylindrical pleated filter packed with activated carbon cloth. *Chemical Engineering Science*, 58(22), pp. 4965 - 4973.
- Terrill, R.M., (1965), Laminar flow in a uniformly porous channel with large injection. *The Aeronautical Quarterly* 16, pp. 323-332.
- Terrill, R. M. (1982), An Exact solution for Flow in a Porous Pipe. *Journal of Applied Mathematics*, pp. 547-552.

- Théron, F., Karcher, G., & Le Coq, L. (2017), Numerical and experimental investigations of the influence of the pleat geometry on the pressure drop and velocity field of a pleated fibrous filter. *Separation and Purification Technology*, 182 pp. 69-77.
- Thomas D. (2001), Étude de la filtration des aérosols par des filtres à fibre, institut polytechnique de Lorraine, Habilitation à diriger les recherches
- Thomas, D., Penicot, P., Contal, P., Leclerc, D., & Vendel, J. (2001), Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles experimental and modelling study. *Chemical Engineering Science*, 56(11), pp. 3549-3561.
- Thomas, D., Ouf, F. X., Gensdarmes, F., Bourrous, S., & Bouilloux, L. (2014), Pressure drop model for nanostructured deposits. *Separation and Purification Technology*, 138, pp. 144-152.
- Thomas, D. Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Appert-Collin, J-C. *Aerosol filtration*, ISTE Press
- Thomas C. and Thomas S. (2002), The influence of pleat geometry on the pressure drop in deep-pleated cassette filters. *Filtration & Separation*, 39(9), pp. 48-52
- Wilcox, D. C., (2008), Formulation of the k-omega Turbulence Model Revisited, *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 11, , pp. 2823-2838.
- Yu, H. et Goulding, C. (1992), Optimized ultra-high efficiency filter for high-efficiency industrial combustion turbines. In *International gas turbine and aeroengine congress and exposition*, ASME (Cologne, Allemagne).

ANNEXE I

Calcul des vecteurs de vitesse avec la technique PIV :

On considère deux signaux $f(x)$ et $g(x)$. $f(x)$ représente l'image de référence (l'image à l'instant t), et $g(x) = f(x - u) + b(x)$ représente l'image décalée translatée par u et bruitée par b par rapport au premier signal (l'image à l'instant $t + dt$). Le calcul de la vitesse revient à la détermination du décalage entre les deux images u . Il peut être déduit en minimisant la norme suivante (par rapport à d) :

$$\min_d \|g - F\|^2 \quad \text{Équation 114}$$

avec F la fonction définie comme : $x \rightarrow f(x - d)$, la norme choisie est la norme 2 de l'espace normé des fonctions « régulières » tel que :

$$\|f\|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |f(x)|^2 dx \quad \text{Équation 115}$$

En utilisant l'inégalité de Cauchy-Schwartz, le problème se ramène à maximiser la quantité suivante (par rapport à d) appelé corrélation :

$$h(d) = (g * f)(d) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x)f(x - d) dx \quad \text{Équation 116}$$

Les signaux émis sont supposés périodiques sur chaque fenêtre d'interrogation, c'est donc plus intéressant de travailler dans l'espace de Fourier TFR, ainsi on peut écrire :

$$g * f = TFR^{-1}(TFR(g)\overline{TFR(f)}) \quad \text{Équation 117}$$

Dans le plan de Fourier la corrélation est équivalente à une simple opération multiplication. Ainsi le passage au plan de Fourier permet de réaliser un gain de temps de calcul.

L'image est divisée en fenêtres d'interrogations, et sur chaque fenêtre (portion d'image) le calcul précédemment présenté est réalisé. Le déplacement des particules et donc la vitesse du fluide correspond au pic de corrélation (valeur maximale).

ANNEXE II

Évolution des profils adimensionnés de vitesse pour deux vitesses de filtration différentes $V_n/2, V_n/10$

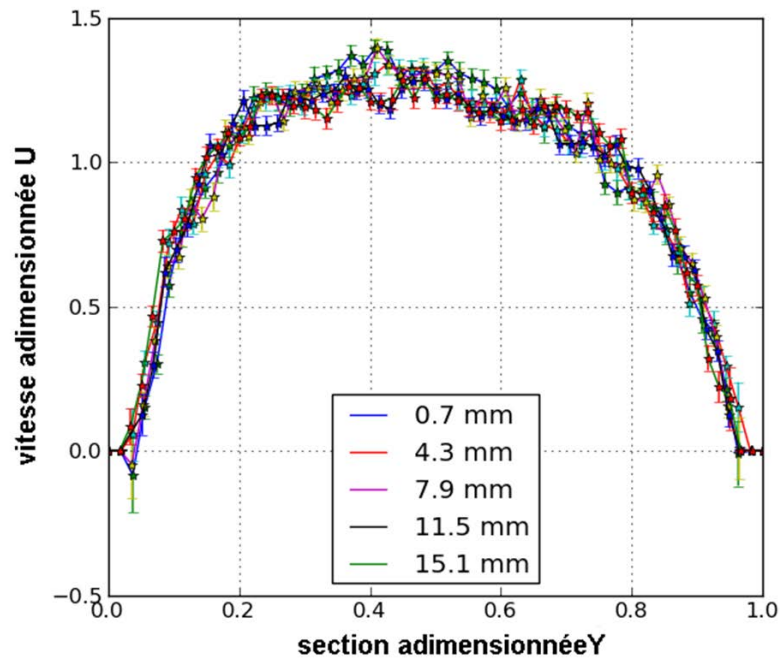


Figure 112 : cas de $V_n/2$

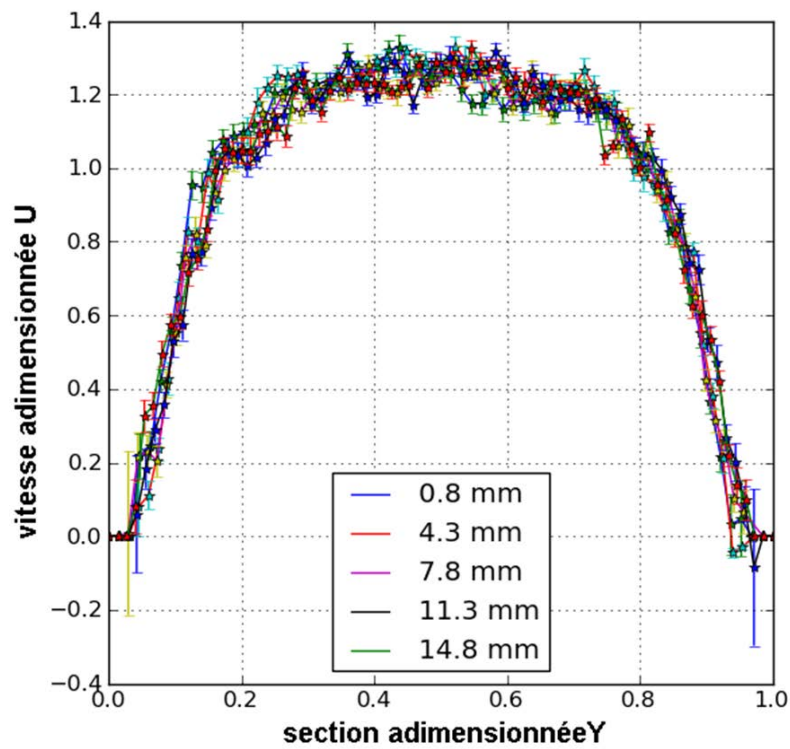


Figure 113 : cas $V_n/10$

ANNEXE III

Différents valeurs numériques intervenant dans le calcul de la fonction f :

Les valeurs de τ, β, γ et a_0 sont résumées dans le tableau suivant :

a_0	0,0217
τ	58,0640
β	99,8914
γ	0,6766

Tableau 19 : valeurs numériques de τ, β, γ et a_0

La figure suivante représente l'évolution du rapport $\frac{a_{n+1}}{a_n}$ en fonction de n

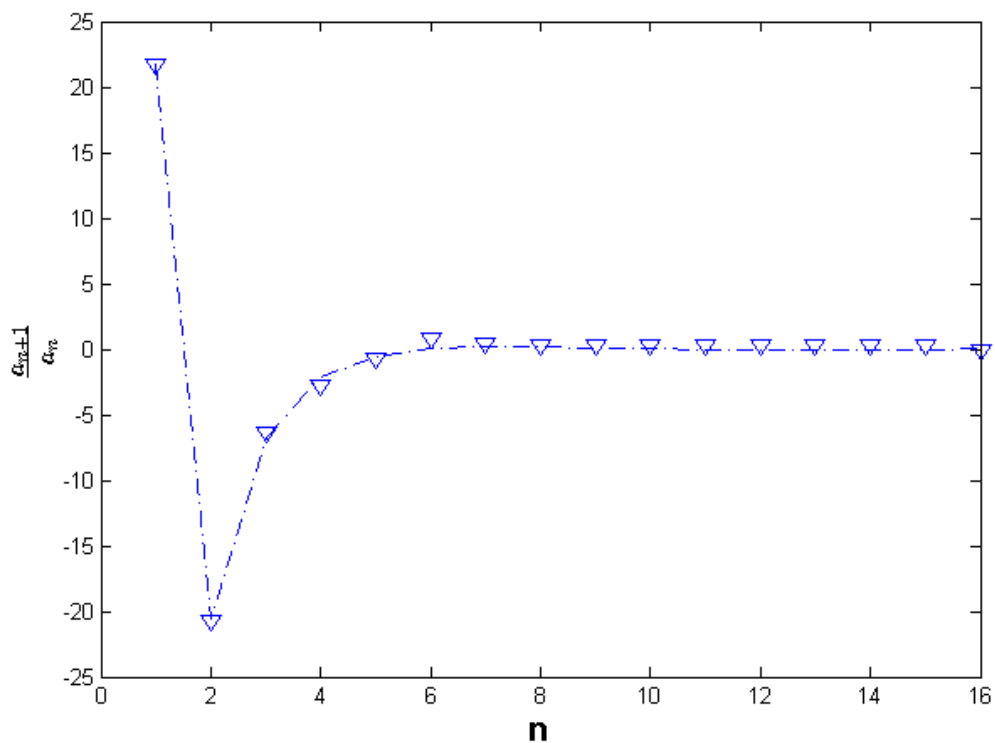
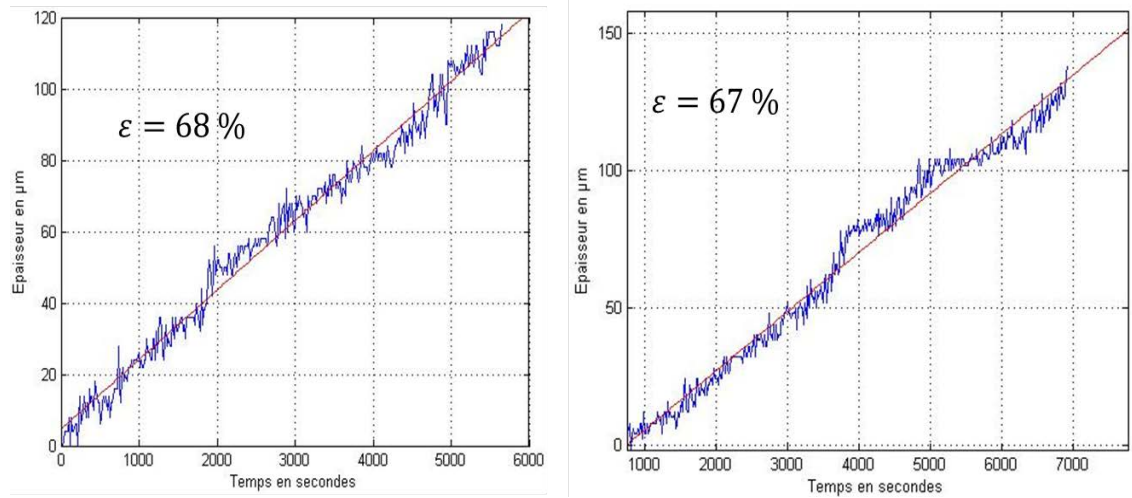
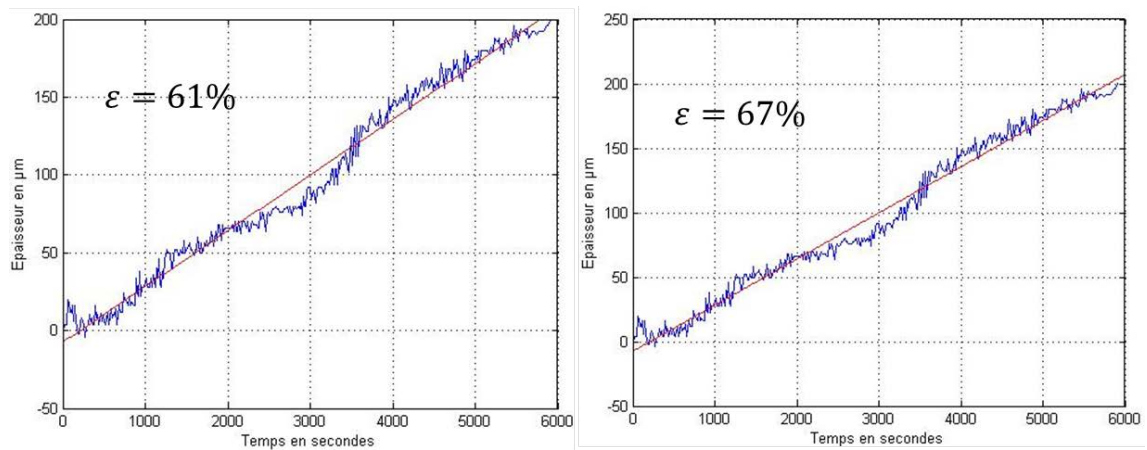
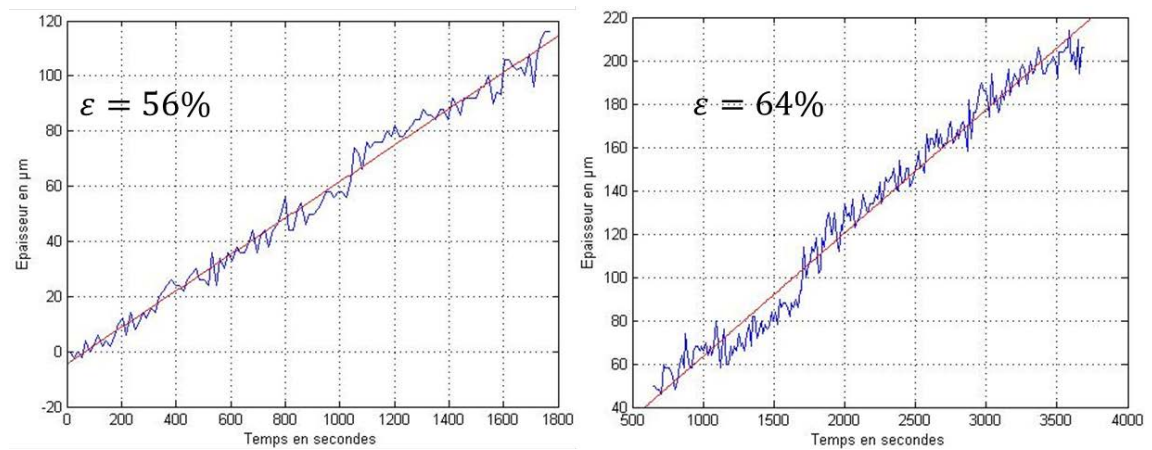


Figure 114 : évolution du rapport des termes de la suite $\frac{a_{n+1}}{a_n}$

ANNEXE IV

Évolution de l'épaisseur du dépôt formé sur filtre plan pour différentes vitesses de filtration (partie 3 du banc expérimental) ainsi que les valeurs de porosité :

Figure 115 : cas de $V_n/5$ Figure 116 : cas de $V_n/2$ Figure 117 : cas de V_n

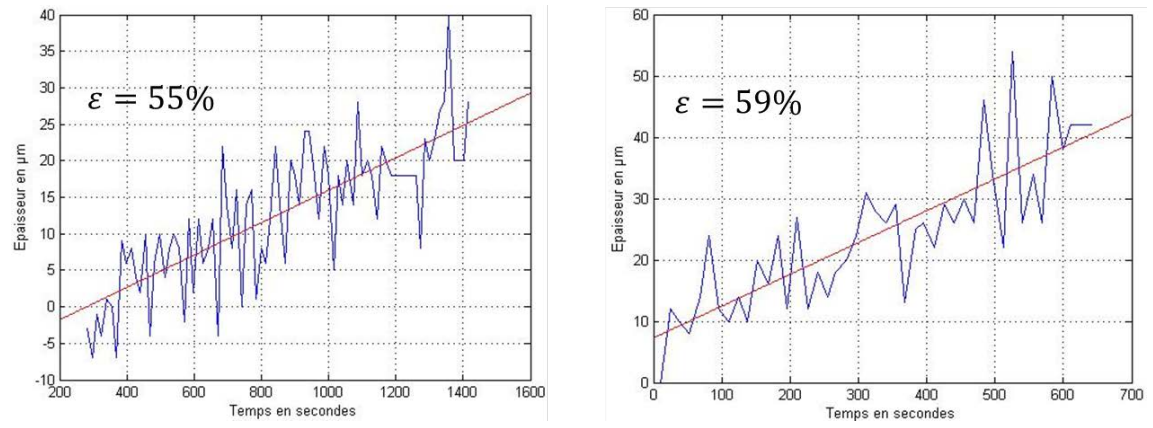


Figure 118 : cas de $2V_n$.

ANNEXE V

Évolution de la perte de charge du gâteau sur filtre plan (partie 4) pour différentes vitesses de filtration et comparaison avec le modèle de Kozeny-Carman pour différentes vitesses de filtration :

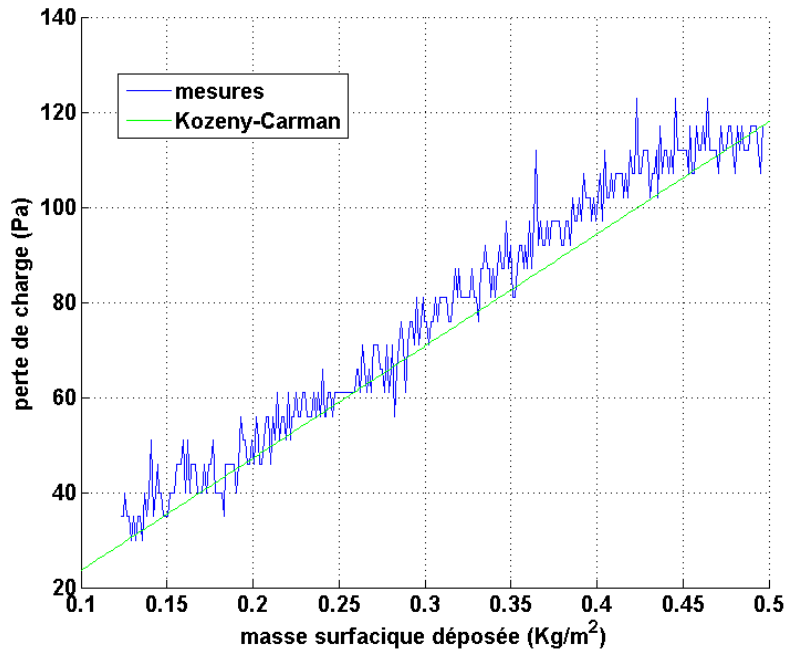


Figure 119 : cas de $Vn/4$

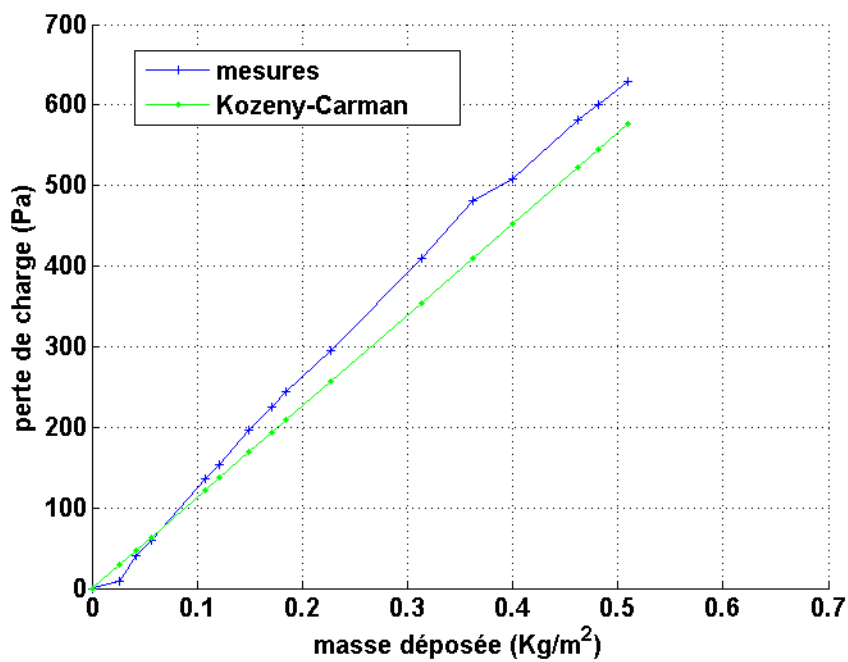


Figure 120 : cas de Vn

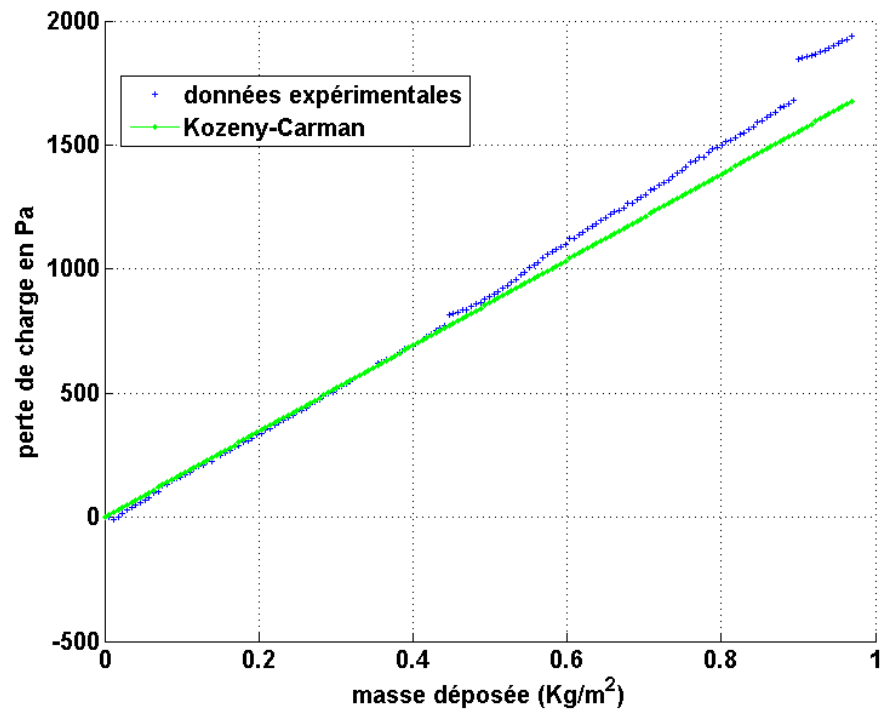


Figure 121 : cas de $2,34 \text{ cm/s}$

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : filtre plissé avec un média THE (Bouilloux 2006)	3
Figure 2 : filtre THE plan vu au MEB (média en fibre de verre ; Joubert, 2009).....	4
Figure 3 : plissage à plis profonds (BD biosciences, 2012))	4
Figure 4: schéma des caractéristiques d'un pli de filtre plissé	4
Figure 5 : cartographie de l'élément silicium (principal constituant du média des filtres THE à petits plis CAMFIL) sur une tranche du média (Bourrous, 2014).....	5
Figure 6 : vue MEB des particules d'alumine Al ₂ O ₃ type UCV-12 (Delcour, 2014).....	7
Figure 7 : évolution de la perte de charge d'un filtre plissé THE à petits plis (CAMFIL) en fonction de la vitesse de filtration (Bourrous, 2014).....	13
Figure 8 : comparaison de l'évolution de la perte de charge d'un filtre THE entre les données expérimentales et celles données par le modèle de Del Fabbro (2001)	14
Figure 9 : géométrie du pli et différents emplacements des points de mesure (Zhuangbo, 2014)	17
Figure 10 : profil de vitesse au sein d'un pli rectangulaire (Zhuangbo, 2014).....	17
Figure 11 : domaine de calcul (Rebai, 2010)	18
Figure 12 : illustration de la déformation des plis à la vitesse nominale de filtration à gauche et à une vitesse de 8 <i>cm/s</i> à droite	20
Figure 13 : schématisation de l'évolution de la perte de charge au cours du colmatage (Bourrous, 2014)	20
Figure 14 : différentes structures possibles lors du dépôt (Kanoaka et al., 1998)	21
Figure 15 : formation de dépôt dans des plis rectangulaires et triangulaires. a- 4plis/inch b-20 plis/inch 1m/s et un diamètre de particules de 10 μm (Fotovati et al. 2011)....	25
Figure 16 : schéma démonstratif de l'algorithme suivi (Saleh at al. 2014)	26
Figure 17 : différentes configurations du dépôt de particules (Saleh et al. 2014)	27
Figure 18 : influence de la vitesse de filtration sur le colmatage d'un filtre THE (combustible PMMA (Mocho et Ouf 2011)).....	28
Figure 19 : comparaison entre la corrélation empirique et les données expérimentales de colmatage pour des particules produites lors d'un essai d'incendie (Ouf et Mocho 2014).	28
Figure 20 : schéma représentatif du pli.....	32

Figure 21 : déplacement des particules entre deux images prises entre t et $t + dt$	33
Figure 22 : géométrie du pli du filtre.....	34
Figure 23 : dispositif de maintien des plis de filtre THE	35
Figure 24 : schématisation de l'emplacement des plis du filtre testé.....	35
Figure 25 : distribution granulométrique des particules de DEHS mesurée par un APS (diamètre aérodynamique).....	36
Figure 26 : banc expérimental de mesure des champs de vitesse dans un pli de filtre THE....	37
Figure 27 : exemple d'image obtenue (en noir le média et en blanc l'air + particules)	38
Figure 28 : image après la première étape (application des filtres + division)	38
Figure 29 : schématisation de la sommation glissante d'images.....	39
Figure 30 : système de dépôt de nanoparticules de carbone sur le filtre.....	40
Figure 31 : exemple de champ de vitesse dans deux portions de pli pour une vitesse nominale de filtration.....	40
Figure 32 : schéma représentant les paramètres géométriques du pli	41
Figure 33 : profils de vitesse adimensionnée à différentes distances de l'entrée du pli pour la vitesse nominale de filtration	42
Figure 34 : domaine de calcul et conditions limites utilisées (en bleu l'air et en rouge le média)	44
Figure 35 : comparaison de profils de vitesse à 2,5 et 7 mm de l'entrée du pli.....	45
Figure 36 : le maillage fluide utilisé pour les calculs ANSYS CFX®.....	45
Figure 37 : champ de vitesse dans le canal d'écoulement du pli pour une vitesse de filtration (ANSYS CFX®).....	47
Figure 38 : profils de vitesse adimensionnée (U) à différentes distances de l'entrée du pli pour une vitesse nominale de filtration (ANSYS CFX®).....	47
Figure 39 : comparaison des profils de vitesse adimensionnée à 10 mm de l'entrée du pli entre les résultats expérimentaux et numérique (ANSYS CFX®) pour une vitesse nominale de filtration.....	48
Figure 40 : domaine de calcul considéré pour les simulations GeoDict® (le média en rouge) .	49
Figure 41 : comparaison des profils de vitesse adimensionnée à 10 mm de l'entrée du pli pour quatre tailles de voxel (15 μm , 10 μm , 5 μm , 3 μm) et pour une vitesse nominale de filtration et un modèle NSB (Geodict®)	50
Figure 42 : comparaison des profils de vitesse adimensionnée à 2 mm, 10 mm et 15 mm de l'entrée du pli (GeoDict®)	51

Figure 43 : comparaison des profils adimensionnés issus d'ANSYS CFX®, de Geodict® et des expériences à 7 mm de l'entrée du pli pour une vitesse nominale de filtration .	51
Figure 44 : schéma représentant les paramètres géométriques du pli	53
Figure 45 : schématisation des débits surfaciques passant dans le canal du pli	53
Figure 46 : évolution du débit surfacique uh le long du pli pour deux vitesses moyennes de filtration obtenu avec ANSYS CFX® ($V_f = 1,38 \text{ cm/s}$ et $V_f = 2 \text{ cm/s}$)	55
Figure 47 : évolution du débit surfacique uh à différentes profondeurs dans le pli (GeoDict®) pour une vitesse moyenne de filtration de 1,8 cm/s	55
Figure 48 : comparaison entre le profil numérique (U) issu d'ANSYS CFX® et du modèle sur une section à 8 mm de l'entrée du pli et pour une vitesse nominale de filtration	57
Figure 49 : comparaison entre la vitesse orthogonale v issue d'ANSYS CFX® et du modèle sur une section à 8 mm de l'entrée du pli et pour une vitesse nominale de filtration	58
Figure 50 : comparaison des profils longitudinaux de vitesse (U) issus de GeoDict® (en noir), d'ANSYS CFX® (en rouge), du modèle théorique (en vert) et de l'expérience ...	58
Figure 51 : évolution de la pression sur une section médiane du pli obtenue avec ANSYS CFX® : (a) sur la totalité de la section médiane, (b) dans le canal d'écoulement, (c) au sein du média.....	60
Figure 52 : schéma explicatif des grandeurs de pression considérées.....	61
Figure 53 : micro-tomographie du fond de pli	62
Figure 54 : image MEB de l'élément silicium d'un fond de pli de filtre THE (Bourrous, 2014) .	62
Figure 55 : schématisation de la longueur effective.....	63
Figure 56 : Schéma explicatif des plis d'entrée et de sortie par rapport à la direction de l'écoulement	63
Figure 57 : évolution de l'évolution de la pression le long de la section d'entrée et de sortie (ANSYS CFX®).....	64
Figure 58 : schématisation de la surface de contrôle Sc utilisée dans le modèle	64
Figure 59 : schématisation du banc expérimentale CATFISH (Joubert, 2009).....	66
Figure 60 : comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales pour un filtre THE (CAMFIL) avec $L = 20 \text{ mm}$, $p = 2,5 \text{ mm}$. En noir le modèle, en rouge les résultats expérimentaux, en bleu la perte de charge du média seul (ΔPd)	67
Figure 61 : comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales pour un filtre THE (CAMFIL) avec $L = 20 \text{ mm}$, $p = 2,5 \text{ mm}$, en prenant en compte la dispersion des valeurs initiales de pertes de charge. En noir le modèle, en rouge les résultats expérimentaux, en bleu la perte de charge du média seul (ΔPd)	68

Figure 62 : comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales pour des filtres THE (CAMFIL) de géométries différentes. En noir le modèle, en rouge les résultats expérimentaux, en bleu la perte de charge du média seul (ΔPd)	69
Figure 63 : diagramme de parité du modèle appliqué aux filtres THE	70
Figure 64 : comparaison entre le modèle et les mesures expérimentales pour des filtres ME de géométries différentes. En noir le modèle, en rouge les résultats expérimentaux, en bleu la perte de charge du média seul (ΔPd)	71
Figure 65 : diagramme de parité du modèle appliqué aux filtres ME	72
Figure 66 : évolution de la perte de charge d'un filtre THE selon le modèle développé en fonction de la vitesse de filtration pour s allant de 1 à 6	73
Figure 67 : en bleu : écart relatif entre la perte de charge issue du modèle pour une longueur effective en fonction de s et la perte de charge de référence ($s = 3$). En vert : évolution du rapport L_{eff}/L en fonction de différentes valeurs de s	74
Figure 68 : l'écart relatif intégral (<i>error</i>) entre le modèle et les valeurs expérimentales de Del Fabbro (2001) pour des filtres ME de géométrie $L = 27\text{ mm}, p = 2\text{ mm}$ et $L = 48\text{ mm}, p = 2\text{ mm}$ pour des valeurs de s allant de 5 à 20	75
Figure 69 : schéma explicatif du banc expérimental de colmatage.....	79
Figure 70 : distribution granulométrique des aérosols d'alumine SPM102 mesurée par un APS80	
Figure 71 : image obtenue par un microscope électronique à balayage (MEB) de la poudre SPM102.....	81
Figure 72 : représentation schématique du principe de fonctionnement du RBG (site Palas) .	81
Figure 73 : évolution de la masse générée de particules d'alumine au cours du temps par le RBG	82
Figure 74 : schéma explicatif du dispositif utilisé pour la mesure de la porosité	83
Figure 75 : évolution de l'épaisseur du dépôt formé sur la membrane en fonction du temps pour deux essais différents (vitesse de filtration de $Vn/10$).....	84
Figure 76 : évolution de la porosité en fonction de la vitesse de filtration	85
Figure 77 : comparaison entre la relation empirique et les données expérimentales	85
Figure 78 : comparaison de la perte de charge du gâteau formé sur le filtre plan (branche 4 du banc expérimental) avec le modèle de Kozeny-Carman adapté, pour une vitesse de filtration de $Vn/2$	87
Figure 79 : évolution de la perte de charge (adimensionnée par la perte de charge initiale) d'un pli de filtre THE au cours du colmatage pour différentes vitesses de filtration.....	88

Figure 80 : formation du dépôt (fraction volumique des particules d'alumines) au cours du colmatage pour différentes masses déposées à une vitesse de filtration de $V_n/10$	92
Figure 81 : évolution du rapport de la réduction de surface (R_s) en fonction de la masse déposée sur le média plissé.....	93
Figure 82 : comparaison du rapport de réduction de surface R_s pour un dépôt homogène et le dépôt issu des simulations numériques pour une vitesse nominale de filtration .	94
Figure 83 : évolution de la perte de charge du pli selon la masse déposée pour trois vitesses de filtration différentes	94
Figure 84 : évolution du rapport de la réduction de surface (R_s) en fonction de la masse déposée pour deux diamètres moyens différents.....	95
Figure 85 : distribution granulométrique en nombre pour les des deux cas.....	96
Figure 86 : évolution du rapport de la réduction de surface (R_s) en fonction de la masse déposée sur le média plissé pour deux vitesses de filtration différentes (V_n , $V_n/10$) et deux distributions granulométriques différentes (Cas 1, Cas 2).....	97
Figure 87 : évolution de la perte de charge pour deux vitesses de filtration différentes (V_n , $V_n/10$) et deux distributions granulométriques différentes (cas 1, cas 2)	98
Figure 88 : comparaison des résultats numériques issus de GeoDict® avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de $2,34 \text{ cm/s}$	99
Figure 89 : comparaison des résultats numériques issus de GeoDict® avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de $0,2 \text{ cm/s}$	100
Figure 90 : image de l'entrée de pli au cours du colmatage à une vitesse de filtration de $0,25 \text{ cm/s}$ (Bourrous 2014)	100
Figure 91 : formation du dépôt à deux instants différents (pour les conditions de simulation cf. Tableau 17– vitesse de $2,34 \text{ cm/s}$).....	101
Figure 92 : schématisation d'un dépôt {gâteau + vide}	101
Figure 93 : schématisation de la surface du dépôt pour une masse déposée de $113,8 \text{ g/m}^2$	102
Figure 94 : évolution de la porosité macroscopique en fonction de la masse déposée pour deux vitesses de filtration (configuration expérimentale cf. Tableau 17)	103
Figure 95 : évolution de la porosité macroscopique en fonction de la masse déposée pour différentes vitesses de filtration et distributions granulométriques utilisées dans les simulations précédentes (Tableau 17)	103
Figure 96 : schéma représentant le média et la zone de dépôt	105
Figure 97 : schématisation du processus du dépôt implémenté dans la plateforme	106
Figure 98 : schéma représentant l'algorithme utilisé dans la plateforme de simulation numérique de la formation du dépôt dans le pli	107

Figure 99 : évolution de la perte de charge du média plissé de filtre THE au cours du colmatage par un aérosol d'alumine pour une vitesse nominale de filtration en utilisant la plateforme numérique développée.....	108
Figure 100 : schéma illustratif d'un dépôt inhomogène.....	110
Figure 101 : schématisation d'un dépôt sur un filtre plissé avec les paramètres géométriques le caractérisant	111
Figure 102 : décomposition du dépôt en couches	111
Figure 103 : schématisation de la construction d'une couche i	112
Figure 104 : algorithme de calcul	113
Figure 105 : Comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de $0,2 \text{ cm/s}$ ($Vn/10$)...	115
Figure 106 : comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 0.5 cm/s ($Vn/4$)	115
Figure 107 : comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 1 cm/s ($Vn/2$)	116
Figure 108 : comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de 2 cm/s (Vn)	116
Figure 109 : comparaison du modèle de perte de charge au cours du colmatage avec les données expérimentales pour une vitesse de filtration de $2,34 \text{ cm/s}$ ($1,17 Vn$)	117
Figure 110 : comparaison de l'évolution de la perte de charge avec et sans prise en compte de la perte de charge due au plissage	118
Figure 111 : évolution de l'écart relatif entre les pertes de charge issue du modèle appliqué dans la configuration de l'essai expérimental de 2 cm/s pour des porosités macroscopiques de 20% et 30%	119
Figure 112 : cas de $Vn/2$	f
Figure 113 : cas $Vn/10$	f
Figure 114 : évolution du rapport des termes de la suite $an + 1an$	g
Figure 115 : cas de $Vn/5$	h
Figure 116 : cas de $Vn/2$	h
Figure 117 : cas de Vn	h
Figure 118 : cas de $2Vn$	i
Figure 119 : cas de $Vn/4$	j
Figure 120 : cas de Vn	j

Figure 121 : cas de 2,34 *cm/s* k

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : classification des filtres THE en fonction de leur efficacité (NF-EN-1822)	11
Tableau 2 : modèles recensés pour $1f(\alpha m)$ (Thomas, 2001)	12
Tableau 3 : résumé des études numériques réalisées	19
Tableau 4 : caractéristiques d'un média THE utilisé dans les filtres de marque CAMFIL (Bourrous, 2014)	34
Tableau 5 : caractéristiques des particules d'ensemencement (DEHS)	36
Tableau 6 : caractéristiques du fluide et du milieu poreux utilisées dans les simulations.....	44
Tableau 7 : valeurs du nombre de Reynolds dans le pli et dans le média.....	46
Tableau 8 : paramètres des calculs avec ANSYS CFX®	46
Tableau 9 : paramètres des calculs avec GeoDict®	50
Tableau 10 : caractéristiques du filtre étudié (Del Fabro 2001)	68
Tableau 11 : caractéristiques des filtres à moyenne efficacité (ME)	70
Tableau 12 : différentes valeurs du rapport entre l'énergie cinétique et l'énergie d'adhésion des particules d'alumine de diamètre $1 \mu m$	90
Tableau 13 : différentes valeurs du rapport entre la force d'adhésion et la force de traînée pour des particules d'alumine de diamètre $1 \mu m$	91
Tableau 14 : paramètres de la simulation GeoDict®	91
Tableau 15 : paramètres de la simulation GeoDict®	95
Tableau 16 : distributions granulométriques des particules utilisées dans les simulations.....	96
Tableau 17 : distributions des particules d'alumine utilisées dans les simulations numériques	98
Tableau 18 : caractéristiques des particules utilisées dans les expériences menées.....	114
Tableau 19 : valeurs numériques de τ, β, γ et a_0	g

Impact sur le colmatage en régimes transitoire et permanent des écoulements d'air induits par le plissage des médias filtrants THE

Les filtres plissés à très haute efficacité (THE) jouent un rôle essentiel dans le maintien du confinement des installations industrielles à risques, les réacteurs nucléaires par exemple. Ces filtres permettent le piégeage des aérosols, qui sont la principale source de contamination externe. Dans ce cadre, l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire) conduit des études pour caractériser les performances des filtres THE. L'objectif de la présente thèse a été de développer un modèle prédictif décrivant l'évolution de la résistance aéraulique du filtre au cours de son colmatage. Le colmatage d'un filtre plissé THE est piloté, d'une part par les conditions aérauliques imposées dans les réseaux de ventilation, d'autre part par la nature du média et les propriétés des particules collectées par le filtre. Ainsi, les travaux réalisés ont été répartis sur deux volets. La première partie a été dédiée à l'étude de l'aéraulique du filtre suivant une approche double expérimentale et numérique. Un banc expérimental permettant de mesurer les champs de vitesse dans un pli de filtre plissé THE a été développé. Les mesures réalisées ont servi à la validation des codes de calcul utilisés (ANSYS CFX® et GeoDict®) et au développement d'un modèle de perte de charge initiale des filtres plissés vierges. Une validation du modèle à l'échelle de filtres complets avec des géométries différentes a ensuite été effectuée. La deuxième partie a porté sur l'étude du colmatage des filtres plissés THE suivant une approche expérimentale et numérique. Un banc expérimental a été développé pour la détermination des paramètres entrant en jeu dans les modèles de colmatage (porosité, taille de particules ...), puis des simulations numériques à l'aide du logiciel GeoDict ont été réalisées pour caractériser la croissance du dépôt sur la média. La combinaison des résultats expérimentaux et numériques a conduit au développement d'un modèle décrivant l'évolution de la résistance aéraulique du filtre THE au cours de son colmatage avec des particules microniques.

Mots clés :

Filtration THE, perte de charge, mécanique des fluides, modélisation, simulation.

Impact of the air flows induced by the pleating of HEPA filters during clogging in stationary and transient state

High Efficiency Particulate Air (HEPA) pleated filters are used to ensure the containment of airborne contamination within nuclear facilities. These filters are often the last barrier before a potential release of radioactive substances into the environment. Predicting their performances (pressure drop and efficiency) is a main thrust of research for IRSN which aims at avoiding any unexpected failure of those devices on French nuclear facilities. The clogging phenomenon is mainly influenced, on one side, by the flow conditions imposed in the ventilation network and, on the other side, by the media characteristics and the particles properties which are collected by the filter. Consequently, the work carried out has been divided into two parts. In the first part, we focused on the study of the airflow behavior within a HEPA pleated filter with an experimental and numerical approach. An experimental bench has been developed to measure the airflow field at the entrance channel of a HEPA filter pleat. Then, the experimental measurements have been used to validate GeoDict® and ANSYS CFX® simulations. The combination of the experimental and the numerical results have been used to develop a model to predict the evolution of the initial HEPA filter pressure drop. The work performed in the second part deals with the clogging of the filter. An experimental bench, dedicated to the characterization of the parameters that intervene in the clogging models such as the porosity, the pressure drop and the particles size, has been developed. Then, numerical simulations conducted with GeoDict® have been realized to describe the cake formation on the surface of a HEPA pleated filter. Finally, we developed a model to predict the evolution of HEPA pressure drop during clogging with micronic particles.

Keywords :

HEPA Filtration, pressure drop, fluid mechanics, numerical modelling, simulation.