AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Université de Lorraine

Ecole doctorale SIMPPÉ: Science et Ingénierie des Molécules, des Produits, des Procédés et de l'Énergie

THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de

Docteure de l'Université de Lorraine

Spécialité: Génie des Procédés, des Produits et des Molécules

Par

Charlotte Godoy

Filtration d'aérosols de suie en présence de vapeur et/ou de gouttelettes d'eau

Soutenance publique le 17 décembre 2019

Composition du jury :

Rapporteures : Gehin Evelyne, Professeure, Université Paris Est Créteil

Gonze Evelyne, Professeure, Université de Savoie

Examinateur.rice.s : Gérardin Christine, Professeure, Université de Lorraine

Thomas Dominique, Professeur, Université de Lorraine

Membre invité : Laurent Falk, Directeur de recherche CNRS, Université de Lorraine

Remerciements

Je souhaite adresser mes premiers remerciements à Cécile Vallières pour sa bienveillance, ses encouragements, son soutien sans faille.

Je remercie Evelyne Gehin et Evelyne Gonze d'avoir accepté de rapporter ces travaux de thèse. Je remercie Dominique Thomas d'avoir proposé ce sujet. Je remercie Laurent Falk, pour l'accueil au laboratoire, ses conseils, et d'avoir pris part au jury. Je remercie très sincèrement Christine Gérardin, pour son soutien, ses conseils et d'avoir accepté d'être membre et présidente de ce jury de thèse.

Je remercie Eric Schaer et Marie Christine Averland Petit, nos discussions m'ont permis d'avancer, je vous remercie de votre soutien et de vos encouragements.

Un immense merci « au gars de l'atelier », sans qui, la mise en place du banc d'essais n'aurait pas été possible, mais aussi pour les conseils techniques durant ces trois années. Merci Charly, Christian, Laurent, Yann et Alain.

Merci à Maud, Daniela, Rainier pour les conseils, les cafés, les moments partagés. Votre optimisme et bonne humeur ont été un vrai soutien. Ma reconnaissance va aux deux Laura, Laura Turri et Laura Lintis, qui ont été tour à tour présidente de jury, m'ont conseillée, aidée, je vous remercie de votre implication, je n'oublierai pas.

Je souhaite aussi remercier Laurent Perrin, de ne pas m'avoir fermée sa porte et d'être resté bienveillant.

Merci à Typhane d'avoir accepté de réaliser son stage avec moi, merci pour ton travail qui a été d'une aide précieuse pendant la rédaction.

Merci aux membres du troisième étage du bâtiment A' de m'avoir accueillie. Merci aux différents membres des services du LRGP : le SAFIC, le CIEL et RAID pour votre coopération agréable durant ces trois ans. Je n'oublie pas Véronique et Laurence, qui ont toujours rendu l'accueil agréable.

Un grand merci aussi à tous ceux et toutes celles avec qui j'ai partagé un moment, un café, ou un repas. Je pense aussi aux représentants et représentantes de doctorant.es pour l'école doctorale que j'ai connu.e.s, Maxence, Alexandre, Romain, Linda, Pauline, Mirabelle, Géraldine et Clémentine. Je remercie également Christine Fivet pour sa disponibilité et ses conseils.

Et je remercie ma famille, mes ami.es, mon compagnon pour leur soutien, leur disponibilité, leurs relectures, leurs conseils.

Je laisse Sisyphe au bas de la montagne! On retrouve toujours son fardeau. Mais Sisyphe enseigne la fidélité supérieure qui nie les dieux et soulève les rochers. Lui aussi juge que tout est bien. Cet univers désormais sans maître ne lui paraît ni stérile ni futile. Chacun des grains de cette pierre, chaque éclat minéral de cette montagne pleine de nuit, à lui seul, forme un monde. La lutte elle-même vers les sommets suffit à remplir un cœur d'homme.

Il faut imaginer Sisyphe heureux.

Le mythe de Sisyphe (Extrait), Albert Camus

NOMENCLATURE

Lettres latines

A	Constante de Hamaker	J
A_f	Surface spécifique des fibres	m^{-1}
a	Surface de la particule	m^2
a_g	Surface spécifique	m^{-1}
B	Perméabilité du milieu	m^2
C_m	Concentration massique	$kg.m^{-3}$
Cu	Coefficient de Cunningham	-
D	Coefficient de diffusion	$m^2.s^{-1}$
D_f	Dimension fractale	m
D_p	Diamètre de la particule primaire	m
d_{ae}	Diamètre aérodynamique	m
d_m	Diamètre moyen des molécules	m
d_{me}	Diamètre de mobilité électrique	m
d_f	Diamètre des fibres	m
$d_{f,mo}$	Diamètre de fibre mouillé	m
d_p	Diamètre de la particule	m
d_v	Diamètre équivalent en volume	m
E	Efficacité	–
E_{el}	Champ électrique	$V.m^{-1}$
E_n	Efficacité en nombre	-
e	Charge électrique élémentaire d'une particule	C
e_g	Epaisseur du gâteau de particules	m
F	Force de capillarité	N
F_{el}	Force électrostatique	N
G	Grammage du medium	$kg.m^{-2}$
HR	Humidité Relative de l'air	%
h_k	Constante de Kozeny	–

h_b	Constante de Burkle Plummer	–
K	Résistance du medium filtrant	m^{-1}
K_2	Résistance spécifique du gâteau de particules	s^{-1}
k_0	Constante diélectrique	$F.m^{-1}$
k_B	Constante de Boltzmann	$J.K^{-1}$
k_f	Facteur préfractal	-
m_a	Masse de l'agglomérat	kg
m_{liq}	Masse de liquide collecté	kg
N_a	Nombre d'Avogadro	Mol^{-1}
$N_{_(nombre\ aval)}$	Nombre de particules en aval du filtre	#
$N_{_(nombre\ amont)}$	Nombre de particules en amont du filtre	#
n	Nombre de moles	mol
n_c	Nombre de charge	-
n_{el}	Nombre de charges élémentaires par particule	-
P	Pression	Pa
P_{amont}	Pression statique à l'amont du medium filtrant	Pa
P_{aval}	Pression statique à l'aval du medium filtrant	Pa
$P_{_ce}$	Perméance	-
Q_{fte}	Débit de fuite	$m^3.s^{-1}$
Q_G	Débit totale de filtration	$m^3.s^{-1}$
Q_{tot}	Débit passant à travers le gâteau	$m^3.s^{-1}$
R	Constante des gaz parfaits	$J.mol^{-1}$
r_c	Rayon centrale de l'APM	m
r_f	Rayon des fibres	m
r_p	Rayon de particule sphérique	m
r_1	Rayon interne de l'APM	m
r_2	Rayon externe de l'APM	m
S	Taux de saturation	–
S_f	Surface de filtration	m^2
S_{fte}	Surface de fuite	m^2

S_G	Surface de gâteau	m^2
S_{tot}	Surface totale de filtration	m^2
T	Température	K
t	Temps	s
t_0	Temps initiale de la chute de perte de charge	s
t_f	Durée de filtration totale	s
U_f	Vitesse de filtration	$m.s^{-1}$
U_0	Vitesse de filtration en début de colmatage	$m.s^{-1}$
U_i	Vitesse interstitielle	$m.s^{-1}$
U_{opt}	Tension optimale	V
Z	Épaisseur du médium	m
z	Distance de séparation entre deux surfaces en interaction	m

Lettres grecques

α	Compacité	–
$\alpha_{,mo}$	Compacité en présence de liquide	-
β	Demi -angle de mouillage	rad
ε	Porosité	–
ε_0	Permittivité du vide	$F.m^{-1}$
θ	Angle de contact	rad
ΔP	Perte de charge du filtre	Pa
ΔP_0	Perte de charge initiale du filtre	Pa
ΔP_G	Perte de charge du gâteau de particules	Pa
Δm_s	Masse de particules dans chaque couche formant le gâteau	kg
Δt	Temps de formation de chaque couche formant le gâteau de particules	s
γ	Tension superficielle du liquide	$N.m^{-1}$

γ_{ls}	Tension interfaciale liquide solide	$N.m^{-1}$
γ_s	Tension superficielle du solide	$N.m^{-1}$
η	Efficacité unitaire d'une fibre	-
λ_m	Libre parcours moyen des molécules de gaz	m
λ_0	Libre parcours moyen de l'air à 293 K à pression atmosphérique	m
λ_g	Libre parcours moyen des molécules du gaz porteur	m
μ	Viscosité dynamique	Pa.s
ρ	Masse volumique du gaz	$kg.m^{-3}$
ρ_f	Masse volumique du fluide	$kg.m^{-3}$
ρ_{eff}	Masse volumique effective des particules	$kg.m^{-3}$
ρ_{liq}	Masse volumique du liquide	$kg.m^{-3}$
ρ_p	Masse volumique de la particule	$kg.m^{-3}$
σ	Ecart type de la distribution granulométrique	–
ω	Vitesse angulaire	$rad.s^{-1}$
τ	Constante de temps	s

Nombres adimensionnels	
I	Nombre d'interception
K_n	Nombre de Knudsen
K_{np}	Nombre de Knudsen de particules
K_{nf}	Nombre de Knudsen de fibres
Pe	Nombre de Peclet
Re_{po}	Nombre de Reynolds de pores
St	Nombre de Stokes

Table des matières

Introduction générale ---------- 1

Chapitre 1 État de l'art ---------- 1

1.1 Filtration des aérosols sur des filtres fibreux plans – généralités ---------- 1

1.1.1 Caractérisation des aérosols ---------- 1

1.1.1.1 Caractérisation du milieu gazeux ---------- 1

1.1.2 Caractérisation des médias fibreux ---------- 2

1.1.2.1 Caractéristiques physiques des filtres à fibres ---------- 2

1.1.2.2 Efficacité de filtration ---------- 3

1.1.2.3 Efficacité unitaire de fibre ---------- 4

1.1.2.4 Capture d'aérosol par les filtres à fibres ---------- 5

1.1.2.5 Perte de charge initial d'un filtre à fibres ---------- 7

1.1.2.6 Adhésion et réentrainement des particules ---------- 8

1.2 Filtration d'aérosols solides sur des médias fibreux plans ---------- 11

1.2.1 Évolution des performances du filtre ---------- 12

1.2.2 Influence des paramètres ---------- 14

1.2.2.1 Influence de la concentration ---------- 14

1.2.2.2 Influence de la vitesse de filtration ---------- 14

1.2.2.3 Influence de la taille des particules ---------- 16

1.2.2.4 Aérosols de combustion ---------- 18

1.2.3 Bilan ---------- 19

1.3 Filtrations d'aérosols liquides par des médias fibreux plans ---------- 19

1.3.1 Évolution des performances du filtre en présence d'un aérosol liquide ---------- 20

1.3.2 Influence des paramètres ---------- 21

1.3.2.1 Concentration de l'aérosol ---------- 21

1.3.2.2 Vitesse de filtration ---------- 21

1.3.2.3 Viscosité dynamique et tension superficielle ---------- 23

1.3.2.4 Nature et structure du filtre ---------- 24

1.3.3 Modélisation des performances d'un filtre plan en présence d'aérosol liquide ---------- 25

1.3.3.1 Modélisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre lors de son colmatage ---------- 25

1.3.3.2 Modélisation de l'efficacité et de la perte de charge d'un filtre lors de son colmatage ---------- 26

1.4 Filtration d'aérosols solides sous humidité ---------- 26

1.4.1 Influence de l'humidité sur la filtration d'aérosols solides sur filtre ---------- 27

1.4.1.1 Évolution des performances du filtre ---------- 27

1.4.1.2 Aérosols non hygroscopiques ---------- 27

1.4.1.3 Aérosols hygroscopiques ---------- 28

1.4.2 Influence de la vitesse sur des filtres plans THE ---------- 30

1.4.3 Influence de la granulométrie ---------- 30

1.4.4 Influence de la nature du filtre ---------- 31

1.4.5 Modélisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan THE colmaté par des particules solides sous air humide ---------- 32

1.4.6 Étude de la filtration sous humidité sur filtre pré-colmaté ---------- 33

1.4.6.1 Évolution des performances ---- 33
1.4.7 Bilan ---- 35

1.5 Filtration d'aérosols liquide et solides sur médias fibreux plans ---- 36
1.5.1 Étude des performances du filtre en présence d'un mélange d'aérosols liquide et solide ---- 36
1.5.2 Particules solides « enrobées » par des particules d'huile ---- 39
1.5.3 Bilan ---- 40

1.6 Conclusion ---- 42

Chapitre 2 Matériels et méthodes ---- 44

2.1 Introduction ---- 45

2.2 Description générale du banc d'essai ---- 45
2.2.1 Schéma du banc d'essai ---- 45
2.2.2 Production des particules de suies ---- 48
2.2.3 Production de l'air humide ou de gouttelettes d'eau ---- 49
2.2.4 Caractérisation des gouttelettes d'eau : Welas ---- 50
2.2.5 Zone d'extraction ---- 51
2.2.6 Zone de mesure ---- 52

2.3 Caractérisation des aérosols de suies ---- 54
2.3.1 Suies étudiées dans la littérature : sélection et caractérisation ---- 54
2.3.1.1 Sélection des suies étudiées ---- 54
2.3.1.2 Moyen de caractérisation de la granulométrie d'un aérosol submicronique ---- 55
2.3.1.3 Granulométries des suies étudiées et stabilité ---- 57
2.3.2 Moyen de caractérisation de la masse volumique d'un aérosol composé d'agrégats ---- 58
2.3.3 Mesures et comparaisons aux données issues de la littérature : validation du banc d'essai ---- 61

2.4 Protocoles opératoires ---- 62
2.4.1 Protocole de l'étude de l'influence de l'humidité relative de l'air sur un dépôt de particules de suies 63
2.4.2 Protocole de l'étude du mélange d'aérosols liquides et solides et de filtration sous air humide -- 64

2.5 Conclusion ---- 65

Chapitre 3 Influence de l'humidité relative sur un dépôt de particules de suies ---- 67

3.1 Performances initiales et propriétés des filtres plans sous humidité ---- 68
3.1.1 Propriétés du filtre vierge ---- 68
3.1.2 Évolution de la perte de charge d'un filtre soumis à des contraintes d'humidité relative par paliers 69

3.2 Colmatage du filtre THE sous humidité ---- 70
3.2.1 Évolution de la perte de charge ---- 70
3.2.1.1 Suies 18 ---- 70
3.2.1.2 Suies 26 ---- 71
3.2.2 Bilan ---- 72

3.3 Influence de l'humidité relative après le colmatage du filtre par des suies ---- 72
3.3.1 Évolution temporelle de la perte de charge ---- 73

3.3.2 Évolution des résistances de gâteau en fonction de l'humidité relative ---- 82
3.3.2.1 Mesures de perméation en air sec ---- 82
3.3.2.2 Variations des résistances avec l'humidité relative ---- 84
3.3.3 Synthèse et bilan des résultats ---- 87

3.4 Interprétation des résultats obtenus ---- 89
3.4.1 Réentrainement des particules ---- 89
3.4.2 Restructuration du gâteau de particules ---- 90
3.4.2.1 Restructuration homogène du gâteau ---- 91
3.4.2.2 Restructuration non uniforme du gâteau : modifications locales de la résistance ---- 92
3.4.2.3 Mécanismes à l'origine de la restructuration du dépôt ---- 96

3.5 Conclusions et perspectives ---- 99

Chapitre 4 Modèles comportementaux ---- 103

4.1 Modèle comportemental de l'évolution de la perte de charge lors du passage de l'air humide ---- 104
4.1.1 Résultats : réponse temporelle ---- 106
4.1.2 Évolutions des constantes de temps et des coefficients de proportionnalité ---- 110
4.1.3 Approche statique : détermination de la perte de charge finale à partir des conditions opératoires initiales 112
4.1.3.1 Expression du coefficient de proportionnalité α en fonction de la perte de charge ---- 112
4.1.4 Approche dynamique ---- 114
4.1.4.1 Élaboration d'une expression plus générale pour les deux suies considérées ---- 114
4.1.4.2 Confrontation des valeurs expérimentales au modèle établi pour les deux suies ---- 117
4.1.4.3 Droites de parité ---- 120

4.2 Conclusion ---- 122

Chapitre 5 Filtration de mélanges d'aérosols : gouttelettes d'eau et particules de suie ---- 125

5.1 Conditions expérimentales ---- 126

5.2 Caractérisation du mélanges ---- 128
5.2.1 Caractérisation des suies ---- 128
5.2.2 Caractérisation des gouttelettes d'eau ---- 129

5.3 Résultats expérimentaux ---- 131
5.3.1 Évolution temporelle de la perte de charge du filtre et variations ---- 131
5.3.2 Evolution en fonction de la masse surfacique générée ---- 134

Conclusion générale ---- 137

Annexe 1. Calculs des concentrations massiques et de la masse surfacique générée ---- 141

Annexe 2. Autre point de fonctionnement dans le cas de mélanges 143

Références 147

Liste des figures

FIGURE 1 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'EFFICACITE UNITAIRE EN FONCTION DU DIAMETRE DE PARTICULES 4
FIGURE 2 : SCHEMA D'UNE PARTICULE CAPTUREE PAR DIFFUSION 5
FIGURE 3 : SCHEMA D'UNE PARTICULE CAPTUREE PAR INTERCEPTION 6
FIGURE 4 : SCHEMA D'UNE PARTICULE CAPTUREE PAR IMPACTION 6
FIGURE 5 : EXPRESSIONS DE LA FORCE DE VAN DER WAALS (SURFACE LISSE ET INDEFORMABLE) (THOMAS 2001) 9
FIGURE 6 : ADHESION PAR PONT LIQUIDE (THOMAS 2001) 10
FIGURE 7 : ÉVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE ET DE LA PENETRATION D'UN AEROSOL SOLIDE MICRONIQUE (DP =1,35 µM) – (WALSH 1996) 12
FIGURE 8 : A GAUCHE, UN EXEMPLE DE L'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE DURANT LE COLMATAGE DE PARTICULES DE FLUORESCEINE (DP = 0,18 µM, C=3., MG/M^3 U_0 = 30 CM/S). A DROITE, CLICHES PHOTOGRAPHIQUES AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE DURANT LE COLMATAGE DE PARTICULES DE FLUORESCEINE. (THOMAS ET AL. 2001) 13
FIGURE 9 : COURBES D'EVOLUTIONS DE LA PERTE DE CHARGE D'AEROSOL D'URANINE (DP = 0,31 µM) POUR DIFFERENTES VITESSES DE FILTRATION. (PENICOT-BAUGE 1998) 14
FIGURE 10 : ÉVOLUTION DU PARAMETRE $\Delta \boldsymbol{Puf}$ POUR DIFFERENTES VITESSES DE FILTRATION AVEC UN AEROSOL D'URANINE (DP = 0,40 µM)- (PENICOT-BAUGE 1998) 15
FIGURE 11 : INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE SUR L'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE (U_0 = 30 CM/S) - (PENICOT-BAUGE 1998) 16
FIGURE 12 : PERTE DE CHARGE DU FILTRE COLMATE AVEC DES PARTICULES DE 0,46 A 1,40 µM (U_0 = 0,10 M/S) – (DC. WALSH 1996) 16
FIGURE 13 : ÉVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE EN FONCTION DE LA MASSE COLLECTEE POUR DIFFERENTES GRANULOMETRIES ET DIFFERENTS AEROSOLS SOLIDES – (NOVICK, MONSON, ET ELLISON 1992) 17
FIGURE 14 : ÉVOLUTION DU DEPOT PENDANT LE COLMATAGE D'UN FILTRE HAUTE EFFICACITE PAR UN AEROSOL SUBMICRONIQUE - (CONTAL ET AL. 2004) 20
FIGURE 15 : ÉVOLUTION DE LA VITESSE DE FILTRATION SUR LA PERTE DE CHARGE (A GAUCHE) ET SUR LA PENETRATION (A DROITE) AVEC UN AEROSOL LIQUIDE SUBMICRONIQUE (CONTAL ET AL. 2004) 22
FIGURE 16 : INFLUENCE DE LA TENSION SUPERFICIELLE SUR L'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE – (PENICOT-BAUGE 1998) 23
FIGURE 17 : INFLUENCE DE LA NATURE DU FILTRE SUR L'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE (CONTAL ET AL. 2004) (WHATMAN D_F = 0,36 µM, SARTORIUS D_F = 0,45 µM, D309 D_F = 0,9 µM, A320 D_F = 3,60 µM) 24
FIGURE 18 : COURBES D'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN AEROSOL NON HYGROSCOPIQUE D'ALUMINE SUR UN FILTRE THE A DIFFERENTES HUMIDITES RELATIVES – (JOUBERT 2009) 28
FIGURE 19 : COURBES D'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN AEROSOL HYGROSCOPIQUE DE NACL EN DESSOUS DU POINT DE DELIQUESCENCE SUR UN FILTRE THE A DIFFERENTES HUMIDITES RELATIVES – (JOUBERT 2009) 29

FIGURE 20 : COURBES D'EVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN AEROSOL HYGROSCOPIQUE DE NACL EN DESSUS DU POINT DE DELIQUESCENCE SUR UN FILTRE THE A DIFFERENTES HUMIDITES RELATIVES – (JOUBERT 2009) 30
FIGURE 21 : INFLUENCE DE LA GEOMETRIE PLANE OU PLISSEE D'UN FILTRE SUR L'EVOLUTION DE SA PERTE DE CHARGE DURANT SON COLMATAGE AVEC L'AEROSOL MICRONIQUE D'ALUMINE POUR TROIS TAUX D'HUMIDITE RELATIVE : 5-25 %, 94-95 % ET 100 % (AURELIE JOUBERT 2009) 31
FIGURE 22 : RICKETTS CITE PAR JOUBERT (2009) - FILTRE PRE COLMATE 33
FIGURE 23 : ÉVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE THE EN PRESENCE D'UN MELANGE D'AEROSOL DE PARTICULES SOLIDES (13,5% EN MASSE) ET LIQUIDES (86,5 % EN MASSE) – (FRISING 2004) 37
FIGURE 24 : COMPARAISON DES DIFFERENTS POURCENTAGES ETUDIES EN FONCTION DU TEMPS POUR DES ESSAIS REALISES AVEC UN FILTRE D-309 A 30 NL/MIN – (FRISING 2004) 38
FIGURE 25 : COURBES DE COLMATAGE SUR UN FILTRE EN FIBRE DE VERRE (A) ET UN FILTRE EN CELLULOSE (B) PAR DES PARTICULES ENROBEES AVEC 50 % DE VOLUME D'HUILE 39
FIGURE 26 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES COMPORTEMENTS POSSIBLES POUR LE DEPOT DE PARTICULES ENROBEES SUR DES FILTRES A FIBRES (HSIAO ET AL. (2015)) 40
FIGURE 27 : SCHEMA DE PRINCIPE DU BANC D'ESSAI 46
FIGURE 28 : PHOTO DU BANC D'ESSAI 47
FIGURE 29 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU MINICAST (CONSTRUCTEUR) 48
FIGURE 30 : SCHEMA DU TUBE CLAMPE 49
FIGURE 31 : SCHEMA DES ECHANGEURS DE CHALEUR 49
FIGURE 32 : SCHEMA DU GENERATEUR DE GOUTTELETTES 50
FIGURE 33 : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU WELAS : VUE SCHEMATIQUE DU GRANULOMETRE (MARCHAND 2008) 50
FIGURE 34 : PHOTO DE LA ZONE D'EXTRACTION 51
FIGURE 35 : DEBIT REEL MESURE AVEC UN COMPTEUR VOLUMETRIQUE EN FONCTION DU DEBIT AFFICHE 52
FIGURE 36 : PHOTO DE LA ZONE DE MESURE 52
FIGURE 37 : ÉVOLUTION DU DEBIT REEL MESURE EN FONCTION DU DEBIT AFFICHE. LES POINTS ORANGES CORRESPONDENT AUX MESURES EN AIR HUMIDE (90% RH) ET LES POINTS BLEUS AUX MESURES EN AIR SEC (15% RH) 53
FIGURE 38 : SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UN DMA (DONNEE CONSTRUCTEUR). UNE SOURCE A RAYONS X EST UTILISEE A LA PLACE DE LA SOURCE RADIOACTIVE PRESENTE SUR LE SCHEMA. 56
FIGURE 39 : GRANULOMETRIES DES TROIS AEROSOLS DE SUIES 57
FIGURE 40 : CONCENTRATION TOTALE EN FONCTION DU TEMPS POUR LES TROIS SUIES 58
FIGURE 41 : SCHEMA DE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DMA-APM EN SERIE (ISSU DE CADAVID RODRIGUEZ, 2015) 59
FIGURE 42 : SCHEMA DU PROTOCOLE OPERATOIRE POUR LA DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE EFFECTIVE DES PARTICULES (ISSU DE CADAVID RODRIGUEZ, 2015) 60
FIGURE 43 : ÉVOLUTION DE LA MASSE VOLUMIQUE EFFECTIVE EN FONCTION DU DIAMETRE DE MOBILITE ELECTRIQUE POUR DIFFERENTS POINTS OPERATOIRES DU MINICAST. LES SYMBOLES RONDS VIDES

correspondent aux mesures de cette etude, et les symboles triangles pleins aux mesures de Yon. 61
Figure 44 : Schematisation du protocole experimental..... 64
Figure 45 : Determination de la resistance du filtre vierge : evolution de la perte de charge en fonction du produit de la vitesse de filtration et de la viscosite de l'air 69
Figure 46 : Évolution de la perte de charge du filtre vierge soumis a des paliers croissants d'humidite relative de l'air. En vert fonce, valeur de l'humidite relative pour le capteur amont, et en vert clair valeur de l'humidite relative pour le capteur aval..... 69
Figure 47 : Évolution de la perte de charge du filtre D309 plan en fonction de la masse surfacique de particules de suies 18 a 15% RH et 90% RH (2,6 cm.s^{-1})..... 71
Figure 48 : Évolution de la perte de charge du filtre D309 plan en fonction de la masse surfacique de particules de suies 26 a 15% RH et 75% RH (2,6 cm.s-1)..... 72
Figure 49 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'a une perte de charge de 3500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suie 18 un debit de filtration de 22,5 L/min 74
Figure 50 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'a une perte de charge de 2500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suie 18 un debit de filtration de 22,5 L/min 74
Figure 51 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'a une perte de charge de 1500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 18 un debit de filtration de 22,5 L/min 75
Figure 52 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'a une perte de charge de 3500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suie 26 un debit de filtration de 12 L/min ... 75
Figure 53 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'a une perte de charge de 3500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 26 un debit de filtration de 12 L/min . 76
Figure 54 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'a une perte de charge de 1500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 26 un debit de filtration de 12 L/min . 76
Figure 55 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'a une perte de charge de 3500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suie 26 un debit de filtration de 22,5 L/min 77
Figure 56 : Évolution de la perte de charge de filtres d-309 jusqu'a une perte de charge de 2500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 26 un debit de filtration de 22,5 L/min 77
Figure 57 : Évolution de la perte de charge de filtres d-309 jusqu'a une perte de charge de 1500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 26 un debit de filtration de 22,5 L/min 78
Figure 58 : Schematisation des deux chutes de perte de charge pour un depot 3500 de suies 18 soumis a une humidite relative de 90%. 80
Figure 59 : Évolution de la perte de charge en fonction du temps pour deux depots 3500 suivis d'un air humide a 90% (suie 26) 81
Figure 60 : Évolution de la perte de charge pour trois depots a 1800, 2000 et 2200 Pa traverse par un air a une humidite relative de 90% (suie 26). Vitesse de filtration a 2,2 cm.s^{-1} 81

FIGURE 61 : ÉVOLUTION DE L'HUMIDITE RELATIVE MESUREE PAR LES CAPTEURS EN AMONT ET EN AVAL DU FILTRE LORS DU PASSAGE D'UN AIR HUMIDE SUR LE DEPOT 3500 (TAUX DE 70 ET 90 % ICI). 82
FIGURE 62 : DETERMINATION GRAPHIQUE DE LA RESISTANCE DES GATEAU AVEC LA LOI DE DARCY POUR LA SUIE 18 A 3500 PA POUR DEUX TAUX D'HUMIDITE RELATIVE (70 ET 90%). 83
FIGURE 63 : DETERMINATION DES RESISTANCES DE GATEAUX SECS POUR LES TROIS DEPOTS (SUIE 18) 84
FIGURE 64 : ÉVOLUTION DES RESISTANCES EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE POUR LES SUIES 18..... 84
FIGURE 65 : ÉVOLUTION DES RESISTANCES EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE POUR LES SUIES 26. 85
FIGURE 66: ÉVOLUTION DE LA RESISTANCE NORMALISEE POUR LES SUIES 18 (SYMBOLES REMPLIS) ET 26 (SANS REMPLISSAGE) EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE. 86
FIGURE 67 : ÉVOLUTION DE LA RESISTANCE DU GATEAU SUR LA RESISTANCE DE GATEAU SEC EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE POUR DEUX DEBITS DE FILTRATION. LE SYMBOLE ROUGE CORRESPOND A UN DEBIT DE 22,5 L/MIN ET ORANGE A UN DEBIT DE 12 L/MIN. (SUIE 26) 87
FIGURE 68 : ÉVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE DE DEUX FILTRES EN SERIE. 90
FIGURE 69 : CLICHES DES DEPOTS DE SUIES AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE. A GAUCHE, LE DEPOT 3500 AYANT ETE TRAVERSE PAR UN AIR A UNE HUMIDITE RELATIVE DE 90% ET A DROITE, UN DEPOT 3500 SANS AUCUN PASSAGE D'AIR. 91
FIGURE 70 : SCHEMA 92
FIGURE 71: ISOTHERME DE SORPTION DE VAPEUR D'EAU SUR LES PARTICULES DE SUIE 18 (T = 25°C) 97
FIGURE 72 : ÉVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE D'UN FILTRE D-309 EN FONCTION DU TEMPS 100
FIGURE 73 : ALLURE EXPERIMENTALE DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE LORS DU PASSAGE D'UN AIR HUMIDE SUR LE DEPOT 104
FIGURE 74 : EXEMPLE DE CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES AVEC UN MODELE D'ORDRE 1. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES VIOLETTES LES VALEURS NUMERIQUES..... 105
FIGURE 75 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR LE DEPOT 3500 AVEC LA SUIE 18 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS NUMERIQUES. 106
FIGURE 76 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR LE DEPOT 2500 SUR LA SUIE 18 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS NUMERIQUES. 107
FIGURE 77 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR LE DEPOT 1500 SUR LA SUIE 18 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES VERTES LES VALEURS NUMERIQUES. 107
FIGURE 78 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR LE DEPOT 3500 SUR LA SUIE 26 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS NUMERIQUES 108

FIGURE 79 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR LE DEPOT 2500 SUR LA SUIE 26 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS NUMERIQUES 108
FIGURE 80 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR LE DEPOT 1500 SUR LA SUIE 26 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES VERTES LES VALEURS NUMERIQUES 109
FIGURE 81 : ÉVOLUTION DES CONSTANTES DE TEMPS EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE POUR LA SUIE 26. 110
FIGURE 82 : ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE PROPORTIONNALITE EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE POUR LA SUIE 26. 110
FIGURE 83 : ÉVOLUTION DES CONSTANTES DE TEMPS EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE POUR LA SUIE 18 111
FIGURE 84 : ÉVOLUTION DU COEFFICIENT DE PROPORTIONNALITE EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE POUR LA SUIE 18 111
FIGURE 85 : DROITE DE PARITE : COMPARAISON VALEURS EXPERIMENTALES ET VALEURS NUMERIQUES. EN ROUGE, SUIE 18 ; EN BLEU, SUIE 26. 114
FIGURE 86 : ÉVOLUTION DES CONSTANTES DE TEMPS MOYENNEES EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE. 115
FIGURE 87 : ÉVOLUTION DES COEFFICIENT DIRECTEURS DES DROITES ALPHA = B*RH + C EN FONCTION DE LA PERTE DE CHARGE 115
FIGURE 88 : ÉVOLUTION DES ORDONNEES DES DROITES ALPHA = B*RH + C EN FONCTION DE LA PERTE DE CHARGE 116
FIGURE 89 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS SUR LA SUIE 18 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS ISSUES DU MODELE GENERAL 117
FIGURE 90 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS SUR LA SUIE 18 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS ISSUES DU MODELE GENERAL 117
FIGURE 91 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS SUR LA SUIE 18 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS ISSUES DU MODELE GENERAL 118
FIGURE 92 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS SUR LA SUIE 26 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS ISSUES DU MODELE GENERAL 119

FIGURE 93 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS SUR LA SUIE 26 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS ISSUES DU MODELE GENERAL 119
FIGURE 94 : ÉVOLUTION DE LA CHUTE DE PERTE DE CHARGE POUR L'ENSEMBLE DES ESSAIS SUR LA SUIE 26 : CONFRONTATION ENTRE LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES VALEURS NUMERIQUES OBTENUES. LES COURBES BLEUES REPRESENTENT LES VALEURS EXPERIMENTALES ET LES COURBES ROUGES LES VALEURS ISSUES DU MODELE GENERAL 120
FIGURE 95 : DROITE DE PARITE POUR LA SUIE 18 121
FIGURE 96 : DROITE DE PARITE POUR LA SUIE 26 121
FIGURE 97 : EFFET DE LA DILUTION SUR LA GRANULOMETRIE DES SUIES 26 (FACTEUR 10) 126
FIGURE 98 : ÉVOLUTION DE LA MASSE D'EAU EVAPOREE SUR FILTRE 127
FIGURE 99 : GRANULOMETRIE DES GOUTTELETTES POUR L'ESSAI 1 129
FIGURE 100 : GRANULOMETRIE DES GOUTTELETTES D'EAU POUR L'ESSAI 3 130
FIGURE 101 : GRANULOMETRIE DES GOUTTELETTES D'EAU POUR LES ESSAIS 2 ET 4. EN BLEU, ESSAIS 2 ; EN ROUGE, ESSAIS 4 130
FIGURE 102 : ÉVOLUTION DES PERTES DE CHARGES EN FONCTION DU TEMPS POUR LES QUATRE ESSAIS ... 132
FIGURE 103 : ÉVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE EN FONCTION DE LA MASSE SURFACIQUE GENEREE (ZOOM SUR LES ESSAIS 2, 3 ET 4) 134
FIGURE 104 : ÉVOLUTION DE LA PERTE DE CHARGE EN FONCTION DE LA MASSE SURFACIQUE GENEREE POUR LES QUATRE ESSAIS 134

Introduction générale

L'épuration de l'air contaminé par les particules générées par de nombreux procédés industriels fait le plus souvent appel à la filtration au moyen de médias filtrants. Ces équipements collectifs de protection des personnes et de l'environnement sont éprouvés en termes d'efficacité initiale mais leur comportement au cours du temps reste difficilement prévisible. Si les performances des médias filtrants sont bien documentées dans la littérature en conditions standards, elle l'est moins concernant la filtration sous humidité relative élevée et ce constat est d'autant plus vrai lorsque ces dispositifs sont confrontés à un air humide sursaturé (formation de gouttelettes). Ces situations peuvent notamment être rencontrées lors de l'usinage de métaux, l'épandage de pesticides, en situation accidentelle lors d'incendie dans des zones confinées comme les centrales nucléaires. D'après Mocho, Bouilloux, et Gmajner (2007), le colmatage des filtres peut avoir deux effets néfastes vis-à-vis du maintien du confinement dans une installation nucléaire : il risque d'entraîner la rupture mécanique du médium filtrant ou de provoquer une chute du débit d'extraction créant finalement un déséquilibre de la cascade de dépressions dans l'ensemble de l'installation. Il est alors crucial de connaître et pouvoir prédire les performances du filtre au cours de son colmatage par des particules en présence de vapeur d'eau afin de prévenir ces risques. Aussi, il est possible d'avoir une humidité de l'air élevée due à des conditions climatiques.

L'étude portera plus particulièrement sur l'influence de l'humidité relative lors du colmatage de filtres plans très haute efficacité (THE) par des particules suies ainsi que lors de mélanges de suies et de gouttelettes d'eau. La filtration d'aérosols liquides ou solides seules est déjà bien documentée dans la littérature. La filtration de mélanges d'aérosols solide et liquide a été très peu étudiée.

Il existe des études traitant des performances des filtres en fonction de l'humidité relative de l'air (Joubert 2009; Gupta et al. 1993), mais celles-ci ne vont jamais jusqu'à la formation de gouttelettes d'eau et elles se limitent aux particules d'alumine et de chlorure de sodium. Pourtant, la possibilité d'un mélange d'aérosol eau/suie était déjà évoqué par Ricketts, Schneider, et Wilhelm (1991), évoquant l'eau liquide comme l'un des défis les plus ambitieux auxquels les filtres doivent être préparés dans les installations nucléaires. Il existe l'étude de Frising (2004) concernant l'évolution des performances de filtres de nature différente en présence de mélanges d'aérosols d'alumine et d'huile.

L'objet de ce travail est donc de pallier un manque de connaissances sur l'influence de l'humidité relative lors du colmatage de particules de suie mais également en cas de mélange avec des gouttes d'eau.

Ce manuscrit s'articule autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre décrit l'état de l'art dans le domaine de la filtration d'aérosols solides déjà bien documentée dans la littérature, de la filtration d'aérosols liquides, de l'influence de l'humidité relative vis-à-vis d'aérosols hygroscopiques et non hygroscopiques et de la filtration de mélanges d'aérosols liquides et solides.

Le deuxième chapitre présente le banc d'essai mis en place spécifiquement pour ces travaux de thèse. Ce banc permet de réaliser différentes études expérimentales :

- Filtration de particules de suies et caractérisations des suies générées. La génération de suies a été ainsi validée expérimentalement par comparaison avec des données existantes dans la littérature.
- Génération de gouttelettes d'eau ou d'un air à des taux humides variables.
- Le banc a été dimensionné de manière à rendre possible le mélange de gouttelettes d'eau avec des particules de suies et la génération de suie sous air humide.

Le troisième chapitre présente deux types de résultats. Les premiers résultats concernent la filtration de particules de suies sous humidité en comparaison à une filtration en air sec. La deuxième partie du chapitre présente l'influence de différents taux d'humidité relative sur des gâteaux de suies formés en air sec présentant des résistances aérauliques différentes. Ainsi les dynamiques des réponses en terme de perte de charge sont étudiées selon le taux d'humidité relative et la résistance aéraulique des gâteaux.

Le quatrième chapitre se déroule en deux parties : une approche statique et une approche dynamique des réponses de perte de charge obtenues. Un modèle comportemental de l'évolution de la perte de charge lors de passage d'air humide sur un gâteau de particule de suie est proposée. Les résultats de ce modèle permettront de proposer une perspective de modèle prédictif de cette évolution de perte de charge à partir des résultats expérimentaux obtenus.

Le cinquième et dernier chapitre s'intéresse à l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan Très Haute Efficacité vis-à-vis de mélanges d'aérosols de suies et de gouttelettes d'eau. Les difficultés expérimentales de tels mélanges seront mises en avant et détaillées. L'évolution des pertes de charge en fonction de la proportion de solides et de liquides sera étudiée.

Chapitre 1 État de l'art

Cette étude bibliographique commencera par une partie traitant des caractéristiques des aérosols et des médias fibreux, puis de la filtration Très Haute Efficacité d'aérosols solide, liquide puis de mélanges liquide/solide et enfin de particules solides sous humidité.

1.1 Filtration des aérosols sur des filtres fibreux plans – généralités

1.1.1 Caractérisation des aérosols

Un aérosol est une suspension de particules solides et/ou liquides dans une phase gazeuse dont la vitesse de chute est négligeable (Renoux et Boulaud 1998). Ainsi, leur taille est comprise entre quelques nanomètres et 100 µm. Les particules supérieures à 2 µm sont qualifiées de « grosses particules » et celles de diamètre inférieur à 2 µm de « fines particules », les particules de moins de 1 µm sont qualifiées de « submicroniques » (Renoux et Boulaud 1998). Les nanoparticules sont les particules de diamètre inférieur à 100 nm. Un aérosol polydispersé, c'est-à-dire constitué de tailles différentes (écart-type géométrique >1,2 µm) est distingué d'un aérosol monodispersé, dont l'ensemble des particules a la même taille différentes (écart-type géométrique <1,2 µm).

1.1.1.1 Caractérisation du milieu gazeux

1.1.1.1.1 Le libre parcours moyen

Le milieu gazeux dans lequel évolue un aérosol est un milieu discontinu constitué de molécules qui ont un mouvement aléatoire. Pour un milieu gazeux ne comportant qu'une sorte d'espèces, celles-ci subissent des chocs élastiques et leur vitesse change en grandeur et en direction (Renoux et Boulaud 1998). Le libre parcours moyen λ_m est défini comme la distance moyenne qu'une molécule traverse avant d'entrer en collision avec une autre (Kulkarni, Baron, et Willeke 2011). Il est défini par la relation :

$$\lambda_m = \frac{RT}{N_a P \pi {d_m}^2 \sqrt{2}} \quad (1)$$

où d_m est le diamètre moyen des molécules.

Pour les molécules d'air, le libre parcours moyen λ peut être défini par la relation :

$$\lambda_m = \lambda_0 \frac{T}{293} \frac{101{,}3}{P} \frac{1 + 110/293}{1 + 110/T} \quad (2)$$

Où P est en kPa et T en K et λ_0 est le libre parcours moyen de l'air à 293 K à pression atmosphérique (environ égal à 65 nm pour l'air, à température et pression normales).

1.1.1.1.2 Le nombre de Knudsen

Le nombre adimensionnel de Knudsen est utilisé pour caractériser les milieux diphasiques. Il est défini par le rapport du libre parcours moyen des molécules du gaz porteur λ_g divisé par le rayons des particules, il permet de caractériser la continuité du milieu :

$$K_n = \frac{2\lambda_g}{d_p} \quad (3)$$

Trois régimes sont définis selon la valeur de K_n :

- $K_n \ll 1$: domaine continu : les particules sont bien plus grosses que le libre parcours moyen des molécules de gaz.
- $K_n \approx 1$: régime intermédiaire
- $K_n \gg 1$: domaine moléculaire. La diffusivité moléculaire est largement impactée par la présence des particules.

1.1.2 Caractérisation des médias fibreux

Un filtre à fibres est caractérisé par des caractéristiques physiques qui sont : le grammage, la compacité, l'épaisseur, le diamètre de fibres. Ces caractéristiques, intrinsèques aux filtres à fibres, permettent de déterminer l'efficacité et la perte de charge du médium vierge. La connaissance de ces paramètres doit permettre de choisir quel type de filtre doit être utilisé et pour quelle application. Connaître la durée de vie du filtre (c'est-à-dire la durée pendant laquelle la perte de charge reste acceptable avec une efficacité suffisante) est alors plus complexe, car cela dépend des conditions opératoires et du type d'aérosol auquel il est confronté.

1.1.2.1 Caractéristiques physiques des filtres à fibres

Un filtre à fibres est ainsi constitué d'un enchevêtrement de fibres de différentes natures possibles (verre, téflon…) (Penicot-Bauge 1998). Un médium filtrant est caractérisé par différents paramètres physiques :

- Le grammage G : rapport entre la masse du filtre et sa surface
- La compacité α qui est le rapport du volume des fibres sur le volume du filtre. Ce paramètre peut aussi être défini à partir de la porosité (ε) qui représente le volume de vide sur le volume de filtre soit α = 1- ε.
- L'épaisseur Z qui est un paramètre important car il intervient dans le calcul de la compacité et de l'efficacité du filtre.
- Le diamètre de fibre d_f : la distribution de taille des fibres est importante car elle a une influence sur la perte de charge et l'efficacité du médium filtrant. Cette distribution de taille dans le médium est assez difficile à caractériser expérimentalement.

1.1.2.2 Efficacité de filtration

L'efficacité de collection est le rapport entre le nombre N de particules collectées dans le filtre et le nombre de particules le traversant (Renoux et Boulaud 1998).

Soit l'efficacité en nombre E_n :

$$E_n = 1 - \frac{N_{nombre\ aval}}{N_{nombre\ amont}} \quad (4)$$

Une autre grandeur utilisée est la perméance P, qui est définie par la relation :

$$P_{ce} = 1 - E \quad (5)$$

L'efficacité fractionnelle correspond au nombre de particules retenues par rapport au nombre de particules traversant le filtre pour une taille de particule donnée. Pour un médium fibreux, on peut déterminer l'efficacité fractionnelle E(dp) par la relation :

$$E(dp) = 1 - exp\left(-\frac{4\eta\, Z\alpha}{(1-\alpha)\pi d_f}\right) \quad (6)$$

Où η est l'efficacité unitaire d'une fibre qui est fonction notamment de la taille des particules, α la compacité, d_f le diamètre de fibre(m) et Z l'épaisseur du médium(m).

Cette expression montre que l'efficacité fractionnelle d'un filtre à fibres dépend de l'efficacité unitaire de la fibre, et il convient alors de décrire ce terme. L'efficacité unitaire de fibre est le rapport entre le nombre de particules qui heurtent la fibre et le nombre de particules qui

pourraient la heurter si les lignes de courant n'étaient pas déviées (Kulkarni, Baron, et Willeke 2011).

1.1.2.3 Efficacité unitaire de fibre

Les particules de l'aérosol traversant un médium peuvent s'écarter de la ligne de courant du gaz porteur (pour différentes raisons) et rentrer en collision avec la fibre. Plusieurs mécanismes sont impliqués dans cette déviation : la diffusion, l'inertie, ou encore l'attraction électrostatique et la sédimentation. La Figure 1 montre l'importance relative des différents mécanismes selon le diamètre de particule. Un minimum d'efficacité est constaté entre 0,1 et 0,3 µm. Ce minimum est nommé « Most Penetrating Particle Size (MPPS). La diffusion est moins efficace lorsque le diamètre de particule augmente alors que l'impaction et l'inertie sont plus importantes pour des particules de diamètre élevé. Dans ce domaine correspondant au MPPS, ces mécanismes de collecte sont en compétition et respectivement l'efficacité est moins importante La plupart des auteurs expriment l'efficacité unitaire de fibre comme la somme des efficacités correspondantes à chacun de ces mécanismes, en les supposant indépendants les uns des autres, soit :

$$\eta = \sum \eta_j \qquad 7$$

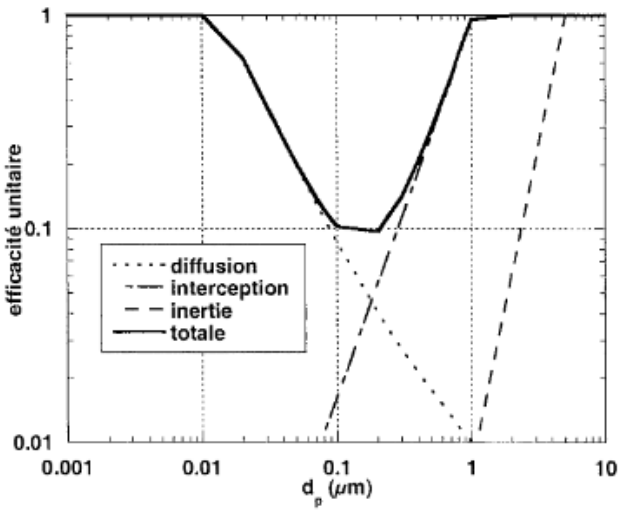


Figure 1 : Représentation schématique de l'efficacité unitaire en fonction du diamètre de particules

Cependant, d'autres auteurs prennent en comptent l'interaction entre ces mécanismes et proposent des expressions différentes de l'efficacité unitaire de fibre. Une description qualitative de ces mécanismes est réalisée dans la partie suivante, ainsi que les nombres adimensionnels les caractérisant. De nombreuses expressions théoriques et empiriques de

ces efficacités individuelles existent dans la littérature et la majorité d'entre elles peuvent être retrouvées dans les travaux de Frising (2004).

1.1.2.4 Capture d'aérosol par les filtres à fibres

- *Diffusion*

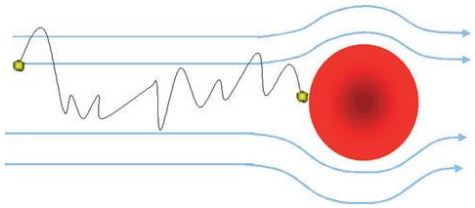


Figure 2 : schéma d'une particule capturée par diffusion

Le régime de diffusion concerne principalement les petites particules notamment celles dont le diamètre est inférieur à 100 nm. Du fait de leur petite taille, elles ne suivent pas les lignes de courant en raison du mouvement brownien qui peut les amener ou non à être collectée par une fibre. Généralement, l'adhésion sur les fibres se fait par interactions de Van der Waals. L'efficacité unitaire de collecte de diffusion est une fonction du nombre de Péclet, soit :

$$Pe = \frac{d_f U_i}{D} \quad (8)$$

Avec d_f le diamètre de fibre, U_i la vitesse interstitielle dans le filtre et D le coefficient de diffusion brownien.

Ce nombre caractérise en effet la capture par diffusion brownienne car il décrit le rapport entre le transport par convection et le transport par diffusion. Plus les particules sont petites plus ce nombre est grand.

Le coefficient D brownienne est donné par la relation :

$$D = \frac{k_B T Cu}{3\pi \mu d_p} \quad (9)$$

Où k_B est la constante de Boltzmann, T la température, d_p le diamètre de particules, μ la viscosité dynamique et Cu le coefficient de Cunningham :

$$Cu = 1 + Kn_p\left(A + Bexp\left(-\frac{C}{Kn_p}\right)\right) \quad (10)$$

A, B et C sont les coefficients du facteur de Cunningham dont différentes valeurs sont données par plusieurs auteurs de la littérature (plusieurs expressions sont regroupées dans les travaux de Frising (2004))

Et Kn_p le nombre de Knudsen de particule :

$$Kn_p = 2\frac{\lambda}{d_p} \quad (11)$$

- *Interception*

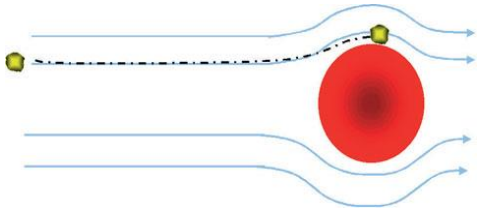


Figure 3 : schéma d'une particule capturée par interception

Lorsque la distance du centre de la particule à la fibre est inférieure à son rayon alors la particule est interceptée par la fibre. Ce mécanisme est caractérisé par le rapport des diamètres :

$$I = \frac{d_p}{d_f} \quad (12)$$

- *Impaction*

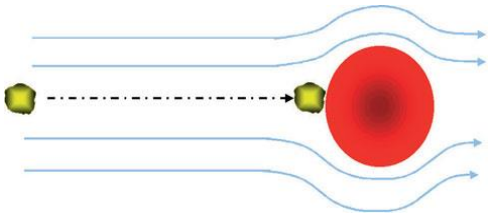


Figure 4 : schéma d'une particule capturée par impaction

Comme le montre la Figure 4 les lignes de courant aux alentours de la fibre sont curvilignes. La particule suit la ligne de courant, puis pour une particule d'une certaine taille et/ou masse elle ne va pas suivre la ligne du courant du fait de son inertie et va heurter la fibre pour y être collectée. Elle s'impacte donc sur la fibre. Ce mécanisme est gouverné par le nombre de Stokes :

$$St = \frac{Cu\rho_p U f d_p^2}{18\mu d_f} \quad (13)$$

La prépondérance de ces mécanismes dépend de la taille des particules comme vu précédemment, mais aussi de la vitesse de filtration, des propriétés du gaz porteur et du médium filtrant.

La connaissance et la maîtrise de ces mécanismes sont essentielles afin de pouvoir proposer une amélioration des performances des filtres. A savoir, par exemple l'augmentation de la vitesse peut améliorer l'efficacité de collection pour les particules concernées par l'impaction, mais ce n'est plus vrai pour les particules concernées par la diffusion. Ainsi, connaissant la granulométrie des aérosols à capturer et les conditions opératoires, une optimisation du filtre peut être proposée par l'appréhension de ces mécanismes et la théorie de la filtration.

1.1.2.5 Perte de charge initial d'un filtre à fibres

La perte de charge ΔP est définie comme la différence des pressions statiques en amont et en aval d'un médium filtrant notées P_{amont} et P_{aval} respectivement, pour une conduite droite sans changement de section :

$$\Delta P = P_{amont} - P_{aval} \quad (14)$$

Plus celle-ci est élevée plus l'écoulement entre l'amont et l'aval plus la résistance à l'écoulement est grande. La perte de charge caractérise la résistance à l'écoulement.

Le nombre de Reynolds de pores Re_{po} permet de définir le régime d'écoulement de l'air à travers le filtre vierge, qui peut être considéré comme un milieu poreux, soit :

$$Re_{po} = \frac{\rho U_f}{\mu A_f \alpha} \quad (15)$$

ρ est la masse volumique du fluide, U_f la vitesse de filtration, μ la viscosité dynamique du fluide, A_f la surface spécifique des fibres et α la compacité du médium filtrant.

Si $Re_{po} < 1$, le régime est dit laminaire. Si $Re_{po} > 10$ le régime est dit turbulent. Entre ces deux valeurs, le régime est dit intermédiaire.

- *Expression de la perte de charge d'un médium vierge en régime laminaire*

Darcy (1856) propose une expression de la perte de charge d'un milieu poreux homogène et isotrope traversé par un fluide incompressible à faible vitesse :

$$\Delta P = \frac{Z}{B} \mu U_f \quad (16)$$

Où ΔP est la perte de charge du milieu poreux (Pa), Z l'épaisseur du milieu (m), μ la viscosité dynamique du fluide (Pa.s), U_f la vitesse de filtration (m/s), B la perméabilité du milieu (m^2).

B étant défini par l'expression :

$$B = \frac{r_f^2}{f(\alpha)} \quad (17)$$

Avec r_f le rayon des fibres du médium filtrant, f(α) une fonction de la compacité du médium dont les expressions sont résumés par (Frising 2004).

Plus la perte de charge d'un médium vierge mesurée est proche de la perte de charge calculée théoriquement par la loi de Darcy, plus le médium est homogène.

- *Expression de la perte de charge d'un médium vierge en régime turbulent*

En régime turbulent, il est possible d'utiliser la relation d'Ergun :

$$\Delta P = \frac{h_k a_g^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu Z U_f + \frac{h_b a_g (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho_f Z U_f^2$$

h_k la constante de Kozeny, hb constante la constante de Burkle-Plummer. ε la porosité, a_g la surface spécifique, μ la viscosité dynamique du fluide (Pa.s), U_f la vitesse de filtration (m/s), ρ_f la masse volumique du fluide (kg/m^3).

1.1.2.6 Adhésion et réentrainement des particules

Les particules se fixent sur une paroi solide grâce aux forces d'adhésion. Les trois principales sont les forces de Van der Waals, capillaires et électrostatiques, et sont décrites dans ce paragraphe.

1.1.2.6.1 Forces de Van der Waals

Les forces de Van der Waals sont des forces attractives provenant de l'interaction entre les moments dipolaires des particules. Ces forces agissent pour des particules séparées d'une faible distance (quelques nanomètres). Contrairement aux forces capillaires et électrostatiques, les forces de Van der Waals sont toujours présentes. Ces interactions attractives varient en $1/z^6$ (où z est la distance entre les molécules) et donc diminuent fortement lorsque la distance entre les particules augmente. Ces interactions sont décrites par les

formules de Keesom, Debye et London mais sont usuellement regroupées sous le terme d'interactions de Van der Waals.

Pour le calcul de la force d'attraction de Van der Waals, deux approches existent (Brown 1993) :

- Bradley (1932) et Hamaker (1937) proposent une approche microscopique
- Lifshitz (1956) a développé une approche macroscopique

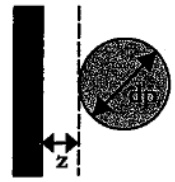
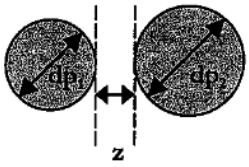
Figure	Force de Van der Waals	Remarques
Sphère / Plan 	$F_{VdW} = \frac{A\ dp}{12\ z^2}$	
Sphère / Sphère 	$F_{VdW} = \frac{A\ dp}{24\ z^2}$	dp : diamètre composé $\frac{1}{dp} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{dp_1} + \frac{1}{dp_2}\right)$

Figure 5 : Expressions de la force de Van der Waals (surface lisse et indéformable) (Thomas 2001)

1.1.2.6.2 Forces capillaires

Il est constaté expérimentalement que l'adhérence des particules augmente avec l'humidité. Un film liquide formée entre la surface de la fibre et la particule par condensation capillaire augmente l'attraction entre les deux corps. Pour un contact sphère-plan, la force capillaire est exprimée par la relation (Renoux et Boulaud 1998) :

$$F = 4\pi r_p \gamma \qquad 18$$

Où r_p est le rayon de la particule sphérique (m) et γ la tension superficielle du film liquide.

Pour une interaction capillaire entre deux particules, cette force s'exprime par la relation :

$$F = \pi d_p \gamma_{LV} \sin\beta \left(\sin(\beta + \theta) + \frac{d_p}{4}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)\sin\beta \right) \qquad 19$$

Avec,

$$R_1 = \frac{d_p(1-\cos\beta)+Z}{2\cos(\beta+\theta)} \quad (20)$$

$$R_2 = \frac{d_p}{2}\sin\beta + R_1(\sin(\beta+\theta)-1) \quad (21)$$

Et β le demi angle de mouillage, θ l'angle de contact (schéma en Figure 6)

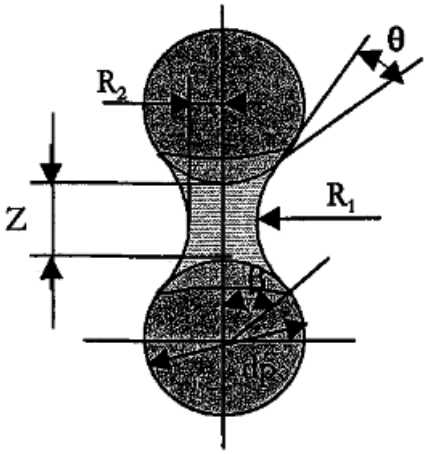


Figure 6 : Adhésion par pont liquide (Thomas 2001)

Les forces capillaires ont un rôle important en filtration d'aérosols liquides. Davies (1973) décrit le comportement des aérosols liquides collectés sur un média fibreux en expliquant que les gouttelettes liquides collectées sur les fibres adhèrent grâce aux forces capillaires. A travers l'étude du colmatage de filtres à fibres par des gouttelettes, Contal et al. (2004) ont montré qu'après une certaine masse de liquide déposée, une redistribution due aux forces capillaires a lieu. Thomas (2001) montre que cinq filtres accolés se colmatent les uns après les autres par déplacement du liquide collecté au sein de la structure fibreuse par capillarité. Comme ces exemples l'indiquent, l'action capillaire a un rôle majeur dans la compréhension du colmatage de filtres à fibres par des aérosols liquides.

1.1.2.6.3 Forces électrostatiques

D'après la loi de Coulomb « l'intensité de la force électrostatique entre deux charges électriques est proportionnelle au produit des deux charges et est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges. La force est portée par la droite passant par les deux charges ». La force électrostatique d'interaction entre deux particules sphériques est décrite par la relation :

$$F_{el} = k_0 \frac{ee'}{z^2} \quad (22)$$

k_0 étant la constante diélectrique, e et e' les charges électriques de chaque particule, z la distance entre les particules.

La détermination de la charge d'une particule est complexe. Pour une particule sphérique, la charge maximale est donnée par la relation de Pauthenier :

$$q_{max} = \frac{3k_0}{2 + k_0} \varepsilon_0 \pi E_{champ} d_p^2 \quad (23)$$

Avec k_0 la constante diélectrique, ε_0 permittivité du vide et E_{champ} champ disruptif du milieu

Pour une particule liquide, la charge maximale est limitée par la stabilité de la goutte soumise au champ électrique superficiel, et sa valeur est donnée par la relation de Rayleigh :

$$q_{max} = \pi d_p^{3/2} \sqrt{8\varepsilon_0 \gamma} \quad (24)$$

Les forces électrostatiques sont souvent utilisées afin d'améliorer la performance des filtres en présence d'aérosols solides chargés. Mouret (2008), par exemple, a mis en évidence l'amélioration de la capture de particules par des filtres synthétiques avec des aérosols chargés. Ses résultats montrent une amélioration spectaculaire de l'efficacité des filtres synthétiques en comparant des aérosols chargés et un aérosol neutre. Les effets électrostatiques sont en particulier recherchés pour améliorer les efficacités des masques de protection respiratoire.

1.2 Filtration d'aérosols solides sur des médias fibreux plans

Cette partie est dédiée à l'étude de la filtration d'aérosols solides par des médias fibreux plans. De manière générale, les performances des filtres sont définies par deux paramètres clés : la perte de charge et l'efficacité. Une perte de charge qui devient trop importante risque d'endommager le filtre ou bien de perturber l'écoulement en amont, si l'efficacité devient trop faible cela implique que trop de particules passent à travers le média, ainsi le filtre ne remplit plus sa mission et il doit être régénéré ou remplacé. L'intérêt sera porté dans cette partie sur l'évolution de ces deux critères au cours du colmatage par des particules solides, ceux-ci conditionnant la durée de vie du filtre (le filtre idéal doit présenter une perte de charge acceptable tout en ayant une efficacité suffisante). Cette partie de la filtration est bien

documentée dans la littérature ((Thomas et al. 2001), (Declan C. Walsh 1996), (Penicot et al. 1999), (Novick, Monson, et Ellison 1992)).

1.2.1 Évolution des performances du filtre

Cette étude s'intéressera principalement aux filtres plans Très Haute Efficacité THE puisque le travail présent sera réalisé avec des filtres THE. Cependant il existe d'autres types de filtres plans, ou bien des filtres plissés THE utilisés notamment dans les installations nucléaires françaises. Selon le type de filtre (plan, plissé, nature des fibres, haute ou moyenne efficacité…), les performances du média varient. L'évolution de ces deux principaux paramètres perte de charge et efficacité dépend également de nombreux facteurs tels que le le diamètre de fibre, la vitesse de l'écoulement ou la taille de l'aérosol.

Walsh (1996) a étudié l'influence du colmatage de média fibreux (type de filtre non précisé) de différentes compacités par un aérosol solide d'acide stéarique allant du domaine submicronique au domaine micronique. La Figure 7 montre l'évolution de la perte de charge et de la pénétration pour un aérosol micronique en fonction de la masse déposée. Ces résultats ont été validés avec un aérosol submicronique d'uranine sur filtres à fibre plans THE par Penicot-Bauge (1998).

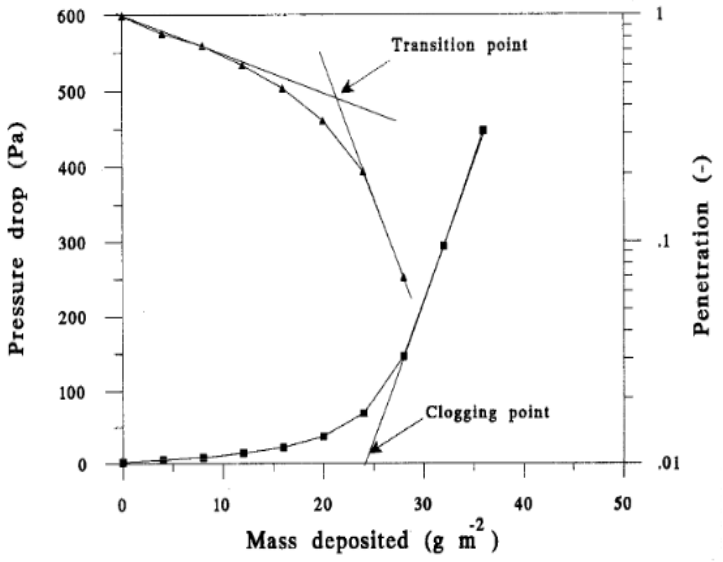


Figure 7 : Évolution de la perte de charge et de la pénétration d'un aérosol solide micronique (dp =1,35 µm) – (Walsh 1996)

Trois phases peuvent être distinguées comme le montre la Figure 7 :

- La première étape s'appelle la filtration en profondeur : la perte de charge augmente légèrement et la pénétration diminue faiblement. Le dépôt des particules se fait au sein du média.

- Au fur et à mesure de la collecte des particules, un dépôt se forme à la surface du filtre et l'évolution de la perte de charge (variation exponentielle) et de la pénétration change à partir de cette seconde zone appelée « zone de transition » ou « point de colmatage ».
- A partir de cette seconde phase, les particules continuent de se déposer sur le filtre, c'est le début de la « filtration en surface » avec une accumulation de particules à la surface du média filtrant. Cette couche formée par les particules est appelée « gâteau ». Dans cette phase, la pénétration chute de manière linéaire et la pente de la courbe de perte de charge augmente à cause d'une réduction de surface significative.

Pour comprendre l'évolution de ces deux principales grandeurs (perte de charge et efficacité), Thomas et al. (2001) ont réalisé des clichés au microscope électronique à balayage du média pour chacune de ces trois étapes de la filtration.

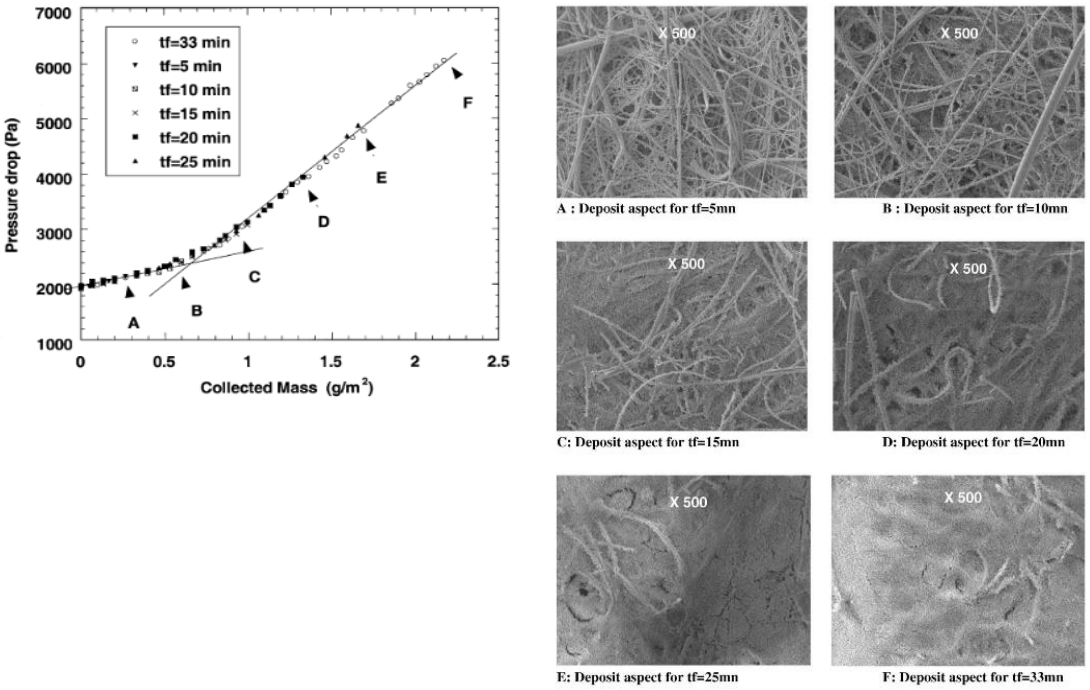


Figure 8 : A gauche, un exemple de l'évolution de la perte de charge durant le colmatage de particules de fluorescéine (dp = 0,18 µm, C=3., mg/m³ U_0 = 30 cm/s). A droite, clichés photographiques au microscope électronique à balayage durant le colmatage de particules de fluorescéine. (Thomas et al. 2001)

Les photos aux points A et B sur la Figure 8 confirment les observations microscopiques de Declan et Walsh (1996), c'est-à-dire que le dépôt s'effectue dans le média lors de la première étape de filtration et que ce dépôt de particules se présente sous forme de dendrites pour les aérosols submicroniques. Thomas et al. (2001) montrent également que pour des aérosols microniques, le dépôt est constitué d'agglomérats compacts et que les deux premières

« étapes » sont difficilement observables sur des filtres plans THE, ce qui confirme les observations de Japuntich et al. (1994) avec des particules de 9 µm.

1.2.2 Influence des paramètres

Cette partie détaillera l'influence de différents paramètres impactant la filtration d'aérosols solides sur un média plan fibreux tels que la concentration, la taille des particules ou la vitesse d'écoulement.

1.2.2.1 Influence de la concentration

Penicot-Bauge (1998) a fait varier la concentration d'un aérosol submicronique d'uranine pour deux tailles de particule soit 0,18 µm et 0,31 µm et pour différentes vitesses de filtration . L'auteur montre que pour les concentrations sélectionnées (pour un rapport de dilution voisin de 3), il n'y a pas eu d'influence significative vis-à-vis des filtres à fibres plans THE. Callé (2000) a aussi testé l'influence de la concentration mais pour des particules microniques (dp = 2,6 µm), et n'a pas noté d'effet sur la perte de charge des filtres testés (fibres de cellulose ou de polyester) lors du colmatage.

1.2.2.2 Influence de la vitesse de filtration

Penicot-Bauge (1998) a réalisé pour un aérosol solide submicronique d'uranine (0,18-0,31-0,40 µm) des mesures de perte de charge sur un filtre plan THE pour des vitesses comprises entre 1,1 cm/s et 50 cm/s. La figure 9 montre que pour un aérosol submicronique d'uranine le point de colmatage ou zone de transition est indépendant pour des vitesses comprises entre 1,1 cm/s et 50 cm/s. Cela signifie que pour des aérosols submicroniques, la transition se fait à partir d'une certaine masse de particules collectées indépendamment de la vitesse de filtration.

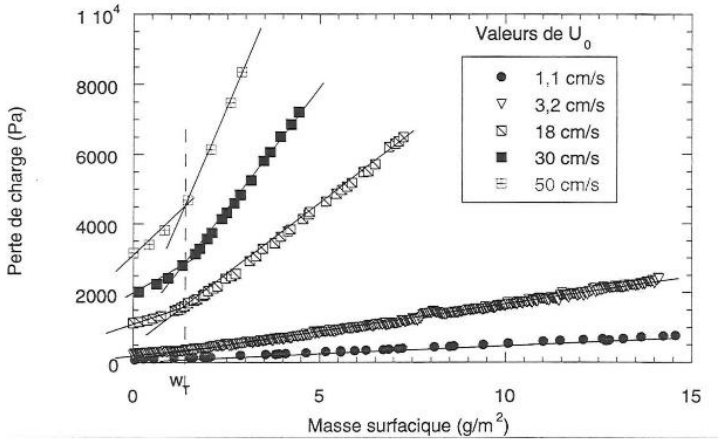


Figure 9 : Courbes d'évolutions de la perte de charge d'aérosol d'uranine (dp = 0,31 µm) pour différentes vitesses de filtration. (Penicot-Bauge 1998)

Le rapport $\frac{\Delta P}{Uf}$ est ensuite tracé en fonction de la masse déposée afin de vérifier si l'augmentation de perte de charge est dû à la vitesse ou à une modification du dépôt. Finalement, la Figure 10 montre que toutes les courbes se superposent quelque soit la vitesse. Ainsi, l'auteur conclut que le dépôt des particules submicroniques sur les fibres ne dépend pas de la vitesse dans la gamme étudiée. Du fait de leur taille, les particules sont collectées par diffusion, ce résultat est cohérent.

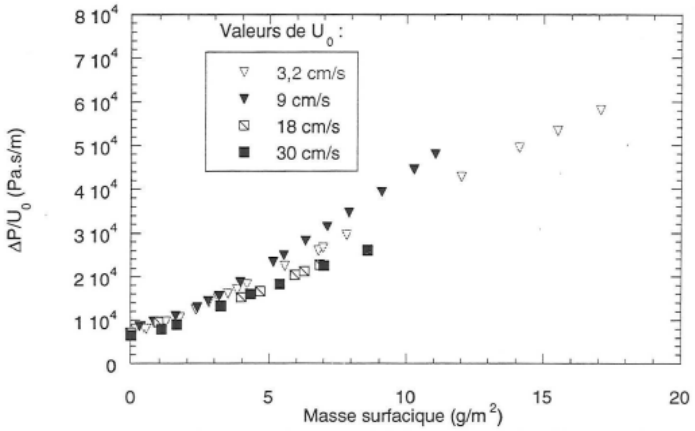


Figure 10 : Évolution du paramètre $\frac{\Delta P}{Uf}$ pour différentes vitesses de filtration avec un aérosol d'uranine (dp = 0,40 µm)- (Penicot-Bauge 1998)

Cependant, comme le montre la Figure 10, Penicot-Bauge (1998) note une augmentation du rapport $\frac{\Delta P}{Uf}$ en fonction de la masse surfacique avec une diminution de la vitesse.

Concernant les aérosols microniques, la zone de transition augmente avec la vitesse (Thomas (2001)). Toutefois, l'influence de la vitesse lors de filtration d'aérosols solides semble plus complexe que cela. En effet, Merlin cité par Thomas (2001) montre des résultats différents pour un aérosol micronique d'émeri (2 µm) vis-à-vis de deux types de filtres à fibres : l'un en fibres de cellulose, l'autre en fibres de verre. Concernant le filtre en fibres de verres, il obtient une augmentation de la zone de transition avec la vitesse. Pour le filtre en fibres de cellulose il obtient des résultats allant dans le même sens que ceux de Callé (2000), c'est-à-dire que la zone de transition augmente avec la vitesse.

Finalement, pour les particules submicroniques le mécanisme de collecte dominant étant la diffusion la formation du dépôt ne dépend pas de la vitesse contrairement aux particules microniques dont le point de colmatage semble augmenter avec la vitesse. Mais comme l'a montré Merlin, il semblerait que cela dépende également de la nature de la fibre et/ou de la structure du filtre, il faudrait donc mener une investigation rigoureuse pour compléter les connaissances sur l'influence de la vitesse.

1.2.2.3 Influence de la taille des particules

L'influence de la granulométrie a également été étudiée par (Walsh 1996) (aérosols submicroniques et microniques), par Penicot-Bauge (1998) (aérosols submicroniques), et par Novick and al. (1992) (aérosols submicroniques et microniques).

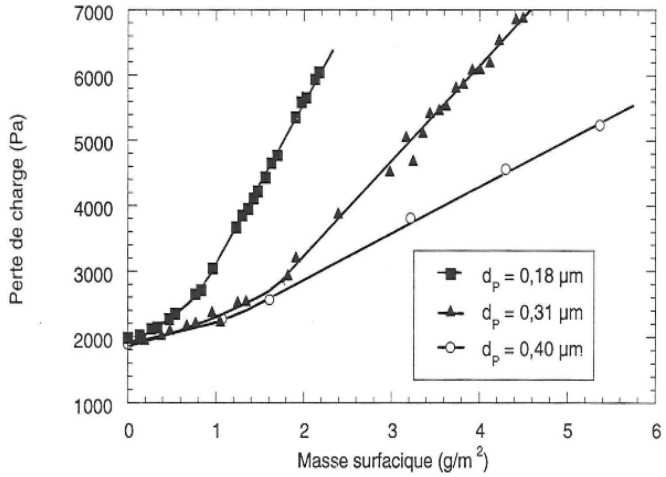


Figure 11 : Influence de la granulométrie sur l'évolution de la perte de charge (U_0 = 30 cm/s) - (Penicot-Bauge 1998)

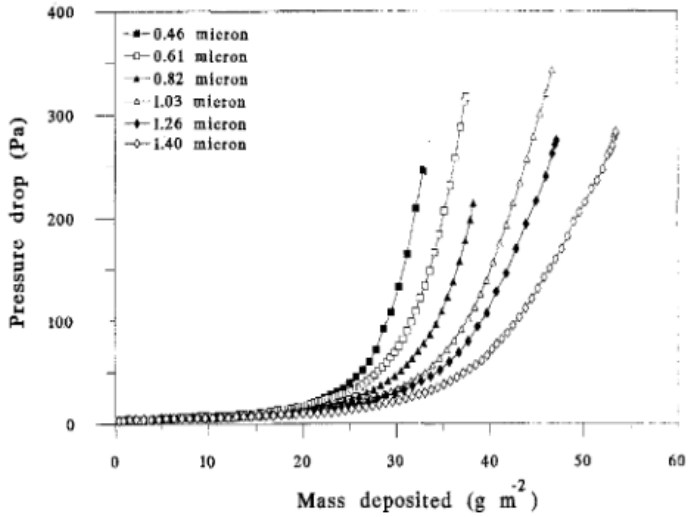


Figure 12 : Perte de charge du filtre colmaté avec des particules de 0,46 à 1,40 µm (U_0 = 0,10 m/s) – (DC. Walsh 1996)

Les résultats de Penicot-Bauge (1998) et Declan C. Walsh (1996) sont cohérents entre eux, plus l'aérosol est de petite taille plus la perte de charge est élevée pour une même masse surfacique collectée.

Novick et al. (1992) se sont intéressés à la caractérisation de la perte de charge et de la masse collectée pour des filtres THE en fonction du diamètre des particules et pour différents aérosols (soit différentes formes de particules, différentes masses volumiques…). La Figure 13 montre l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus pour les trois aérosols et pour différents

diamètres médians en masse (0,50 µm à 1,69 µm). Ces résultats valident le fait que plus l'aérosol est petit plus la perte de charge est grande.

L'explication avancée est que la surface spécifique des particules sera d'autant plus grande que leur taille sera petite grande ce qui favorisera une plus grande perte de charge du filtre. Inversement, des particules de plus grand diamètre ont une surface spécifique plus faible donc génèrent une perte de charge moins importante.

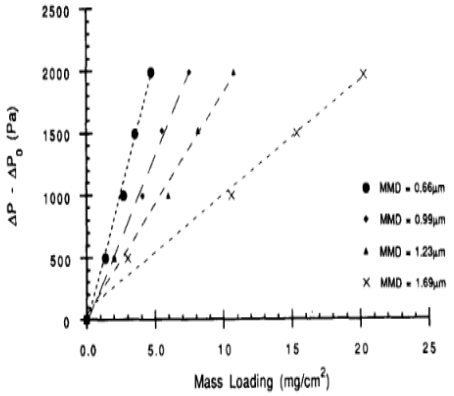


Fig. 1. Net increase in pressure drop as a function of mass loading for different particle distributions of NaCl aerosol.

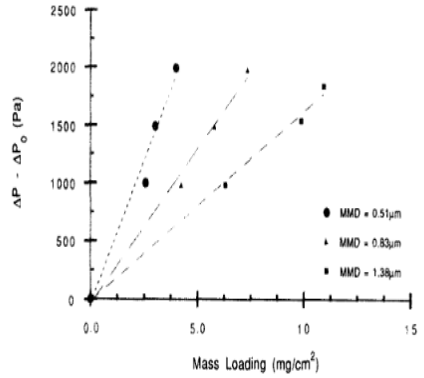


Fig. 2. Net pressure drop as a function of mass loading for different particle size distributions of ammonium chloride.

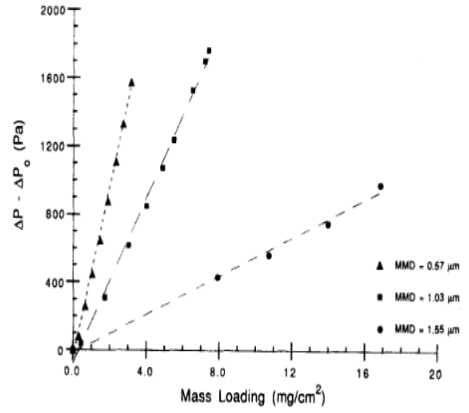


Fig. 3. Net pressure drop as a function of mass loading for different particles size distributions of aluminum oxide.

Figure 13 : Évolution de la perte de charge en fonction de la masse collectée pour différentes granulométries et différents aérosols solides – (Novick, Monson, et Ellison 1992)

Walsh (1996) a également étudié l'influence de la granulométrie de l'aérosol sur la pénétration des particules à travers un filtre de nature non précisée. Les résultats montrent que plus le diamètre médian de l'aérosol est petit plus la pénétration diminue en fonction de la masse collectée ce qui est cohérent avec les mécanismes de diffusion et d'impaction.

1.2.2.4 Aérosols de combustion

Les suies sont des particules carbonées sous forme d'agrégats issues d'une combustion incomplète. Leur morphologie et leur composition sont variables selon le processus de combustion qui les a générées. Ces agrégats sont constitués de particules primaires. Quelques études existent sur la filtration de particules de suies sur filtres THE mais à notre connaissance aucune ne s'intéresse à l'influence de l'humidité relative.

Mocho, Bouilloux et Gmajner (2007) ont réalisé une étude sur les facteurs influençant le colmatage des filtres THE industriels par les aérosols formés en cas de feux de différents matériaux. Les filtres utilisés dans cette étude sont des filtres plissés en fibre de verre. Trois types de matériaux combustibles rencontrés dans l'industrie nucléaire sont utilisés : le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), le LEXAN et le PVC. Des mélanges de ces deux derniers avec le PMMA sont faits. L'association PMMA/PVC a une teneur en eau comprise entre 25 et 35 % selon le débit. Le PMMA seul et l'association PMMA/LEXAN ont une teneur en eau d'environ 2%. Les aérosols sont tous polydispersés avec un diamètre aérodynamique médian massique compris entre 0,7 et 1 µm (faible ventilation du foyer de combustion) ou 1,5 à 1,8 µm (forte ventilation du foyer de combustion). Les auteurs constatent que la résistance aéraulique du filtre plissé augmente avec la diminution de la vitesse de filtration pour le PMMA. Selon eux, cela proviendrait de l'hétérogénéité initiale de l'écoulement de l'air dans un filtre plissé et une réduction de surface plus importante à faible vitesse. Les résultats montrent aussi une diminution de la résistance aéraulique avec une diminution du débit de dioxygène. Les auteurs expliquent ce phénomène par une augmentation de la taille des particules primaires formant les agrégats.

Thomas et al. (2014) ont développé un modèle de perte de charge pour les dépôts de particules nanostructurées . Ils montrent un bon agrément entre les valeurs expérimentales de colmatages obtenues avec des agrégats de nanoparticules de carbone et des suies issues d'un générateur d'aérosol de combustion.

Par ailleurs, les interactions entre la vapeur d'eau et les particules de suies ont été étudiées (Popovicheva et al. 2008; Lintis (2018); Weingartner, Burtscher, et Baltensperger 1997). Weingartner, Burtscher, et Baltensperger (1997) ont montré une diminution du diamètre de particule de noir de carbone avec l'augmentation de l'humidité relative. Popovicheva et al. (2008) a établi que le noir de carbone issu du PALAS était hydrophobiques et que les suies issues du générateur de combustion miniCAST peuvent être décrites comme non hygroscopiques. Plus récemment, Lintis (2018) a étudié les propriétés physico-chimiques de plusieurs suies issues de différents types de combustion (différents comburants : PMMA,

heptane, huile hydraulique…) et leurs interactions avec la vapeur d'eau. Ces récents travaux ont mis en évidence des corrélations entre les conditions d'incendie et les propriétés physico-chimiques des suies et une relation entre masse moyenne d'agrégats et débit de combustion a pu être proposée (Lintis (2018)). De plus, l'auteure a montré que les suies analytiques testées peuvent être classifiées comme hydrophobes. Selon les conditions de combustion les suies peuvent avoir des propriétés très différentes qui peuvent amener à des particules hydrophobes ou hydrophiles et avoir une prise de masse en eau pouvant aller jusqu'à de la condensation capillaire (Lintis (2018)).

1.2.3 Bilan

L'évolution de la perte de charge et l'efficacité pour des aérosols solides vis-à-vis d'un média fibreux se fait en trois étapes : une phase de filtration en profondeur, une phase de transition puis une phase de filtration en surface où un gâteau de particules se forme. Cette évolution est également conditionnée par le diamètre de particule et la vitesse de filtration. En effet, plus l'aérosol est fin plus la perte de charge est importante pour une même masse d'aérosol déposée. Si la vitesse semble avoir peu d'influence pour les particules submicroniques, Del Fabbro et al. (2000) a mis en évidence qu'une augmentation de celle-ci semble augmenter le rapport $\frac{\Delta P}{Uf}$. Les études sur la filtration d'agrégats et notamment de particules de suies sont récentes et portent essentiellement sur les filtres plissés (Ouf et al. 2015; Bourrous et al. 2016) ou alors sont réalisées avec du noir de carbone (peu d'études de filtrations de suies issues de combustion sur filtre plan) (Charvet et al. 2018). Et surtout, ces études sont réalisées en air sec.

1.3 Filtrations d'aérosols liquides par des médias fibreux plans

Cette partie détaille les différentes étapes de filtration d'aérosols liquides par des médias fibreux, l'évolution des performances du filtre vis-à-vis de ces aérosols et les différents facteurs influant sur ce type de filtration tels que la vitesse, la viscosité du liquide, sa tension superficielle ou la granulométrie des gouttelettes. La filtration des aérosols liquides a surtout été étudiée sur des médias plans et avec des liquides organiques (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacate (DEHS), Dioctylphthalate (DOP), Diméthylphtalate (DMP), glycérol).

1.3.1 Évolution des performances du filtre en présence d'un aérosol liquide

Plusieurs études ont été réalisées avec des huiles de viscosité différentes et sur des médias de qualité différente, la plupart avec des aérosols liquides submicroniques (Penicot-Bauge 1998; Contal et al. 2004; Frising 2004; Charvet et al. 2010).

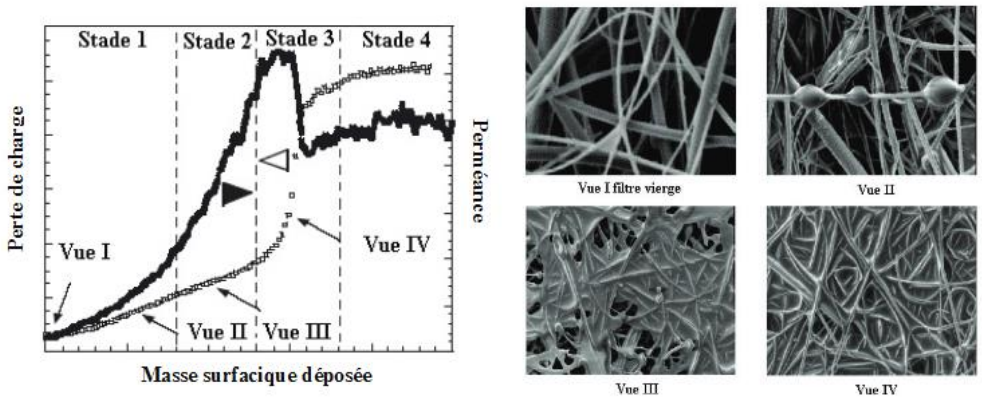


Figure 14 : Évolution du dépôt pendant le colmatage d'un filtre haute efficacité par un aérosol submicronique - (Contal et al. 2004)

La Figure 14 représente des résultats expérimentaux établis par Contal et al. (2004). A gauche, la représentation de la courbe de pénétration avec l'évolution de la perte de charge en fonction de la masse surfacique déposée. A droite, des clichés du média fibreux pour les différents stades identifiés de la filtration de l'aérosol liquide. Ces données réunies permettent une meilleure analyse de ce qu'il se passe au niveau du média lors de cette filtration. Quatre stades sont distingués :

- *Stade 1 :* La perte de charge et la pénétration augmentent lentement. Les images de la Figure 14 montrent que les particules de liquide sont déposées autour des fibres. D'une part, cela diminue la surface de collection des fibres du média donc augmente la pénétration. D'autre part, cela augmente la surface de frottement et donc augmente la perte de charge du média.
- *Stade 2 :* La courbe de pénétration augmente de manière exponentielle et, comme l'avaient déjà constaté Walsh et al. (1996), la perte de charge augmente moins rapidement qu'au stade 1. L'observation au microscope à balayage électronique montre que les gouttelettes déposées autour des fibres grossissent et forment des ponts liquides au niveau des intersections des fibres. Contal et al. (2004) proposent deux explications de ces évolutions : le dépôt des gouttelettes sur les fibres augmente leur diamètre ce qui diminue la surface spécifique, le liquide collecté à l'intérieur du filtre est redistribué dans le média par force capillaire, ce qui contribue également à la diminution de la surface de collecte des fibres.

- *Stade 3 :* Alors que la pénétration continue d'augmenter abruptement jusqu'à atteindre un maximum pour ensuite diminuer subitement, la perte de charge augmente de manière exponentielle. L'observation au microscope à balayage électronique permet de montrer qu'un film liquide fini par se former en fin de colmatage à la surface du média. La formation de ce film liquide implique la fermeture des espaces interstitiels, donc l'écoulement à travers le média se fait plus difficilement et la perte de charge augmente. Ceci entraîne également que la surface de vide diminue par conséquent la vitesse d'infiltration augmente ce qui va favoriser le mécanisme d'impaction et ainsi diminuer la pénétration des particules.
- *Stade 4 :* Pour finir, la perte de charge et la pénétration atteignent un palier pseudo stationnaire. La valeur de la pénétration à ce niveau-là est plus faible que le maximum atteint au stade 3. Au moment où le film liquide est formé, la perte de charge et la pénétration sont stabilisées, une partie du liquide est drainée au niveau du filtre. Un équilibre est établi entre la collecte des gouttelettes et le drainage. Les auteurs constatent que pour ces expériences menées en laboratoire avec ce type d'aérosol et de méthodologie, le réentrainement n'est pas significatif. Cette étape permet de drainer le liquide en aval du filtre, qui n'était pas recyclable en amont sous forme d'aérosol.

1.3.2 Influence des paramètres

1.3.2.1 Concentration de l'aérosol

Penicot-Bauge (1998) s'est intéressée à l'influence de la concentration d'un aérosol submicronique de DOP sur un filtre THE en fibres de verre (D-309) et n'a constaté aucun effet de la concentration (dans la gamme d'essais) sur la perte de charge. Plus tard, Contal et al. (2004) ont réalisé des essais avec du DOP sur le même filtre et ils n'ont pas constaté l'influence de la concentration sur la perte de charge ; même constat pour Charvet et al. (2008) avec un aérosol submicronique de DEHS sur un filtre très haute efficacité (THE).

1.3.2.2 Vitesse de filtration

L'influence de la vitesse sur la filtration d'aérosols liquides sur des filtres à fibres a été largement étudié (Contal et al. 2004; Penicot-Bauge 1998; Frising 2004; Gougeon 1994). Selon la composition chimique de l'aérosol, sa granulométrie et la nature du filtre, l'influence de la vitesse de filtration sur l'évolution de la perte de charge et la pénétration est différente.

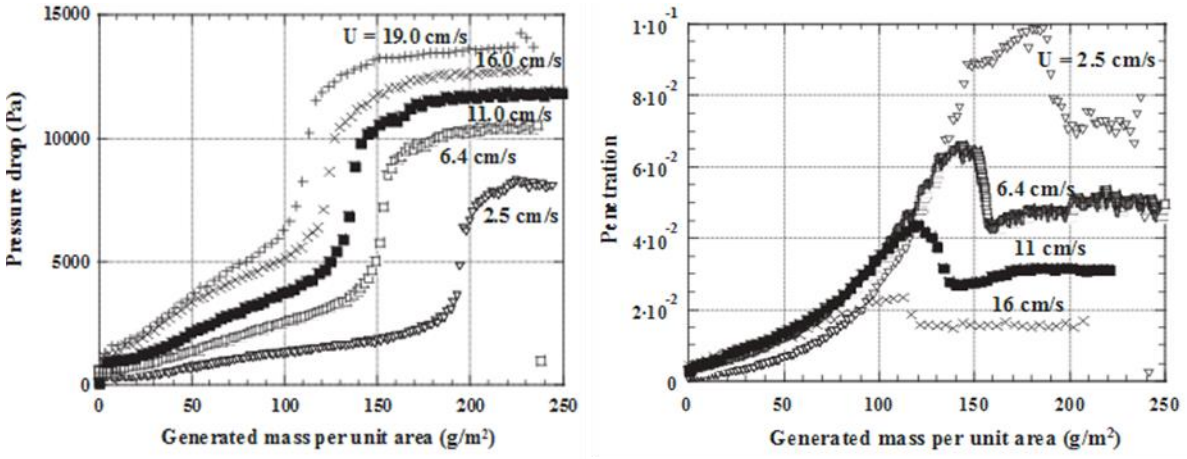


Figure 15 : Évolution de la vitesse de filtration sur la perte de charge (à gauche) et sur la pénétration (à droite) avec un aérosol liquide submicronique (Contal et al. 2004)

Contal et al. (2004) ont étudié l'influence de la vitesse avec un aérosol submicronique de DOP sur un filtre haute efficacité en fibres de verre. La Figure 15 montre l'influence de la vitesse sur la perte de charge à gauche et sur la pénétration à droite en fonction de la masse générée par unité de surface de 2,5 cm/s à 19 cm/s. Les résultats montrent que la pénétration diminue avec la vitesse et que l'état pseudo-stationnaire est atteint plus rapidement à vitesse élevée. Une augmentation de perte de charge avec la vitesse est constatée. Cependant il faut s'intéresser à l'évolution de la résistance aéraulique du média pour une interprétation rigoureuse. En représentant l'évolution de la résistance en fonction de la masse générée par unité de surface, les auteurs constatent que celle-ci est plus faible en augmentant la vitesse de filtration. Frising (2004) fait le même constat avec un aérosol submicronique de DEHS sur le même type de filtre. Dans cette configuration, c'est-à-dire avec un aérosol submicronique type DEHS ou DOP sur un filtre haute efficacité, il semble judicieux de travailler à une vitesse de filtration élevée, en effet les mécanismes d'impaction sont favorisés. Pour des particules de diamètre inférieur à 0,1 µm, le domaine diffusionnel est majoritaire et l'efficacité serait vraisemblablement diminuée.

Frising (2004) s'est aussi intéressé à l'influence de la vitesse avec le même aérosol liquide mais en faisant varier sa granulométrie (trois granulométries allant du domaine submicronique à micronique) et pour un autre type de filtre (moyenne efficacité). Pour une granulométrie comprise entre 0,215 µm et 0,33 µm, il remarque que la perméance diminue avec l'augmentation de la vitesse, cependant les courbes de perméance n'ont pas la même allure. Pour une granulométrie comprise entre 0,52 µm et 0,82 µm, la perméance est constante pour le filtre moyenne efficacité et variable pour le filtre haute efficacité. Pour des tailles microniques comprises entre 1,3 µm et 2,04 µm, la perméance est variable pour le filtre moyenne efficacité mais augmente avec la vitesse pour le D-309. L'auteur explique que cette augmentation de perméance avec la vitesse demeure un phénomène non identifié à ce jour.

Penicot-Bauge (1998) obtient le même type de résultats avec un aérosol liquide submicronique de DOP sur un filtre D-309. La représentation du rapport $\frac{\Delta P}{Uf}$ en fonction de la masse générée à différentes vitesse de filtration montre que les courbes se superposent en dessous du point de colmatage (point de transition entre la filtration en profondeur et en surface). Donc en dessous de ce point, le dépôt n'est pas sensible à la variation de vitesse dans la gamme étudiée. A partir du point de colmatage les courbes se séparent et l'évolution exponentielle du rapport $\frac{\Delta P}{Uf}$ a lieu pour une masse déposée plus faible lorsque la vitesse augmente.

1.3.2.3 Viscosité dynamique et tension superficielle

L'influence de la viscosité dynamique et de la tension superficielle est un peu moins traitée dans la littérature, l'analyse est souvent délicate puisque tension superficielle et viscosité dynamique sont des facteurs liés. Toutefois, (Penicot-Bauge 1998; Contal et al. 2004; Frising 2004) ont tenté d'étudier l'influence de la nature de l'aérosol sur la perte de charge d'un filtre.

La Figure 16 montre l'évolution des pertes de charges pour trois aérosols de tensions superficielles différentes.

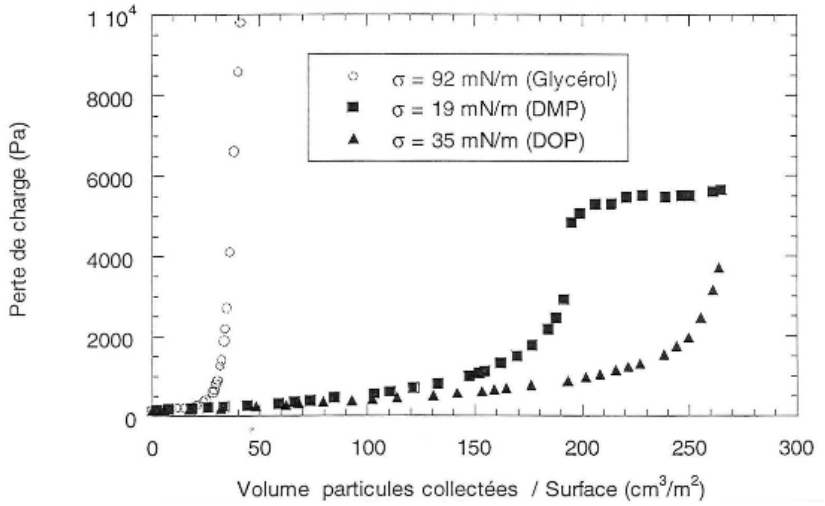


Figure 16 : Influence de la tension superficielle sur l'évolution de la perte de charge – (Penicot-Bauge 1998)

Les deux premières étapes du colmatage ont des allures similaires pour les trois aérosols submicroniques, la différence est que le glycérol colmate le filtre bien plus rapidement que le DMP et le DOP. De plus, les paliers de perte de charge quasi stationnaires n'ont pas été atteints pour le glycérol et le DOP. Le DMP qui a une tension superficielle et une viscosité inférieures au DOP atteint son point de transition plus rapidement, il n'y a actuellement pas d'explication pour cela.

Frising (2004) a diminué la tension superficielle du DEHS et du glycérol par l'ajout de tensioactifs, la diminution expérimentale de la tension superficielle implique aussi une augmentation de la viscosité des liquides. Ses résultats montrent une augmentation de la perméance avec la diminution de la tension superficielle. Cependant il est difficile de donner une interprétation rigoureuse étant donné la relation entre tension superficielle et viscosité dynamique. De plus le glycérol contient un pourcentage d'eau pouvant s'évaporer au niveau du média et ce qui pourrait fausser les observations.

1.3.2.4 Nature et structure du filtre

La Figure 17 montre les résultats d'expériences menées par Contal et al. (2004) afin d'étudier l'influence de la nature du filtre sur l'évolution de la perte de charge. Les auteurs ayant déjà montré l'influence de la vitesse sur le point de saturation, les tests sont réalisés à une même vitesse de filtration. Les résultats montrent que plus le diamètre de fibre est faible, plus la résistance aéraulique est grande pour une même masse de gouttelettes collectées, et que plus le diamètre de fibre est grand, plus le point de colmatage est élevé.

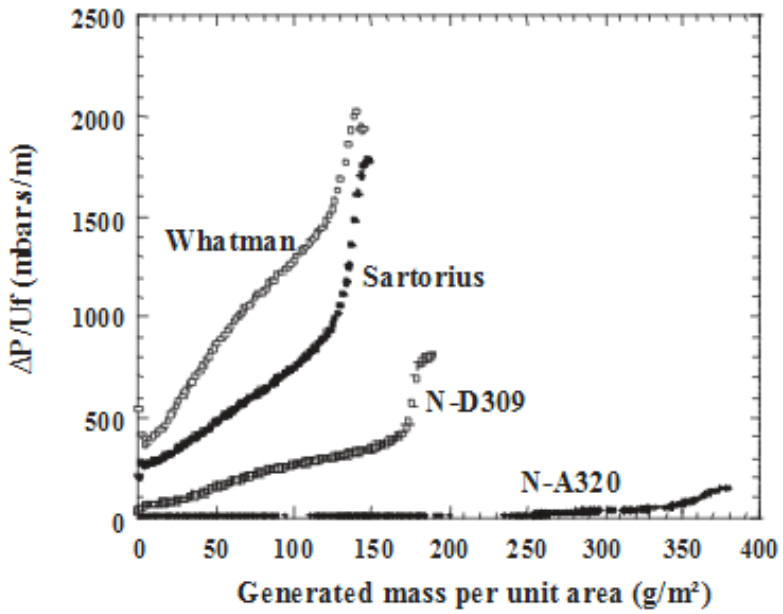


Figure 17 : Influence de la nature du filtre sur l'évolution de la perte de charge (Contal et al. 2004) (Whatman d_f = 0,36 µm, Sartorius d_f = 0,45 µm, D309 d_f = 0,9 µm, A320 d_f = 3,60 µm)

En plus d'étudier l'influence de la nature du filtre sur la perte de charge, Frising (2004) étudie également l'influence de la nature du filtre sur la perméance. Des filtres de moyenne efficacité, haute efficacité et très haute efficacité sont utilisés pour cette étude. Les résultats sont semblables pour les filtres HE (Haute Efficacité) et THE. Par contre, l'évolution de la perméance pour des filtres moyenne efficacité est contraire à celle observée pour des filtres

HE et THE. Effectivement elle diminue pendant le colmatage du filtre ME (Moyenne Efficacité) alors qu'elle augmente pour les filtres THE.

1.3.3 Modélisation des performances d'un filtre plan en présence d'aérosol liquide

Peu d'études sont consacrées à la modélisation de la perte de charge et de l'efficacité de filtres fibreux lors du colmatage d'aérosols liquides. Les évolutions du diamètre de fibre au cours de la filtration et de la compacité du média sont en effet complexes.

1.3.3.1 Modélisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre lors de son colmatage

1.3.3.1.1 Estimation de la perte de charge atteinte lors de la phase d'équilibre

Liew et Conder (1985) étudient l'influence d'aérosol liquide de géraniol sur la résistance des filtres à fibres. Ils constatent que la résistance du filtre augmente tout en diminuant la porosité du média. Ils proposent une expression empirique de la perte de charge lorsque la phase de drainage est atteinte pour des médias ayant une compacité comprise entre 0,076 et 0,142 avec un diamètre de fibre compris entre 4 et 22 µm :

$$\Delta P_{équilibre} = \Delta P_0 \left(1.09 \left(\alpha \frac{Z}{d_f} \right)^{-0.561} \left(\frac{U_0 \mu}{\gamma cos\ \theta} \right)^{-0.477} \right) \quad (25)$$

1.3.3.1.2 Évolution temporelle de la perte de charge

Davies (1973) propose une autre expression de la perte de charge à l'équilibre :

$$\Delta P = \mu Z U_f \frac{32 \alpha_{mo}^{1.5} (1 + 56 \alpha_{mo}^3)}{d_{f,mo}^2} \quad (26)$$

En faisant l'hypothèse que le liquide est mouillant et se répartie uniformément au sein du filtre, le diamètre initial de la fibre augmente ($d_{f,mo}$) ainsi que sa compacité du fait de la présence du liquide (α_{mo}).

Et ces paramètres évoluent tels que :

$$d_{f,mo} = d_f \sqrt{1 + \frac{m_{liq}}{S_f \rho_{liq} Z \alpha}} \quad (27)$$

$$\alpha_{mo} = \alpha + \frac{1}{\rho_{liq} Z} \frac{m_{liq}}{S_f} \quad (28)$$

Le modèle de Davies repris par Penicot-Bauge (1998) et comparé à ses résultats expérimentaux, permet de bien représenter l'évolution de la perte de charge en dessous du point de colmatage, au-delà les hypothèses ne sont plus valables.

1.3.3.2 Modélisation de l'efficacité et de la perte de charge d'un filtre lors de son colmatage

Payet (1991) qui étudie la filtration aérosols liquides submicroniques, estime que les fibres « mouillées » ne sont plus efficaces pour capter les particules, ce qui implique une diminution du nombre de fibres efficace et donc une diminution de la surface efficace de collecte. L'auteur considère de plus que l'augmentation du diamètre de fibre n'a pas vraiment d'incidence sur l'efficacité de collecte d'une fibre. Un accord satisfaisant est trouvé entre son modèle et ses mesures expérimentales, mais l'auteur indique qu'il manque la prise en compte des paramètres liés au liquide. Le modèle proposé est seulement un modèle d'efficacité, la perte de charge n'est pas modélisée.

Gougeon (1994) réalise un modèle de perte de charge et d'efficacité basé sur l'hypothèse de l'augmentation du diamètre de fibre et de la vitesse interstitielle. Cependant, malgré l'hypothèse d'une augmentation du diamètre de fibre il n'y a pas de prise en compte de l'augmentation de la compacité dans ce modèle, ce qui est physiquement discutable.

Raynor et Leith (2000) proposent une expression empirique de la perte de charge en régime de drainage :

$$\ln\left(\frac{\Delta P_f}{\Delta P_0}\right) = \frac{S^{0,91\pm0,06}}{\alpha^{0,69\pm0,06}} \cdot exp(-1,21 \pm 0,24) \quad (29)$$

Des modèles plus récents ont également été développés depuis par (Frising (2004) ; Charvet et al. 2010; Kampa et al. 2015)

1.4 Filtration d'aérosols solides sous humidité

Cette partie est divisée en deux sous parties. Une première traite du comportement des filtres THE lors de la filtration d'aérosols solides sous humidité. Dans la littérature, les études s'intéressant à l'effet de l'humidité relative en filtration THE comparent des particules de nature hygroscopique différente. L'hygroscopie traduit la capacité de certaines particules à absorber l'humidité. Ces études présentent des résultats avec du chlorure de sodium, qui en plus d'être

hygroscopique est déliquescent c'est-à-dire qu'à partir d'un certain taux d'humidité relative, la particule se dissout et devient liquide. La deuxième traite de l'influence de l'humidité de l'air sur la perte de charge d'un filtre pré-colmaté.

1.4.1 Influence de l'humidité sur la filtration d'aérosols solides sur filtre

1.4.1.1 Évolution des performances du filtre

1.4.1.1.1 Influence de l'humidité sur filtre vierge sans génération de particules solides

Avant de s'intéresser aux effets de l'humidité sur la filtration d'aérosols solides sur un média il faut vérifier l'influence de l'humidité sur le média sans génération de particules solides. Pour des taux d'humidité compris entre 1 et 100%, (Gupta et al. 1993) n'observent aucune variation de la perte de charge sur un filtre plan vierge hydrofugé en fibres de verre. Pour des taux d'humidité compris entre 30 et 90% sur un filtre en fibres de polyester, (Miguel 2003) trouve que la perméabilité du filtre vierge reste identique.

1.4.1.2 Aérosols non hygroscopiques

Gupta et al. (1993) s'intéressent à l'effet de l'humidité et de l'hygroscopicité des particules sur la perte de charge de filtres très haute efficacité (THE). Les particules de sel sont générées avec un nébuliseur et l'air humide avec un humidificateur. Les auteurs étudient également l'influence de la granulométrie. Des particules non hygroscopiques d'alumine sont générées pour deux diamètres médians 0,5 µm (σ = 1,7) et 1 µm (σ = 1,8). Les courbes représentant la perte de charge du gâteau en fonction de la masse surfacique de particules collectées sont linéaires, quelle que soit l'humidité relative comprise entre 0 et 100%. Pour des particules submicroniques, les résultats montrent qu'il y a peu d'effet de l'humidité lorsqu'elle est inférieure à 90%, au-delà la résistance diminue. Pour les particules microniques, les résultats montrent que la résistance spécifique diminue à partir d'un taux d'humidité relative de 35% jusque 90%.

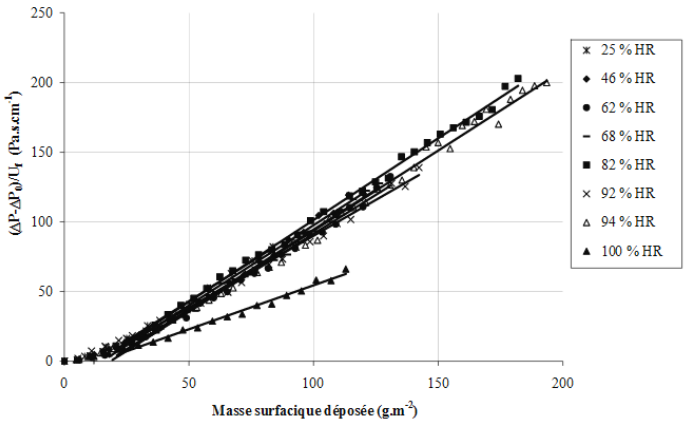


Figure 18 : Courbes d'évolution de la perte de charge d'un aérosol non hygroscopique d'alumine sur un filtre THE à différentes humidités relatives – (Joubert 2009)

Joubert (2009) a travaillé avec des aérosols de même nature que ceux utilisés par Gupta et al. (1993) sur des filtres plans THE et dans les mêmes ordres de grandeur de vitesse de filtration (1,2 à 15 $cm.s^{-1}$) avec le même protocole opératoire. Seul le diamètre médian est différent et ce pour les deux distributions granulométriques. Ses résultats confirment ceux de Gupta et al. (1993) à propos de l'alumine. Cependant Joubert (2009) utilise un aérosol d'alumine micronique de diamètre médian de 4,2 µm alors que Gupta et al. (1993) utilise un aérosol de diamètre médian de 1 µm. Or ces derniers constataient qu'en augmentant le diamètre de l'aérosol la perte de charge diminuait avec l'humidité ce qui n'est pas le cas chez Joubert (2009) dont les courbes de perte de charge sont quasi confondues en dessous d'une humidité relative de 94%. Joubert (2009) a également vérifié l'évolution de la résistance spécifique d'un gâteau formé de particules d'alumine en fonction de l'humidité relative et a comparé ses résultats à ceux de Gupta et al. (1993). Les résultats des auteurs concordent et montrent la même tendance : la résistance spécifique (masse de gâteau par unité de surface) du gâteau de particules diminue avec de la taille des particules et avec l'augmentation du taux d'humidité relative (à partir de 90% pour l'alumine).

1.4.1.3 Aérosols hygroscopiques

1.4.1.3.1 En dessous du point de déliquescence

Gupta et al. (1993) réalisent les mêmes expériences pour des aérosols hygroscopiques de chlorure de sodium (NaCl) submicronique et micronique. Pour des humidités en dessous du point de déliquescence (<75% pour NaCl) une relation linéaire entre la perte de charge et la masse surfacique est obtenue, comme dans le cas des aérosols non hygroscopiques. La résistance spécifique diminue avec augmentation de l'humidité, cette diminution est plus marquée pour les particules non hygroscopiques notamment pour les particules de NaCl submicroniques.

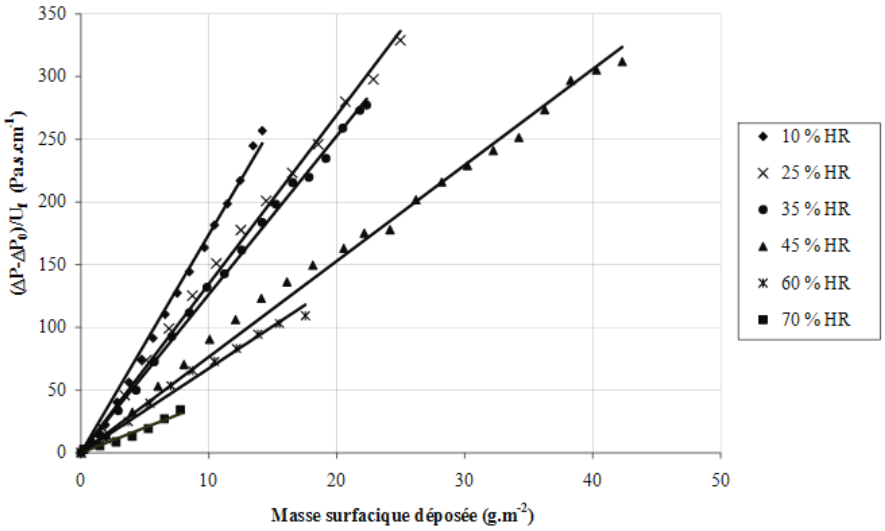


Figure 19 : Courbes d'évolution de la perte de charge d'un aérosol hygroscopique de NaCl en dessous du point de déliquescence sur un filtre THE à différentes humidités relatives – (Joubert 2009)

La Figure 19 montre les résultats de Joubert (2009) pour un aérosol submicronique hygroscopique de NaCl en dessous du point de déliquescence. Ces résultats confirment ceux de Gupta et al. (1993) pour le même aérosol. Les résultats montrent effectivement la même tendance que pour les particules non hygroscopiques c'est-à-dire que la perte de charge d'un filtre plan diminue avec l'augmentation de l'humidité. Joubert (2009) explique aussi qu'une évolution linéaire du rapport $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$ en fonction de la masse collectée signifie qu'il n'y a pas de compression du gâteau au cours du colmatage.

1.4.1.3.2 Au-dessus du point de déliquescence

Gupta et al. (1993) remarquent qu'au-dessus du point de déliquescence les particules de chlorure de sodium se présentent sous forme de gouttelettes. Les résultats montrent que la perte de charge en fonction de la masse surfacique n'est plus linéaire et augmente soudainement à partir d'une certaine valeur de masse surfacique. Les gouttelettes remplissent les espaces interstitiels du filtre jusqu'à former un film liquide, d'où l'augmentation abrupte de perte de charge. Les auteurs constatent que l'augmentation de l'humidité retarde l'augmentation soudaine de perte de charge : Plus l'humidité est importante plus la taille de la gouttelette est grande. Des gouttelettes plus petites s'étalent mieux sur les fibres que les grosses gouttelettes car leur tension superficielle est plus élevée (Gupta et al. 1993). Pour un taux d'humidité relative de 79%, le film liquide sur le filtre se forme pour une masse surfacique plus faible que pour un taux d'humidité relative de 88%. Par ailleurs, l'évolution de la perte de charge en fonction de la masse surfacique sur un filtre THE a été testée pour 1,26 µm et 3,12 µm à 80% d'humidité. Les résultats confirment que pour un diamètre plus petit, à même

humidité, le changement d'allure de la courbe de perte de charge se fait pour une masse collectée plus faible.

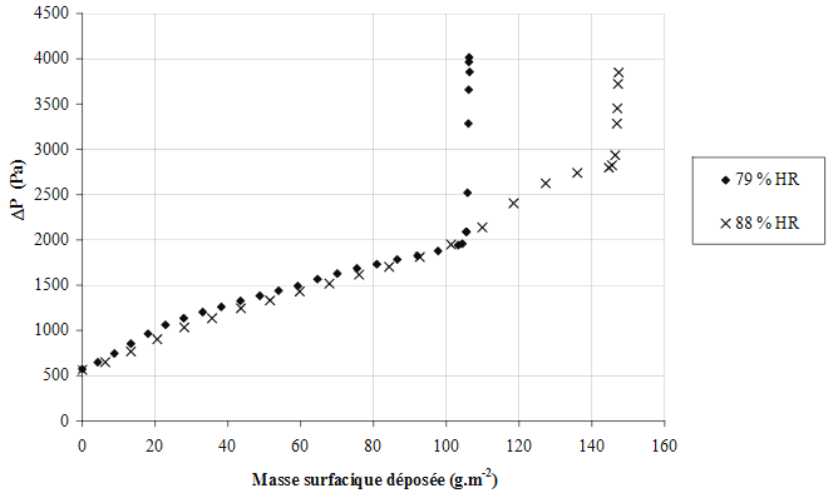


Figure 20 : Courbes d'évolution de la perte de charge d'un aérosol hygroscopique de NaCl en dessus du point de déliquescence sur un filtre THE à différentes humidités relatives – (Joubert 2009)

La Figure 20 représente les résultats de Joubert (2009) pour un aérosol de NaCl submicronique au-dessus du point de déliquescence et confirment ceux de Gupta et al. (1993), soit une évolution linéaire de la perte de charge en fonction de la masse surfacique déposée puis une augmentation brutale non linéaire de cette perte de charge. Ces résultats confirment que le film liquide formé en surface apparaît pour une masse collectée plus importante pour une humidité plus grande. Comme l'auteure l'indique, ces courbes obtenues sont caractéristiques d'un colmatage sur filtre plan avec un aérosol liquide.

1.4.2 Influence de la vitesse sur des filtres plans THE

Joubert (2009) a étudié l'effet de la vitesse de filtration pour des aérosols microniques non hygroscopiques. Cette étude sur l'influence de la vitesse de filtration est réalisée en air sec (<10%) et en air humide (92%). Pour les deux humidités retenues, la même tendance est observée, l'augmentation de la vitesse engendre une légère augmentation de la résistance spécifique du gâteau. L'étude n'a pas été menée pour des filtres plans THE avec un aérosol hygroscopique submicronique, car l'auteure utilise les constats de Penicot-Bauge (1998) affirmant que la vitesse de filtration n'influe pas sur la résistance spécifique d'un gâteau de particules submicroniques.

1.4.3 Influence de la granulométrie

Gupta et al. (1993), puis plus récemment Joubert (2009) ont étudié les évolutions de la résistance spécifique des gâteaux de particules hygroscopiques et non hygroscopiques en

fonction de l'humidité relative pour différentes tailles d'aérosols. Chacun d'entre eux observent une diminution de la résistance spécifique du gâteau avec l'augmentation du diamètre moyen des aérosols structurant le gâteau.

1.4.4 Influence de la nature du filtre

Ariman et Helfritch (1977) cités par Joubert (2009) ont réalisé des travaux portant sur l'influence de l'humidité avec des aérosols non hygroscopiques (dont la taille n'est pas précisée) sur des filtres en polyester. Ces résultats montrent que la résistance du gâteau diminue avec l'augmentation de l'humidité. Miguel (2003) fait le même constat pour des aérosols hygroscopiques et non hygroscopiques pour des filtres à fibres de polyester.

Pour les aérosols hygroscopiques microniques au-dessus du point de déliquescence, Vendel et Letourneau (1995) cités par Joubert (2009) observent la même évolution de perte de charge que celle décrite en 1.4.1.3.2 avec des filtres à fibres métalliques.

Joubert (2009) a également étudié l'influence de l'humidité avec les aérosols cités précédemment sur des filtres plissés THE. Une comparaison est établie entre les colmatages sur filtres plans et plissés vis-à-vis d'aérosol micronique non hygroscopique d'alumine et d'aérosol submicronique hygroscopique de chlorure de sodium. Les courbes d'évolution de la perte de charge avec l'alumine ont une zone commune en début de filtration pour les deux types de filtres comme le montre la Figure 21.

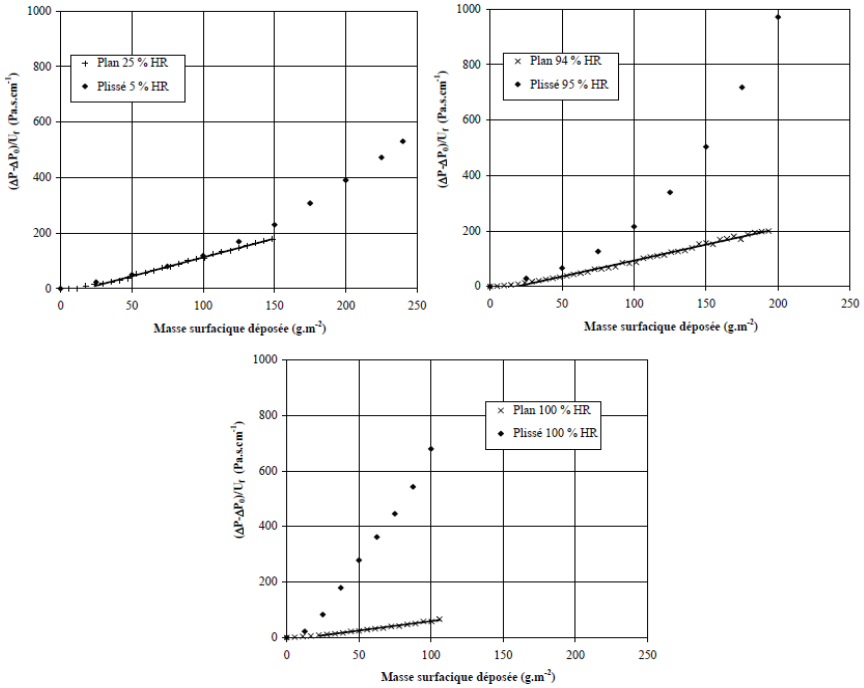


Figure 21 : Influence de la géométrie plane ou plissée d'un filtre sur l'évolution de sa perte de charge durant son colmatage avec l'aérosol micronique d'alumine pour trois taux d'humidité relative : 5-25 %, 94-95 % et 100 % (Aurélie Joubert 2009)

Les résultats montrent que plus l'humidité est importante moins cette zone commune est grande en fonction de la masse surfacique déposée, ensuite l'écart entre les pertes de charges augmente avec l'humidité. L'augmentation de perte de charge devenant beaucoup plus importante pour un filtre plissé du fait de la réduction de surface du filtre lors du colmatage. Une zone commune de perte de charge est aussi observée pour l'aérosol de chlorure de sodium pour les deux filtres. Au-delà la perte de charge des filtres plissés devient beaucoup importante et n'évolue pas linéairement. Ces tests ont été réalisés à des humidités en dessous du point de déliquescence.

1.4.5 Modélisation de l'évolution de la perte de charge d'un filtre plan THE colmaté par des particules solides sous air humide

Joubert (2009) propose une modélisation afin d'expliquer l'évolution temporelle de la perte de charge d'un filtre à fibres avec formation d'un dépôt en surface en fonction de l'humidité de l'air. Pour cela, les hypothèses émises sont: le dépôt en profondeur des particules est négligé, le gâteau de particules formé est supposé homogène et son épaisseur reste la même quelle que soit l'humidité à laquelle il est exposé.

Pour la modélisation, le gâteau est découpé en N couches considérées de mêmes épaisseurs et masses. L'auteure explique que chaque couche a une perte de charge qui dépend de son état d'équilibre avec l'humidité de l'air correspondant au temps de contact de l'aérosol avec l'air humide.

La perte de charge à travers un filtre colmaté correspondant à la somme de la perte de charge du filtre vierge ΔP_0 et de la perte de charge du gâteau de particules ΔP_G, soit :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \Delta P_G \quad (30)$$

Joubert (2009) exprime ΔP_G pour un filtre colmaté sous humidité par :

$$\Delta P_G = \frac{U_f}{S_f} \Delta m_s \sum_{k=1}^{N} K_2(t_f - k\Delta t) \quad (31)$$

Sachant que la masse de particules Δm_s est considérée identique pour chaque épaisseur de couche k. Il faut ainsi connaître K_2 la résistance spécifique du gâteau selon l'humidité relative. Joubert (2009) propose l'expression de l'évolution de K_2 (éq. 32) en fonction du temps issue de ses différentes expériences :

$$K_2(t) = K_2(air\ sec) - \frac{t}{a + bt} \quad (32)$$

Les valeurs des coefficients a et b sont obtenues d'après les valeurs de K_2 obtenues expérimentalement en fonction de l'humidité relative.

La comparaison modèle expérience montre que la méthode de modélisation de l'évolution de la perte de charge d'un gâteau de particule sous humidité est satisfaisante. L'écart maximal entre les résultats des expériences et la modélisation est de 30% pour le chlorure de sodium. Pour l'aérosol d'alumine les courbes sont quasi confondues. Plus l'humidité relative augmente, plus l'écart entre le modèle et les résultats expérimentaux est important. Ce modèle a pu être transposé aux filtres plissés.

1.4.6 Étude de la filtration sous humidité sur filtre pré-colmaté

1.4.6.1 Évolution des performances

Ricketts, Schneider, et Wilhelm (1991) ont étudié l'influence de l'humidité sur des filtres THE colmatés faisant varier l'humidité de 40 à 90%. La Figure 22 montre les résultats des auteurs, soit l'augmentation relative de perte de charge en fonction du temps d'exposition à l'air humide. Cette augmentation se produit à partir d'une humidité de relative de 70 %. Cependant, il n'est pas précisé le type de particules utilisées (nature, hygroscopiques, non hygroscopiques, granulométrie…). Par ailleurs aucune interprétation des résultats n'a été proposée.

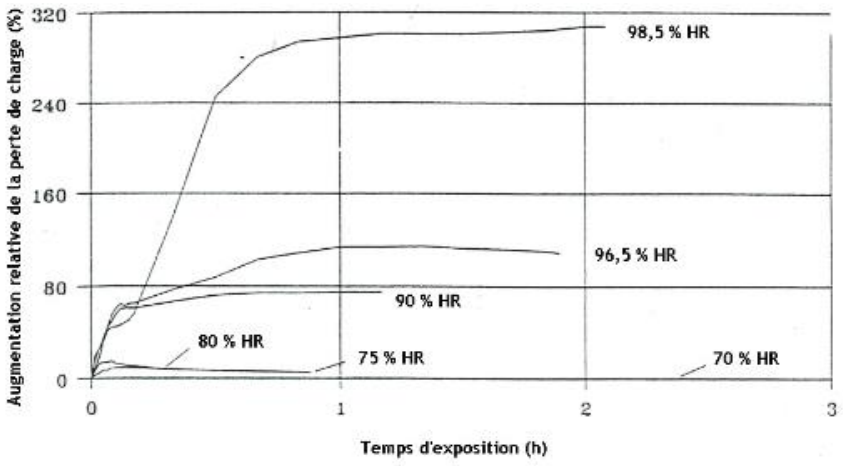


Figure 22 : Ricketts cité par Joubert (2009) - filtre pré colmaté

Joubert et al. (2011) se sont intéressés à l'influence de l'humidité sur des filtres plans et plissés pré colmatés avec soit un aérosol hygroscopique submicronique, soit non hygroscopique micronique. La méthodologie retenue consiste à colmater sous air sec le filtre. Une fois le gâteau formé, la génération d'aérosol est arrêtée puis le gâteau est soumis à un flux d'air humide. Concomitamment, des mesures de perte de charge sont relevées périodiquement. Les résultats mettent en évidence, pour l'aérosol non hygroscopique d'oxyde d'aluminium,

l'absence d'effet sur la résistance spécifique du gâteau pour des humidités inférieures à 40%. Une réduction d'environ 10% de la résistance spécifique est observée pour une exposition à une humidité de 90%. Pour l'aérosol hygroscopique de NaCl, la résistance spécifique du gâteau diminue avec l'augmentation de l'humidité. Ces résultats pour le chlorure de sodium sont valables pour des humidités en dessous du point de déliquescence. L'auteure explique que la résistance spécifique du gâteau diminue jusqu'à atteindre une valeur fixe, qui correspondrait à l'équilibre thermodynamique avec l'environnement.

Récemment, Montgomery, Green, et Rogak (2015) se sont intéressés à l'impact de l'humidité relative sur des filtres HVAC (Heating, Ventilating, Air Conditioning) pré colmatés avec des particules hygroscopiques et non hygroscopiques. La méthodologie est proche de celle mise en place par Joubert et al. (2011), les filtres sont colmatés à une humidité A puis une fois le gâteau formé l'humidité est modifiée pour atteindre une valeur B. Pour un aérosol hygroscopique, les auteurs constatent que si B est inférieure ou égale à A, il n'y a aucune variation de perte de charge. Lorsque B est supérieure à A, les résultats indiquent une diminution de la résistance spécifique du gâteau pour le chlorure de sodium ce qui est en accord avec les résultats de Joubert et al. (2011). De plus, cette diminution de la résistance spécifique s'accompagne d'une diminution de l'efficacité. Les résultats de Montgomery, Green, et Rogak (2015) mettent également en avant le fait que les caractéristiques de l'écoulement dépendent de l'humidité pendant le colmatage et de l'humidité d'exposition après le colmatage. Aucun changement des propriétés du gâteau d'oxyde d'alumine n'est remarqué. Cependant Montgomery, Green, et Rogak (2015) n'ont pas été au-delà de 40% d'humidité, sachant que Joubert et al. (2011) avaient noté une modification de la résistance spécifique à partir de 90% d'humidité pour des particules non hygroscopiques. Pour des particules hygroscopiques, Montgomery, Green, et Rogak (2015) supposent que les particules du gâteau soumises à l'humidité après leur colmatage grossissent par absorption de vapeur d'eau ce qui causerait un réarrangement du gâteau de particules et donc une modification de sa résistance spécifique et de son efficacité.

Ribeyre (2015) a étudié l'influence de l'humidité sur la perte de charge d'un dépôt nanostructuré. L'étude est faite avec des poudres nanométriques non hygroscopiques soumises à des humidités relatives de l'ordre de 90%. Les résultats montrent une augmentation très lente de la perte de charge du milieu poreux. Comme le précise l'auteur, ces résultats sont en contradictions avec ceux des auteurs précédents. Cependant la méthodologie et les conditions expérimentales diffèrent : granulométrie de l'aérosol, épaisseur du gâteau. Ribeyre (2015) a également développé un modèle d'adsorption-condensation reposant sur la loi de Kelvin et montrant que plus le diamètre de particules primaires est petit plus la condensation capillaire est importante.

1.4.7 Bilan

Plusieurs auteurs ont étudié l'influence de l'humidité sur le comportement de filtres plans et plissés colmatés par des aérosols solides. Il a été mis en avant que l'hygroscopicité des particules est un paramètre essentiel. Au-dessus du point de déliquescence, les particules hygroscopiques se comportent comme les aérosols liquides. Pour des aérosols non hygroscopiques, ou hygroscopiques en dessous du point de déliquescence, les études citées précédemment montrent que l'augmentation de perte de charge est moins significative lorsque l'humidité relative est grande. Cependant, les aérosols étudiés dans ces différentes investigations sont des aérosols d'alumine et de chlorure de sodium. Les principales tendances des évolutions des filtres THE lors de colmatages sous humidité sont résumées dans le Tableau 1.

Colmatage sous humidité				**Influence de l'humidité relative sur un dépôt de particules**			
Joubert (2009)		**Gupta et al. (1993)**		**Montgomery et al. (2015)**		**Joubert (2009)**	
NaCl (en dessous du point de déliquescence)	Alumine	NaCl (en dessous du point de déliquescence)	Alumine	NaCl (en dessous du point de déliquescence)	Alumine	NaCl (en dessous du point de déliquescence)	Alumine
d_{50} = 0,6 µm	d_{50} = 4,2 µm	d_{50} = 0,5 µm d_{50} = 1 µm	d_{50} = 0,45 µm d_{50} = 1,19 µm	d_{50} = 0,1 µm	Bimodal d_{mod}= 0,13 µm d_{mod2} = 0,4 µm	d_{50} = 0,6 µm	d_{50} = 4,2 µm
Diminution de ΔP avec augmentation de HR	Diminution de ΔP à partir de HR > 94 %	Diminution de ΔP avec augmentation de HR	Diminution de ΔP à partir de HR > 80 %	Diminution soudaine de ΔP avec RH>$RH_{colmatage}$	Pas de changement	Diminution soudaine de ΔP avec RH>$RH_{colmatage}$	Légère augmentation très rapide avec un air à 95% HR

Tableau 1 : Récapitulatif des résultats de la littérature sur l'influence de l'humidité relative en filtration THE

1.5 Filtration d'aérosols liquide et solides sur médias fibreux plans

Cette partie présente les études de recherche portant sur le comportement de filtres à fibres en présence de mélanges de gouttelettes liquides et particules solides. Très peu d'études traitent de la filtration de mélanges d'aérosols pourtant il existe de nombreux domaines où ces mélanges sont présents : industrie métallurgique, industrie automobile, industrie mécanique, situation d'incendie avec des mélanges suie/eau. Une description de l'évolution de la perte de charge des filtres en fonction du ratio liquide/solide sera faite. Le comportement de filtres de nature différente sera également présenté dans le cas de filtration de mélanges d'aérosols liquides et solides.

Un autre type d'étude est abordé, il s'agit du cas un peu particulier de particule solide enrobée dans une gouttelette liquide. Une description du rapport solide/liquide, ainsi que l'influence de la nature du liquide, est également présentée.

1.5.1 Étude des performances du filtre en présence d'un mélange d'aérosols liquide et solide

Frising (2004) avait compté une étude industrielle réalisée par Rosati, Leith, et Raynor (1999) et deux communications : Sun et Chen (2001) et Chay et Chen (2004). Par la suite, Frising (2004) a mené une investigation plus poussée sur les performances de filtres en présence d'un mélange d'aérosols liquide et solide, avec comme liquides différents types d'huile. Depuis, aucune autre étude ne semble avoir abordé ce sujet.

Rosati, Leith, et Raynor (1999) ont mené une étude sur la durée de vie des filtres dans les industries mécaniques. Selon les sites industriels étudiés, le ratio de particules solides et liquides varie de 0,01 à 1,82. La granulométrie des aérosols et le type d'huile sont différents. Ils constatent que lorsque les filtres sont soumis à des particules uniquement liquide, ces derniers ont une durée de vie supérieure à ceux soumis à un mélange liquide/solide. Lorsque le rapport solide/liquide est important les performances du filtre sont moins bonnes.

Sun et Chen (2001) ont réalisé une étude sur l'évolution de la perte de charge pendant la filtration de mélanges de NaCl et d'acide oléique. Les auteurs montrent que la perte de charge augmente avec le ratio solide/liquide. Mais Frising (2004) note que les expériences ont été arrêtées avant les phases de drainage et l'état pseudo stationnaire.

Frising (2004) recherche l'influence d'un mélange de particules solides d'alumine micronique avec des gouttelettes de DEHS submicronique sur la durée de vie de filtres de qualité

différente (moyenne, haute et très haute efficacité). Il s'intéresse notamment à la variation du ratio solide/liquide dans le mélange (variant de 0 à 100% de masse solide dans le mélange).

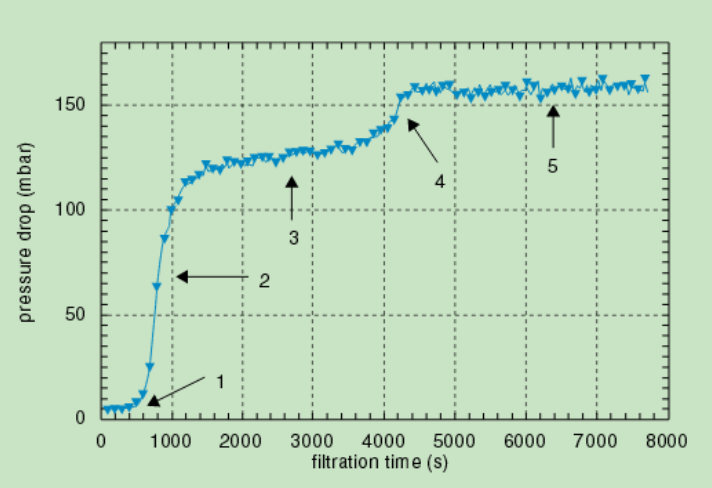


Figure 23 : Évolution de la perte de charge d'un filtre THE en présence d'un mélange d'aérosol de particules solides (13,5% en masse) et liquides (86,5 % en masse) – (Frising 2004)

Comme le montre la Figure 23, l'auteur distingue cinq étapes lors de la filtration d'un mélange d'aérosol. Avec des images prises avec un microscope à balayage électronique du filtre pour chaque étape et des mesures de perméance, une analyse du dépôt des particules est proposée :

- *Etape 1 :* La filtration du mélange débute par une augmentation lente de la perte de charge. Le dépôt des particules se fait en surface des fibres à l'intérieur du filtre (filtration en profondeur), l'écoulement n'est pas perturbé. L'analyse microscopique montre que les particules se déposent sous forme d'aggrégats dont certains sont enrobées de liquides. L'auteur n'exclue pas que certaines particules ont pu s'agglomérer en amont du filtre.
- *Etape 2 :* Cette étape est caractérisée par une augmentation exponentielle de la perte de charge. Il y a l'apparition d'un gâteau en surface du filtre dont la répartition des particules semble homogène et recouverte d'un film liquide. Les interstices sont de plus en plus comblés d'où l'augmentation importante de perte de charge ainsi que de la résistance à l'écoulement. Les résultats de Frising (2004) montrent une amélioration des performances car l'efficacité augmente.
- *Etape 3 :* L'augmentation de perte de charge et de l'efficacité sont beaucoup plus lentes qu'à la seconde étape. L'auteur explique que ce palier pourrait être du à une redistribution au sein du filtre comme cela existe pour la filtration d'aérosol liquide. Il constate aussi que le gâteau devient plus apparent mais moins homogène.
- *Etape 4 :* Une seconde montée exponentielle de la perte de charge se produit et l'analyse microscopique montre une augmentation du nombre d'agglomérats et de leur

taille. Ceci implique une réduction de surface donc une augmentation de la vitesse interstitielle, or une augmentation de vitesse favorise l'impaction, cette étape s'accompagne alors aussi d'une diminution plus forte de la perméance.

- *Etape 5 :* Un second état pseudo-stationnaire est atteint pour la perte de charge et la perméance. Le nombre et la taille des agglomérats ont continué d'augmenter. Cet état pseudo-stationnaire a lieu en raison du drainage du liquide. L'auteur observe que ce phénomène de drainage n'a pas lieu lors du premier état pseudo-stationnaire et commence à partir du second.

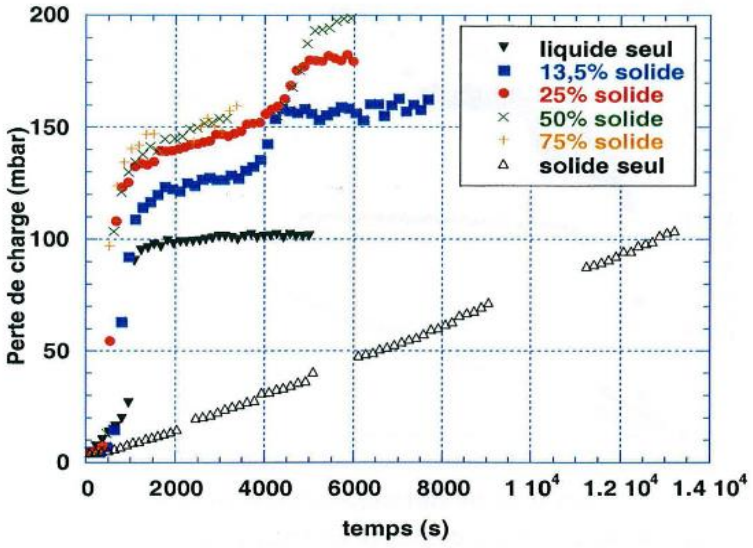


Figure 24 : Comparaison des différents pourcentages étudiés en fonction du temps pour des essais réalisés avec un filtre D-309 à 30 Nl/min – (Frising 2004)

La Figure 24 montre l'évolution de la perte de charge en fonction du temps avec différents ratio solide/liquide dans le mélange, superposés avec les cas d'aérosols liquide et solide seuls. Les résultats montrent que la perte de charge augmente avec la proportion de solide dans le mélange et que pour un temps donné la perte de charge des mélanges est supérieure à celle du liquide ou du solide seul. Ces résultats confirment ceux de l'étude de Rosati, Leith, et Raynor (1999).

Frising (2004) fait part de plusieurs difficultés quant à la caractérisation des performances d'un filtre soumis à un mélange d'aérosols liquide et solide : comment représenter correctement l'évolution de la perte de charge tenant compte de la différence de densité des deux aérosols ? Qu'en est-il de la validité des mesures d'efficacité considérant qu'en aval du filtre la proportion solide/liquide diffère sans doute de l'amont ? Est-ce que le mélange particules solides et liquides est bien distinct ou y a-t-il des agglomérats enrobés de liquide ? Aussi, les huiles sélectionnées par l'auteur sont des huiles entières et ne contiennent pas d'eau pour s'affranchir des problèmes d'évaporations. Ainsi si la filtration se fait avec des huiles contenant

une part d'eau ou aussi des gouttelettes d'eau, une difficulté expérimentale est ajoutée vis-à-vis de la fiabilité de la mesure de la granulométrie de l'aérosol ou de sa stabilité dans le temps, des problèmes de reproductibilité des essais pourraient apparaître.

Il n'existe pas de modèle prédictif à ce jour de l'évolution des performances d'un filtre vis-à-vis d'un mélange d'aérosol de particules solides et de gouttelettes liquides.

1.5.2 Particules solides « enrobées » par des particules d'huile

Un autre cas considéré par certains auteurs (Bredin, O'Leary, et Mullins 2012; Hsiao et Chen 2015) est celui de particules solides « enrobées » d'huile. Très peu d'études scientifiques traitant ce sujet ont été recensées. Pourtant, ce cas peut de présenter en situation industrielle (moteurs à combustion par exemple). Hsiao et Chen (2015) étudient l'évolution de la perte de charge de filtres à fibres vis à vis de particules solides de chlorure de potassium (KCl) enrobées d'huile. Des mesures de perte de charge sont réalisées sur deux filtres à fibres basse efficacité, l'un en fibre de verre l'autre en fibre de cellulose (figure 25). Différentes huiles sont utilisées pour « l'enrobage » afin de rendre compte de l'influence de la tension superficielle (et/ou viscosité). Les auteurs font également varier le pourcentage de solide dans la particule afin d'évaluer son influence sur la perte de charge. Par contre, la pénétration des particules à travers le filtre n'est pas évaluée. Les résultats montrent que plus la fraction de liquide est importante, plus le point d'inflexion de la courbe de perte de charge est retardé et celle-ci augmente plus lentement. Il est également observé que les propriétés physico-chimiques de l'huile ont un impact sur la perte de charge. Pour un enrobage contenant moins de 50% de liquide, la perte de charge augmente plus lentement pour le glycérol comparé aux trois autres liquides (DEHS, Light Mineral Oil, Castor Oil) sur les deux types de filtres utilisés.

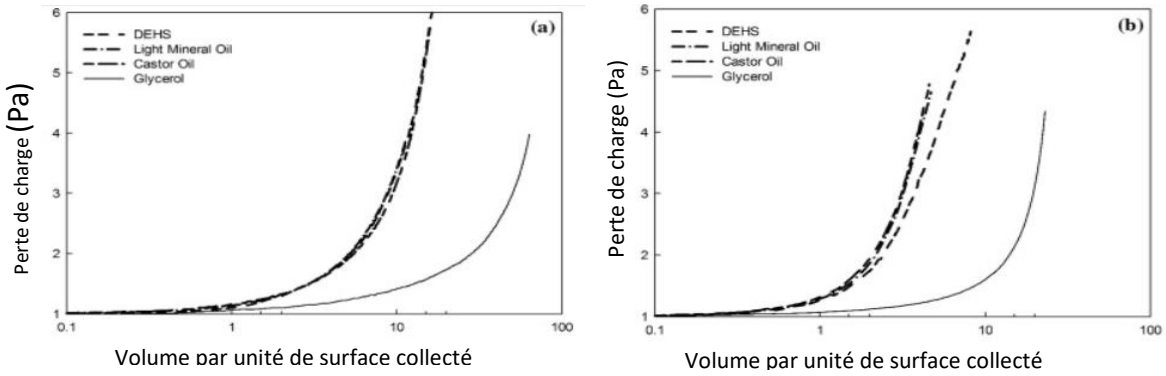


Figure 25 : Courbes de colmatage sur un filtre en fibre de verre (a) et un filtre en cellulose (b) par des particules enrobées avec 50 % de volume d'huile

Pour des essais réalisés avec le liquide pur, la courbe d'évolution de perte de charge du glycérol est à gauche des autres courbes (figure 25). Les auteurs expliquent que pour de basses viscosités du liquide enrobant le cœur solide, la particule solide peut se déplacer plus

facilement et s'accumuler aux intersections des fibres. Une viscosité plus importante de l'huile limiterait le mouvement des particules solides et engendrerait un dépôt plus uniforme comme le montre la Figure 26. L'allure de la courbe de perte de charge du glycérol sur un filtre à fibres de verre pour un pourcentage de liquide de 88% est différente de celle du pourcentage à 50%. Les auteurs concluent que le comportement des particules enrobées lors du colmatage est très complexe et que la tension superficielle et la viscosité influencent et dominent leur comportement dans les différents cas.

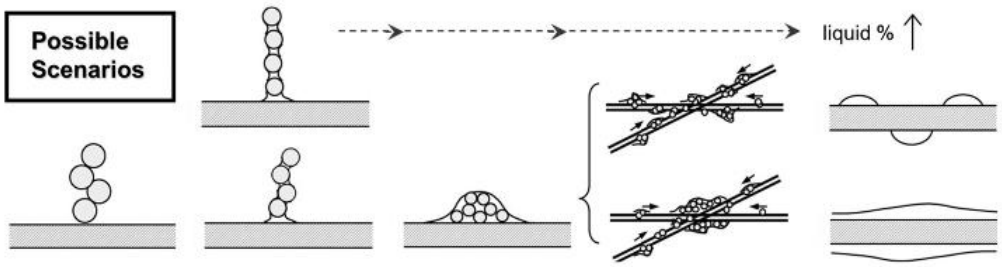


Figure 26 : Représentation schématique des comportements possibles pour le dépôt de particules enrobées sur des filtres à fibres (Hsiao et al. (2015))

Bien qu'il soit précisé que la granulométrie est maintenue « presque » constante pour les différents pourcentages liquide/solide, il est possible que lors de la génération de l'aérosol (nébuliseur) certaines particules soient uniquement liquides. Cette possible proportion de particules liquide n'est pas évaluée. Les auteurs ont considéré que la particule d'aérosol était solide, enrobée de liquide. Or si une part de ses particules est seulement liquide, cela aura une influence sur l'évolution de la perte de charge.

1.5.3 Bilan

Frising (2004) a pu mettre en avant le comportement de différents filtres en présence de mélanges d'aérosols, avec variation du ratio solide/liquide. Il montre une évolution en cinq étapes avec deux paliers de perte de charge atteints mais avec un seul phénomène de drainage lors du second palier. Depuis cette étude la filtration de mélange d'aérosols ne semble pas avoir été approfondie. Ses résultats n'ont donc pas pu être confirmés par d'autres auteurs et il n'y a pas eu de développement d'un modèle prédictif de filtration en présence de mélanges d'aérosols. Il existe des études avec des particules « enrobées » (Bredin, O'Leary, et Mullins 2012; Hsiao et Chen 2015) mais ce cas est difficilement comparable à un réel mélange d'aérosols. En effet, il est possible d'imaginer que dans un cas de mélange distincts d'aérosols l'évolution de la perte de charge pourrait avoir une allure allant d'une tendance linéaire (faible taux de liquide) à une tendance avec une augmentation très rapide de la perte de charge (fort taux de liquide). Il est nécessaire de pouvoir prédire ces évolutions en fonction

du ratio de solide/liquide car une évolution exponentielle (et donc rapide) de la perte de charge peut mener à une rupture de filtre. Cependant, une étude de mélange d'aérosols peut être complexe :

- Si l'aérosol liquide est inorganique (eau par exemple) ou une huile ayant une part d'eau, la stabilité et la reproductibilité de tels mélanges n'est pas évidente expérimentalement du fait des phénomènes d'évaporation/condensation.
- Pour obtenir un mélange homogène.
- L'interaction entre les particules solides et liquides peut être à prendre en compte également, ou les phénomènes d'évaporation/condensation peuvent compliquer la mesure granulométrique du mélange.

1.6 Conclusion

L'étude du comportement des filtres à fibres en présence d'aérosols solides et liquides seuls est bien documentée dans la littérature scientifique, comme vu dans ce rapport bibliographique.

L'influence de l'humidité sur le colmatage de filtres à fibres en présence d'aérosols solides a été un peu plus traitée que la filtration solide sous air sec, mais souvent avec le même type d'aérosols solides avec la confrontation de résultats portant sur des particules de chlorure de sodium non hygroscopique et d'alumine non hygroscopique. Les résultats montrent une diminution de la résistance aéraulique avec l'augmentation de l'humidité relative pour le chlorure de sodium, concernant l'alumine une diminution de la résistance aéraulique est observée au-delà de 85% d'humidité relative. Néanmoins, la majeure partie des études se limitent à ces deux aérosols. La littérature manque de données expérimentales concernant l'influence de l'humidité relative en filtration THE avec d'autres types de particules et notamment sur les suies et aucune ne va jusqu'à la formation de gouttelettes d'eau.

Récemment, quelques auteurs ont commencé à s'intéresser aux mélanges d'aérosols liquides et solides, ou encore de particules solides enrobées dans une goutte liquide. Mais ces études demandent à être approfondies : utilisation de liquides de composition chimique différente, ou encore de particules solides telles que des suies. Frising 2004 a étudié la filtration de mélange d'alumine et de particules d'huile. Cependant, ces particules de par leur taille (micronique pour l'alumine) et de leur propriétés physico-chimiques peuvent avoir des comportements éloignées d'un mélange de suies (agrégats submicroniques) et de gouttelettes d'eau. En effet, dans le cas d'une génération de gouttelettes d'eau, il existe une difficulté de maintenir la génération constante, d'être dans des conditions opératoires reproductibles, d'avoir un mélange homogène ou de contrôler la granulométrie d'un tel mélange. Ce domaine de la filtration nécessite une investigation plus approfondie et doit être examinée ne serait-ce que pour les situations accidentelles type incendie.

Chapitre 2 Matériels et méthodes

2.1 Introduction

Ce deuxième chapitre présente le banc d'essai conçu et mis en place au cours de ces travaux afin de mener l'étude de l'influence de l'humidité relative sur la filtration de particules de suies ainsi que l'étude des évolutions des performances de filtres plans Très Haute Efficacité vis-à-vis d'un mélange de particules de suies et de gouttelettes d'eau.

Le banc est constitué de différentes zones de générations et zone de mesures. La mise en place du banc et de l'appareillage associé a été un travail de longue haleine. Ce chapitre présente dans un premier temps le banc d'essai mis en œuvre dans le cadre de cette étude, puis sa validation par comparaison de mesures de densité effective des suies générées avec des données issues de la littérature et enfin les protocoles opératoires développées pour les différentes études présentées dans ces travaux :

- Filtration de particules de suies sous air sec et air humide
- Étude de l'influence de l'humidité relative sur la perte de charge d'un dépôt de particules de suie
- Filtration de mélange d'aérosols solides et liquides

Le banc a été conçu pour permettre des suivis de perte de charge, d'efficacité, d'humidité relative, de température, de débits tout au long des essais et ce pour une gamme de vitesse de filtration comprise entre 1,75 et 4 $cm.s^{-1}$.

2.2 Description générale du banc d'essai

2.2.1 Schéma du banc d'essai

Le schéma de principe du banc d'essai mis en place est représenté sur la Figure 27. Ce banc d'essai est constitué de trois zones principales (photographie du banc en figure 28) :

- Une zone de génération de l'aérosol de suies.
- Une zone de génération de gouttelettes d'eau et/ou de production d'un air humide dépourvu de gouttelettes.
- Une zone de filtration et de mesures des grandeurs caractéristiques de l'air (humidité et température) et des propriétés du colmatage (perte de charge et débit).

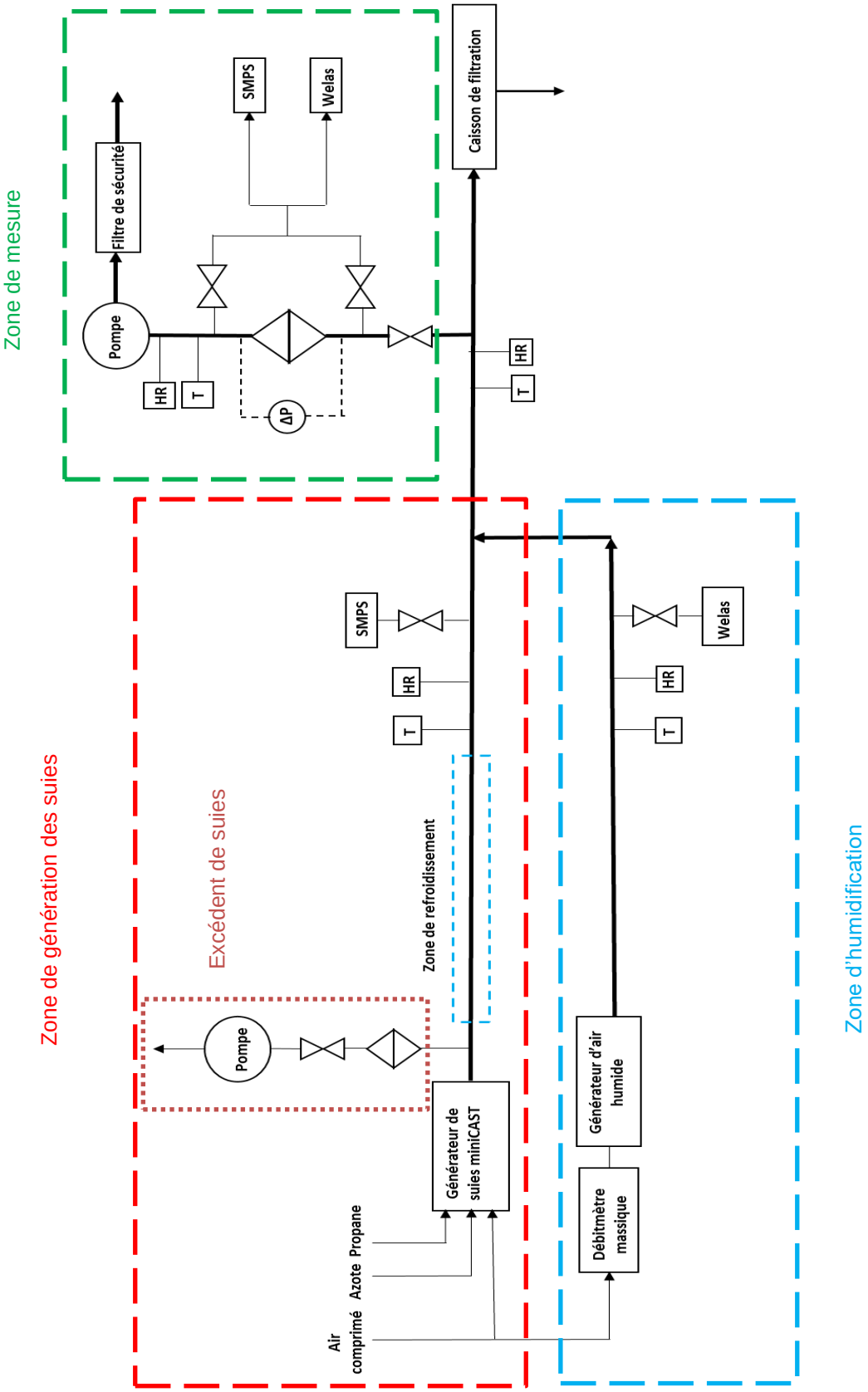


Figure 27 : Schéma de principe du banc d'essai



Figure 28 : Photo du banc d'essai

2.2.2 Production des particules de suies

Les particules de suies sont produites par le générateur Jing-CAST (Combustion Aerosol STandard) commercialisé par la société Jing (modèle 5203C). Le CAST dont le principe de fonctionnement est illustré en Figure 29 permet la génération de suies de propriétés morphologique et physico-chimique diverses. Les caractéristiques de ces suies peuvent être assimilées aux émissions de processus de combustion réelles tels que les moteurs à diesel (Barthazy et al. 2007). Comme le montre la Figure 29, une flamme de diffusion est générée, puis une réaction de pyrolyse du propane a lieu du fait de la chaleur dégagée par la flamme. Un courant d'azote permet d'arrêter la flamme de diffusion et ainsi d'interrompre la combustion (Barthazy et al. 2007). En imposant différents débits d'oxygène de l'air, la hauteur de flamme est modifiée. Alors que le courant d'azote reste à même hauteur, différents diamètres de suies peuvent être obtenus par cette modification de hauteur de flamme. D'après le constructeur, les granulométries des particules de suies sont comprises entre le domaine submicronique.

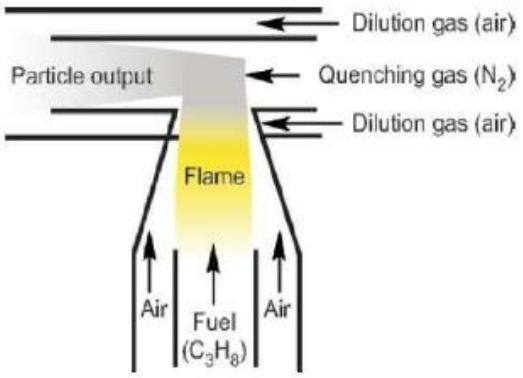


Figure 29 : Schéma de fonctionnement du miniCAST (constructeur)

Le générateur de suies génère un écoulement d'une température de plus de 35°C et des températures de canalisation (en acier inoxydable) de plus 70°C. L'objectif étant de travailler avec des taux d'humidité relative allant jusque 100% et de générer des gouttelettes, il est nécessaire de contrôler ces températures. Une zone de refroidissement permettant d'abaisser la température de paroi et d'effluent a été mise en place à la sortie du générateur.

Zone de refroidissement

Un tube clampé en téflon a été fabriqué par l'atelier de mécanique du laboratoire afin de couper la conduction de chaleur en sortie du générateur au niveau de la canalisation en acier inoxydable grâce à la conductivité thermique du téflon ($\lambda_{\text{téflon}} = 0{,}23$ à $0{,}25\ W.m^{-1}.K^{-1}$) jusqu'à 100 fois inférieure à celle de l'acier inoxydable ($\lambda_{\text{acier inoxydable}} = 26\ W.m^{-1}.K^{-1}$).

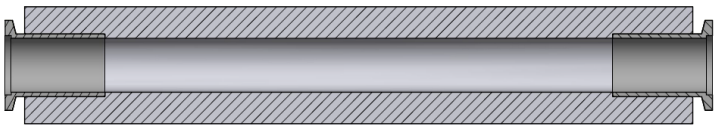


Figure 30 : Schéma du tube clampé

Puis deux échangeurs de chaleur à double enveloppe (L = 400 mm) ont également été fabriqués par l'atelier de mécanique du LRGP afin de refroidir l'effluent en sortie du tube clampé (figure 30). Un flux d'eau (coté double enveloppe) refroidi par un cryostat (Julabo, modèle 200F) circule dans les deux échangeurs placés en série. Les échangeurs fonctionnent en co-courant.

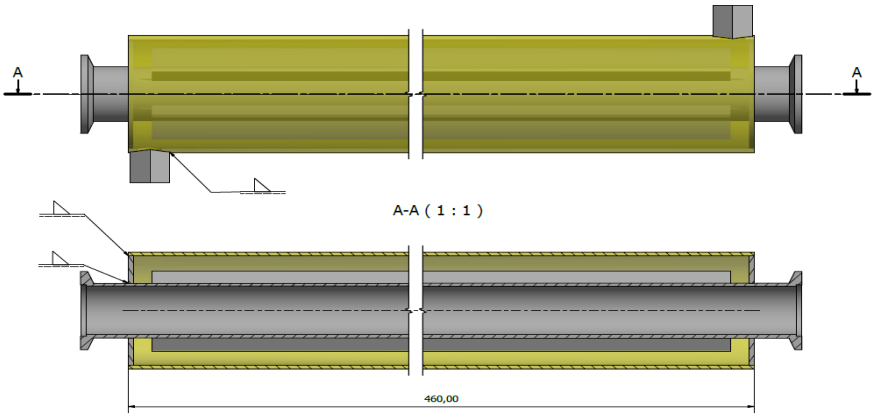


Figure 31 : Schéma des échangeurs de chaleur

En parallèle, une zone de production d'air humide avec ou dépourvu de gouttelettes d'eau est mise en place (figure 31). Cette zone d'humidification va permettre de réaliser la filtration sous humidité ou du mélange d'aérosols (gouttes d'eau et suies).

2.2.3 Production de l'air humide ou de gouttelettes d'eau

Un générateur de gouttelettes conçu et fabriqué précédemment au LRGP a été utilisé. Le générateur à gouttelettes peut être rempli par le liquide souhaité (dans le cadre de cette étude, avec de l'eau déminéralisée). De l'air comprimé est envoyé au niveau d'une buse située sur le socle du générateur comme l'indique le schéma de principe en Figure 32. La buse permet de créer une aspiration du liquide contenu dans le générateur et de pulvériser le liquide sous forme de gouttelettes.

En plaçant un filtre Moyenne Efficacité en sortie du générateur, une production d'air humide dépourvu de gouttelettes d'eau est rendue possible.

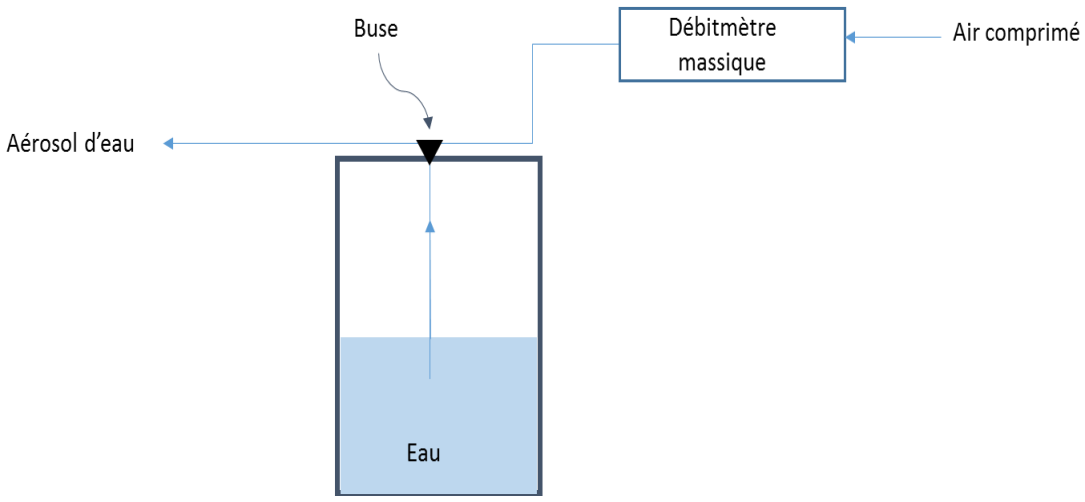


Figure 32 : Schéma du générateur de gouttelettes

2.2.4 Caractérisation des gouttelettes d'eau : Welas

Un granulomètre optique est utilisé pour déterminer la distribution granulométrique des gouttelettes d'eau, il s'agit du Welas (WhitE Light Aerosol Spectrometer, modèle 2100 (PALAS)). Le principe de fonctionnement est représenté en Figure 33.

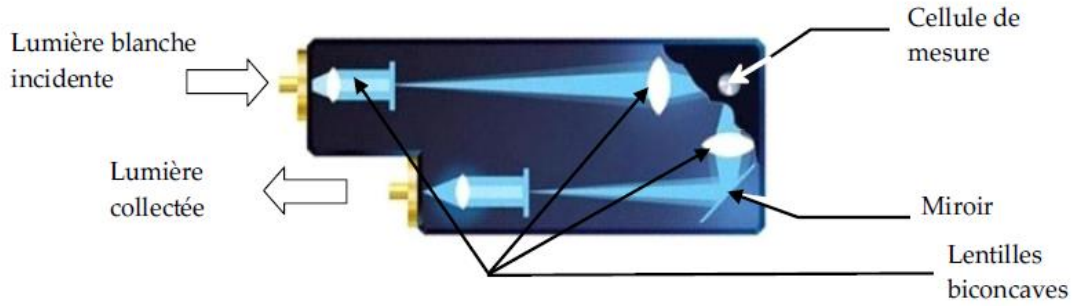


Figure 33 : Principe de fonctionnement du Welas : vue schématique du granulomètre (Marchand 2008)

Le granulomètre WELAS utilise le principe de la diffusion à 90° de la lumière blanche pour mesurer la concentration et le diamètre des particules (0,18 µm à 40 µm) en suspension dans un gaz (Marchand 2008).

Le principe de la mesure est le suivant : une source de lumière blanche émise par une lampe au xénon crée, à l'aide de deux lentilles biconcaves, un volume de mesure uniformément éclairé en lumière blanche. Les particules traversant ce volume de mesure diffusent du signal dans toutes les directions et celui-ci est collecté à un angle de 90°. Ce signal est focalisé dans une fibre optique à l'aide d'un jeu de deux lentilles et d'un miroir. Cette fibre optique achemine le signal ainsi collecté jusqu'à un photomultiplicateur qui mesure en temps réel l'intensité

lumineuse du signal diffusé par les aérosols. La relation entre l'intensité du signal collecté et la taille de particule est ensuite fait à l'aide de la théorie de Lorentz-Mie (Marchand 2008).

2.2.5 Zone d'extraction

Sur la ligne de production des particules de suies, une zone d'extraction du débit de suies a été mise en place en aval de la zone de refroidissement. Lors d'essai de filtration sous air humide ou de mélange d'aérosols de suies et de gouttelettes, si le débit d'aérosol de suie est trop important par rapport au débit d'air humide en amont du mélange, il sera difficile d'atteindre des taux d'humidité relative élevés. Cette zone va alors permettre un contrôle plus aisé de l'humidité relative lors d'un mélange ou d'une filtration sous air humide.

Cette zone est constituée d'un filtre de protection type « boite à gant » (Camfil) en ligne avec un débitmètre massique (TSI, modèle 4000) et d'une pompe (GAST) (Figure 34). Ce système permet d'aspirer une partie du débit d'aérosols de suies afin de contrôler les débits lors d'un mélange avec le flux d'air humide.

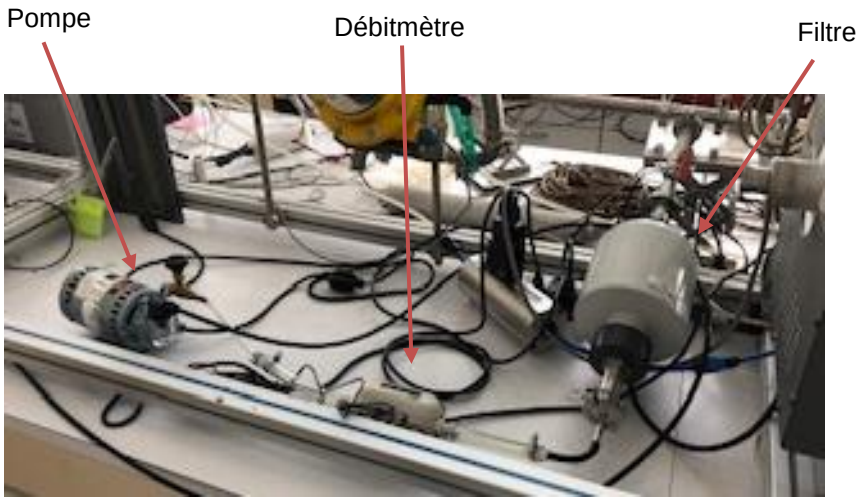


Figure 34 : Photo de la zone d'extraction

Le débitmètre a été qualifié à l'aide d'un compteur volumétrique. Les résultats sont présentés en Figure 35 et montrent une bonne adéquation entre la valeur affichée du débitmètre et la valeur réelle de débit traversant la zone d'extraction.

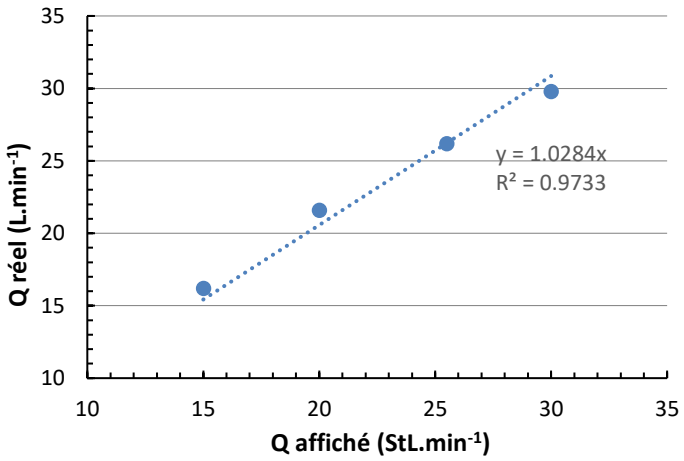


Figure 35 : Débit réel mesuré avec un compteur volumétrique en fonction du débit affiché

2.2.6 Zone de mesure

La zone de mesure est composée de deux capteurs d'humidité relative et de température (Ahlborn), ainsi que d'un capteur de perte de charge (Ahlborn) en amont et en aval de l'ensemble filtre test et porte-filtre. La filtration se fait en aspiration : un débitmètre massique (TSI, modèle 4000) est placé en aval du filtre suivi d'une vanne de régulation, d'une pompe (ILMVAC, modèle PK2DC) et enfin d'un filtre de protection type « boite à gants » (Camfil). La photo (Figure 36) donne une vue de la zone de mesure.

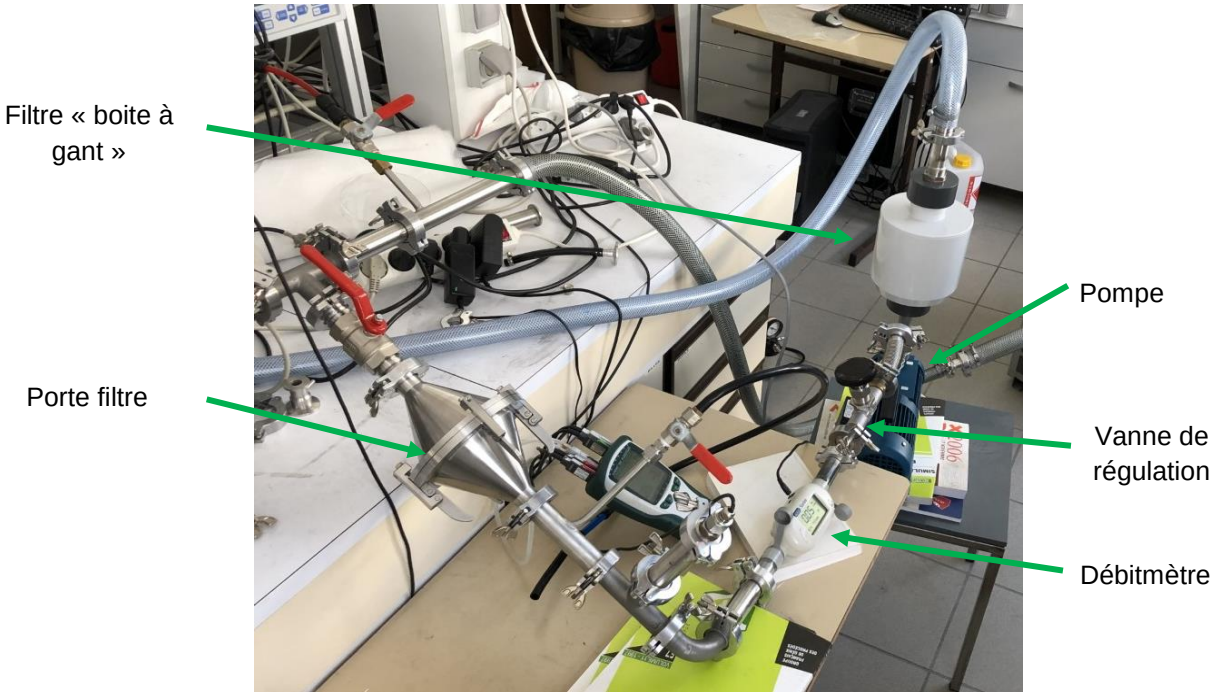


Figure 36 : Photo de la zone de mesure

Les débitmètres ont été qualifiés en air sec et en air humide pour les besoins de l'étude. Il faut effectivement vérifier les valeurs affichées par le débitmètre en fonction de l'humidité relative

pour éviter des artefacts. Les résultats de ces qualifications sont représentés en Figure 37. Une bonne adéquation entre les valeurs affichées et les valeurs réelles en air humide est trouvée, en air sec la valeur affichée surestime légèrement les valeurs de débits. Il faudra lors des essais relever les valeurs de débits et s'assurer de la stabilité du débit de filtration.

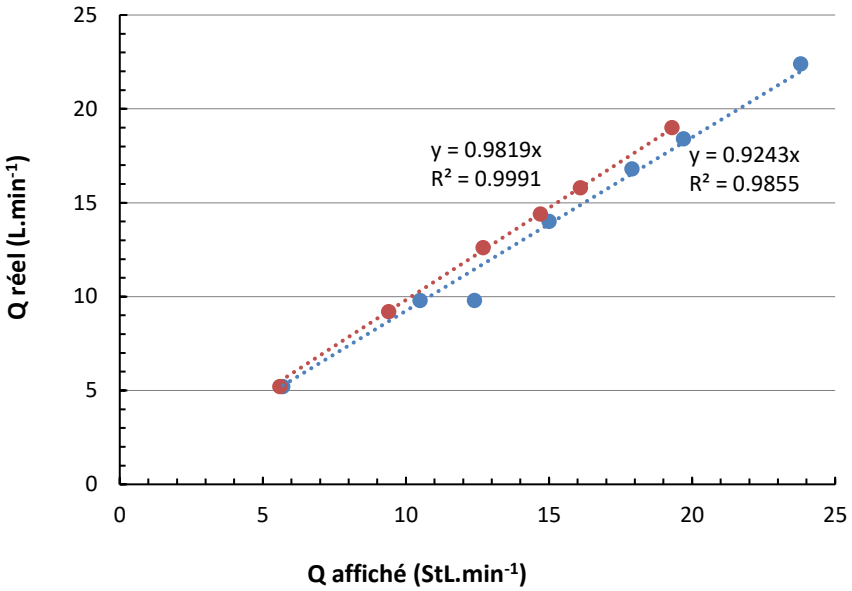


Figure 37 : Évolution du débit réel mesuré en fonction du débit affiché. Les points oranges correspondent aux mesures en air humide (90% RH) et les points bleus aux mesures en air sec (15% RH)

- Perte de charge

Les valeurs de perte de charge sont mesurées et enregistrées à intervalles réguliers de 10 secondes à l'aide de capteurs de pression différentielle connectés à l'amont et à l'aval du filtre et reliés à une centrale d'acquisition (Almemo 2690, Ahlborn). Ces capteurs ont une précision de +/- 0,5%.

- Humidité : capteur capacitif

Deux capteurs d'humidité relative (Almemo 2690, Ahlborn) fonctionnant sur un principe capacitif ont été placés en aval et en amont du filtre à tester. Le fonctionnement de ces capteurs est le suivant : une couche polymère sensible à l'humidité est appliquée sur un substrat de verre entre deux électrodes de métal. Du fait de la prise d'eau correspondant à l'hygrométrie relative, la constante diélectrique est modifiée. Le signal de mesure est directement proportionnel à l'humidité relative. La plage de fonctionnement du capteur s'étend de 5 à 98% RH pour une gamme de température comprise entre -20 et 80 °C. Pour une température nominale de fonctionnement de 25°C, l'erreur de mesure est de ±2% RH.

Le constructeur indique qu'en atmosphère poussiéreuse, il existe une possibilité d'erreur de la mesure. Cette erreur n'est pas quantifiée par le constructeur dans ce scénario. De plus, il est

précisé que pour des humidités relatives supérieures à 90% RH avec de l'eau condensée, il faut s'attendre à des mesures erronées. Cela signifie, que lorsque des essais avec un mélange de particules de suies et de gouttelettes d'eau seront réalisés, les mesures d'humidité relatives seront à prendre avec beaucoup de précaution.

2.3 Caractérisation des aérosols de suies

Afin de valider le banc d'essai, trois suies générées par le miniCAST et caractérisées préalablement dans la littérature par Yon et al. (2015) et Bescond et al. (2014) en terme de diamètre primaire, de rapport carbone organique sur carbone total (OC/TC) et masse volumique ont été sélectionnées. L'évolution de leur masse volumique effective en fonction du diamètre de mobilité électrique a été caractérisée et comparée aux valeurs de la littérature afin de vérifier d'une part, la fiabilité des appareils de mesures (granulométrie) et d'autres part, d'utiliser les données supplémentaires apportées par ces auteurs sur les caractéristiques des suies étudiées.

Effectivement, le fait de sélectionner trois suies connues permet d'avoir plus de données sur les propriétés physico-chimiques des aérosols étudiés (diamètre primaire de particules, masse volumique…) pour l'étude.

Le principe de fonctionnement des appareils de mesures spécifiquement utilisés pour la caractérisation des suies du miniCAST est détaillé ici.

2.3.1 Suies étudiées dans la littérature : sélection et caractérisation

2.3.1.1 Sélection des suies étudiées

Les particules de suies sont des particules issues de la combustion d'hydrocarbure. Ces particules se présentent généralement sous la forme d'agrégat et leurs propriétés physico-chimiques nécessitent d'être connues afin de comprendre d'éventuelles différences de comportements en filtration. La caractérisation des particules de suies a été faite dans cette étude sur l'évolution de la masse volumique effective en fonction de leur diamètre de mobilité électrique. La masse volumique effective correspond au rapport de la masse de la particule considérée sur le volume de la sphère déterminé à partir du diamètre de mobilité électrique. La mesure expérimentale se fait par le couplage DMA-APM (Analyseur différentiel de mobilité - analyseur de masse de particules centrifuge).

	CAST (Propane (mL/min) / Azote (mL/min) / Oxygène de l'air (L/min) / Dilution air (L/min))		
	60/0/1,5/20	*60/0/1/20*	*50/200/1,2/20*
Richesse	0,95	1,43	0,99
D_f	1,73	1,79	1,74
k_f	1,94	1,95	1,94
ρ_{pp} (kg/m^3)	1543	1321	1227
D_p (nm)	18,1	32,5	26,5
OC/TC (%)	16.2	87	22

Tableau 2 : Données expérimentales issues des résultats de (Bescond et al. 2014; Yon et al. 2015) pour quatre points opératoires du miniCAST. D_f est le diamètre fractal, k_f le facteur préfractal, ρ_{pp} la masse volumique, D_p le diamètre primaire et OC/TC le taux de carbone organique sur carbone total

Dans le cadre de cette étude, trois points expérimentaux ont été sélectionnés. Ces points opératoires sont issus des expériences de Yon et al. (2014). Les données expérimentales de ces points sont regroupées dans le Tableau 2. Les suies seront nommées en fonction de leur diamètre primaire par la suite :

Point [60/0/1.5/20] : suie 18
Point [60/0/1/20] : suie 32
Point [50/200/1.2/20] : suie 26

2.3.1.2 Moyen de caractérisation de la granulométrie d'un aérosol submicronique

- *SMPS (Scanning mobility particle sizer, modèle 3080 (TSI)):*

Le SMPS est un dispositif de mesure de la distribution granulométrique d'aérosol submicronique. Son principe de fonctionnement repose sur la mesure de la mobilité électrique des particules. D'une part, le DMA (Differential Mobility Analyser) permet de classifier les particules par mobilité électrique, d'autre part, le WCPC (Water Condensation Particle Counter) permet le comptage des particules. L'association des deux appareils en série (SMPS) donne la distribution granulométrique de l'aérosol généré.

- DMA modèle 3081 (TSI): Classificateur

Le « long DMA » permet de classifier des particules allant de 10 à 1000 nm. L'intervalle de température de mesure est compris entre 10 et 40 °C. L'intervalle d'humidité relative (RH) acceptable pour l'appareil est compris entre 0 et 90% sans condensation. Ainsi, le courant de particules de suies généré doit respecter ces conditions expérimentales pour permettre une mesure correcte de la granulométrie de l'aérosol et ne pas endommager le DMA.

A partir d'un aérosol polydispersé, le DMA classifie les particules selon leur mobilité électrique. La mobilité électrique d'une particule étant liée à sa taille et à la charge électrique des particules. Cette classification nécessite deux étapes :

- Le marquage des particules à travers une source à rayons X.

Cette étape permet de charger électriquement les particules, l'aérosol sortant est globalement neutre avec une répartition identique de particules chargées positivement et négativement. Les particules chargées vont ensuite pouvoir être séparées du reste de l'aérosol. Effectivement, l'acquisition d'une charge électrique par une particule lui confère une mobilité électrique. Il existe une relation entre la mobilité électrique d'une particule et son diamètre, ce qui permet pour des particules monochargées de les sélectionner par taille.

- La sélection des particules par mobilité électrique.

Les particules étant chargées, elles vont pouvoir être séparées diamètre par diamètre. Le DMA est constitué de deux cylindres concentriques métalliques. Le cylindre intérieur est maintenu à une tension négative, alors que le cylindre extérieur est mis à la terre comme le montre la Figure 38. Cette différence de potentiel crée un champ électrique entre les deux cylindres. Les particules chargées positivement vont être attirées par le potentiel négatif.

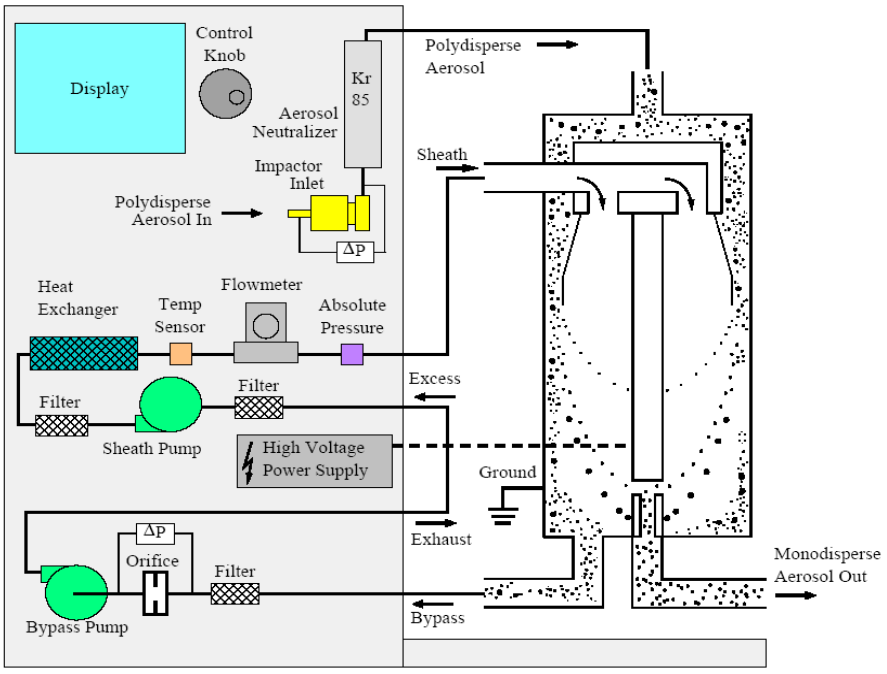


Figure 38 : Schéma de fonctionnement d'un DMA (donnée constructeur). Une source à rayons X est utilisée à la place de la source radioactive présente sur le schéma.

- WCPC modèle 3788 (TSI): Comptage des particules

Le comptage optique des particules dans le WCPC se fait selon ces trois étapes :

1. Production d'une vapeur d'eau sursaturée
2. Croissance des particules par condensation de cette vapeur
3. Détection des particules grossies par méthode optique.

Les aérosols de suies générés par le miniCAST peuvent avoir une concentration supérieure à la concentration maximale mesurable par le SMPS. Un diluteur (VKL 10 (PALAS)) est placé sur la ligne d'échantillonnage en amont du SMPS afin de rendre la mesure possible. De plus, ce diluteur favorise dans le cas d'un mélange avec des gouttelettes d'eau l'évaporation de ces dernières dont la présence pourrait endommager le DMA.

Le SMPS permet ainsi de donner la concentration de particules en fonction du diamètre de mobilité électrique d'un aérosol submicronique.

2.3.1.3 Granulométries des suies étudiées et stabilité

2.3.1.3.1 Granulométrie

Les granulométries des trois suies sélectionnées sont présentées Figure 39.

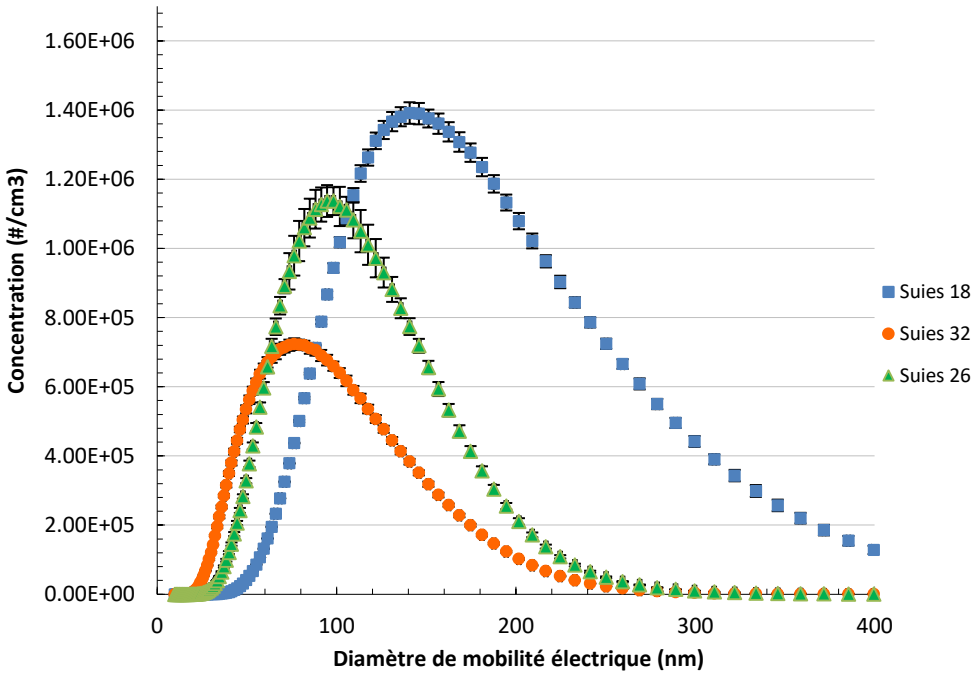


Figure 39 : Granulométries des trois aérosols de suies

Les grandeurs caractéristiques des trois suies étudiées sont données en Tableau 3.

	Suie 18	Suie 32	Suie 26
Diamètre médian (nm)	148	77	96
Diamètre moyen (nm)	163	86	103
Mode (nm)	142	76	96
Écart type géométrique	1,53	1,59	1,49
Concentration totale(#/cm3)	$4{,}29.10^7$	$2{,}66.10^7$	$3{,}29.10^7$

Tableau 3 : Grandeurs caractéristiques des distributions granulométriques des trois suies étudiées en air sec et sans dilution

2.3.1.3.2 Stabilité dans le temps

La stabilité en concentration des trois aérosols de suies dans le temps a été vérifiée. Les résultats sont en Figure 40 et montrent que la concentration totale est globalement stable pour chacune des suies dans l'intervalle de temps étudié.

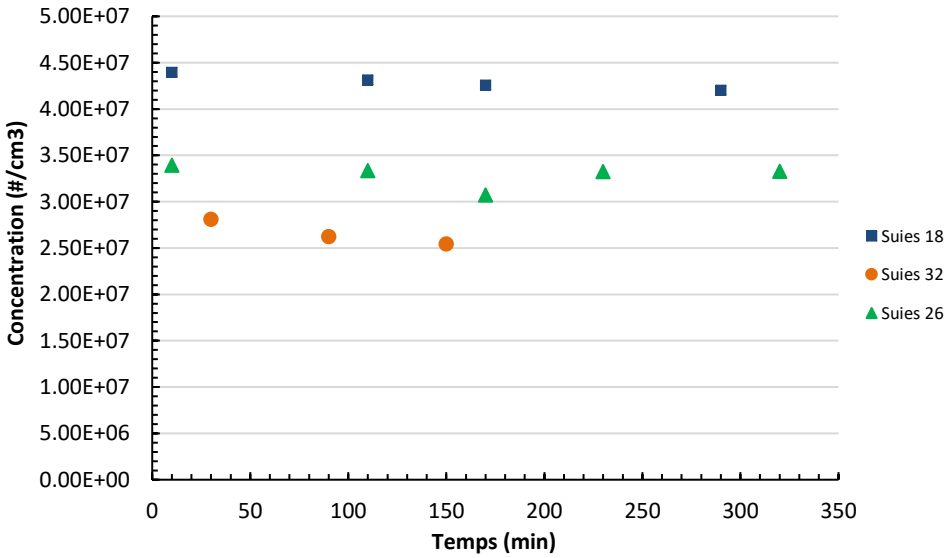


Figure 40 : Concentration totale en fonction du temps pour les trois suies

2.3.2 Moyen de caractérisation de la masse volumique d'un aérosol composé d'agrégats

La caractérisation de la masse volumique effective en fonction du diamètre de mobilité électriques des particules s'est faite avec un système APM – DMA – CNC décrite ici :

Système APM (Analyser Particle Mass, Kanomax 3601) -DMA : détermination de la masse volumique effective des aérosols nanostructurés

Dans un premier temps, le DMA permet de sélectionner les particules par diamètre de mobilité électrique issues d'un échantillon d'aérosol polydispersé. Un aérosol mono dispersé entre alors dans l'APM qui va permettre une deuxième classification par leur masse selon le principe

expliqué ci-dessous. En sortie de l'APM, les particules possèdent une même masse. Leur concentration en nombre est ensuite mesurée par un compteur de noyaux à condensation (WCPC, TSI 3788). Le schéma de principe de fonctionnement de l'association DMA-APM est présenté en Figure 41.

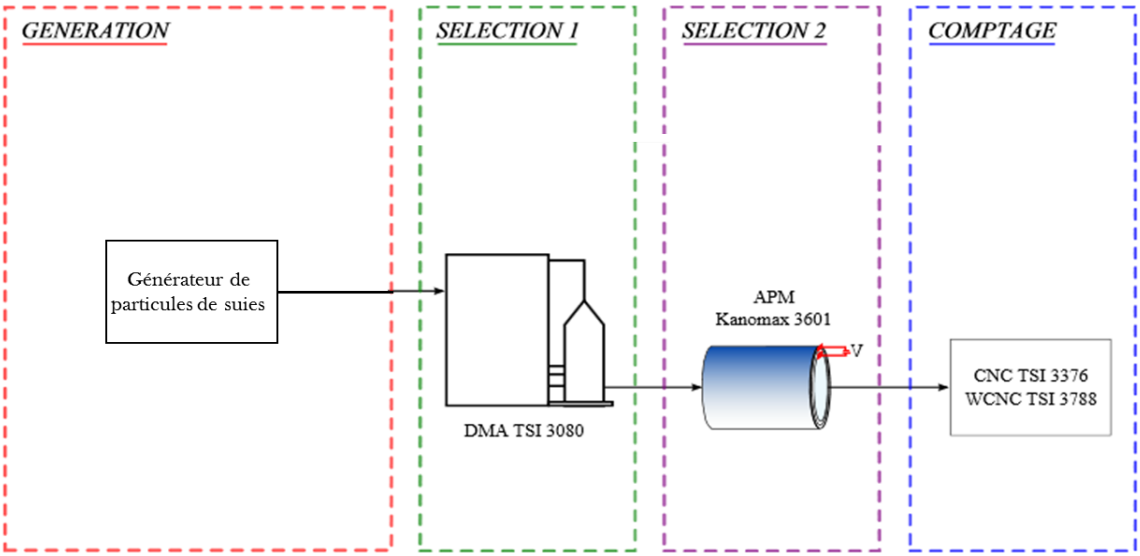


Figure 41 : Schéma de principe de fonctionnement DMA-APM en série (Issu de Cadavid Rodriguez, 2015)

L'APM est constitué de deux électrodes cylindriques coaxiales. Ces deux électrodes tournent à une vitesse angulaire ω, ainsi les particules sont soumises à une force centrifuge F_c. Une tension entre les deux électrodes est appliquée, par conséquent les particules sont également soumises à une force électrostatique $F_{él.}$ Seules les particules pour lesquelles les forces sont en équilibre sortiront de l'appareil.

On a

$$F_c = F_{el} \tag{33}$$

$$m_a r_c \omega^2 = n_{el} e E_{el} \tag{34}$$

Avec,

$$E_{el} = \frac{U_{opt}}{r_c \ln \frac{r_2}{r_1}} \tag{35}$$

Soit,

$$m_a = \frac{n_c e U_{opt}}{r_c^2 \omega^2 ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (36)$$

Au préalable, à tension nulle entre les électrodes de l'APM, la vitesse angulaire ω est augmentée jusqu'à ce que la concentration mesurée soit nulle ($C_{S,APM}$). Puis, à la vitesse angulaire sélectionnée, la tension est augmentée, pour chaque palier de tension appliqué la concentration est mesurée. De ce fait, la tension optimale U_{opt} est connue (c'est-à-dire la tension pour laquelle la concentration est maximale).

Connaissant le diamètre de mobilité électrique et la masse de l'agrégat, il est possible de déterminer sa masse volumique effective :

$$\rho_{eff} = \frac{6 m_a}{\pi d_{me}^3} \quad (37)$$

Le protocole opératoire de détermination de la masse volumique effective des particules est détaillé en Figure 42.

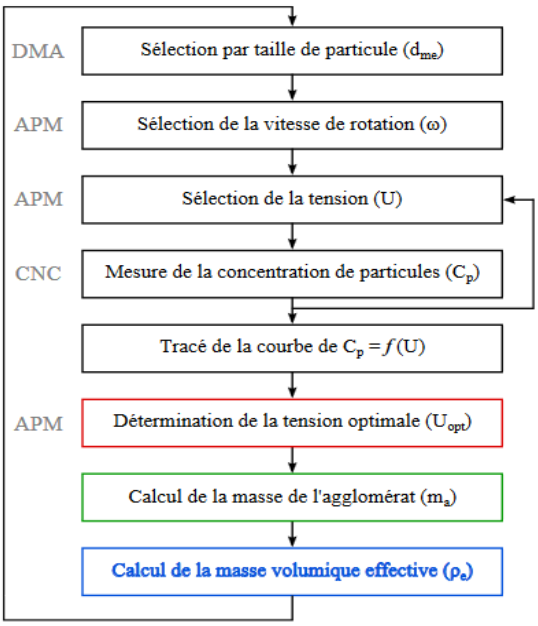


Figure 42 : Schéma du protocole opératoire pour la détermination de la masse volumique effective des particules (Issu de Cadavid Rodriguez, 2015)

2.3.3 Mesures et comparaisons aux données issues de la littérature : validation du banc d'essai

La Figure 43 montre les résultats expérimentaux obtenus pour les trois points opératoires sélectionnés du CAST. Ces résultats permettent de tracer la masse volumique effective des particules en fonction de leur diamètre de mobilité électrique. Sur le graphique ont aussi été reportés les résultats issus de Yon et al. 2014

Les résultats expérimentaux obtenus pour les suies 18 et 26 sont très proches des résultats de l'étude de Yon et al. (2014). Néanmoins, l'évolution de la densité effective en fonction du diamètre de mobilité électrique obtenue pour la suie 32 ne concorde pas avec les résultats de Yon et al. (2014).

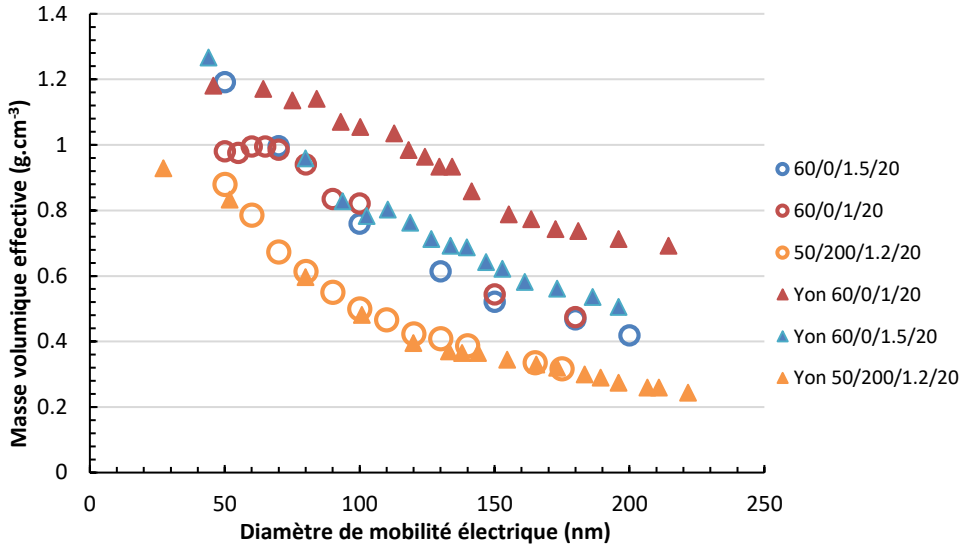


Figure 43 : Évolution de la masse volumique effective en fonction du diamètre de mobilité électrique pour différents points opératoires du miniCAST. Les symboles ronds vides correspondent aux mesures de cette étude, et les symboles triangles pleins aux mesures de Yon.

Les résultats des expressions de la masse volumique en fonction du diamètre de mobilité électrique pour les trois points opératoires sont donnés en Tableau 4. Ces résultats mettent en avant le bon fonctionnement du générateur et la fiabilité des mesures granulométriques.

Tableau 4 : Comparaisons de la masse volumique effective en fonction du diamètre de mobilité électrique avec les données de la littérature

Points opératoires	Masse volumique effective	Masse volumique effective issues des travaux de Yon
Suies 18	$\rho_{eff} = 25{,}305\ d_{me}^{-0.737}$	$\rho_{eff} = 25{,}292\ d_{me}^{-769}$
Suies 32	$\rho_{eff} = 11{,}899\ d_{me}^{-0.604}$	$\rho_{eff} = 6{,}859\ d_{me}^{-0.419}$
Suies 26	$\rho_{eff} = 22{,}489\ d_{me}^{-0.825}$	$\rho_{eff} = 21{,}907\ d_{me}^{-827}$

Compte tenu des différences notables des résultats obtenus dans cette étude et ceux publiés par (Yon, Bescond, et Ouf 2015) sur la suie 32, seules les suies 18 et 26 seront utilisées pour la suite de l'étude. Il sera alors possible de considérer que le diamètre primaire, la masse volumique et le rapport OC/TC sont ceux de l'étude de (Yon, Bescond, et Ouf 2015; Bescond et al. 2014).

2.4 Protocoles opératoires

Trois types d'études ont été réalisées au cours de ces travaux :

- L'étude de l'influence de l'influence de l'humidité relative pendant le colmatage d'un filtre plan THE par des particules de suies.
- L'étude de l'influence de l'humidité relative sur la perte de charge d'un dépôt de particules de suies. Ces résultats permettront de comparer le comportement d'un gâteau de suies soumis à différents taux d'humidité relative à celui de particules de chlorure de sodium ou d'alumine (Joubert et al. 2010; Montgomery et al. 2015). Les résultats obtenus seront utilisés pour mettre en place un modèle d'évolution de perte de charge dépendant des conditions opératoires telles que l'humidité relative et la perte de charge de colmatage. Cette partie représente la première étape avant une étude d'un cas plus réaliste où le filtre est colmaté en présence de suies et d'un air insaturé ou sursaturé.
- L'étude de l'évolution de la perte de charge de filtres colmatés par un mélange de particules de suies et de gouttelettes d'eau. L'objectif est d'obtenir des premières données expérimentales sur ce cas concret représentant un scénario possible dans le cas d'un incendie.

Deux protocoles opératoires ont ainsi été mis en place et sont décrits dans les deux sous parties suivantes. Les études d'évolution de perte de charge de filtre colmaté par des particules de suies sous air humide avec ou dépourvu de gouttelettes auront un protocole commun. La différence entre les deux protocoles réside dans le fait qu'un filtre en sortie de générateur de gouttelettes est installé afin d'avoir un air humide dépourvu de gouttelettes.

2.4.1 Protocole de l'étude de l'influence de l'humidité relative de l'air sur un dépôt de particules de suies

Les expériences se déroulent en plusieurs étapes :

Etape 1 *: Préparation initiale*

- Réglage du cryostat en aval du générateur de suies à une température de consigne de 1°C.
- Pesée du filtre vierge.
- Montage du filtre sur le porte filtre.
- Réglage du débit de filtration maintenu constant par ajustement manuel lors des essais.
- Démarrage des mesures des grandeurs caractéristiques et acquisition : Débit, température de gaz, humidité relative et perte de charge entre l'amont et l'aval du filtre.

Etape 2 *: Phase de colmatage du filtre par des particules de suies en air sec*

- Démarrage de la génération de particules de suies avec le miniCAST.
- Lancement de la filtration par des particules de suies jusqu'à une perte de charge finale définie (1500 Pa ; 2500 Pa ; 3500 Pa).
- Arrêt du colmatage et de la génération de particules de suies.

Etape 3 *: Détermination de la résistance du dépôt de particules – perméation en air sec (RH = 10%)*

- Perméation d'un air sec à travers le filtre colmaté à différents débits de filtration.
- La valeur de la perte de charge est relevée pour chaque débit appliqué.

Etape 4 *: Influence de l'humidité sur le dépôt de particules de suies*

- Génération d'un air humide variant entre RH = 50% à 90%
- Suivi de l'évolution de la perte de charge en continue au cours du temps

Etape 5 *: Détermination de la nouvelle résistance du dépôt après passage d'un air humide*

- Perméation d'un air sec à travers le filtre colmaté à différents débits de filtration.
- La valeur de la perte de charge est relevée pour chaque débit appliqué.

Etape 6 *: Perméation en air sec*

- Perméation d'un air sec à travers le filtre au débit de filtration.
- Suivi de la perte de charge en continue au cours du temps.

***Etape 7** : Détermination de la nouvelle résistance du dépôt après passage d'un air humide – vérification*

- Perméation d'un air sec à travers le filtre colmaté à différents débits de filtration.
- La valeur de la perte de charge est relevée pour chaque débit appliqué.

***Etape 8** : Etape finale*

- Arrêt de production des effluents
- Pesée du filtre avant et après passage à l'étuve à 120°C pendant 24 heures.

Le protocole opératoire est schématisé par la Figure 44.

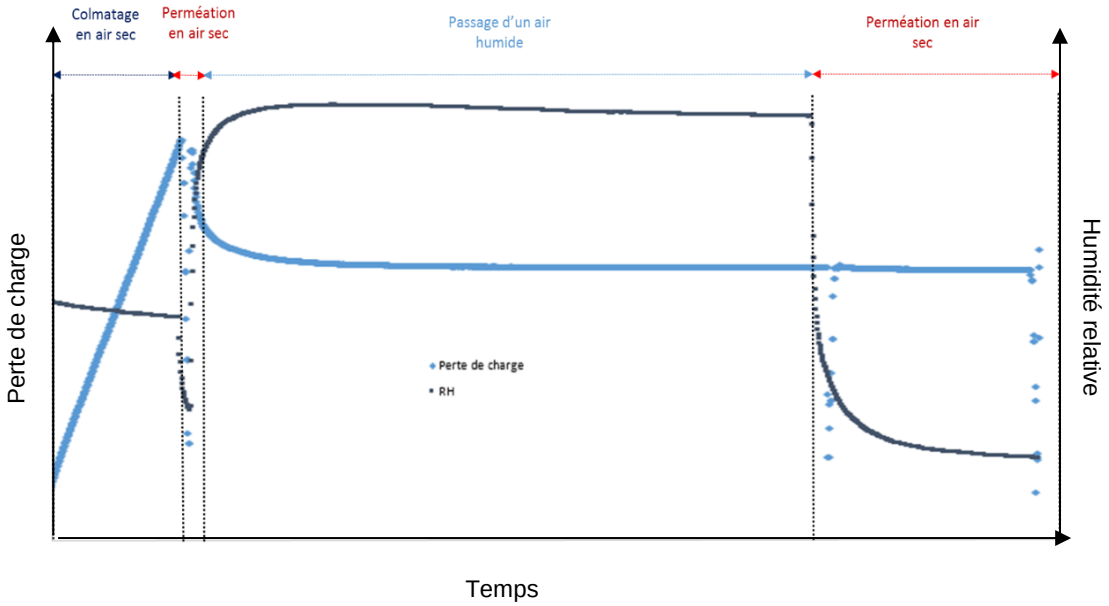


Figure 44 : Schématisation du protocole expérimental

2.4.2 Protocole de l'étude du mélange d'aérosols liquides et solides et de filtration sous air humide

1. *Préparation initiale :*

- Pesée du filtre vierge.
- Réglage du cryostat en aval du générateur de suies à une température de consigne de 1°C.
- Démarrage de la génération de particules de suies.

- Démarrage de l'extraction d'une partie du débit de suies fixé à un débit de 30 L/min pour tous les essais.
- Génération des gouttelettes : le débit de gouttelettes est modifié selon les essais entre 10 et 30 L/min afin de faire varier le ratio solide/liquide. Génération d'air humide : un filtre moyenne efficacité est placé en aval du générateur afin d'avoir un air humide dépourvu de gouttelettes. Le débit du générateur dans ce dernier cas est fixée à 25 L/min.

2. *Lorsque le mélange de suies et de gouttelettes est stable en température et en humidité relative, la filtration est lancée :*

- Réglage du débit de filtration maintenu constant lors des essais.
- Démarrage des mesures des grandeurs caractéristiques et acquisition : Débit, température de gaz, humidité relative et perte de charge entre l'amont et l'aval du filtre.

3. *Etape Finale*

- Arrêt de production des effluents
- Pesée du filtre avant et après passage à l'étuve à 120°C pendant 24 heures.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de décrire d'une part le banc d'essais mis en place spécifiquement pour ces travaux de thèse et d'autre part, la validation de la génération de suie par comparaison des masses volumiques effectives pour des points opératoires déjà étudiés dans la littérature (Yon et al. 2015) et en dernier lieu, les protocoles opératoires relatifs aux deux études expérimentales de ces travaux.

Le banc d'essais a nécessité un temps de réalisation important. En effet des difficultés de reproductibilité, de contrôle de température, d'humidité relative, de stabilité des aérosols (notamment des gouttelettes d'eau) ont été rencontrées. Il faut ajouter qu'en période de fortes chaleurs, il est extrêmement difficile de maintenir l'humidité relative au-dessus d'un taux de 70%.

Suite à la caractérisation des suies et la confrontation des résultats à ceux de la littérature, deux suies ont été sélectionnées pour l'étude : suie 18 et suie 26 (nommées par la valeur de leur diamètre primaire de particules). En effet, la concordance des résultats expérimentaux avec ceux de (Yon et al. 2015) permet de considérer que les paramètres tels que le diamètre

primaire, le rapport OC/TC et la masse volumique sont ceux déterminées dans les études de (Bescond et al. 2014; Yon et al. 2015).

Chapitre 3 Influence de l'humidité relative sur un dépôt de particules de suies

Comme précisé dans le chapitre état de l'art, il n'existe à notre connaissance pas de données publiées sur le comportement d'un gâteau de suies soumis à un balayage d'air humide ni sur l'évolution de la perte de charge en filtration de particules de suies sous air humide.

Ce troisième chapitre expose les résultats expérimentaux de l'influence de l'humidité obtenus avec des particules de suies. En premier lieu, l'influence de l'humidité relative sur le filtre vierge (D-309) est étudiée. Puis les résultats de colmatage sur filtre D-309 par les deux aérosols de particules de suies sélectionnées (suie 26 et suie 18) sous humidité sont présentés. Enfin, les résultats de perméations d'air humide sur plusieurs dépôts de particules de suies sont également présentés. Cette dernière étude mettra en évidence l'influence de différents paramètres opératoires et physiques sur l'évolution de la perte de charge : le type d'aérosol de suies, la perte de charge de colmatage et le taux d'humidité relative.

3.1 Performances initiales et propriétés des filtres plans sous humidité

3.1.1 Propriétés du filtre vierge

Cette partie présente les propriétés du média filtrant utilisé dans cette étude et l'évolution de sa perte de charge lors de perméations à différents taux d'humidité relative. Le média filtrant sélectionné est un filtre plan D-309. Ce type de média filtrant est bien connu au laboratoire et a été testé précédemment (Contal et al. 2004; Frising et al. 2005; Joubert et al. 2010; Charvet et al. 2018). Il s'agit de filtre Très Haute Efficacité (THE) dont les caractéristiques sont proches des filtres plissés utilisés en industrie nucléaire (Joubert 2009).

Les caractéristiques du média filtrant sont regroupées dans le Tableau 5.

Matériau	Epaisseur (µm)	Compacité	Diamètre de fibre moyen arithmétique (µm)	Efficacité fournie par le fournisseur (0,3 µm à 5,3 cm.s^{-1})
Verre	409	0,078	1,21	0,998

Tableau 5 : Caractéristiques du média filtrant D-309 (Frising 2004)

La valeur de la résistance à l'écoulement a été mesurée expérimentalement en effectuant une perméation en air sec sur le filtre vierge. D'après la loi de Darcy,

$$\Delta P = U\mu K \qquad 38$$

la résistance du gâteau est déterminée à partir de la pente de la courbe d'évolution de la perte de charge en fonction du produit de la vitesse de filtration et de la viscosité de l'air (Figure 45).

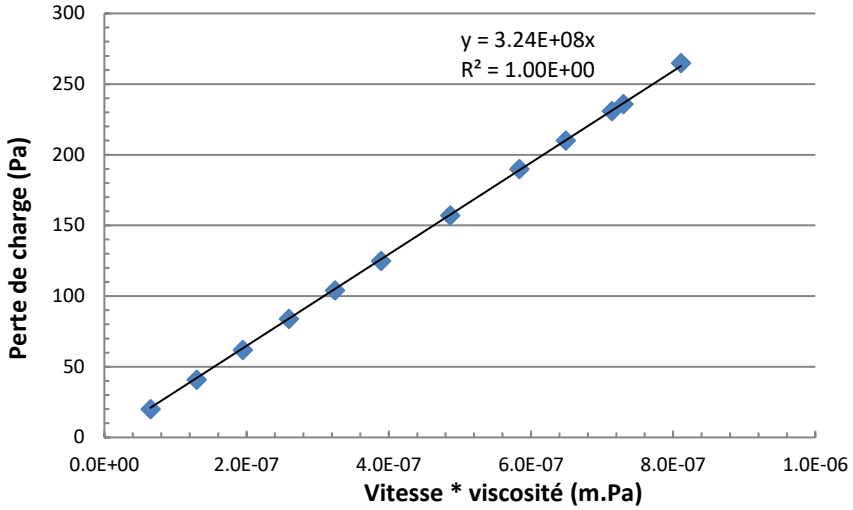


Figure 45 : Détermination de la résistance du filtre vierge : évolution de la perte de charge en fonction du produit de la vitesse de filtration et de la viscosité de l'air

La résistance du filtre vierge, déterminée au laboratoire, est de $3{,}24.10^{8}$ m^{-1}, ce qui est cohérent avec les valeurs mesurées antérieurement (Frising, 2004).

3.1.2 Évolution de la perte de charge d'un filtre soumis à des contraintes d'humidité relative par paliers

Il est nécessaire de s'assurer de l'absence d'impact de l'humidité relative sur les performances du média filtrant afin de ne pas biaiser les interprétations des différents essais menés dans le cadre de cette thèse. Ainsi, un suivi de la perte de charge du filtre en fonction du temps pour plusieurs paliers d'humidité relative a été réalisé. Les résultats obtenus sont représentés en Figure 46.

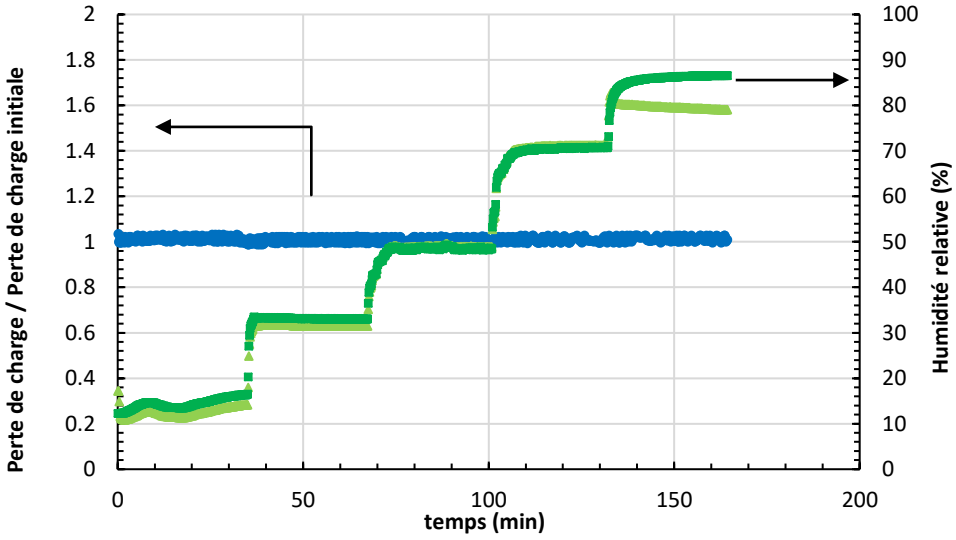


Figure 46 : Évolution de la perte de charge du filtre vierge soumis à des paliers croissants d'humidité relative de l'air. En vert foncé, valeur de l'humidité relative pour le capteur amont, et en vert clair valeur de l'humidité relative pour le capteur aval.

Les résultats montrent que le rapport $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ reste constant dans la gamme d'humidité relative appliquée. Il n'y a donc pas d'influence de l'humidité relative sur la perte de charge du média filtrant utilisé pour les essais de cette étude. Ainsi, la structure du média n'est pas modifiée par le passage d'un air à des taux d'humidité relative compris entre 10 et 90%.

Ces résultats sur le filtre vierge sont en accords avec ceux de la littérature (Joubert 2009).

Ces essais permettent également de vérifier les valeurs données par les capteurs d'humidité relative placés à l'amont et l'aval du filtre. Leurs valeurs coïncident jusqu'à une humidité relative de 70%. Pour une humidité relative supérieure à 70%, le capteur amont donne des valeurs inférieures au capteur aval.

3.2 Colmatage du filtre THE sous humidité

Afin de déterminer l'impact de l'humidité sur la structure du gâteau de particules, des suivis de l'évolution de la perte de charge lors du colmatage du média filtrant à différentes humidités avec les deux aérosols de suies utilisés dans cette étude (suie 26 et suie 18 (dont les caractéristiques sont données dans le chapitre 2)) ont été réalisés.

3.2.1 Évolution de la perte de charge

Des expériences de colmatage de filtres par les suies 18 et 26 à environ 15% RH et 90% RH ont été réalisées. La perte de charge du filtre est mesurée en continu. De plus, lors des expériences de colmatage pour les suies 18, un second filtre a été placé en série du filtre test afin de détecter ou non une diminution de l'efficacité du média testé.

3.2.1.1 Suies 18

La Figure 47 représente l'évolution du rapport $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$ en fonction de la masse surfacique collectée de particules de suies 18 pour deux taux d'humidité relative 15% RH et 90% RH, et ce pour trois essais afin de s'assurer de la répétabilité des expériences.

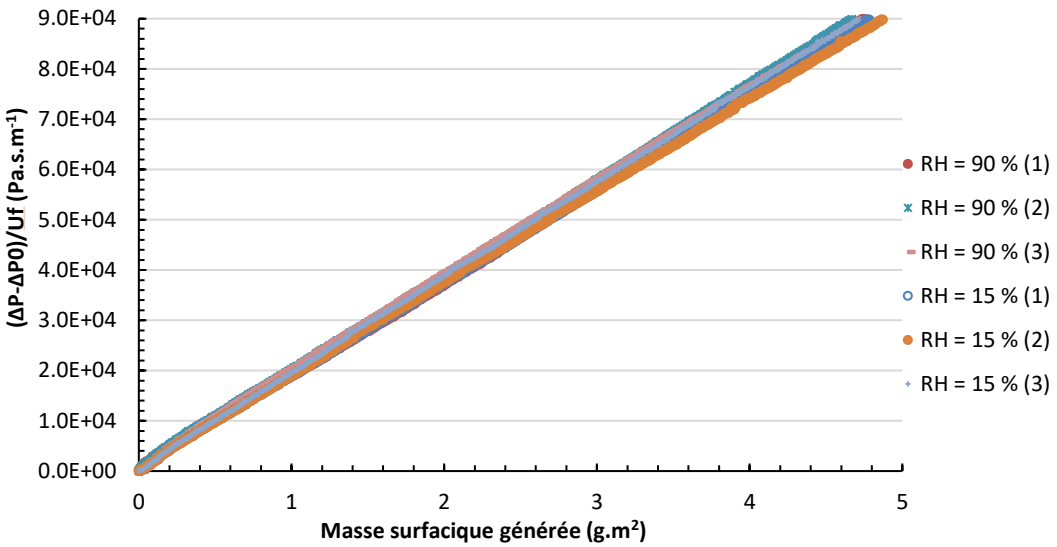


Figure 47 : Évolution de la perte de charge du filtre D309 plan en fonction de la masse surfacique de particules de suies 18 à 15% RH et 90% RH (2,6 cm.s^{-1})

Les résultats montrent que pour les deux humidités relatives appliquées les évolutions de perte de charge peuvent être considérées comme confondues. Ces résultats semblent indiquer que la formation du gâteau de particules de suies 18 n'est pas modifiée par l'humidité relative de l'air dans ces conditions. La Figure 47 montre aussi une très bonne reproductibilité entre chaque essai. Ce résultat est important pour la suite de l'étude, cela signifie que l'humidité relative lors de la filtration de particules de suies n'a pas d'impact sur les caractéristiques du gâteau (porosité, résistance aéraulique du gâteau).

La perte de charge du filtre placé en aval est restée constante (155 Pa +/- 0,05 Pa) pour chaque essai. L'efficacité du filtre test n'a donc pas diminuée quelle que soit l'humidité relative appliquée lors du colmatage. Ce résultat est cohérent car, en effet, plus le filtre est colmaté par des particules solides plus l'efficacité augmente. Si l'humidité avait endommagé le filtre (fuite par exemple), une augmentation de la perte de charge du filtre aval aurait été observée.

Les valeurs de pertes de charge étant similaires pour les valeurs extrêmes de la gamme d'humidité relative, il semble pertinent de considérer que le résultat serait similaire pour des humidités intermédiaires.

3.2.1.2 Suies 26

La Figure 48 représente l'évolution du rapport $\frac{\Delta P - \Delta P_0}{U_f}$ en fonction de la masse surfacique de particules de suie 26 collectées pour deux taux d'humidité relative 15% RH et 75% RH. Les résultats montrent que pour les deux humidités relatives appliquées les évolutions de perte de charge peuvent être considérées comme confondues. Ces résultats semblent indiquer que la formation du gâteau de particules de suies 26 n'est pas modifiée par l'humidité relative de l'air

dans ces conditions. Ces résultats donnant les mêmes tendances que pour la suie 18 (i.e. pas de modification de la structure du gâteau) qui étaient très reproductibles, pas d'essais supplémentaires n'ont été réalisés.

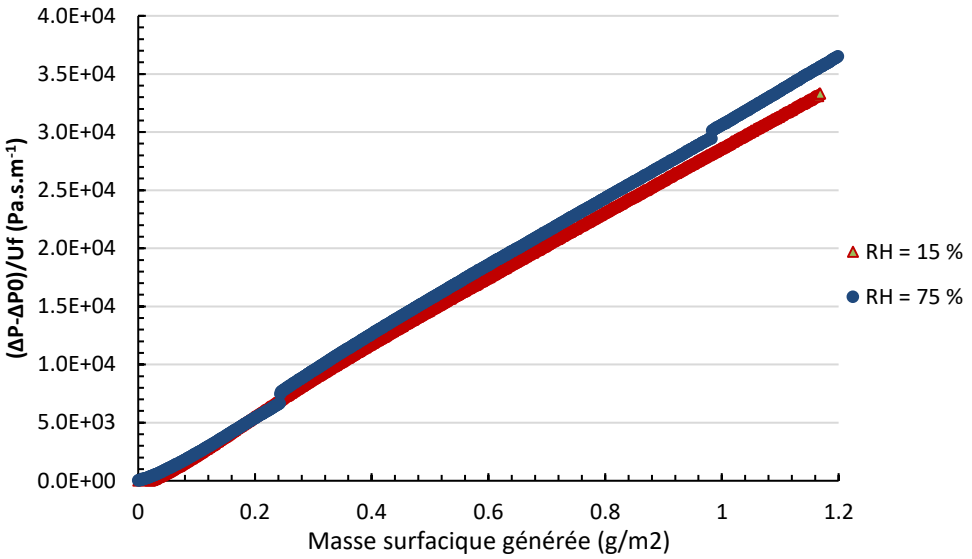


Figure 48 : Évolution de la perte de charge du filtre D309 plan en fonction de la masse surfacique de particules de suies 26 à 15% RH et 75% RH (2,6 cm.s-1).

3.2.2 Bilan

Les résultats montrent qu'il n'y a pas d'influence du taux d'humidité relative sur la résistance aéraulique lors des colmatages des suies 18 (<90% HR) et 26 (<75% HR). Une bonne reproductibilité des résultats a été mise en avant également. Ces résultats sont similaires aux résultats obtenus par (Joubert et al. 2010) avec des particules d'alumine (jusque 95% HR). Ces résultats sont conformes aux colmatages de suies sur filtre plan THE réalisé précédemment par Nerisson (2015).

3.3 Influence de l'humidité relative après le colmatage du filtre par des suies

Dans cette partie, l'objectif est d'étudier l'influence de l'humidité relative sur un gâteau de particules de suies formé sous air sec. L'intérêt sera porté sur les évolutions de la perte de charge de différents dépôts de particules de suies traversés par un flux d'air plus ou moins humide. Les évolutions de perte de charge seront représentées en fonction du temps, ce qui permettra de s'intéresser à la cinétique de ces évolutions selon les conditions opératoires. Une caractérisation de la résistance aéraulique du gâteau de particules sera faite pour plusieurs dépôts de particules et plusieurs valeurs d'humidité relative puis une interprétation des résultats sera proposée.

3.3.1 Évolution temporelle de la perte de charge

- *Méthode*

La perte de charge d'un gâteau de particules dépend de plusieurs paramètres : son épaisseur, sa porosité, la surface spécifique des particules le constituant, la vitesse de filtration et la viscosité dynamique du fluide le traversant.

Trois différentes pertes de charges de colmatage seront sélectionnées pour les essais : 1500 Pa, 2500 Pa et 3500 Pa. Ces niveaux atteints seront appelés respectivement par la suite : dépôt 1500, dépôt 2500 et dépôt 3500. L'objectif étant d'étudier l'influence de l'humidité relative selon la perte de charge de colmatage. Pour les deux suies, les essais seront réalisés à un débit volumique de 22,5 L/min (soit 3,3 $cm.s^{-1}$). Pour la suie 18, des essais à des débits volumiques de 12 L/min seront également réalisés pour des pertes de charges similaires sachant que la masse collectée de particules sur un filtre est plus importante à plus faible vitesse pour une même perte de charge. Cela permettra de comparer les résultats pour une même perte de charge mais des épaisseurs différentes.

Il faut préciser qu'à perte de charge et débit de filtration identiques pour les suies 18 et 26, la masse déposée, la porosité et l'épaisseur de dépôt sur le filtre ne sont pas les mêmes.

Pour une perte de charge donnée, trois essais de perméation humide sont réalisés, respectivement à environ 50%, 70% et 90% RH, soit 9 essais pour chaque suie.
Il a été vérifié pour chaque essai que le débit de filtration pendant le colmatage et la perméation en air humide restait constant et identique entre les essais.

- *Résultats pour les suies 18 à un débit de filtration de 22,5 L/min*

Les Figure 49 à Figure 50 présentent les évolutions de perte de charge de filtres plans colmatés par des particules de suie 18 à un débit de 22,5 L/min. Les essais ont été faits pour les trois pertes de charge sélectionnées : 1500, 2500 et 3500 Pa. Dans chacun des cas, quelle que soit la perte de charge de colmatage atteinte, l'humidité relative moyenne lors du colmatage était de 35 %.

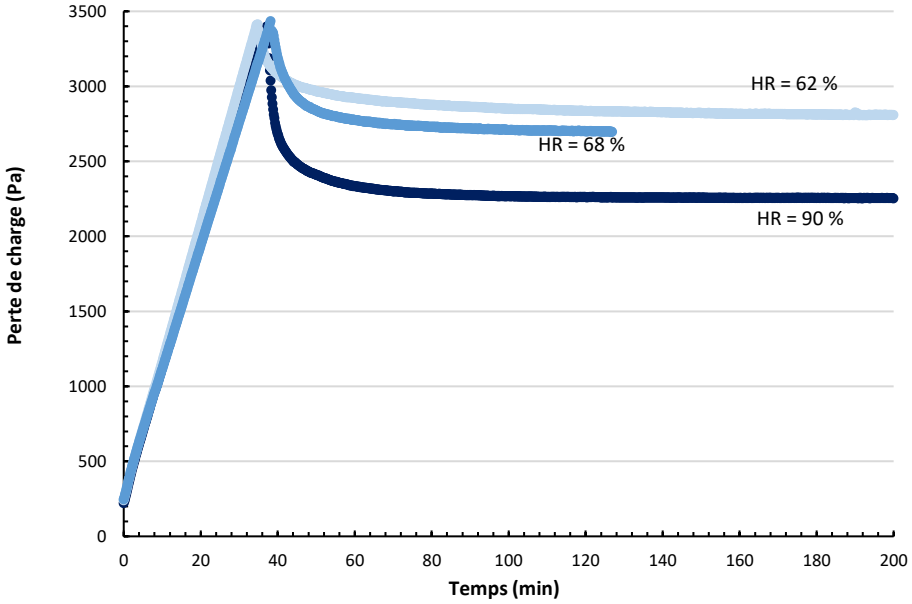


Figure 49 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'à une perte de charge de 3500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suie 18 un débit de filtration de 22,5 L/min

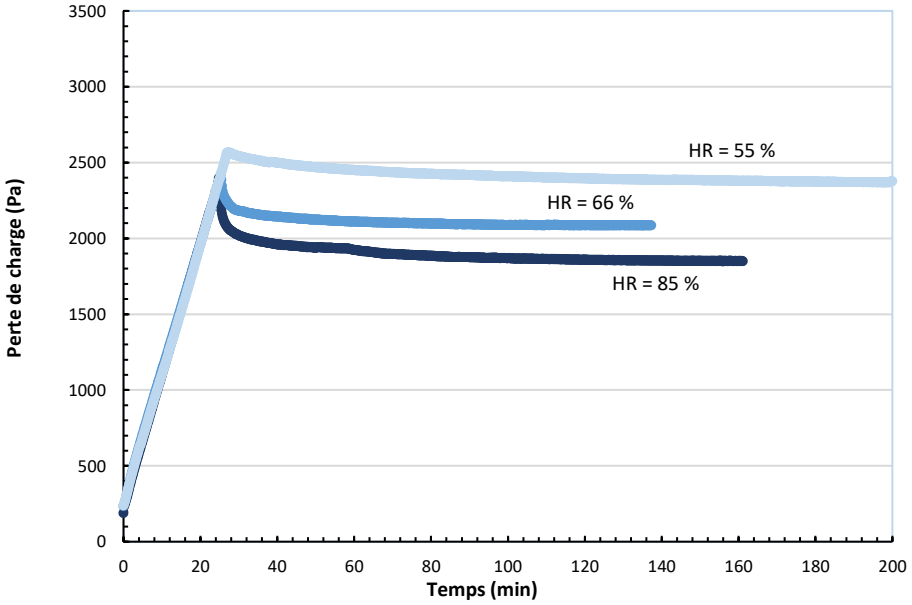


Figure 50 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'à une perte de charge de 2500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suie 18 un débit de filtration de 22,5 L/min

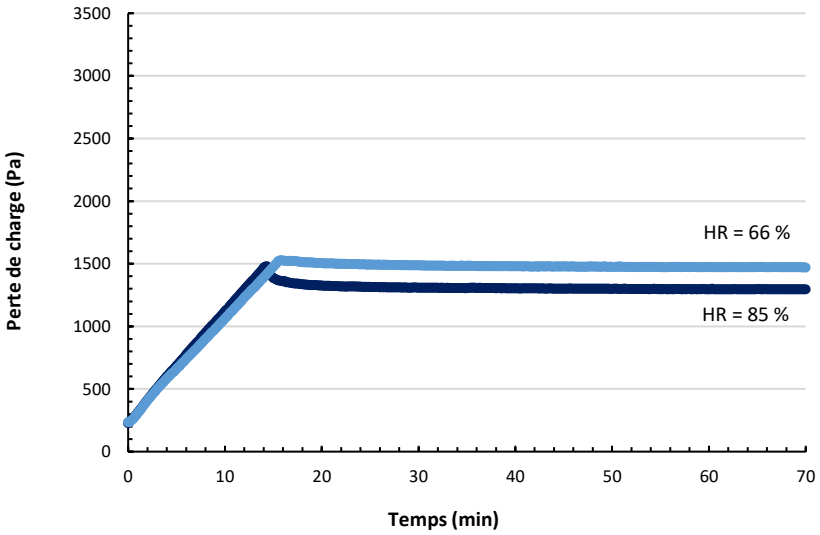


Figure 51 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'à une perte de charge de 1500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 18 un débit de filtration de 22,5 L/min

- *Résultats pour la suie 26 à un débit de filtration de 12 L/min*

Les Figures 52 à 54 présentent les évolutions de perte de charge de filtres plans colmatés par des particules de suie 26 à un débit de 12 L/min. Les essais ont été faits pour les trois pertes de charge sélectionnées : 1500, 2500 et 3500 Pa. Dans chacun des cas, quelle que soit la perte de charge de colmatage atteinte, l'humidité relative moyenne lors du colmatage était de 35% à température ambiante. Il n'a pas été possible de réaliser l'ensemble des expériences à ce débit, à cause d'un problème de dysfonctionnement de la pompe de filtration.

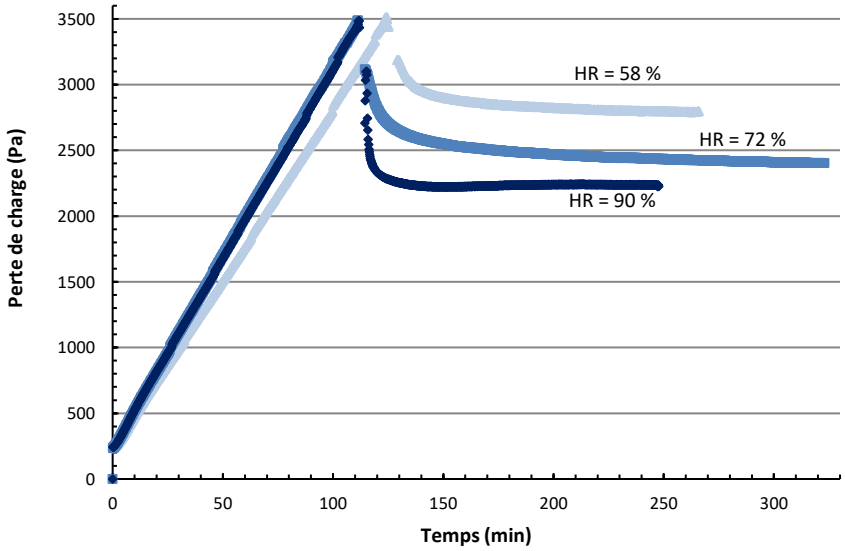


Figure 52 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'à une perte de charge de 3500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suie 26 un débit de filtration de 12 L/min

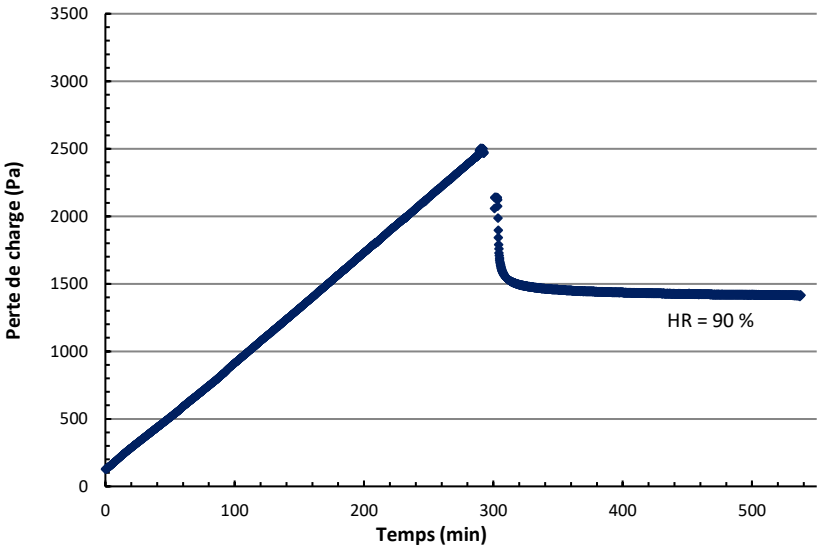


Figure 53 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'à une perte de charge de 3500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 26 un débit de filtration de 12 L/min

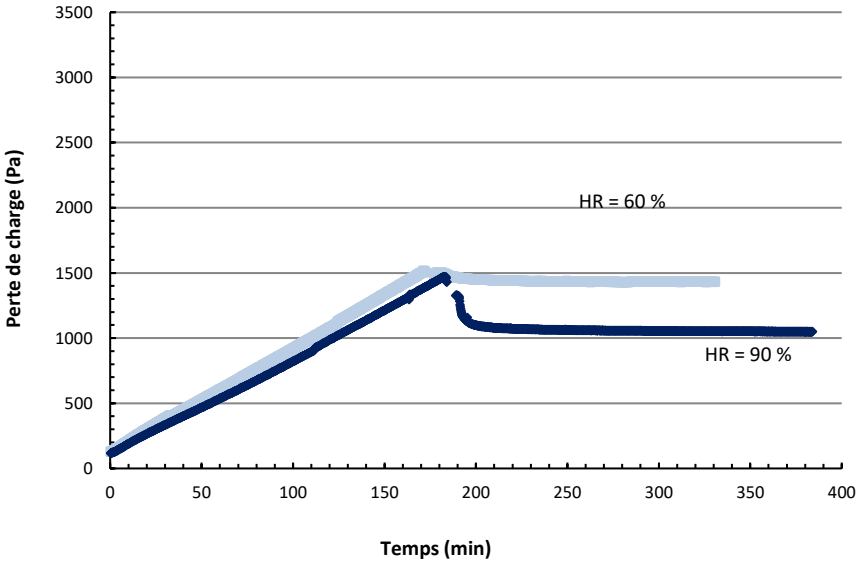


Figure 54 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'à une perte de charge de 1500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 26 un débit de filtration de 12 L/min

- *Résultats pour la suie 26*

Les Figure 55 à Figure 57 présentent les évolutions de perte de charge de filtres plans colmatés par des particules de suie 26. Les essais ont été faits pour les trois pertes de charge sélectionnées. Dans chacun des cas, quelle que soit la perte de charge atteinte, l'humidité relative moyenne lors du colmatage était de 35% à température ambiante.

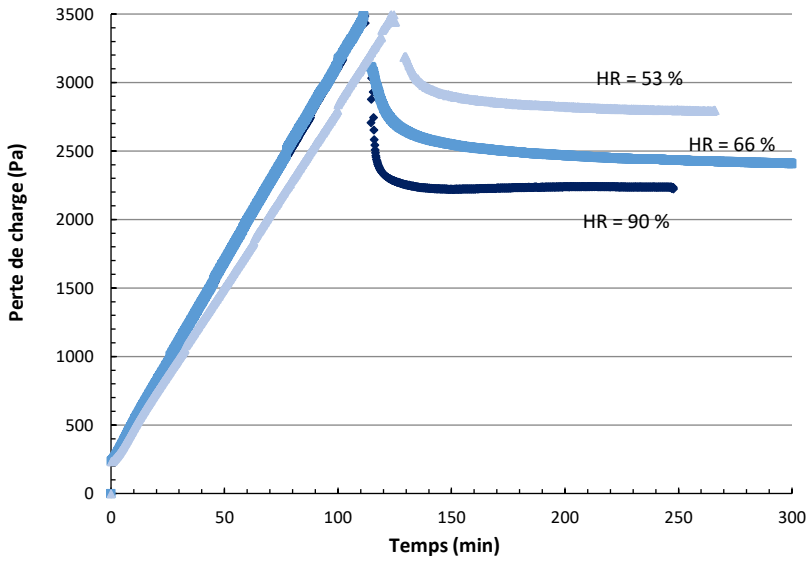


Figure 55 : Évolution de la perte de charge de filtres D-309 jusqu'à une perte de charge de 3500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suie 26 un débit de filtration de 22,5 L/min

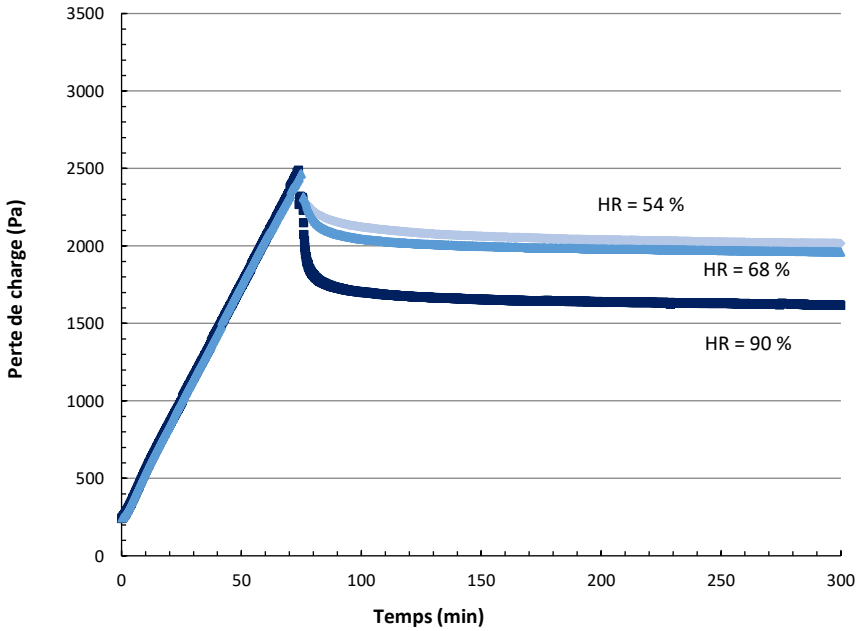


Figure 56 : Évolution de la perte de charge de filtres d-309 jusqu'à une perte de charge de 2500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 26 un débit de filtration de 22,5 L/min

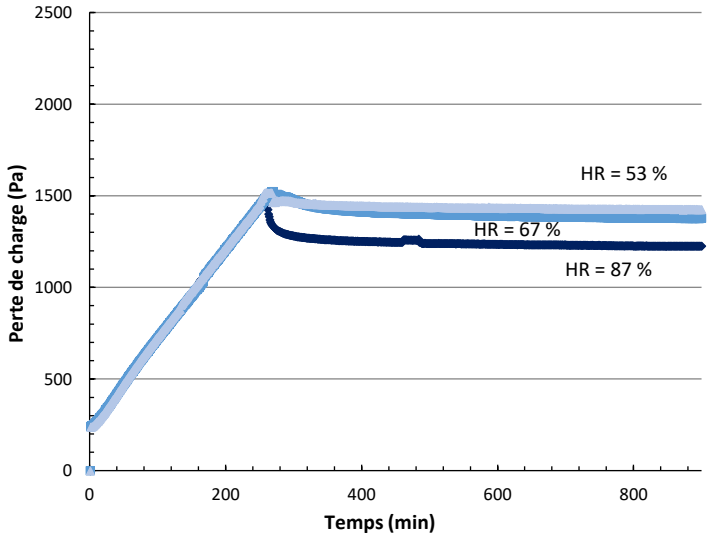


Figure 57 : Évolution de la perte de charge de filtres d-309 jusqu'à une perte de charge de 1500 Pa suivie d'un air humide pour les particules de suies 26 un débit de filtration de 22,5 L/min

Les masses des dépôts de particules ainsi que les pourcentages de diminution de perte de charge par rapport à la valeur finale de colmatage sont fournies pour les suies 18 et 26 respectivement dans les Tableau 6 et Tableau 7. Le Tableau 7 donne les résultats pour deux débits de filtration : 12 et 22,5 L/min.

	Dépôt 3500			**Dépôt 2500**			**Dépôt 1500**		
RH (%)	90	68	62	85	66	55	85	66	50
Masse déposée (+/-0.002) (g)	0,038	0,04	0,038	0,028	0,027	0,028	0,015	0,018	0,015
Diminution de perte de charge (%)	***34***	***22***	***18***	***25***	***14***	***0***	***13***	***4***	***0***

Tableau 6 : Données pour l'ensemble des essais avec la suie18 à un débit de filtration de 22,5 L/min: taux d'humidité relative moyen mesuré, masse déposée et diminution de perte de charge en pourcentage

	Dépôt 3500			Dépôt 2500			Dépôt 1500		
RH (%)	90	66	53	90	68	54	87	67	53
Masse déposée (g)	*0,025*	*0,028*	*0,03*	*0,016*	*0,019*	*0,019*	*0,01*	*0,01*	*0,011*
Diminution de perte de charge (%)	***36***	***31***	***20***	***35***	***21***	***18***	***17***	***8,0***	***1,8***
RH (%)	90	72	58	89			88	67	
Masse déposée (g)	0,036	0,046	0,048	0,037			0,022	0,022	
Diminution de perte de charge (%)	***35***	***18***	***8***	***44***			***29***	***6***	

Tableau 7 : Données pour l'ensemble des essais avec la suie 26 à deux débits de filtration de 22,5 L/min (haut du tableau) et 12 L/min (bas du tableau): taux d'humidité relative moyen mesuré, masse déposée et diminution de perte de charge en pourcentage

Ces données montrent que la masse déposée pour la suie 18 est plus importante que pour la suie 26 à même perte de charge. Il n'a pas été possible expérimentalement de connaître l'épaisseur et la porosité des gâteaux formés. Le protocole établi et décrit dans les travaux de Ribeyre (2015) avec le suivi de l'évolution du gâteau au cours de sa formation par trigonométrie laser a été appliqué sur ces dépôts de suies, mais il n'a pas été possible d'obtenir de résultat exploitable, du fait de la nature « charbonneuse » des suies.

Lors des essais à plus faible vitesse, la masse de particules déposée est plus importante car la perte de charge de colmatage pour une même perte de charge. Les données du Tableau 7 ne montrent pas de relations claires entre la masse déposée ou l'épaisseur et la diminution de perte de charge.

- *Commentaires sur les résultats obtenus : influence du taux d'humidité relative*

Les résultats représentent l'évolution de la perte de charge en fonction du temps pour des colmatages allant jusque 3500, 2500 et 1500 Pa respectivement pour les suies 18 et 26.

Les courbes présentent trois phases : une évolution linéaire, puis une diminution importante et rapide, et enfin une diminution moins importante et beaucoup plus lente que la première (Figure 58).

Les courbes de colmatage sont linéaires ce qui est caractéristique de la filtration de particules solides sur filtres plan Très Haute Efficacité et représente la formation du gâteau. Il est à noter la bonne reproductibilité des essais mettant ainsi en évidence une structure du dépôt similaire pour chaque essai. Par exemple, pour la suie 18, les coefficients directeurs correspondant aux dépôts 3500, 2500 et 1500 valent respectivement 87, 84 et 88 $Pa.min^{-1}$. Cela permet également d'établir que les trois types de gâteaux (1500 Pa, 2500 Pa et 3500 Pa) se structurent de la même manière et ainsi de faire l'hypothèse que leurs porosités sont identiques. Seule l'évolution de la perte de charge en fonction du temps est étudiée durant le passage de l'air humide à travers le dépôt car la masse d'eau retenue par le filtre en fonction de la masse d'aérosols déposée n'a pas pu être déterminée (même masse de filtre colmaté avant et après étuvage à 120°C).

Pour les trois dépôts, lorsqu'un flux d'air d'humidité relative plus élevée que l'humidité relative du colmatage traverse le dépôt, une diminution brutale de la perte de charge est observée. Plus la perte de charge du gâteau sec est grande, plus la diminution de perte charge est importante. Pour les dépôts 1500, la valeur du taux d'humidité relative a peu d'influence sur la chute de perte de charge.

Lorsque les dépôts 3500 sont soumis à des humidités relatives de 70 et 90%, la perte de charge chute brutalement dans un premier temps puis diminue beaucoup plus lentement. Cette seconde diminution est beaucoup plus faible que pour la première chute. Cette évolution est observée également pour les dépôts 2500 avec des humidités relatives de 70 et 90%, et pour les dépôts 1500 uniquement avec une humidité relative de 90%. De manière générale, les dynamiques de chute de perte de charge dépendent de l'humidité relative et de la perte de charge de colmatage.

Sur l'ensemble des essais réalisés, les paliers de perte de charge atteints sont différents pour les trois humidités relatives appliquées au dépôt : plus l'humidité relative est élevée, plus ce palier est bas. Cependant, concernant la seconde partie de la diminution de perte de charge, les essais n'ont pas pu être réalisé jusqu'à stabilisation complète de la valeur de la perte de charge. Les valeurs finales de stabilisation de perte de charge ne sont donc pas connues. Finalement, il semblerait que la chute de perte de charge suive deux cinétiques : une cinétique de chute immédiate puis une cinétique beaucoup plus lente comme le montre la Figure 58. Cela laisse penser qu'il pourrait y avoir deux mécanismes physico-chimiques distincts impliqués dans la chute de perte de charge.

Par ailleurs, ces résultats montrent que plus la perte de charge du gâteau est grande, plus l'influence de l'humidité relative est forte. De manière générale, les réponses des deux types de gâteaux de suies suivent les mêmes tendances.

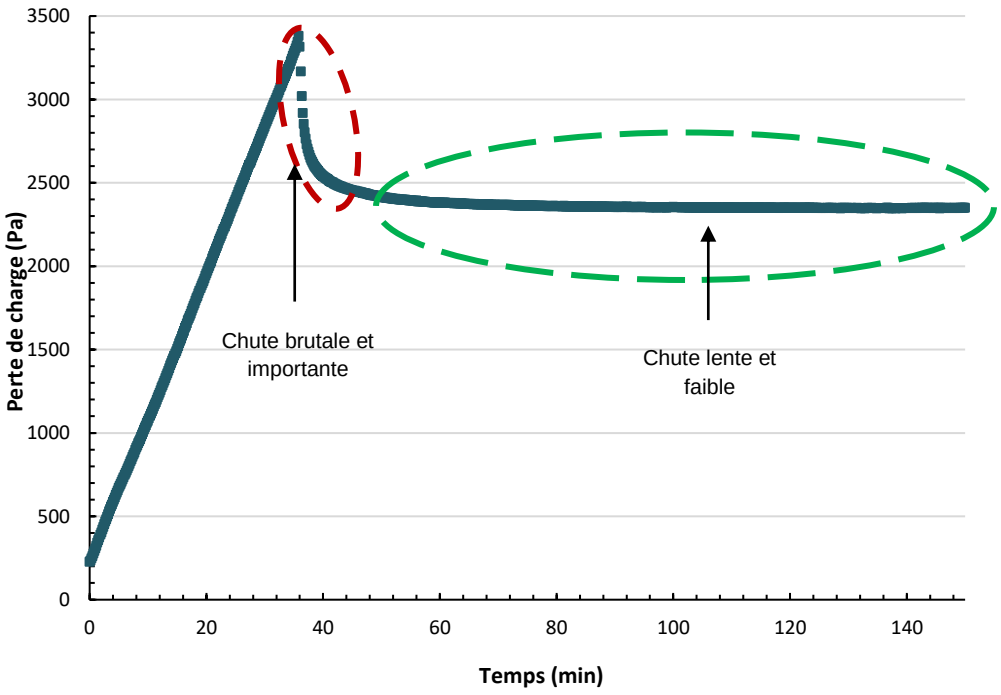


Figure 58 : Schématisation des deux chutes de perte de charge pour un dépôt 3500 de suies 18 soumis à une humidité relative de 90%.

- *Résultats et observations complémentaires*

Des expériences complémentaires ont été effectuées afin de savoir si la chute de perte de charge est reproductible. Deux essais avec le même protocole opératoire et des conditions opératoires similaires sont mis en place. La Figure 59 présente l'évolution de la perte de charge en fonction du temps pour la suie 26 pour deux dépôts 3500 traversés par un air à un taux d'humidité relative de 90%.

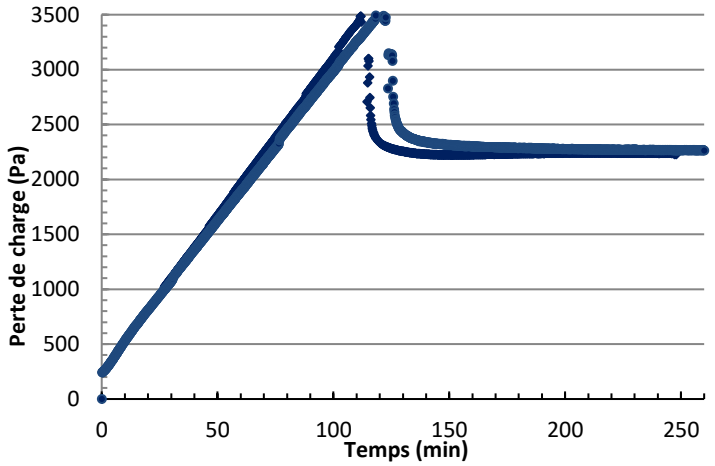


Figure 59 : Évolution de la perte de charge en fonction du temps pour deux dépôts 3500 suivis d'un air humide à 90% (suie 26)

Les résultats montrent que la chute de perte de charge se fait avec une cinétique similaire pour les deux essais et que le palier de perte de charge atteint est le même. Le léger décalage observé entre les courbes peut être attribué au réglage manuel du débit de filtration.

Des essais ont également été menés pour trois dépôts à des pertes de charge proches : 1800, 2000 et 2200 Pa traversés par un air à un taux d'humidité relative de 90% chacun. Les résultats de ces essais sont représentés en Figure 60.

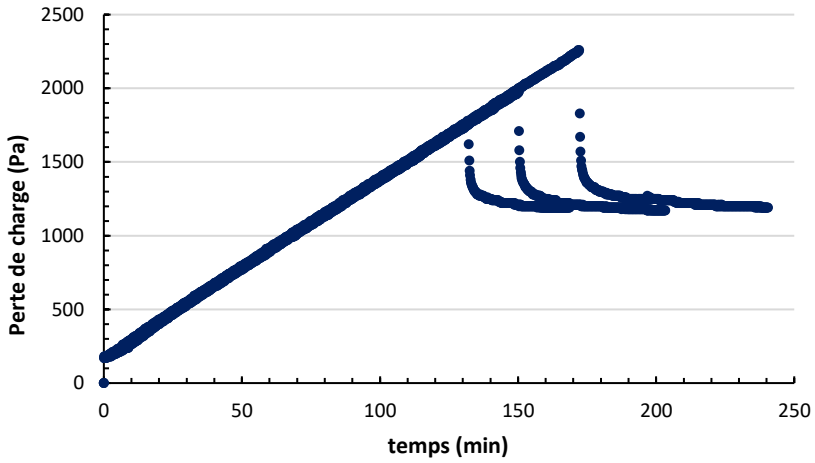


Figure 60 : Évolution de la perte de charge pour trois dépôts à 1800, 2000 et 2200 Pa traversé par un air à une humidité relative de 90% (suie 26). Vitesse de filtration à 2,2 cm.s^{-1}

Pour ces trois essais, le même constat est fait : le palier de perte de charge atteint est similaire. Il semblerait alors que pour une même perte de charge (ou pour des pertes de charges proches) le palier de chute de pression atteint est reproductible.

L'évolution des mesures d'humidités relative amont et aval lors du passage de l'air humide sur le dépôt 3500 de la suie 18 est aussi représentée en Figure 61 pour des taux d'humidité relative de 70 et 90 %.

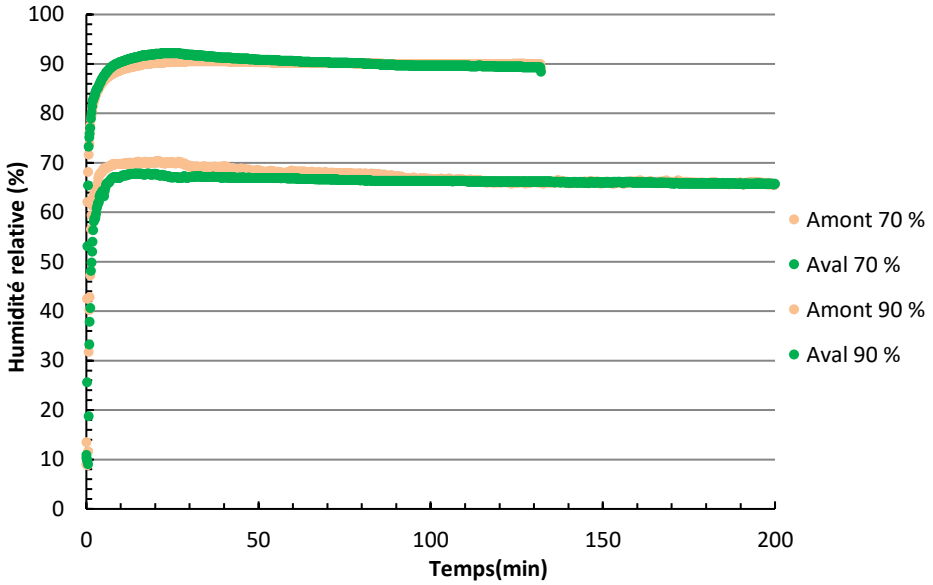


Figure 61 : Évolution de l'humidité relative mesurée par les capteurs en amont et en aval du filtre lors du passage d'un air humide sur le dépôt 3500 (taux de 70 et 90 % ici).

Les écarts entre les valeurs expérimentales sont extrêmement faibles et ne permettre pas d'observer une différence d'humidité relative entre l'amont et l'aval du filtre, ni de conclure sur une sorption d'eau par le gâteau.

L'intérêt est ensuite porté sur les résistances des gâteaux et l'évolution de ces résistances en fonction de l'humidité relative.

3.3.2 Évolution des résistances de gâteau en fonction de l'humidité relative

3.3.2.1 Mesures de perméation en air sec

Comme expliqué dans le protocole opératoire (chapitre 2), pour chacun des essais, des perméations en air sec ont été réalisées sur le gâteau immédiatement après son colmatage, puis sur le gâteau ayant subi un passage d'air à humidité relative plus élevée. Ces essais de perméation ont permis de déterminer les résistances aérauliques de l'ensemble {gâteau + média fibreux colmaté en profondeur} avant et après passage de l'air humide. Il est important de rappeler que les essais n'ont pas été réalisés jusqu'à stabilisation complète de la perte de

charge, cependant compte tenu du critère d'arrêt utilisé (moins de 4 pascals sur 30 minutes), l'erreur sur la résistance finale est faible. Il sera appelé « gâteau sec » le gâteau formé suite au colmatage, et « gâteau humide » le gâteau après le passage d'un air humide.

D'après la loi de Darcy, la perte de charge est proportionnelle à la vitesse de filtration. Avec ΔP la perte de charge de l'ensemble {gâteau + média fibreux colmaté en profondeur} (Pa), U la vitesse de perméation (m/s), η la viscosité de l'air (Pa.s) et K la résistance du milieu poreux.

Ainsi la pente de la courbe d'évolution de la perte de charge en fonction du produit de la vitesse de filtration et de la viscosité correspond à la résistance du gâteau. La Figure 62 représente les résultats de perméation pour la suie 18 avec un dépôt 3500.

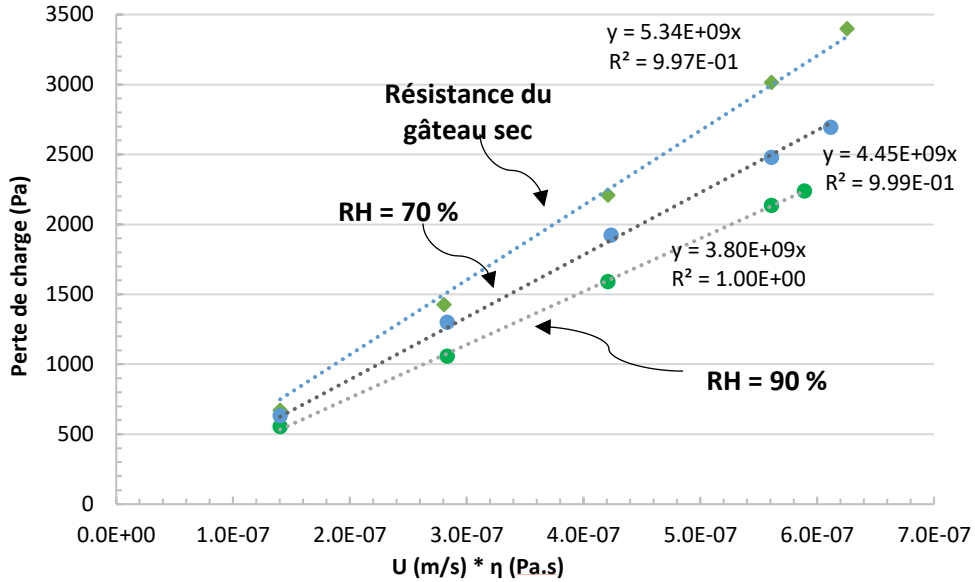


Figure 62 : Détermination graphique de la résistance des gâteau avec la loi de Darcy pour la suie 18 à 3500 Pa pour deux taux d'humidité relative (70 et 90%).

Les droites correspondant aux dépôts soumis à un flux d'air à des humidités relatives de 70% et 90 % ont une pente plus faible que la droite du dépôt n'ayant pas été exposé à un air humide. Plus l'humidité relative appliquée sera élevée, plus faible sera la résistance aéraulique du dépôt.

Pour chaque niveau de colmatage (1500, 2500 et 3500), il a été nécessaire de réaliser trois gâteaux secs afin de tester trois taux d'humidité relative différents. Ainsi, trois résistances à l'écoulement des dépôts secs ont été déterminées permettant de vérifier la reproductibilité des valeurs de résistances et la validité de la méthode. La Figure 63 montre les résultats des perméations sur l'ensemble {gâteau sec + média fibreux colmaté en profondeur} pour la suie 18.

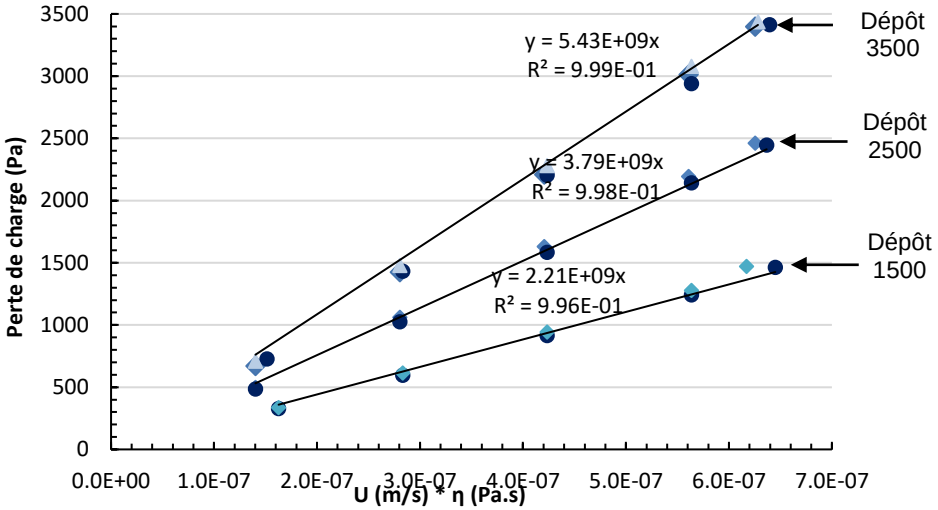


Figure 63 : Détermination des résistances de gâteaux secs pour les trois dépôts (Suie 18)

Les résultats présentés Figure 63 montrent que les résistances mesurées pour chaque dépôts sont très proches, ainsi une bonne reproductibilité entre les essais est obtenue.

3.3.2.2 Variations des résistances avec l'humidité relative

La Figure 64 et la Figure 65 rassemblent les évolutions des résistances de gâteaux respectivement pour les suies 18 et 26 en fonction de l'humidité relative de l'air.

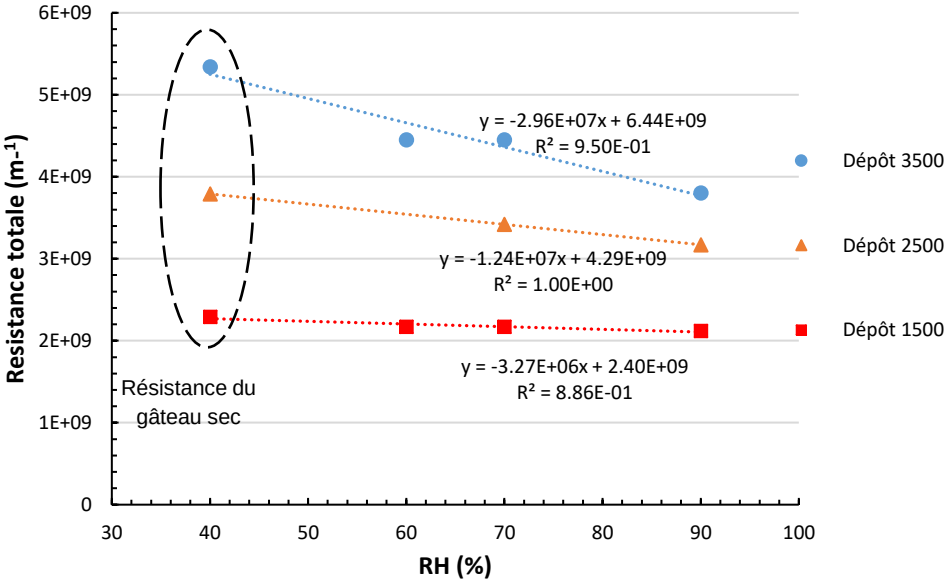


Figure 64 : Évolution des résistances en fonction de l'humidité relative pour les suies 18.

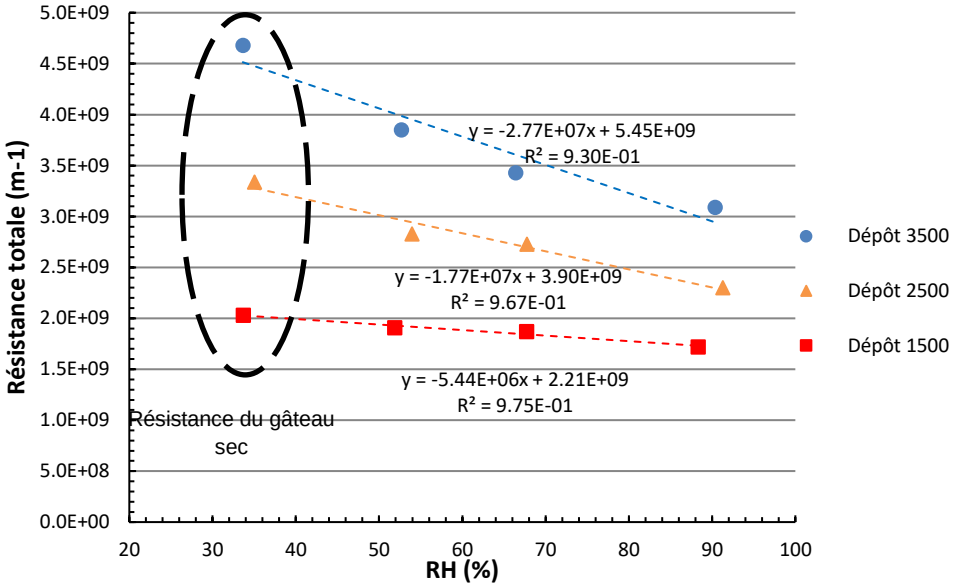


Figure 65 : Évolution des résistances en fonction de l'humidité relative pour les suies 26.

En premier lieu, les Figure 64 et Figure 65 montrent que les résistances des gâteaux formés diminuent avec l'humidité relative. Quelle que soit la suie, pour les dépôts formés jusqu'à une perte de charge de 1500 Pa, la diminution des valeurs de résistances sont légères. Pour les dépôts formés jusqu'à une perte de charge de 2500 Pa, une diminution de la résistance est observée avec l'augmentation de l'humidité relative. Enfin, pour le dépôt formé jusqu'à une perte de charge de 3500 Pa, la diminution de la résistance en fonction de l'humidité relative est plus importante que pour les autres dépôts.

En conclusion, les résultats révèlent que plus la résistance du gâteau initial formé est importante, plus la diminution de la résistance est grande en fonction de l'humidité relative.

Deuxième point notable, les résistances à perte de charge et taux d'humidité similaires sont toujours plus élevées pour les suies 18 que les suies 26. La masse déposée pour atteindre les pertes de charge souhaitées est plus élevées pour les suies 18 que les suies 26 (Tableau 6 et Tableau 7), ainsi l'épaisseur ou la compacité est plus élevée pour les gâteaux de suies 18 entraînant dans les deux cas une résistance plus élevée.

- *Comparaisons des résultats pour les deux suies : représentation normalisée de la résistance*

Afin de comparer l'ensemble des résultats, l'évolution du rapport de la résistance du gâteau « humide » pour une humidité donnée sur la résistance du gâteau « sec » en fonction de l'humidité relative respectivement pour les suies 18 et 26 est reporté en Figure 66 .

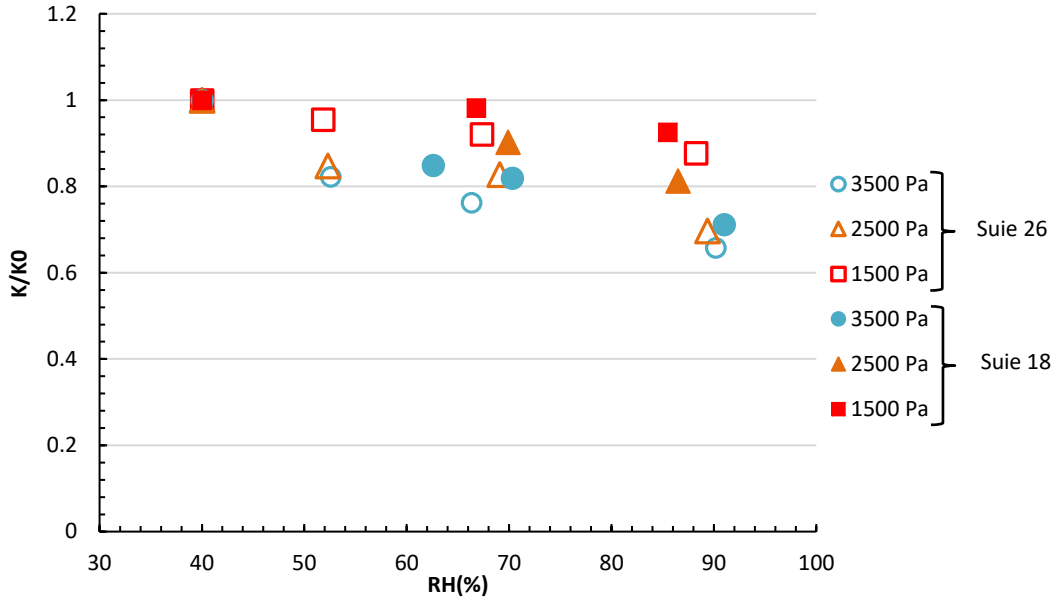


Figure 66: Évolution de la résistance normalisée pour les suies 18 (symboles remplis) et 26 (sans remplissage) en fonction de l'humidité relative.

La représentation normalisée des résistances en fonction de l'humidité relative semble indiquée que la diminution des résistances est très légèrement plus marquée pour les suies 26 que les suies 18. Il faut garder à l'esprit que les résistances initiales, les masses déposées, les structures des gâteaux ne sont pas les mêmes. En considérant ces points et les incertitudes de mesures, cette légère différence n'est pas suffisante pour conclure quant à une réelle différence de comportement entre les deux suies.

- *Comparaison des résistances normalisées pour la suie 26 aux deux débits de filtration*

La Figure 67 présente les résultats des évolutions des résistances normalisées pour le dépôt 3500 des suies 26 à deux débits de filtration. Comme il n'a pas été possible d'avoir l'ensemble des résultats au débit de filtration de 12 $L.min^{-1}$, seules les résistances pour le dépôt 3500 sont représentées.

Pour une humidité relative de 90%, les valeurs des résistances normalisées se superposent pour les deux débits. Pour des taux d'humidité relatives aux environs de 50 et 65 %, le rapport des résistances est légèrement plus faible pour les essais à un débit de 12 $L.min^{-1}$. Cette différence n'est pas suffisamment marquée pour conclure que la vitesse aurait une influence.

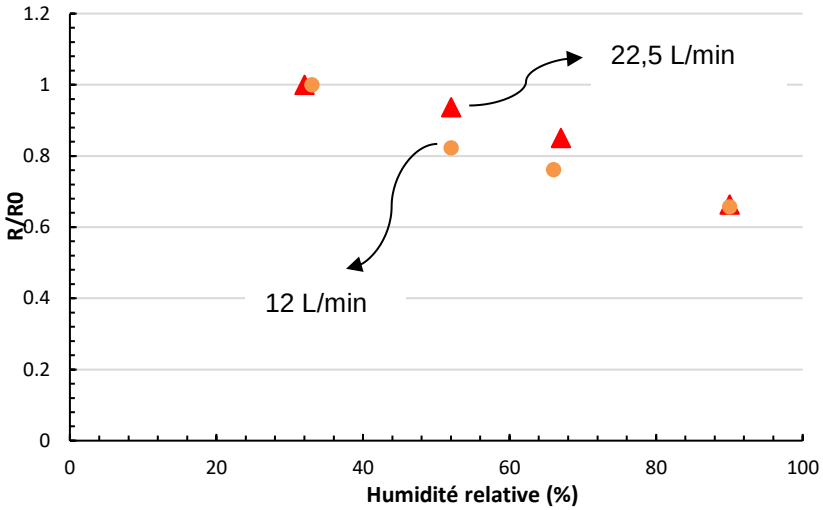


Figure 67 : Évolution de la résistance du gâteau sur la résistance de gâteau sec en fonction de l'humidité relative pour deux débits de filtration. Le symbole rouge correspond à un débit de 22,5 L/min et orange à un débit de 12 L/min. (Suie 26)

3.3.3 Synthèse et bilan des résultats

L'ensemble de ces résultats expérimentaux montrent qu'il existe une influence de l'humidité relative de l'air sur un dépôt de particules nanostructurées non hygroscopiques et peu hydrophiles. Une bonne reproductibilité entre les colmatages à différentes pertes de charge est constatée, ce qui permet de faire l'hypothèse que quel que soit le niveau de colmatage, les gâteaux sont structurés de manière identique pour une suie donnée.

Pour les deux suies, les mêmes types d'évolutions ont été observées.

1. *Dépôts 3500*

Les dépôts 3500 sont les dépôts avec l'épaisseur la plus importante et la plus grande masse de particules déposée. L'influence de l'humidité relative sur ces dépôts est la plus marquée pour ces essais. Lorsque l'air humide traverse le dépôt, la perte de charge chute brutalement puis une diminution plus faible et plus lente est constatée. Plus le taux d'humidité relative est élevé plus la diminution de perte de charge est importante.

2. *Dépôts 2500*

Dans l'ensemble le même constat est fait pour les dépôts 2500 que pour les dépôts 3500. La différence est que la diminution de la perte de charge lors du passage de l'air humide est moins notable que pour les dépôts 3500. De plus, pour des humidités relative proches de 55%, l'influence semble peu significative.

3. Dépôts 1500

L'influence de l'humidité relative pour les dépôts 1500 semble faible. Une diminution légèrement plus marquée semble toutefois apparaitre pour des humidités relatives de 90%.

Ces résultats mettent en avant la sensibilité de deux paramètres : la perte de charge de colmatage et le taux d'humidité relative. Cependant, les faibles écarts de résistances normalisées entre les deux suies ne permettent pas de savoir si l'une des deux suies est plus ou moins sensible que l'autre à l'humidité relative.

Il est important de préciser qu'un certain nombre de paramètres opératoires et physiques varient et interviennent dans ces expériences :

- La perte de charge « finale » de colmatage impliquant :
  - La force de pression exercée sur le gâteau
  - L'épaisseur
  - La porosité du milieu
  - La granulométrie des particules déposées

- Les propriétés physico-chimiques de l'aérosol généré :
  - La granulométrie de l'aérosol, le diamètre primaire des agrégats et la porosité des agrégats
  - Son affinité avec la vapeur d'eau : hygroscopie (adsorption ou absorption d'eau) et hydrophilie (soluble dans l'eau)
  - Le taux de carbone organique des agglomérats : plus ce taux est élevé plus il est possible d'avoir des liaisons chimiques favorisant une interaction avec la vapeur d'eau.

- La vitesse de filtration
- La température
- L'humidité relative lors du colmatage et après le colmatage

Les paramètres étant pour certains liés, leur influence sur le comportement des gâteaux ne sera pas aisée à distinguer.

De manière générale, l'ensemble des données et des résultats semble indiquer que les paramètres les plus sensibles pour les suies étudiées dans ces travaux sont la perte de charge, la résistance à l'écoulement (liée à la perte de charge) et le taux d'humidité relative. A

noter, que les propriétés physico-chimiques des suies de cette étude sont proches, il est donc prématuré de conclure sur leur sensibilité.

3.4 Interprétation des résultats obtenus

Les observations des résultats obtenus montrent que la chute de perte de charge lors du passage d'un air humide se fait en deux temps ainsi deux mécanismes peuvent être à l'origine de la chute de perte de charge. Le premier mécanisme serait responsable de la chute brutale de perte de charge et le second serait responsable de la chute plus lente de perte de charge.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer cette chute de perte de charge:

1. Réentrainement des particules
2. Restructuration du gâteau
    - Le réarrangement du gâteau peut être homogène
    - Le réarrangement du gâteau peut se faire localement

Ces hypothèses vont être étudiées, discutées et comparées avec les résultats de la littérature.

Les données de la littérature concernant l'effet de l'humidité relative de l'air en filtration d'aérosols ne sont pas nombreuses. Cette présente étude utilise des protocoles opératoires similaires à ceux de Montgomery et al. (2015) et Joubert (2009) afin de comprendre l'influence de l'humidité relative sur un dépôt de particules. Cependant, ces deux précédentes études ont été réalisées avec des gâteaux de particules de chlorure de sodium, soit des particules submicroniques hydrophiles, hygroscopiques et déliquescentes et des particules d'alumine hydrophobes et non hygroscopiques. Les résultats de Montgomery et al. (2015) montrent que pour des humidités relatives de perméation inférieures ou égales à l'humidité relative de colmatage, la perte de charge n'est pas perturbée, elle reste constante. Pour des humidités relatives supérieures à l'humidité relative lors du colmatage (mais inférieure à l'humidité relative de déliquescence du sel soit 75 %), une chute brutale de perte de charge est observée. Ces résultats sont similaires aux résultats obtenus dans cette étude avec des particules de suies. Ainsi, les résultats de l'étude mettent en avant que cette perturbation de la perte de charge n'est pas forcément liée au caractère hygroscopique ou hydrophile des particules mais peut être à la taille des particules.

3.4.1 Réentrainement des particules

Afin de déterminer s'il y a pu avoir un réentrainement des particules, l'expérience a été faite avec deux filtres D-309 placés en série. En effet, s'il y a réentrainement des particules la perte

de charge du filtre en aval devrait augmenter due aux potentielles particules ré-entrainées. Les évolutions des pertes de charge de ces deux filtres sont représentées sur la Figure 68.

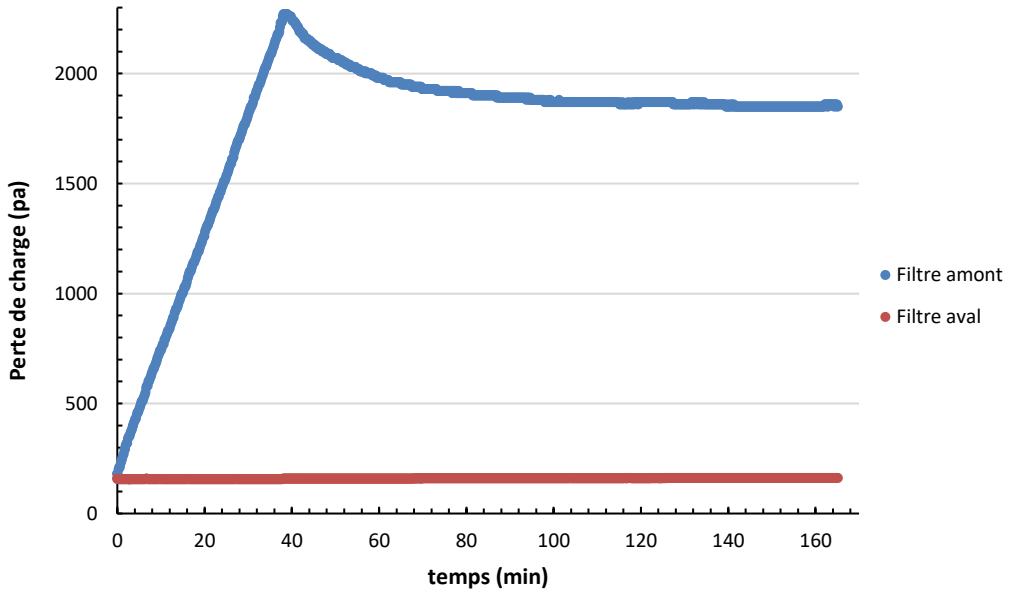


Figure 68 : Évolution de la perte de charge de deux filtres en série.

La Figure 68 montre clairement que la perte de charge du filtre en aval reste constante pendant le colmatage et pendant le passage de l'air à une humidité relative de 90%. Cela montre d'une part, que le filtre amont a une efficacité proche de 100% pendant toute la durée du colmatage. D'autre part, qu'il n'y a pas (ou bien une quantité très faible) de particules ré-entrainées lors du passage de l'air humide. De plus, le filtre aval a été pesé avant et après l'expérience, sa masse demeure constante (dans la limite de l'incertitude de la balance (2 mg)), ce qui confirme le résultat.

Montgomery et al. (2015) ont montré une légère modification de l'efficacité lors du passage de l'air humide avec des filtres HVAC (Heating, Ventilating, Air Conditioning). Cependant, les filtres étudiés sont des filtres moyenne efficacité ce qui peut expliquer la différence de résultat. Pour des filtres à très haute efficacité, Montgomery et al. (2015) n'ont pas noté une modification d'efficacité lors du passage de l'air humide.

3.4.2 Restructuration du gâteau de particules

L'hypothèse la plus probable est une restructuration du gâteau de particules ou d'une partie du gâteau. Cette restructuration peut être homogène ou bien non uniforme. Ces deux hypothèses vont être étudiées.

3.4.2.1 Restructuration homogène du gâteau

La restructuration est homogène : une modification de l'épaisseur et de la porosité de l'ensemble du milieu apparait. Soit le milieu se compacte, l'épaisseur et la porosité diminuent. Soit le milieu « s'aère », l'épaisseur augmente ainsi que la porosité. Dans les deux cas, les effets de l'épaisseur et de la porosité sont contraires sur l'évolution de la perte de charge, mais l'un peut être prédominant sur l'autre. En effet, une augmentation de l'épaisseur augmente la perte de charge alors qu'une augmentation de la porosité la diminue (loi de Kozeny).

Si la restructuration est homogène, il est envisageable d'observer des modifications du dépôt par microscopie.

Des clichés au Microscope Electronique à Balayage à effet de champ ont été réalisé pour deux échantillons de dépôts sur filtre afin de visualiser une éventuelle modification de structure du dépôt :

- Un dépôt 3500 n'ayant subi aucune perméation d'air sec ou humide (échantillon témoin)
- Un dépôt 3500 avec passage d'un air à 90 % d'humidité relative

Les résultats sont présentés Figure 69.

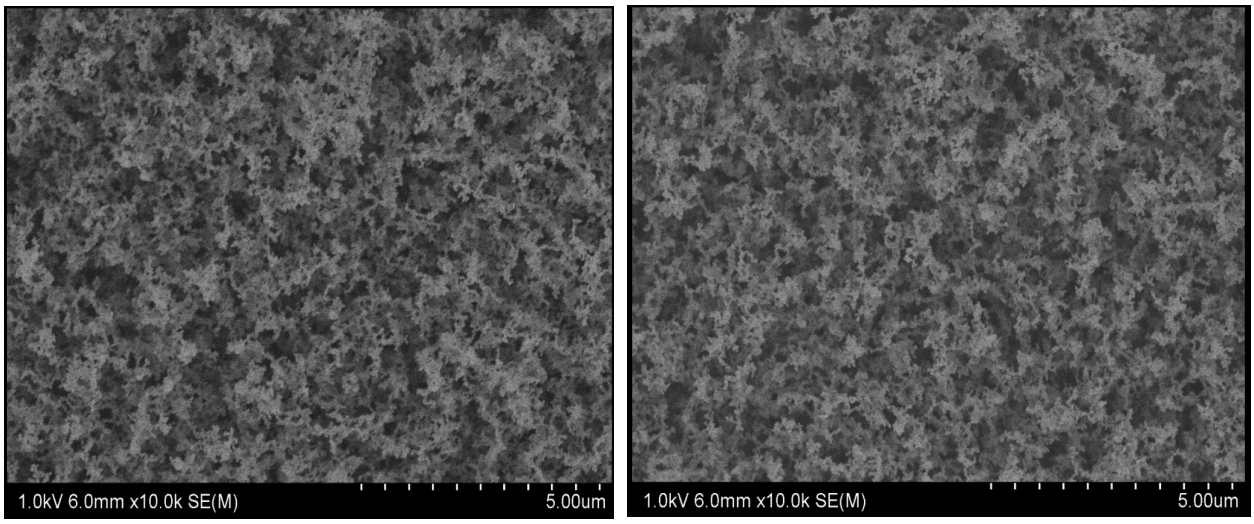


Figure 69 : Clichés des dépôts de suies au Microscope Electronique à Balayage. A gauche, le dépôt 3500 ayant été traversé par un air à une humidité relative de 90% et à droite, un dépôt 3500 sans aucun passage d'air.

Ces observations peuvent éventuellement montrer des différences si la restructuration du dépôt est homogène sur l'ensemble de la surface du filtre pas si elle reste localisée à quelques endroits. Les clichés ne montrent pas de différence significative. Ce résultat tend à dire que la modification n'est pas homogène.

3.4.2.2 Restructuration non uniforme du gâteau : modifications locales de la résistance

La restructuration n'est pas uniforme sur l'ensemble du gâteau : des modifications locales de résistance apparaissent. Ces modifications locales pourraient conduire à la création de micro fractures au sein du dépôt ou pour le moins favoriser des passages préférentiels. Cette hypothèse semble réaliste car une restructuration locale du dépôt est probablement rapide et irréversible.

3.4.2.2.1 Méthode et hypothèses pour la détermination des surfaces de fuite

L'hypothèse de création de passages préférentiels au sein du dépôt lors du passage de l'air humide a été mise en avant. Afin de quantifier la surface du gâteau impactée par ces passages préférentiels, une étude théorique a été entreprise.

En parallèle, des calculs de chute de perte de charge pour les trois résistances de gâteaux secs (dépôts 1500, 2500 et 3500) seront réalisée pour un pourcentage de surface de fuite par rapport à la surface totale égale pour chacun de ces trois dépôts. Ces estimations vont permettre de savoir comment la surface de fuite impacte les différentes résistances de gâteau : est-ce qu'un gâteau de résistance élevée est plus facilement perturbée qu'un gâteau de résistance plus faible ?

Un modèle de perte de charge incluant des fuites au sein du gâteau de particules peut être développé en différenciant le débit d'air Q_f passant par la fuite du débit d'air Q_g passant par le gâteau non perturbé (Mouret 2008) (les indices f et g sont pour fuite et gâteau respectivement).

Le modèle repose sur les hypothèses suivantes:

- Le gâteau non perturbé et les fuites sont considérés comme un système parallèle.
- La résistance des fuites est assimilée à la résistance du filtre vierge.
- La résistance du gâteau est assimilée à la résistance de « gâteau sec » mesurée expérimentalement.

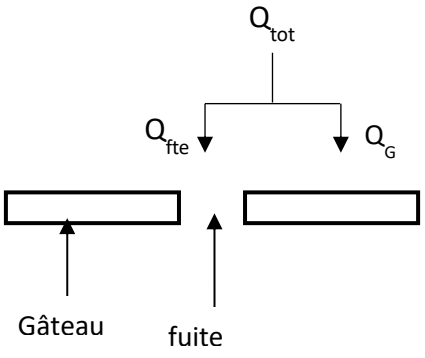


Figure 70 : Schéma

On a :

$$Q_{tot} = Q_{fte} + Q_G \quad (39)$$

$$S = S_{fte} + S_G \quad (40)$$

Avec, S_{tot} la surface de filtration (m^2), S_{fte} la surface de fuite (m^2) et S_G la surface de gâteau (m^2).

D'après la loi de Darcy,

$$\Delta P = K\mu\frac{Q}{S} \quad (41)$$

Où ΔP est la perte de charge (Pa), K est la résistance à l'écoulement (m^{-1}), μ la viscosité dynamique du fluide (Pa.s), Q le débit du fluide (m^3/s), S la surface de filtration (m^2).

L'ensemble {gâteau + fuites} étant considéré comme un système parallèle, on a alors :

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_{fte} = \Delta P_G \quad (42)$$

Soit,

$$K_G\mu\frac{Q_G}{S_G} = K_f\mu\frac{Q_{fte}}{S_{fte}} \quad (43)$$

Il est alors possible d'exprimer le débit traversant le gâteau par l'expression :

$$Q_G = Q_{fte}\frac{K_p}{K_G}\frac{S_G}{S_{fte}} \quad (44)$$

Soit,

$$Q_G = (Q_{tot} - Q_G)\frac{K_f}{K_G}\frac{S_G}{S_{fte}} \quad (45)$$

Finalement,

$$Q_G = \frac{\frac{K_f}{K_G}\frac{S_G}{S_f}Q_{tot}}{1 + \frac{K_f}{K_G}\frac{S_G}{S_{fte}}} \quad (46)$$

La surface totale de filtre S_{tot}, la résistance du filtre vierge, ainsi que le débit de filtration Q_{tot} sont mesurés expérimentalement et leurs valeurs figurent en Tableau 8.

Q_{tot} (L/min)	22,5
Q_{tot} (m^3/s)	$3{,}75.10^{-4}$
K_filtre_vierge (m^{-1})	$3{,}24.10^{+8}$
viscosité (Pa.s)	$1{,}85.10^{-5}$
S_{tot} (m^2)	$1{,}13.10^{-2}$

Tableau 8 : Données expérimentales : débit de filtration, résistance du filtre vierge, viscosité dynamique et surface de filtre

	Suie 18		Suie 26	
	RH (%)	**$R_{gâteau,initiale}$**	**RH (%)**	**$R_{gâteau,initiale}$**
	91	$5{,}34.10^9$	90	$4{,}70.10^9$
Dp = 3500	68	$5{,}43.10^9$	66	$4{,}50.10^9$
	62	$5{,}24.10^9$	53	$4{,}68.10^9$
	85	$3{,}90.10^9$	90	$3{,}30.10^9$
Dp = 2500	66	$3{,}79.10^9$	68	$3{,}30.10^9$
	55	$3{,}34.10^9$	53	$3{,}34.10^9$
	85	$2{,}29.10^9$	87	$1{,}96.10^9$
Dp = 1500	66	$2{,}21.10^9$	67	$2{,}03.10^9$
	50	$2{,}00.10^9$	53	$2{,}00.10^9$

Tableau 9 : Résistance aéraulique des gâteaux secs formés pour chaque essai

L'expression de la perte de charge dépend alors de la surface de fuite et devient :

$$\Delta P = \frac{K_G \mu}{S_G} * \frac{\frac{K_f}{K_G}\frac{S_G}{S_{fte}} Q_{tot}}{1 + \frac{K_f}{K_G}\frac{S_G}{S_{fte}}} \quad (47)$$

En utilisant la perte de charge obtenue en fin d'essai, il est possible de déterminer le rapport $\frac{S_G}{S_{fte}}$ et ainsi la surface de fuite.

3.4.2.2.2 Résultats : calculs des surfaces de fuites avec les pertes de charges finales obtenues

Les rapports de surface de fuites calculés (exprimés comparativement à la surface totale de dépôt) sont donnés dans les Tableau 10 et Tableau 11.

Perte de charge de colmatage (Pa)	3400	3434	3413	2462	2445	2567	1481	1528	1515
Humidité relative de la perméation (%)	90	66	53	90	68	53	87	67	53
Perte de charge finale (Pa)	2255	2695	2806	1849	2103	2336	1298	1472	1487
Pourcentage de surface de fuite (%)	*2,90*	*1,49*	*0,95*	*2,65*	*0,98*	*0,44*	*1,46*	*0,00*	*0,00*

Tableau 10 : Pourcentage de perforation par rapport à la surface totale calculée à partir des données expérimentales pour la suie 26.

Perte de charge de colmatage (Pa)	3485	3487	3516	2489	2467	2469	1475	1503	1515
Humidité relative de la perméation (%)	90	68	62	85	66	55	85	66	51
Perte de charge finale (Pa)	2225	2402	2797	1626	1955	2018	1227	1376	1487
Pourcentage de surface de fuite (%)	*2,19*	*1,16*	*0,19*	*2,66*	*0,38*	*0,026*	*0,008*	*0,00*	*0,00*

Tableau 11 : Pourcentage de perforation par rapport à la surface totale calculée à partir des données expérimentales pour la suie 18.

Les pourcentages de surface de fuite sont compris entre 0 et 2,9 % de la surface totale de filtration. Ces résultats mettent en évidence que la surface des zones perturbées sera d'autant plus importante que la perte de charge de colmatage ou que l'humidité relative de l'air de perméation sera élevée. De plus, pour les dépôts 1500 avec des perméations humides à des taux d'humidité relative de 70 et 50%, la surface de fuite est nulle, ce qui semble logique étant donné que les évolutions de perte de charge montraient qu'il n'y avait que peu d'influence de l'humidité relative pour ces essais.

3.4.2.2.3 Influence de la surface de fuite sur la chute de perte de charge

Afin de mettre en avant l'influence de la résistance du dépôt sur la chute de perte de charge, des calculs de perte de charge avec un pourcentage de surface de fuite par rapport à la surface totale fixée arbitrairement (pour la démonstration) à 3% ont été faits pour chacun des dépôts pour les deux suies. En utilisant l'équation 47, les données expérimentales et en ajustant la

surface de fuite à 3%, la perte de charge associée a été calculée. Les résultats obtenus sont en Tableau 12 et Tableau 13.

Perte de charge de colmatage (Pa)	3400	2462	1481
Perte de charge théorique (Pa)	2224	1795	1184
Chute de perte de charge (Pa)	1176	667	297
% de perte de charge « perdue »	35	27	20

Tableau 12 : Calculs de la valeur de la perte de charge perdue pour les trois dépôts (1500, 2500 et 3500) pour une surface de fuite de 3% pour chacun des dépôt (suie 18)

Perte de charge de colmatage (Pa)	3485	2489	1475
Perte de charge théorique (Pa)	2044	1586	1041
Chute de perte de charge (Pa)	1441	903	434
% de perte de charge « perdue »	41	36	29

Tableau 13 : Calculs de la valeur de la perte de charge perdue pour les trois dépôts (1500, 2500 et 3500) pour une surface de fuite de 3% pour chacun des dépôt (suie 26)

Pour les deux suies, à surface de fuite égale, ce sont les dépôts ayant la plus grande résistance (dépôts 3500) qui ont la chute de perte de charge la plus importante. Plus la résistance du dépôt est faible, moins la chute est importante pour une même surface de fuite. Ces résultats mettent en avant la sensibilité de la chute de perte de charge à la résistance de gâteau sec. En effet, un gâteau de résistance élevée sera plus facilement perturbé qu'un gâteau de résistance plus faible. Inversement, une réorganisation du gâteau impactera moins un gâteau de résistance plus faible.

3.4.2.3 Mécanismes à l'origine de la restructuration du dépôt

Les mécanismes à l'origine de cette modification de structure restent incertains. La première chute de la perte de charge se produit en un temps caractéristique d'une dizaine de seconde, ce qui signifie que la réorganisation du gâteau se fait également dans un temps caractéristique d'une dizaine de seconde, ce qui est extrêmement rapide et laisse penser que d'autres mécanismes que l'adsorption serait impliquées dans cette réorganisation. Des phénomènes d'adsorption peuvent avoir lieux les premiers instants. Mais il faut envisager que d'autres mécanismes que l'adsorption soient la cause de la réorganisation du gâteau en considérant cette cinétique très rapide de chute de perte charge (quelques secondes). En effet, l'adsorption est un phénomène ayant une cinétique lente. Les résultats de Lintis (2018) ont montré qu'il fallait plusieurs heures aux particules de suies pour être en équilibre avec la vapeur d'eau (jusque 10h pour des humidités relatives supérieures à 85%). Il faut néanmoins garder à l'esprit que les isothermes de sorption sont réalisés sans écoulement alors que dans le cas de la filtration, les particules ne sont pas simplement sous vapeur d'eau mais traversées par la vapeur d'eau. Une isotherme de sorption d'eau sur la suie 18 est présentée Figure 71. Il s'agit

d’une isotherme de type V, donc l’affinité de l’adsorbant avec l’adsorbat est faible, de plus les quantité sorbées sont faibles, ce qui permet de conclure que la suie 18 peut être qualifiée d’hydrophobe. Il est intéressant de noter un phénomène d’hystérèse entre la courbe d’adsorption et de désorption. Cette hystérèse met en avant des phénomènes de condensation capillaire.

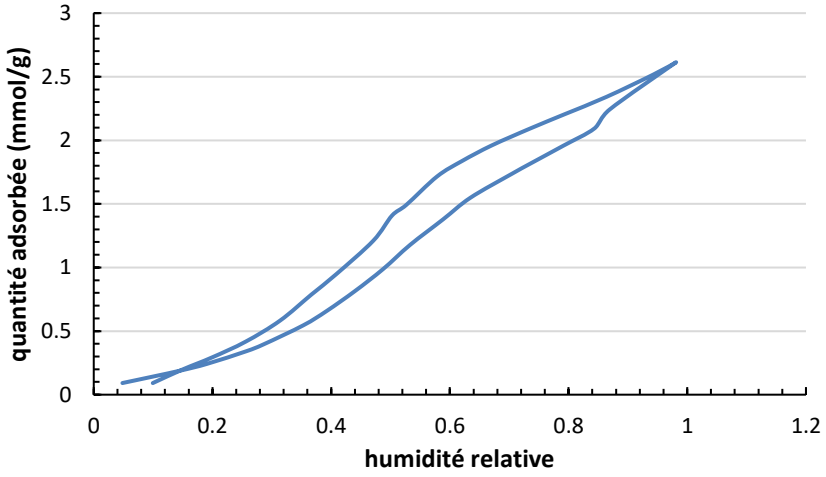


Figure 71: isotherme de sorption de vapeur d'eau sur les particules de suie 18 (T = 25°C)

Un autre phénomène possible serait que lorsque de l’air à une humidité relative supérieure à celle du colmatage est injectée, une condensation physique de la vapeur d’eau sur le gâteau de particules ait lieu. Les résultats ont mis en évidence que la chute de perte de charge est d’autant plus grande que la perte de charge de colmatage est grande. Une perte de charge plus importante implique une augmentation de la pression totale en amont du gâteau de particules. Une augmentation de la pression totale augmenterait alors la pression partielle de vapeur en amont du gâteau. Alors, si la pression de vapeur devient supérieure à la pression de vapeur saturante une condensation en amont du gâteau est possible. Ainsi, plus la perte de charge est importante, plus l’environnement hygrométrique en amont du gâteau est perturbé et favorise une condensation. Ou alors, une condensation dû à une différence de température entre l’écoulement et le gâteau (point froid). Une condensation physique locale et rapide serait cohérente avec les cinétiques rapides observées. Si c’est le cas, cette condensation serait difficilement mesurable car les capteurs d’humidité relative ne permettent pas d’avoir une mesure fiable dans un scénario de condensation comme expliqué dans le chapitre 2. Cela est également cohérent avec les différents dynamiques de perte de charge observées en fonction du taux d’humidité relative. Plus le taux d’humidité relative est important, plus l’air arrivant au gâteau est chargé en eau et entrainera une condensation plus conséquente et donc une réorganisation plus prononcée.

La condensation peut créer des ponts capillaires entre les particules. La structure du gâteau peut être déséquilibré amenant les particules à se réorganiser pour trouver une nouvelle stabilité. En effet, la condensation peut engendrer des forces supplémentaires entre certaines particules déstabilisant l'équilibre du milieu. Ainsi, certaines particules peuvent se rapprocher et d'autres s'éloigner générant une fracture ou une zone de moindre résistance dans le dépôt. Des hypothèses peuvent être avancées pour expliquer la différence de dynamique entre les dépôts étudiés. D'une part, il a été vu avec le modèle de fuite qu'un gâteau de résistance élevée va être plus sensible à des modifications locales de la résistance. Mais les résultats ont également montré, que les surfaces de fuite seraient plus faibles pour les gâteaux de résistance moins importante. Un autre paramètre à prendre en compte est la pression exercée sur le gâteau. Plus la perte de charge est importante, plus la pression exercée sur le gâteau est importante. Par conséquent, pour des plus faibles pressions (et donc plus faible résistance de gâteau), les forces inter-particulaires sont moins impactées par la pression ou moins déstabilisées. Quand, la perte de charge devient plus importante, il devient plus difficile aux particules de résister à la pression, les forces inter-particulaires peuvent être plus facilement affaiblies, ainsi des modifications locales plus importantes ont lieues, ce qui explique des surfaces de fuite plus importantes.

Ces hypothèses peuvent-elles expliquées pourquoi les particules de chlorure de sodium (Montgomery, Green, et Rogak 2015; Joubert et al. 2010) ou les suies étudiées ici seraient plus sensibles à une réorganisation que des particules d'alumine ?

La loi de Kelvin montre que plus les pores sont petits plus la condensation se fait facilement. Peut-être que la condensation dans les pores des gâteaux de particules d'alumine se fait plus difficilement ou n'a pas lieu. Il faudrait connaître et comparer les tailles de pores de ces dépôts pour trancher. Autre point, la taille des particules d'alumine est plus grande que celle des particules de chlorure de sodium et de suies. L'augmentation de la taille de particule a une influence à la fois sur les phénomènes d'adsorption et sur la condensation capillaire. Ribeyre (2015) a montré que l'adsorption se fait plus facilement pour des plus petites particules. De surcroit, Hinds (1999) montre que les forces capillaires sont d'autant plus fortes que la taille de particule est importante. Ainsi, il serait plus facile de déstabiliser un dépôt de petites particules car les forces capillaires y sont moins fortes alors que pour des particules d'alumine, même si la condensation a lieu, les forces capillaires plus importantes résistent. Finalement, ces résultats viennent mettre en avant que c'est la manière dont est structurée l'édifice qui permet la réorganisation plutôt que l'affinité des particules avec la vapeur d'eau.

3.5 Conclusions et perspectives

Les résultats expérimentaux spécifiques à l'influence de l'humidité relative lors de la filtration de particules de suies et sur un gâteau de particules de suies ont été présentés dans ce chapitre. D'abord, l'influence de l'humidité relative sur les performances du filtre test vierge a été examinée. Les résultats, en accord avec la littérature, ont montré que l'humidité relative ne modifiait pas les performances du filtre en fibres de verre. Puis, l'influence de l'humidité relative pendant la filtration de particules de suies a été étudiée. Les résultats montrent que l'humidité relative n'a pas d'influence sur le colmatage des particules de suies considérées, ainsi la structure du gâteau formé à humidité relative élevée est la même que la structure d'un gâteau formé en air sec.

Enfin, l'influence de l'humidité relative sur plusieurs gâteaux de particules (dépôts 1500, 2500 et 3500) a été recherchée. Cette étude a permis de montrer qu'il existe une influence de l'humidité relative sur des dépôts de particules de suies. Plusieurs paramètres sensibles ont pu être mis en avant : résistance aéraulique, perte de charge, taux d'humidité relative, taille de particules, taille de pores. Il a été vu que la dynamique de réponse de chute de perte de charge du gâteau de particules à un débit d'air humide dépend de la perte de charge atteinte lors du colmatage et du taux d'humidité relative appliquée au gâteau.

Il a été montré que la chute de perte de charge se fait en deux temps : une chute importante et rapide, puis une chute plus faible et beaucoup plus lente. Concernant la première chute, l'hypothèse privilégiée serait une réorganisation du gâteau avec la formation de passages préférentiels dans le dépôt due à une condensation physique lors du passage de l'air humide. Concernant la deuxième chute, une réorganisation du dépôt est possible dû à des phénomènes de sorption ou de condensation. Il a été montré que cette réorganisation du dépôt de particules est irréversible et ne diminue pas l'efficacité du média filtrant THE. Pour d'autres média filtrants, comme (Montgomery, Green, et Rogak 2015) l'a montré, ce constat n'est plus vrai. Cependant, cette dernière information est intéressante, si un air humide permet de diminuer la perte de charge significativement (plus de 30% pour un air à une humidité relative de 90%) et ne pas diminuer l'efficacité (pour des filtres THE), une optimisation des performances des filtres peut-être envisager grâce au passage d'un air humide. Comme le montre la Figure 72, il est possible de colmater après le passage d'air humide, et ce second colmatage se fait plus lentement que le premier.

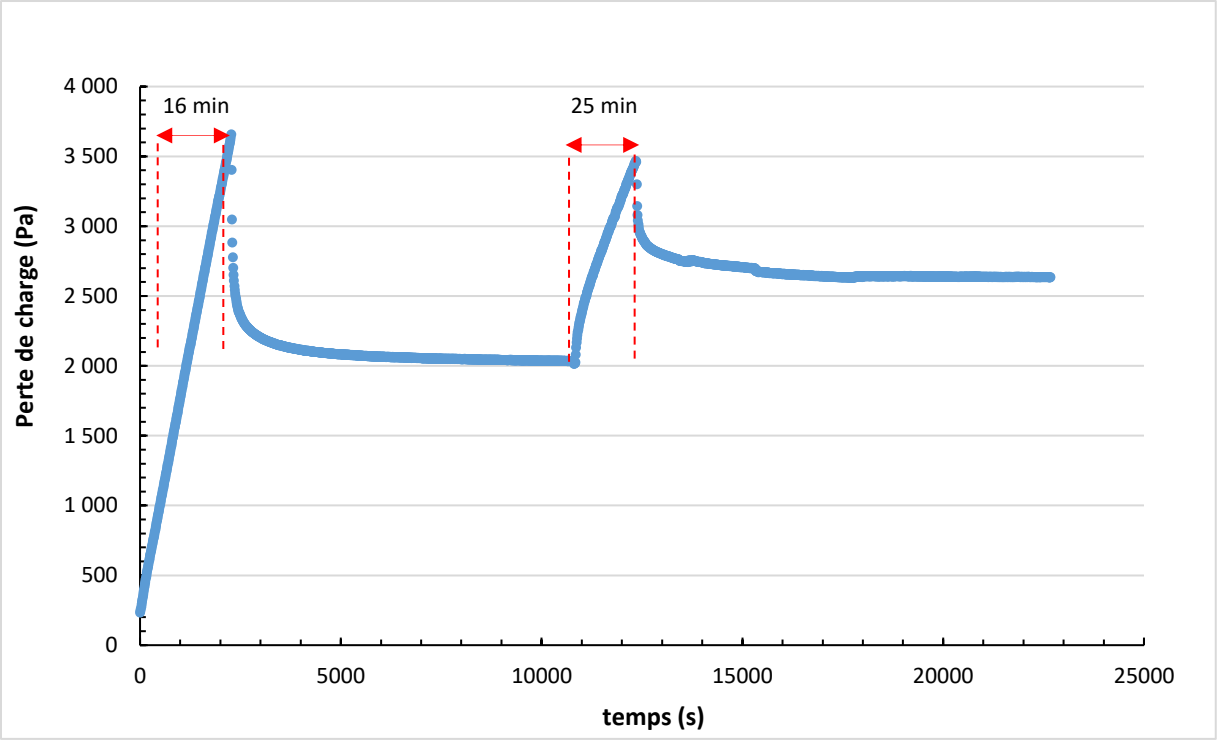


Figure 72 : Évolution de la perte de charge d'un filtre D-309 en fonction du temps

De plus, les résultats issus de la littérature apportent d'autres informations et pistes de recherche. En effet, Montgomery et al. (2015) ont remarqué le même type de réponse pour des dépôts de particules de chlorure de sodium, alors qu'il ne semble pas d'avoir d'influence pour des dépôt d'alumine. Les particules de chlorure de sodium et de suies ont une taille plus petite que les particules d'alumine.

Jusqu'à présent, la littérature portant sur la filtration THE mettait en avant une influence de l'humidité relative pour des particules hygroscopiques. Ces résultats montrent que même des particules de suies peuvent être impactées par un passage d'air humide. Ces résultats mettent également en avant des questions quant à la réorganisation des gâteaux de particules : est-ce dû à une sensibilité des forces capillaires ? de la taille des pores ?

Il faudrait pour mieux comprendre ces résultats pouvoir suivre l'évolution de l'épaisseur et de la porosité de dépôt lors du passage de l'air humide. Une mesure des quantités d'eau « liée » et « libre » permettrait également de donner une indication quant à la nature des interactions entre la vapeur d'eau et des particules constituants le gâteau. Enfin, il faudrait envisager une analyse de sensibilité de paramètres afin de déterminer avec certitude quels sont les paramètres les plus sensibles afin de mieux comprendre les mécanismes de réorganisation des gâteaux de particules.

Chapitre 4 Modèles comportementaux

Ce chapitre présente un modèle d'expression numérique représentant la chute de perte de charge lors du passage de l'air humide sur le dépôt de particules observée expérimentalement. Des paramètres caractéristiques (constante de temps, différence de perte charge) seront mis en évidence La méthode permettant d'identifier les paramètres de la représentation retenue sera détaillée, puis la comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues des modèles proposés sera présentée. Une étude des paramètres caractéristiques en fonction de l'humidité relative sera proposée et permettra de conclure sur une perspective de modèle prédictif de la chute de perte de charge en fonction des conditions opératoires.

4.1 Modèle comportemental de l'évolution de la perte de charge lors du passage de l'air humide

Les observations expérimentales ont montré que la perte de charge chute rapidement lors du passage de l'air humide, avec une évolution à priori exponentielle comme le montre la Figure 73.

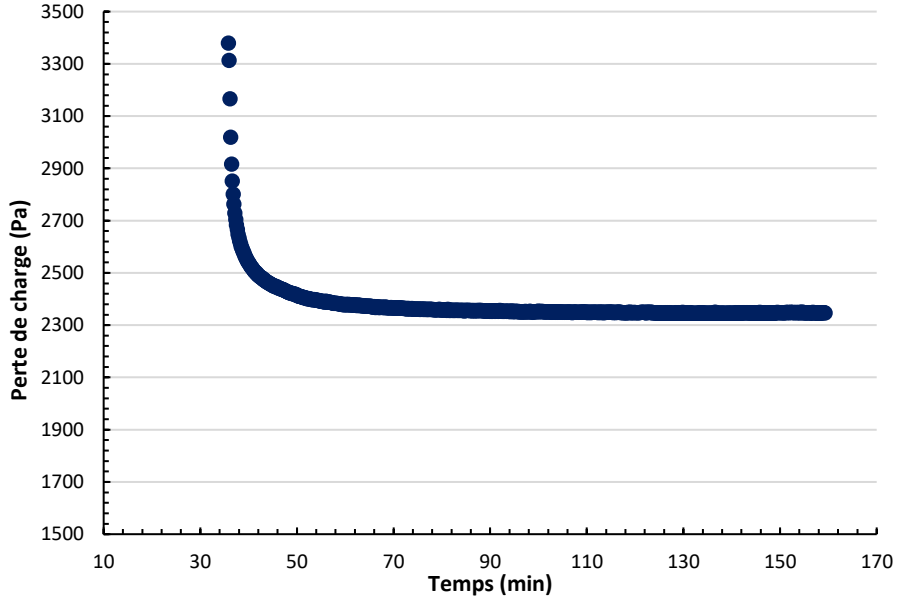


Figure 73 : Allure expérimentale de la chute de perte de charge lors du passage d'un air humide sur le dépôt

Au regard de cette évolution, dans un premier temps, une identification d'un modèle d'évolution du premier ordre de la perte de charge est recherchée.

La perte de charge relative va être exprimée à l'aide d'une équation différentielle du premier ordre selon la forme :

$$\dot{y} + ay = 0 \qquad 48$$

où y est calculé à partir de la perte de charge relative. On suppose que la valeur finale de la perte de charge correspond à $y = 0$ et la condition initiale $y(0) = \Delta P(0) - \Delta P(\infty)$. La valeur de a va être déterminée pour que la fonction $y(t)$ approche au mieux les observations expérimentales selon un critère quadratique :

$$Min\ J = \sum (y(t) - \hat{y}(t))^2 \quad (49)$$

L'intégration et la mise en forme de la relation (1) conduit à l'expression ci-dessous :

$$\Delta P = \Delta P_0 - \alpha * (1 - exp\left(-\frac{(t - t_0)}{\tau}\right) \quad (50)$$

Avec ΔP_0 la perte de charge de colmatage (Pa), α la différence perte de charge ΔP - ΔP_0 (Pa), τ la constante de temps (s) caractérisant le temps de relaxation, t_0 le temps initiale de la chute de perte de charge (s).

Cependant les allures observées et les analyses des premiers résultats d'identification montrent :

- Qu'une telle représentation permet de reproduire l'allure globale de la perte de charge mesurée et d'avoir une bonne estimation du temps de relaxation,
- L'existence de dynamiques secondaires que cette représentation ne permet pas de mettre en évidence.

En effet, les courbes suivantes montrent qu'une représentation linéaire du premier ordre permet de bien reproduire soit le régime transitoire et moins bien le temps de convergence vers le régime d'équilibre, soit l'inverse.

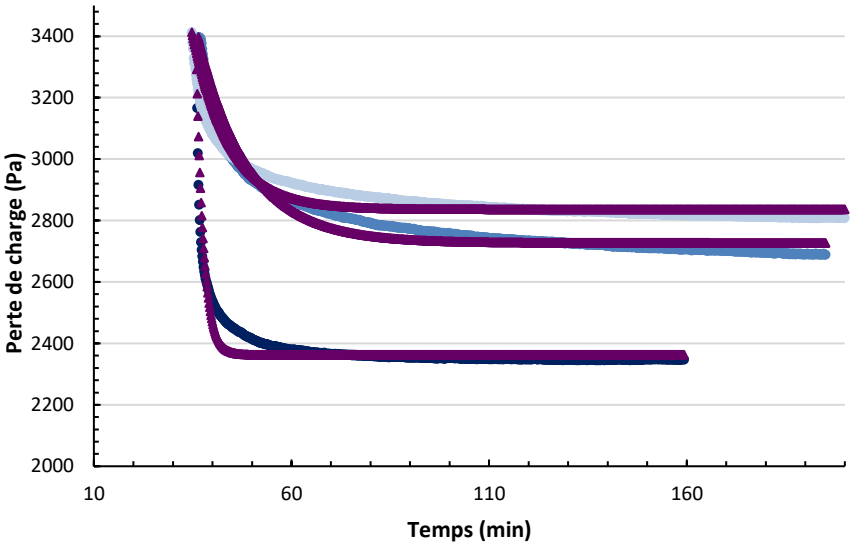


Figure 74 : Exemple de confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues avec un modèle d'ordre 1. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes violettes les valeurs numériques.

Les essais réalisés semblent ainsi montrer l'existence de dynamiques d'ordres supérieures. Cependant des études complémentaires effectuées en utilisant de modèles d'ordre plus élevé (2ème et 3ème ordre) n'ont pas conduit à l'amélioration de la représentation dynamique comparativement à celle d'un premier ordre. Une représentation du type suivant a été proposée :

$$\Delta P = \Delta P_0 - \alpha * (1 - \exp\left(-\frac{(t - t_0)^r}{\tau}\right) \quad 51$$

où le paramètre r est tel que $0 < r < 1$.

Finalement, une analyse paramétrique a montré qu'une valeur de r égale à 0,5 conduit à des résultats pertinents.

L'expression devient :

$$\Delta P = \Delta P_0 - \alpha * (1 - exp\left(-\frac{(t-t_0)^{0.5}}{\tau}\right) \quad 52$$

4.1.1 Résultats : réponse temporelle

Cette partie présente une comparaison des résultats expérimentaux avec les résultats numériques obtenus sur la chute de perte de charge lors du passage de l'air humide. Les paramètres caractéristiques obtenus grâce à l'expression numérique sont également présentés.

- *Résultats pour la suie 18 à 22,5 L/min*

La confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques pour l'ensemble des essais pour la suie 18 à un débit de 22,5 L/min est présentée en Figure 75 à Figure 77.

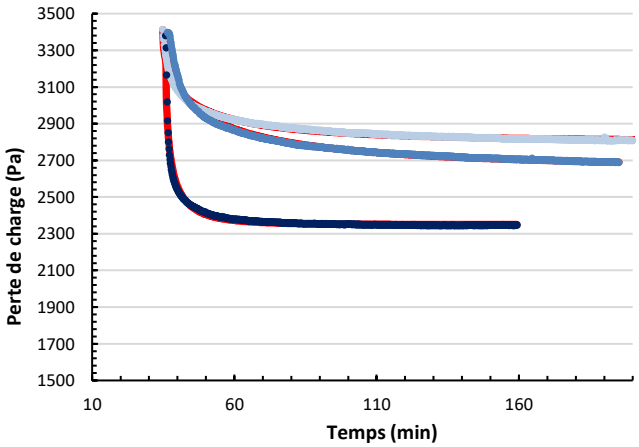


Figure 75 : Évolution de la chute de perte de charge pour le dépôt 3500 avec la suie 18 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs numériques.

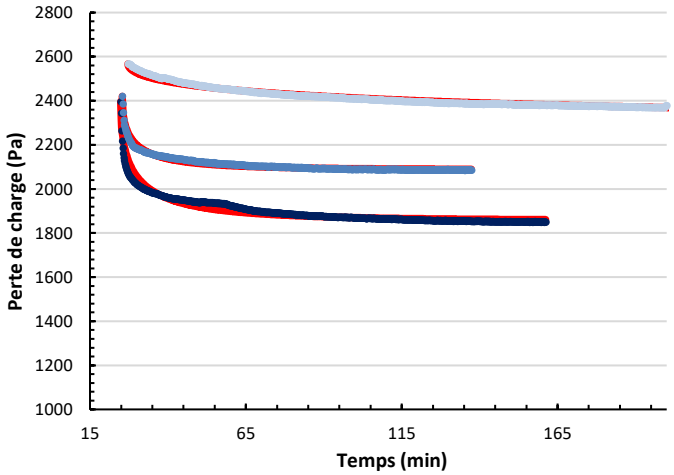


Figure 76 : Évolution de la chute de perte de charge pour le dépôt 2500 sur la suie 18 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs numériques.

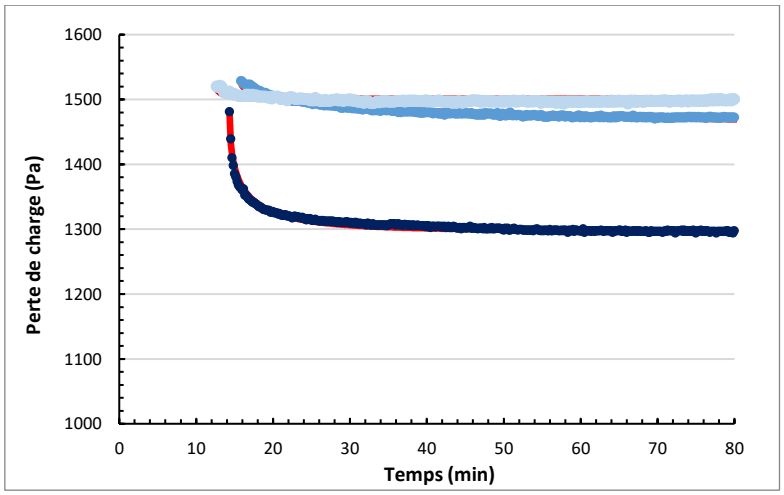


Figure 77 : Évolution de la chute de perte de charge pour le dépôt 1500 sur la suie 18 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes vertes les valeurs numériques.

Le temps de relaxation τ, le coefficient de proportionnalité α ainsi que la variance V pour chaque essai avec la suie 18 sont donnés dans le Tableau 14.

	Dépôt 3500			**Dépôt 2500**			**Dépôt 1500**		
RH (%)	90	68	62	85	66	55	85	66	50
τ (s)	*9,9*	*29,9*	*23,6*	*17,8*	*15,4*	*82*	*11,6*	*33,5*	*8*
α (Pa)	*1029*	*734*	*608*	*538*	*332*	*278*	*189*	*69*	*19*
V	157	232	33	260	40	24	7	6	4

Tableau 14 : Ensemble des données numériques obtenues pour chaque essais de la suie 18 : τ la constante de temps, α le coefficient de proportionnalité, V la variance entre les valeurs expérimentales et numériques.

- *Résultats pour la suie 26 à 22,5 L/min*

La confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues pour l'ensemble des essais pour la suie 26 à un débit de 22,5 L/min est présentée en Figure 78 à Figure 80.

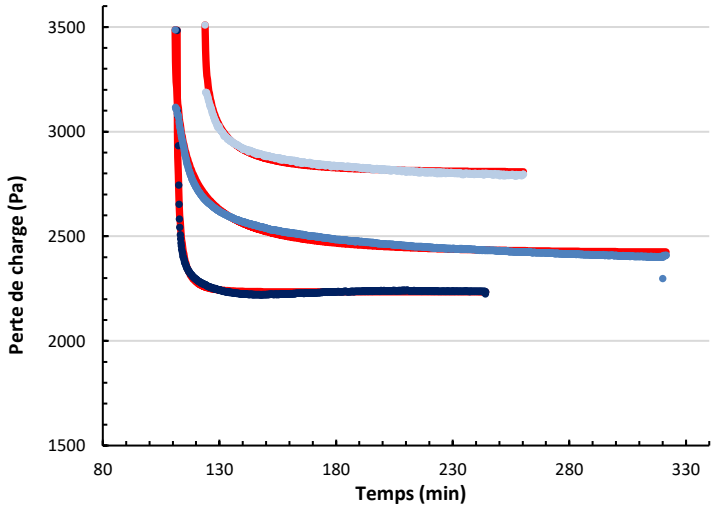


Figure 78 : Évolution de la chute de perte de charge pour le dépôt 3500 sur la suie 26 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs numériques

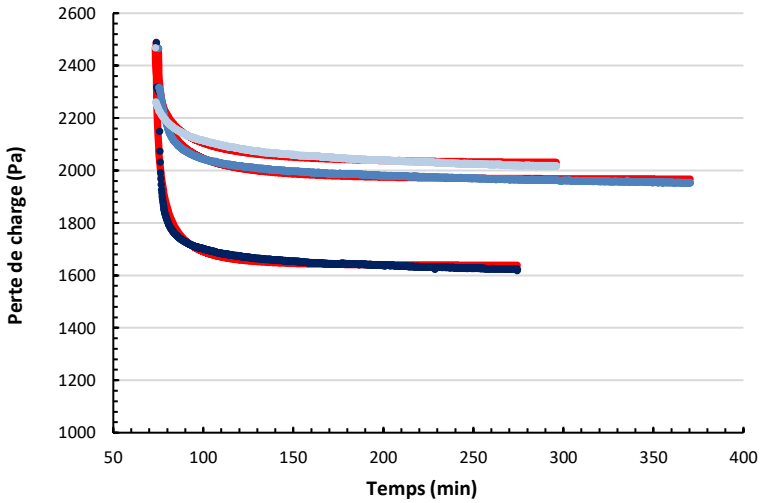


Figure 79 : Évolution de la chute de perte de charge pour le dépôt 2500 sur la suie 26 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs numériques

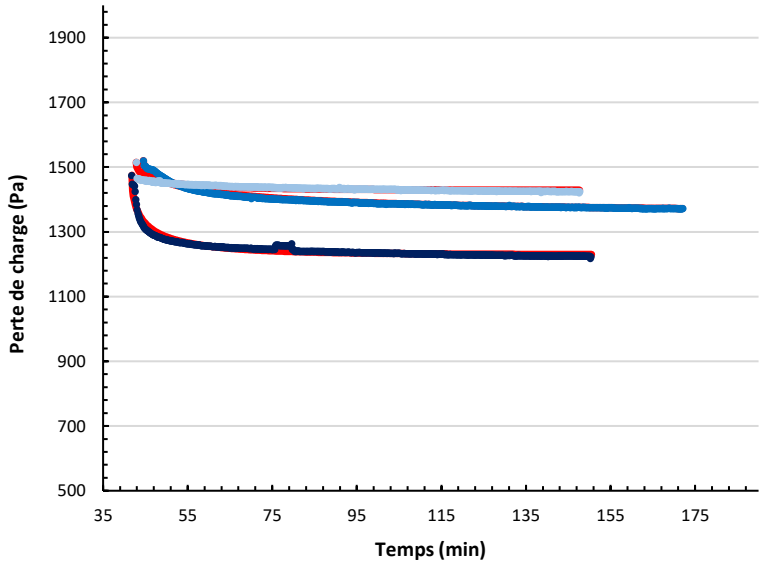


Figure 80 : Évolution de la chute de perte de charge pour le dépôt 1500 sur la suie 26 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes vertes les valeurs numériques

Le temps de relaxation τ, le coefficient de proportionnalité α ainsi que la variance V pour chaque essai avec la suie 26 figurent dans le Tableau 15.

	Dépôt 3500			**Dépôt 2500**			**Dépôt 1500**		
RH(%)	90	66	53	90	68	54	87	67	53
τ	*6,7*	*20,6*	*16,7*	*14,2*	*21*	*22,8*	*14,8*	*33,6*	*16,7*
α	*1251*	*900*	*705*	*850*	*500*	*440*	*245*	*159*	*87*
V	163	335	267	397	80	213	45	18	11

Tableau 15 : Ensemble des données numériques obtenues pour chaque essais de la suie 26 : τ la constante de temps, α le coefficient de proportionnalité, V la variance entre les valeurs expérimentales et numériques.

Les Figure 75 à Figure 80 montrent que l'expression numérique identifiée traduit avec fidélité la chute de perte de charge expérimentale pour l'ensemble des essais pour les deux suies et a permis de déterminer des paramètres caractéristiques tels que la constante de temps et le coefficient de proportionnalité entre la perte de charge de colmatage et la perte de charge finale.

Les résultats figurant dans les Tableau 14 et Tableau 15 montrent d'une part que le coefficient de proportionnalité diminue avec l'humidité relative appliquée, d'autre part que les constantes de temps sont de l'ordre de quelques secondes. A part pour un point (suie 18, dépôt 2500, HR = 55%), les constantes de temps sont comprises entre 5 et 30 secondes. Dans l'ensemble, une diminution de la constante de temps est observée pour les essais à une humidité relative

de 90%, ce qui est cohérent avec les observations expérimentales montrant une chute de perte de charge plus soudaine pour un taux d'humidité relative à 90% plutôt que pour des taux d'humidité relative compris entre 50% et 70%.

4.1.2 Évolutions des constantes de temps et des coefficients de proportionnalité

Les évolutions des constantes de temps en fonction de l'humidité relative et du coefficient de proportionnalité en fonction de l'humidité relative pour les deux suies sont représentées en Figure 81 à Figure 84.

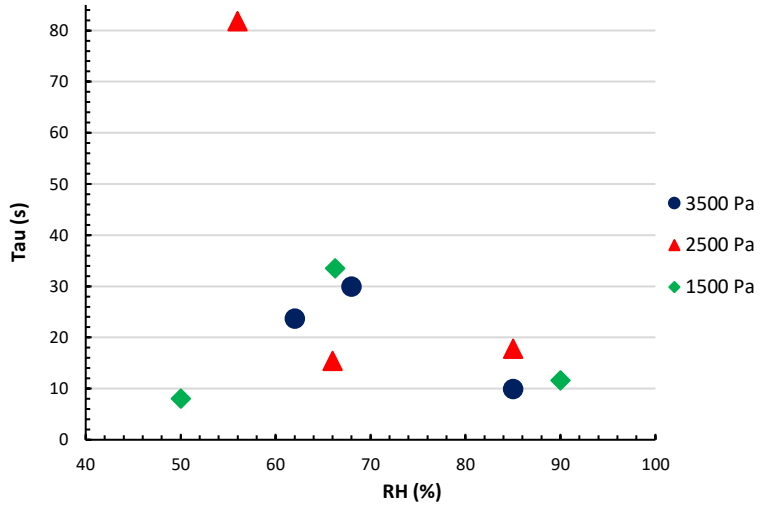


Figure 81 : Évolution des constantes de temps en fonction de l'humidité relative pour la suie 26.

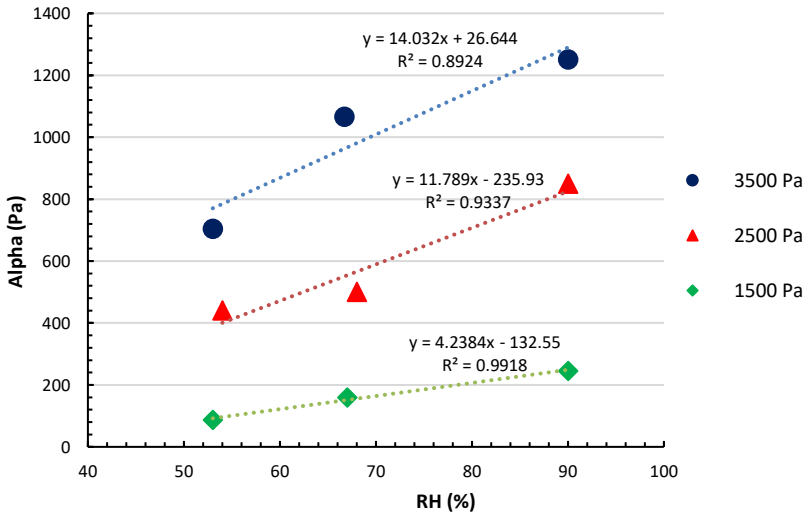


Figure 82 : Évolution du coefficient de proportionnalité en fonction de l'humidité relative pour la suie 26.

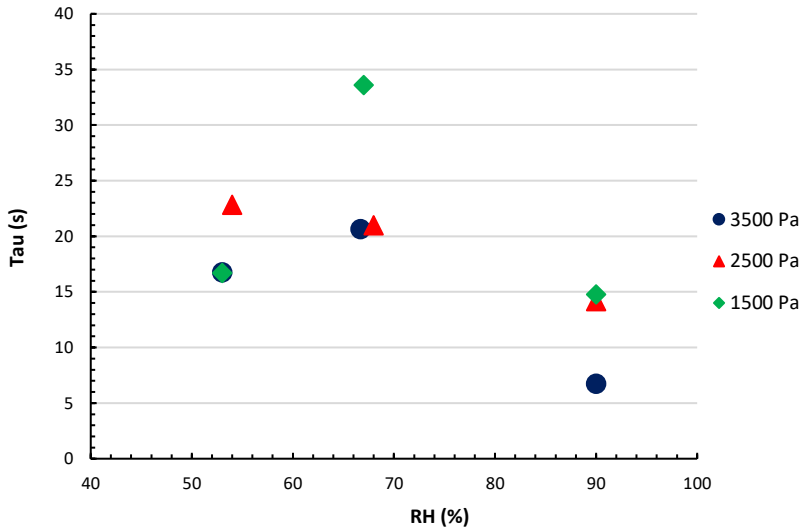


Figure 83 : Évolution des constantes de temps en fonction de l'humidité relative pour la suie 18

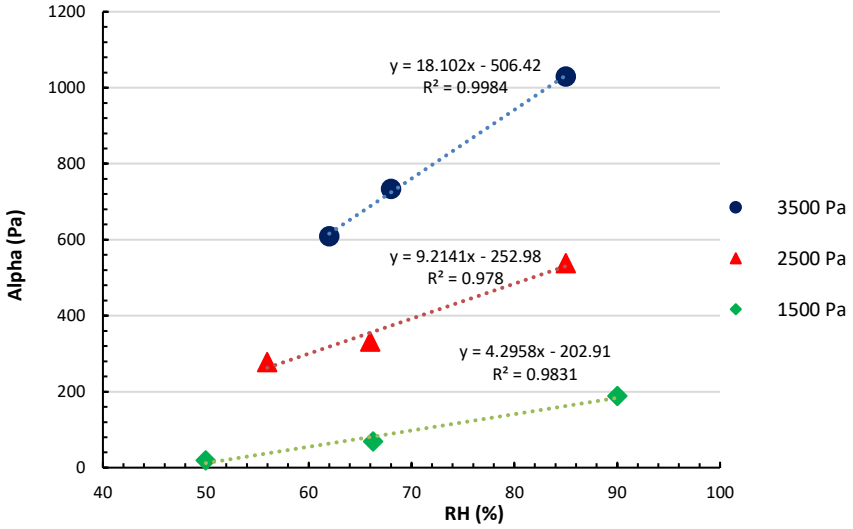


Figure 84 : Évolution du coefficient de proportionnalité en fonction de l'humidité relative pour la suie 18

Pour les deux suies, l'évolution du coefficient de proportionnalité en fonction de l'humidité relative semble linéaire. Une diminution de la valeur de la constante de temps pour un taux d'humidité relative à 90% est constatée pour l'ensemble des essais. L'évolution de la constante peut sembler polynomiale d'ordre deux pour les dépôts 1500 et 3500, cependant il est plus difficile de conclure quant à un type d'évolution pour les constantes de temps avec certitude.

Dans l'ensemble, il faudrait un nombre de points de mesure plus important pour affiner et conclure avec rigueur sur les évolutions des constantes.

4.1.3 Approche statique : détermination de la perte de charge finale à partir des conditions opératoires initiales

4.1.3.1 Expression du coefficient de proportionnalité α en fonction de la perte de charge

Les évolutions du coefficient de proportionnalité en fonction de l'humidité relative étant linéaires pour les deux suies, il est possible d'écrire :

$$\alpha = b(\Delta P_0)RH + c(\Delta P_0) \quad (53)$$

Où ΔP_0 est la perte de charge de colmatage (Pa).

Une expression des coefficients b et c est recherchée telle que :

$$b = a_1 \Delta P_0 + b_1 \quad (54)$$

$$c = a_2 \Delta P_0 + b_2 \quad (55)$$

Finalement, l'expression de chute de perte de charge devient :

$$\Delta P = \Delta P_0 - [(a_1 \Delta P_0 + b_1)RH + (a_2 \Delta P_0 + b_2)] * (1 - exp\left(-\frac{(t - t_0)^{0.5}}{\tau}\right) \quad (56)$$

Si t tend vers l'infini, il est possible d'écrire :

$$\Delta P = \Delta P_0 - [(a_1 \Delta P_0 + b_1)RH + (a_2 \Delta P_0 + b_2)] \quad (57)$$

Les variations des constantes permettent d'obtenir les valeurs figurants dans le Tableau 16.

	suie 18	suie 26
a_1	0,0069	0,0049
b_1	-6,71	-2,22
a_2	-0,15	0,025
b_2	58	-212

Tableau 16 : Valeurs des coefficients a1, b1, a2, b2 pour les deux suies

Les valeurs de perte de charge calculées avec l'expression numérique sont données en Tableau 17 et Tableau 18.

ΔP_0 (Pa)	HR (%)	ΔP_{HR}(Pa)	ΔP_{model}(Pa)
3380	90	2347	2333
3397	68	2689	2710
3413	62	2806	2822
2396	85	1850	1862
2420	66	2085	2065
2567	55	2336	2288
1481	85	1292	1346
1520	50	1500	1501
1528	66	1472	1446

Tableau 17 : Valeurs de perte de charge obtenues avec l'expression numérique pour la suie 18. ΔP_0 la perte de charge de colmatage (Pa), HR la valeur de l'humidité relative appliquée sur le dépôt lors de l'essai, ΔP_{HR} la perte de charge obtenue après passage de l'air humide et ΔP_{model} la perte de charge obtenue avec l'expression numérique.

ΔP_0(Pa)	HR (%)	ΔP_{HR}(Pa)	ΔP_{model}(Pa)
3485	90	2234	2272
3487	66	2410	2630
3510	53	2797	2840
2489	90	1623	1740
2467	68	1954	1946
2469	53	2017	2095
1475	87	1223	1214
1520	67	1373	1343
1515	53	1425	1413

Tableau 18 : Valeurs de perte de charge obtenues avec l'expression numérique pour la suie 18. ΔP_0 la perte de charge de colmatage (Pa), HR la valeur de l'humidité relative appliquée sur le dépôt lors de l'essai, ΔP_{HR} la perte de charge obtenue après passage de l'air humide et ΔP_{model} la perte de charge obtenue avec l'expression numérique.

La droite de parité représentant la perte de charge expérimentale en fonction de la perte de charge calculée est en Figure 85.

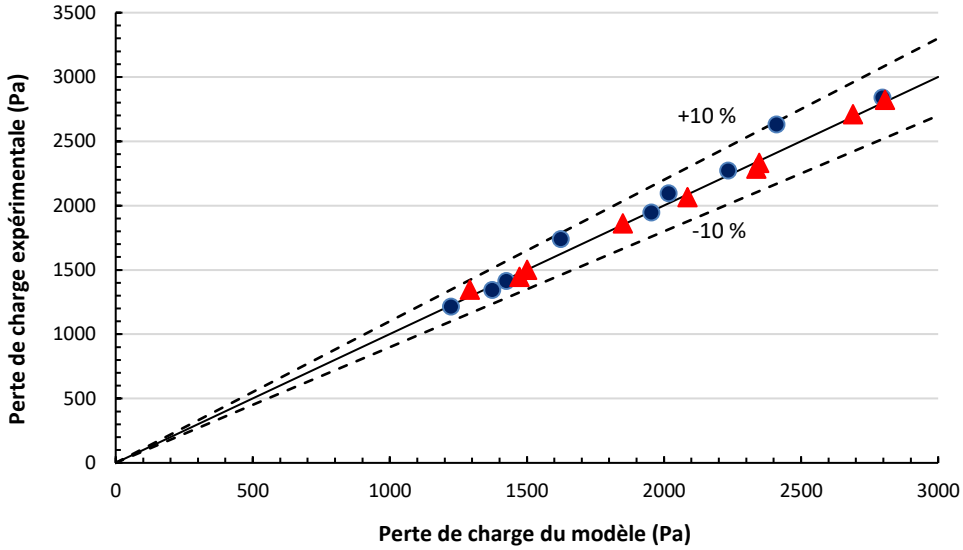


Figure 85 : Droite de parité : comparaison valeurs expérimentales et valeurs numériques. En rouge, suie 18 ; En bleu, suie 26.

L'expression numérique permettant de déterminer la perte de charge finale à partir des conditions initiales (perte de charge de colmatage, taux d'humidité relative) donne de très bon résultats, la plupart des points sont très proches de la bissectrice y = x.

4.1.4 Approche dynamique

4.1.4.1 Élaboration d'une expression plus générale pour les deux suies considérées

A partir de l'expression numérique obtenue précédemment, une expression générale de la perte de charge en fonction de l'humidité relative et de la perte de charge de colmatage est recherchée. Ainsi, une expression de la constante de temps en fonction de l'humidité relative et du coefficient de proportionnalité en fonction de l'humidité relative et de la perte de charge de colmatage est investiguée.

- *Expression de la constante de temps en fonction de l'humidité relative pour les deux suies*

Les valeurs des constantes de temps sont moyennées pour des taux humidités relatives proches. Une expression de type polynomiale d'ordre deux a été sélectionnée pour traduire les évolutions des constantes de temps en fonction de l'humidité relative.

La Figure 86 présente l'évolution des temps de relaxation moyennées en fonction de l'humidité relative.

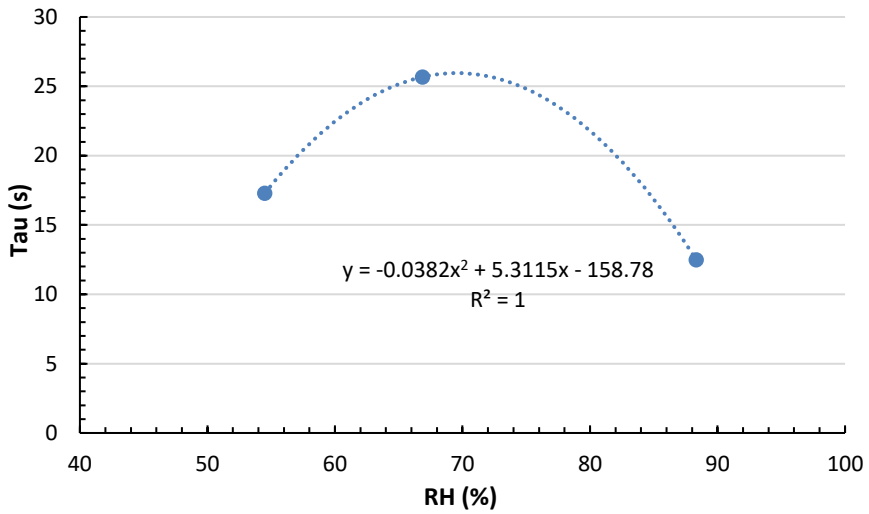


Figure 86 : Évolution des constantes de temps moyennées en fonction de l'humidité relative

L'expression de la constante de temps obtenue en fonction de l'humidité relative peut être approchée par la relation :

$$\tau = -0{,}038RH^2 + 5{,}31RH - 159 \quad (58)$$

L'évolution de la constante de temps pose question. Cependant, il faudrait plus de résultats pour confirmer ou non cette évolution polynomiale.

L'évolution du coefficient b en fonction de la perte de charge de colmatage est représenté en Figure 87.

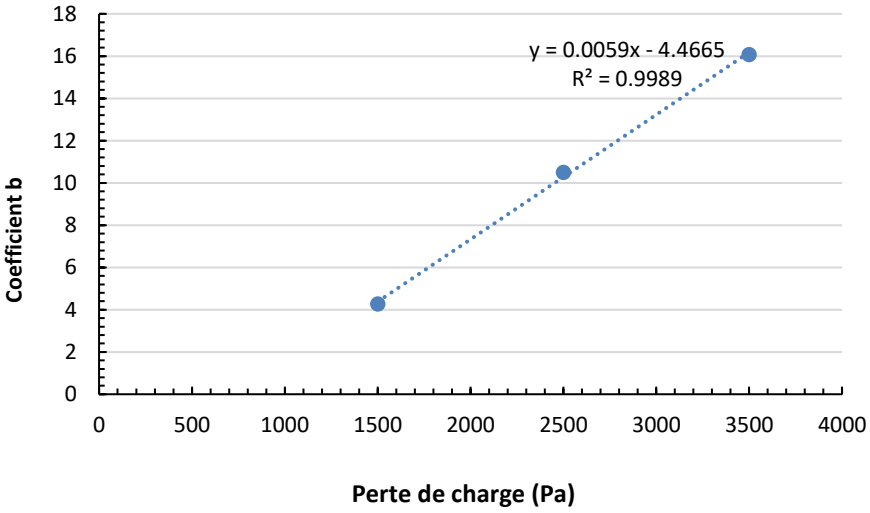


Figure 87 : Évolution des coefficient directeurs des droites alpha = b*RH + c en fonction de la perte de charge

L'évolution du coefficient b en fonction de la perte de charge de colmatage est représenté en Figure 88.

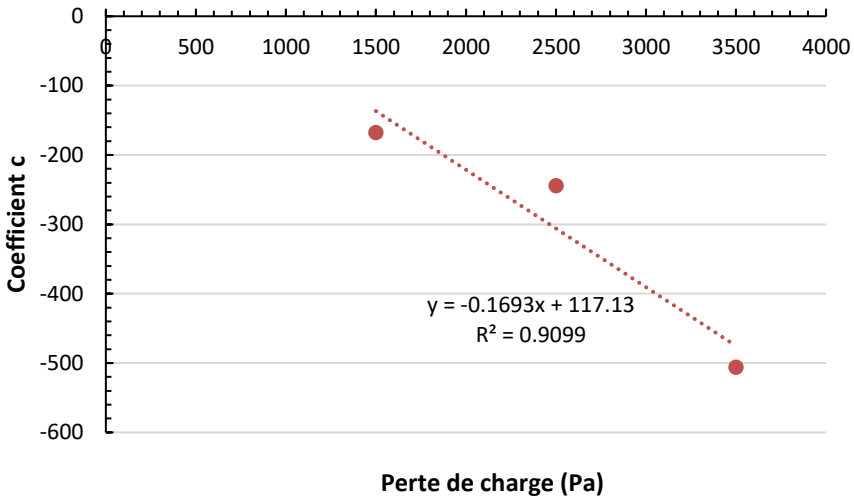


Figure 88 : Évolution des ordonnées des droites alpha = b*RH + c en fonction de la perte de charge

A l'issue de ces résultats, les expressions suivantes sont obtenues :

$$b = 0{,}0059\Delta P_0 - 4{,}47 \quad (59)$$

Et

$$c = -0{,}0017\Delta P_0 + 117 \quad (60)$$

Finalement, l'expression de la chute de perte de charge devient :

$$\Delta P = \Delta P_0 - [(a_1\Delta P_0 + b_1)RH + (a_2\Delta P_0 + b_2)] * (1 - exp\left(-\frac{(t-t_0)^{0.5}}{-0{,}038RH^2+5{,}31RH-159}\right)) \quad (61)$$

En remplaçant par les valeurs numériques :

$$\Delta P = \Delta P_0 - [(0{,}0059\Delta P_0 - 4{,}47)RH + (-0.0014\Delta P_0 + 117)] * (1 - exp\left(-\frac{(t-t_0)^{0.5}}{-0{,}038RH^2+5{,}31RH-159}\right)) \quad (62)$$

Le coefficient a_2 a été ajusté par essais-erreurs à une valeur de -0,0014 pour une meilleure fidélité entre le modèle et les valeurs expérimentales. Les variations de la constante de temps et du coefficient b étant très proches pour les deux suies, le choix s'est porté sur l'ajustement de ce coefficient (a_2) pour une expression générale aux deux suies puisque de plus grands écarts étaient observés sur ce dernier.

4.1.4.2 *Confrontation des valeurs expérimentales au modèle établi pour les deux suies*

La confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques pour l'ensemble des essais pour la suie 18 à un débit de 22,5 L/min est présentée en Figures 89 à 91.

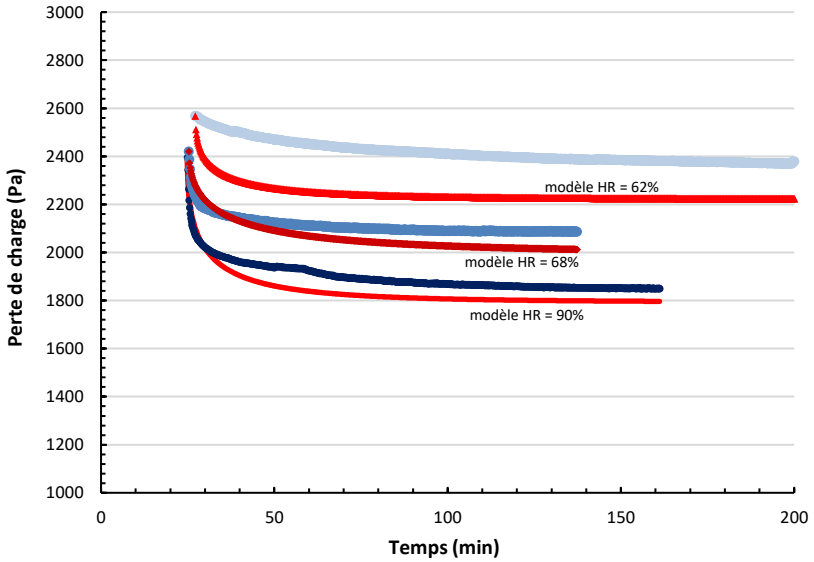


Figure 89 : Évolution de la chute de perte de charge pour l'ensemble des essais sur la suie 18 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs issues du modèle général

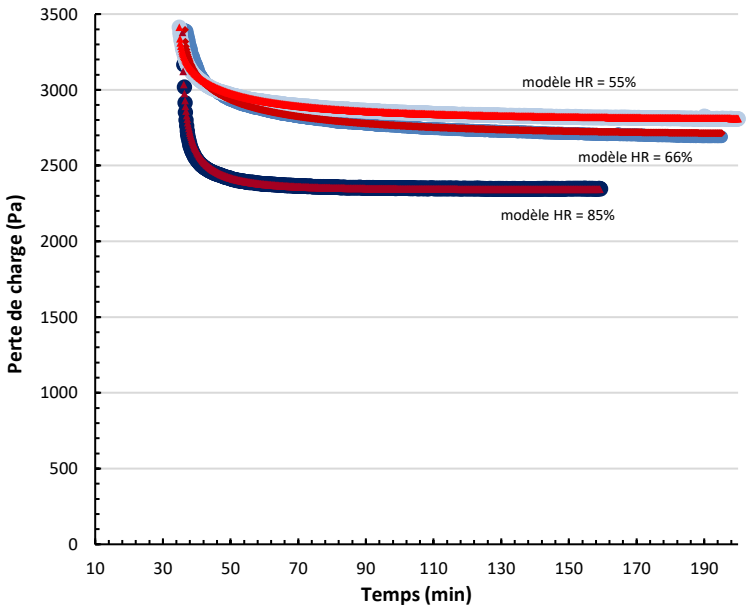


Figure 90 : Évolution de la chute de perte de charge pour l'ensemble des essais sur la suie 18 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs issues du modèle général

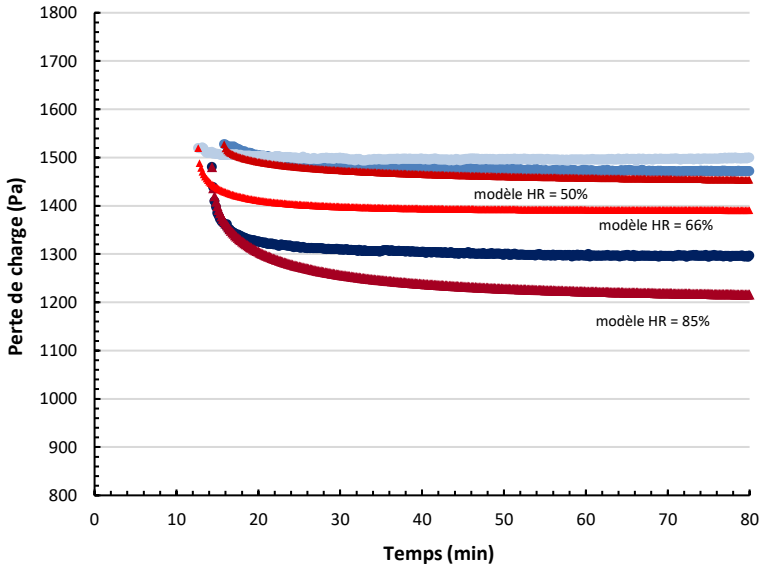


Figure 91 : Évolution de la chute de perte de charge pour l'ensemble des essais sur la suie 18 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs issues du modèle général

- Dépôt 3500 : la Figure 90 montre qu'il existe un bon accord entre le modèle et les valeurs expérimentales pour le dépôt 3500.
- Dépôt 2500 : le modèle sous-estime légèrement les valeurs expérimentales notamment pour le passage d'air un taux d'humidité relative proche de 55%, cependant les écarts restent inférieurs à 5% des valeurs expérimentales de perte de charge.
- Dépôt 1500 : le modèle sous-estime les valeurs lors de la phase quasi stationnaire pour le dépôt 1500, mais ces écarts restent inférieurs à 10% de la valeur de la perte de charge. Dans l'ensemble, le modèle permet de décrire de manière plutôt fidèle la chute de perte de charge avec une légère sous-estimation pour les dépôts 1500 et 2500.

La confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques pour l'ensemble des essais pour la suie à un débit de 22,5 L/min est présentée en Figure 92 à Figure 94.

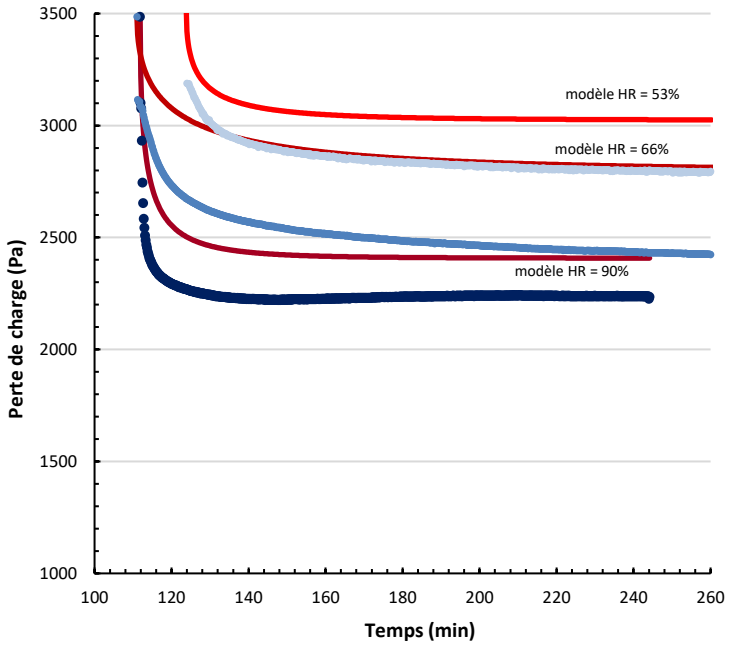


Figure 92 : Évolution de la chute de perte de charge pour l'ensemble des essais sur la suie 26 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs issues du modèle général.

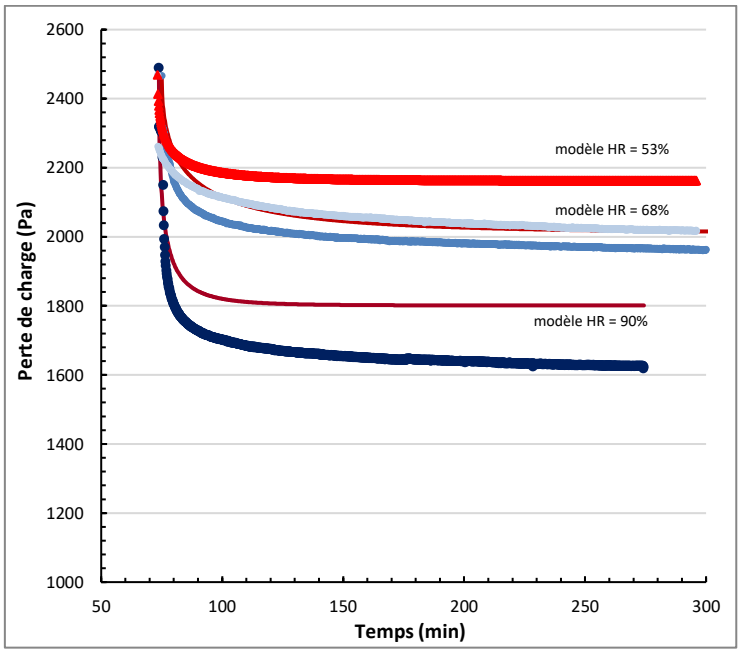


Figure 93 : Évolution de la chute de perte de charge pour l'ensemble des essais sur la suie 26 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs issues du modèle général

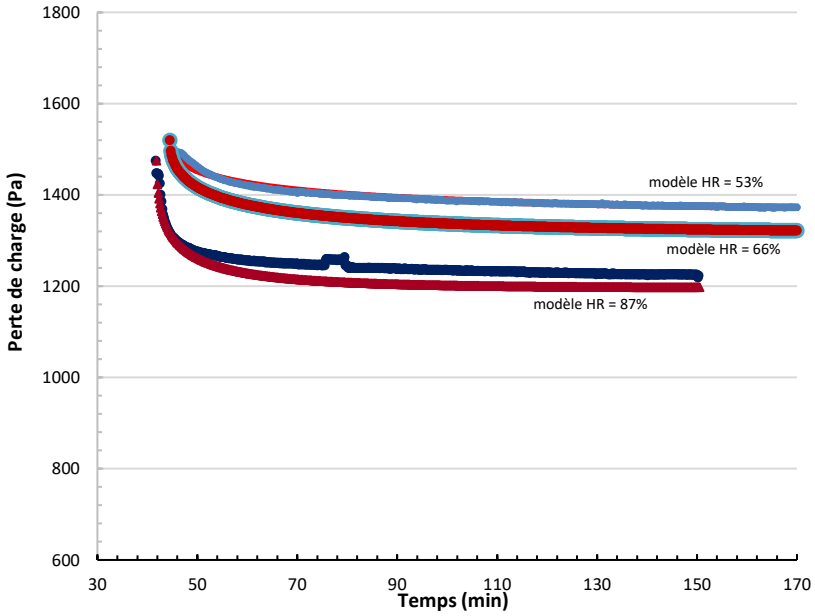


Figure 94 : Évolution de la chute de perte de charge pour l'ensemble des essais sur la suie 26 : confrontation entre les valeurs expérimentales et les valeurs numériques obtenues. Les courbes bleues représentent les valeurs expérimentales et les courbes rouges les valeurs issues du modèle général

La Figure 93 montre que le modèle surestime les valeurs de perte de charge pour les dépôts 3500 et 2500 lors de la phase quasi-stationnaire. L'écart le plus important est observé pour le dépôt 3500 avec une perméation humide à 70% RH, cet écart est de 16%. Pour les autres essais, l'écart à la valeur de perte de charge est de moins de 10%. Un bon accord entre les valeurs expérimentales et le modèle est observé pour le dépôt 1500.

De manière générale, l'allure du modèle est fidèle aux allures de décroissance de la perte de charge. Il existe cependant un écart entre les valeurs finales de perte de charge obtenues pour certains essais. Néanmoins ces écarts demeurent plutôt faibles avec des erreurs inférieures 16% pour la suie 26 et des erreurs inférieures à 5% pour la suie 18.

4.1.4.3 Droites de parité

Afin de quantifier l'écart entre les données expérimentales et théoriques, la perte de charge expérimentale est représentée en fonction de la perte de charge théorique en Figure 95 pour la suie 18 et en Figure 96 pour la suie 26.

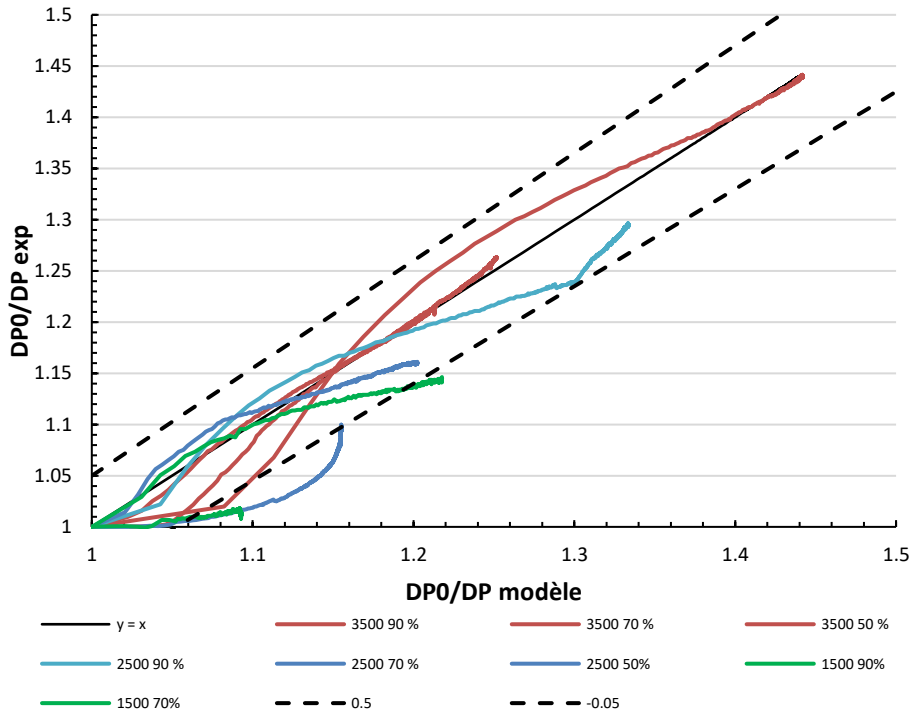


Figure 95 : Droite de parité pour la suie 18

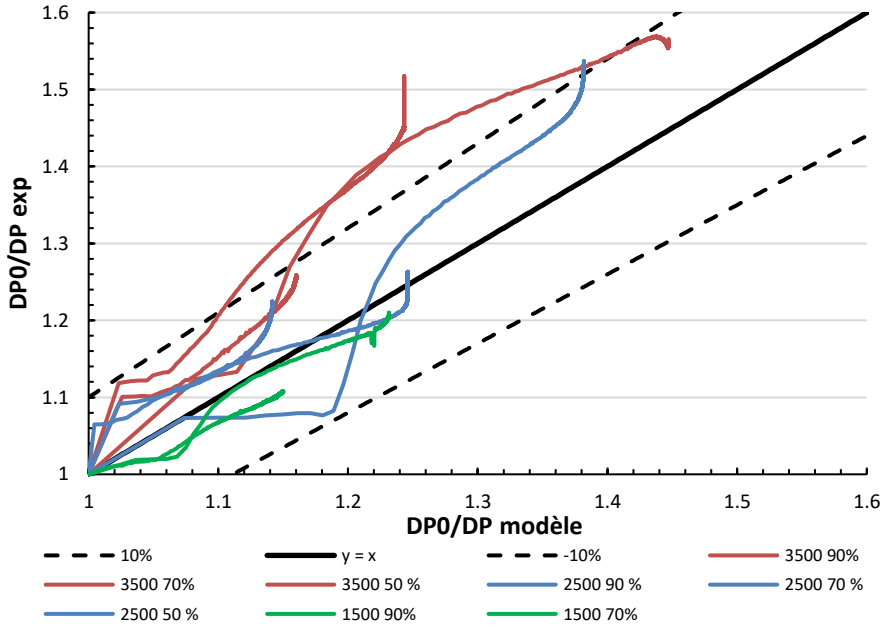


Figure 96 : Droite de parité pour la suie 26

Les valeurs de pertes de charge sont bien représentées pour l'ensemble des échantillons, malgré un écart un peu plus important pour les dépôts 3500 de la suie 26.

4.2 Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé tout d'abord à une méthode d'estimation de la surface de fuite puis à la mise en place d'un modèle comportementale de l'évolution de la perte de charge lors du passage de l'air humide sur le dépôt.

La mise en place du modèle comportemental d'évolution de la perte de charge a permis de trouver une relation qui traduit la chute de perte de charge avec fidélité et d'obtenir des paramètres caractéristiques tels qu'une constante de temps et un coefficient de proportionnalité pour chaque essai. Les évolutions de ces paramètres en fonction des paramètres opératoires (humidité relative et perte de charge de colmatage) ont permis de développer un modèle prédictif de chute de perte de charge lors du passage d'un air humide sur un dépôt de particules de suies. Il a été montré que ce modèle donne une allure de chute de perte de charge fidèle aux chutes de perte de charge expérimentales observées, c'est-à-dire une diminution brutale puis une diminution beaucoup plus lente. Les valeurs de pertes de charge finales du modèle sont acceptables par rapport aux valeurs expérimentales de perte de charge.

L'expression du modèle de chute de perte charge prédictif peut être améliorée de deux manières :

- D'un point de vue expérimental :
    - En réalisant plus de points expérimentaux avec plus de taux d'humidité relative appliqués sur le dépôt et plus de pertes de charge de colmatage. Cela permettrait d'affiner l'évolution de la constante de temps en fonction de l'humidité relative et du coefficient de proportionnalité en fonction de la perte de charge de colmatage.
    - En réalisant d'autres essais avec des suies de tailles différentes. En fonction des résultats obtenus, il serait alors envisageable d'avoir une expression de chute de perte de charge dépendant de la taille des particules ou bien d'autres propriétés propres aux particules utilisées. Cela permettrait d'avoir un modèle plus générale et s'appliquant à toute taille de particules.
- D'un point de vue modélisation : trouver une expression de la perte de charge qui dépendrait de deux constantes de temps afin de traduire avec plus de rigueur les deux cinétiques présentes dans la diminution de la perte de charge et deux coefficients de proportionnalités.

Si Les résultats expérimentaux obtenus sont utilisés en vue d'une optimisation des performances dans le domaine de la filtration, ce modèle peut être pertinent pour déterminer quelle humidité relative appliquée pour une perte de charge de colmatage donnée afin de la faire diminuer.

Chapitre 5 Filtration de mélanges d'aérosols : gouttelettes d'eau et particules de suie

Il a été vu dans l'état de l'art que peu d'études sont consacrées à l'évolution des performances des filtres lors d'un mélange de particules solides et liquides, et qu'aucune étude à notre connaissance ne s'intéresse au cas d'un mélange de particules de suies et de gouttelettes d'eau. Pourtant, lors d'un incendie, il est probable que les filtres de sécurité se retrouvent en présence d'un tel mélange.

Ce chapitre présente par conséquent une étude expérimentale sur la filtration par des filtres à fibres plans de mélange d'aérosol de suies et de gouttelettes d'eau. L'intérêt sera porté sur l'évolution de la perte de charge de ces filtres au cours du colmatage en faisant varier la proportion de particules liquides et solides.

Il sera mis en avant dans ce chapitre les difficultés expérimentales rencontrées quant à la stabilisation de la granulométrie d'un aérosol de gouttelettes d'eau, de la fiabilité des mesures granulométriques pour un tel mélange mais aussi de la reproductibilité des essais.

5.1 Conditions expérimentales

L'objectif des expériences réalisées est d'étudier la filtration des mélanges de deux aérosols, solides (particules de suie) et liquides (eau). L'évolution de la perte de charge de filtres plans D-309 au cours du colmatage est étudiée.

Différentes proportions en solide et en liquide ont été expérimentées pour ces mélanges. Cependant, un certains nombres de difficultés expérimentales demeurent pour ces essais :

- La distribution granulométrique des suies varie selon le facteur de dilution : plus l'aérosol est dilué, plus son diamètre moyen est faible. Ce résultat est dû à un phénomène de désagrégation des particules.

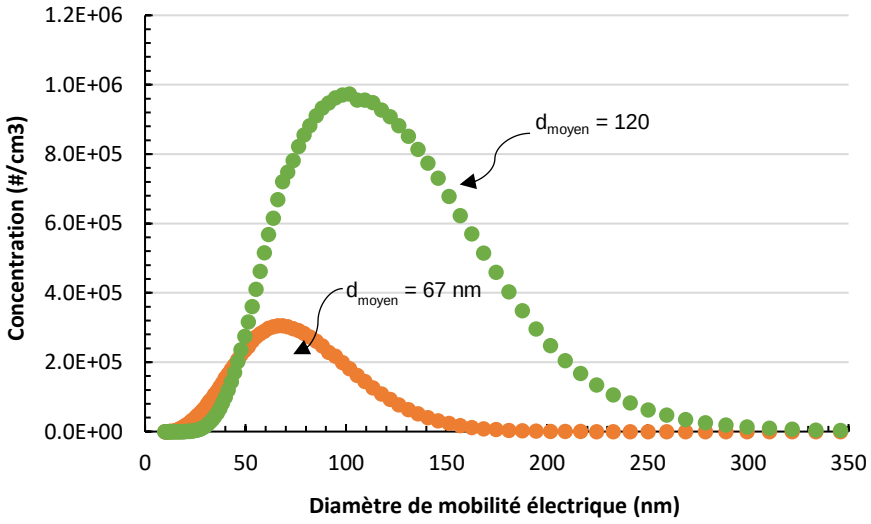


Figure 97 : Effet de la dilution sur la granulométrie des suies 26 (facteur 10)

- Les distributions granulométriques des gouttes d'eau mesurées par le Welas ne sont pas fiables. D'une part, si le nombre de particules dépasse le seuil limite de l'appareil (10^6 P/cm^3), alors la mesure est erronée et il n'est pas possible de diluer avec de l'air sec car celui-ci viendrait soit assécher complètement les gouttelettes soit faussée la distribution. D'autre part, des phénomènes d'évaporation ou de condensation peuvent avoir lieu au sein de la ligne de prélèvement.
- Une analyse gravimétrique rigoureuse aurait pu permettre de pallier ce manque de données, cependant la masse d'eau récupérée sur le filtre s'évapore rapidement et fausse également la masse d'eau sur filtre.

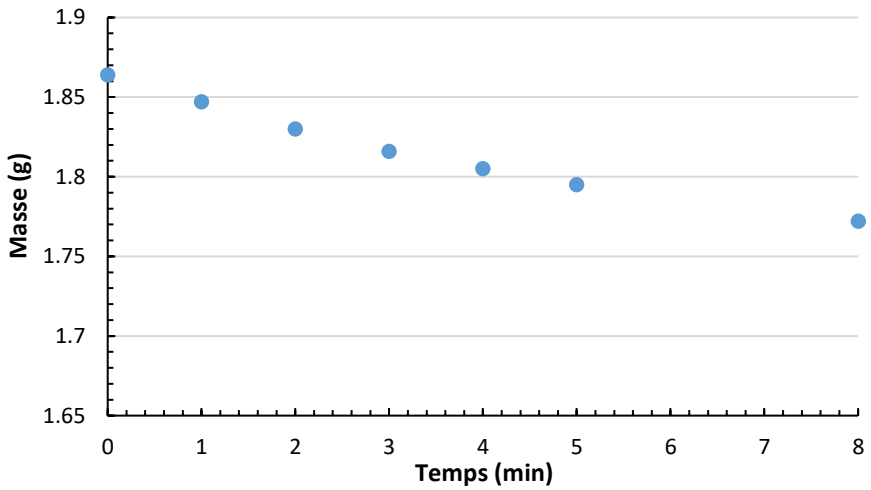


Figure 98 : Évolution de la masse d'eau évaporée sur filtre

Entre chaque essai, le débit d'extraction de suie en amont du mélange est maintenu constant et le débit de gouttelettes est diminué. Les essais 2 et 4 sont réalisés pour des conditions expérimentales identiques.

Le pourcentage de liquide considéré dans les différentes expériences correspond à un pourcentage défini par rapport au débit massique de liquide :

$$\frac{q_{m\ liquide}}{q_{m\ mélanges}} = \frac{q_{vl}C_l}{q_{vl}C_l + q_{vs}C_s}$$

Où q_m représente un débit massique (en g.s^{-1}), q_v un débit volumique (en m^3.s^{-1}) et C la concentration en solide ou liquide (en g.m^{-3}).

Au vu des incertitudes expérimentales exprimées, la valeur de ce pourcentage est difficilement fiable. Elle sera donnée à titre indicatif. (Calculs des concentrations massiques en annexe)

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4
$Q_{gouttes}$ (L/min)	25	20	18	20
$Q_{extraction}$ (L/min)	25	25	25	25
% massique liquide dans le mélange	98	80	24	0,054
T (°C)	19,5	20	21,2	20
m_{filtre_vierge} (g)	1,014	1,009	1,013	1,013
m_{finale} (g)	1,516	1,109	1,067	1,122
m_{sec} (g)	1,037	1,042	1,067	1,119
m_{suies} (g)	0,023	0,033	0,054	0,106
m_{eau} (g)	0,479	0,067	Non mesurable	0,003
$Concentration_{suies_totale}$ (P/cm^3)	63440492	74473621	78935175	74473621
$Concentration_{suies_massique}$ (mg/m^3)	58,52	20,4	18,1	20,6
$Concentration_{gouttes_totale}$ (P/cm^3)	325339	205069	120976	120976
$Concentration_{gouttes_massique}$ (mg/m^3) [granulo]	788	44	3,3	5,4
$Concentration_{gouttes_massique}$ (mg/m^3) [Pesée]	1218	41,4	Non mesurable	0,58
Débit massique gouttes (mg/s)	0,366	0,012	Non mesurable	0,00017
Débit massique suies (mg/s)	0,0176	0,006	0,005	0,006
Débit volumique de filtration(m^3/s)	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
Temps de colmatage (s)	1310	5390	9950	17190

Tableau 19 : Données relatives aux quatre essais de scénario de mélange

5.2 Caractérisation du mélanges

Habituellement, il est nécessaire de pouvoir mesurer la distribution granulométrique les aérosols générés car cela permet d'avoir une information quant aux mécanismes de collecte des particules sur le filtre et d'autres part de comparer les résultats aux analyses gravimétriques permettant de mettre en avant la fiabilité des résultats obtenus. Cependant, la caractérisation d'un tel mélange n'est pas aisé. En effet, d'une part la dilution peut diminuer la taille de l'aérosol de suie, d'autre part la mesure de la granulométrie des gouttelettes d'eau est peu fiable.

5.2.1 Caractérisation des suies

Le Tableau 20 présente les diamètres moyens expérimentaux obtenus pour différents essais dont un essai avec une génération de suie sans mélange ou dilution et sans diluteur.

Essai	Génération de suie simple – pas de dilution	Mélanges : essai 2	Mélanges : essai 3
Diamètre moyen (nm)	164	148	132

Tableau 20 : influence de la dilution sur le diamètre moyen

Les résultats montrent que lors d'une génération sans aucune dilution le diamètre moyen est plus élevé. Le taux de liquide est plus élevé dans l'essai 2 que dans l'essai 3, ainsi l'aérosol de suie y est plus dilué et pourtant le diamètre moyen mesuré lors de l'essai 2 est plus élevé que pour l'essai 3. Cela peut aussi être dû à des interactions entre les suies et les gouttelettes.

En faisant varier les proportions d'aérosols liquides et solides, le taux de dilution des suies varie ainsi que la granulométrie de l'aérosol de suie. Cela rend plus délicat une éventuelle comparaison entre les résultats.

5.2.2 Caractérisation des gouttelettes d'eau

La granulométrie de l'aérosol de gouttelettes générée pour l'essai 1 est représentée en Figure 99. Il était prévu de faire une mesure granulométrique en fin de colmatage mais le filtre s'est déchiré sous la pression. Ainsi une seule mesure granulométrique, en début de colmatage, a été réalisée.

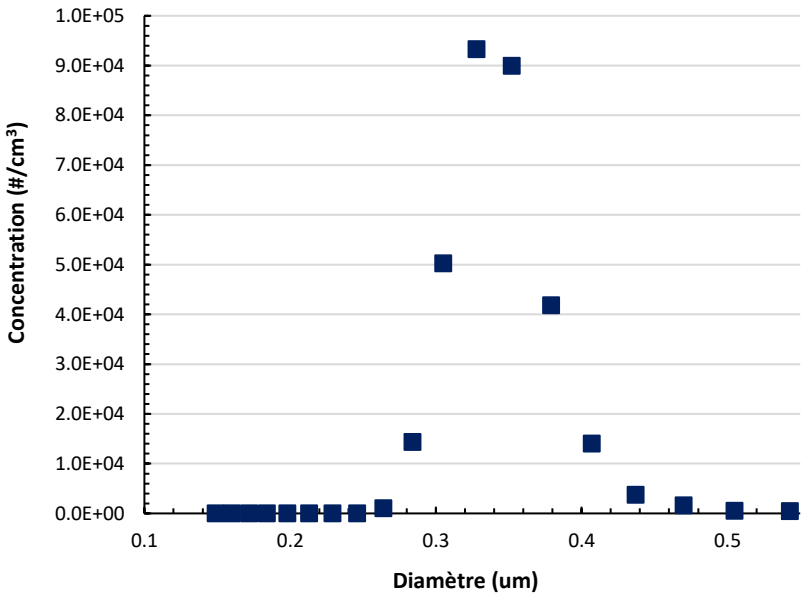


Figure 99 : Granulométrie des gouttelettes pour l'essai 1

La granulométrie de l'aérosol de gouttelettes générée pour l'essai 3 est représentée en Figure 100. Il a été possible pour cette essai de réaliser une mesure en début et en fin de colmatage.

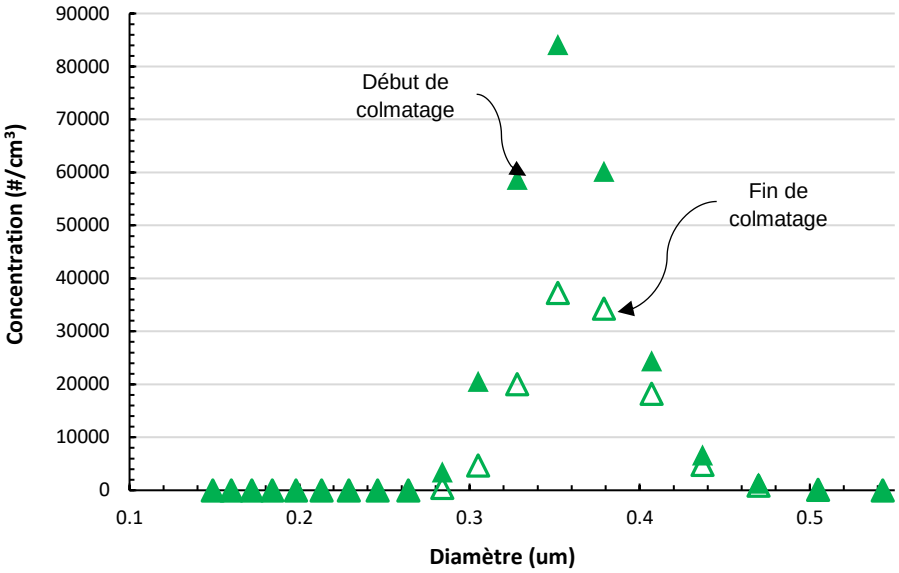


Figure 100 : Granulométrie des gouttelettes d'eau pour l'essai 3

Les résultats de la Figure 100 montrent qu'une diminution (diminué d'environ 50%) de la concentration en gouttelettes d'eau a eu lieu au cours du colmatage et met en avant la difficulté d'avoir un aérosol stable tout au long d'un essai. La pesée du filtre après le colmatage n'a pas pu permettre de déterminer la masse d'eau déposée (même masse de filtre avant et après étuvage à 120 °C).

La granulométrie des aérosols de gouttelettes générée pour les essais 2 et 4 sont représentées en Figure 101. Les résultats pour ces deux essais sont représentés sur une même figure, car ils ont été réalisés pour des conditions expérimentales identiques (même débit d'aérosol de suie et d'aérosol d'eau).

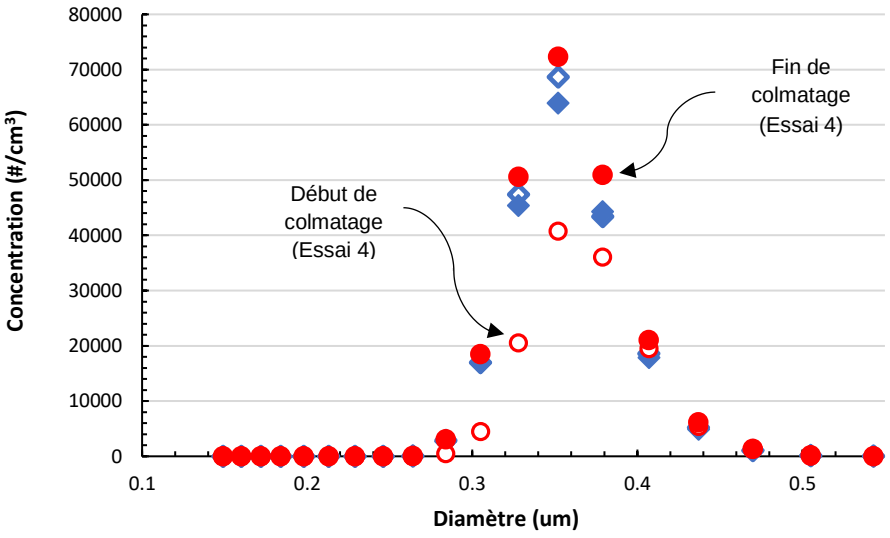


Figure 101 : Granulométrie des gouttelettes d'eau pour les essais 2 et 4. En bleu, essais 2 ; En rouge, Essais 4.

La Figure 101 montre pour l'essai 2, la génération de gouttelettes semble avoir été stable, car les courbes granulométriques se superposent. Concernant l'essai 4, la concentration semble avoir augmenté et la distribution granulométrique en fin de colmatage se superpose aux granulométries de l'essai 2.

Le Tableau 21 présente pour chaque essai les concentrations massiques calculées à partir des mesures granulométriques et les concentrations massiques calculées à partir des pesées des filtres après colmatage.

	Essai 1	**Essai 2**	**Essai 3**	**Essai 4**
$Concentration_{gouttes_massique}$ (mg/m3) ***[calculée à partir de la granulométrie]***	788	44	3,3	5,4 à 45
$Concentration_{gouttes_massique}$ (mg/m3) [Pesée]	1218	**41,4**	Non mesurable	**0,58**

Tableau 21 : Comparaison des concentrations massiques calculées avec les mesures de granulométries et les concentrations massiques mesurées par analyse gravimétrique

Il faut prendre en compte que les valeurs des concentrations massiques calculées à partir des pesées sont sous estimées puisque qu'une partie de l'eau déposée a pu s'évaporer entre l'arrêt de l'essai et la pesée du filtre sur la balance.

Pour l'essai 1, l'analyse granulométrique sous-estime la concentration massique des gouttelettes d'eau. Cela peut s'expliquer par le fait que la concentration était supérieure au seuil limite de l'appareil de mesure.

Pour les essais 2, 3 et 4 l'analyse gravimétrique sous-estime la concentration massique, ce qui est cohérent avec le fait qu'une partie de l'eau a pu s'évaporer au moment de la mesure.

5.3 Résultats expérimentaux

5.3.1 Évolution temporelle de la perte de charge du filtre et variations

Les évolutions de perte de charge du filtre lors du colmatage par les différents mélanges sont représentées en Figure 102.

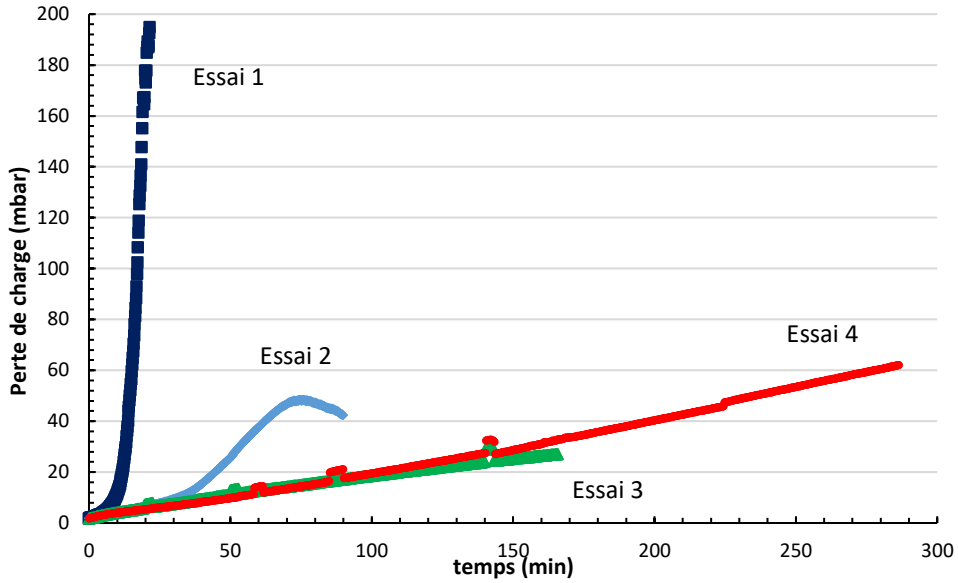


Figure 102 : Évolution des pertes de charges en fonction du temps pour les quatre essais

Essai 1 :

L'évolution de perte de charge de l'essai 1 est caractéristique d'une évolution en filtration d'aérosols liquide. En effet, dans un premier temps la perte de charge augmente lentement, puis un changement dans sa variation est observé par la présence d'un point d'inflexion et enfin une augmentation exponentielle apparaît. La phase de drainage n'a pas pu être atteinte car le filtre s'est rompu à une perte de charge de 205 mbar. Cette évolution est cohérente avec la proportion importante (au moins 80%) d'aérosol liquide dans le mélange.

Essais 2 et 4 :

Comme indiqué dans les conditions opératoires précédemment, les essais 2 et 4 ont été réalisé pour des configurations expérimentales identiques. Néanmoins, les résultats de la Figure 102 montrent que leur perte de charge respective n'évolue pas de la même manière. L'essai 2 a une évolution caractéristique de la filtration d'aérosol liquide avec une augmentation lente de la perte de charge puis un changement de cette évolution qui devient plus rapide. Comme pour l'essai 1, il n'a pas été possible d'atteindre la phase de drainage car le filtre s'est rompu pour une perte de charge de 48 mbar. L'évolution de la perte de charge pour l'essai 4 est plus lente que pour l'essai 2, elle semble linéaire au début puis elle augmente un peu plus rapidement à partir de 150 minutes. Les évolutions de pertes de charge demeurent cohérentes avec les proportions d'aérosols liquides et solides dans le mélange, en effet d'après les analyses gravimétriques la masse d'eau déposée pour l'essai 2 est au moins vingt-deux fois plus importante que la masse d'eau déposée pour l'essai 4. De plus, l'analyse

granulométrique montre qu'au début de l'essai 2 la concentration en gouttelettes d'eau est au moins deux fois plus faible que pour l'essai 4.

Ces différences de concentration en aérosol d'eau peuvent s'expliquer par une légère modification de la température, bien que les capteurs n'aient pas pu permettre de déterminer cette différence, ou bien, par une légère irrégularité dans le fonctionnement de la buse placé sur le générateur d'aérosol d'eau. Les gouttelettes d'eau ont une taille et une masse plus importante que les particules de suies, une légère modification de la concentration peut entraîner une importante modification de l'évolution de la perte de charge.

Ces résultats montrent la difficulté d'obtenir des résultats reproductibles quant au suivi de la perte de charge d'un filtre vis-à-vis d'un tel mélange.

Essai 3 :

L'évolution de la perte de charge semble linéaire donc proche des évolutions lors de la filtration de particules solides. Ce résultat est cohérent avec le fait que la masse d'eau déposée était très faible (non mesurable).

Bilan des observations :

Ces résultats montrent que pour une proportion importante de liquide dans le mélange, l'évolution de la perte de charge suit les caractéristiques de la filtration d'aérosols liquides : une augmentation lente de la perte de charge puis une augmentation de type exponentielle. Seulement, il n'a pas été possible d'atteindre le palier de drainage qui est classiquement obtenu car les filtres se sont rompus avant. Le fait que les filtres se soient rompus rend le traitement des résultats complexes. Il aurait été en effet intéressant de pouvoir caractériser les résistances des filtres au cours et en fin de colmatage. Néanmoins, ce constat est intéressant, en effet cela signifie que si les filtres de sécurité sont exposés à une proportion importante d'aérosol d'eau, il y a un risque de craquage, ainsi le filtre ne remplit plus son rôle de protection. Les résultats témoignent également de la difficulté à obtenir des expériences reproductibles pour des conditions opératoires identiques. Les résultats montrent également que lorsque la proportion de liquide est plus faible, l'évolution de la perte de charge se rapproche des tendances observées lors de la filtration de particules solides.

5.3.2 Evolution en fonction de la masse surfacique générée

Le choix de l'axe des abscisses pour la représentation des différentes courbes de perte de charge sur un même graphe est une difficulté supplémentaire puisque la proportion de liquide et de solide varie selon les mélanges réalisés. D'autant plus qu'il a été montré précédemment, qu'il demeure plusieurs incertitudes quant aux mesures granulométriques des suies et des gouttelettes d'eau, ainsi que lors de la pesée du filtre. La comparaison sera tout de même faite en représentant les courbes de perte de charge en fonction de la masse totale d'aérosols générés. Les évolutions de perte de charge des essais de filtration biphasique en fonction de la masse surfacique totale générée (somme de la masse surfacique liquide générée et de la masse surfacique solide générée) sont représentées en Figure 103.

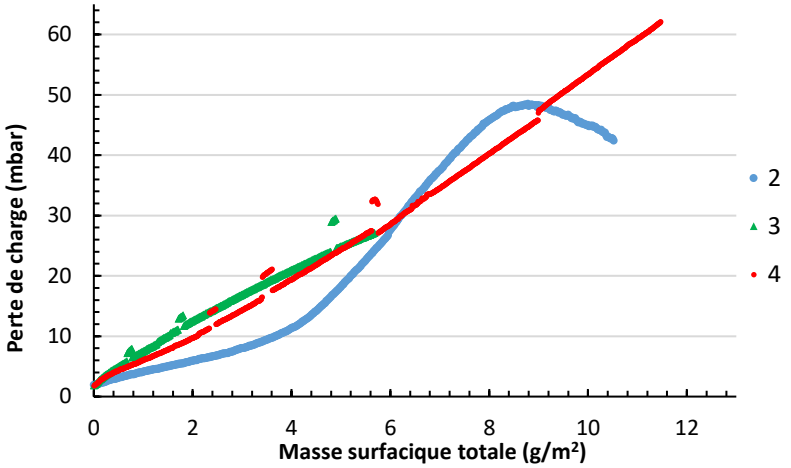


Figure 103 : Évolution de la perte de charge en fonction de la masse surfacique générée (zoom sur les essais 2, 3 et 4)

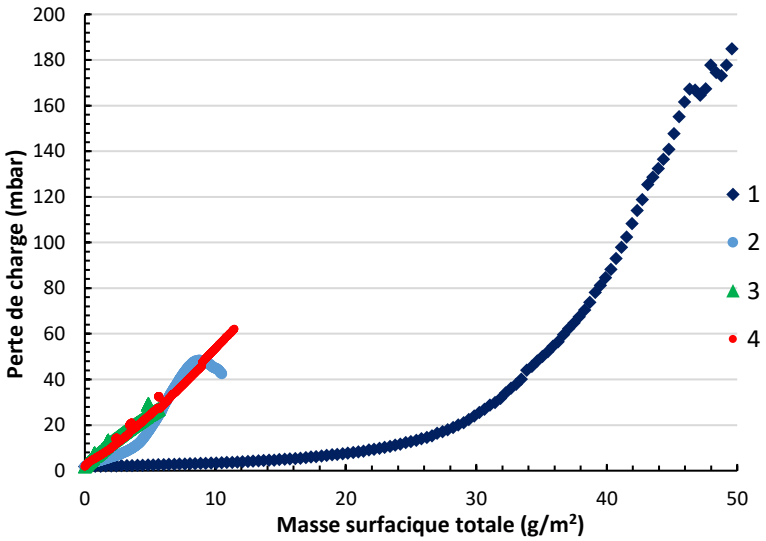


Figure 104 : Évolution de la perte de charge en fonction de la masse surfacique générée pour les quatre essais

La Figure 103 montre que pour les essais 2, 3 et 4 la masse surfacique totale générée est faible (< 12 $g.m^{-2}$). Les évolutions des courbes pour les essais 3 et 4 sont similaires jusqu' à une masse totale surfacique totale de 6 $g.m^{-2}$ pour l'essai 3. La perte de charge de l'essai 4 semble augmenter un peu plus rapidement à partir de 6 $g.m^{-2}$ ce qui est plutôt cohérent avec le fait que les analyses granulométriques ont montré une augmentation de la concentration en aérosol d'eau au cours du colmatage.

L'évolution de perte de charge de l'essai 2 est plus lente que pour les essais 3 et 4 jusqu'à une masse totale surfacique totale de 6 $g.m^{-2}$, puis elle augmente plus rapidement que l'essai 4 à partir de cette valeur. Le filtre se rompt pour une masse surfacique totale de 8 $g.m^{-2}$.

La Figure 104 montre que la masse surfacique totale générée est plus importante pour l'essai 1, ce qui est cohérent avec le fait que la masse d'aérosol d'eau générée est plus importante pour cet essai que pour les autres. La perte de charge augmente lentement jusqu'à une masse totale surfacique de 25 $g.m^{-2}$ puis une augmentation plus rapide est observée. L'augmentation de perte de charge pour des masses surfaciques totales inférieures à 12 $g.m^{-2}$ est beaucoup plus lente que pour les trois autres essais. Le filtre se rompt pour une masse surfacique totale de 50 $g.m^{-2}$.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de déterminer comment l'humidité de l'air (non saturée ou sursaturée) pouvait impacter la perte de charge d'un filtre THE lors de son colmatage par des particules de suies.

L'influence de l'humidité de l'air en filtration est complexe et il existe à l'heure actuelle peu d'études consacrées à ce sujet. De plus, la plupart des études s'y intéressant comparent l'influence de l'humidité en opposant particules non hygroscopiques et hygroscopiques (Joubert 2009; Gupta et al. 1993; Montgomery et al. 2015). Plus récemment, Ribeyre (2015) s'est intéressé à l'influence de l'humidité relative sur des dépôts de particules nanostructurées, sans étudier l'action de l'humidité pendant la formation du dépôt. De plus, aucune de ces études n'a pris en compte les gouttelettes d'eau. Par ailleurs, il n'existe que très peu d'études portant sur la filtration de mélanges d'aérosols liquides et solides à notre connaissance. Frising (2004) a effectué une première approche de l'évolution de la perte de charge dans ce cas avec la mise en évidence d'une évolution de la perte de charge en cinq étapes. Cependant, cette étude a été réalisée avec des particules solides d'alumine et des gouttelettes d'huile ce qui a « simplifié » les expériences, car les aérosols d'huile sont moins sensibles aux phénomènes d'évaporation ou de condensation et par conséquent plus faciles à stabiliser facilitant ainsi des conditions d'essais plus reproductibles.

La démarche adoptée dans ces travaux a été dans un premier de temps de mettre en place un banc d'essai permettant de :

- Caractériser les suies générées
- Colmater un filtre plan par des particules de suies de propriétés physico-chimiques différentes en air sec et à des taux d'humidité relatives jusque 90%
- Colmater un filtre plan par un mélange de particules de suies et de gouttelettes d'eau

La génération des particules de suie a été validée par comparaison à des résultats de caractérisations issus de la littérature. A l'issue de cette validation expérimentale, deux aérosols de suie bien caractérisés par Yon et al. (2015) et Bescond et al. (2014) en termes de diamètre primaire, rapport OC/TC et masse volumique ont été sélectionnés pour notre étude .

Une première étude de la filtration de particules de suies comparant la formation des gâteaux de ces deux suies en air sec et en air humide a été entreprise. Les résultats ont mis en

évidence que la formation des gâteaux de suie n'étaient pas modifiée par l'humidité de l'air conformément aux résultats déjà établis sur filtres plans par Nerisson et al. (2015).

L'étude s'est ensuite orientée vers l'influence de l'humidité relative sur des dépôts de particules de suies formés en air sec. Des chutes rapides de perte de charge ont été observées pour les deux suies. Il a pu être mis en évidence que les dynamiques de chute de perte de charge dépendent du taux d'humidité relative et de la perte de charge de colmatage du dépôt initialement formé. Les résultats ont montré que cette modification de perte de charge est irréversible ce qui vient confirmer que cette diminution est due à une restructuration du gâteau de particules. La restructuration peut être ou non homogène. Une restructuration non homogène pourrait amener à des modifications locales de la résistance voir à des micro-fracturations au sein du dépôt. Les causes de la réorganisation posent questions. Initialement, les résultats de la littérature (Joubert 2009; Montgomery et al. 2015) ont montré cette tendance pour des particules hygroscopiques, alors que la perte de charge n'était pas modifiée ou très peu (légère augmentation) pour des particules non hygroscopiques. Cette présente étude met clairement en évidence que ce phénomène de restructuration est possible avec des particules non hygroscopiques et même hydrophobes. Il reste donc un paramètre commun avec les particules de chlorure de sodium utilisées dans la littérature : leur taille. Il serait donc possible de faire diminuer la perte de charge sans diminuer l'efficacité sur un gâteau de particules peu importe la nature physico chimique des particules (ce qui ne veut pas dire que la nature des particules n'influence pas les paramètres de cette diminution). Ce résultat est intéressant, si le filtre est exposé à une augmentation importante de sa perte de charge en situation accidentelle notamment (incendie) alors il serait envisageable d'améliorer ponctuellement les performances du filtre par un passage d'air humide. L'étude menée par Ribeyre (2015) mettant en avant une augmentation très lente de la perte de charge du dépôt soumis à un air humide pose question et met en avant la complexité des phénomènes de réorganisation des gâteaux de particules. Il faut garder à l'esprit que les dépôts de l'étude de Ribeyre (2015) ont des épaisseurs très importantes comparativement à ceux de suies étudiés ici. Le nombre important de paramètres liés d'une part au gâteau (épaisseur, porosité, résistance), aux particules (diamètre de particules, diamètre de particule primaire, porosité de la particule si agrégat, propriétés physico-chimiques), mais aussi les forces s'exerçant sur le gâteau (plus la perte de charge augmente plus ces forces sont importantes) et les forces inter-particulaires rend l'analyse complexe. Il a été vu que plus la particule est petite, plus les forces de capillarités sont faibles, s'il y a condensation lors du passage de l'air humide alors il est peut-être plus facile de déstructurer le gâteau. Il serait intéressant de faire une analyse de sensibilité de paramètres afin de savoir quels sont les paramètres influents dans la réorganisation du gâteau.

Puis, la chute de perte de charge a été traduite par un modèle comportemental de deux manières : une approche statique et une approche dynamique.
Un modèle comportemental de l'évolution de la perte de charge lors du passage de l'air humide a été réalisé. Il traduit avec fidélité les résultats expérimentaux et a permis de mettre en avant des constantes de temps de l'ordre de 20 secondes pour l'ensemble des essais mais aussi, une relation de proportionnalité entre la chute de perte de charge (différence entre la perte de charge atteinte et la perte de charge de colmatage) et le taux d'humidité relative. Les variations de ces constantes ont été utilisées pour mettre en place un modèle qui permet de prédire l'évolution de la chute de perte de charge pour les deux suies considérées. Évidemment, ce modèle n'est pas universel et peut être amélioré. Afin de rendre ce modèle général, il faudrait obtenir des résultats avec des suies de diamètres différents et aussi d'autres types de particules (métalliques par exemple) et obtenir une variation des constantes en fonction du diamètre de particules et/ou du diamètre primaire.

Enfin, la dernière partie de l'étude s'intéresse à la filtration de mélanges d'aérosols de suies et d'eau. Les difficultés expérimentales rencontrées ont été mises en avant : non fiabilité des mesures granulométriques, non stabilité de l'aérosol d'eau, résultats non reproductibles. Néanmoins, il a été vu que plus la proportion est importante plus la perte de charge augmente rapidement avec une évolution type liquide pour les mélanges avec une proportion d'eau importante. Un résultat intéressant est le fait que lorsque la proportion d'eau est importante, il y'a un risque important de rupture du filtre. Ainsi, si des gouttelettes d'eau sont générées en situation accidentelle (avec en plus un apport de particules solides), il serait nécessaire de sécher le courant en amont du filtre pour prévenir la rupture ou alors peut être utiliser des filtres plus résistants de type métalliques par exemple.

Annexe 1. Calculs des concentrations massiques et de la masse surfacique générée

- Calculs des concentrations massiques Cm

  - *Par pesée sur filtre*

$$C_m = \frac{m_{dépôt}}{Q_{prélèvement}\Delta t}$$

Avec $m_{dépôt}$ la masse de dépôt de l'aérosol considéré (kg), $Q_{prélèvement}$ le débit de prélèvement ($m^3.s^{-1}$), Δt durée du prélèvement (s).

  - *Par analyse granulométrique*

Pour une taille de particule donnée, la concentration massique peut être calculée par la relation :

$$C_{m,i} = \frac{\pi\rho}{6} * C_{n,i} * d_{v,i}^3$$

Où $C_{n,i}$ est la concentration fractionnelle en nombre mesurée($\#.cm^{-3}$), ρ est la masse volumique du matériau ($kg.m^{-3}$), et d_v est le diamètre équivalent en volume des particules (m).

Pour une particule nanostructurée :

$$d_v = d_m * \left(\frac{\rho_{eff}}{\rho_p}\right)^{\frac{1}{3}}$$

Où d_{me} est le diamètre équivalent en mobilité électrique des particules, et ρ_e est la masse volumique effective des particules.

  - Calcul de la masse surfacique générée

$$m = \frac{\Delta t * Q_{massique}}{S_{tot}}$$

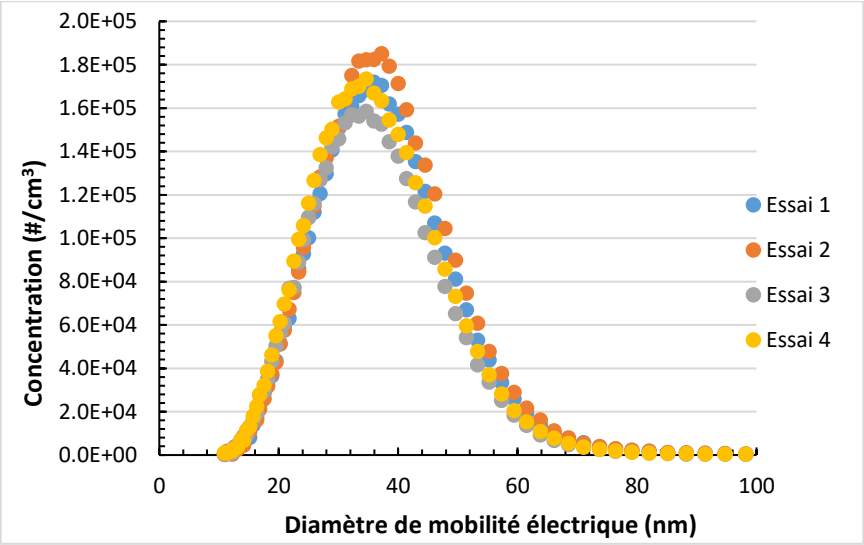
Annexe 2. Autre point de fonctionnement dans le cas de mélanges

Des essais de mélanges avec un autre point de fonctionnement du miniCAST que ceux caractérisés dans le manuscrit ont été faits. Les conditions opératoires sont données dans le tableau ci-dessous :

	Essai 1	**Essai 2**	**Essai 3**	**Essai 4**
Qgouttes (L/min)	30	27	24	20
Qextraction (L/min)	28	28	28	28
T (°C)	19.5	20	21.2	20
m_{filtre_vierge} *(g)*	1.014	1.016	1.014	1.004
m_{finale} *(g)*	2.111	2.059	2.057	1.996
m_{sec} *(g)*	1.015	1.016	1.014	1.14
m_{suies} *(g)*	0.001	0	0	0.136
m_{eau} *(g)*	1.096	1.043	1.043	0.856
Concentration$_{suies_totale}$ *(P/cm3)*	37123113	39449298	35189827	38269432
Concentration$_{suies_massique}$ *(mg/m3) (pesée)*	0.440	0	0	23.3
Concentration$_{gouttes_totale}$ *(P/cm3)*	11415	9940	92238	2180
Concentration$_{gouttes_massique}$ *(mg/m3)(granulométrie)*	*295*	*385*	*735*	*34,5*
Concentration$_{gouttes_massique}$ *(mg/m3) (pesée)*	*482*	*478*	*634*	*146*
Débit massique gouttes (mg/s)	0.145	0.143	0.190	0.044
Débit massique suies (mg/s)	0.00013	0	0	0.007
Débit volumique(m3/s)	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
delta t (s)	7580	7280	5480	19490

Les concentrations massiques montrent une fois de plus le problème de fiabilité de la mesure. Sur les essais 2 et 3, la masse de particules de suies étaient trop faible pour être mesurée par pesée. Concernant les concentrations massiques de gouttes d'eau, la comparaison entre les valeurs obtenues par l'analyse granulométrique et par la pesée ne concordent pas. Ces problèmes de fiabilités de mesures ont été un réel frein à l'avancé de la recherche de ces travaux.

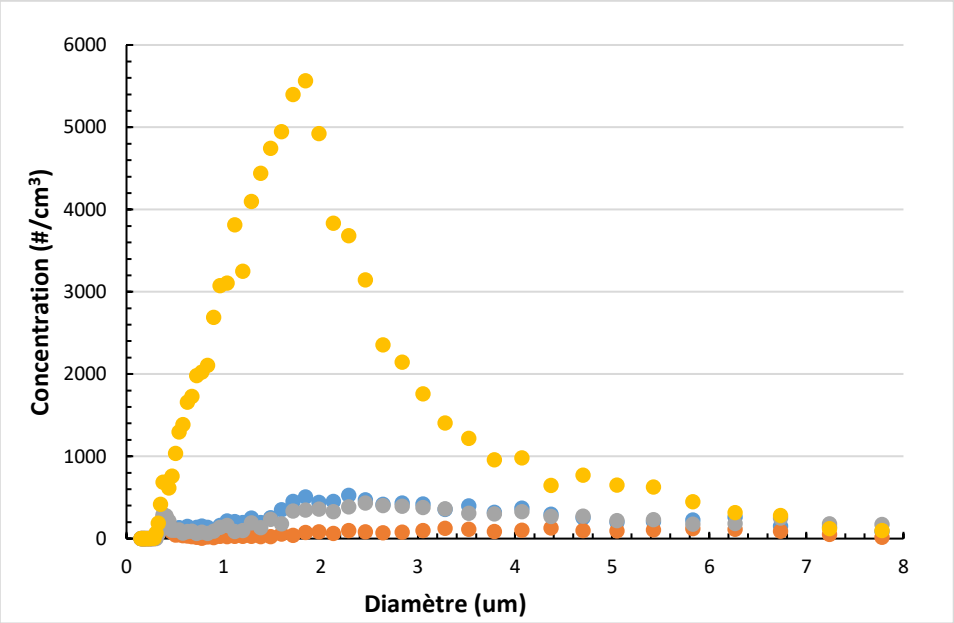
- *Granulométrie des suies des quatre essais*



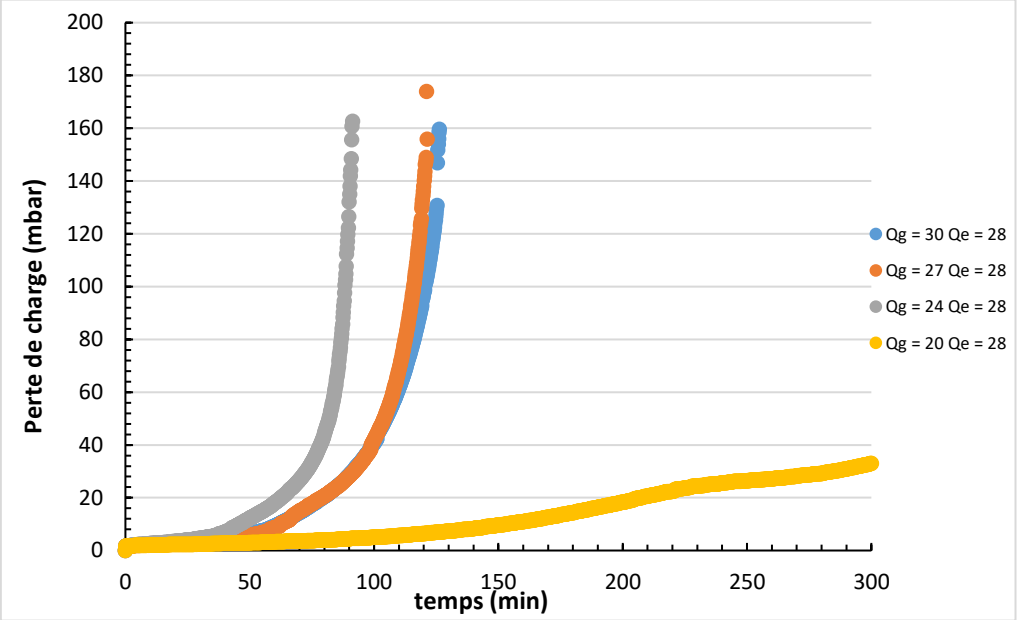
Ces granulométries sont réalisées avec le diluteur. Ce point de fonctionnement a une concentration trop importante pour le SMPS pouvoir comparer l'effet du diluteur sur la granulométrie. La mesure sans diluteur ne serait pas fiable.

- *Granulométriques des gouttelettes d'eau*

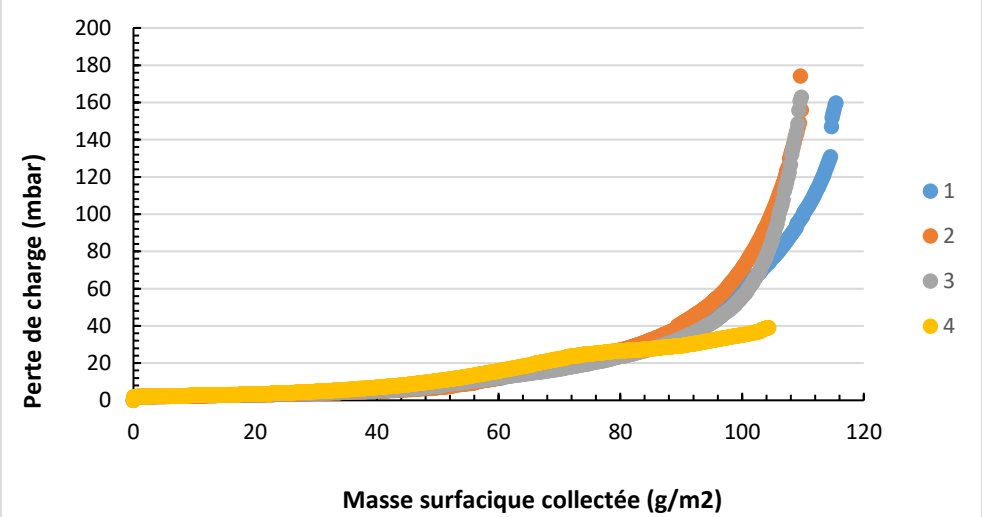
La figure ci-dessous représente la granulométrie des gouttelettes d'eau pour les quatre essais.



L'évolution de la perte de charge des quatre essais est représentée ci-dessous. Concernant les essais 1, 2 et 3, le filtre s'est rompu à chaque fois avant d'atteindre une phase de drainage.



L'évolution de la perte de charge en fonction de la masse surfacique totale générée est représentée ci-dessous pour les quatre essais.



Essais 1, 2 et 3 :

L'évolution de perte de charge de ces essais est caractéristique d'une évolution en filtration d'aérosols liquide. En effet, dans un premier temps la perte de charge augmente lentement, puis un changement dans sa variation est observé par la présence d'un point d'inflexion et enfin une augmentation exponentielle apparaît. La phase de drainage n'a pas pu être atteinte car le filtre s'est rompu à une perte de charge de 160 mbar.

Références

Barthazy, E., O. Stetzer, C. Derungs, S. Wahlen, et U. Lohmann. 2007. « Characterization of a Propane Soot Generator ». In *Nucleation and Atmospheric Aerosols*, 834- 39. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6475-3_165.

Bescond, A., J. Yon, F. X. Ouf, D. Ferry, D. Delhaye, D. Gaffié, A. Coppalle, et C. Rozé. 2014. « Automated Determination of Aggregate Primary Particle Size Distribution by TEM Image Analysis: Application to Soot ». *Aerosol Science and Technology* 48 (8): 831- 41. https://doi.org/10.1080/02786826.2014.932896.

Bourrous, S., L. Bouilloux, F. -X. Ouf, P. Lemaitre, P. Nerisson, D. Thomas, et J. C. Appert-Collin. 2016. « Measurement and modeling of pressure drop of HEPA filters clogged with ultrafine particles ». *Powder Technology* 289 (février): 109- 17. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.020.

Bredin, A., R. A. O'Leary, et B. J. Mullins. 2012. « Filtration of soot-in-oil aerosols: Why do field and laboratory experiments differ? » *Separation and Purification Technology* 96 (août): 107- 16. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.05.023.

Brown, RC. 1993. « Air Filtration : an integrated approach to the theory and applications of fibrous filter. Pergamon Press ». 1993. https://www.elsevier.com/books/air-filtration/brown/978-0-08-041274-0.

Cadavid Rodriguez, M. C. 2015. « Les laveurs : une alternative aux médias fibreux pour le traitement des nanoparticules issues des fumées de métallisation ? », Université de Lorraine.

Callé, S. 2000. « Etude des performances des media filtrants utilisés en dépoussiérage industriel ». Vandoeuvre-les-Nancy, INPL. http://www.theses.fr/2000INPL091N.

Charvet, A., Y. Gonthier, A. Bernis, et E. Gonze. 2008. « Filtration of liquid aerosols with a horizontal fibrous filter ». *11th Congress of the French Chemical Engineering Society* 86 (6): 569- 76. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2007.11.008.

Charvet, A., Y. Gonthier, E. Gonze, et A. Bernis. 2010. « Experimental and modelled efficiencies during the filtration of a liquid aerosol with a fibrous medium ». *Chemical Engineering Science* 65 (5): 1875- 86. https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.11.037.

Charvet, A., S. Pacault, S. Bourrous, et D. Thomas. 2018. « Association of Fibrous Filters for Aerosol Filtration in Predominant Brownian Diffusion Conditions ». *Separation and Purification Technology* 207 (décembre): 420- 26. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.045.

Contal, P, J Simao, D Thomas, T Frising, S Callé, J.C Appert-Collin, et D Bémer. 2004. « Clogging of fibre filters by submicron droplets. Phenomena and influence of operating conditions ». *Journal of Aerosol Science* 35 (2): 263- 78. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.07.003.

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

Del Fabbro, L., P. Brun, J. C. Laborde, J. Lacan, A. Renoux, et L. Ricciardi. 2000. « Study of the clogging of industrial pleated filters by solid particles ». *Journal of Aerosol Science*, European Aerosol Conference 2000, 31 (septembre): 210- 11. https://doi.org/10.1016/S0021-8502(00)90217-9.

Frising, T. 2004. « Étude de la filtration des aérosols liquides et de mélanges d'aérosols liquides et solides ». Vandoeuvre-les-Nancy, INPL. http://www.theses.fr/2004INPL077N.

Frising, T., D. Thomas, D. Bémer et P. Contal. 2005. « Clogging of fibrous filters by liquid aerosol particles: Experimental and phenomenological modelling study ». *Chemical Engineering Science* 60 (10): 2751- 62. https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.12.026.

Gougeon, R. 1994. « Filtration des aérosols liquides par les filtres à fibres en régimes d'interception et d'inertie ». Université Paris-Est Créteil Val de Marne (UPEC). http://www.theses.fr/1994PA120049.

Gupta, A., V.J. Novick, P. Biswas, et P. R. Monson. 1993. « Effect of Humidity and Particle Hygroscopicity on the Mass Loading Capacity of High Efficiency Particulate Air (HEPA) Filters ». *Aerosol Science and Technology* 19 (1): 94- 107. https://doi.org/10.1080/02786829308959624.

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

Hsiao, T., et D. Chen. 2015. « Experimental observations of the transition pressure drop characteristics of fibrous filters loaded with oil-coated particles ». *Separation and Purification Technology* 149 (juillet): 47- 54. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.029.

Joubert, A., J. C. Laborde, L. Bouilloux, S. Callé-Chazelet, et D. Thomas. 2010. « Influence of Humidity on Clogging of Flat and Pleated HEPA Filters ». *Aerosol Science and Technology* 44 (12): 1065- 76. https://doi.org/10.1080/02786826.2010.510154.

Joubert, A., J. C. Laborde, L. Bouilloux, S. Chazelet, et D. Thomas. 2011. « Modelling the pressure drop across HEPA filters during cake filtration in the presence of humidity ». *Chemical Engineering Journal* 166 (2): 616- 23. https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.033.

Joubert, A. 2009. « Performances des filtres plissés à Très Haute Efficacité en fonction de l'humidité relative de l'air ». Vandoeuvre-les-Nancy, INPL. http://www.theses.fr/2009INPL081N.

Kampa, D., S. Wurster, J. Meyer, et G. Kasper. 2015. « Validation of a new phenomenological "jump-and-channel" model for the wet pressure drop of oil mist filters ». *Chemical Engineering Science* 122 (janvier): 150- 60. https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.09.021.

Kulkarni, P., P. A. Baron et K. Willeke. 2011. « Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications ». John Wiley & Sons.

Liew, T. P., et J. R. Conder. 1985. « Fine mist filtration by wet filters—I. Liquid saturation and flow resistance of fibrous filters ». *Journal of Aerosol Science* 16 (6): 497- 509. https://doi.org/10.1016/0021-8502(85)90002-3.

Lifshitz, EM. 1956. « The theory of molecular attractive forces between solids. Soviet Physics 2:73-83 ». 1956. https://inspirehep.net/record/47897/citations?ln=fr.

Lintis, L. 2018. « Etude des phénomènes de sorption de l'eau sur des aérosols solides émis lors d'un incendie : ». Université de Lorraine.

Marchand, D. 2008. « Etude du rabattement des produits de fission sous forme aérosol par une pulvérisation de gouttelettes d'eau générée par un système d'aspersion de REP ». Thesis, St Etienne du Rouvray, INSA. http://www.theses.fr/2008ISAM0008.

Miguel, A. F. 2003. « Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles ». *Journal of Aerosol Science* 34 (6): 783- 99. https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00027-2.

Mocho, V. M., L. Bouilloux, et S. Gmajner. 2007. « Facteurs influençant le colmatage des filtres THE industriels par les aérosols formés en cas de feux de différents matériaux - Google Scholar ». 2007.

Montgomery, James F., Sheldon I. Green, et Steven N. Rogak. 2015. « Impact of Relative Humidity on HVAC Filters Loaded with Hygroscopic and Non-Hygroscopic Particles ». *Aerosol Science and Technology* 49 (5): 322- 31. https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1026433.

Mouret, G. 2008. *Étude de la filtration des aérosols nanométriques*. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL. http://www.theses.fr/2008INPL063N.

Nerisson, P, et O Nouri. 2015. « Clogging of Flat and Pleated HEPA Filters With Soot Particles: Effect of Relative Humidity. ».

Novick, V. J., P. R. Monson, et P. E. Ellison. 1992. « The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters ». *Journal of Aerosol Science* 23 (6): 657- 65. https://doi.org/10.1016/0021-8502(92)90032-Q.

Ouf, F. -X., V. -M. Mocho, S. Pontreau, Z. Wang, D. Ferry, et J. Yon. 2015. « Physicochemical properties of aerosol released in the case of a fire involving materials used in the nuclear industry ». *Journal of Hazardous Materials* 283 (février): 340- 49. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.043.

Payet, S. 1991. «Filtration stationnaire et dynamique des aérosols liquides submicroniques. » Université Paris-Est Créteil Val de Marne (UPEC). http://www.theses.fr/1991PA120047.

Penicot, P., D. Thomas, P. Contal, D. Leclerc, et J. Vendel. 1999. « Clogging of HEPA fibrous filters by solid and liquid aerosol particles: An experimental study ». *Filtration & Separation* 36 (2): 59- 64. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(99)80036-6.

Penicot-Bauge, P. 1998. « Étude de la performance de filtres à fibres lors de la filtration d'aérosols liquides ou solides submicroniques ». Thèse de doctorat, Nancy, France: Laboratoire des sciences du génie chimique.

Popovicheva, O B, N M Persiantseva, V Tishkova, N K Shonija, et N A Zubareva. 2008. « Quantification of Water Uptake by Soot Particles ». *Environmental Research Letters* 3 (2): 025009. https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/2/025009.

Raynor, Peter C., et David Leith. 2000. «The influence of accumulated liquid on fibrous filter performance». *Journal of Aerosol Science* 31 (1): 19- 34. https://doi.org/10.1016/S0021-8502(99)00029-4.

Renoux, A., et D. Boulaud. 1998. Les aérosols: physique et métrologie. Tec & Doc Lavoisier.

Ribeyre, Q. 2015. «Influence de l'humidité de l'air sur la perte de charge d'un dépôt nanostructuré». Université de Lorraine. http://www.theses.fr/2015LORR0056.

Ricketts, C. I., M. Schneider, et J. G. Wilhelm. 1991. « Mathematical models for changes in HEPA filter pressure drop caused by high air humidity ». http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:22085430.

Rosati, J., D. Leith, et P. Raynor. 1999. « Determinants of Filter Lifetime ». *Filtration & Separation* 36 (10): 30- 32.

Thomas, D. 2001. « Etude de la filtration des aérosols par des filtres à fibres. Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université Henri Poincaré de Nancy. »

Thomas, D., F. X. Ouf, F. Gensdarmes, S. Bourrous, et L. Bouilloux. 2014. « Pressure drop model for nanostructured deposits ». *Separation and Purification Technology* 138 (décembre): 144- 52. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.032.

Thomas, D., P. Penicot, P. Contal, D. Leclerc, et J. Vendel. 2001. « Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles Experimental and modelling study ». *Chemical Engineering Science* 56 (11): 3549- 61. https://doi.org/10.1016/S0009-2509(01)00041-0.

Walsh, D. C., J. I. T. Stenhouse, K. L. Scurrah, et A. Graef. 1996. « The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance ». *Journal of*

Aerosol Science, Abstracts of the 1996 European Aerosol Conference, 27 (septembre): S617- 18. https://doi.org/10.1016/0021-8502(96)00381-3.

Walsh, Declan C. 1996. « Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load ». *Filtration & Separation* 33 (6): 501- 6. https://doi.org/10.1016/S0015-1882(97)84316-9.

Weingartner, E., H. Burtscher, et U. Baltensperger. 1997. « Hygroscopic properties of carbon and diesel soot particles ». *Atmospheric Environment* 31 (15): 2311- 27. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00023-X.

Yon, J., A. Bescond, et F. -X. Ouf. 2015. « A simple semi-empirical model for effective density measurements of fractal aggregates ». *Journal of Aerosol Science* 87 (septembre): 28- 37. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2015.05.003.

Résumé en français

L'épuration de l'air contaminé par les particules générées par de nombreux procédés industriels fait le plus souvent appel à la filtration au moyen de médias filtrants. Ces équipements collectifs de protection des personnes et de l'environnement sont éprouvés en termes d'efficacité initiale mais leur comportement au cours du temps reste difficilement prévisible. Ce constat est d'autant plus vrai lorsque ces dispositifs sont confrontés à un aérosol diphasique constitué de particules solides et liquides. Ces situations peuvent notamment être rencontrées lors de l'usinage de métaux, l'épandage de pesticides ou encore lors d'incendie dans des zones confinées comme les centrales nucléaires.

L'étude proposée visera à établir les performances d'un média fibreux vis à vis d'aérosols diphasiques composés de particules solides nanostructurées et de gouttelettes (submicroniques ou microniques). Si la filtration d'aérosols solides ou d'aérosols liquides seuls est relativement bien documentée dans la littérature, aucune étude ne s'est intéressée à cette problématique d'aérosols diphasiques (surtout en termes de colmatage). Pour de forts ratios solide/liquide, l'évolution temporelle de la perte de charge devrait se rapprocher de celle d'un filtre soumis à des aérosols solides, à savoir une augmentation quasi-linéaire au cours du temps. Dans le cas d'un aérosol majoritairement constitué de gouttelettes, une stabilisation de la perte de charge, caractérisée par un état d'équilibre entre le débit massique de gouttelettes collectées et le débit de liquide drainé sur la face aval du filtre, pourrait être envisagée. Mais quid de l'évolution de la perte de charge entre ces deux extremums ?

La détermination de l'évolution temporelle de l'efficacité de collecte est tout aussi incertaine et de plus se heurte à un véritable verrou métrologique. Une mesure fine et fiable de la concentration et de la distribution granulométrique d'un aérosol constitué d'agglomérats nanostructurés est déjà relativement complexe. La présence de gouttelettes rendra la mesure d'autant plus difficile car pourrait être à l'origine d'une modification de la distribution granulométrique des particules solides au cours de leur transport (impaction, condensation). De plus, la caractérisation d'un aérosol diphasique nécessitera le couplage de différents granulomètres basés sur des principes de mesure différents de façon à faire la distinction entre les particules liquides et solides.

L'objectif de cette thèse a ainsi pour but de pallier l'absence de connaissance sur la filtration d'aérosols diphasiques dans une double optique de protection des personnes et de l'environnement.

Résumé en anglais

One of the most frequently used methods to purify air contaminated by particles, in many industrial processes, is filter media. These collective equipment for protecting people and the environment are proven in terms of initial efficiency, but their behavior over time remains difficult to predict. This is all the more noticeable when these devices are confronted with a biphasic aerosol composed of solid and liquid particles. These situations can be encountered during metals machining, pesticides spreading or even during fires in confined areas such as nuclear power plants.

The proposed study will aim to establish the performance of a fibrous media with respect to biphasic aerosols with nanostructured solid particles and droplets (submicron or micron-sized). If the filtration of solid aerosols or liquid aerosols is relatively well documented in the literature, no study has been interested in this problem of biphasic aerosols. For high solid / liquid ratios, the time course of the pressure drop should be close to solid aerosols filtration evolution, ie a quasi-linear increase over time. In the case of an aerosol predominantly made up of droplets, a constant pressure drop overtime, characterized by a state of equilibrium between the mass flow rate of collected droplets and the flow rate of liquid drained on the downstream face of the

filter, could be considered . But what about the evolution of the pressure drop between these two extremes?

The determination of the temporal evolution of the collection efficiency is also uncertain and should be regarded as a real metrological challenge.