UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

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 bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

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

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE l'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : Génie des Procédés, des Produits et des Molécules

par **Elise CABASET**

Sous la direction du Pr. Dominique THOMAS

Influence de la structure géométrique des médias filtrants sur leurs performances (efficacité et perte de charge) - Approches numérique et expérimentale

Soutenue le 05 novembre 2025

Membres du jury :

Directeur de thèse :	**Dominique THOMAS**	**Professeur à l'Université de Lorraine, Nancy**
Rapporteurs :	**Laurence LE COQ**	**Professeur à l'IMT, Nantes**
	Jean-Francis BLOCH	**Maitre de conférences à Grenoble INP, Saint Martin d'Hères**
Présidente du jury :	**Evelyne GONZE**	**Professeur à l'Université Savoie Mont Blanc, Chambéry**
Examinateurs :	**Philippe VROMAN**	**Maître de conférences à l'Université de Lille, Roubaix**
	Sandrine CHAZELET	**Responsable d'études à l'INRS, Vandoeuvre**
	Augustin CHARVET	**Professeur à l'Université de Lorraine, Nancy**
	Nathalie BARDIN-MONNIER	**Maître de conférences à l'Université de Lorraine, Nancy**
Membre invité :	**Christian DESQUILLES**	**Docteur, Applications Manager Europe chez Lydall**

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements aux rapporteurs de ma thèse, Laurence Le Coq et Jean-Francis Bloch, pour avoir accepté d'évaluer ce travail et de consacrer de leur temps à la lecture attentive de mon manuscrit.

J'exprime également ma gratitude à Évelyne Gonze, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury. Je remercie également Sandrine Chazelet et Philippe Vroman pour avoir accepté de participer à l'évaluation de cette thèse et de prendre part à ma soutenance.

Je souhaite aussi remercier l'entreprise Alkegen, et plus particulièrement Christian Desquilles, pour la fourniture des fibres ainsi que pour l'aide expérimentale précieuse apportée lors de la fabrication des formettes.

Que serait une doctorante sans son équipe de thèse ?

Tous mes remerciements vont à mon directeur de thèse, Dominique Thomas, dont la rigueur scientifique et le sens du détail m'ont poussée à me dépasser tout au long de ces trois années. Son exigence, toujours accompagnée de sa confiance, m'ont permis de gagner en autonomie. De mon professeur de mécanique des fluides à l'IUT jusqu'à mon directeur de thèse, je lui suis reconnaissante pour son partage scientifique et ses conseils avisés.

Je tiens également à remercier Augustin Charvet, qui m'a accompagné depuis la naissance de mon intérêt pour le monde de la recherche, lorsque j'étais étudiante à l'IUT, jusqu'à maintenant en tant que co-encadrant de ma thèse. Je lui suis profondément reconnaissante pour son soutien, sa rigueur scientifique, ainsi que pour l'écoute attentive et bienveillante dont il a toujours fait preuve, en particulier dans les moments de doute qui jalonnent ce parcours parfois éprouvant mais enrichissant qu'est la thèse.

J'adresse enfin mes remerciements à Nathalie Bardin-Monnier, qui m'a fait don sans réserve de son temps précieux, et a toujours fait de son mieux pour être impliquée durant ces trois années.

D'une manière plus générale, j'aimerais remercier le LRGP, au sein duquel j'ai eu la chance de réaliser ma thèse, et plus particulièrement les membres de l'axe Perseval que j'ai eu le plaisir de côtoyer et avec qui j'ai pu partager des moments conviviaux autour des pauses café durant ces trois années : Olivier, Léa, Rémi, Baptiste, Marie-Odile et Marie-Noelle.

Je tiens également à remercier mes stagiaires, Maelis et Carla, pour leur aide précieuse dans la partie expérimentale de cette thèse. Leur implication et leur sérieux ont grandement facilité l'avancée de mes travaux.

De façon moins formelle, je suis extrêmement reconnaissante d'avoir eu à mes côtés, au laboratoire, mon trio préféré : Mathilde (Grumpix), Chloé (Photosynthésix) et Adrien (Triphasix). Merci pour tous ces repas partagés en « subissant » les innombrables jeux en anglais de Mathilde (que nous avons finalement tous appris à apprécier), pour les multiples pauses thés, pour nos discussions et pour l'aide mutuelle sur nos travaux respectifs. Votre présence a été un soutien précieux tout au long de ces trois années, dans les bons comme dans les mauvais moments, et je n'aurais pas pu rêver meilleure compagnie pour traverser cette aventure. J'aimerais également remercier José, Omar, Margarita, Madi, Eglé et Audrey qui, au-delà d'être de précieux collègues, sont devenus de très bons amis.

Je souhaite aussi adresser mes remerciements au Bureau des Jeunes Chercheurs (BJC), dans lequel j'ai eu la chance de m'impliquer et de travailler. Merci à tous les doctorants et ex-doctorants qui l'ont composé et que je n'ai pas encore cités : Morgane, Fabiola, Ryma, Nicolas, Luis, Séphora, Laure, Benjamin, Darrick, Miguel, Lilian, Juan David, Ugo, Apolline, Ruddybel, Alvina, et bien d'autres encore. J'ai beaucoup apprécié ces échanges, cette convivialité et cette belle énergie collective. Je sais que la suite de l'organisation du bureau est entre de bonnes mains.

Je remercie mes amies de toujours, Fanny et Zoé, pour tous les bons moments partagés à Nancy qui m'ont permis de décompresser. Depuis le début du collège jusqu'à aujourd'hui, tant de choses se sont passées dans nos vies, et je suis heureuse que vous soyez toujours là à mes côtés. Je remercie également mes amies pour leur soutien : Margaux B. Margaux M. (ie. Dupont et Dupond), Marion, Aline, ainsi qu'Audrey pour avoir été ma « coach de doctorat ».

Je tiens à remercier ma famille, mes parents et mon frère, qui m'ont soutenue et accompagnée depuis toujours. Promis, c'est terminé maintenant, je m'arrête là ! Je remercie également ma belle-famille pour leur encouragement et leur soutien tout au long de cette période. Tout particulièrement, j'aimerais adresser quelques mots à Léa. J'ai la chance non seulement de t'avoir comme belle-sœur, mais aussi d'avoir partagé avec toi cette aventure doctorale. Merci pour ton soutien et pour tous ces encouragements mutuels qui nous ont aidé à traverser ensemble les hauts et les bas de la thèse. Quand bien même je n'ai pas toujours saisi toutes les nuances de la prosopopée, ni toi celles de la filtration, nous avons toujours su nous encourager. J'ai hâte d'assister à ta soutenance et de te voir clôturer à ton tour ce beau chapitre.

Une pensée particulière pour mon chat, Gaïa, qui m'a accompagnée durant ces longues périodes de rédaction à la maison, dont la présence, malgré son caractère bien affirmé, m'a toujours apporté du réconfort.

Pour finir, je tiens surtout à remercier mon conjoint, Rémi, pour son soutien inconditionnel tout au long de cette épreuve. Je ne saurais exprimer avec de simples mots toute ton implication dans ma vie et dans la réussite de cette thèse. Merci d'avoir toujours été présent, patient et bienveillant, même dans les moments les plus difficiles. Je t'aime très fort.

En souvenir de mon papi,
de tata Wowo et de François

Table des matières

Introduction....1

Chapitre 1 : État de l'art....5

1.1 Médias fibreux : production et caractérisation....7

1.1.1 Définition d'un média fibreux non-tissé....7

1.1.2 Fabrication des non-tissés....8

1.1.3 Caractérisation d'un média fibreux....11

1.2 Perte de charge et perméabilité initiale d'un média fibreux....14

1.2.1 Perte de charge d'un média fibreux....14

1.2.2 Caractérisation de la continuité du milieu....15

1.2.3 Modélisation de la perméabilité (régime continu)....17

1.2.4 Modélisation de la perméabilité (régime non-continu)....23

1.3 Efficacité de collecte initiale d'un média fibreux....24

1.3.1 Définitions....24

1.3.2 Mécanismes de collecte....25

1.3.3 Modélisation de l'efficacité unitaire par diffusion....28

1.3.4 Modélisation de l'efficacité unitaire par interception....32

1.3.5 Modélisation de l'efficacité unitaire par inertie....34

1.4 Conclusion....36

Chapitre 2 : Simulation numérique des performances d'un média filtrant....37

2.1 Introduction à la CFD et généralités sur GeoDict....38

2.2 Modélisation numérique de microstructures fibreuses....40

2.3 Simulation de l'écoulement à travers les médias fibreux....42

2.4 Simulation numérique de la collecte de particule....45

2.5 Analyse de sensibilité des paramètres de simulation....48

2.5.1 Résolution du maillage....49

2.5.2 Dimension du domaine de simulation....52

2.5.3 Dimension des zones d'établissement de l'écoulement....57

2.5.4 Nombre de particules....58

2.6 Conclusion....60

Chapitre 3 : Simulation numérique de l'écoulement à travers des médias fibreux....61

3.1 Distribution monomodale de fibres....62

3.2 Distribution bimodale de fibres 65
3.2.1 Plan d'expérience 65
3.2.2 Modèles de la littérature 67
3.2.3 Développement d'un nouveau modèle de perméabilité 69
3.2.4 Validation du modèle de perméabilité avec des données numériques et expérimentales de la littérature 71
3.3 Extension du modèle de perméabilité à des distributions multimodales 75
3.3.1 De bimodales à décamodales… 75
3.3.2 … jusqu'à des distributions multimodales 76
3.4 Prise en compte du glissement 78
3.4.1 Stratégie 78
3.4.2 Distributions monomodales 79
3.4.3 Distributions multimodales 83
3.5 Conclusion 84
Chapitre 4 : Confrontation du modèle aux valeurs de perméabilités expérimentales 87
4.1 Médias fibreux modèles 88
4.1.1 Fabrication de médias fibreux 88
4.1.2 Caractérisation des médias 91
4.1.3 Mesure expérimentale de la perméabilité 102
4.2 Comparaison des données expérimentales au modèle 107
4.2.1 Analyse des incertitudes 107
4.2.2 Médias de distribution monomodales 116
4.2.3 Médias de distributions bimodales 119
4.3 Conclusion 127
Chapitre 5 : Simulation numérique de l'efficacité de médias fibreux 129
5.1 Modèles prédictifs d'efficacité de filtration unitaire 130
5.1.1 Simulation numérique des mécanismes de filtration 130
5.1.2 Efficacité de collecte par diffusion 132
5.1.3 Efficacité de collecte par interception 138
5.1.4 Efficacité de collecte par inertie 143
5.2 À la recherche d'une structure fibreuse optimale 148
5.2.1 Structures iso-perméables 148

5.2.2 Influence des caractéristiques structurales de médias iso-perméables sur l'efficacité de filtration 151

5.2.3 Figure de mérite 158

5.3 Conclusion 162

Conclusion générale et perspectives 163

Nomenclature 167

Liste des figures 171

Liste des tableaux 180

Références bibliographiques 183

Annexes 191

Annexe 2-A : Résolution du maillage 192

Annexe 3-A : Structures microniques modélisées via GeoDict 194

Annexe 3-B : Modèle de la littérature (Davies et Jackson et James) 196

Annexe 3-C : Structures submicroniques modélisées via GeoDict 198

Annexe 4-A : FSD des médias fibreux modèles 201

Annexe 4-B : Modélisation de l'épaisseur des formettes selon la contrainte appliquée 203

Annexe 5-A : Modélisation des efficacités unitaires par diffusion par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale) 205

Annexe 5-B : Modélisation des efficacités unitaires par interception par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale) 207

Annexe 5-C : Modélisation des efficacités unitaires par inertie par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale) 209

Annexe 5-D : Structures iso-perméables de même compacité et même diamètre équivalent 211

Annexe 5-E : Structures iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différents 213

Introduction

En ingénierie des procédés, la filtration est un processus fondamental, consistant à séparer une phase dispersée d'une phase continue à l'aide d'un dispositif spécifique. Dans le domaine de la séparation gaz/particule, de nombreux procédés de filtration existent, comprenant les laveurs, les électrofiltres, les séparateurs mécaniques (comme les cyclones) ou encore les séparateurs à couches filtrantes, tels que les membranes, les lits granulaires et les médias fibreux. Ces derniers jouent un rôle clé dans de nombreuses applications exigeant une purification efficace de l'air, allant de la ventilation générale (filtration d'habitacle automobile ou aéronautique, centrale de traitement d'air) à la protection individuelle et collective (équipements de protection respiratoire, assainissement des lieux de travail, salles blanches), en passant par l'épuration industrielle pour le respect des normes de rejet (dépoussiéreurs à manches filtrantes). Ils garantissent ainsi la qualité des fluides, la protection des équipements et la sécurité des opérateurs.

Cette capacité des médias fibreux à purifier l'air est indispensable face à l'augmentation constante de la pollution atmosphérique, un enjeu sanitaire et environnemental majeur. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé [1], la pollution de l'air est responsable de près de 7 millions de décès prématurés par an à l'échelle mondiale, en affectant aussi bien les environnements intérieurs (bâtiments, véhicules) qu'extérieurs (émissions industrielles, trafic urbain). En France, Santé publique France [2] attribue 7 % de la mortalité totale de la population française à la pollution de l'air. En particulier, les aérosols et les particules fines (PM1, PM2,5 et PM10[1]) ont des répercussions importantes, tant sur la santé en favorisant des maladies respiratoires et cardiovasculaires, que sur l'environnement, où ils participent au changement climatique [1]. Par ailleurs, la crise du Covid-19 a mis spécifiquement en lumière les risques pandémiques liés aux aérosols, renforçant l'importance des systèmes de filtration pour limiter la transmission de pathogènes, tant au niveau collectif (ventilation, salle blanche) qu'individuel (port de masques) [3,4]. Dans ce cadre, les filtres jouent un rôle essentiel permettant de respecter des normes strictes comme la directive européenne 2008/50/EC [5] sur les rejets ou l'ISO 16890 [6] pour la ventilation générale, afin de protéger la santé publique et réduire l'empreinte écologique des activités humaines.

Au-delà des enjeux sanitaires et environnementaux, le choix et la conception des filtres répondent aussi à des impératifs économiques face à la hausse continue du coût de l'énergie et aux problèmes de dépendance énergétique. Selon le Conseil Mondial de l'Énergie, la consommation énergétique mondiale devrait croître à son rythme actuel pendant encore plus de 50 ans [7]. À titre d'exemple, la ventilation dans les bâtiments représente environ 30 % des coûts énergétiques totaux du système, dont une part significative est liée aux filtres. Selon une analyse de Camfil [8], le coût du cycle de vie d'un filtre est dominé par la consommation

[1] Particules fines de diamètre aérodynamique inférieur ou égal à 1µm (PM1), 2,5 µm (PM2,5) et 10 µm (PM10).

énergétique (70 %), suivie par le coût du filtre (15 %), le nettoyage du système de ventilation (8 %), la main d'œuvre correspondant à l'installation et au remplacement (5 %) et le coût des déchets (2 %). Ce coût énergétique est directement proportionnel à la perte de charge du filtre, Camfil estimant qu'une perte de charge de 1 Pa correspond approximativement à un coût de 1 € par an [8].

Ces impératifs économiques, parmi lesquels la perte de charge des filtres joue un rôle déterminant sur les coûts énergétiques, mettent en évidence les défis techniques inhérents à la conception des médias fibreux. Les utilisateurs de médias filtrants cherchent ainsi un équilibre optimal entre efficacité, perte de charge et coûts de fabrication : *« The perfect filter would have no pressure drop, hold an unlimited amount of dirt, be small enough to fit anywhere in a system, […] have high capture efficiency and cost nothing. Obviously, this combination cannot exist, and the pursuit of the perfect compromise has always been the challenge for filter manufacturers. »* I. Sheffield [9].

Cette citation illustre le défi auquel est confronté les fabricants de filtres : trouver un équilibre optimal entre des exigences contradictoires. La conception des médias filtrants, visant à atteindre les caractéristiques d'un filtre dit « idéal », demeure encore une problématique scientifique et technologique au cœur de nombreuses études, où les compromis entre performances, contraintes énergétiques et coûts de fabrication sont au cœur des enjeux.

Les performances des médias fibreux, notamment l'efficacité de filtration et la perte de charge, sont fortement influencées par la formation de la structure fibreuse, incluant des propriétés liées aux fibres (diamètre, longueur, orientation) ainsi que des caractéristiques globales du média (compacité, épaisseur, hétérogénéité, présence de liant ou d'additif), sans oublier la mise en forme du média fibreux dans le filtre. Ainsi, la complexité de ces structures fibreuses rend difficile, pour une application donnée, l'identification d'un média optimal nécessitant un équilibre entre les dépenses énergétiques, les coûts de fabrication, les ressources utilisées et les performances souhaitées (efficacité, perte de charge, durée de vie, résistance mécanique). Il est donc nécessaire d'établir des modèles mathématiques couvrant une large gamme de structures fibreuses reliant les performances souhaitées aux caractéristiques structurales des médias fibreux. Par exemple, on peut recenser dans la littérature deux types de modèles de perte de charge : des modèles théoriques basés sur une structure idéalisée de fibres avec une distribution monodisperse et des modèles empiriques où la distribution granulométrique n'est pas prise en compte, et bien souvent assimilée à un diamètre moyen ou équivalent qui peut différer selon les modèles. Pourtant, les médias filtrants industriels sont souvent composés de fibres de différents diamètres : des fibres fines, favorisant l'efficacité de collecte des particules, et des fibres grossières, assurant la rigidité mécanique du média. De plus, comme l'ont montré Singha et al. [10], chacun de ces diamètres de fibres est généralement polydispersé, en suivant une distribution loi log-normale.

Cette thèse, intitulée *Influence de la structure géométrique des médias filtrants sur leurs performances (efficacité et perte de charge) – approches numérique et expérimentale*, s'inscrit dans cette optique de recherche d'un média optimal et vise ainsi à étudier l'impact des propriétés structurales des médias, en particulier la distribution des diamètres de fibres et la compacité, sur les performances des médias fibreux, en se concentrant particulièrement sur l'efficacité de filtration et la perte de charge initiale. Le manuscrit s'articulera autour de cinq chapitres.

Le premier chapitre dresse un état de l'art sur les médias fibreux, en s'intéressant plus particulièrement aux médias non tissés. Les procédés de fabrication et les méthodes de caractérisation des propriétés structurales, telles que le grammage, l'épaisseur, la compacité et la distribution des diamètres de fibres, sont présentés. La seconde partie de ce chapitre examine les modèles prédictifs existants pour évaluer les performances des médias fibreux, notamment les modèles de perte de charge (perméabilité) pour des structures monomodales et multimodales en régimes d'écoulement continu et non continu, ainsi que les différents mécanismes et modèles d'efficacité de filtration des particules.

Le deuxième chapitre introduit la méthodologie numérique adoptée pour simuler les écoulements mono- et diphasiques à travers des microstructures fibreuses parfaitement caractérisées. Ces simulations, réalisées à l'aide du logiciel GeoDict, permettent de déterminer la perméabilité et l'efficacité fractionnelle des médias. Une analyse de sensibilité y est aussi menée pour évaluer l'influence des paramètres de simulation sur les résultats, et garantir une description précise des champs d'écoulement et du mouvement des particules, tout en optimisant la durée des calculs et la mémoire nécessaire. Cette méthodologie constitue la base des simulations ultérieures, assurant la fiabilité des résultats obtenus.

Le troisième chapitre se concentre sur la simulation numérique des écoulements à travers des médias fibreux, en évaluant la pertinence des modèles de perméabilité recensés dans la littérature. Ces modèles sont comparés aux résultats des simulations pour des distributions de fibres monomodales et multimodales, d'abord pour des fibres microniques, puis pour des fibres submicroniques en tenant compte de l'effet de glissement. Un nouveau modèle de perméabilité est proposé, offrant une meilleure prédiction pour des distributions complexes de diamètres de fibres, tout en intégrant l'effet de glissement sur les fibres submicroniques.

Le quatrième chapitre se consacre à confronter le modèle de perméabilité établi dans le chapitre précédent à des données expérimentales. Des médias fibreux simplifiés de distribution mono- ou bimodale, fabriqués au laboratoire ou fournis par l'entreprise Alkegen, sont étudiés pour comparer leurs perméabilités expérimentales à celles prédites par le modèle. Ce chapitre détaille les protocoles expérimentaux, incluant la fabrication des médias, la caractérisation de leurs propriétés structurales et la mesure de leur perméabilité. Une méthodologie pour le calcul des incertitudes, expérimentales et liées au modèle, est présentée, pour permettre une comparaison rigoureuse des performances.

Enfin, le cinquième chapitre explore les modèles d'efficacité unitaire des mécanismes de capture des particules (diffusion, inertie et interception) appliqués à des structures numériques composées de fibres microniques. Puis, une analyse conjointe de la perte de charge et de l'efficacité de microstructures numériques est développée pour évaluer le potentiel d'optimisation des médias fibreux.

Chapitre 1 : État de l'art

Sommaire

Chapitre 1 : État de l'art 5
1.1 Médias fibreux : production et caractérisation 7
1.1.1 Définition d'un média fibreux non-tissé 7
1.1.2 Fabrication des non-tissés 8
1.1.3 Caractérisation d'un média fibreux 11
a. Grammage 11
b. Épaisseur 11
c. Compacité 12
d. Diamètre des fibres 13
1.2 Perte de charge et perméabilité initiale d'un média fibreux 14
1.2.1 Perte de charge d'un média fibreux 14
1.2.2 Caractérisation de la continuité du milieu 15
1.2.3 Modélisation de la perméabilité (régime continu) 17
a. Facteur hydrodynamique (régime continu) 18
b. Loi de mélange 19
c. Diamètre équivalent 20
1.2.4 Modélisation de la perméabilité (régime non-continu) 23
1.3 Efficacité de collecte initiale d'un média fibreux 24
1.3.1 Définitions 24

1.3.2 Mécanismes de collecte 25
1.3.3 Modélisation de l'efficacité unitaire par diffusion 28
1.3.4 Modélisation de l'efficacité unitaire par interception 32
1.3.5 Modélisation de l'efficacité unitaire par inertie 34
1.4 Conclusion 36

Ce chapitre vise à dresser un état de l'art sur les médias fibreux constitués de fibres microniques et/ou submicroniques. La première partie est consacrée à la définition des médias fibreux non-tissés ainsi qu'à la présentation des différents procédés de fabrication et de caractérisation de ces structures fibreuses. La deuxième partie traite des modèles de perte de charge, et plus spécifiquement, de la détermination de la perméabilité de structures mono et multimodales pour un régime d'écoulement continu à non-continu. Enfin, la dernière partie aborde les différents mécanismes et modèles de capture de particules (efficacité).

1.1 Médias fibreux : production et caractérisation

1.1.1 Définition d'un média fibreux non-tissé

Les médias fibreux englobent les médias tissés, tricotés et non-tissés. Ce manuscrit se focalisera sur les médias non-tissés, mis en œuvre dans la majorité des filtres à fibres utilisés dans le domaine de la filtration de l'air.

Selon la norme EN ISO 9092:2019 [11], un assemblage fibreux est défini comme une « quantité et disposition prédéterminées de matières fibreuses naturelles ou fabriquées, telles que – sans se limiter aux fibres – filaments continus, ou fils coupés de toute longueur ou section ». Les non-tissés, plus spécifiquement, correspondent à un « assemblage fibreux préconçu, essentiellement plan, possédant un niveau nominal d'intégrité structurale conférée au moyen de procédés physiques et/ou chimiques, à l'exclusion du tissage, du tricotage ou de la fabrication du papier ».

Dans le secteur de la filtration, les médias fibreux non-tissés présentent une structure complexe composée de fibres de distributions de taille variables, agencées de façon aléatoire ou semi-aléatoire. A la différence des médias tissés, qui sont des structures textiles dites classiques où des ensembles de fibres formant des fils sont utilisés, les fibres sont directement employées dans les non-tissés. Par opposition aux méthodes textiles traditionnelles, la fabrication des médias non-tissés se caractérise par un processus plus court, impliquant l'assemblage direct des fibres en un voile, suivi d'une étape de consolidation. Cette approche simplifiée permet non seulement d'accroitre la productivité, mais aussi de réduire les coûts de fabrication. Ils possèdent une très large gamme de propriétés avec une épaisseur allant de 20 à 5000 µm, une masse surfacique de 0,1 à 2000 g/m^2 et un diamètre de fibre de 0,1 à 500 µm [12]. De par leur grande perméabilité, leur bonne résistance mécanique et leur efficacité de filtration élevée, les non-tissés sont largement utilisés dans les domaines de la filtration et de la purification de l'air. Ces médias sont notamment mis en œuvre dans les centrales de traitement de l'air, les équipements de protection individuelle, tels que les appareils de protection respiratoire, ou collective, ou dans le dépoussiérage industriel.

Selon l'application visée, différentes normes permettent de classifier les médias non tissés en fonction de leurs performances :

- La norme ISO 16890-1:2016 [6], qui remplace l'ancienne norme EN 779-2012 [13], s'applique aux filtres à air de ventilation générale (climatisation, système HVAC correspond à *Heating Ventilation and Air-Conditionning*) et les classifie selon leur efficacité à retenir des particules de différentes tailles (ePM1, ePM2,5, ePM10),
- La norme ISO 1822-1:2019 [14] et ISO 29763-1:2024 [15] est définie pour les filtres à haute efficacité, notamment les filtres HEPA (*High Efficient Particulate Air Filter*), EPA (*Efficient Particulate Air Filter*) et ULPA (*Ultra Low Penetration Air Filter*) utilisés également en ventilation générale.
- Pour les dispositifs de protection respiratoire individuelle, citons la norme NF EN 149 :2009 [16] pour les demi-masques filtrants de type FFP1, FFP2 et FFP3, la norme NF EN 143:2021 [17] pour les filtres pour demi-masques ou masques complets de type P1, P2 et P3 ou encore la norme NF EN 14683 [18] pour les masques chirurgicaux.

1.1.2 Fabrication des non-tissés

La fabrication des non-tissés se déroule en trois étapes principales : la production ou sélection des fibres, la formation d'un voile à partir des fibres, et finalement la consolidation du voile formé pour lui conférer sa structure et ses propriétés définitives.

Le choix rigoureux des fibres constitue une étape stratégique à l'origine des propriétés finales du média. Ces fibres peuvent être d'origines diverses [19]:

- naturelles, comme les fibres végétales (coton, lin, chanvre, …), animales (laine, cachemire, …) ou minérales (amiante),
- synthétiques, qu'elles soient organiques (polypropylène, polyesters, …) ou inorganiques (fibres de carbone, céramique, …),
- ou encore artificielles telles que les fibres cellulosiques (viscose, acétate, …), protéiques (lanital, arachide, …) ou minérales (fibres de verre, métalliques ou inox).

La nature spécifique des fibres sélectionnées influence directement les propriétés du média, telles que son comportement face à l'humidité, sa résistance chimique et thermique, ainsi que ses propriétés mécaniques. Au-delà de la nature des fibres, leur morphologie constitue également un paramètre déterminant, incluant notamment le diamètre, la longueur, la forme de la section, le degré de frisure, le traitement de surface, ainsi que la présence éventuelle de fibres bicomposantes ou partiellement thermofusibles favorisant la formation de points de contact fibre/fibre fixes.

Il existe quatre procédés de fabrication des voiles de non-tissés à partir des fibres sélectionnées : la voie sèche (*drylaid*), la voie humide (*wetlaid*), la voie fondue (*spunlaid*) et la voie aérodynamique. La Figure 1-1 synthétise ces différentes voies de fabrication.

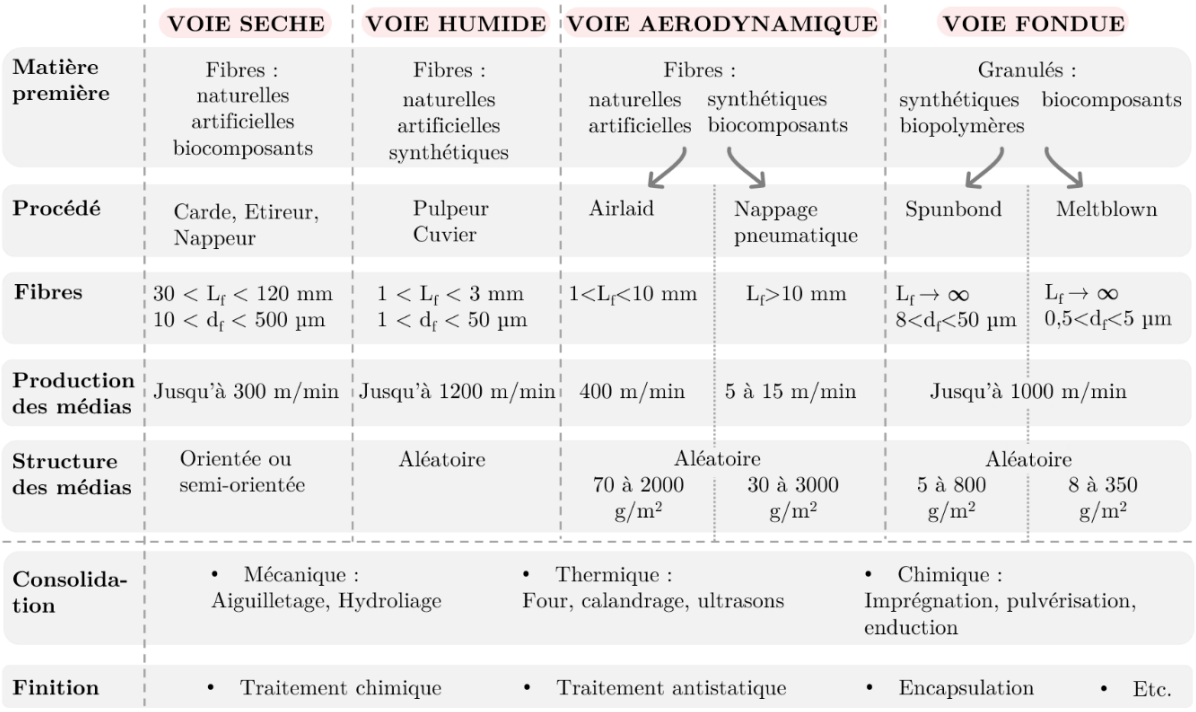


Figure 1-1 : Les différentes voies de fabrication des médias fibreux non-tissés [12,19,20]

Issus de la voie textile, les procédés par **voie sèche** utilisent des cardes afin de démêler, ouvrir, et homogénéiser les fibres pour former un voile de fibres uniforme et orientées dans le sens de production. Bien que l'orientation des fibres s'effectue principalement selon le sens de la machine, l'utilisation de brouilleurs ou de condenseurs permet de rendre les médias plus isotropes.

En **voie humide**, similairement aux procédés papetiers, les fibres sont mises en suspension dans une solution aqueuse. Cette solution est ensuite diluée et filtrée afin de générer un voile. Le média fibreux nouvellement créé est essoré. Ce procédé est notamment utilisé dans la fabrication de filtres à très haute efficacité [19] en fibres de verre. La norme EN ISO 9092:2019 [11] précise qu'à la différence de la fabrication du papier où « le mécanisme prédominant qui maintient la feuille est la liaison hydrogène », l'intégrité structurale des non-tissés obtenus par voie humide est assurée « essentiellement par des procédés physiques et/ou chimiques autres que la liaison hydrogène ».

En **voie aérodynamique**, les fibres sont aspirées, dispersées dans un flux d'air, puis projetées aléatoirement sur un tapis pour générer un média fibreux. Deux technologies existent selon la longueur des fibres : le dispositif *airlaid* pour des fibres courtes de 1 à 10 mm, et le nappage pneumatique ou *highloft* pour des fibres longues supérieures à 10 mm.

A la différence des procédés présentés ci-dessus, des polymères thermoplastiques sous forme de granulés, et non de fibres, sont utilisés en **voie fondue**. Ces granulés, majoritairement de polypropylène (PP) ou de polytéréphtalate d'éthylène (PET), sont extrudés puis filés afin de former des filaments, constituant ainsi une nappe de fibres. Deux technologies peuvent être

utilisées : le *spunbond* et le *meltblown*. Dans le procédé *spunbond*, le filament est refroidi après filage, puis étiré et déposé afin de former le voile. Pour la technologie *metlblown*, le polymère est soufflé par de l'air chaud avant refroidissement, permettant d'obtenir des diamètres de fibres beaucoup plus fins que le procédé *spunbond*.

Après avoir formé le voile, il est nécessaire de consolider la structure pour lui apporter une cohésion. Cette consolidation peut s'effectuer de manière mécanique, thermique ou chimique.

La **consolidation mécanique** repose sur l'enchevêtrement physique des fibres, qui peut s'effectuer à l'aide d'aiguilles venant transpercer le voile pour entremêler les fibres (procédé d'aiguilletage), ou bien par jets d'eau à haute pression (procédé d'hydroliage).

La **consolidation thermique**, quant à elle, exploite les propriétés de thermoplasticité et de thermofixation des fibres synthétiques. Ce processus s'effectue dans des conditions de température adaptées, avec de la chaleur apportée par des cylindres compacteurs, des ondes hautes fréquences, ou bien des fours à air chaud.

Enfin, la **consolidation chimique** implique l'introduction d'une dispersion aqueuse de polymères et copolymères dans le voile. Cette opération peut être réalisée par imprégnation, pulvérisation ou enduction. La consolidation finale du média intervient après séchage, lorsque le liant ajouté polymérise.

Une fois le voile formé et consolidé, des traitements spéciaux additionnels peuvent être réalisés afin de conférer au média d'autres propriétés [12] :

- Des **traitements chimiques**, créant une enveloppe protectrice autour des fibres pour acquérir des propriétés spécifiques ou une meilleure résistance chimique ;
- Des **traitements antistatiques**, diminuant la résistivité électrique par ajout de fils ou fibres conducteurs dans la structure ;
- De **l'encapsulation**, consistant à introduire des microcapsules ou nanocapsules (charbon actif, parfum, ...) dans le média pour lui donner de nouvelles propriétés.

1.1.3 Caractérisation d'un média fibreux

La structure d'un média fibreux peut être caractérisée par différents paramètres tels que le grammage, l'épaisseur, la compacité ou encore le diamètre des fibres qui la composent.

a. Grammage

Le grammage correspond à la masse surfacique du média en g/m^2 et caractérise les structures de médias non-tissés pour les fabricants. Cependant, pour évaluer les performances de filtration, le paramètre de compacité est généralement préféré.

b. Épaisseur

L'épaisseur est un paramètre important du média. La norme ISO 9073-2:1997 [21] définit les méthodes d'essai permettant de mesurer l'épaisseur des non-tissés, qu'ils soient dits « normaux » ou « volumineux », en appliquant des pressions spécifiques. De manière générale, la méthode repose sur la mesure de la distance comprise entre une plaque de référence, sur laquelle est posé l'échantillon, et un pied presseur parallèle, qui va exercer une certaine pression sur sa surface.

Bien que cette mesure puisse paraître simple, elle est en réalité techniquement délicate, car elle dépend fortement de la compressibilité du matériau. Un essai préliminaire, requis afin d'évaluer cette compressibilité, consiste à appliquer successivement deux charges sur le pied pression, permettant d'obtenir une pression uniforme de 0,1 kPa et de 0,5 kPa. Si l'échantillon est comprimé à moins de 20 %, il est considéré comme non-tissé « normal » ; au-delà, il est considéré comme « volumineux ». En fonction de sa catégorisation, différentes méthodes et dispositifs sont utilisés :

- Un pied presseur horizontal pour les non-tissés normaux appliquant une pression de 0,5 kPa,
- Un levier à contacts électriques pour les non-tissés volumineux d'épaisseur inférieure à 20 mm,
- Un palpeur vertical pour des non-tissés volumineux d'épaisseur supérieure à 20 mm, appliquant une faible pression de 0,02 kPa sur l'échantillon.

Alternativement d'autres méthodes existent sans appliquer de contrainte sur le média. L'épaisseur d'un média fibreux peut notamment être mesurée à l'aide d'un microscope optique. Néanmoins, cette méthode nécessite de surmonter certaines difficultés [12]. Ainsi, la profondeur de champ ou l'inclinaison de l'échantillon lors du positionnement de la tranche du filtre par rapport à l'axe d'observation peuvent fausser les résultats. De plus, la préparation de l'échantillon soulève également d'autres problématiques. Par exemple, l'incision du média fibreux peut provoquer un écrasement local. Il est donc nécessaire de préparer et mesurer un

grand nombre d'échantillons afin d'obtenir une valeur d'épaisseur moyenne statistiquement fiable.

Une mesure indirecte peut aussi être effectuée grâce au test de Washburn [22] et à la corrélation entre l'épaisseur d'un média fibreux et sa vitesse d'imbibition capillaire. Pour mettre en œuvre cette méthodologie, il est nécessaire d'utiliser un dispositif spécifique pour la mesure de l'imbibition, ainsi qu'un solvant approprié, capable de mouiller parfaitement le média fibreux. Cependant, cette méthode repose sur l'hypothèse de l'absence de gonflement du média à saturation des pores par le liquide d'essai. De plus, la méthode est effectuée sur un faible volume de média, il est donc nécessaire de multiplier les mesures pour obtenir une valeur d'épaisseur moyenne la plus représentative.

c. Compacité

La compacité (α) représente le rapport entre le volume de fibres sur le volume du média fibreux. En général, la compacité d'un média non-tissé utilisé en filtration est inférieure à 20 % - 30 % [12].

$$\alpha = \frac{V_{fibres}}{V_{total}} \qquad \textit{Eq. 1-1}$$

La porosité (ε) correspondant au rapport du volume de pores sur le volume total du média peut être reliée à la compacité :

$$\varepsilon = \frac{V_{pores}}{V_{total}} = 1 - \alpha \qquad \textit{Eq. 1-2}$$

Par mesure directe du grammage et de l'épaisseur d'un média fibreux, il est possible de calculer la compacité, à condition de connaître la masse volumique moyenne des fibres (Eq. 1-3).

$$\alpha = \frac{10^{-3} \times G}{Z \times \rho_f} \qquad \textit{Eq. 1-3}$$

Avec G le grammage du média en g/m^2, Z l'épaisseur en m et ρ_f la masse volumique moyenne des fibres constituant le média en kg/m^3

Lorsque le média est composé uniquement de fibres de même matériau, cette masse volumique correspond simplement à celle du matériau. Dans le cas, le plus courant, d'un mélange de fibres de nature différente et/ou en présence de liant, la masse volumique moyenne du média doit être déterminée :

- soit expérimentalement à l'aide d'un pycnomètre par exemple,
- soit par calcul, en utilisant les fractions volumiques de chaque composant (fibres et liant) et leur masse volumique respective.

D'autres méthodes, comme la méthode par microtomie d'échantillon consolidé [23], permettent de déterminer la compacité. Après découpe en tranches et polissage d'un média

initialement enrobé dans une résine, l'observation au microscope électronique à balayage couplée à une analyse EDX (Energy Dispersive X-ray) permet de remonter à la compacité locale et moyenne.

L'utilisation de la tomographie à rayons X est quant à elle une méthode non destructive et non invasive. Des images numériques tridimensionnelles de l'échantillon sont reconstruites avec une haute résolution à partir d'images dites « en coupes ». La structure interne d'un matériau, via l'interaction d'un faisceau de rayons X avec la matière, peut ainsi être identifiée [24]. Cette technique est très utilisée dans la littérature afin de définir précisément la compacité, ou porosité, globale et locale d'un média fibreux, ou encore la distribution des diamètres de pores de ces structures non-tissées [25–29].

d. Diamètre des fibres

Généralement, les médias non-tissés présentent une distribution granulométrique de taille de fibres qui peut être qualifiée en fonction du nombre de mode. Ainsi, une distribution est dite monomodale si elle présente un seul mode, bimodale si elle présente deux modes et multimodale si elle présente un grand nombre de modes. De plus, une distribution est dite monodisperse lorsque toutes les fibres ont des diamètres formant une distribution étroite autour de la moyenne ; c'est à dire si 90 % de la distribution se situe dans un intervalle défini par la moyenne à +/- 5 % [30]. A l'inverse, si l'écart-type est important et que la majorité de la distribution s'étend au-delà de cet intervalle, la distribution est qualifiée de polydisperse.

L'utilisation de techniques d'observation de surface permet de déterminer une distribution de tailles de fibre. La Microscopie Électronique à Balayage (MEB) est notamment utilisée pour mesurer le diamètre des fibres [10,31,32] mais cette méthode nécessite un grand nombre d'échantillons pour obtenir une distribution statistiquement représentative. Par ailleurs, la détermination de la structure interne du média par micro-tomographie permet aussi d'obtenir la distribution en volume des diamètres de fibres à l'intérieur du média ainsi que leur orientation [33–36].

Cependant, la mesure de la distribution de taille de fibre d'un média reste une opération délicate, souvent source d'incertitudes. En pratique, l'analyse par MEB est largement utilisée, en raison de sa meilleure accessibilité par rapport à des équipements plus importants, tels que Soleil, ESRF ou des tomographes de laboratoire à haute résolution. Néanmoins, cette méthode présente plusieurs limites. Elle fournit uniquement une distribution des diamètres des fibres présentes à la surface du média, dont la représentativité sur l'ensemble du volume du média peut être remise en question. De plus, un biais inconscient peut apparaitre selon les fibres sélectionnées et mesurées manuellement par l'opérateur. Enfin, l'estimation de la distribution volumique des diamètres de fibre à partir des images MEB nécessite de formuler des hypothèses sur la longueur des fibres, à partir de la distribution en nombre obtenue.

Alors que le diamètre de fibre est une propriété clé dans les performances des médias fibreux, ce paramètre est rarement déterminé dans les industries. En effet, l'utilisation du titre, soit la finesse d'un fil ou d'une fibre, est plutôt privilégiée pour les médias polymères [12].

$$d_f = \sqrt{\frac{4 \times \text{Titre}_{(\text{en dtx})}}{10^7 \times \pi \times \rho_f}} \qquad \textit{Eq. 1-4}$$

Avec d_f le diamètre des fibres en m et ρ_f la masse volumique des fibres en kg/m^3

On retrouve notamment l'unité normalisée tex, correspondant à la masse en gramme de 1000 m de fibre ou fil. Son sous-multiple, le décitex (dtx), est le plus employé (Eq. 1-4).

1.2 Perte de charge et perméabilité initiale d'un média fibreux

Cette partie est consacrée à la perte de charge initiale des médias fibreux et n'abordera donc pas l'évolution temporelle de ce paramètre au cours du colmatage d'un filtre.

1.2.1 Perte de charge d'un média fibreux

Une résistance est engendrée par un média fibreux lorsqu'un fluide le traverse. Cette différence de pression entre l'amont et l'aval du média se nomme la perte de charge.

$$\Delta P = P_{amont} - P_{aval} \qquad \textit{Eq. 1-5}$$

La perte de charge est un paramètre important dans l'évaluation de la performance d'un média filtrant. Elle conditionne la dépense énergétique et joue un rôle déterminant dans la durée de vie d'un filtre, notamment en raison de son évolution lors du colmatage du média.

A partir des caractéristiques du filtre et de la nature de l'écoulement, différentes lois existent pour estimer la perte de charge initiale. La loi de Darcy, par exemple, décrit l'évolution linéaire du gradient de pression selon la vitesse du fluide traversant le média fibreux pour un écoulement laminaire :

$$\frac{\Delta P}{Z} = \frac{\mu U_f}{\kappa} \qquad \textit{Eq. 1-6}$$

Avec μ la viscosité dynamique du fluide en kg/(m.s), U_f la vitesse d'écoulement superficielle en m/s, Z l'épaisseur du média poreux en m et κ la perméabilité du média en m^2.

La validité de cette expression dépend du régime d'écoulement, qui se caractérise par le nombre de Reynolds de fibres ou de pores selon la compacité du média fibreux :

- Reynolds de fibres pour $\alpha < 0{,}2$:

$$Re_f = \frac{\rho U_f d_f}{\mu (1-\alpha)} \qquad \textit{Eq. 1-7}$$

- Reynolds de pores pour $\alpha > 0{,}2$:

$$Re_{pores} = \frac{\rho U_f}{\mu \alpha a_f} \qquad \textit{Eq. 1-8}$$

Avec a_f la surface spécifique des fibres de diamètre d_f

Le Tableau 1-1 regroupe les valeurs limites du nombre de Reynolds pour les différents régimes d'écoulement [12].

Tableau 1-1 : Plages des régimes d'écoulement laminaire, intermédiaire et turbulent

Régime	$\alpha > 0,2$ [37,38]	$\alpha < 0,2$ [39–41]
Laminaire	$Re_{pores} < 180$	$Re_f < 1$
Intermédiaire	$180 < Re_{pores} < 900$	$1 < Re_f < 1000$
Turbulent	$900 < Re_{pores}$	$1000 < Re_f$

Le modèle de Brown [42] exprime, quant à lui, la perte de charge en fonction d'un facteur hydrodynamique (H), représentant l'écoulement dans une structure fibreuse complexe après simplification de sa résolution à l'aide de modèles considérant le filtre comme un milieu continu avec une structure idéale.

$$\frac{\Delta P}{Z} = \frac{16\,\alpha\,\mu\,U_f}{d_f^2\,H} \qquad \textit{Eq. 1-9}$$

Avec α la compacité du média, μ la viscosité dynamique du fluide en kg/(m.s), U_f la vitesse d'écoulement superficielle en m/s, Z l'épaisseur du média poreux en m et d_f le diamètre de fibre en m. Différentes expressions du facteur hydrodynamique, H, sont définies selon le régime d'écoulement (voir sections 1.2.3a. et 1.2.4).

Pour des vitesses plus élevées, d'autres relations existent pour décrire l'écoulement dans les milieux poreux, telle que la loi de Forchheimer de 1901 [43]. Cette relation ajoute à la loi de Darcy un terme non linéaire pour prendre en compte les effets inertiels.

$$\frac{\Delta P}{Z} = \frac{\mu\,U_f}{\kappa} + \frac{\rho_f\,\mu\,U_f^2}{\kappa_f} \qquad \textit{Eq. 1-10}$$

Avec κ_f la perméabilité de Forchheimer en s^3/kg.

1.2.2 Caractérisation de la continuité du milieu

L'écoulement, et donc la perte de charge, dépend de la continuité du milieu, qui peut être caractérisée par le nombre adimensionnel de Knudsen, qui compare les interactions intramoléculaires du fluide aux interactions entre les fibres ou particules et les molécules du fluide. Le nombre de Knudsen quantifie donc le rapport entre le libre parcours moyen des molécules du fluide (λ_g) et une longueur caractéristique du milieu qu'il traverse (L_{caract}).

$$K_n = \frac{\lambda_g}{L_{caract}} \qquad \textit{Eq. 1-11}$$

Dans le domaine de la filtration, le nombre de Knudsen de fibres (K_{n_f}) est généralement défini en utilisant le rayon de fibre ($d_f/2$) comme longueur caractéristique :

$$K_{n_f} = \frac{2\,\lambda_g}{d_f} \qquad \textit{Eq. 1-12}$$

Le libre parcours moyen du gaz correspond à la distance qu'une molécule peut parcourir avant d'entrer en collision avec une autre molécule. Il peut être calculé à l'aide de la relation suivante :

$$\lambda_g = \frac{1}{\sqrt{2}\, n_{mol}\, \pi\, d_{mol}^2} \qquad \textit{Eq. 1-13}$$

Avec n_{mol} et d_{mol} respectivement le nombre de molécules par unité de volume et le diamètre d'une molécule.

Pour les molécules d'air, le libre parcours moyen de l'air est de 66,5 nm à une température de 20 °C et à pression atmosphérique de 1,013 bar. Pour d'autres conditions de pression et de température, le libre parcours moyen de l'air peut être déterminé à partir de la relation empirique de Willeke [44] (Eq. 1-14).

$$\lambda_g = \lambda_0 \frac{T}{T_0} \frac{P_0}{P} \frac{1 + \frac{110,4}{T_0}}{1 + \frac{110,4}{T}} \qquad \textit{Eq. 1-15}$$

Avec λ_0= 66,5 10^{-9} m, T_0= 293,15 K et P_0=101325 Pa.

Le nombre de Knudsen présente donc un intérêt pour évaluer les limites des régimes d'écoulements. D'une manière générale, si Kn << 1, le milieu est considéré comme continu et des modèles comme les équations de Navier-Stokes permettent de décrire les écoulements du fluide. A l'inverse, si Kn >> 1, le régime est considéré comme moléculaire. Comme les collisions gaz-particules sont plus importantes que les collisions entre les molécules du gaz, le milieu sera régi par une approche cinétique.

On trouve différentes valeurs limites pour définir les régimes dans la littérature. Cependant, ces plages sont plutôt des ordres de grandeur car la transition est progressive entre les régimes [45,46]. De plus, les valeurs dépendent de la longueur caractéristique choisie pour calculer le nombre de Knudsen.

Pich [47], par exemple, distingue quatre types de régimes (moléculaire libre, de transition, de glissement et continu) selon le nombre de Knudsen de fibre (Figure 1-2).



Figure 1-2 : Plage de régime d'écoulement selon Kn_f [47]

Généralement, dans des médias fibreux, le régime est supposé continu. Cependant, des effets de glissement peuvent apparaitre à la surface des fibres submicroniques. Le gradient de vitesse du fluide à la surface devient alors non nul ce qui réduit considérablement la force de trainée et la résistance à l'écoulement (Figure 1-3), générant de fait une perte de charge plus faible que celle prédite par les équations classiques.

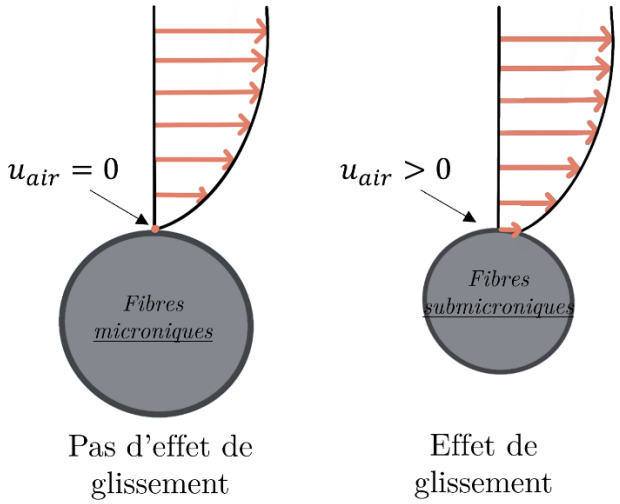


Figure 1-3 : Représentation schématique des effets de glissement

1.2.3 Modélisation de la perméabilité (régime continu)

Dans le cas d'un régime d'écoulement laminaire linéaire, En égalisant la relation de Darcy (Eq. 1-6) et celle de Brown (Eq. 1-9), la perméabilité peut être exprimée à partir du diamètre des fibres, de la compacité et du facteur hydrodynamique.

$$\kappa = \frac{d_f^2 \, H}{16 \, \alpha} \qquad \textit{Eq. 1-16}$$

Pour un média fibreux ayant une distribution monomodale de diamètres de fibres, la détermination de la perméabilité nécessite la connaissance de ses propriétés structurales (compacité et diamètre de fibres).

L'évaluation de la perméabilité d'un média fibreux présentant une distribution polydisperse de tailles de fibre peut s'avérer plus complexe en raison des interactions hydrodynamiques entre les différentes populations de fibres. Dans la littérature, deux approches pour déterminer la perméabilité d'un tel mélange de fibres sont identifiées. La première méthode consiste à estimer directement la perméabilité sur la base de « règles de mélange », tandis que la seconde est basée sur la détermination d'un diamètre de fibre équivalent (d_{eq}) à prendre en compte lors du calcul de la perméabilité :

$$\kappa = \frac{d_{eq}^2 \, H}{16 \, \alpha} \qquad \textit{Eq. 1-17}$$

a. Facteur hydrodynamique (régime continu)

Dans les études de perméabilité en régime d'écoulement continu, on retrouve généralement l'expression de « perméabilité adimensionnelle » κ/df^2 ou $1/f(\alpha)$, qui peut être relié au facteur hydrodynamique H, selon l'arrangement et l'orientation des fibres en relation avec l'écoulement (Eq. 1-18).

$$\frac{1}{f(\alpha)} = \frac{\kappa}{df^2} = \frac{H}{16\alpha} \qquad \textit{Eq. 1-18}$$

Plusieurs auteurs, dont Jackson et James [48] en 1986 ou plus récemment Woudberg [49] et Zhu *et al.* [50] en 2017, et Thomas *et al.* [51] en 2023 ont étudié et synthétisé les modèles existants dans la littérature.

Jackson et James [48] ont classé les modèles selon trois scénarios d'écoulement distincts : perpendiculaire, parallèle ou aléatoire par rapport aux fibres. Dans le domaine de la filtration et selon le procédé de fabrication des non-tissés, l'écoulement le plus couramment observé est perpendiculaire aux fibres. Les auteurs ont ainsi développé un modèle empirique basé sur des données expérimentales pour ce type d'écoulement. De la même manière, Davies [52] a proposé un modèle empirique, à partir de mesures expérimentales de la perméabilité de différents médias composés d'un seul diamètre de fibres. Ces deux modèles (Jackson et James, Davies) restent les plus utilisés.

Contrairement aux modèles empiriques précédents, la corrélation originale d'Happel [53] est fondée sur des considérations théoriques. Récemment, Thomas *et al.* [51] ont proposé un nouveau modèle, appelé le modèle d'Happel modifié, permettant une meilleure prédiction de la perméabilité adimensionnelle pour les distributions de fibres monomodales, comparé aux modèles de Jackson et James et de Davies. Le modèle d'Happel a été modifié en incorporant un facteur de $(5/2)^{1/4}$ à la corrélation originale

Le Tableau 1-2 résume les différents modèles développés pour un écoulement perpendiculaire aux fibres, exprimé en facteur hydrodynamique à partir de l'équation 1-17.

Tableau 1-2 : Expressions du facteur hydrodynamique pour un écoulement perpendiculaire aux fibres

Auteurs	**Facteur hydrodynamique**		**Commentaires**
Davies (1953) **[52]**	$\frac{1}{4\sqrt{\alpha}\,(1+56\alpha^3)}$	*Eq. 1-19*	· Modèle empirique · $0{,}006 < \alpha < 0{,}3$
Jackson & James (1986) **[48]**	$\frac{3}{5}[-\ln(\alpha) - 0{,}931]$	*Eq. 1-20*	· Modèle empirique · $\alpha < 0{,}25$
Woudberg (2017) **[49]**	$\frac{4\pi \times \left(1-\sqrt{\alpha}\right)^3}{13{,}5 \times \sqrt{\alpha}}$	*Eq. 1-21*	· Modèle analytique · $\alpha < 0{,}25$
Happel (1959) **[53]**	$\frac{1}{2}\left(-\ln(\alpha) + \frac{\alpha^2-1}{\alpha^2+1}\right)$	*Eq. 1-22*	· Modèle analytique
Happel modifié (2023) **[51]**	$\frac{(5/2)^{\frac{1}{4}}}{2}\left(-\ln(\alpha) + \frac{\alpha^2-1}{\alpha^2+1}\right)$	*Eq. 1-23*	· Modification empirique du modèle d'Happel · $0{,}006 < \alpha < 0{,}3$

Dans la Figure 1-4, la perméabilité adimensionnelle déterminée à partir des différents modèles de facteur hydrodynamique est représentée en fonction de la compacité. Tous les modèles suivent une tendance globale similaire et les écarts entre les modèles de Davies, Happel modifié et Jackson et James ne semblent pas significatifs pour une compacité inférieure à 20 %. Cependant, le modèle de Jackson et James commence à diverger à partir d'une compacité de 30 %. Le modèle de Woudberg quant à lui se distingue par des écarts plus marqués pour des compacités inférieures à 10 %, caractéristiques de filtres commerciaux,

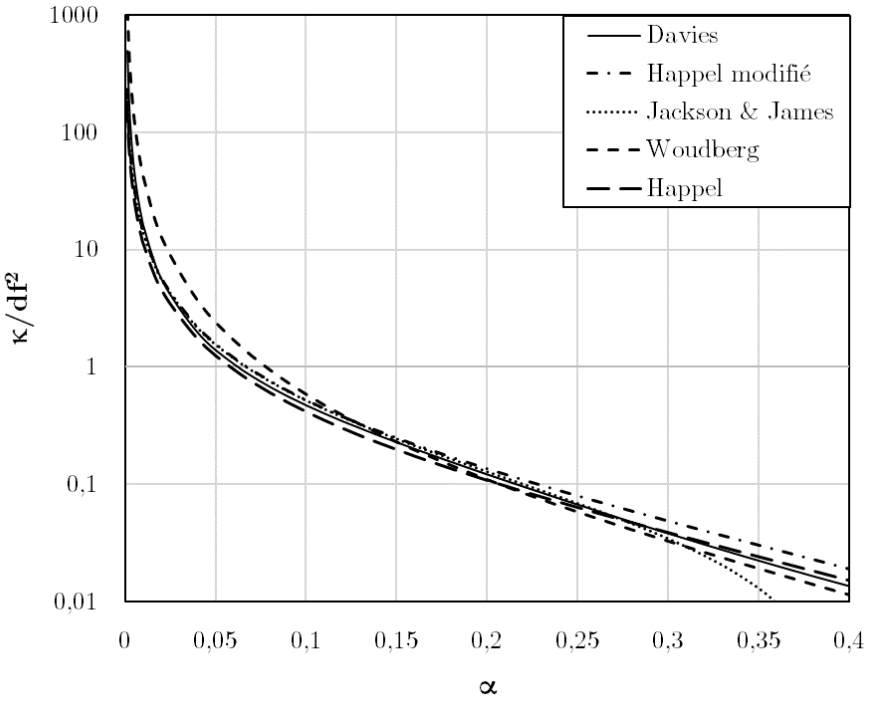


Figure 1-4 : Modèles de perméabilité adimensionnelle

b. Loi de mélange

Dans les modèles basés sur des règles de mélange, on suppose que la résistance à l'écoulement induite par chaque fibre est simplement additive et indépendante de la position de la fibre dans le filtre par rapport aux autres fibres. Ces lois de mélange ont été développées dans la plupart des cas pour des distributions bimodales et peuvent facilement être étendues à des distributions polymodales. Cependant, Mattern et Deen [54] ont démontré que la détermination de la perméabilité équivalente est difficile en raison de l'interdépendance des résistances hydrauliques au sein des populations de fibres. Pour prendre en compte ces interactions, la résistivité ($1/\kappa$) est pondérée selon différentes caractéristiques des fibres (volume, longueur, etc.). Ces modèles sont résumés dans le Tableau 1-3.

Tableau 1-3 : Expressions de lois de mélange

Loi de mélange	**$1/\kappa$ (m^{-2}) ou κ (m^2)**	
Volume weighted resistivity	$\frac{1}{\kappa} = \sum_i \frac{\alpha_i}{\alpha} \times \frac{1}{\kappa_i(\alpha)}$	*Eq. 1-24*
Unweighted resistivity	$\frac{1}{\kappa} = \sum_i \frac{1}{\kappa_i(\alpha_i)}$	*Eq. 1-25*
Length-weighted resistivity	$\frac{1}{\kappa} = \left[\sum_i \frac{\frac{\alpha_i}{d_i^2}}{\kappa_i(\alpha)}\right] \times \frac{1}{\sum_i \frac{\alpha_i}{d_i^2}}$	*Eq. 1-26*
Volume weighted permeability	$\kappa = \sum_i \left(\frac{\alpha_i}{\alpha}\right) \kappa_i(\alpha)$	*Eq. 1-27*

$\boldsymbol{\alpha_i}$ *la fraction solide des fibres de diamètre* $\boldsymbol{d_i}$ *(*$\sum_i \boldsymbol{\alpha_i} = \boldsymbol{\alpha}$*)*
$\boldsymbol{\kappa_i}$ *la perméabilité d'un média composé de fibres de diamètre* $\boldsymbol{d_i}$

Clague et Phillips [55] ont tout d'abord développé un modèle basé sur des simulations tridimensionnelles avec des couples de diamètres ayant un ratio du diamètre épais sur le diamètre fin inférieur à 3. Ce modèle, initialement conçu pour des distributions bimodales mais extensible aux distributions multimodales, se réfère à une résistivité pondérée par le volume (*volume weighted resistivity*).

Mattern et Deen [54] introduisent trois autres modèles basés sur des règles de mélange : le modèle de résistivité non pondérée (*unweighted resistivity*), dont la méthode est équivalente à celle de Jackson et James, ainsi que les modèles de résistivité pondérée par la longueur (*length-weighted resistivity*), et de perméabilité pondérée par le volume (*volume weighted permeability*). A partir de leurs résultats de simulations bidimensionnelles, Mattern et Deen [54] ont conclu que le modèle de perméabilité pondérée par le volume montre la meilleure prédiction de la perméabilité d'un mélange de fibres.

c. Diamètre équivalent

La deuxième méthode présentée dans la littérature pour déterminer la perméabilité d'un mélange de fibres repose sur le calcul d'un diamètre équivalent (d_{eq}). Cette approche consiste à déterminer le diamètre de fibre qui générerait, pour une même compacité, la même perméabilité que celle causée par la distribution réelle des fibres. Le Tableau 1-4 résume les différents modèles de diamètres équivalents recensés dans la littérature.

Tableau 1-4 : Modèles de diamètres équivalents issus de la littérature

Diamètre équivalent ($\mathbf{d_{\beta,\gamma}}$)			Commentaires
$\mathbf{d_{0,2}}$ **[55,56]** *Square root mean*	$\sqrt{\frac{1}{\frac{f_{me}}{d_e^2}+\frac{f_{mf}}{d_f^2}}}$	*Eq. 1-28*	· $0{,}01 < \alpha < 0{,}6$ · $R_{cf} < 3$ · Simulation 3D
$\mathbf{d_{0,1}}$ **[57]** *Number weighted mean*	$\frac{\frac{f_{me}}{d_e}+\frac{f_{mf}}{d_f}}{\frac{f_{me}}{d_e^2}+\frac{f_{mf}}{d_f^2}}$	*Eq. 1-29*	· $R_{cf} = 4$ · Modélisation d'une matrice 2D de fibres et vérification expérimentale
$\mathbf{d_{1,1}}$ **[57]** *Aera weighted mean*	$\frac{1}{\frac{f_{me}}{d_e}+\frac{f_{mf}}{d_f}}$	*Eq. 1-30*	
$\mathbf{d_{2,1}}$ **[57]** *Volume weighted mean*	$f_{me}d_e + f_{mf}d_f$	*Eq. 1-31*	
$\mathbf{d_{2,2}}$ **[54]** *Volume weighted permeability*	$\sqrt{f_{me}d_e^2 + f_{mf}d_f^2}$	*Eq. 1-32*	· $0{,}01 < \alpha < 0{,}18$ · $R_{cf} = 3$ · Simulation 2D
$\mathbf{d_{0,3}}$ **[56]** *Cube root mean*	$\sqrt[3]{\frac{f_{me}d_e + f_{mf}d_f}{\frac{f_{me}}{d_e^2}+\frac{f_{mf}}{d_f^2}}}$	*Eq. 1-33*	· $0{,}05 < \alpha < 0{,}15$ · $1 \leq R_{cf} \leq 5$ · Simulation 3D
d_e *et* d_f *le diamètre des fibres épaisses et fines* f_{me} *et* f_{mf} *la fraction massique des fibres épaisses et fines dans le média*			$R_{cf} = d_e/d_f$ α la compacité

En supposant que toutes les fibres ont la même longueur, Tucny *et al.* [58] montrent que ces expressions de diamètres équivalents peuvent s'écrire sous la forme :

$$d_{eq} = d_{\beta,\gamma} = \left(\frac{\sum_i f_{ni} d_i^{\beta+\gamma}}{\sum_i f_{ni} d_i^{\beta}}\right)^{1/\gamma} = \left(\frac{\sum_i f_{mi} d_i^{\beta+\gamma-2}}{\sum_i f_{mi} d_i^{\beta-2}}\right)^{1/\gamma} \qquad \textit{Eq. 1-34}$$

Avec f_{ni} et f_{mi} respectivement la fraction en nombre et en masse des fibres de taille d_i. Les coefficients β et γ correspondent aux différents modèles et sont résumés dans le Tableau 1-5.

Tableau 1-5 : les coefficients β et γ pour différents modèles de diamètres équivalents selon l'expression de Tucny et al. [58]

Modèle ($\mathbf{d_{\beta,\gamma}}$)	β	γ
Number weighted mean **[57]**	0	1
Square root mean / volume weighted resistivity **[55,56]** *	0	2
Cube root mean **[56]**	0	3
Area weighted mean **[57]**	1	1
Volume weighted mean **[57]**	2	1
Volume weighted permeability **[54]** *	2	2

** issu d'une loi de mélange*

En partant des lois de mélange, Tafreshi *et al.* [56] ont traduit la loi de *volume weighted resistivity* en diamètre équivalent $\mathbf{d_{0,2}}$, aussi appelé *square root mean*, avec l'hypothèse de même densité et même longueur de fibre. Afin de mieux corréler à leurs données de simulations, ils s'inspirent de ce diamètre pour en faire une nouvelle expression $\mathbf{d_{0,3}}$, *cube root mean*. De la même manière, ils traduisent la loi de mélange *volume weighted permeability* en diamètre $\mathbf{d_{2,2}}$. A partir de leurs simulations 3-D sur le logiciel GeoDict, Tafreshi *et al.* [56] démontrent une meilleure prédiction de leurs données de perméabilité numérique avec les diamètres $d_{0,2}$ et $d_{0,3}$ associés à l'expression de f(α) de Jackson et James.

Brown et Thorpe [57] ont quant à eux modélisé des structures bidimensionnelles de fibres et proposé trois diamètres équivalents : *number weighted mean* $\mathbf{d_{0,1}}$, *area weighted mean* $\mathbf{d_{1,1}}$ et *volume weighted mean* $\mathbf{d_{2,2}}$. Des mesures expérimentales avec un mélange bimodale de fibres de verre ont présenté de bons résultats avec le diamètre équivalent théorique $d_{1,1}$.

De nombreux autres auteurs ont ainsi tenté de déterminer l'expression du diamètre équivalent qui représente au mieux les distributions de fibres bimodales dans le calcul de la perméabilité. A partir de simulations numériques de structures 2-D avec Ansys Fluent 6.3, Fotovati *et al.* [59] ont ainsi montré une meilleure prédiction de la perméabilité théorique avec le diamètre $\mathbf{d_{0,3}}$. Malgré le même type de simulations, les conclusions de Jaganathan *et al.* [60] diffèrent et privilégient le modèle $\mathbf{d_{1,1}}$, comme préconisé par Brown et Thorpe [57]. Gervais [61] a plus récemment démontré à l'aide de simulation 3-D que la validité des expressions de diamètres équivalents de la littérature dépendait de la compacité α et du ratio des deux diamètres. Comme Jaganathan, il est arrivé à la conclusion que les modèles existants ne sont pas suffisamment robustes et universels, car ils ne peuvent être appliqués qu'à des structures présentant certaines propriétés spécifiques.

Dans ces études, seul le cas d'une distribution bimodale de diamètres de fibres a été étudié, alors que les médias fibreux réels sont généralement multimodaux. Par analogie mathématique entre la diffusivité, la tortuosité et la perméabilité, Tomadakis *et al.* [62] ont montré que le diamètre $\mathbf{d_{1,1}}$ est le plus représentatif de la structure des médias fibreux multimodaux. Pour une distribution multimodale, Tucny *et al.* [58] ont également proposé une nouvelle corrélation de la perméabilité adimensionnelle de Davies, corrigée par le diamètre équivalent de Sauter (volume sur surface) et par une variance normalisée de la distribution de fibres.

Ces différentes études, principalement dédiées aux structures fibreuses avec une distribution bimodale des diamètres de fibres, ont été menées avec des gammes de compacité ou des couples de diamètres spécifiques. Bien que plusieurs auteurs considèrent $\mathbf{d_{1,1}}$ comme le diamètre le plus fiable pour prédire la perméabilité, une expression universelle applicable à une large gamme de structures fibreuses n'a toujours pas été trouvée.

1.2.4 Modélisation de la perméabilité (régime non-continu)

Lorsque le diamètre des fibres se rapproche du libre parcours moyen des molécules du gaz, le fluide ne peut plus être considéré comme un milieu continu et les modèles conventionnels de perméabilité précédemment présentés ne sont plus adaptés.

Des expressions alternatives du facteur hydrodynamique ont donc été développées pour tenir compte de l'effet de glissement apparaissant à la surface des fibres submicroniques (Tableau 1-6). Ces modèles sont généralement fonction du nombre de Knudsen des fibres ($\mathrm{Kn_f}$). Certains modèles, tels que ceux de Kwak *et al.* [63] et de Pich [64], intègrent dans leur expression le facteur hydrodynamique de Kuwabara (1959) ($\mathrm{H_{Ku}}$), défini sur un ensemble de cylindres en régime continu :

$$\mathrm{H_{Ku}} = \alpha - \frac{1}{2}\ln(\alpha) - \frac{1}{4}\alpha^2 - \frac{3}{4} \qquad \textit{Eq. 1-35}$$

Tableau 1-6 : Facteurs hydrodynamiques en régime continu

Auteurs	Expression de H		Commentaires
Kirsch et Zhulanov (1978) **[65]**	$\mathrm{H_{Fan}^{K\&Z}} = -0{,}5\ln\left(\frac{\alpha}{1+\sigma}\right) - 0{,}52 + \frac{0{,}64\,\alpha}{(1+\sigma)} + 1{,}43\left(1-\frac{\alpha}{1+\sigma}\right)\mathrm{Kn_f}$	*Eq. 1-36*	· Superposition aléatoire de grilles · Prise en compte de la polydispersité des fibres avec $\sigma = \frac{\overline{d_1^2} - \overline{d_1}^2}{\overline{d_1}^2}$
Kwak *et al.* (2023) **[63]**	$(\mathrm{H_{Ku}} + 0.149\,\mathrm{Kn_f}\,[\mathrm{H_{Ku}} + 18.35\,(1-\alpha)^2 - 3.79(1-\alpha)])\,\frac{1}{1+0.149\,\mathrm{Kn_f}}$	*Eq. 1-37*	$5\ 10^{-3} < \alpha < 0.1$ $30 \leq \mathrm{df} \leq 300$ nm $0.42 \leq \mathrm{Kn_f} \leq 4.2$
Pich (1966) **[64]**	$\frac{\mathrm{H_{Ku}} + 0.998\,\mathrm{Kn_f}\left(-\frac{1}{2} - \ln(\alpha) + \frac{1}{2}\alpha^2\right)}{1 + 1.996\,\mathrm{Kn_f}}$	*Eq. 1-38*	· Ensemble de cylindres
Yeh et Liu (1974) **[66]**	$\mathrm{H_{Ye}} = \frac{\alpha}{1+\mathrm{Kn_f}} - \frac{\ln(\alpha)}{2} - \frac{\alpha^2}{4} - \frac{3}{4(1+\mathrm{Kn_f})} + \frac{\mathrm{Kn_f}(2\alpha-1)^2}{4(1+\mathrm{Kn_f})}$	*Eq. 1-39*	· Ensemble de cylindres

Le modèle de Pich [64] repose sur le calcul de la force de trainée exercée sur chaque fibre, en tenant compte de l'effet de glissement à leur surface. Il intègre le facteur hydrodynamique de Kuwabara pour décrire le champ de vitesse à l'intérieur du filtre. Kwak *et al.* [63] ont ajusté ce modèle à partir de résultats de simulations numériques 3D menées sur des structures monomodales composées de fibres submicroniques monodisperses. De leur côté, Yeh et Liu [66] ont adopté une approche similaire à celle de Pich [64], mais avec des conditions aux limites différentes. Il est important de noter que, dans le cas extrême où le nombre de Knudsen de

fibre tend vers zéro, les modèles de Pich [64], et Yeh et Liu [66] se réduisent au facteur hydrodynamique de Kuwabara, correspondant à un régime d'écoulement continu.

Outre le modèle de Kirsch et Zhulanov [65] prenant en compte la polydispersité des fibres avec σ (Tableau 1-6), aucun des autres modèles ne permet actuellement de prendre en compte les mélanges de fibres présentant des distributions multimodales, bien que ces configurations soient couramment rencontrées dans les médias fibreux réels. Ces médias peuvent en effet combiner des fibres microniques, assurant la résistance mécanique de la structure, et des fibres submicroniques, contribuant à améliorer les performances de filtration.

Cette limitation souligne la nécessité de développer de nouveaux modèles capables de prédire la perméabilité de ces structures plus complexes dans un régime d'écoulement non continu.

1.3 Efficacité de collecte initiale d'un média fibreux

1.3.1 Définitions

L'**efficacité globale** de collecte des particules (E) d'un média fibreux représente le ratio entre le nombre de particules retenues ou capturées par le filtre et le nombre total de particules atteignant le média. En supposant un débit volumique constant entre l'amont et l'aval du filtre, l'efficacité globale se calcule à partir des concentrations de particules en amont (C_{amont}) et en aval (C_{aval}), selon la formule :

$$E = 1 - \frac{C_{amont}}{C_{aval}} \qquad \textit{Eq. 1-40}$$

Pour un filtre très efficace, la caractérisation de sa performance peut aussi s'exprimer à partir de la **perméance** (P) ou du **coefficient d'épuration**, appelée aussi facteur de décontamination (CE) :

$$P = \frac{C_{aval}}{C_{amont}} = 1 - E = \frac{1}{CE} \qquad \textit{Eq. 1-41}$$

On définit également l'efficacité fractionnelle comme étant l'efficacité pour une taille de particule d_i :

$$E_{d_i} = 1 - \frac{C_{aval,d_i}}{C_{amont,d_i}} \qquad \textit{Eq. 1-42}$$

Afin d'estimer l'efficacité des filtres à fibres, de nombreux auteurs font intervenir l'**efficacité unitaire** de collecte d'une fibre. Pour un système constitué d'une fibre entourée d'une enveloppe concentrique de fluide, cette efficacité unitaire correspond au rapport du flux de particules de diamètre d_p collectées par la fibre sur le flux s'approchant de la fibre :

$$\eta(d_{pi}) = \frac{\text{Particules de diamètre } d_{pi} \text{ collectées par la fibre i}}{\text{Particules de diamètre } d_{pi} \text{ s'approchant de la fibre i}} \qquad \textit{Eq. 1-43}$$

A partir d'un bilan sur une tranche de média d'épaisseur dZ, l'efficacité globale peut être reliée à l'efficacité unitaire, selon la relation suivante :

$$E = 1 - \exp\left(-4\eta \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{Z}{\pi d_f}\right) \qquad \textit{Eq. 1-44}$$

1.3.2 Mécanismes de collecte

L'efficacité unitaire de collecte d'une fibre dépend de différents mécanismes physiques de capture, qui interviennent plus ou moins significativement selon la taille des particules (Figure 1-6). On distingue principalement :

- La **diffusion brownienne** : La seule interaction des particules de faible diamètre est leur collision avec des molécules de gaz. Leur trajectoire devient ainsi aléatoire, s'écartant des lignes de courant. Par cette agitation brownienne, les particules de diamètre inférieur à 0,1 µm peuvent entrer en contact avec les fibres et y adhérer.
- **L'interception** : Les particules d'un diamètre supérieur à environ 0,1 µm suivent les lignes de courant mais peuvent être interceptées par une fibre lorsqu'elles sont à une distance inférieure à leur rayon.
- **L'impaction inertielle** : Une particule présentant une masse importante ou ayant un diamètre supérieur de l'ordre de grandeur du micromètre pour une densité de l'ordre de un peut être déviée de la ligne de courant qui contourne la fibre et venir s'impacter à sa surface de par son inertie.
- **La sédimentation** : Ce phénomène est négligeable pour un diamètre inférieur à 10 µm et ne concernera pas nos cas d'étude.

A ces mécanismes dits « mécaniques », peuvent s'ajouter des phénomènes dus à la présence de charges électriques : les **effets électrostatiques**.

Les mécanismes de capture mécanique pertinents pour notre cas d'étude sont illustrés en Figure 1-5.

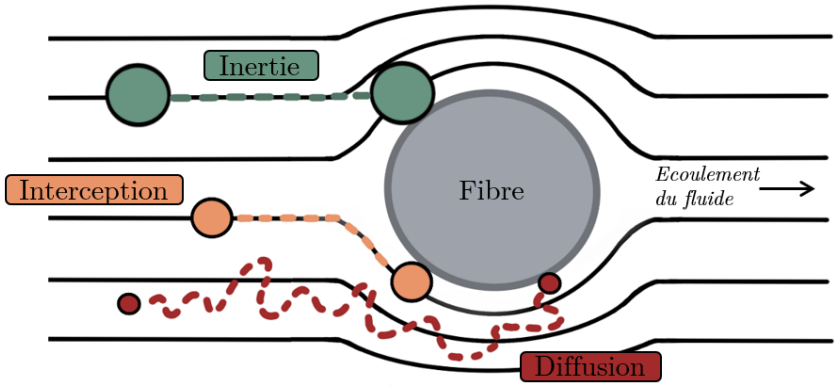


Figure 1-5 : Collecte des particules par inertie, interception et diffusion

En Figure 1-6 sont représentées les efficacités fractionnelles des principaux mécanismes de collecte contribuant à l'efficacité globale d'un filtre à fibres. La courbe d'efficacité globale possède un minimum, qui se nomme la M.P.P.S. (*Most Penetrating Particle Size*). Elle définit l'efficacité fractionnelle minimale pour la taille de particule la plus pénétrante (Figure 1-6) et se situe généralement pour un diamètre de particule entre 0,1 et 0,5 µm [12].

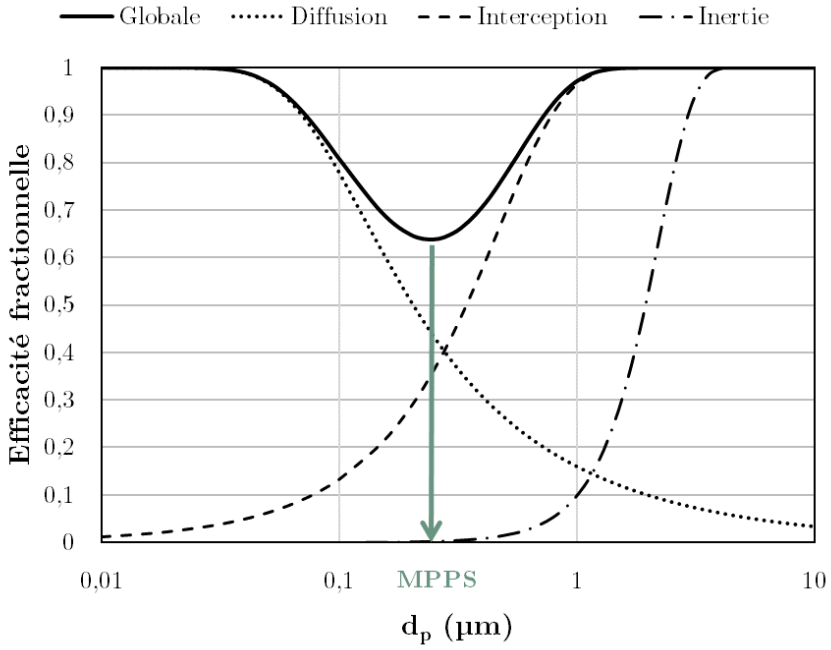


Figure 1-6 : Évolution de l'efficacité fractionnelle de collecte

La majorité des auteurs considère les mécanismes indépendants les uns des autres et suppose que l'efficacité unitaire globale d'une fibre correspond à la somme des efficacités unitaires des mécanismes intervenant :

$$\eta = \sum_{i=n}^{n} \eta_i \qquad \textit{Eq. 1-45}$$

Kasper *et al.* [67], quant à eux, raisonnent sur la perméance d'une fibre qui correspond au produit des perméances de chaque mécanisme :

$$P_{fibre} = \prod_{i=1}^{n} P_i \qquad \textit{Eq. 1-46}$$

Ainsi, l'efficacité unitaire s'exprime de la manière suivante :

$$\eta_{fibre} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - \eta_i) \qquad \textit{Eq. 1-47}$$

A noter que l'équation 1.47 peut se résumer à l'équation 1. 45 si pour une taille de particules donnée, un mécanisme de collecte prévaut sur les autres.

Quelques auteurs tiennent compte de l'interaction entre diffusion et interception avec une efficacité unitaire des deux mécanismes combinés η_{DR} [65,68] :

$$\eta = \sum_{i=n}^{n} \eta_i + \eta_{DR} \qquad \textit{Eq. 1-48}$$

La modélisation des efficacités de filtration nécessite le calcul du champ de trajectoire des particules au voisinage des fibres. Cependant, la structure complexe des médias fibreux rend cette détermination difficile. La résolution peut être simplifiée à l'aide de modèles considérant le filtre comme un milieu continu avec une structure idéale, composée d'un ensemble de cylindres de même diamètre, parallèles entre eux et perpendiculaires à l'écoulement. De cette manière, en résolvant les équations de Navier-Stokes autour d'un ensemble de fibres, on obtient une fonction de courant relative aux composantes de la vitesse et qui s'exprime avec un facteur hydrodynamique (H) comme pour les modèles de perte de charge. Différentes expressions existent selon le régime d'écoulement, comme présenté dans la section 1.2.3a. pour caractériser la perméabilité d'un média fibreux en régime d'écoulement continu, et dans la section 1.2.4 pour un régime d'écoulement non continu.

Dans le Tableau 1-7, trois expressions classiquement utilisées dans les modèles d'efficacité unitaire de filtration issus de la littérature sont présentées pour un régime d'écoulement continu.

Tableau 1-7 : Facteur hydrodynamique en régime continu des modèles d'efficacités unitaires

Auteurs	**Expression de H**		**Commentaires**
Kuwabara (1959) **[69]**	$H_{Ku} = \alpha - \frac{1}{2}\ln(\alpha) - \frac{1}{4}\alpha^2 - \frac{3}{4}$	*Eq. 1-49*	· Ensemble de cylindres · Régime continu
Lamb (1932) **[70]**	$H_{La} = 2 - \ln(Re_f)$	*Eq. 1-50*	· Cylindre isolé · Régime continu
Happel (1959) **[53]**	$H_{Ha} = \frac{\alpha^2}{1+\alpha^2} - \frac{1}{2}\ln(\alpha) - \frac{1}{2}$	*Eq. 1-51*	· Ensemble de cylindres · Régime continu

1.3.3 Modélisation de l'efficacité unitaire par diffusion

Le mécanisme de collecte de particules par diffusion est caractérisé par le nombre de Peclet, qui montre l'importance du transport par convection du gaz porteur par rapport au mouvement diffusionnel :

$$Pe = \frac{d_f\, U}{\mathcal{D}} = \frac{\text{transport par convection}}{\text{transport par diffusion}} \qquad \textit{Eq. 1-52}$$

Avec $\mathcal{D}$ le coefficient de diffusion d'une particule sphérique de diamètre d_p :

$$\mathcal{D} = \frac{k_B\, T\, Cu}{3\, \pi\, \mu\, d_p} \qquad \textit{Eq. 1-53}$$

Avec k_B la constante de Boltzmann ($1{,}38\ 10^{-23}$ $J.K^{-1}$), T la température en K et Cu le coefficient de Cunningham calculé à partir du nombre de Knudsen de particules.

Le coefficient de Cunningham (Cu), permettant d'intégrer les effets de glissement apparaissant sur les particules, se définit comme :

$$C_u = 1 + A\, K_{n_p} + B\, K_{n_p} \exp\left(-\frac{C}{K_n}\right) \qquad \textit{Eq. 1-54}$$

Avec les coefficients A, B et C des constantes déterminées expérimentalement (Tableau 1-8), et K_{n_p} le nombre de Knudsen de particule défini en fonction du diamètre de particule d_p et du libre parcours moyen λ_g (Eq. 1-55).

$$K_{n_p} = \frac{2\, \lambda_g}{d_p} \qquad \textit{Eq. 1-55}$$

Tableau 1-8 : Valeurs des constantes de Cunningham selon différents auteurs

Auteurs	A	B	C
Millikan (1923) [**71**]	1,250	0,420	0,870
Allen et Raabe (1982) [**72**]	1,155	0,471	0,596
Buckley et Loyalka (1989) [**73**]	1,099	0,518	0,425
Rader (1990) [**74**]	1,207	0,440	0,780
Allen et Raabe (1985) [**75**]	1,142	0,558	0,999
Hutchins *et al.* (1995) [**76**]	1,231	0,470	1,178
Kim *et al.* (2005) [**77**]	1,165	0,483	0,997
Jung *et al.* (2012) [**78**]	1,165	0,480	1,001

Les modèles théoriques, semi-empiriques et empiriques issus de la littérature sont résumés dans le Tableau 1-9.

La majorité des modèles a été développée en considérant un écoulement dans le milieu fibreux en régime continu. Trois auteurs [65,79,80] se distinguent en prenant en compte les effets de glissement du fluide sur les fibres (Eq. 1-63 ; Eq. 1-66 ; Eq. 1-67).

Ces modèles sont majoritairement fonction d'un nombre de Peclet à la puissance -2/3. Il est intéressant de noter que seul le modèle théorique de Kirsch et Zhulanov (Eq. 1-63) intègre la polydispersité des diamètres de fibres afin de représenter un média réaliste. Enfin, le modèle LRGP, développé au sein de l'équipe (Eq. 1-75) est actuellement en cours d'optimisation.

Les coefficients Cd de Liu et Rubow [79] et Cd' de Payet *et al.* [80] se définissent de la manière suivante :

$$\mathrm{Cd} = 1 + 0{,}388\mathrm{Kn_f}\left[\frac{(1-\alpha)\mathrm{Pe}}{\mathrm{H_{ku}}}\right]^{1/3} \qquad \textit{Eq. 1-56}$$

$$\mathrm{Cd'} = \left[1 + 1{,}6\left[\frac{1-\alpha}{\mathrm{H_{ku}}}\right]^{\frac{1}{3}}\mathrm{Pe}^{-\frac{2}{3}}\mathrm{Cd}\right]^{-1} \qquad \textit{Eq. 1-57}$$

Et les expressions de η_0 et η_∞ de Mardanov [81] :

$$\eta_0 = 11{,}41 - 6{,}01\mathrm{H_{Ku}} + 6{,}52\mathrm{H_{Ku}^2} \qquad \textit{Eq. 1-58}$$

$$\eta_\infty = 4{,}82\mathrm{H_{Ku}^{-0{,}59}}\,\mathrm{Pe}^{-1+5{,}47\times10^{-2}\mathrm{H_{Ku}}} \qquad \textit{Eq. 1-59}$$

L'ensemble des modèles a été comparé sur une structure fibreuse fictive composée de fibres d'un diamètre de 2 µm et d'une compacité de 5%. La Figure 1-7 et la Figure 1-8 montrent l'évolution des différents modèles d'efficacité unitaire de diffusion selon le nombre de Peclet.

Parmi les différents modèles de la littérature, une tendance similaire est observée, à savoir une augmentation de l'efficacité unitaire de diffusion lorsque le nombre de Peclet diminue. Toutefois, la dispersion des résultats générées par ces modèles ne permet pas de privilégier un modèle en particulier. Une confrontation avec des données expérimentales s'avère ainsi nécessaire.

Tableau 1-9 : Expressions de l'efficacité unitaire par diffusion selon différents auteurs

Auteurs	Expression de η_D		Commentaires
Fuchs et Stechkina (1963) [**82**]	$2{,}9\,H_{Ku}^{-1/3}\,Pe^{-2/3}$	*Eq. 1-60*	· Modèle théorique · Régime continu
Stechkina *et al.* (1969) [**68**]	$2{,}9\,H_{Ku}^{-1/3}Pe^{-2/3} + 0{,}624\,Pe^{-1}$	*Eq. 1-61*	· Modèle théorique · Régime continu
Kirsch et Fuchs (1968) [**83**]	$2{,}7Pe^{-2/3}$	*Eq. 1-62*	· Modèle empirique · Etude avec 0,01<α<0,15
Kirsch et Zhulanov (1978) [**65**]	$2{,}7Pe^{-2/3}\left[1 + 0{,}39\left(H_{Fan}^{K\&Z}\right)^{-1/3} Pe^{1/3}\,Kn_f\right] + 0{,}624Pe^{-1}$	*Eq. 1-63*	· Modèle théorique, prise en compte de la polydispersité des fibres dans le facteur hydrodynamique · Régime non continu
Lee et Liu (1) (1982) [**84**]	$2{,}6\left[\frac{1-\alpha}{H_{ku}}\right]^{1/3} Pe^{-2/3}$	*Eq. 1-64*	· Modèle théorique · Écoulement de Kuwabara · Régime continu
Lee et Liu (2) (1982) [**84**]	$1{,}6\left[\frac{1-\alpha}{H_{ku}}\right]^{1/3} Pe^{-2/3}$	*Eq. 1-65*	· Modèle théorique modifié selon les résultats expérimentaux · Écoulement de Kuwabara · Régime continu
Liu et Rubow (1990) [**79**]	$1{,}6\left[\frac{1-\alpha}{H_{ku}}\right]^{1/3} Pe^{-2/3}Cd$	*Eq. 1-66*	· Extension du modèle de Lee et Liu avec facteur de correction Cd dû aux glissements · Régime non continu
Payet *et al.* (1992) [**80**]	$1{,}6\left[\frac{1-\alpha}{H_{ku}}\right]^{1/3} Pe^{-2/3}Cd\,Cd'$	*Eq. 1-67*	· Facteur de correction Cd' ajouté au modèle de Liu et Rubow · Régime non continu
Langmuir (1948) [**85**]	$1{,}7H_{La}^{-1/3}\,Pe^{-2/3}$	*Eq. 1-68*	· Modèle théorique
Rao et Faghri (1) (1988) [**86**]	$1{,}8\left[\frac{1-\alpha}{H_{ku}}\right]^{1/3} Pe^{-2/3}$	*Eq. 1-69*	· Ajustement paramétrique · Étude avec 100<Pe<300 et 0,029<α<0,1
Rao et Faghri (2) (1988) [**86**]	$4{,}89\left[\frac{1-\alpha}{H_{ku}}\right]^{0{,}54} Pe^{-0{,}92}$	*Eq. 1-70*	· Ajustement paramétrique · Étude avec Pe<50 et 0,029<α<0,1
Natanson cité par Matteson (1987) [**87**]	$2{,}9H_{La}^{-1/3}\,Pe^{-2/3}$	*Eq. 1-71*	· Modèle théorique
Davies [**40**]	$1{,}5Pe^{-2/3}$	*Eq. 1-72*	
Wang (2007) [**88**]	$0{,}84Pe^{-0{,}43}$	*Eq. 1-73*	· Modèle empirique · Étude avec 1<Pe<250 et 0,039<α<0,05
Mardanov (2023) [**81**]	$\sqrt{\left(\frac{\eta_0^2}{2\eta_\infty}\right)^2 + \eta_0^2} - \frac{\eta_0^2}{2\eta_\infty}$	*Eq. 1-74*	· Modèle théorique · Écoulement de Kuwabara · Régime continu · Étude avec 10^{-3}<Pe<10^3 et 0,001<α<0,1
LRGP (2022) [**89**]	$2{,}2\,(1-\alpha)\,Pe^{-0{,}63}$	*Eq. 1-75*	· Régime continu · Étude avec 1,3<Pe<580 et 0,02<α<0,25

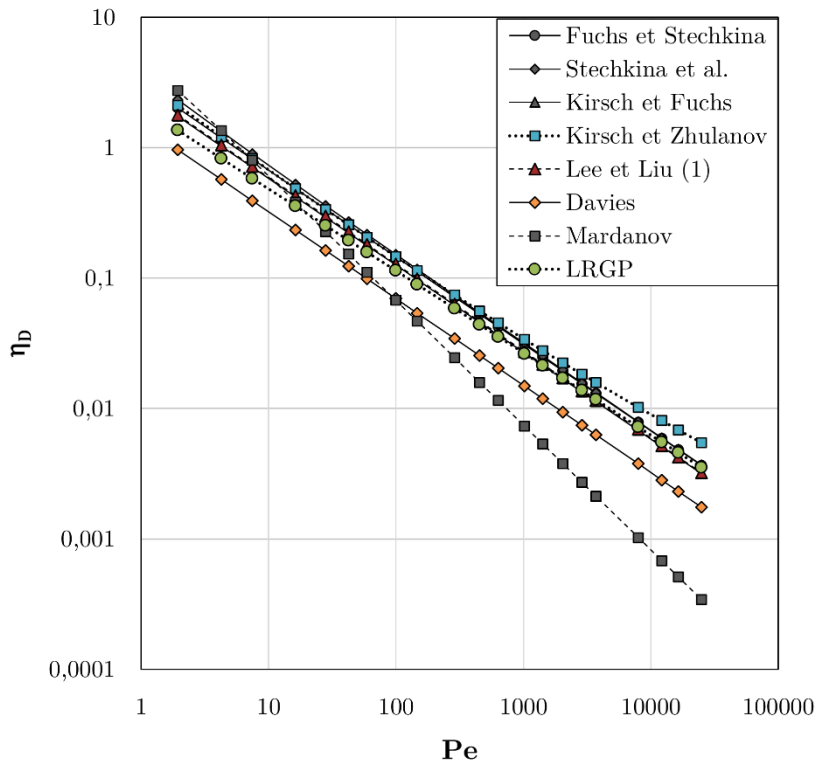


Figure 1-7 : Modèles d'efficacité unitaire par diffusion (a)

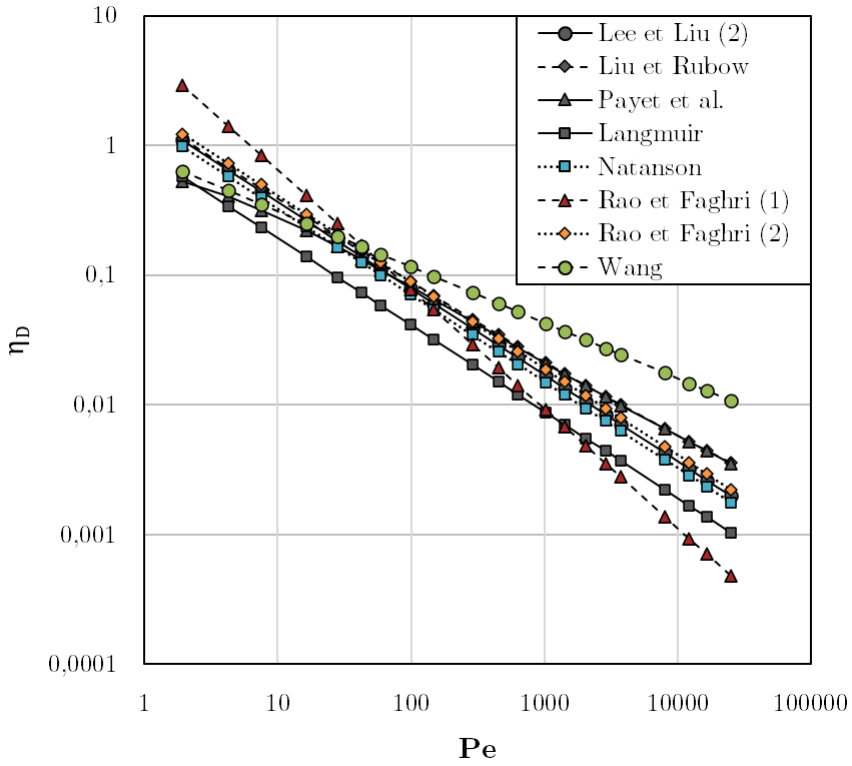


Figure 1-8 : Modèles d'efficacité unitaire par diffusion (b)

1.3.4 Modélisation de l'efficacité unitaire par interception

Indépendant de la vitesse, le mécanisme d'interception est fonction de la taille des particules, mais aussi de la structure fibreuse du média (diamètre de fibre et compacité). Il est décrit par le rapport (R) entre le diamètre des particules et le diamètre des fibres :

$$R = \frac{d_p}{d_f} \qquad \textit{Eq. 1-76}$$

Le Tableau 1-10 regroupe les différents modèles de la littérature, parmi lesquels seuls trois (Eq. 1-80 ; Eq. 1-85 ; Eq. 1-86) sont adaptés au régime d'écoulement non continu [65,79,87].

Les expressions du coefficient Cr de Liu et Rubow [79] et du paramètre H^{nat} de Natanson cité par Matteson [87] sont les suivantes :

$$Cr = 1 + 1{,}996\frac{Kn_f}{R} \qquad \textit{Eq. 1-77}$$

$$H^{nat} = -0{,}7 - 0{,}5\ln(\alpha) \qquad \textit{Eq. 1-78}$$

La Figure 1-9 représente les différents modèles de la littérature appliqués au même exemple de structure fibreuse que précédemment, en fonction du rapport R. On constate une augmentation de l'efficacité unitaire par interception à mesure que la valeur du rapport R croît, ce qui correspond à une augmentation du diamètre des particules pour un diamètre de fibre constant. Le graphique met en évidence deux catégories distinctes de modèles à faible valeur de R : ceux établis pour un régime d'écoulement continu et ceux intégrant le glissement du fluide sur les fibres.

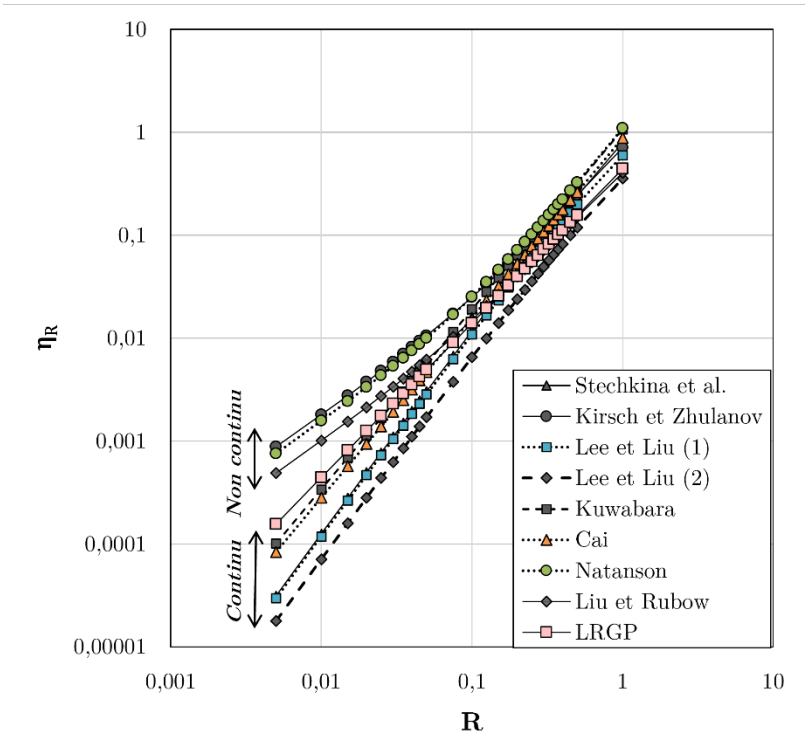


Figure 1-9 : Modèles d'efficacité unitaire par interception

Tableau 1-10 : Expressions de l'efficacité unitaire par interception selon différents auteurs

Auteurs	**Expression de η_R**		**Commentaires**
Steckhina *et al.* (1969) [**68**]	$\frac{1}{2\,H_{Ku}}[2(1+R)\ln(1+R) - (1+R) + \frac{1}{1+R}]$	*Eq. 1-79*	· Modèle théorique · Régime continu · Écoulement de Kuwabara
Kirsch et Zhulanov (1978)[**65**]	$\frac{1}{2\,H_{Fan}^{K\&Z}}\left[2(1+R)\ln(1+R) - (1+R) + \frac{1}{1+R} + \frac{2{,}86(2+R)R}{1+R}Kn_f\right]$	*Eq. 1-80*	· Modèle théorique, prise en compte de la polydispersité des fibres dans le facteur hydrodynamique · Régime non continu
Lee et Liu (1) (1982)[**84**]	$\frac{1-\alpha}{H_{Ku}}\frac{R^2}{1+R}$	*Eq. 1-81*	· Modèle théorique · Régime continu · Écoulement de Kuwabara
Lee et Liu (2) (1982)[**84**]	$0{,}6\frac{1-\alpha}{H_{Ku}}\frac{R^2}{1+R}$	*Eq. 1-82*	· Modèle théorique modifié selon les résultats expérimentaux · Régime continu · Écoulement de Kuwabara
Kuwabara	$2{,}9\,\alpha^{\frac{1}{3}}\,R^{1{,}75}$	*Eq. 1-83*	· Modèle théorique · Régime continu · Écoulement de Kuwabara
Cai cité par Miecret (1989)[**90**]	$2{,}4\,\alpha^{\frac{1}{3}}\,R^{1{,}75}$	*Eq. 1-84*	· Régime continu · Écoulement de Kuwabara
Natanson cité par Matteson (1987) [**87**]	$\frac{R\,(R+1{,}996Kn_f)}{H^{nat}+1{,}996Kn_f(H^{nat}+R)}$	*Eq. 1-85*	· Modèle théorique · Régime non continu
Liu et Rubow (1990) [**79**]	$0{,}6\frac{1-\alpha}{H_{Ku}}\frac{R^2}{1+R}\,Cr$	*Eq. 1-86*	· Extension du modèle de Lee et Liu avec facteur de correction Cr dû aux glissements · Régime non continu
LRGP (2021) [**91,92**]	$1{,}2\,\alpha^{\frac{1}{3}}R^{\frac{3}{2}}$		· Régime continu

1.3.5 Modélisation de l'efficacité unitaire par inertie

L'efficacité unitaire par inertie est caractérisée par le nombre de Stokes, qui représente le rapport entre l'énergie cinétique de la particule et l'énergie dissipée par frottement avec le fluide. La longueur caractéristique dans l'expression de Stokes est, selon les auteurs, le rayon ou le diamètre des particules ce qui explique la coexistence des deux expressions suivantes :

$$\mathrm{Stk} = \frac{\rho_p \, d_p^2 \, Cu \, U}{9 \, \mu \, d_f} \qquad \textit{Eq. 1-87}$$

Ou :

$$\mathrm{Stk}' = \frac{\rho_p \, d_p^2 \, Cu \, U}{18 \, \mu \, d_f} \qquad \textit{Eq. 1-88}$$

Les différents modèles d'efficacité unitaire par inertie sont résumés dans le Tableau 1-11.

Tableau 1-11 : Expressions de l'efficacité unitaire par inertie selon différents auteurs

Auteurs	**Expression de η_I**		**Commentaires**
Langmuir (1948)[**85**]	$\frac{\mathrm{Stk}^2}{(1+0{,}55\,\mathrm{Stk})^2}$	*Eq. 1-89*	· Modèle théorique · Étude avec Re_f <1
Friedlander (1967) [**93**]	$0{,}075\,\mathrm{Stk}^{6/5}$	*Eq. 1-90*	· Modèle empirique · Étude avec Re_f <1, R<0,2 et 0,8<Stk<2
Stechkina *et al.* (1969) [**68**]	$\frac{I\,\mathrm{Stk}}{(2\,H_{Ku})^2}$	*Eq. 1-91*	· Modèle théorique · Étude avec 0,01<R <0,4 et 0,0035<α<0,11
Gougeon (1994) [**94**]	$0{,}0334\,\mathrm{Stk}^{3/2}$	*Eq. 1-92*	· Modèle empirique · Étude avec 0,03<Re_f <0,25 et 0,5<Stk<4,1
Landhal et Hermann (1949) [**95**]	$\frac{\mathrm{Stk}^3}{\mathrm{Stk}^3+0{,}77\,\mathrm{Stk}^2+0{,}22}$	*Eq. 1-93*	· Modèle empirique
Ilias et Douglas (1989) [**96**]	$[\mathrm{Stk}'^3+A_1/\mathrm{Stk}'] \times [A_2\,\mathrm{Stk}'^3 + (A_3+A_4\ln(Re_f))\mathrm{Stk}'^2 + A_5\ln(Re_f)+A_6]^{-1}$ $A_1 = 1{,}622\,10^{-4}$; $A_2 = 1{,}031$ $A_3 = 1{,}14$; $A_4 = 0{,}04044$; $A_5 = 0{,}01479$; $A_6 = 0{,}2013$	*Eq. 1-94*	· Modèle issu de calculs numériques · Étude avec 0,07<Stk'<5 et 30<Re_f <40000

Avec le paramètre I de Stechkina *et al.* [68] :

$$I = (29{,}6 - 28\,\alpha^{0{,}62})R - 27{,}5\,R^{2{,}8} \qquad \textit{Eq. 1-95}$$

La Figure 1-10 montre l'évolution des efficacités unitaires par inertie en fonction du nombre de Stokes pour la filtration de particule de NaCl à une vitesse de 5 cm/s avec un média fibreux de diamètre de fibres de 5 µm et une compacité de 5 %. La figure met en évidence une grande variabilité entre les modèles existants dans la littérature.

L'application du modèle de Stechkina *et al.* [68] (Eq. 1-91) semble très limitée, car celui-ci atteint une efficacité unitaire supérieure à 1 pour des nombres de Stokes extrêmement faibles (inférieurs à 0,4). De la même manière, le modèle de Langmuir semble applicable seulement pour un nombre de Stokes inférieur à 2.

Les modèles de Landahl et Hermann [95] (Eq. 1-93) ainsi que celui d'Ilias et Douglas [96] (Eq. 1-94) présentent une évolution similaire : ils convergent vers une valeur limite pour des grandes valeurs du nombre de Stokes. En revanche, les modèles de Gougeon [94] (Eq. 1-92) et Friedlander [93] (Eq. 1-90) montrent une tout autre tendance et se distinguent des autres modèles par une valeur d'efficacité unitaire nettement plus faible pour des nombres de Stokes inférieurs à 7.

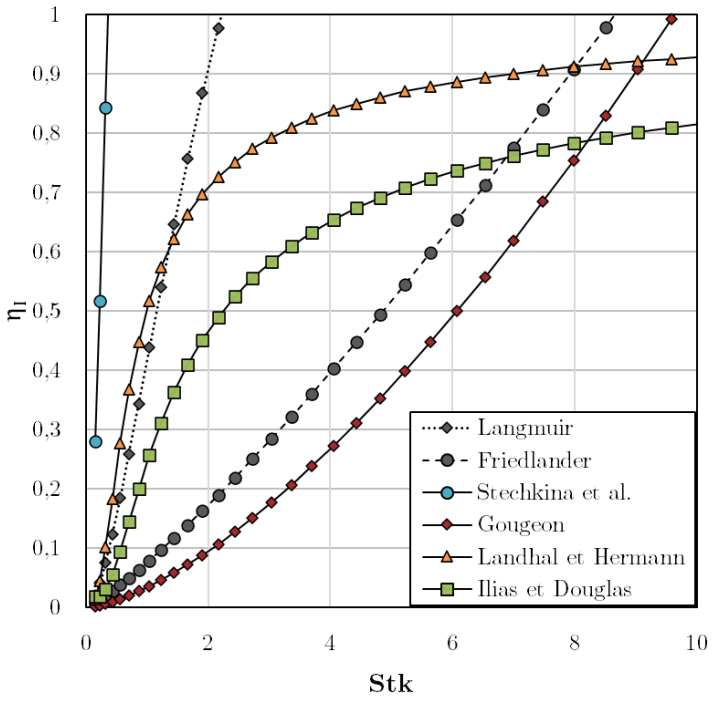


Figure 1-10 : Modèles d'efficacité unitaire par inertie

1.4 Conclusion

Les filtres à fibres demeurent à l'heure actuelle les systèmes les plus utilisés dans le domaine de l'épuration particulaire des gaz en ventilation générale, en protection individuelle et collective ou en épuration industrielle. Les médias fibreux constitutifs de ces filtres sont classiquement composés d'un enchevêtrement de fibres de longueur variable et de différentes tailles afin de former un matelas fibreux présentant une certaine compacité pour une épaisseur donnée. Deux critères importants permettent de caractériser ces médias : la perte de charge et l'efficacité fractionnelle de collecte des particules.

La plupart des modèles de perméabilité ou d'efficacité unitaire recensés dans la littérature montrent une grande dispersion entre eux. Concernant les modèles théoriques, ces écarts peuvent être attribués aux différentes hypothèses émises lors de leur établissement et, pour les modèles empiriques qui reposent sur des données expérimentales, aux conditions opératoires différentes et/ou à une caractérisation plus ou moins poussée et précise des structures fibreuses (grammage, compacité, épaisseur…). On peut rajouter également la non prise en compte pour la plupart des modèles de la distribution granulométrique des fibres souvent assimilée à une valeur de diamètre et dont la détermination reste floue. En conclusion, une étape de validation expérimentale demeure indispensable sur de nombreuses structures fibreuses présentant des caractéristiques très différentes afin de déterminer le « modèle universel ». Cette tâche essentielle demeure pourtant très ardue car elle nécessite de fabriquer des structures fibreuses très différentes pour balayer un large éventail de grammage, de compacité, de distribution de tailles de fibres et de les caractériser le plus précisément possible. La seule mesure de l'épaisseur qui conditionne également la compacité reste une opération délicate compte tenu de la compressibilité de ces structures. Et que dire de la détermination de la distribution granulométrique des fibres. Ces structures doivent être bien évidemment le plus homogène possible mais comment s'en assurer ?

Ces difficultés liées à la fabrication et à la caractérisation fine des structures fibreuses peuvent être contournées par l'utilisation de la simulation numérique. En particulier, le code numérique GeoDict permet de construire aisément des structures fibreuses parfaitement maîtrisées et caractérisées et de simuler des écoulements mono et diphasiques au travers d'elles afin d'en déterminer la perméabilité et l'efficacité fractionnelle.

Chapitre 2 : Simulation numérique des performances d'un média filtrant

Sommaire

Chapitre 2 : Simulation numérique des performances d'un média filtrant 37
2.1 Introduction à la CFD et généralités sur GeoDict 38
2.2 Modélisation numérique de microstructures fibreuses 40
2.3 Simulation de l'écoulement à travers les médias fibreux 42
2.4 Simulation numérique de la collecte de particule 45
2.5 Analyse de sensibilité des paramètres de simulation 48
2.5.1 Résolution du maillage 49
2.5.2 Dimension du domaine de simulation 52
a. Structure cubique 52
b. Épaisseur de la structure 55
2.5.3 Dimension des zones d'établissement de l'écoulement 57
2.5.4 Nombre de particules 58
2.6 Conclusion 60

Ce chapitre a pour objectif de présenter le cadre et le déroulement des simulations effectuées à l'aide du logiciel GeoDict afin de déterminer la perméabilité et l'efficacité de collecte de microstructures représentatives d'un média fibreux. Dans un second temps, une analyse de sensibilité sera menée afin d'évaluer l'influence des différents paramètres de simulation sur les résultats obtenus.

2.1 Introduction à la CFD et généralités sur GeoDict

L'approche de la simulation numérique présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes expérimentales. Alors que ces dernières sont souvent longues, coûteuses et pas faciles à mettre en œuvre, la simulation numérique permet d'obtenir une grande quantité de données tout en réduisant considérablement le temps nécessaire, une fois l'étape de validation effectuée. Grâce à l'utilisation d'outils mathématiques et informatiques, cette méthode permet ainsi de simuler un comportement physique à partir d'un ensemble de conditions définies.

Plus spécifiquement, la CFD (*Computational Fluid Dynamics*) est une sous-discipline de la simulation numérique qui se concentre sur la mécanique des fluides numérique. Elle permet de visualiser et d'étudier le comportement des fluides dans des conditions réelles. Aujourd'hui, la CFD est largement utilisée par la communauté scientifique. Bien qu'une validation expérimentale reste nécessaire, elle constitue un outil efficace pour gagner du temps et analyser des phénomènes complexes. Les simulations CFD permettent notamment de résoudre les équations moyennées de Navier-Stokes afin de modéliser le comportement moyen de l'écoulement, notamment en ce qui concerne les vitesses et les pressions moyennes.

Développé depuis les années 2000 par l'Institut Fraunhofer ITWM et commercialisé depuis 2011 par la société Math2Market GmbH, GeoDict est un logiciel de simulation numérique d'écoulement de fluide dans les milieux poreux dont l'acronyme signifie « *GEOmetric design and property preDICTion* ». Bien que ce logiciel puisse être appliqué à de nombreux domaines, cette étude se concentre sur son utilisation dans le cadre de la filtration des aérosols.

L'intérêt de GeoDict réside dans sa capacité à concevoir, modéliser, simuler et optimiser des médias filtrants à différentes échelles : de l'échelle du média fibreux à celle d'un élément filtrant (plis simples ou multiples) jusqu'à l'échelle d'un filtre complet en important un modèle CAO (Conception Assistée par Ordinateur) (Figure 2-1).

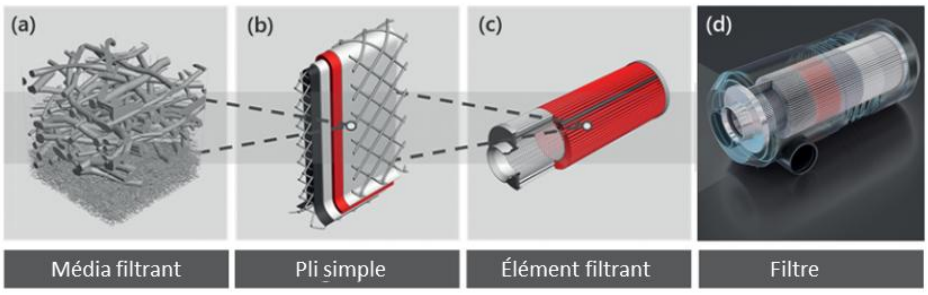


Figure 2-1: Utilisation du code de calcul GeoDict à plusieurs échelles [97]

Le logiciel est structuré en modules indépendants permettant la création de microstructures virtuelles représentant des médias fibreux (tissés ou non), des empilements compacts de sphères ou des plis poreux. Les équations différentielles liées à l'écoulement peuvent ensuite être résolues à l'aide de solveurs, permettant de déterminer diverses caractéristiques de la microstructure telles que la perméabilité, l'efficacité de filtration, les propriétés élastiques ou encore la tortuosité.

La Figure 2-2 illustre l'enchainement des modules utilisés pour simuler l'écoulement et la filtration de particules à l'échelle d'un média fibreux.

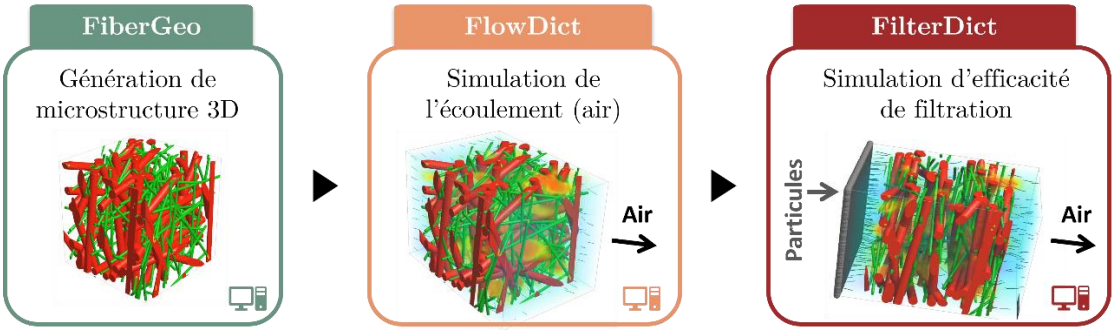


Figure 2-2 : Démarche simplifiée d'utilisation du code de calcul GeoDict

La première étape consiste à générer une nano ou microstructure numérique représentative du média filtrant. Des modules d'importation permettent de produire ces microstructures exploitables à partir d'images issues de la tomographie ou de la microscopie FIB-SEM. D'autres modules, comme **FiberGeo**, génèrent des microstructures basées sur les propriétés structurales d'un non-tissé définies par l'utilisateur, telles que la forme de la section transversale des fibres, leur longueur, la distribution de leur taille, leur pourcentage (en nombre, en masse ou en volume) ainsi que leur orientation.

À partir de ces microstructures, les propriétés d'écoulement sont déterminées par le module **FlowDict**. Les équations différentielles associées, telles que celles de Stokes, de Navier-Stokes ou de Stokes-Brinkman, y sont résolues afin d'extraire des paramètres liés à la structure, tels que la perméabilité ou la perte de charge.

Enfin, grâce au module **FilterDict**, le transport et le dépôt de particules en surface et en profondeur de la structure fibreuse peuvent être observés. À l'échelle du média fibreux, on peut notamment évaluer l'efficacité de collecte initiale d'un filtre propre ou encore simuler l'évolution de son colmatage, en analysant la perte de charge et l'accumulation des particules au fil du temps.

2.2 Modélisation numérique de microstructures fibreuses

Au cours de cette thèse, notre choix s'est porté vers la génération de microstructures plutôt que sur l'importation d'images. Ainsi, le module FiberGeo [98] a été utilisé, afin de créer des microstructures présentant une distribution aléatoire de fibres dans le domaine de simulation, tout en respectant les caractéristiques des fibres (diamètre, distribution de taille, orientation, incurvation, matériau) ainsi que les propriétés du média (compacité ou porosité).

Le domaine de calcul est représenté par un parallélépipède rectangle en trois dimensions. Cet espace est divisé en voxels (pixels volumétriques), qui sont définis comme étant remplis (zone solide) ou vides (zone fluide), leur proportion étant déterminée par la compacité (Figure 2-3).

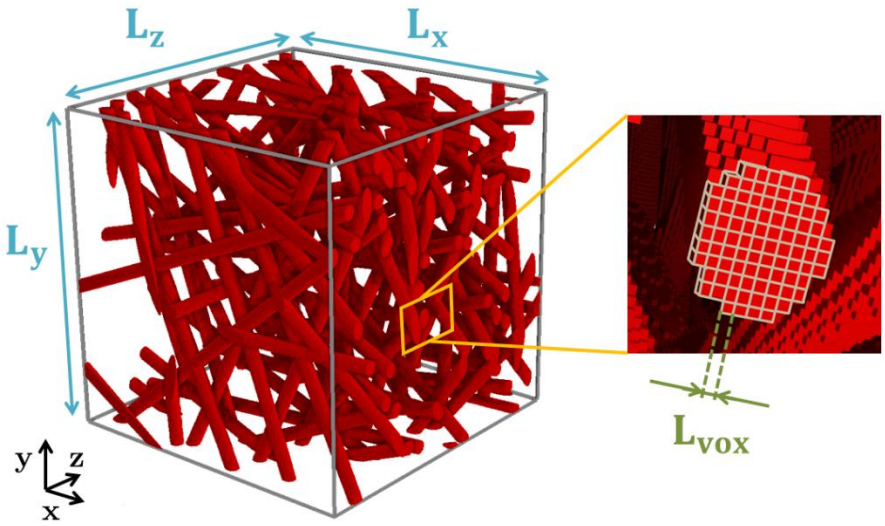


Figure 2-3: Domaine de calcul

Les dimensions du parallélépipède sont définies par l'utilisateur à l'aide des paramètres N_x, N_y et N_z, qui représentent respectivement le nombre de voxels sur les axes x, y et z. La résolution de la microstructure est directement influencée par la longueur constante des voxels L_{vox}, également fixée par l'utilisateur.

Ainsi, les dimensions du domaine de calcul sont :

$$\begin{aligned} L_x &= N_x \times L_{vox} \\ L_y &= N_z \times L_{vox} \\ L_z &= N_z \times L_{vox} \end{aligned} \qquad \textit{Eq. 2-1}$$

Les fibres, généralement modélisées sous forme de cylindres de longueur finie ou infinie, sont placées aléatoirement dans le domaine. Le code GeoDict permet de générer des diamètres de fibres uniformes, selon une valeur fixée par l'utilisateur, ou bien non uniformes, en suivant une distribution de taille gaussienne, log-normale ou une distribution de probabilité définie par l'utilisateur.

L'initialisation de la génération d'une structure repose sur une fonction aléatoire appelée « *random seed* » (RS). Ainsi, l'utilisation de différents RS permet de générer des structures avec des arrangements de fibres variés, tout en préservant leurs propriétés macroscopiques.

Dans le code GeoDict, les fibres sont créées avec des orientations aléatoires, suivant une distribution définie par deux paramètres d'anisotropie fixés, a_1 et a_2 [98].

Pour chaque fibre, une direction aléatoire d est calculée selon une distribution isotrope :

$$d = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \qquad \textit{Eq. 2-2}$$

Les paramètres d'anisotropie influencent cette orientation. Le vecteur résultant associé à la nouvelle orientation est donné par :

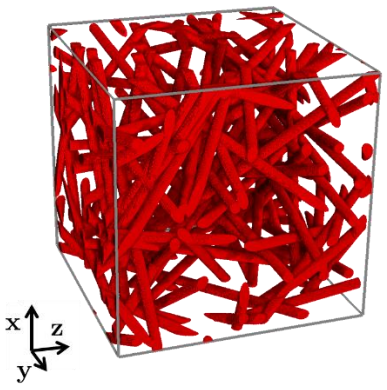
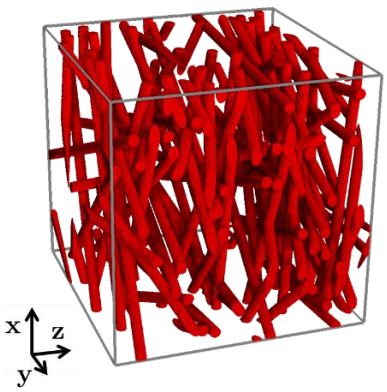
$$d_a = \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 \cdot x \\ a_1 \cdot a_2 \cdot y \\ z \end{pmatrix} \qquad \textit{Eq. 2-3}$$

Le paramètre a_1 contrôle les coordonnées en x et en y, tandis que a_2 modifie uniquement la coordonnée en y. L'orientation aléatoire selon z quant à elle n'est pas modifiée [98].

Ainsi, toutes les directions ont la même probabilité lorsque les deux paramètres a_1 et a_2 sont égaux à 1, la direction obtenue par l'algorithme aléatoire d n'étant pas modifié. Les fibres sont donc isotropes [98].

Une grande valeur de a_1, favorise une orientation parallèle au plan (xy), tandis qu'une valeur plus faible comprise entre 0 et 1 privilégie l'orientation des fibres dans la direction de l'axe z. En ce qui concerne le paramètre a_2, une valeur supérieure à 1 induit une orientation des fibres parallèle à l'axe y, tandis qu'une valeur inférieure à 1 les oriente parallèlement au plan (xz) [98].

Tableau 2-1: Paramètres d'anisotropie et orientation des fibres dans la structure

$\mathbf{a_1 = a_2 = 1}$	$\mathbf{a_1 > 1}$ **et** $\mathbf{a_2 = 1}$
$\mathbf{d_a = \begin{pmatrix} 1 \cdot x \\ 1 \cdot 1 \cdot y \\ z \end{pmatrix}}$	$d_a = \begin{pmatrix} 7 \cdot \\ 7 \cdot 1 \cdot y \\ z \end{pmatrix}$
	

Dans le cadre de cette étude dédiée aux milieux fibreux pour des applications de filtration, certains paramètres ont été fixés :

- Les fibres étant majoritairement orientées perpendiculairement à l'écoulement dans les procédés de fabrication des médias fibreux (par voie humide ou aérodynamique), les paramètres a_1 et a_2 ont été respectivement fixés à 7 et 1, afin d'obtenir une distribution isotrope dans le plan (xy).
- La section des fibres a été choisie circulaire, ce qui correspond généralement à la morphologie des fibres de verre ou de polymère, majoritairement utilisées dans les filtres industriels.
- Étant donné que les domaines simulés ne représentent qu'une infime partie du média filtrant, généralement bien inférieure à la longueur réelle des fibres, les fibres sont modélisées comme des cylindres droits de longueur infinie. Si des domaines de taille beaucoup plus importante étaient considérés, il serait alors pertinent de simuler des fibres incurvées, pour mieux représenter la morphologie réelle des fibres issues des procédés de type *meltblown* ou *spunbond*.

La taille des voxels, leur nombre selon les trois dimensions de l'espace ainsi que l'orientation des fibres sont des paramètres importants dans la construction d'une microstructure. Leur choix doit permettre de décrire avec précision l'écoulement, tout en garantissant un temps de calcul raisonnable et en limitant l'espace de stockage requis. Une étude de sensibilité de ces paramètres est présentée dans la section 2.5 de ce chapitre.

2.3 Simulation de l'écoulement à travers les médias fibreux

Pour résoudre les écoulements dans le module FlowDict [99], trois éléments d'entrée sont nécessaires :

- Une structure poreuse tri-dimensionnelle,
- La nature du fluide de viscosité constante,
- Les paramètres de l'écoulement, comme la vitesse ou la direction de l'écoulement.

Dans un premier temps, les **équations différentielles partielles** (**EDP**) permettant de caractériser l'écoulement doivent être définies. Comme l'écoulement est considéré visqueux, incompressible et le fluide stationnaire, il n'y donc pas de dépendance temporelle. La conservation de la masse (eq. 2-4) et la conservation de la quantité de mouvement (eq. 2-5) peuvent être exprimées sous forme d'équations de **Navier-Stokes** stationnaires comme suit :

$$\nabla\vec{u} = 0 \qquad \text{Eq. 2-4}$$

$$-\mu\Delta\vec{u} + (\rho\vec{u}\nabla)\vec{u} + \nabla p = \vec{f} \qquad \text{Eq. 2-5}$$

Avec μ la viscosité du fluide, $\vec{u}$ la vitesse du fluide, ρ la densité du fluide, p la pression et $\vec{f}$ la densité de force volumique.

La densité de force volumique désigne les forces extérieures appliquées à l'ensemble du volume de fluide, telles que la gravité dans le cas d'écoulements verticaux ou les forces électromagnétiques dans le cas de fluides chargés. Dans le cadre de notre application, portant sur des écoulements au sein de structures fibreuses, aucune force volumique externe significative n'agit sur le fluide. Ce terme sera donc négligé dans les équations.

A la surface des éléments solides, les conditions de non-glissement sont appliquées pour une partie de l'étude (Eq. 2-6).

$$\vec{u} = 0 \qquad \textit{Eq. 2-6}$$

Lorsque la vitesse d'écoulement du fluide est faible, c'est-à-dire à faible nombre de Reynolds, les forces d'inertie sont négligeables vis-à-vis des forces visqueuses. Le terme inertiel de la loi de conservation de la quantité de mouvement est donc négligé. L'équation de Navier-Stokes devient l'équation de **Stokes**, conduisant à une relation linéaire entre la perte de charge et la vitesse :

$$-\mu\Delta\vec{u} + \nabla p = \vec{f} \qquad \textit{Eq. 2-7}$$

Selon le régime d'écoulement, laminaire ou non laminaire, l'écoulement sera modélisé en résolvant les équations de Stokes ou de Navier-Stokes (Figure 2-4). Il est à noter que les équations de Navier-Stokes appliquées sur GeoDict entrainent tout de même l'hypothèse d'un régime permanent, donc les phénomènes dépendant du temps, comme la turbulence, ne sont pas pris en compte. De plus, pour garantir des conditions d'écoulement stationnaire et non transitoire à la frontière du milieu, il est nécessaire d'ajouter au domaine de la microstructure poreuse une région d'entrée et de sortie [99]. Ces régions sont ajoutées en introduisant des voxels vides en amont et en aval de la structure selon la direction de l'écoulement.

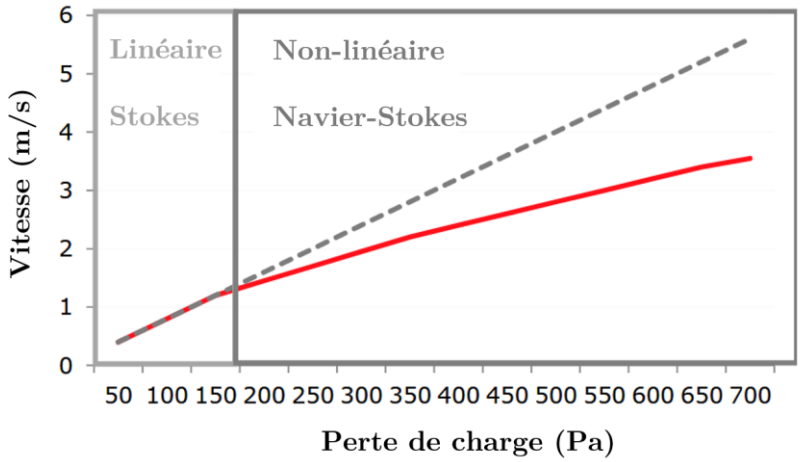


Figure 2-4 : Evolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la perte de charge [99]

Le choix des EDP à résoudre ne dépend pas seulement du régime d'écoulement du fluide (linéaire ou non-linéaire), mais aussi du milieu étudié. Les équations de Stokes et de Navier-Stokes sont appropriées pour un matériau poreux, constitué seulement de voxels vides et solides.

Pour des structures plus complexes et pour des raisons d'échelle, il est parfois nécessaire d'utiliser des voxels poreux. C'est notamment le cas lors de la modélisation d'un élément filtrant tel qu'un pli, qui sera constituée d'une grille métallique (composée de voxels solides et de voxels vides) servant de support à un média filtrant (représenté par des voxels poreux avec une perméabilité définie).

Dans ce contexte, l'ajout du terme de **Brinkman** dans les équations de Stokes et Navier-Stokes est nécessaire :

$$-\mu\Delta\vec{u} + \mu\mathbf{K}^{-1}\vec{u} + \nabla p = \vec{f} \qquad \textit{Eq. 2-8}$$

$$-\mu\Delta\vec{u} + (\rho\vec{u}\nabla)\vec{u} + \mu\mathbf{K}^{-1}\vec{u} + \nabla p = \vec{f} \qquad \textit{Eq. 2-9}$$

Avec ***K*** *le tenseur de perméabilité*

Pour résoudre ces équations différentielles partielles, trois **solveurs** existent dans le logiciel GeoDict [99]. Le solveur **EJ** (*Explicit Jump*) est applicable à des écoulements quand la relation entre la vitesse d'écoulement et la perte de charge est linéaire (équations de Stokes) pour des matériaux très poreux. Le solveur **Simple FFT** (*Simple Fast Fourier Transform*), fonctionne avec des écoulements non laminaires et laminaires. Cependant, pour des médias très poreux, le temps de convergence est beaucoup plus important. Il nécessite aussi une station de calcul avec davantage de mémoire. Pour finir, le solveur **LIR** (*Left Identity Right*) a une vitesse comparable au solveur Simple FFT pour des structures de très faible porosité, mais permet un gain important de temps et de mémoire pour des structures très poreuses, comme les médias fibreux. Basé sur un maillage adaptatif non uniforme, il augmente les dimensions des voxels à l'intérieur du volume poreux entre les fibres (zone à faible gradient de vitesse), tout en maintenant une haute résolution près de la surface des fibres, correspondant à la résolution fixée par l'utilisateur [100].

Au vu de la faible vitesse d'écoulement dans le domaine de la filtration de l'air pour des médias très poreux, les équations de **Stokes** associées au solveur **LIR** seront privilégiées dans cette thèse pour optimiser le temps de calcul et la mémoire de la station de calcul.

Après avoir résolu l'écoulement, à savoir déterminer la perte de charge pour une vitesse moyenne donnée, ou inversement, l'objectif est d'obtenir la perméabilité ou la résistance à l'écoulement de la microstructure. La relation entre la vitesse moyenne d'écoulement prédite (ou perte de charge), la viscosité du fluide et l'épaisseur du milieu exprimée dans la loi de **Darcy**, est utilisée pour calculer la perméabilité de la structure [99].

Le **tenseur de perméabilité** est obtenu à partir de la loi de Darcy pour un vecteur de vitesse moyenne $\vec{v}^{i}$ et un gradient de pression (ou différence de pression) ∇p^{i} dans la direction i.

L'indice i correspond au sens du flux d'écoulement dans la direction x pour i=1, y pour i=2 et z pour i=3.

$$\vec{v}^{i} = -\mu^{-1}\begin{bmatrix}\kappa_{xx} & \kappa_{xy} & \kappa_{xz}\\ \kappa_{yx} & \kappa_{yy} & \kappa_{yz}\\ \kappa_{zx} & \kappa_{zy} & \kappa_{zz}\end{bmatrix}\nabla p^{i} \qquad \textit{Eq. 2-10}$$

Le gradient de pression dans la direction i correspond à :

$$\nabla p^{i} = \frac{\Delta p^{i}}{L^{i}} \qquad \textit{Eq. 2-11}$$

Où L^{i} est la longueur physique du domaine numérique dans la direction de l'écoulement considérée, correspondant au produit de la taille d'un voxel et du nombre de voxels dans cette direction ; et Δp^{i} la perte de charge dans la direction considérée.

Lors de la résolution des équations linéaires de Stokes avec les différents solveurs, un tenseur de perméabilité indépendant de la perte de charge appliquée et de la viscosité du fluide utilisée est obtenu. La perméabilité est ainsi considérée comme une propriété intrinsèque du média, ce qui n'est pas le cas avec la résolution du modèle non linéaire de Navier-Stokes.

2.4 Simulation numérique de la collecte de particule

Après avoir modélisé l'écoulement du fluide, l'efficacité de collecte initiale de la microstructure peut être déterminée à l'aide du module FilterDict [101].

Le champ d'écoulement, préalablement calculé dans le module FlowDict, est réutilisé lors des simulations du mouvement des particules dans le module FilterDict. La densité des particules étant supposée faible, leur écoulement n'entraine pas de modification du champ d'écoulement, celui-ci étant principalement influencé par la taille et le nombre de particules.

De la même manière que pour les simulations d'écoulement du fluide, il est nécessaire d'ajouter une région de voxels vides en amont de la microstructure fibreuse, dans la direction de l'écoulement [101]. Cette région doit être plus large que le plus grand diamètre de particule fixé. En effet, les particules sont placées de manière aléatoire sur un plan situé dans cette zone de départ (Figure 2-5).

La distribution de taille des particules ainsi que le nombre de particules simulées pour chaque taille sont fixés par l'utilisateur. Il est donc nécessaire et important de trouver un compromis entre précision et temps de calcul, tous deux augmentant avec le nombre de particules injectées dans la structure fibreuse. La trajectoire des particules est résolue de manière indépendante pour définir si elles seront collectées en surface, dans la profondeur du média ou si elles quitteront le domaine. L'efficacité de collecte fractionnelle, i.e. pour chaque taille de particules, peut ainsi être déterminée.

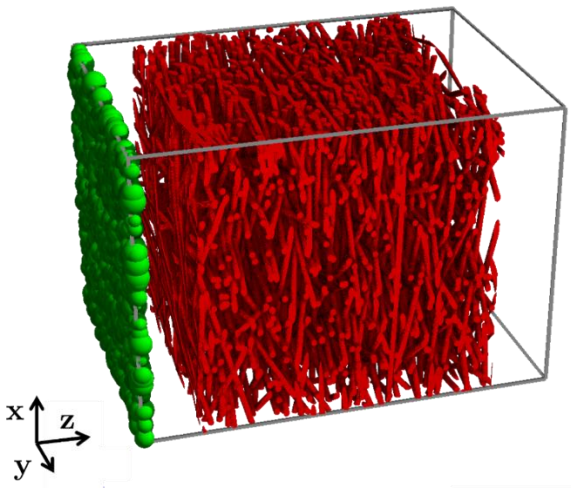


Figure 2-5: Position initiale des particules

Le mouvement des particules est régi par différentes forces. La force de traînée, correspondant à la friction entre la particule et le fluide, est l'une des forces dominantes agissant sur les particules. La force brownienne traduit quant à elle les changements de direction aléatoires dus aux collisions des particules avec les molécules du fluide. Enfin, des effets électrostatiques, d'attraction ou de répulsion, peuvent également influencer les trajectoires des particules en fonction des charges éventuelles des particules et des fibres.

Le mouvement des particules est ainsi gouverné par le bilan de forces suivant :

Quantité de mouvement des particules = Friction + Diffusion brownienne + Effets électrostatiques + Forces externes

Soit :

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = 6\pi\mu\frac{r_p}{C_u}\left(\vec{u} - \vec{v} + \sqrt{2D}\frac{d\vec{W}(t)}{dt}\right) + Q\vec{E} + \vec{F} \qquad \textit{Eq. 2-12}$$

La friction avec le fluide est proportionnelle à la différence entre la vitesse du fluide $\vec{u}$ et la vitesse de la particule $\vec{v}$. Dans un écoulement de Stokes, le coefficient de friction γ pour des particules sphériques de rayon r_p peut être corrigé par le facteur de Cunningham C_u pour prendre en compte la présence de glissement à la surface des particules de très faible diamètre, et est défini par :

$$\gamma = 6\pi\mu\frac{r_p}{C_u} \qquad \textit{Eq. 2-13}$$

Le mouvement brownien est modélisé par une description mathématique du mouvement aléatoire en temps continu, via le processus de Wiener tridimensionnel $\vec{W}$. Le coefficient de diffusion D est donnée par la relation suivante :

$$D = \frac{k_B T}{\gamma} \qquad \textit{Eq. 2-14}$$

Où T est la température ambiante et k_B la constante de Boltzmann

Les effets électrostatiques sont liés à l'influence éventuelle d'un champ électrique $\vec{E}$ sur une particule de charge Q. Le dernier terme du bilan de force $\vec{F}$ correspond à un champ de force additionnel que l'utilisateur peut ajuster, afin d'inclure, par exemple, la gravité ou la flottabilité. Les effets électrostatiques et le mouvement brownien peuvent être activés ou désactivés selon les cas de figure rencontrés.

Outre l'étude du mouvement des particules, il est essentiel d'évaluer leur dépôt au sein de la structure fibreuse afin de déterminer l'efficacité de collecte. Cela implique de suivre les collisions des particules à chaque étape de leur transport et de définir un modèle d'adhésion aux surfaces des zones solides ou poreuses.

Les collisions sont déterminées en calculant la distance entre le centre des particules et les obstacles, représentés par des voxels solides. Une fonction de distance est implémentée lors de la création de la microstructure, permettant de connaître la distance séparant chaque voxel vide de l'obstacle le plus proche.

Différents modèles de dépôt sont disponibles dans le logiciel GeoDict [101]. Le modèle de Hamaker compare la vitesse de la particule aux forces d'adhésion. Si la vitesse de la particule est suffisamment faible au moment du contact avec la structure, elle est capturée par le filtre. Ce modèle nécessite la définition de deux paramètres :

- La constante de Hamaker, qui représente l'énergie nécessaire pour que la particule rebondisse sur la fibre.
- Le coefficient de restitution, qui quantifie la conservation de l'énergie cinétique lors de la collision. Il varie entre une collision parfaitement élastique (où la particule rebondit avec la même vitesse qu'avant l'impact) et une collision inélastique (où une partie de l'énergie est absorbée, entraînant un ralentissement de la particule).

Le modèle de *Sieving* entraine un rebond strict de la particule avec dissipation d'énergie. Les particules ne s'accrochent jamais au filtre, sauf si elles cessent de se déplacer et entrent en contact avec le filtre en deux points distincts.

Enfin, le modèle *caught on first touch*, employé dans le cadre de ces travaux, considère qu'une particule adhère immédiatement lorsqu'elle entre en contact avec une surface solide.

Dans le cadre de la modélisation du colmatage d'un filtre, une fois fixées à la surface, les particules deviennent partie intégrante de la structure globale et servent de nouveaux collecteurs, sous forme de voxels solides ou poreux.

2.5 Analyse de sensibilité des paramètres de simulation

L'analyse de sensibilité réalisée dans cette étude vise à identifier les paramètres de simulation les plus influents sur les résultats, afin de garantir une description suffisamment fine du champ d'écoulement et du mouvement des particules, tout en évitant des simulations trop coûteuses en mémoire et en temps de calcul. La taille du domaine, la résolution du maillage, l'ajout de voxels vides en amont et en aval de la structure ainsi que le nombre de particules par type de diamètre ont été étudiés (Figure 2-6).

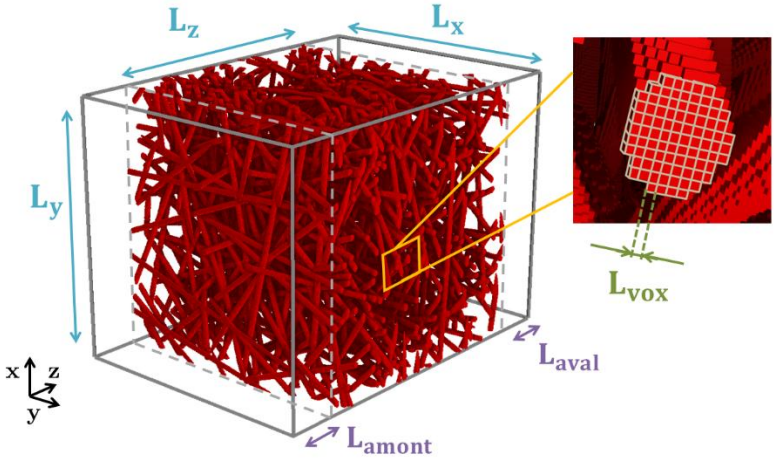


Figure 2-6 : Paramètres étudiés dans l'analyse de sensibilité

Dans ce cadre, des simulations ont été effectuées sur plusieurs structures afin d'évaluer leur perméabilité et leur efficacité de collecte selon ces paramètres. Ces simulations ont été réalisées dans des conditions similaires d'écoulement et de filtration :

- Trois valeurs d'initialisation ou « random seed » afin de déterminer une perméabilité et une efficacité de collecte moyenne pour trois structures différentes mais de mêmes propriétés macroscopiques ;
- Une vitesse d'écoulement de 10 cm/s ;
- Une distribution de particules de diamètres compris entre 0,01 et 8 µm, afin de prédire l'efficacité de collecte dans les domaines inertiel et diffusionnel. Les interactions électrostatistiques ont été désactivées afin d'isoler uniquement les effets mécaniques de filtration.

Cette analyse de sensibilité permet ainsi de déterminer les conditions optimales pour assurer une modélisation fiable et efficace, tout en optimisant les ressources nécessaires à la simulation.

2.5.1 Résolution du maillage

La résolution du maillage, qui permet une description plus fine de la structure et donc une meilleure représentation de l'écoulement du fluide et des particules, est directement liée à la taille du voxel.

Les études précédentes caractérisent cette résolution à l'aide du ratio entre le diamètre de la fibre et la taille du voxel, notamment pour des structures monomodales. Emami *et al.* [102] recommandent une taille de voxel d'au moins 1/7e du diamètre de la fibre, tandis que Thomas *et al.* [51] suggèrent un ratio supérieur à 20 pour obtenir une estimation fiable de la perméabilité.

Ce ratio, φ, est défini par :

$$\varphi = \frac{d_f}{L_{vox}} \qquad \textit{Eq. 2-15}$$

Il est important de noter que ce paramètre a principalement été étudié pour des structures monomodales. En présence de structures multimodales, il est défini, par la suite, en fonction du plus petit diamètre de fibre de la distribution.

Deux structures monomodales et une structure trimodale ont été analysées. Leurs caractéristiques structurales sont résumées dans le Tableau 2-2. Différentes résolutions φ, variant de 3 à 25, ont été testées et leur influence sur la perméabilité ainsi que sur l'efficacité fractionnelle a été évaluée. Pour minimiser les effets liés aux dimensions de la microstructure, un domaine suffisamment grand a été utilisé.

Tableau 2-2 : Paramètres structurels des structures Mono. 1, Mono. 2 et Trim. 1

Paramètres	Mono. 1	Mono. 2	Trim. 1
$\mathbf{d_1}$ (µm)	4	4	5,4
$\mathbf{f_{V1}}$ (%)	100	100	49
$\mathbf{d_2}$ (µm)	/	/	7,1
$\mathbf{f_{V2}}$ (%)	/	/	35,4
$\mathbf{d_3}$ (µm)	/	/	8,2
$\mathbf{f_{V3}}$ (%)	/	/	15,6
$\boldsymbol{\alpha}$ (%)	5	20	10
$\mathbf{L_x = L_y = L_z}$ (µm)	500	180	500

Avec d_i le diamètre de la fibre i, où l'indice i le plus faible correspond aux fibres les plus fines, f_{Vi} la fraction volumique de la fibre i et α la compacité de la microstructure.

La Figure 2-7 présente l'évolution du rapport entre la perméabilité κ^n obtenue à une résolution φ^n et la perméabilité de référence $\kappa^{n=25}$, obtenue avec la résolution maximale $\varphi = 25$. Ce ratio décroît avec l'augmentation de la résolution, jusqu'à atteindre une valeur limite de 1, correspondant à la perméabilité de référence pour $\varphi = 25$. Au vu de la faible variation des perméabilités entre $\varphi = 15$ et $\varphi = 25$, l'utilisation de $\varphi = 25$ comme résolution de référence semble justifiée. Enfin, à partir de $\varphi = 10$, l'écart de la perméabilité simulée avec celle de

référence devient inférieur à 1%, suggérant que cette résolution est suffisante pour obtenir une estimation précise de la perméabilité, tout en optimisant le temps de calcul.

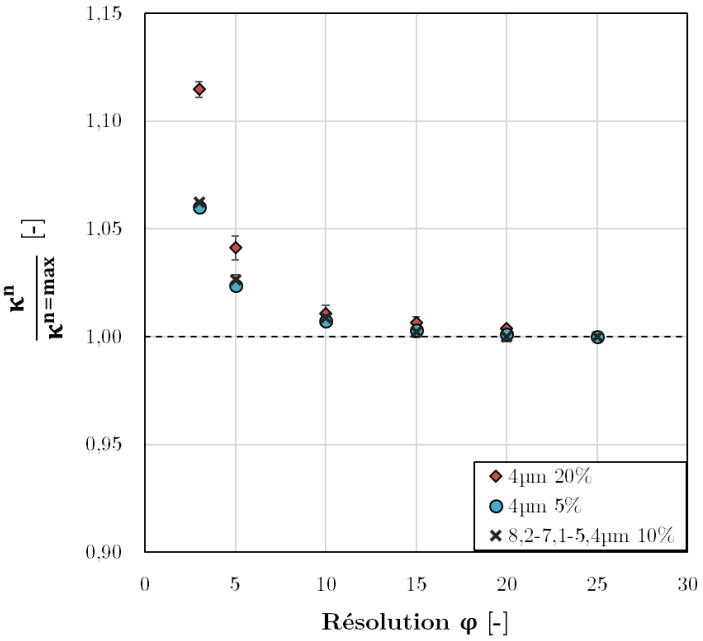


Figure 2-7 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la résolution du maillage

L'efficacité de filtration a ensuite été déterminée à partir des simulations réalisées sur les trois structures, en utilisant les résolutions de maillage précédentes. En se plaçant dans le cas le plus complexe, la Figure 2-8 présente les résultats obtenus pour la structure trimodale (Trim. 1) et illustre l'influence de la résolution du maillage φ sur l'efficacité fractionnelle de collecte en fonction du diamètre de particule d_p. La Figure 2-9, quant à elle, montre le rapport entre l'efficacité obtenue à une résolution donnée (Eff^n) et celle de référence, correspondant à la résolution maximale étudiée ($\varphi = 25$).

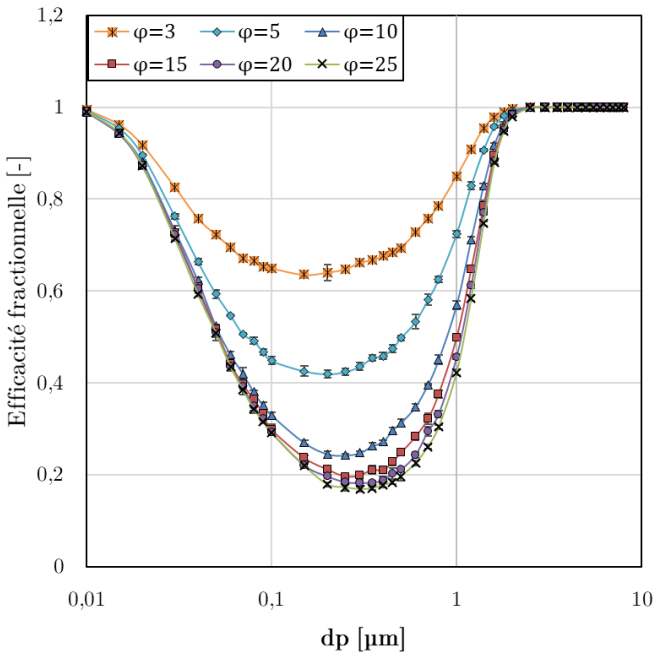


Figure 2-8: Efficacité fractionnelle de la structure Trim. 1 en fonction de la résolution du maillage

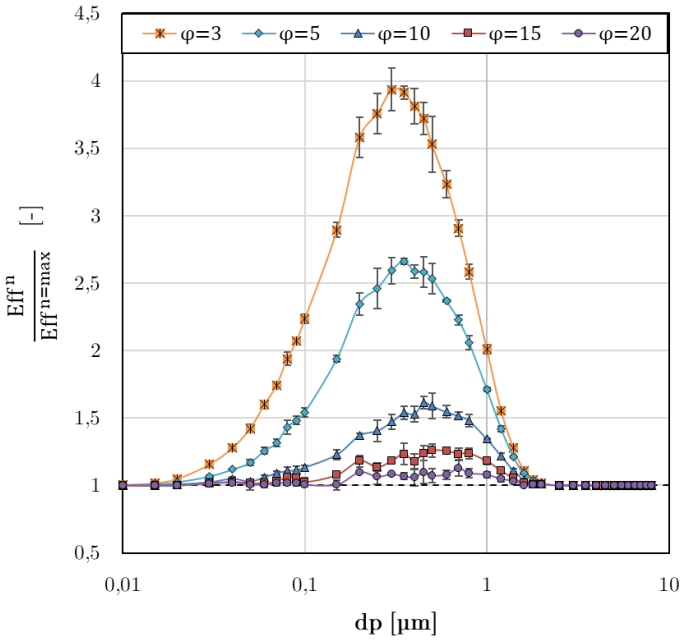


Figure 2-9 : Évolution du rapport d'efficacité fractionnelle $Eff^n/Eff^{n=max}$ selon différentes résolutions du maillage

Pour des résolutions faibles ($\varphi = 3$ et $\varphi = 5$), l'efficacité fractionnelle est surestimée sur l'ensemble de la distribution de particules. L'impact de la résolution du maillage sur l'efficacité de filtration est bien plus important que sur la perméabilité, avec des écarts vis-à-vis de la résolution de référence pouvant atteindre, à la MPPS, jusqu'à 400 % pour $\varphi = 3$ et 250% pour $\varphi = 5$. Comme le maillage conditionne directement la finesse de la représentation des fibres, une schématisation plus grossière conduit à une surestimation de la collecte des particules sur l'ensemble de la plage de diamètres étudiée.

En augmentant la résolution, les simulations convergent vers la valeur réelle de l'efficacité de la structure. À partir d'une résolution de 20, les courbes sont quasiment superposées, avec un écart maximal de 10 % pour une plage de d_p allant de 0,2 µm à 1,2 µm.

Pour obtenir une estimation précise de l'efficacité de filtration, une résolution de $\varphi = 20$ est donc requise. Les tendances et conclusions obtenues pour les deux autres structures monomodales sont similaires et sont résumées en annexe 2.A.

En conclusion, une résolution $\varphi = 20$ de la microstructure numérique est nécessaire pour une estimation fiable de l'efficacité de filtration. En revanche, si seule la simulation de l'écoulement du fluide est requise, la résolution peut être réduite à $\varphi = 10$, permettant ainsi de déterminer la perméabilité de la structure avec un gain de temps de calcul, tout en conservant une précision satisfaisante.

2.5.2 Dimension du domaine de simulation

Une seconde analyse de sensibilité a ensuite été réalisée afin d'évaluer spécifiquement l'impact des dimensions du domaine de simulation sur la perméabilité. Indépendamment de la taille des voxels et donc de la résolution, l'efficacité dépend de l'aéraulique dans la structure fibreuse. Il a donc été considéré que si le domaine est suffisamment grand pour représenter correctement l'écoulement, il le sera également pour évaluer l'efficacité de collecte.

Compte tenu des conclusions précédentes, la résolution du maillage des structures modélisées a été fixée à $\varphi = 10$. Trois microstructures de RS différents ont été modélisées afin d'obtenir une perméabilité moyenne pour chaque structure.

a. Structure cubique

Dans un premier temps, l'impact de la dimension d'une structure cubique, soit à $L_x = L_y = L_z$, a été étudié. La Figure 2-10 présente l'évolution de la perméabilité en fonction de la taille de la microstructure, ainsi que celle d'un des paramètres structurels, la valeur de la compacité vers laquelle le code de calcul a convergé. Les deux structures monomodales sont issues du Tableau 2-2 (Mono. 1 et Mono. 2). Les barres d'erreur représentent l'écart type des trois RS.

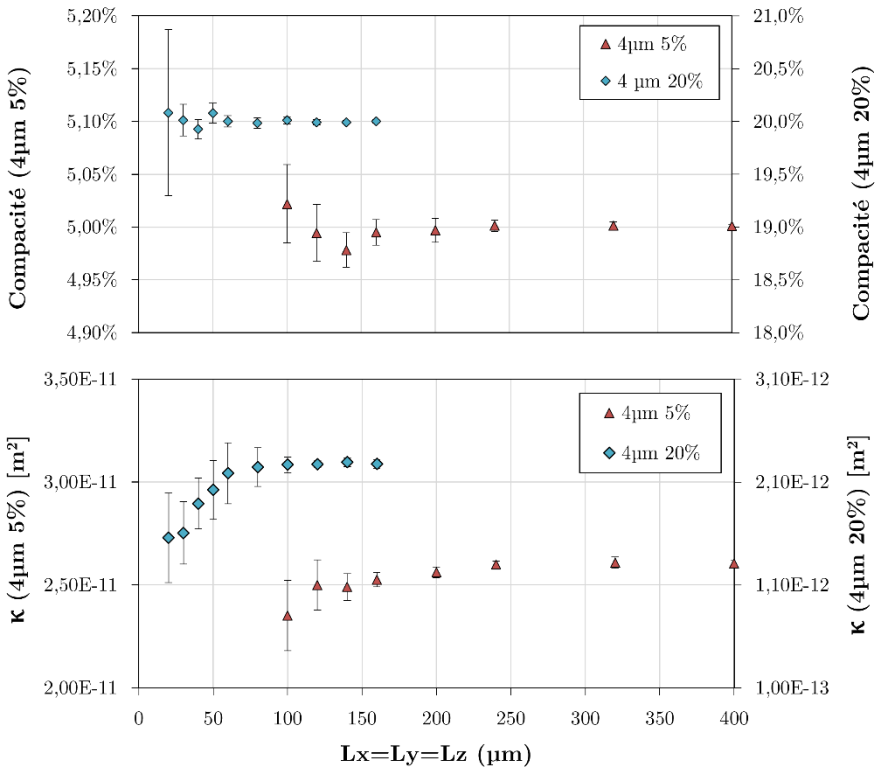


Figure 2-10 : Évolution de la compacité et de la perméabilité simulées en fonction de la taille du domaine cubique

Les résultats montrent que lorsque la taille du domaine augmente dans les trois directions, la perméabilité croît jusqu'à se stabiliser à une valeur donnée. Ces résultats montrent que la structure doit être suffisamment volumineuse pour obtenir des valeurs de perméabilités indépendantes de la taille du domaine.

Par ailleurs, la forte variabilité observée entre les trois structures de RS différents pour les plus petits domaines, mise en évidence par les barres d'erreur, indique que les structures sont significativement différentes les unes des autres. Lorsque le domaine est trop petit, la structure ne parvient pas à converger vers les paramètres structurels initiaux fixés par l'utilisateur. L'évolution de la compacité simulée en Figure 2-10 confirme cette conclusion.

Ces résultats soulignent l'importance d'un domaine de taille suffisante pour éviter toute influence sur la valeur de la perméabilité. De plus, la comparaison des deux structures monomodales (Figure 2-10) montre que la taille minimale requise dépend des paramètres structurels fixés, et donc de la structure en elle-même.

Certains auteurs utilisent le critère de longueur de Brinkman pour déterminer la taille du domaine des microstructures :

$$\delta\sqrt{\kappa} \qquad \textit{Eq. 2-16}$$

Avec κ la perméabilité estimée de la structure et δ une constante

Ce critère, issu des travaux de Clague et Phillips [55], stipule que la taille minimale du domaine doit être comprise entre $6\sqrt{\kappa}$ et $20\sqrt{\kappa}$. Cette fourchette a pour objectif d'établir la limite pour garantir que les résultats simulés restent indépendants de la taille du domaine et représentatifs de la structure.

Tafreshi *et al.* [56] ont recommandé une valeur intermédiaire de $14\sqrt{\kappa}$, utilisé ensuite par d'autres chercheurs en filtration [58,61,102]. Toutefois, Thomas *et al.* [51] ont mis en évidence l'inadéquation de cette constante δ, recommandant un minimum de $45\sqrt{\kappa}$ pour les structures monodisperses étudiées.

L'évolution de la constante de Brinkman en fonction des perméabilités simulées a donc été analysée pour plusieurs tailles de domaine. Outre les structures monomodales et trimodales issue du Tableau 2-2 (Mono. 1, Mono. 2 et Trim. 1), d'autres structures monomodales, bimodales et quadrimodales ont été étudiées. Leurs paramètres structurels sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 2-3 : Paramètres structurels des structures Mono. 3, Bim. 1, Bim. 2 et Quadri. 1

Paramètres	Mono. 3	Bim. 1	Bim. 2	Quadri. 1
$\mathbf{d_1}$ (µm)	10	3	3	5
$\mathbf{f_{V1}}$ (%)	100	50	50	55
$\mathbf{d_2}$ (µm)	/	8	8	8
$\mathbf{f_{V2}}$ (%)	/	50	50	10
$\mathbf{d_3}$ (µm)	/	/	/	10
$\mathbf{f_{V3}}$ (%)	/	/	/	15
$\mathbf{d_4}$ (µm)	/	/	/	14
$\mathbf{f_{V4}}$ (%)	/	/	/	20
$\boldsymbol{\alpha}$ (%)	15	5	20	10

Pour chaque structure, simulée pour différentes tailles de domaine et correspondant ainsi à différents critères de Brinkman, la perméabilité a été simulée. Le rapport entre la perméabilité κ^n obtenue à une taille de microstructure donnée et la perméabilité dite de référence κ^{max}, obtenue à la taille maximale du domaine simulé, est représentée en fonction du paramètre δ en Figure 2-11 pour les distributions monomodales et en Figure 2-12 pour les distributions multimodales. Pour déterminer le paramètre δ à partir de l'équation 2-16, la perméabilité a été calculée à l'aide de la fonction $\frac{1}{f(\alpha)}$ de Jackson et James [48] et du diamètre équivalent $d_{1,1}$.

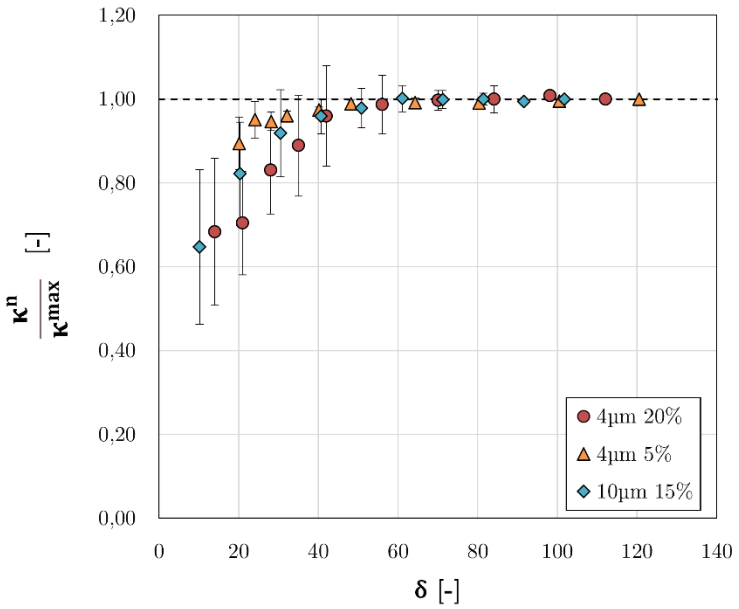


Figure 2-11 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction d'une constante δ du critère de Brinkman pour des structures monomodales

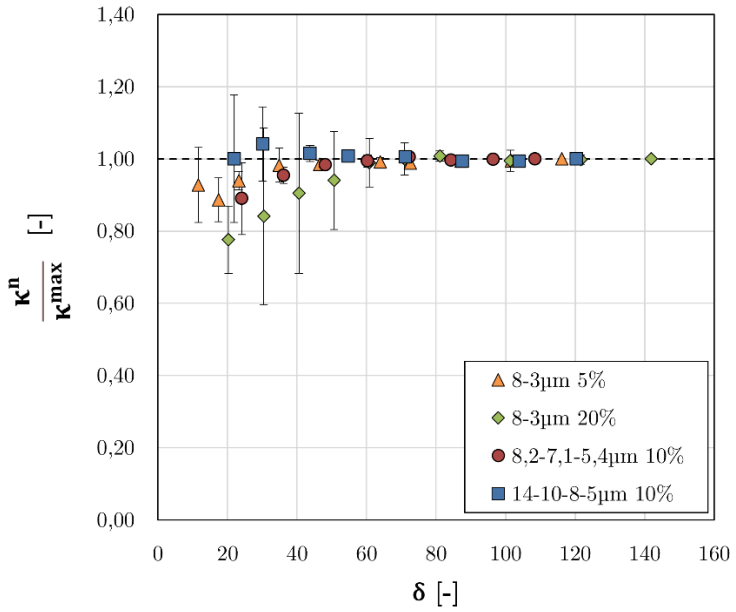


Figure 2-12 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction d'une constante δ du critère de Brinkman pour des structures bimodales, trimodales et quadrimodales

En Figure 2-11, pour des structures monomodales, une valeur stable de la perméabilité semble atteinte à partir d'un δ de 60. Pour des distributions plus complexes (Figure 2-12) la perméabilité semble plutôt converger à partir d'un δ entre 70 et 80.

Au vu de l'impact de la taille du domaine sur la convergence de la perméabilité, une analyse paramétrique approfondie est recommandée. En effet, d'autres facteurs doivent aussi être pris en compte pour des distributions multimodales, comme s'assurer que le domaine converge vers les conditions paramétriques d'entrée spécifiées tout en incluant un nombre suffisant de chaque type de fibre.

Dans cette thèse, la perméabilité a été simulée pour des domaines de $80\sqrt{\kappa}$ et de $100\sqrt{\kappa}$ pour chaque structure, afin de vérifier la stabilité des valeurs obtenue. Si l'écart entre ces deux tailles de domaine était inférieur à 3%, celle de $80\sqrt{\kappa}$ était retenue. Dans le cas contraire, la taille du domaine était encore augmentée jusqu'à atteindre une valeur stable de la perméabilité, garantissant ainsi la précision des valeurs simulées.

b. Épaisseur de la structure

Dans un second temps, afin d'approfondir l'étude concernant la taille de la microstructure, la perméabilité a été simulée en ne faisant varier que l'épaisseur. La surface perpendiculaire à l'écoulement, de dimension L_x et L_y, a ainsi été maintenue constante avec une longueur fixée à $80\sqrt{\kappa}$.

L'impact de la réduction de l'épaisseur sur la perméabilité simulée pour les structures monomodales (Mono. 1 et Mono. 2 issues du Tableau 2-2) et bimodales (Bim. 1 et Bim. 2 du Tableau 2-3) est présentée en Figure 2-13 et Figure 2-14. Pour chaque structure, le rapport $\kappa^{L_z^i}/\kappa^{L_z^{max}}$ est représenté, où :

- $\kappa^{L_z^{max}}$ correspond à la perméabilité obtenue pour une épaisseur maximale $L_z^{max} = L_x = L_y = 80\sqrt{\kappa}$
- $\kappa^{L_z^i}$ est la perméabilité obtenue après réduction de l'épaisseur à $L_z^i < L_z^{max}$, tout en maintenant $L_x = L_y = 80\sqrt{\kappa}$.

La réduction de l'épaisseur est quantifiée par le rapport L_z^i/L_z^{max}.

Les résultats montrent qu'une réduction de l'épaisseur jusqu'à 50% n'a pas d'impact significatif sur la perméabilité, avec un écart maximal de 3%. Ainsi, une réduction de l'épaisseur peut être envisagée si une réduction du temps de calcul ou de la mémoire requise est nécessaire. Cette approche est également pertinente dans le cadre des simulations d'efficacité de filtration, notamment pour des structures présentant une forte compacité et de faibles diamètres de fibres. En effet, réduire l'épaisseur du domaine permet d'éviter d'obtenir des efficacités fractionnelles de filtration égales à 100 %, rendant impossible le calcul d'une efficacité unitaire correspondante.

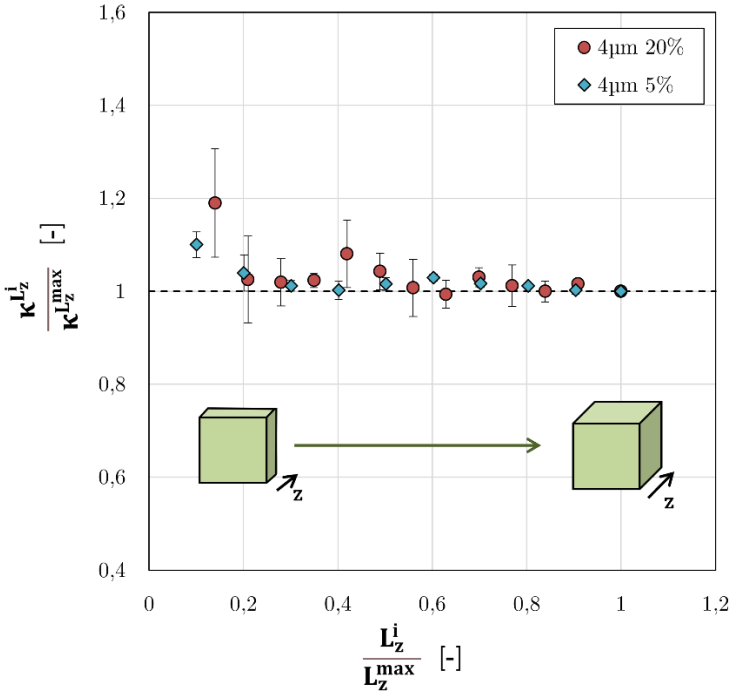


Figure 2-13 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la réduction de l'épaisseur pour des structures monomodales

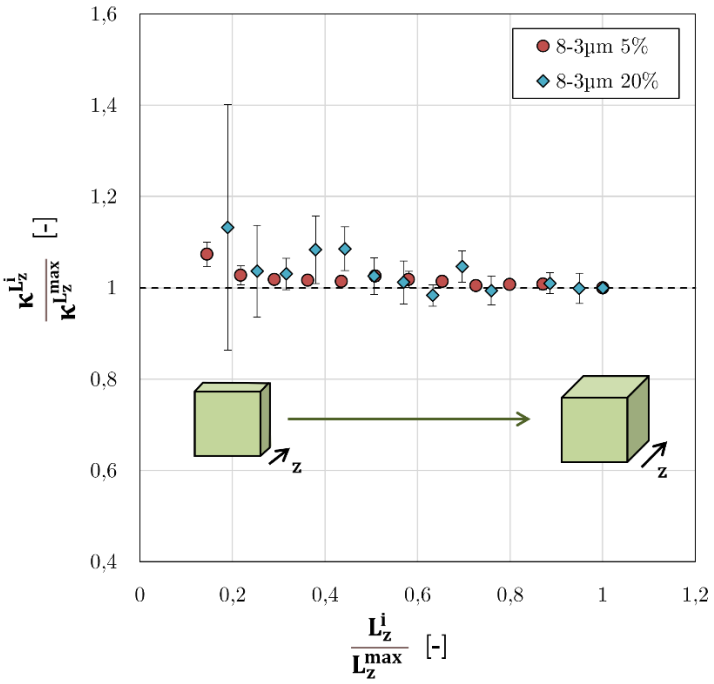


Figure 2-14 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la réduction de l'épaisseur pour des structures bimodales

2.5.3 Dimension des zones d'établissement de l'écoulement

Une analyse de sensibilité a également été menée sur la dimension des zones de voxels vides ajoutées en amont et en aval dans la direction de l'écoulement, respectivement de longueur L_{amont} et L_{aval}. Dans le code de calcul GeoDict, l'ajout de ces zones est nécessaire pour garantir des conditions d'écoulement du fluide stationnaire et positionner les particules de manière aléatoire sur un plan dans cette zone de départ.

Les structures monomodales (Mono. 1 et Mono. 2 issues du Tableau 2-2) et les structures bimodales (Bim. 1 et Bim. 2 du Tableau 2-3) ont été modélisées avec une résolution de $\varphi = 10$ et un domaine respectant le critère de Brinkman de $80\sqrt{\kappa}$. Pour chacune des structures, plusieurs simulations de perméabilité ont été réalisées en faisant varier le nombre de voxels des zones amont (N_{amont}) et aval (N_{aval}) entre 10 et 150 voxels. La conversion du nombre de voxels en longueur dépend de la résolution, et donc de la microstructure correspondante.

$$L_{amont} = N_{amont} \times L_{vox} \qquad \textit{Eq. 2-17}$$
$$L_{aval} = N_{aval} \times L_{vox}$$

La Figure 2-15 représente la variation de la perméabilité en fonction de la taille de la zone amont (ou aval). Pour chaque structure, le rapport κ^n/κ^{max} est représenté, où κ^n est la perméabilité obtenue avec une zone amont (ou aval) de n voxels, et κ^{max} correspond à la perméabilité obtenue avec le nombre maximal de voxels vides ajoutés à la structure dans les simulations effectuées.

La Figure 2-15 montre que, pour une variation de 10 à 150 voxels, l'impact sur la perméabilité reste faible avec un écart inférieur à 2,5%. Un nombre de 100 voxels semblent ainsi suffisant pour minimiser l'influence des zones ajoutées sur la valeur de perméabilité.

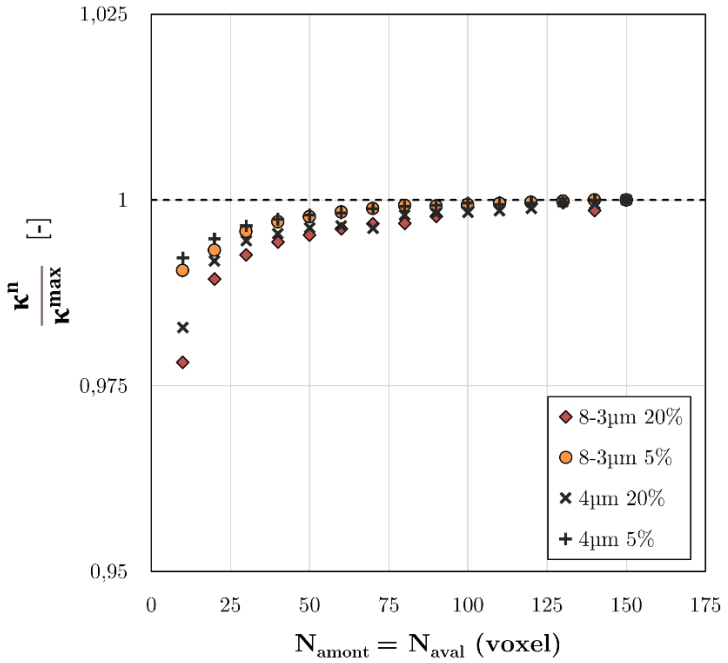


Figure 2-15 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la taille des zones vides ajoutées en amont et aval

Enfin, il est à noter que la taille de la zone amont doit être au minimum supérieure au plus grand diamètre des particules, afin de pouvoir positionner ces particules dans cette zone avant injection dans la structure fibreuse.

2.5.4 Nombre de particules

Dans GeoDict, le nombre de particules simulées pour chaque taille donnée doit être défini. Le guide utilisateur [101] recommande d'utiliser un nombre élevé pour améliorer la précision des résultats, sans toutefois préciser de valeur minimale.

Ainsi pour deux structures monomodales constituées de fibres de diamètre 4 ou 2 µm, avec une compacité de 20 %, une résolution $\varphi = 20$, et un domaine supérieur au minimum donné par le critère de Brinkman (respectivement $126\sqrt{\kappa}$ et $140\sqrt{\kappa}$), l'efficacité fractionnelle a été calculée en réalisant des simulations avec 100, 1 000 et 10 000 particules par type. La Figure 2-16 et la Figure 2-17 présentent les résultats obtenus pour ces deux structures.

Les résultats montrent qu'avec 100 particules, la variabilité des efficacités fractionnelles est importante, ce qui traduit un manque de précision. Cette variabilité diminue significativement pour 1 000 particules et disparaît pratiquement pour 10 000 particules. Cela

met en évidence la nécessité d'un nombre suffisant de particules pour obtenir une courbe d'efficacité fractionnelle fiable et précise.

Étant donné que ce paramètre n'est pas très consommateur en temps de calcul, une valeur intermédiaire a été retenue pour les simulations de cette étude afin d'optimiser la précision. Un nombre de 5 000 particules par type de diamètre a ainsi été choisi.

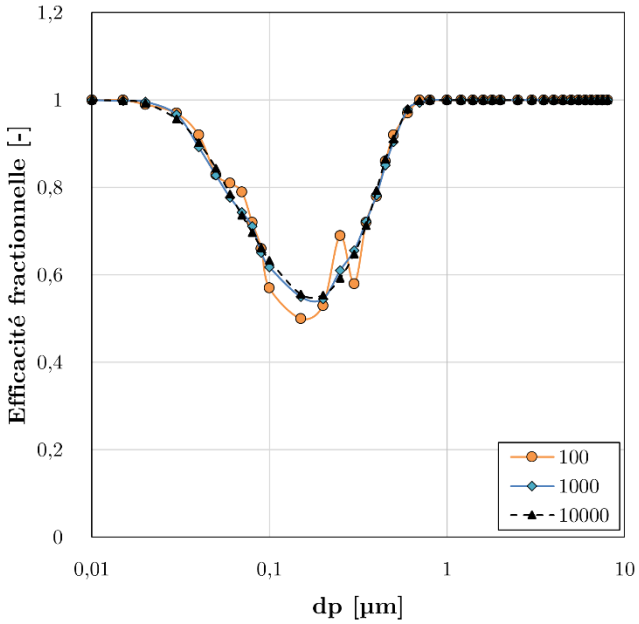


Figure 2-16 : Efficacité fractionnelle de la structure monomodale (2µm-20%) en fonction du nombre de particules

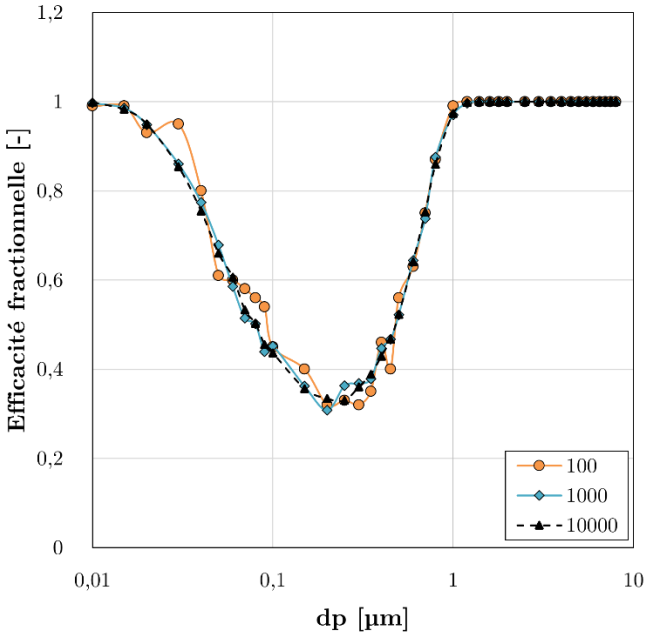


Figure 2-17 : Efficacité fractionnelle de la structure monomodale (4µm-20%) en fonction du nombre de particules

2.6 Conclusion

Ce chapitre a tout d'abord introduit le fonctionnement des simulations, effectuées à l'aide du code de calcul GeoDict, pour la détermination de la perméabilité et de l'efficacité de collecte de microstructures fibreuses.

Ensuite, une étude paramétrique approfondie des simulations numériques a été menée, en mettant particulièrement l'accent sur l'analyse de sensibilité, afin d'identifier les paramètres influents sur la précision et la fiabilité des résultats. Cette analyse a permis d'optimiser les choix de paramétrage en équilibrant précision des résultats et temps de calcul. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Résolution du maillage : Pour une estimation fiable de la perméabilité, la taille du voxel doit être d'au moins $1/10^{e}$ du diamètre de la fibre la plus fine. Pour l'efficacité de filtration, une résolution d'au moins $1/20^{e}$ est nécessaire.
- Dimension du domaine de simulation : L'impact de la taille du domaine sur la perméabilité doit être vérifié systématiquement. Le choix envisagé est ainsi d'effectuer des simulations pour des domaines de $80\sqrt{\kappa}$ et $100\sqrt{\kappa}$ et de ne retenir le plus petit domaine que si l'écart entre les deux perméabilités obtenues est inférieur à 3%. Dans le cas contraire, la taille du domaine est augmentée jusqu'à atteindre une valeur stable. Le critère prépondérant semble ainsi être la dimension de la surface et donc le nombre de fibres face à l'écoulement puisque l'épaisseur du domaine peut être réduite jusqu'à 50% sans altérer la fiabilité des résultats.
- Zone amont et aval : Une zone de 100 voxels vides doit être ajoutée en amont et en aval.
- Nombre de particules simulées : Un nombre de 5 000 particules par taille de particule est suffisant pour assurer une bonne précision des résultats d'efficacité fractionnelle.

La méthodologie adoptée ici servira de base pour les simulations ultérieures et garantit la fiabilité des résultats obtenus.

Chapitre 3 : Simulation numérique de l'écoulement à travers des médias fibreux

Sommaire

Chapitre 3 : Simulation numérique de l'écoulement à travers des médias fibreux 61
3.1 Distribution monomodale de fibres 62
3.2 Distribution bimodale de fibres 65
3.2.1 Plan d'expérience 65
3.2.2 Modèles de la littérature 67
3.2.3 Développement d'un nouveau modèle de perméabilité 69
3.2.4 Validation du modèle de perméabilité avec des données numériques et expérimentales de la littérature 71
3.3 Extension du modèle de perméabilité à des distributions multimodales 75
3.3.1 De bimodales à décamodales… 75
3.3.2 … jusqu'à des distributions multimodales 76
3.4 Prise en compte du glissement 78
3.4.1 Stratégie 78
3.4.2 Distributions monomodales 79
3.4.3 Distributions multimodales 83
3.5 Conclusion 84

Ce chapitre vise à évaluer la pertinence des modèles de perméabilité recensés dans la littérature en les comparant aux résultats issus de simulations numériques, pour des distributions de fibres monomodales et multimodales. Ces différents modèles associent un diamètre « équivalent » de fibre à un facteur hydrodynamique dépendant de la compacité de la structure fibreuse (Voir chapitre 1). L'étude portera d'abord sur des distributions granulométriques microniques, avant d'être élargie aux fibres submicroniques avec prise en compte de l'effet de glissement.

3.1 Distribution monomodale de fibres

Dans un premier temps, la perméabilité de distributions monomodales de fibres a été simulée afin de fixer le diamètre « équivalent » de fibre et ne comparer que les facteurs hydrodynamiques recensés dans la littérature.

Ainsi, différentes microstructures (annexe 3-A), composées d'un diamètre compris entre 1,5 µm et 30 µm avec une compacité de 1 %, 5 %, 12 % ou 20 %, ont été simulées sur le logiciel GeoDict, version 2022. Pour chaque structure, cinq simulations ont été réalisées à partir d'initialisations différentes (voir la section 2.2 du chapitre 2 sur le *random seed*), générant ainsi plusieurs structures avec des arrangements de fibres variés, tout en préservant leurs propriétés macroscopiques.

Au total, 200 simulations ont été effectuées, permettant d'obtenir quarante valeurs moyennes de perméabilités pour différentes structures. Les valeurs des cinq perméabilités obtenues pour chacune des structures sont faiblement dispersées, avec des coefficients de variation entre 0,29 % et 2,17 %. La Figure 3-1 compare l'évolution de la perméabilité simulée en fonction du diamètre de fibre pour les différentes compacités.

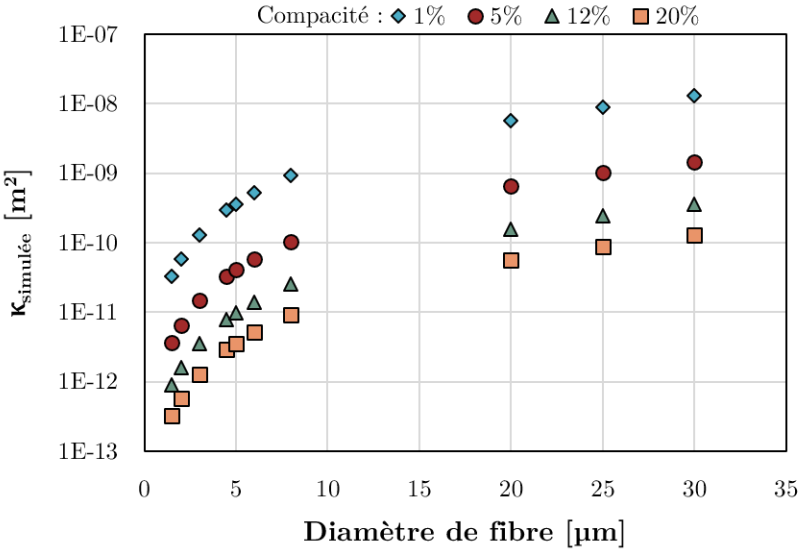


Figure 3-1: Évolution de la perméabilité simulée de distributions monomodales pour différentes valeurs de compacité

Les perméabilités numériques obtenues (Figure 3-1) montrent une évolution classique que l'on retrouve dans la littérature. La perméabilité d'un média augmente avec la taille de diamètre de fibres, et diminue avec l'accroissement de la compacité.

Connaissant les compacités et le diamètre des fibres des structures modélisées, leurs perméabilités numériques peuvent être comparées aux modèles classiques de perméabilité, à partir des facteurs hydrodynamiques de Davies [52], Happel modifié [51], Jackson et James [48] et Woudberg [49] (voir la section 1.2.3a. du chapitre 1).

La Figure 3-2 compare les perméabilités issues des modèles de la littérature à celles obtenues par simulation.

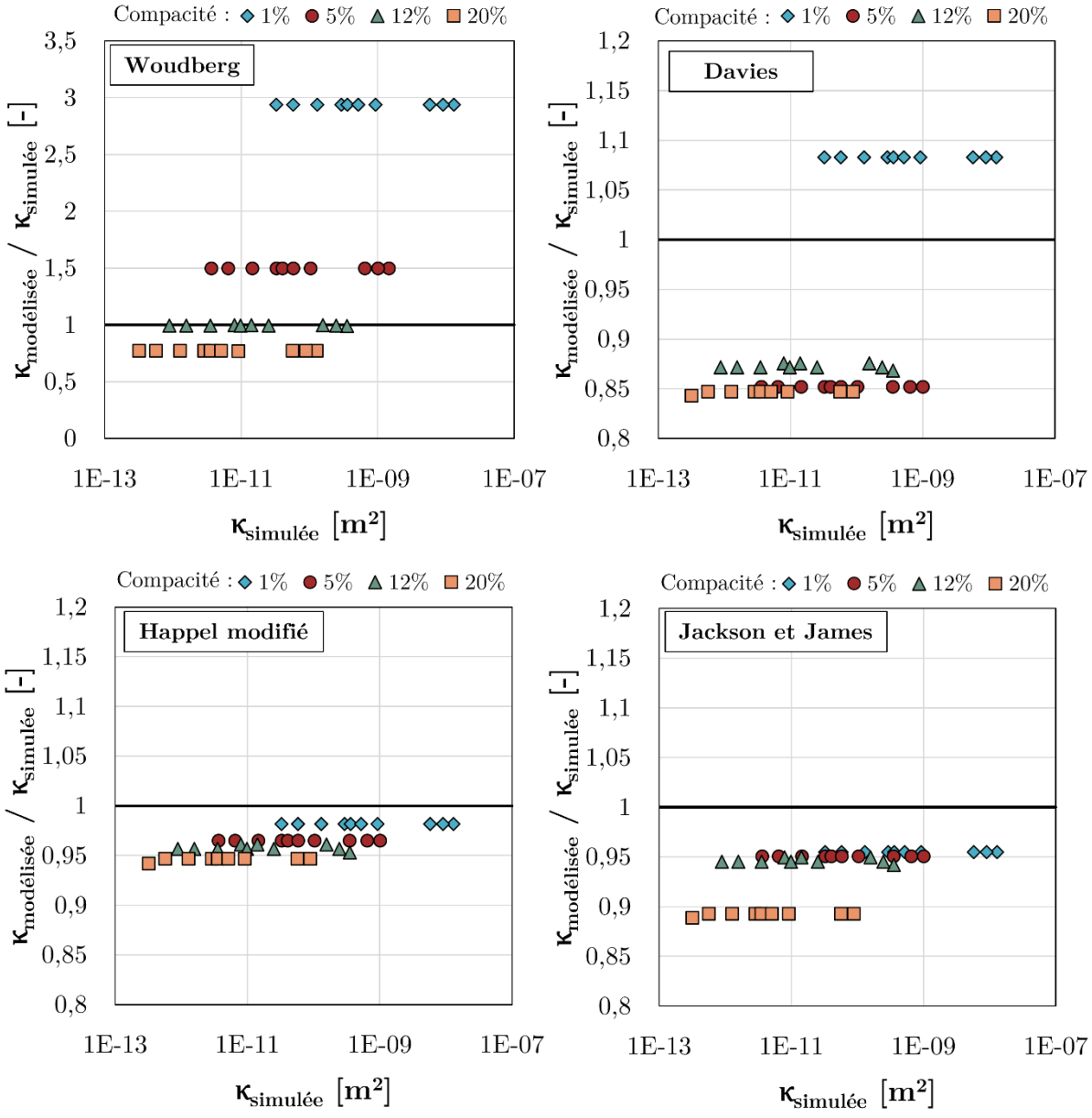


Figure 3-2 : Comparaison des perméabilités simulées et théoriques avec les modèles de Woudberg [49], Davies [52], Jackson et James [48], et Happel modifié [51] pour des structures monomodales

L'écart relatif selon la perméabilité simulée a été défini de la manière suivante :

$$\text{Ecart relatif} = \frac{\left|\kappa_i^{\text{simulée}} - \kappa_i^{\text{modélisée}}\right|}{\kappa_i^{\text{simulée}}} \qquad \textit{Eq. 3-1}$$

Le paramètre MRD (Mean Relative Discrepancy), soit l'écart relatif moyen, a été utilisé comme critère qualitatif pour comparer les différents modèles (Voir Le Tableau 3-1).

$$\text{MRD} = \frac{1}{N}\sum_{i}^{N} \frac{\left|\kappa_i^{\text{simulée}} - \kappa_i^{\text{modélisée}}\right|}{\kappa_i^{\text{simulée}}} \qquad \textit{Eq. 3-2}$$

Tableau 3-1: Écart relatif moyen (MRD) des modèles de facteur hydrodynamique pour des structures monomodales

Modèle κ/df^2	**MRD**
Happel modifié	3,74 %
Jackson et James	6,41 %
Davies	12,81 %
Woudberg	66,70 %

Parmi les modèles étudiés, les modèles d'Happel modifié et de Jackson et James présentent les écarts les plus faibles par rapport aux perméabilités simulées avec un MRD de 3,74 % et 6,41 % respectivement (Tableau 3-1). A l'inverse du modèle d'Happel modifié qui affiche un écart stable sur l'ensemble des microstructures étudiées (Figure 3-2), le modèle de Jackson et James montre un écart relatif plus important, de l'ordre de 11%, pour des compacités élevées (20%). Le modèle de Davies surestime les perméabilités des structures à faible compacité (1%), et les sous-estime pour des compacités plus élevées, avec un écart relatif autour de 15 %. Le modèle de Woudberg quant à lui présente des résultats très dispersés, entraînant un MRD très élevé de 66,70 %, avec des écarts relatifs très différents selon la compacité de la structure. Ce modèle présente une bonne prédiction seulement pour les structures ayant une compacité de 12 %.

Ainsi, parmi les différentes expressions du facteur hydrodynamique recensées dans la littérature, celui de Happel modifié semble être le plus performant pour estimer la perméabilité simulée sur une large gamme de diamètres et de compacités, dans le cas de distributions monomodales.

3.2 Distribution bimodale de fibres

3.2.1 Plan d'expérience

Un second plan d'expériences a été établi pour simuler des médias présentant une distribution bimodale de fibres de même nature (annexe 3-A). Les fibres fines sont notées avec l'indice 1 et les fibres épaisses l'indice 2. Soixante structures ont été simulées présentant différentes caractéristiques :

- Une compacité (α) de 5 %, 12 %, ou 20 %,
- Un couple de diamètres de 30-4,5µm, 20-5µm, 6-2µm, 8-1,5µm ou 25-3µm,
- Une fraction volumique des fibres épaisses ($f_{V,2}$) de 25%, 50%, 75% ou 90%.

L'objectif est double : confirmer la pertinence des facteurs hydrodynamiques et vérifier si les modèles de la littérature sont adaptés à de nombreuses structures différentes de médias fibreux, notamment à des distributions bimodales.

La plage de diamètres sélectionnée s'étend de 1,5 µm à 30 µm, afin d'éviter les fibres pour lesquels des phénomènes de glissement peuvent apparaitre. De plus, le critère $R_{2/1}$, qui représente le rapport du diamètre épais (d_2) sur le diamètre fin (d_1), est fixé à une valeur supérieure à 3. Ainsi, les couples de diamètres ont été choisis de manière à obtenir une répartition homogène dans le plan d'expérience (Figure 3-3), tant en termes de compacité, de rapport $R_{2/1}$ des diamètres, que de différence entre d_2 et d_1.

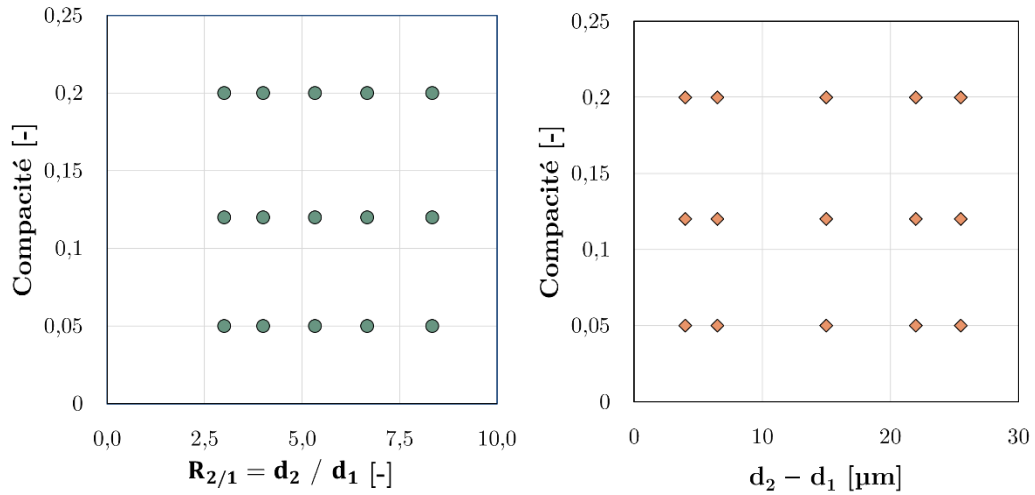


Figure 3-3 : Répartition des couples de diamètres étudiés en fonction du rapport $R_{2/1}$ ou de l'écart entre les deux diamètres

En effectuant cinq simulations par structure avec différents Random Seed, soixante valeurs de perméabilité moyenne ont été obtenues pour différentes structures bimodales, ce qui correspond à un total de trois cents simulations.

La Figure 3-4 et la Figure 3-5 comparent les évolutions de la perméabilité simulée en fonction de la fraction volumique des fibres épaisses ($f_{V,2}$), et de la compacité pour deux couples de diamètre. Les tendances observées restent cohérentes avec celles rapportées dans la littérature, où la perméabilité augmente avec la fraction volumique des fibres épaisses. Lorsque cette fraction passe de 75 % à 100 %, une augmentation significative de la perméabilité est observée. Ainsi, la présence résiduelle de fibres fines, même en faible proportion, a un impact notable dans cette plage, en raison de leur surface spécifique élevée.

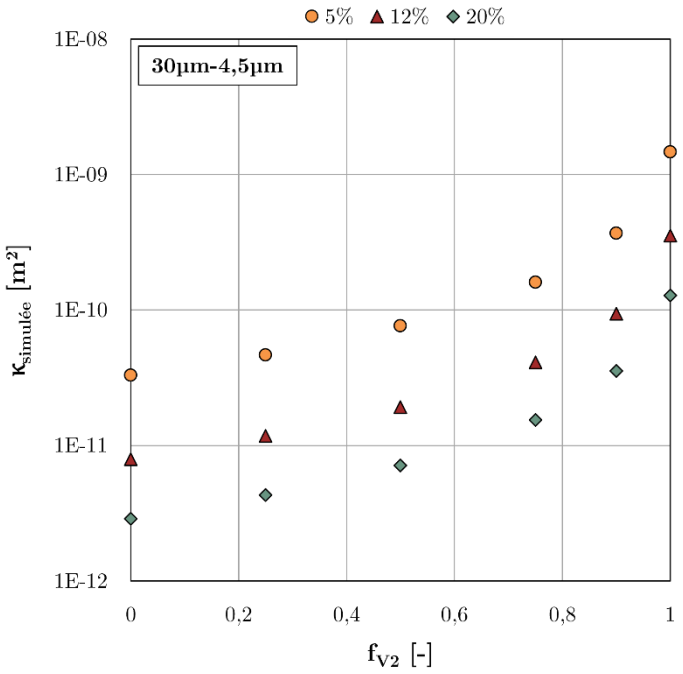


Figure 3-4 : Évolution de la perméabilité simulée en fonction de la fraction volumique de fibre épaisse (fv_2) et de la compacité (5%, 12%, 20%) pour les microstructures avec des fibres de 30 et 4,5 µm

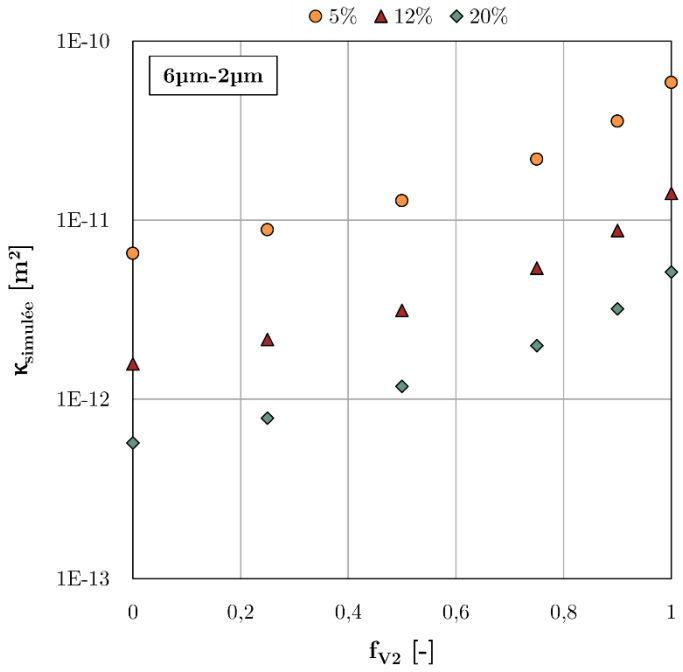


Figure 3-5 : Évolution de la perméabilité simulée en fonction de la fraction volumique de fibre épaisse (fv_2) et de la compacité (5%, 12%, 20%) pour les microstructures constituées de fibres de 6 et 2 µm

3.2.2 Modèles de la littérature

A partir des caractéristiques structurales connues des médias modélisés, à savoir les diamètres et les compacités, les modèles issus de la littérature peuvent être appliqués en couplant les expressions de diamètres équivalents $d_{0,2}$, $d_{0,1}$, $d_{1,1}$, $d_{0,3}$, $d_{2,1}$ et $d_{2,2}$ (section 1.2.3c. du chapitre 1) et les expressions de facteur hydrodynamique d'Happel modifié, Jackson et James, et Davies (section 1.2.3a. du chapitre 1). Les écarts relatifs moyens (MRD) entre les perméabilités modélisées et simulées sont résumés dans le Tableau 3-2.

Tableau 3-2 : MRD pour différentes associations de diamètre équivalent et de facteur hydrodynamique pour des distributions bimodales de fibres

Diamètre équivalent	MRD		
	Happel modifié	Davies	Jackson & James
$d_{0,2}$	0,21	0,29	0,23
$d_{1,1}$	0,22	0,13	0,19
$d_{0,1}$	0,46	0,51	0,47
$d_{0,3}$	0,58	0,62	0,62
$d_{2,1}$	2,60	2,22	2,50
$d_{2,2}$	4,17	3,63	4,03

La comparaison entre les résultats obtenus avec GeoDict, version 2022, et ceux issus des différents diamètres équivalents pour le modèle d'Happel modifié est présentée dans la Figure 3-6 et la Figure 3-7. L'annexe 3-B présente les figures pour les modèles de Davies et de Jackson et James.

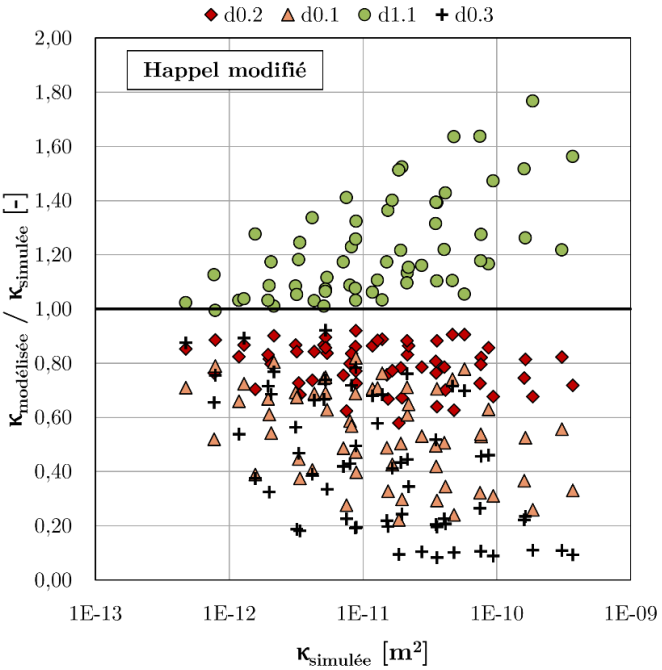


Figure 3-6 : Comparaison des perméabilités obtenues pour les diamètres équivalents $d_{0.2}$, $d_{0.1}$, $d_{1.1}$, et $d_{0.3}$ avec les données simulées pour 60 distributions bimodales

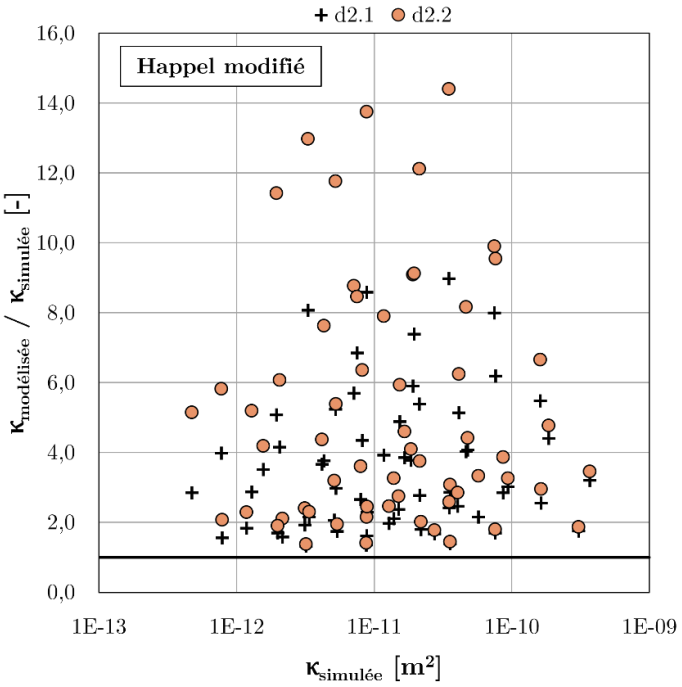


Figure 3-7 : Comparaison des perméabilités obtenues pour les diamètres équivalents $d_{2.1}$ et $d_{2.2}$ avec les données simulées pour 60 distributions bimodales

Avec le modèle de facteur hydrodynamique d'Happel modifié, les deux diamètres équivalents, $d_{0,2}$ et $d_{1,1}$, ont les valeurs de MRD les plus faibles, respectivement de 0,21 et 0,22. Cependant, les ratios de perméabilité modélisée sur perméabilité simulée pour ces deux diamètres sont très dispersés, allant de 1 à 1,8 pour $d_{1,1}$ et de 0,6 à 0,9 pour $d_{0,2}$, comme illustré dans la Figure 3-7. Les autres diamètres présentent des valeurs de MRD encore plus élevées et des dispersions importantes sur les graphiques.

Pour chaque diamètre équivalent, les autres modèles de facteur hydrodynamique, tels que ceux de Davies ou de Jackson et James, donnent des résultats du même ordre de grandeur (Tableau 3-2). Plusieurs auteurs [57,60,62] ont montré que le diamètre $d_{1,1}$ entraine les meilleures prédictions. Ce constat se vérifie également dans notre étude. Bien que nos résultats soient globalement cohérents avec ceux rapportés dans la littérature, les valeurs de MRD restent élevées, avec une grande dispersion selon les diamètres équivalents utilisés.

Dans la littérature, d'autres combinaisons associant un modèle de diamètre équivalent et un facteur hydrodynamique sont également proposées et ont été comparées :

- Le modèle $d_{0,2}$ avec Jackson et James tel que décrit par Tafreshi *et al.* [56],
- L'approche de Tucny [58], qui consiste à ajuster le diamètre $d_{1,1}$ associé avec l'expression de Davies corrigée par un facteur dépendant d'une variance normalisée de la distribution de fibres,

$$\kappa = \frac{d_{1.1}^2}{\left[64\alpha^{\frac{3}{2}}(1+56\alpha^3)(1+0.277\ C_v^2)\right]} \quad \text{où} \quad Cv^2 = \frac{\overline{d^2} - d_{0.1}^2}{d_{0.1}^2} \qquad \text{Eq. 3-3}$$

- Le modèle $\mathbf{d_{1,1}}$ avec une autre expression de perméabilité adimensionnelle, celle de Sangani *et al.* [103] dérivée de l'article de Jaganathan *et al.* [60],

$$\frac{1}{f(\alpha)} = \frac{32\alpha}{-\ln(\alpha) - 1.476 + 2\alpha - 1.774\alpha^2 + 4.076\alpha^3 + O(\alpha^4)} \qquad \text{Eq. 3-4}$$

- L'association du diamètre $\mathbf{d_{1,1}}$ avec l'expression de Davies qui a entrainé le plus faible MRD dans le Tableau 3-2.

La comparaison de ces différentes approches avec les perméabilités simulées de structure bimodale est présentée dans la Figure 3-8. L'écart relatif moyen de ces approches est résumé dans le Tableau 3-3.

Tableau 3-3 : Écart relatif moyen pour différentes approches issues de la littérature

Approche	MRD
Tucny	0,085
Davies & $\mathbf{d_{1.1}}$	0,13
Jackson et James & $\mathbf{d_{0.2}}$	0,23
Sangani & $\mathbf{d_{1.1}}$	0,26

A l'exception de l'approche de Tucny, qui affichent un MRD de 0,085 mais reste très complexe car nécessite l'utilisation de deux diamètres équivalents, les autres approches de la littérature montrent une grande dispersion, avec un MRD supérieur à 0,1. Ces écarts mettent en évidence les limites des démarches considérées. Aucune expression de diamètre équivalent, associée à un modèle de facteur hydrodynamique, ne permet de prédire avec précision la perméabilité sur une large plage de diamètres et de compacités, ce qui nécessite le développement d'un nouveau modèle.

3.2.3 Développement d'un nouveau modèle de perméabilité

Bien que le facteur hydrodynamique d'Happel modifié présente une bonne prédiction des perméabilités numériques de distributions monomodales, les résultats ne sont pas concluants lorsqu'il est associé à différentes expressions de diamètres équivalents issues de la littérature dans le cas de distributions bimodales de fibres.

Ainsi, une nouvelle approche a été développée, consistant à associer un nouveau diamètre équivalent au facteur hydrodynamique d'Happel modifié. Ce diamètre équivalent a été déterminé pour des distributions bimodales en ajustant la loi de mélange *volume weighted resistivity* (Eq. 1-24), proposé par Clague et Philipps [55], comme suit :

$$\frac{1}{\kappa} = \left[\frac{\alpha_1}{\alpha\,[\kappa_1(\alpha)]^{\frac{3}{4}}} + \frac{\alpha_2}{\alpha\,[\kappa_2(\alpha)]^{\frac{3}{4}}} \right]^{\frac{4}{3}} \qquad \textit{Eq. 3-5}$$

Où α_i représente la fraction solide des fibres de diamètre d_i, la somme des α_i correspond à la compacité globale de la structure α, et κ_i, la perméabilité d'un média composé de fibres de diamètre d_i, s'exprime de la manière suivante :

$$\kappa_i = \frac{d_i^2}{16\alpha} H \qquad \textit{Eq. 3-6}$$

En remplaçant κ_i, dans l'équation 3-5, on obtient :

$$\kappa = \frac{H}{16\alpha}\left[\frac{1}{\frac{\alpha_1}{(\alpha_1+\alpha_2)\, d_1^{\frac{3}{2}}} + \frac{\alpha_2}{(\alpha_1+\alpha_2)\, d_2^{\frac{3}{2}}}}\right]^{\frac{4}{3}} \qquad \textit{Eq. 3-7}$$

Comme α_i/α correspond à la fraction volumique f_{Vi} de la fibre d_i, le nouveau diamètre équivalent s'écrit alors :

$$d_{eq} = \left[\frac{1}{\frac{f_{V1}}{d_1^{\frac{3}{2}}} + \frac{f_{V2}}{d_2^{\frac{3}{2}}}}\right]^{\frac{2}{3}} \qquad \text{Eq. 3-8}$$

Cette expression peut être généralisée à des distributions polydisperses comportant n diamètre de fibres :

$$d_{eq} = \left[\frac{1}{\sum_i \frac{f_{Vi}}{d_i^{\frac{3}{2}}}}\right]^{\frac{2}{3}} \qquad \text{Eq. 3-9}$$

Il est à noter que la nouvelle équation développée s'aligne avec l'expression générale des diamètres équivalents proposée par Tucny *et al.* (Eq. 1-34), puisque que le diamètre équivalent peut être obtenu en fixant $\beta = 0{,}5$ et $\gamma = 1{,}5$. De plus, si les fibres sont constituées du même matériau, et donc de masse volumique identique, la fraction volumique est équivalente à la fraction massique.

Cette nouvelle approche entraine une bonne prédiction des perméabilités numériques de distribution bimodale avec un MRD de 5,2 % (Figure 3-8), inférieure à celles des différentes approches de la littérature présentées dans la section 3.2.2. Bien que la méthode récente issue des travaux de Tucny *et al.* induise un MRD de 8,5 %, notre approche présente tout de même de meilleurs résultats, tout en reposant sur une formulation plus simple. L'intégration de deux diamètres équivalents différents dans la variance normalisée complexifie en effet l'utilisation du modèle de Tucny.

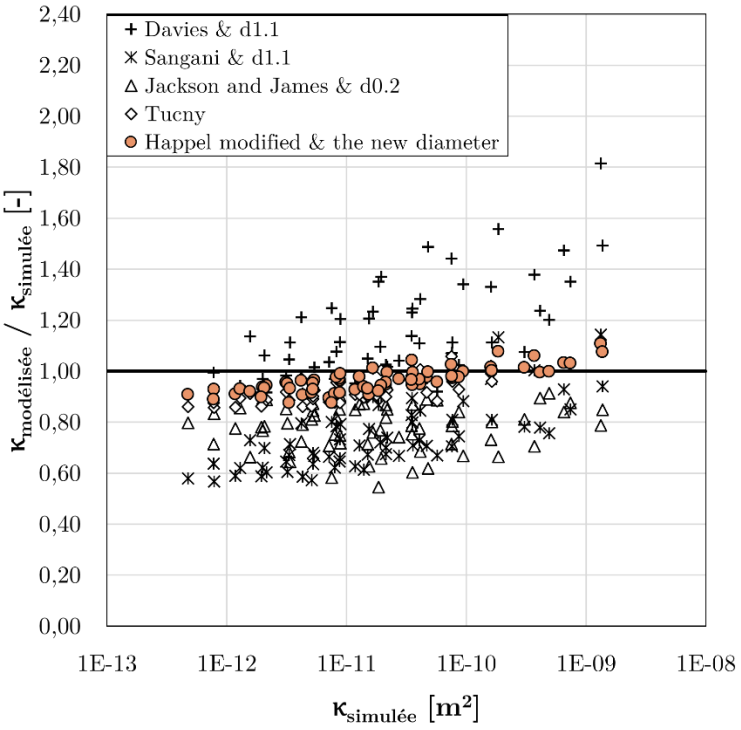


Figure 3-8 : Comparaison de la perméabilité simulée avec celles calculées selon différentes approches de la littérature

L'application du nouveau diamètre équivalent améliore ainsi les prédictions de perméabilité sur une large plage de valeurs, de 10^{-12} à 10^{-9} m^2, avec un rapport entre la perméabilité modélisée et la perméabilité simulée de l'ordre de 1±10%.

3.2.4 Validation du modèle de perméabilité avec des données numériques et expérimentales de la littérature

Afin de valider la robustesse de cette nouvelle approche, des données additionnelles de perméabilité de structures fibreuses bimodales ont été extraites de la littérature et comparées à notre nouveau modèle de diamètre équivalent.

Une seule série de données expérimentales a pu être utilisée, provenant de l'étude de Payen *et al.* [104], en raison des difficultés fréquentes pour accéder dans les articles de la littérature à l'ensemble des caractéristiques nécessaires des milieux fibreux, notamment les distributions de diamètre de fibre. En complément, des données simulées par le logiciel GeoDict ont été extraites des travaux de Gervais [61], Tafreshi *et al.* [56] ainsi que Tucny *et al.* [58]. Quelques données supplémentaires, simulées par Tucny *et al.* [58] à l'aide de la méthode Lattice Bolztmann (LBM), ont également été prises en compte.

Les caractéristiques des structures fibreuses numériques ou expérimentales sont résumées dans le Tableau 3-4.

Tableau 3-4 : Caractéristiques structurales des médias numériques et expérimentaux de la littérature

	d_i (µm)	d_1 / d_2	α (%)
Expérimentale			
Payen *et al.* [104]	10,9 à 45,1	2,59 à 4,14	11,6 à 17,2
Simulation			
Gervais [61]	10 à 50	2 à 5	5 à 15
Tafreshi *et al.* [56]	5 à 25	2 à 5	10
Tucny *et al.* (LBM) [58]	6 à 42	2 à 7	4,3 à 20,5
Tucny *et al.* (GeoDict) [58]	6 and 18	3	5 à 19,5
Étude actuelle	*1,5 à 30*	*3 à 8*	*1 à 20*

La Figure 3-9 présente la comparaison entre les données expérimentales de Payen, les résultats numériques de Tafreshi *et al.* et de Gervais, et les valeurs de perméabilité estimées par notre nouvelle approche.

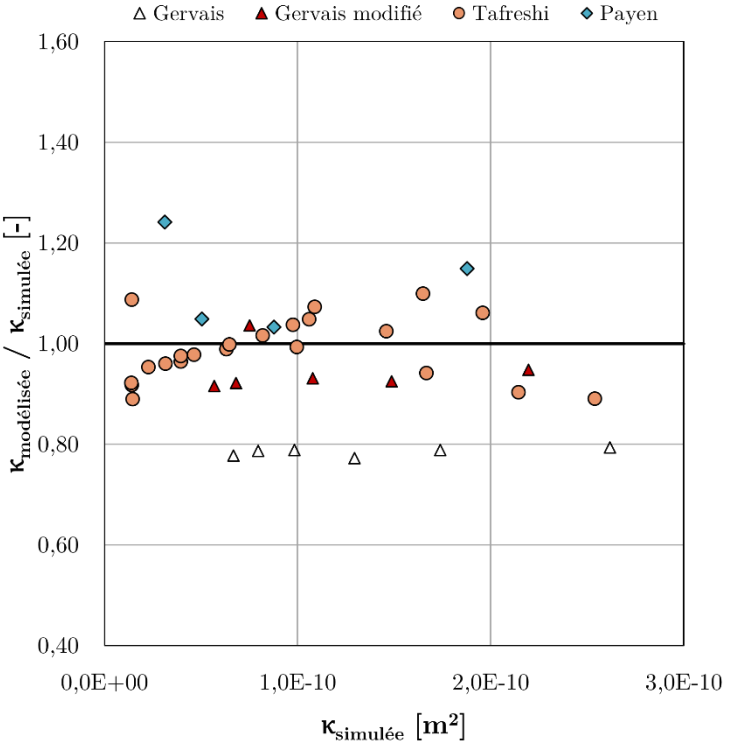


Figure 3-9 : Comparaison des données de perméabilité issues de la littérature avec la nouvelle approche (Gervais, Tafreshi et al., Payen et al.)

L'écart observé entre les données expérimentales de Payen et les résultats de notre approche, peut être attribué à certains biais expérimentaux, notamment l'absence d'informations précises sur la structure des médias, telle que la détermination de la distribution de diamètre de fibres, la présence éventuelle de liant, ou encore l'hétérogénéité du média. Avec un MRD de 0,12 pour ces données expérimentales, la nouvelle approche reste cependant

cohérente. Concernant les données obtenues par simulation, le nouveau modèle présente une bonne adéquation avec celles de Tafreshi, avec un MRD de seulement 0,05.

Par ailleurs, les données simulées par Gervais, présentent un écart important par rapport à la perméabilité modélisée, se traduisant par un MRD de 0,22. Cette différence semble provenir des propriétés des structures simulées par Gervais, en particulier celles relatives à l'orientation isotrope des fibres dans l'ensemble de la structure. Pour vérifier cet aspect, certaines des structures issues de l'étude de Gervais ont été re-simulées via GeoDict en modifiant les paramètres d'anisotropie (a_1 et a_2), définis dans la section 2.2 du chapitre 2, de manière à obtenir des fibres isotropes uniquement dans le plan perpendiculaire à l'écoulement, plus représentatif des médias réels. Ces résultats, appelés, « Gervais modifié » dans la Figure 3-9, montrent un meilleur accord avec le nouveau modèle (MRD de 0,07).

La Figure 3-10 montre la comparaison des données de perméabilité numérique issues de l'article de Tucny *et al.*, par le code de calcul LBM ou GeoDict, avec la nouvelle approche.

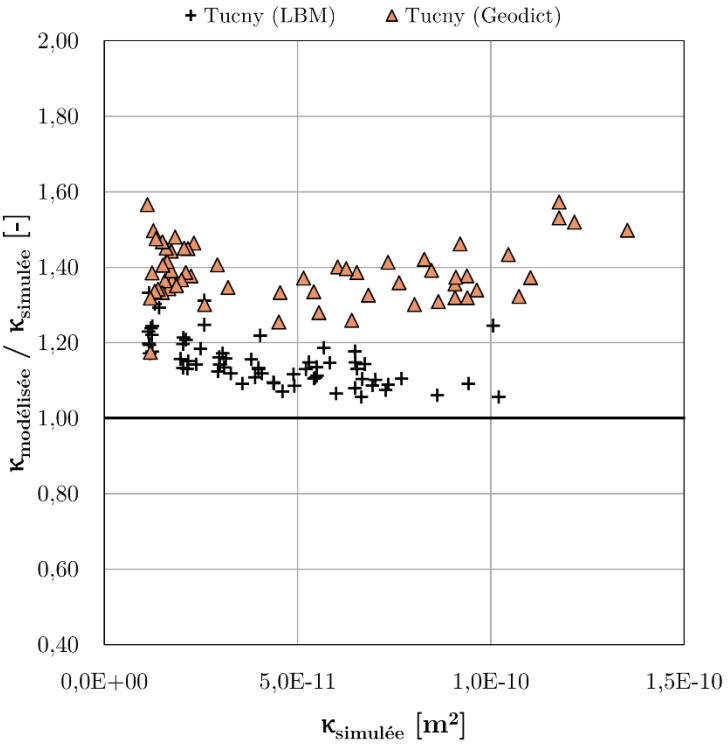


Figure 3-10 : Comparaison des données de perméabilité issues de la littérature avec la nouvelle approche (Tucny et al.)

Bien que les simulations LBM réalisées par Tucny *et al.* présentent des résultats relativement proches de ceux obtenus avec notre approche, les simulations effectuées via GeoDict montrent des écarts significatifs.

Dans notre étude, afin de se rapprocher des milieux fibreux réels, notre stratégie de simulation consiste à générer des microstructures constituées de fibres longues, caractérisées par un rapport longueur sur diamètre élevé. A l'inverse, en raison de la faible taille des domaines générés par Tucny *et al.*, le nombre de fibres représentative de la structure est très restreint.

Deux structures bimodales issues de leur étude ont été analysées : l'une présentant la plus grande valeur de perméabilité, notée κ_{max}, et l'autre la plus faible, notée κ_{min}. Ces deux structures ont été générées via GeoDict, version 2022, en utilisant les mêmes paramètres que ceux décrits par Tucny *et al.*, à savoir : une compacité de 5 % et de 19,5 %, un couple de diamètres de 18 µm et 6 µm, et une fraction volumique de 0,75 pour les fibres de plus grand diamètre.

Concernant les caractéristiques du domaine des microstructures décrites dans leur article, des voxels de 0,6 µm ont été utilisés, avec une épaisseur de 1,2 mm (soit 2000 voxels dans la direction Z). Pour la section perpendiculaire à l'écoulement (plan 0xy), les longueurs ont été fixées à $L_x = L_y = 4 \times \max d_i + 6\ \mu m$, ce qui correspond à un nombre de voxels de $N_x = N_y = 130$ voxels.

Chaque point présenté dans les deux graphiques de la Figure 3-11 correspond à la moyenne de trois simulations, réalisées avec différents paramètres d'initialisations (RS), où les barres d'erreur représentent l'écart-type.

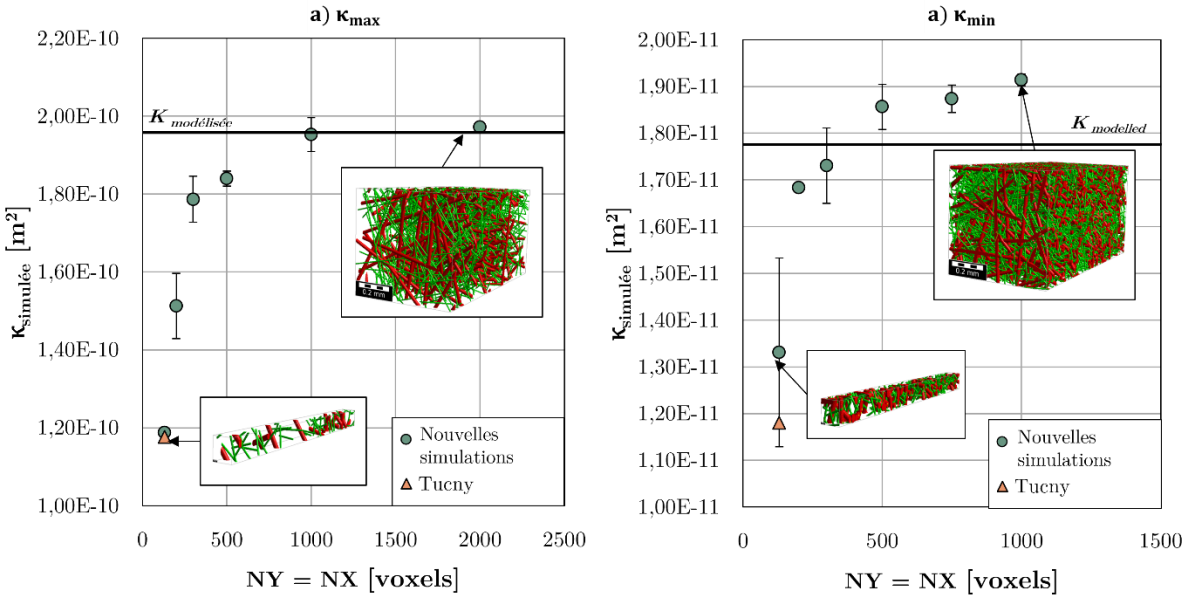


Figure 3-11 : Évolution de la perméabilité selon la dimension de la surface perpendiculaire à l'écoulement

Pour la structure κ_{max}, une valeur de perméabilité identique à celle obtenue par Tucny *et al.* a été retrouvée. Pour la structure κ_{min}, la valeur de Tucny se situe à l'intérieur de l'intervalle défini par l'écart-type des trois simulations répétées. Ces résultats confirment que les paramètres fixés dans les nouvelles simulations correspondent bien aux structures générées par Tucny *et al.*

Par la suite, d'autres simulations ont été réalisées en augmentant progressivement la dimension de la section perpendiculaire à l'écoulement, i.e. le nombre de voxels N_x et N_y. L'évolution de la perméabilité pour ces nouvelles structures est présentée dans la Figure 3-11. Ces résultats confirment que la taille des domaines modélisées dans l'article de Tucny *et al.* est

insuffisante pour obtenir des valeurs de perméabilité indépendantes de la taille du domaine, ce qui explique les écarts importants observés entre notre nouvelle approche et leurs données.

3.3 Extension du modèle de perméabilité à des distributions multimodales

3.3.1 De bimodales à décamodales…

Après avoir développé et validé notre nouvelle approche sur des médias ayant des distributions bimodales de fibres, l'étape suivante consiste à étendre le modèle à des distributions plus complexes.

Tout d'abord, de nouvelles simulations ont été effectuées avec le logiciel GeoDict, version 2022, pour des milieux fibreux suivant différentes distributions (annexe 3-A), notamment :

- Des distributions trimodales avec des diamètres équivalents (Eq. 3-9) allant de 3,43 µm à 9,01 µm et des compacités entre 5 % et 20 %,
- Des distributions quadrimodales avec des diamètres équivalents (Eq. 3-9) allant de 3,2 µm à 14,4 µm et des compacités entre 5 % et 20 %,
- Des distributions décamodales, c'est-à-dire des structures possédant une distribution de 10 diamètres aléatoires, entre 2 et 10 µm, ou entre 5 et 14 µm, avec une compacité de 12% ou 6%.

La Figure 3-12 compare la perméabilité théorique à celle obtenue par simulation pour ces trois distributions.

Le nouveau modèle montre des prédictions robustes pour les différentes distributions multimodales étudiées. Pour celles trimodales, les ratio perméabilités modélisées sur simulées sont compris entre 0,9 et 1, correspondant à un MRD de 0,062. L'écart relatif moyen est encore plus faible pour les distributions plus complexes testés, avec des MRD de 0,048 et 0,037 respectivement pour les distributions quadrimodales et décamodales.

Ces premiers résultats suggèrent que le modèle peut être étendu de manière fiable jusqu'à des distributions décamodales.

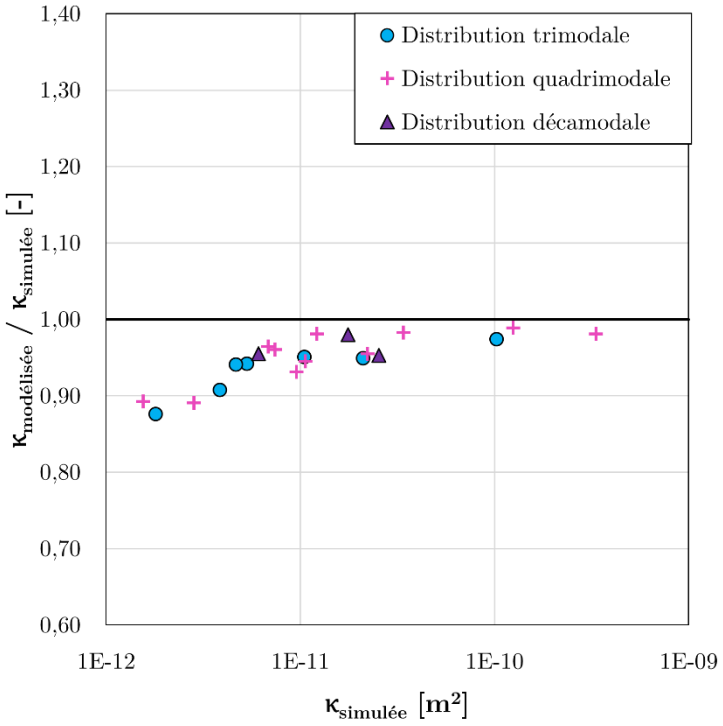


Figure 3-12 : Comparaison des perméabilités simulées avec GeoDict, version 2022, avec la nouvelle approche pour des distributions de fibres trimodales, quadrimodales et décamodales.

3.3.2 … jusqu'à des distributions multimodales

Après avoir validé la nouvelle approche jusqu'à des distributions décamodales, l'objectif est de vérifier sa capacité à prédire la perméabilité de médias fibreux ayant des distributions granulométriques de fibres encore plus complexes. Ainsi, des microstructures avec une distribution de diamètre de fibres log-normale ou normale ont été simulées. A partir de ces distributions monomodales fortement dispersées, chaque diamètre de fibre a été considéré comme un mode, afin d'appliquer à ces structures la même méthodologie que pour des distributions multimodales.

Neuf structures de distribution log-normale et quatre domaines de distribution normale, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 3-5, ont été spécifiquement étudiés. Les propriétés des lois log-normales et normales ont été définies de manière à limiter la proportion de fibres submicroniques, correspondant au maximum à 1,7 % de la distribution en nombre.

Les microstructures obtenues sont composées d'un grand nombre de fibres par domaine, entre 477 et 1995. En considérant chaque diamètre individuellement comme une classe d'une distribution multimodale, un diamètre équivalent pour chaque microstructure peut être calculé en supposant que les fibres sont de même longueur et de même masse volumique, et en considérant le régime d'écoulement comme continu. Bien que certaines fibres d'un domaine de simulation n'aient pas nécessairement des longueurs identiques, notamment à proximité des sommets du domaine cubique, la présence d'un grand nombre de fibres dans un domaine ayant une taille significative atténue l'impact de ce biais.

Tableau 3-5 : Caractéristiques des structures log-normales et normales modélisées

	d_G ou d_{50} (µm)	σ_G ou σ	α	Nombre de fibres	d_{eq} (µm) (Eq. 3-9)
Log-normal	3	1,2	5%	542	3,07
	3	1,6	5%	477	3,57
	3	1,2	10%	1179	3,10
	3	1,6	10%	933	3,66
	3	1,2	20%	1995	3,09
	3	1,6	20%	1597	3,68
	3	1,9	20%	661	4,17
	5	1,8	3%	565	6,57
	5	1,8	5%	687	6,59
Normal	5	2	3%	753	5,42
	5	1,5	5%	973	5,26
	5	1,5	10%	1993	5,25
	5	2	10%	1904	5,45

La Figure 3-13 compare la perméabilité simulée avec GeoDict pour ces différentes structures multimodales avec celle modélisée.

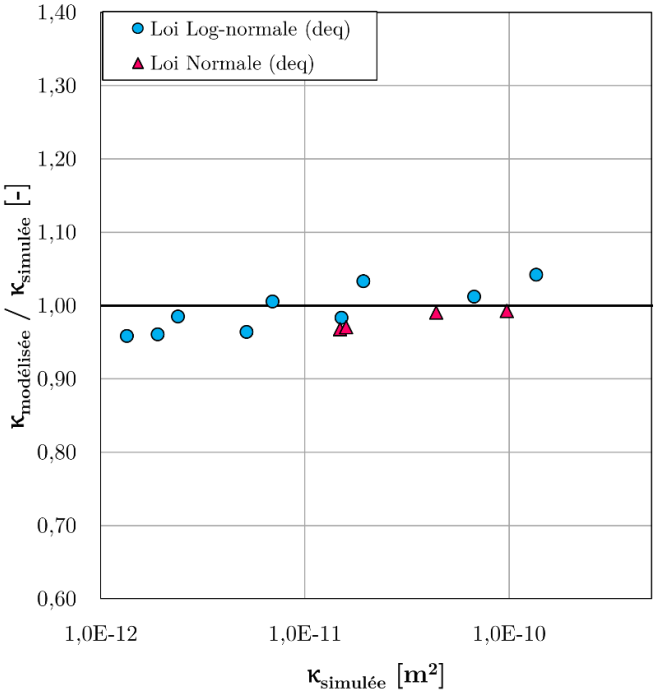


Figure 3-13 : Comparaison des perméabilités simulées et modélisées avec la nouvelle approche pour des distributions de fibres normales et log-normales

Avec un MRD de 0,025 pour toutes les distributions (log-normal et normal), les résultats confirment que l'approche est pertinente pour prédire la perméabilité de structures complexes composés d'une grande plage de diamètre.

Cette première étude a ainsi permis de développer un modèle de perméabilité applicable à des distributions multimodales dans un régime d'écoulement continu. Cependant, pour le rendre pertinent dans le cas de médias fibreux réels, souvent constitués en partie de fibres submicroniques, il est indispensable de l'étendre à un régime d'écoulement non continu. En effet, pour renforcer les performances de filtration, notamment pour les particules fines, de nombreux médias intègrent aujourd'hui des nanofibres pour lesquelles des effets de glissement apparaissent à leur surface.

3.4 Prise en compte du glissement

En parallèle des travaux précédents considérant des structures fibreuses constituées de fibres microniques, l'équipe de recherche s'est intéressée à la prise en compte du glissement lors de la présence de fibres submicroniques dans les médias fibreux. Cette section présentera succinctement les travaux de simulation menés pour la définition et la validation d'une nouvelle expression de perméabilité prenant en compte l'effet de glissement.

3.4.1 Stratégie

En présence de glissement à la surface des fibres, le gradient de vitesse devient non nul et la résistance à l'écoulement devient beaucoup plus faible (voir Figure 1-3 de la section 1.2.2 du chapitre 1). Ainsi, ce nouveau profil de vitesse doit être intégré dans les simulations numériques.

Dans le code de calcul GeoDict, la vitesse de glissement à la surface des fibres est considérée proportionnelle à la contrainte de cisaillement. L'expression de cette vitesse est alors reformulée afin de correspondre localement à un profil de vitesse quadratique, en remplacement du profil linéaire classiquement utilisé [105]. Cette prise en compte du glissement consiste à saisir une longueur de glissement assimilée au libre parcours moyen, afin d'introduire un décalage des profils de vitesse à la surface de la fibre. Cette approche de simulation des phénomènes de glissement, a été validée dans l'étude d'Azimian *et al.* [105], qui ont confronté les résultats numériques à des solutions analytiques du profil de vitesse dans un capillaire avec glissement. D'autres auteurs tels que Kwak *et al.* [63] ou Pan *et al.* [106], ont aussi utilisé ce code de calcul pour simuler l'écoulement dans les milieux poreux en présence de glissement.

Dans le cadre de cette étude, la stratégie consiste, là encore, en la création d'un plan d'expériences numériques pour déterminer la perméabilité d'un grand nombre de structures composées de fibres submicroniques et nanométriques. Les simulations ont été réalisées avec une longueur de glissement fixe de 66,5 nm, correspondant au libre parcours moyen de l'air à une pression de 1,013 bar et à une température de 20 °C [107]. La vitesse du fluide a quant à elle été fixée à 5 cm/s.

À l'aide du logiciel GeoDict, différentes structures peuvent être modélisées pour des nombres de Knudsen différents (Eq. 1-12), en faisant varier le diamètre des fibres. Des structures de distributions monomodales à bimodales permettront d'accéder à une grande plage de nombre de Knudsen.

3.4.2 Distributions monomodales

Étant donné que la majorité des modèles de la littérature ne permettent pas la prise en compte de distributions multimodales, deux lots de données numériques issues de distributions monomodales ont été utilisés.

Le premier concerne des simulations effectuées dans l'équipe à l'aide du code de calcul GeoDict, version 2023. 113 structures ont été générées, présentant une compacité variant de 2 % à 50 % et un diamètre de fibres compris entre 0,05 et 8 µm. À une pression de 1,013 bar et une température de 20 °C, entraînant un libre parcours moyen fixé à 66,5 nm, ces différentes structures permettent d'étudier une large plage du nombre de Knudsen, compris entre 0,017 et 2,66.

Le deuxième lot de données est issu de l'article de Kwak *et al.* [63], dans lequel 107 perméabilités ont été simulées, également via GeoDict, avec des structures ayant une compacité comprise entre 0,5 % et 10 %, ainsi qu'un diamètre de fibres compris entre 300 nm et 30 µm. Le libre parcours moyen, fixé à 63 nm, entraine un nombre de Knudsen entre 0,42 et 4,2 pour ces structures.

Connaissant les caractéristiques structurales des médias, les modèles de la littérature peuvent être appliqués à ces distributions monomodales, notamment ceux proposés par Pich (1966) [64], Yeh *et al.* (1974) [66], Kirsch *et al.* (1978) [65], et plus récemment par Kwak *et al.* (2023) [63].

Thomas *et al.* [108] introduisent un nouveau modèle, établi sur des données simulées de perméabilité de structures monomodales. Cette approche, issue de celle développée en régime continu au cours de cette thèse, se distingue des modèles classiques qui ne prennent pas en compte la polydispersité des fibres, et peut ainsi être étendue à des distributions plus réalistes.

Ce modèle de perméabilité en régime non continu repose sur une expression intégrant la fraction volumique f_{Vi} et la perméabilité individuelle κ_i de chaque fibre de diamètre d_i.

$$\kappa = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{f_{Vi}}{\kappa_i^{\frac{3}{4}}}} \right)^{\frac{4}{3}} \qquad \textit{Eq. 3-10}$$

La perméabilité de chaque fibre κ_i est donnée par :

$$\kappa_i = \left[H_a^{mod} + 1{,}33(1-\alpha)^{1,5} Kn_f \right] \frac{d_i^2}{16\alpha} \qquad \textit{Eq. 3-11}$$

Où α est la compacité globale de la structure fibreuse, λ le libre parcours moyen, et H_a^{mod} le facteur hydrodynamique issu du modèle de perméabilité adimensionnelle d'Happel modifié, défini comme :

$$H_a^{mod} = \left(\frac{5}{2}\right)^{0,25}\left(-\frac{1}{2}\ln(\alpha) + \frac{1}{2}\frac{\alpha^2-1}{\alpha^2+1}\right) \qquad \textit{Eq. 3-12}$$

Ce modèle (Eq. 3-10) reste valable pour un régime d'écoulement continu. En effet, lorsque le nombre de Knudsen de fibre tend vers de 0, l'expression se simplifie pour retrouver celle en milieu continu (Eq. 3-6 et Eq. 3-9).

L'ensemble de ces modèles a été appliqué aux structures simulées dans cette étude, dont une partie a été utilisée pour établir ce nouveau modèle, puis aux données simulées par Kwak *et al.*. Les écarts relatifs moyens entre les perméabilités modélisées et celles issues des simulations sont résumés dans le Tableau 3-6.

Tableau 3-6 : MRD pour différentes approches de perméabilité avec glissement pour des distributions monomodales

Approche	**MRD**	
	Simulations de l'étude	*Données de Kwak*
Thomas *et al.* [108]	3,51 %	4,18 %
Kirsch *et al.* [65]	12,28 %	5,51 %
Kwak *et al.* [63]	15,15 %	4,17 %
Yeh *et al.* [66]	52,25 %	53,31 %
Pich [64]	56,38 %	58,56 %

Les comparaisons entre les perméabilités calculées et simulées sont présentées dans la Figure 3-14 et la Figure 3-15.

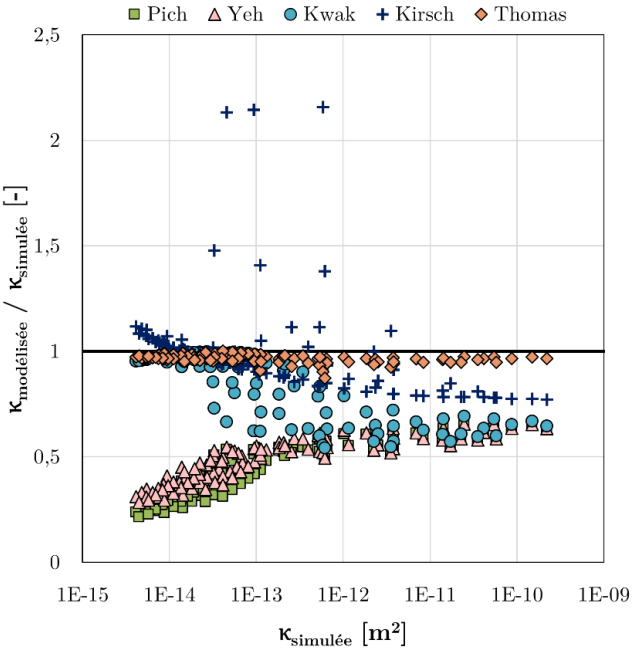


Figure 3-14 : Comparaison des perméabilités obtenues par différentes approches théoriques avec les données simulées issues de notre étude (distribution monomodale)

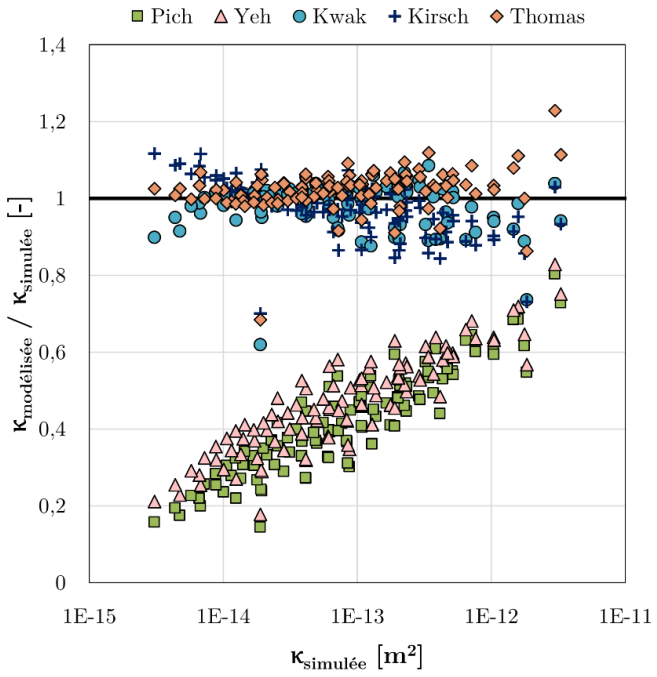


Figure 3-15 : Comparaison des perméabilités obtenues par différentes approches théoriques avec des données simulées issues de l'article de Kwak [63] (distribution monomodale)

Les modèles de Pich [64] et Yeh *et al.* [66] sous-estiment grandement la perméabilité pour l'ensemble des simulations, avec un MRD supérieur à 55 %.

Le modèle de Kwak *et al.* [63] montre une bonne prédiction de la perméabilité simulée dans son étude, avec un MRD de 4,17 %, ce qui est cohérent étant donné que le modèle a été développé à partir de ces données. Cependant, des écarts plus importants apparaissent avec nos données de simulation, avec un MRD de 15 %. Ils peuvent s'expliquer par le fait que ce modèle a été établi à partir de données numériques simulées dans des plages plus restreintes de paramètres : une compacité comprise de 5×10^{-3} et 0,1, un diamètre de fibres entre 30 et 300 nm et un nombre de Knudsen de fibres entre 0,42 et 4,2. Dans ces conditions, le modèle fournit des prédictions satisfaisantes, avec une précision de ± 10 %, notamment pour des nombres de Knudsen compris entre 0,6 et 4,2. En revanche, en dehors de cette plage, notamment pour des nombres de Knudsen inférieurs à 0,6, le modèle tend à sous-estimer les valeurs de perméabilité, et cette sous-estimation devient plus marquée à mesure que le nombre de Knudsen diminue. Cela souligne que le modèle reste restreint à ses plages de validité initiales.

Le modèle de Kirsch *et al.* [65] montre de très bonnes prédictions pour les deux lots de données numériques, mais surestime fortement les valeurs de perméabilité à partir d'une compacité supérieure à 40 %.

Étant donné que le modèle de Thomas *et al.* [108], développé au sein de l'équipe, a été établi sur une partie des données monomodales simulées dans notre étude, la Figure 3-14 montre un très bon accord entre les données modélisées et celles simulées. Ce modèle a ensuite été validé sur d'autres données, notamment celles de Kwak (Figure 3-15), avec un MRD de 4,18 %.

Ainsi, parmi les modèles étudiés, seul celui de Thomas *et al.* [108] a démontré de très bonnes prédictions des perméabilités simulées pour des distributions monomodales, sur une large plage de compacité ($0{,}5\ \% < \alpha < 50\ \%$), de diamètre ($300\ \text{nm} < d_f < 30\ \mu\text{m}$), et de nombre de Knudsen ($0{,}017 < Kn < 4{,}2$).

Le modèle développé pour les fibres submicroniques peut être considéré comme un modèle global, couvrant à la fois les régimes d'écoulement continu et non continu. Pour des diamètres de fibres supérieurs à 3 µm, ce modèle donne des résultats très proches, moins de 5 % d'écart (Figure 3-16), de ceux obtenus avec le modèle établi précédemment pour des fibres microniques en régime continu (section 3.2.3). En revanche, pour des fibres de plus petit diamètre, l'absence de prise en compte de l'effet de glissement dans le modèle initial conduit à une sous-estimation de la perméabilité, ce qui explique l'écart croissant entre les deux approches (Figure 3-16). À l'inverse, lorsque le diamètre des fibres devient très grand, le nombre de Knudsen tend vers zéro, et le modèle submicronique tend vers le modèle en régime continu. Cela confirme la capacité du nouveau modèle à prédire la perméabilité sur une large gamme de conditions, en tenant compte des effets de glissement.

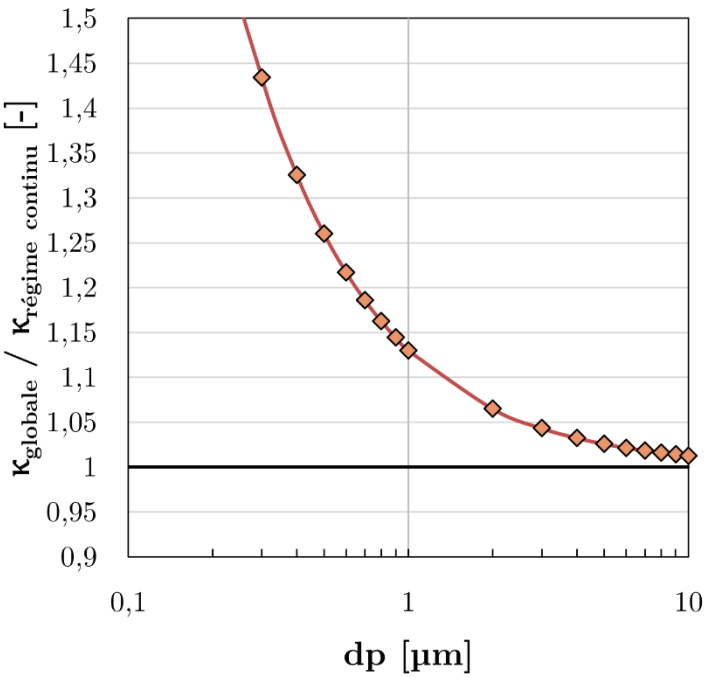


Figure 3-16 : Comparaison du modèle de perméabilité globale ($\kappa_{globale}$) avec le modèle établi en régime continu ($\kappa_{régime\ continu}$) en fonction du diamètre de fibre pour une structure de compacité 5 %

3.4.3 Distributions multimodales

Le modèle de Thomas *et al.* [108] a ensuite été appliqué sur des structures numériques présentant des mélanges de fibres microniques et submicroniques :

- 90 structures de distributions bimodales avec des diamètres de fibres compris entre 0,05 µm et 2 µm, et une compacité entre 3 % et 15 %,
- 37 structures de distributions trimodales avec des diamètres de fibres compris entre 0,075 µm et 20 µm, et une compacité entre 5 % et 20 %,
- 56 structures de distributions quadrimodales avec des diamètres de fibres compris entre 0,1 µm et 20 µm, et une compacité entre 5 % et 10 %.

La Figure 3-17 présente la comparaison entre les perméabilités simulées et modélisées pour ces trois types de distributions. Le modèle de Thomas *et al.* [108] montre de très bonnes prédictions, avec un MRD de 3,96 % pour les distributions bimodales, 2,35 % pour les distributions trimodales et 3,16 % pour les distributions quadrimodales. La majorité des perméabilités sont ainsi prédites à ±10 %.

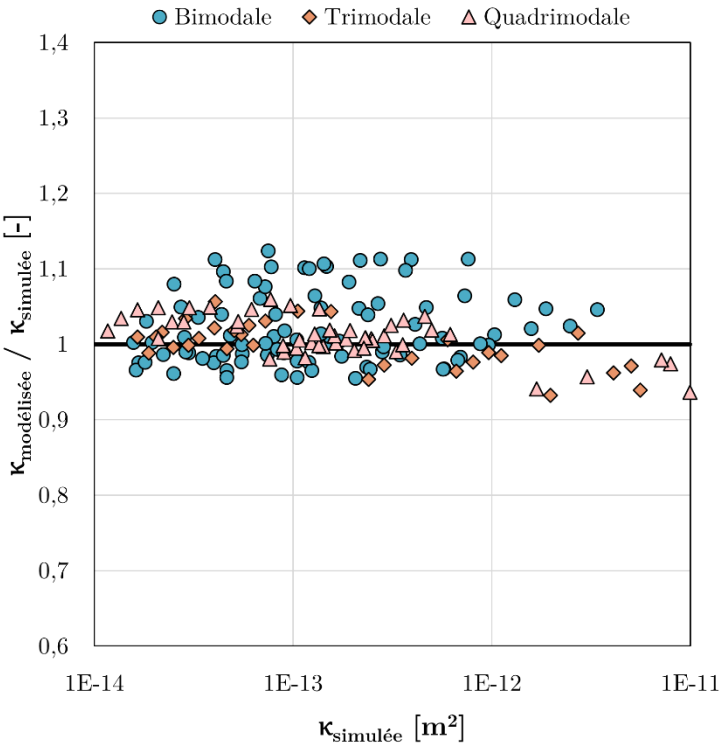


Figure 3-17 : Comparaison des perméabilités obtenues par l'approche de Thomas et al. [108] avec les données simulées pour des distributions bimodales, trimodales et quadrimodales

3.5 Conclusion

En conclusion, un modèle prédictif de la perméabilité de milieux fibreux composés de fibres microniques a été développé à partir de simulations d'écoulement au travers de milieux fibreux générés par GeoDict. La perméabilité (Eq. 3-13) peut s'écrire en fonction du facteur hydrodynamique et d'un diamètre équivalent. A partir de distribution monomodale, il a été démontré que le facteur hydrodynamique le plus pertinent est celui de Happel modifié (Eq. 3-14). Les essais de simulations réalisés sur des structures fibreuses polymodales, ont permis d'exprimer le diamètre équivalent à partir de la fraction volumique de chaque fibre et de son diamètre à la puissance (3/2) (Eq. 3-15). Ce nouveau modèle prédit les valeurs de perméabilité simulées à ±10% sur une large gamme de compacités (de 1 % à 20 %) et de diamètres de fibres (1,5 µm à 30 µm), tout en démontrant sa capacité à être étendue à des distributions de fibres multimodales.

Tableau 3-7 : Résumé du modèle prédictif de perméabilité en régime d'écoulement continu

RÉGIME D'ÉCOULEMENT CONTINU		
Perméabilité en régime Continu (C)	$\kappa_C = \frac{d_{eq}^2 \, H_a^{mod}}{16\,\alpha}$	*Eq. 3-13*
Facteur hydrodynamique d'Happel modifié	$H_a^{mod} = \left(\frac{5}{2}\right)^{0,25}\left(-\frac{1}{2}\ln(\alpha) + \frac{1}{2}\frac{\alpha^2-1}{\alpha^2+1}\right)$	*Eq. 3-14*
Nouveau diamètre équivalent	$d_{eq} = \left[\frac{1}{\sum_i \frac{f_{Vi}}{d_i^{\frac{3}{2}}}}\right]^{\frac{2}{3}}$	*Eq. 3-15*

Dans un deuxième temps, le modèle a été étendu aux médias fibreux constitués de fibres submicroniques ou d'un mélange de fibres microniques et submicroniques pour lesquelles l'effet de glissement conduit à une perméabilité plus grande (Eq. 3-16 et Eq. 3-17). Il a démontré de très bonnes prédictions de la perméabilité, avec une précision de ±10 %, pour des distributions allant de monomodales à quadrimodales, sur une large plage de diamètres, de compacités et de nombres de Knudsen.

Tableau 3-8 : Résumé du modèle prédictif de perméabilité en régime d'écoulement non continu

RÉGIME D'ÉCOULEMENT NON CONTINU		
Perméabilité en régime Non Continu (NC)	$\kappa_{NC} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{f_{Vi}}{\kappa_i^{\frac{3}{4}}}}\right)^{\frac{4}{3}}$	*Eq. 3-16*
Perméabilité de chaque fibre i	$\kappa_i = \left[H_a^{mod} + 1{,}33(1-\alpha)^{1,5}\frac{2\lambda}{d_i}\right]\frac{d_i^2}{16\alpha}$	*Eq. 3-17*

Ce modèle a ainsi confirmé sa pertinence, tant par des prédictions plus précises que celles des modèles de la littérature pour les distributions monomodales, que par sa capacité à être généralisé à des distributions de diamètres de fibres plus complexes tout en intégrant l'effet de glissement sur les fibres submicroniques.

Afin de valider définitivement ce modèle, une dernière étape demeure ; celle de la confrontation aux données expérimentales.

Chapitre 4 : Confrontation du modèle aux valeurs de perméabilités expérimentales

Sommaire

Chapitre 4 : Confrontation du modèle aux valeurs de perméabilités expérimentales 87
4.1 Médias fibreux modèles 88
4.1.1 Fabrication de médias fibreux 88
a. Médias modèles 88
b. Formettes Alkegen 90
4.1.2 Caractérisation des médias 91
a. Distribution de diamètres de fibres 91
b. Épaisseur 96
c. Grammage et Compacité 101
4.1.3 Mesure expérimentale de la perméabilité 102
4.2 Comparaison des données expérimentales au modèle 107
4.2.1 Analyse des incertitudes 107
a. Analyse de sensibilité des modèles (FSD) 107
b. Incertitude de la perméabilité expérimentale 109
c. Incertitude des modèles de perméabilité 111
4.2.2 Médias de distribution monomodales 116
4.2.3 Médias de distributions bimodales 119
4.3 Conclusion 127

Ce chapitre a pour objectif de valider expérimentalement le modèle général défini précédemment permettant la détermination de la perméabilité de médias composés de fibres microniques et/ou submicroniques.

4.1 Médias fibreux modèles

Dans un premier temps, la perméabilité de médias fibreux modèles a été étudiée. L'utilisation de ces médias simplifiés, fabriqués soit au laboratoire (formettes LRGP), soit par l'entreprise Alkegen (formettes Alkegen), vise à faciliter la comparaison entre les perméabilités obtenues expérimentalement et celles déterminées à l'aide du nouveau modèle, aussi bien pour des fibres microniques que submicroniques. En particulier, l'absence de liant et un meilleur contrôle de la distribution des fibres au sein des médias permettent une meilleure caractérisation de la structure fibreuse.

4.1.1Fabrication de médias fibreux

a. Médias modèles

Dans un premier temps, des formettes dites « LRGP » ont été fabriquées au sein du laboratoire à partir de lots de fibres de verre de différents diamètres centrés sur 2,7 µm et 6 µm et fournis par l'entreprise Alkegen. Des fibres provenant d'un autre fournisseur de diamètre 2,7 µm ont également été utilisées dans le cadre de cette étude.

A partir de ces différents lots de fibres, un protocole expérimental de fabrication de nos propres médias fibreux a été développé en s'inspirant de la méthode par voie humide, similaire au procédé papetier, pour obtenir différents médias de grammage proche de 80 g/m^2. Le protocole est schématisé en Figure 4-1.

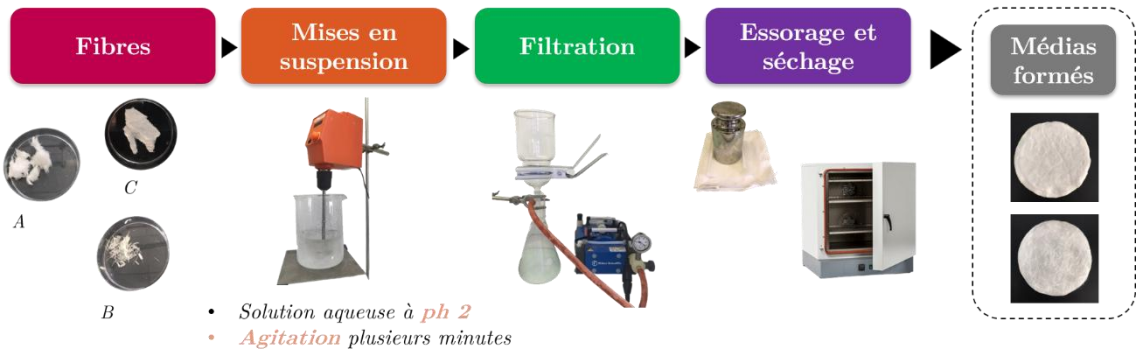


Figure 4-1: Schéma du protocole de fabrication des médias modèles

Initialement, les fibres de verre se présentant sous forme d'amas sont dispersées dans une solution aqueuse acide. La dispersion des fibres dépend de la charge de surface, liée à des phénomènes de protonation ou déprotonation des groupes silanols (Si-OH) présents à leur

surface. Ces groupes entrainent une charge négative (Si-O^-) à pH élevé ou une charge positive (Si-OH_2^+) à pH bas [109,110].

Le point de charge nulle, pH_0, correspond au pH où le solide présente une charge nette nulle, correspondant à une absence totale de charge en surface ou bien à la présence simultanée de charges positives et négatives en quantité égale [111,112]. Ainsi, à pH_0 les forces de répulsions sont faibles entre les surfaces : si $pH < pH_0$ les surfaces du matériau sont chargées positivement, et si $pH > pH_0$, il y a déprotonation des sites, qui vont donc être chargés négativement [109]. Dans la littérature, différentes valeurs peuvent être trouvées : pour de la silice pure, Jupille [113] détermine un pH_0 de l'ordre de 2, alors que les travaux de Carre *et al.* [114] ont plutôt montré un pH_0 entre 2 et 4. Lozano [109] met en avant que la valeur du point de charge nulle est dépendante de la composition chimique précise du verre, la majorité des valeurs de la littérature restant inférieur à 6.

En l'absence de connaissance des compositions précises des fibres de verres utilisés par Alkegen, il est difficile d'en déterminer son pH_0 à partir de la littérature. L'entreprise, quant à elle, nous a confirmé l'utilisation d'un pH de la solution aqueuse à environ 2 dans son procédé de fabrication de médias filtrants. Ce choix, proche ou légèrement inférieur au pH_0, minimise les répulsions électrostatiques entre les fibres, favorisant une dispersion homogène des fibres de verre afin de faciliter la formation d'un média filtrant uniforme.

Ainsi, après avoir pesé la masse nécessaire pour obtenir un grammage proche de 80 g/m^2, les fibres sont placées dans une solution d'acide sulfurique à pH = 2. La solution est ensuite agitée pendant plusieurs minutes de façon à obtenir une bonne dispersion des fibres et donc par la suite un média le plus homogène possible. En pratique, il a en effet été observé le besoin de plusieurs minutes d'agitation pour arriver à bien disperser les amas de fibres [115–117].

Après la mise en solution et l'agitation, la suspension de fibres est filtrée sur Büchner. Le média formé est ensuite essoré et mis à l'étuve. Une fois séchée, la masse de l'échantillon est mesurée et comparée à celle des fibres initialement ajoutées. Les résultats montrent une perte de masse maximale de 4 % lors du protocole de fabrication.

Six médias de distribution monomodale ont ainsi été fabriqués pour chaque type de fibres : les échantillons obtenus à partir des fibres d'Alkegen seront nommés A pour les fibres de 2,7 µm et B pour les fibres de 6 µm, et ceux fabriqués à partir des fibres d'un autre fournisseur de diamètre 2,7 µm seront nommés C. La Figure 4-2 présente trois clichés des médias formés :

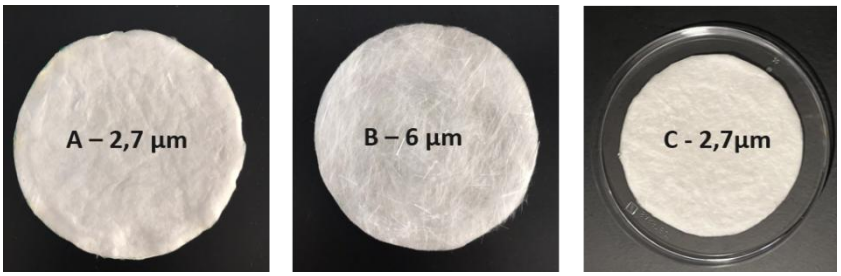


Figure 4-2 : Exemple de médias modèles formés

b. Formettes Alkegen

Dans un second temps, l'entreprise Alkegen nous a fourni des formettes de médias correspondant à des grammages et des mélanges prédéfinis de fibres de 6 µm et de 2,7 µm. Ces formettes présentant une surface plus importante, il est possible d'y découper plusieurs échantillons issus d'une même fabrication. Le procédé de fabrication utilisé est similaire à celui appliqué pour les médias modèles.

Les fractions massiques cibles de fibres centrées sur 6 µm (f_{m1}) et sur 2,7 µm (f_{m2}), ainsi que les grammages cibles des différentes formettes sont résumés dans le Tableau 4-1. Quatre formettes, F1, F2 et F4, F7, ont une distribution monomodale, avec un grammage cible de 80 ou 160 g/m^2. Six autres formettes sont constituées de distributions bimodales différentes pour ces deux mêmes grammages.

Tableau 4-1 : Composition et grammage cibles des formettes

Nom	f_{m1} cible (6 µm)	f_{m2} cible (2,7 µm)	Grammage cible (g/m^2)
F1	100 %	0 %	80
F2	100 %	0 %	160
F4	0 %	100 %	80
F7	0 %	100 %	160
F8	50 %	50 %	80
F9	75 %	25 %	80
F10	90 %	10 %	80
F11	50 %	50 %	160
F12	75 %	25 %	160
F13	90 %	10 %	160

4.1.2 Caractérisation des médias

La mesure précise des propriétés structurales des médias est essentielle : si seule l'épaisseur est requise pour la détermination expérimentale de la perméabilité, la compacité et la distribution des diamètres de fibres sont par contre nécessaires pour pouvoir prédire la perméabilité. Une caractérisation rigoureuse est donc indispensable pour garantir la fiabilité des résultats obtenus.

a. Distribution de diamètres de fibres

La distribution de diamètres de fibres (FSD - *Fiber Size Distribution*) d'un média fibreux peut être déterminée par des techniques d'observation de surface, notamment à l'aide d'un Microscope Électronique à Balayage (MEB).

A partir des images acquises, les diamètres des fibres ont directement été mesurés via le logiciel d'analyse d'images ImageJ. Pour identifier les fibres, une ligne diagonale est tracée sur chaque image [10]. Seules les fibres traversées par cette ligne sont prises en compte pour la mesure, évitant ainsi de compter plusieurs fois les mêmes fibres. De plus, différentes zones d'un même échantillon ont été analysées pour obtenir une distribution la plus représentative possible du média. Les fibres hors du plan focal ont été exclues afin de garantir la précision des mesures. La Figure 4-3 montre un exemple d'images MEB analysées pour des fibres du média B.

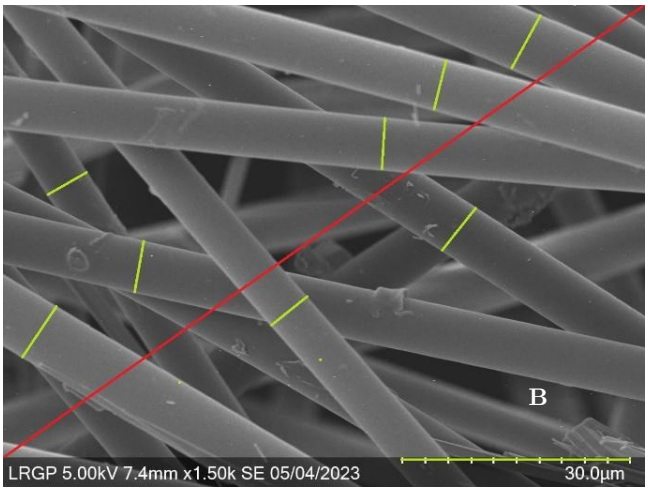


Figure 4-3 : Exemple d'image MEB analysée pour la détermination de la distribution de taille de fibres

Dans un premier temps, des échantillons issus des formettes LRGP et Alkegen ne contenant qu'un seul type de fibre (distribution monomodale) ont été analysés. La Figure 4-4 correspond aux distributions en nombre des formettes F1/F2 et F4/F7, respectivement constituées du lot de fibre centré sur 6 µm ou 2,7 µm. Les autres FSD des formettes LRGP A, B et C sont présentés en annexe 4-A.

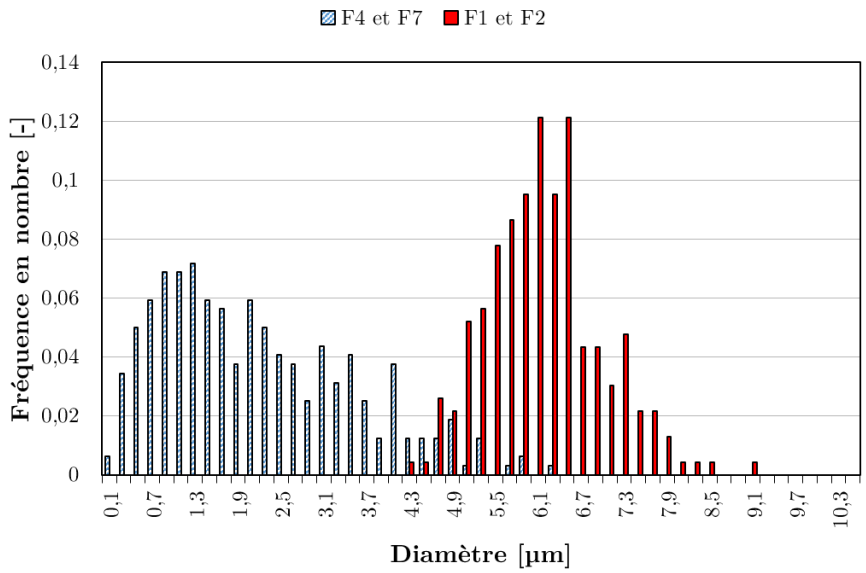


Figure 4-4: FSD des formettes de distribution monomodale (F4, F7, F1 et F2)

Bien que les fournisseurs indiquent un diamètre de fibre unique pour chaque type de média, les images de microscopie révèlent que les fibres ne sont pas monodisperses mais monomodales et polydisperses, avec un écart type important. Le Tableau 4-2 résume les caractéristiques des FSD obtenues pour les formettes LRGP et Alkegen de composition monomodale.

Tableau 4-2 : Caractéristiques des FSD des formettes LRGP et Alkegen de composition monomodale

Nom	**Nombre de fibres mesurées**	**d_{min} (µm)**	**d_{max} (µm)**	**Écart type(µm)**	**d_{eq} (µm) (Eq. 3-9)***
A	126	0,29	10,09	1,51	2,92
B	57	4,88	8,27	0,85	6,22
C	124	0,24	11,12	1,40	2,91
F1 et F2	231	4,39	9,10	0,79	6,25
F4 et F7	320	0,14	6,29	1,33	2,79

* diamètre équivalent calculé à titre indicatif selon l'expression valable en régime d'écoulement continu, bien qu'il ne soit pas utilisé dans le modèle général de perméabilité.

Les distributions de taille de fibre des échantillons A et F4/F7 d'une part, et B et F1/F2 d'autre part, sont relativement similaires. Les faibles différences observées peuvent s'expliquer par des incertitudes de mesure, notamment liées au nombre de fibres analysées, plus élevé pour les formettes F1/F2 et F4/F7. Par ailleurs, le formettes Alkegen ont été produites ultérieurement à partir d'un nouveau lot de fibres, comparés aux formettes LRGP A et B. Des variations entre les lots de matière première sont également possibles. Par ailleurs, les fibres des échantillons C et A sont quasiment identiques, ce qui suggère qu'ils proviennent probablement du même fournisseur.

Dans un second temps, les autres formettes Alkegen, composées d'un mélange de deux types de fibres en proportions massiques différentes, ont été analysées à partir d'images MEB (Tableau 4-3) et leurs distributions sont présentées en annexe 4-A. On retrouve bien des diamètres équivalents similaires entre les formettes composées des mêmes proportions de fibres, malgré des grammages différents (F8 et F11 ; F9 et F12 ; F10 et F13).

Tableau 4-3: Caractéristiques des FSD des formettes Alkegen de composition bimodale

Nom	**Nombre de fibres mesurées**	**d_{min} (µm)**	**d_{max} (µm)**	**d_{eq} (µm) (Eq. 3-9)***
F8	334	0,25	10,49	4,15
F11	208	0,43	7,66	4,00
F9	426	0,34	9,58	5,11
F12	374	0,37	9,74	4,91
F10	234	0,40	8,52	5,71
F13	176	0,27	8,11	5,46

* diamètre équivalent calculé à titre indicatif selon l'expression valable en régime d'écoulement continu, bien qu'il ne soit pas utilisé dans le modèle général de perméabilité.

L'analyse repose sur des images de MEB à la surface des médias, ce qui peut impliquer certaines limitations :

- L'opérateur peut inconsciemment privilégier certaines fibres au détriment d'autres, entrainant des biais de sélection.
- La méthode donne accès à une distribution des fibres à la surface des médias, ce qui ne reflète pas nécessairement celle à l'intérieur du filtre.
- La longueur des fibres ne pouvant pas être mesurée, la conversion d'une distribution en nombre vers une distribution en volume repose sur l'hypothèse d'une longueur identique de fibres.

Afin de vérifier l'homogénéité des FSD mesurées sur les formettes, des mesures ont été réalisées sur les deux faces opposées de chaque échantillon. La Figure 4-5 et la Figure 4-6 présentent une comparaison des distributions obtenues à partir des images des faces A et B des formettes F10 et F9.

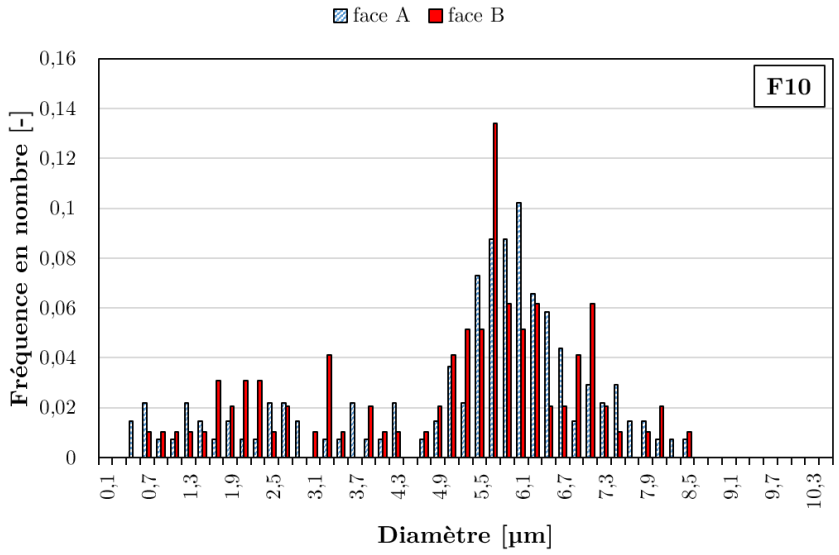


Figure 4-5: Comparaison des distributions granulométriques de fibres réalisées sur les deux faces de la formette F10

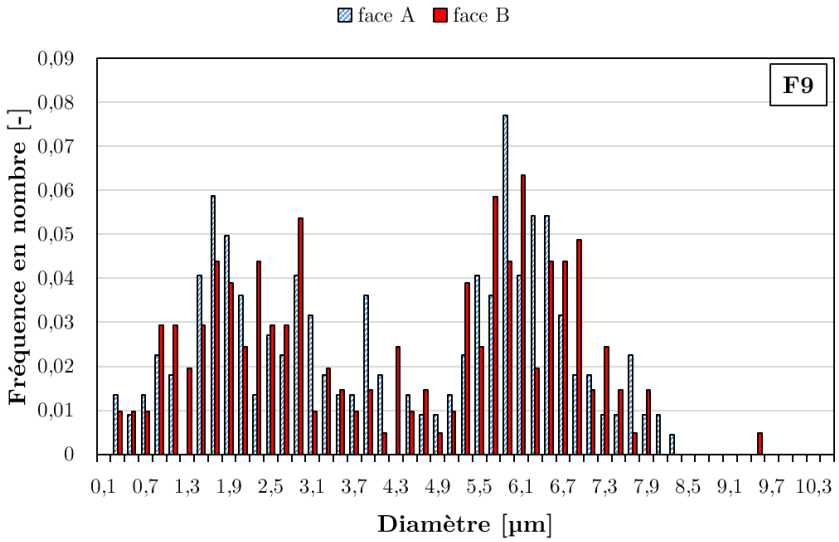


Figure 4-6 : Comparaison des distributions granulométriques de fibres réalisées sur les deux faces de la formette F9

Les formes des deux distributions sont globalement similaires entre les deux faces. Les faibles écarts observés peuvent aisément s'expliquer par les incertitudes liées au traitement des données de microscopie et à l'hétérogénéité locale des structures fibreuses. La similarité des distributions entre les deux faces suggère qu'il n'y a pas de ségrégation en taille au cours du procédé de fabrication, ce qui permet de supposer que la distribution mesurée est représentative de l'ensemble de l'épaisseur du média.

Pour vérifier que cette analyse microscopique peut rendre compte de la distribution dans l'épaisseur de la structure fibreuse, la distribution de taille de fibres d'un média commercial a été confrontée à celle obtenue par tomographie, méthode permettant d'accéder à la structure interne du média.

Le logiciel GeoDict a été utilisé pour importer puis segmenter les scans de tomographie du média (microtomographe EasyTom 150/160) et reconstruire une structure tridimensionnelle. Par ailleurs, l'utilisation du module FiberFind de GeoDict a permis d'identifier chacune des fibres de cette structure et d'en déterminer l'orientation et le diamètre.

La Figure 4-7 montre des différences dans les distributions de fibres obtenues par micro-tomographie et par imagerie MEB. Les incertitudes liées à la détermination des FSD par MEB, ne peuvent être compensées par le microtomographe de laboratoire dont la résolution, de l'ordre du micromètre, ne permet pas d'obtenir une distribution représentative de la structure composée de fibres submicroniques.

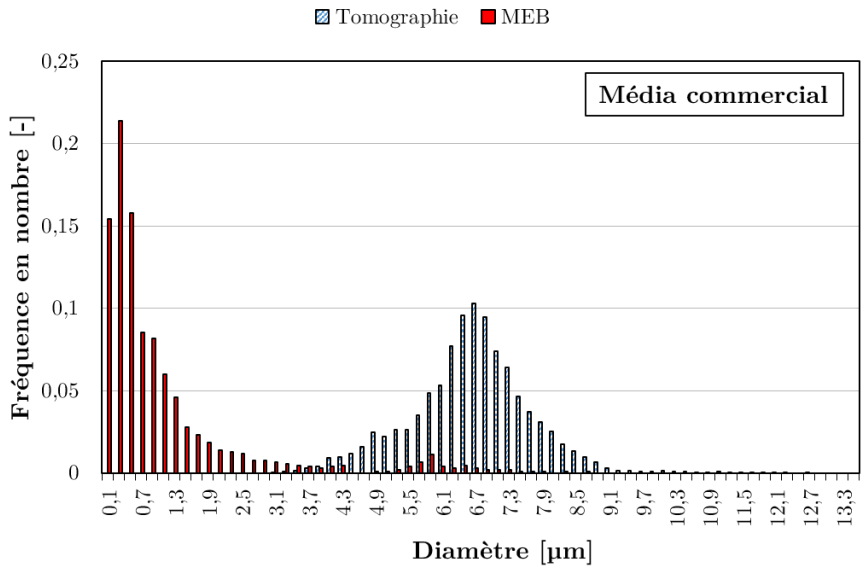


Figure 4-7 : Comparaison des distributions obtenues par tomographie et par imagerie MEB pour un média commercial

Aucune des deux méthodes d'imagerie présentées dans cette section pour caractériser la distribution des tailles de fibre des médias ne semble idéale. Le MEB offre une bonne résolution pour les fibres submicrométriques, et demeure un appareil plus facilement accessible au laboratoire. Cependant, il est limité à l'analyse de surface et peut introduire des biais liés à la préparation des échantillons, nécessitant un revêtement métallique pour les échantillons non conducteurs comme les fibres de verre, ou à la subjectivité des mesures effectuées par l'opérateur. En revanche, la micro-tomographie à rayon X (µ-CT) permet une analyse 3D non destructive, visualisant la distribution des fibres dans tout le volume de l'échantillon, avec la possibilité d'automatiser les mesures via des logiciels comme GeoDict. Cependant, sa résolution, généralement de 1 à 10 µm dans les tomographes de laboratoire, est insuffisante pour détecter les fibres submicroniques, et l'accès à de grands instruments ayant une résolution plus importante est plus coûteux.

Ainsi, au vu de la présence de fibres submicroniques dans certains échantillons, la méthode d'imagerie en surface par MEB a été retenue pour caractériser les FSD dans cette

étude. Malgré les incertitudes associées à l'imagerie de surface, la similarité des distributions de tailles de fibres sur les deux faces de l'échantillon laisse à penser à une certaine homogénéité de ce paramètre dans l'ensemble du volume.

b. Épaisseur

L'épaisseur des médias a été mesurée à l'aide d'un mesureur commercial (VVC) respectant la norme ISO 9073-2:1997 [21]. Cet appareil mesure la distance entre deux plaques, en appliquant sur l'échantillon une pression connue. Conformément à cette norme, des essais préliminaires (voir section 1.1.3b. du chapitre 1) ont été réalisés sur les échantillons des formettes LRGP et Alkegen. Ces essais ont montré que certains médias étaient comprimés de plus de 20 % entre les contraintes de 0,1 kPa et 0,5 kPa, les classant ainsi comme des « non-tissés volumineux ». Cependant, seul le dispositif correspondant à la méthode de mesure d'épaisseur pour les non-tissés dits « normaux » (pied presseur horizontal à 0,5 kPa) était disponible au laboratoire. Il n'a donc pas été possible d'appliquer la méthode dédiée aux non-tissés volumineux.

Compte tenu de la compressibilité des échantillons, il a été décidé de mesurer l'épaisseur des échantillons sous deux contraintes (0,1 kPa et 0,5 kPa) à l'aide de l'appareil de mesure disponible. Pour les formettes LRGP, la Figure 4-8 présente les résultats d'épaisseur selon la contrainte appliquée. Seuls les échantillons de la formette B ont été mesurés sous une contrainte de 0,5 kPa. Quant à la Figure 4-9 , elle représente les épaisseurs moyennes mesurées pour les formettes Alkegen, issues de cinq mesures, sous 0,1 kPa ou 0,5 kPa.

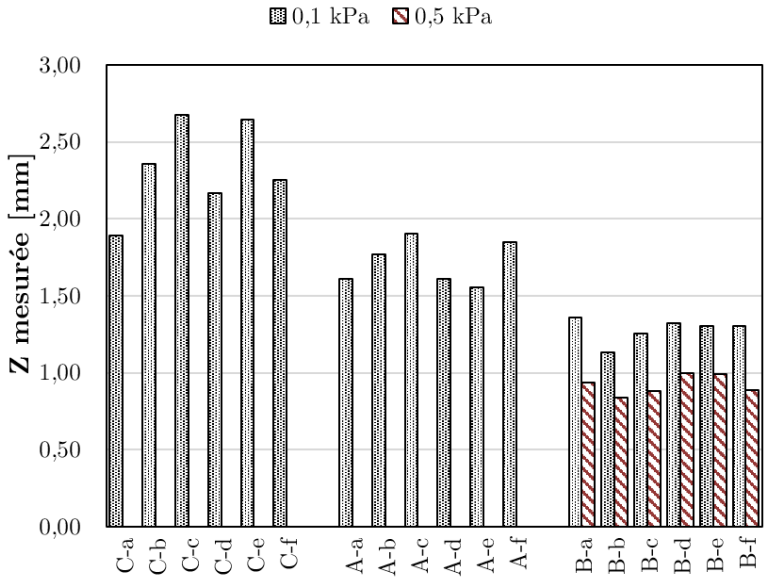


Figure 4-8 : Épaisseurs mesurées des formettes LRGP à une contrainte de 0,1 kPa et 0,5 kPa (une seule mesure par échantillon)

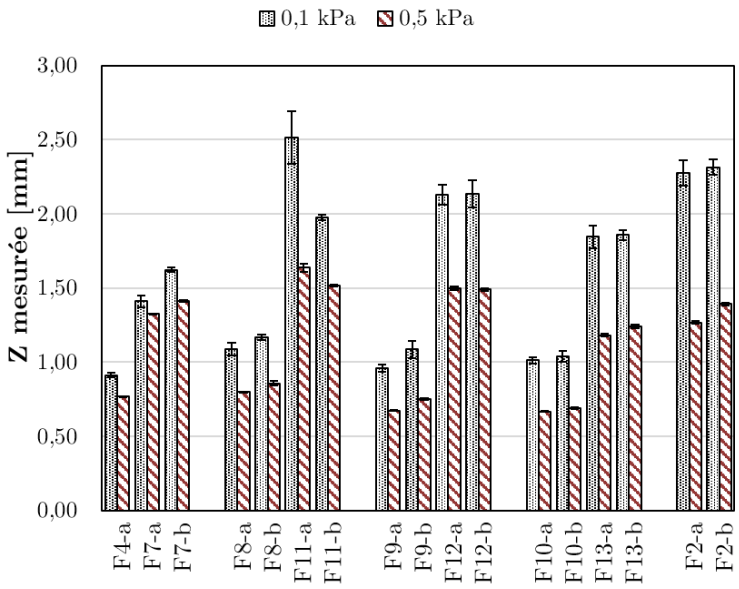


Figure 4-9 : Épaisseurs mesurées des médias issus des formettes d'Alkegen à une contrainte de 0,1 kPa et 0,5 kPa (cinq mesures par échantillon)

Que ce soit pour les formettes LRGP ou Alkegen, l'écart notable entre les épaisseurs mesurées à 0,1kPa et à 0,5kPa indique que les médias étudiés sont fortement compressibles.

Par conséquent, afin de caractériser leur comportement sous compression, des mesures supplémentaires ont été réalisées sous différentes contraintes. La méthodologie expérimentale est schématisée en Figure 4-10.

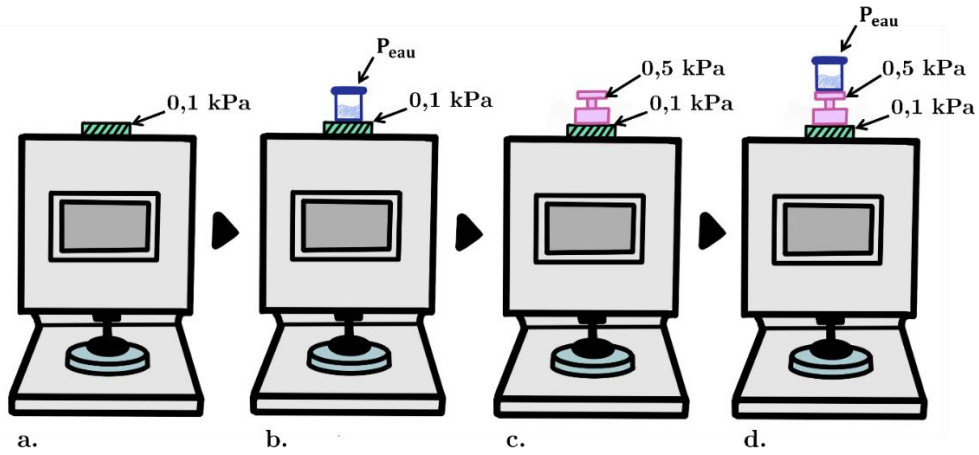


Figure 4-10: Méthodologie expérimentale de mesure d'épaisseur sous différentes contraintes

L'appareil mesure initialement une épaisseur minimale à une pression appliquée de 0,1 kPa (Figure 4-10a). L'ajout d'une masse de référence fournie avec l'appareil permet ensuite d'atteindre une pression totale de 0,5 kPa (Figure 4-10c). Pour obtenir d'autres valeurs de pression, des récipients remplis d'eau de masses variables sont ajoutés, soit pour atteindre une contrainte intermédiaire entre 0,1 et 0,5 kPa (Figure 4-10b), soit pour dépasser 0,5 kPa (Figure 4-10d).

La pression totale appliquée lors de chaque mesure ($P^{tot}_{contrainte}$) est définie par :

$$P^{tot}_{contrainte} = P_{app} + P_{eau} \qquad \textit{Eq. 4-1}$$

Avec $P_{app} = 0{,}1\ kPa$ ou $0{,}5\ kPa$ selon la configuration de l'appareil de mesure, et P_{eau} (en kPa), la pression induite par la masse d'eau ajoutée :

$$P_{eau} = \frac{Force}{Surface} = \frac{m_{eau}\, g}{\frac{\pi}{4} d_m^2} \qquad \textit{Eq. 4-2}$$

Où m_{eau} est la masse d'eau en kg, g l'accélération gravitationnelle en m/s^2, et d_m le diamètre de la surface de pression en m.

Trois échantillons ont été découpés à l'emporte-pièce pour chaque type de formette et les mesures d'épaisseur ont été réalisées à six différentes contraintes (Tableau 4-4).

Tableau 4-4: Mesure d'épaisseur réalisée à différentes contraintes

Mesure	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
$\mathbf{P_{app}}$ (kPa)	0,1	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5
$\mathbf{m_{eau}}$ (g)	0	37,9	0	61,9	131,8	331,6
$\mathbf{P^{tot}_{contrainte}}$ (kPa)	**0,1**	**0,25**	**0,5**	**0,74**	**1,02**	**1,8**

Lorsque la contrainte augmente, l'épaisseur mesurée du média diminue. Son évolution en fonction de la contrainte exercée peut être modélisée par la relation suivante :

$$Z = Z_0 - (Z_0 - Z_{min})\left[1 - \exp\left(-\frac{P^{tot}_{contrainte}}{\tau}\right)\right] \qquad \textit{Eq. 4-3}$$

Soit encore

$$\frac{Z}{Z_0} = 1 - C_{max}\left[1 - \exp\left(-\frac{P^{tot}_{contrainte}}{\tau}\right)\right] \qquad \textit{Eq. 4-4}$$

Où

$$C_{max} = \frac{Z_0 - Z_{min}}{Z_0} \qquad \textit{Eq. 4-5}$$

Avec Z_0 l'épaisseur du média en l'absence de contrainte, Z_{min} l'épaisseur minimale du média pour une contrainte infinie, P^{tot}_{mesure} la contrainte appliquée lors de la mesure en kPa, τ une constante en kPa et C_{max} le taux de compression maximale.

Pour illustrer l'influence des paramètres C_{max} et τ, prenons comme exemple trois médias fictifs avec un taux de compression maximale de 40% ou 20%, et une constante τ de 0,25 kPa et 0,75 kPa. Leurs courbes de compression sont représentées en Figure 4-11.

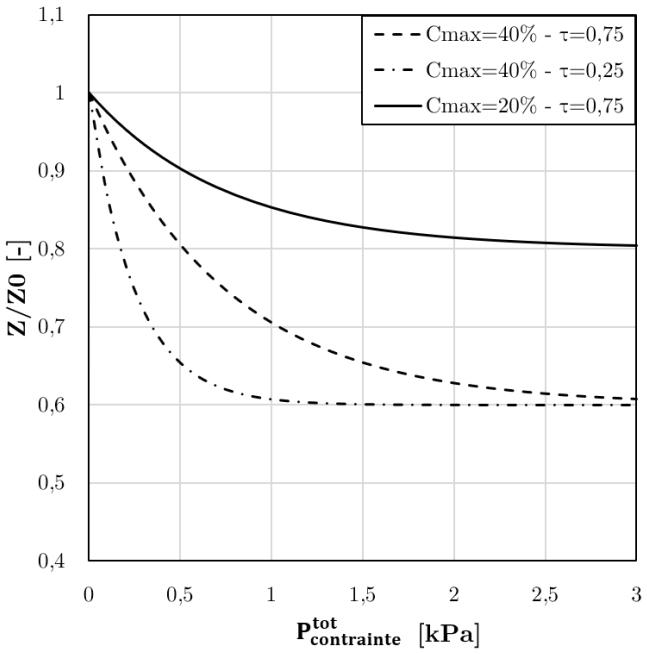


Figure 4-11 : Influence des paramètres C_{max} et τ pour trois exemples théoriques

La compression des médias fibreux est ainsi caractérisée par deux paramètres :

- C_{max}, le taux de compression maximal qui caractérise la compressibilité de la structure. Plus C_{max} est important, plus le média est compressible.
- τ, une constante qui traduit la résistance de la structure à la compression. Le média se comprime d'autant plus facilement que la valeur de τ est faible.

Ainsi, pour trois échantillons par formette, la courbe de compressibilité a été tracée et modélisée. La Figure 4-12 présente les mesures expérimentales d'épaisseur et la courbe de compressibilité modélisée correspondante pour les formettes 11 et 8. Les figures relatives aux autres formettes sont présentées dans l'annexe 4-B.

Pour certaines formettes, une divergence peut être observée entre les courbes obtenues pour les trois échantillons d'une même formette. Cette variabilité pourrait refléter une hétérogénéité au sein de la formette, avec des différences locales d'épaisseur, et/ou des incertitudes liées à la précision des mesures.

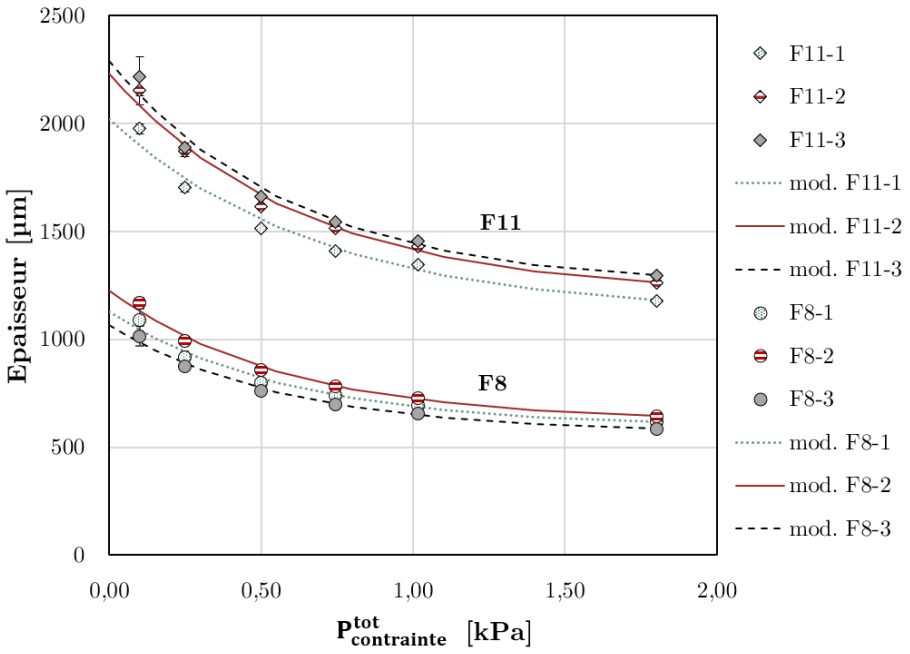


Figure 4-12 : Courbes de compressibilité modélisée des formettes 11 et 8

Le taux de compressibilité moyen (C_{max}) et la constante τ moyenne obtenus pour chaque formette sont présentés en Figure 4-13. Les barres d'erreur indiquent l'écart type des trois modélisations réalisées à partir des échantillons analysés pour chaque formette.

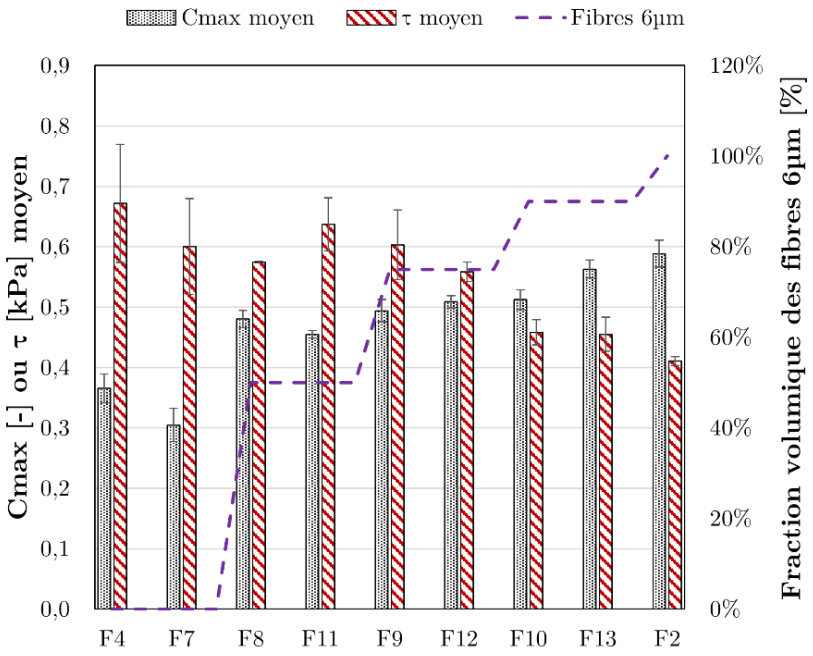


Figure 4-13 : Comparaison des taux de compressibilité moyen (C_{max}) et de la constante τ moyenne pour chaque formette d'Alkegen

La modélisation du comportement des médias sous contrainte (Eq. 4-4), réalisée par ajustement des paramètres C_{max} et τ aux données expérimentales, s'est révélée pertinente, avec un écart relatif moyen global (MRE) de seulement 2,3% entre la courbe modélisée et les mesures expérimentales.

La comparaison des paramètres moyens de compressibilité, C_{max} et τ, entre les différentes formettes met en évidence des comportements différents selon la composition de fibre du média. Les médias composés d'une proportion importante de fibres épaisses (6 µm) présentent une forte compressibilité, caractérisée à la fois par un taux de compression maximale élevée et une constante τ relativement faible. Ces structures sont donc facilement déformables sous la contrainte. A l'inverse, les médias constitués majoritairement de fibres fines (2,7 µm) se montrent moins compressibles, bien que leur C_{max} reste significatif, compris entre 30 et 40%.

c. Grammage et Compacité

A partir des mesures d'épaisseur, du grammage, et de la masse volumique des médias (déterminée par pycnométrie à l'hélium), la compacité des différents échantillons a été déterminée. La Figure 4-14 présente le grammage en fonction de la compacité des différents médias, calculée à partir d'une épaisseur mesurée sous une faible contrainte de 0,1 kPa. Cette figure inclut à la fois les formettes LRGP et les échantillons issus des formettes Alkegen. La Figure 4-15 montre les mêmes paramètres mais pour une épaisseur mesurée à une contrainte de 0,5 kPa.

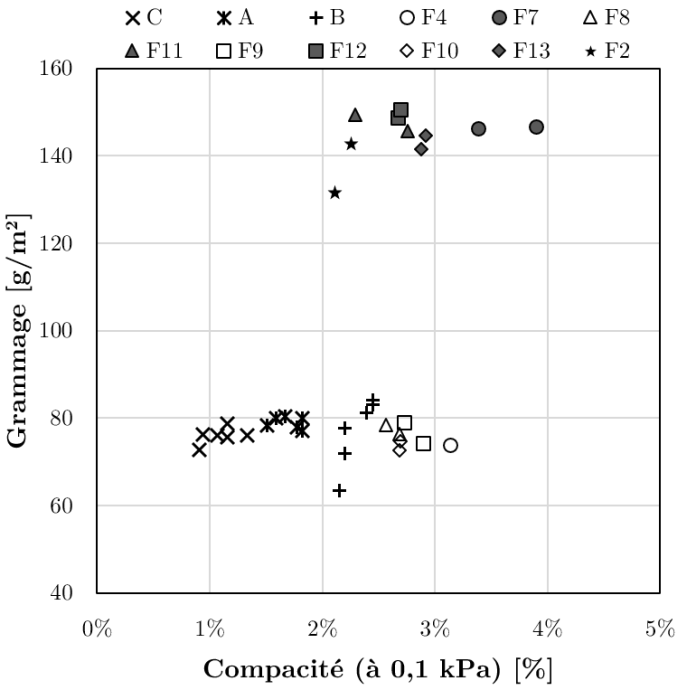


Figure 4-14 : Cartographie des médias de l'étude selon leur grammage et leur compacité (contrainte de 0,1 kPa)

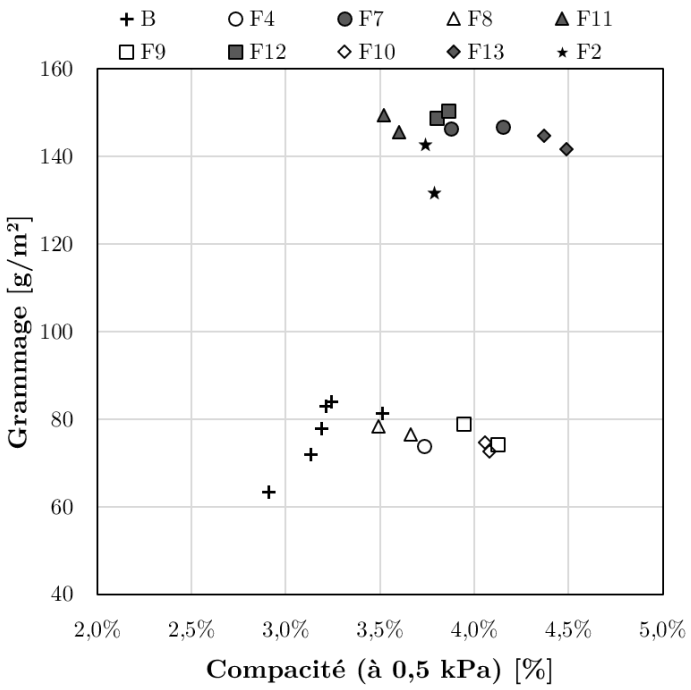


Figure 4-15 : Cartographie des médias de l'étude selon leur grammage et leur compacité (contrainte de 0,5 kPa)

Compte tenu des hétérogénéités observées dans les formettes Alkegen, que ce soit en termes d'épaisseur ou de grammage, les compacités déterminées varient significativement entre différents échantillons issus d'une même formette. De la même manière, une variabilité est également observée entre les différentes formettes LRGP, A, B et C, fabriquées au laboratoire (Figure 4-14 et Figure 4-15).

De plus, en comparant ces deux figures, on observe qu'en comprimant davantage le média, la compacité augmente. On peut donc s'interroger sur le niveau de contrainte à appliquer pour déterminer ce paramètre.

En conséquence, pour s'affranchir de la variabilité entre échantillons d'un même média, chaque répliquât sera considéré comme un média dans le cadre de la validation du modèle de perméabilité à partir des mesures expérimentales.

4.1.3 Mesure expérimentale de la perméabilité

La perméabilité expérimentale d'un média fibreux peut être déterminée à partir d'une mesure de la perte de charge pour une vitesse de perméation donnée. Pour rappel, en régime d'écoulement laminaire, la loi de Darcy permet de relier ces grandeurs :

$$\Delta P = \frac{Z}{\kappa} \mu U_f \qquad \textit{Eq. 4-6}$$

Avec μ la viscosité dynamique du fluide en kg/(m.s), U_f la vitesse d'écoulement superficielle en m/s, Z l'épaisseur du média poreux en m et κ la perméabilité du média en m^2

D'où la perméabilité :

$$\kappa = \frac{Z}{\Delta P}\mu U_f \qquad \textit{Eq. 4-7}$$

A partir d'une série de mesures expérimentales de la perte de charge pour différentes vitesses de perméation, la perméabilité du média peut être estimée à partir de la pente du graphique $\Delta P = f(U_f)$. La fiabilité des résultats repose sur la précision des mesures de la perte de charge, de la vitesse de perméation, mais aussi sur la connaissance précise de l'épaisseur du média fibreux. Cependant, cette mesure est rendue problématique en raison de la compressibilité du média, ce qui entraine une variation de l'épaisseur selon la contrainte qui lui est appliquée (voir la section 4.1.2b.).

Afin d'évaluer l'influence de cette compressibilité, des essais préliminaires de perméation ont été réalisés sur trois échantillons issus des formettes F9, F11 et F12, présentant respectivement des taux de compression maximale importants de 50,3%, 44,8% et 49,9%. L'évolution de leur perte de charge expérimentale pour des vitesses de perméation comprises entre 5 cm/s et 200 cm/s est présentée en Figure 4-16. Le régime d'écoulement laminaire a été vérifié pour l'ensemble des vitesses testées.

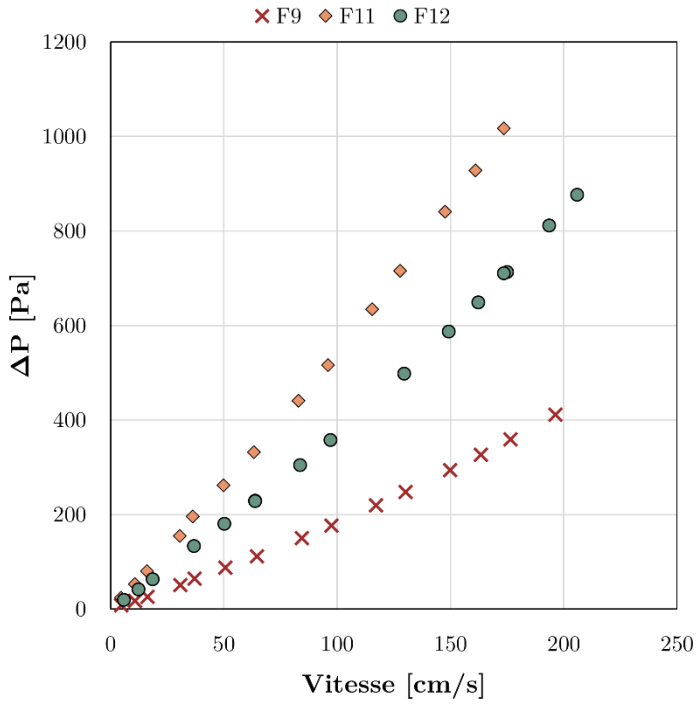


Figure 4-16 : Évolution de la perte de charge expérimentale en fonction de la vitesse d'écoulement pour trois médias (F9, F11 et F12)

A partir des résultats obtenus, la résistance à l'écoulement R a été calculée pour chaque point (ΔP, U_f). Son évolution en fonction de la perte de charge est illustrée en Figure 4-17.

La résistance à l'écoulement, notée R en m^{-1}, est définie par :

$$R = \frac{Z}{\kappa} = \frac{\Delta P}{\mu U_f} \qquad \textit{Eq. 4-8}$$

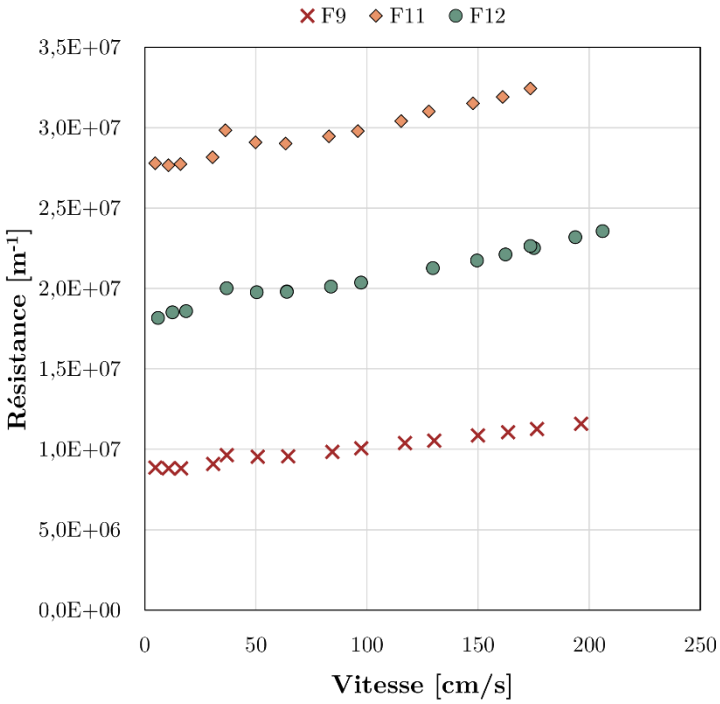


Figure 4-17 : Évolution de la résistance à l'écoulement en fonction de la vitesse d'écoulement pour trois médias (F9, F11 et F12)

Bien que l'évolution entre la perte de charge et la vitesse semble linéaire à première vue (Figure 4-16), la résistance à l'écoulement n'est, quant à elle, pas constante (Figure 4-17), avec un écart d'environ 30 % entre les résistances mesurées à la plus grande et à la plus fiable vitesse pour les médias F9 et F12, et de 16 % pour le média F11. Cela indique que la relation $\Delta P = f(U_f)$ n'est pas parfaitement linéaire sur l'ensemble de la plage de vitesses étudiée, une augmentation progressive de la résistance étant observée. Trois hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer ce comportement :

- une augmentation de l'épaisseur à perméabilité constante, ce qui serait physiquement inconcevable,
- une diminution de la perméabilité à épaisseur constante, sans modification structurale du média, ce qui apparaît également peu réaliste,
- ou plus vraisemblablement, une diminution simultanée de la perméabilité et de l'épaisseur, induite par la compression du média sous l'effet de la pression d'écoulement.

Cette non-linéarité de la relation $\Delta P = f(U_f)$ serait donc liée à la compressibilité du média fibreux.

Imaginons que la résistance du média reste constante, caractéristique d'un média incompressible, en prenant comme référence R_{min}, la valeur à la plus faible perte de charge. L'évolution de la perte de charge de ce média incompressible en fonction de la vitesse peut ainsi être calculée :

$$\Delta P^{incomp.} = R_{min} \mu U_f \qquad \textit{Eq. 4-9}$$

Pour les trois médias, la relation linéaire $\Delta P = f(U_f)$ a été tracée à partir respectivement de leur résistance de référence R_{min} en Figure 4-18, montrant l'évolution différente pour un média compressible et son équivalent incompressible.

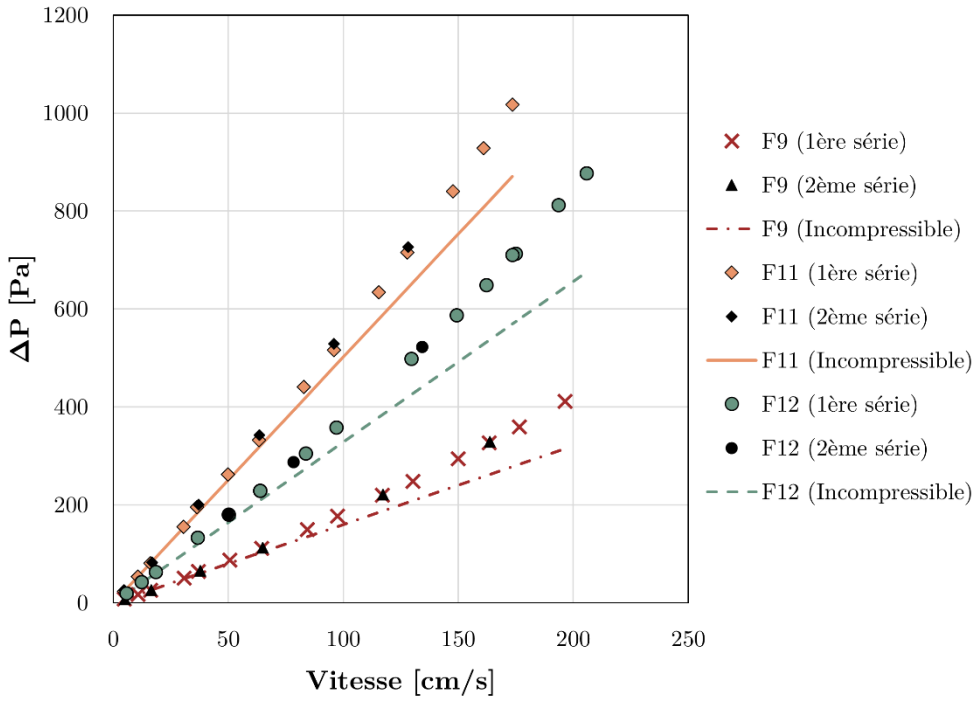


Figure 4-18 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge mesurée en fonction de la vitesse d'écoulement pour les médias compressibles étudiés (F9, F11 et F12) et leurs équivalents incompressibles - 1ère série : vitesses de perméation croissantes - 2ème série : vitesses de perméation décroissantes

À faible vitesse, les résultats expérimentaux coïncident avec ceux prédits pour un média équivalent incompressible. Le faible écart observé entre les deux courbes est dû à une faible variation de la résistance dans cette zone. Toutefois, l'analyse des courbes de compressibilité présentée en section (section 4.1.2b.) indique que l'épaisseur du média varie légèrement dès qu'une force lui est appliquée. Il semble donc que, dans cette zone linéaire, l'épaisseur et la perméabilité varient simultanément, mais se compenseraient mutuellement, maintenant ainsi une résistance globalement stable, ce qui est visible et cohérent avec la Figure 4-17 pour les médias F9 et F11.

À plus forte vitesse, l'écart entre les résultats expérimentaux et ceux du média équivalent incompressible s'accentue. Le média utilisé expérimentalement se comprime sous la force exercée par l'écoulement qui le traverse.

Par ailleurs, pour chaque essai de perméation, une première série de mesures a été réalisée en augmentant progressivement la vitesse d'écoulement jusqu'à environ 200 cm/s. Ensuite, quelques mesures supplémentaires ont été effectuées en diminuant progressivement la vitesse.

L'objectif de cette démarche est de vérifier si la compressibilité de la structure du média est réversible.

La superposition des points obtenus lors de cette seconde série de mesures (Figure 4-18) montre que, bien que le média soit comprimé pendant l'essai, ce phénomène est réversible dans la plage étudiée lors des essais de perméation. L'absence d'hystérésis met en évidence que la structure du média n'a pas été affectée.

Dans la pratique, la mesure de l'épaisseur est très souvent réalisée sous une contrainte très différente de celle que subit le média filtrant lors des essais de filtration ou de perméation. La difficulté repose donc sur le choix de l'épaisseur à considérer, ainsi que sur la méthodologie à appliquer pour déterminer la perméabilité expérimentale d'un média compressible.

Compte tenu de la compressibilité des médias au cours des essais de perméation, il ne semble pas pertinent d'estimer une valeur moyenne de perméabilité déterminée sur l'ensemble de la plage de vitesses testées (de 0 à 200 cm/s). En effet, s'il y a une modification de l'épaisseur du média, sa compacité est aussi affectée. Chaque point de mesure (ΔP, U_f) issu de la perméation, serait donc représentatif d'une structure différente. Une comparaison basée sur une structure donnée à un point de mesure (ΔP^i, U_f^i), c'est-à-dire à une épaisseur donnée, semble plus judicieuse.

En supposant que la contrainte appliquée lors de la mesure d'épaisseur (exprimée comme une force sur une surface) soit équivalente à la force par unité de surface exercée par l'écoulement dans le milieu poreux (c'est-à-dire la perte de charge), il serait donc possible d'estimer l'épaisseur correspondant à un point donné (ΔP^i, U_f^i) des essais de perméation.

Bien que la variation des mesures d'épaisseur sous une contrainte de 0,5 kPa soit plus faible qu'à celle de 0,1 kPa, expérimentalement il s'est avéré difficile d'atteindre pour certains médias une perte de charge de 0,5 kPa, à cause de la faible tenue mécanique des médias fabriqués. Ainsi, deux points de chaque courbe de perméation (ΔP^i, U_f^i), situés autour d'une perte de charge de 0,1 kPa, ont été utilisés. En supposant une évolution linéaire entre ΔP et U_m dans cet intervalle, la vitesse correspondant à une perte de charge de 0,1 kPa est calculée. La perméabilité expérimentale est ensuite déterminée à l'aide de la loi de Darcy, en considérant l'épaisseur mesurée sous une contrainte de 0,1 kPa pour le média étudié.

En appliquant cette méthodologie, la Figure 4-19 présente les différentes valeurs de perméabilité expérimentales obtenues. Les médias issus de la formette F1 n'ont finalement pas pu être utilisés : à cause de leur faible résistance mécanique, il était impossible d'atteindre une valeur de perte de charge de 0,1 kPa. La plage globale de perméabilités étudiées se situe ainsi entre $2{,}30 \times 10^{-11}$ m^2 et $2{,}58 \times 10^{-10}$.

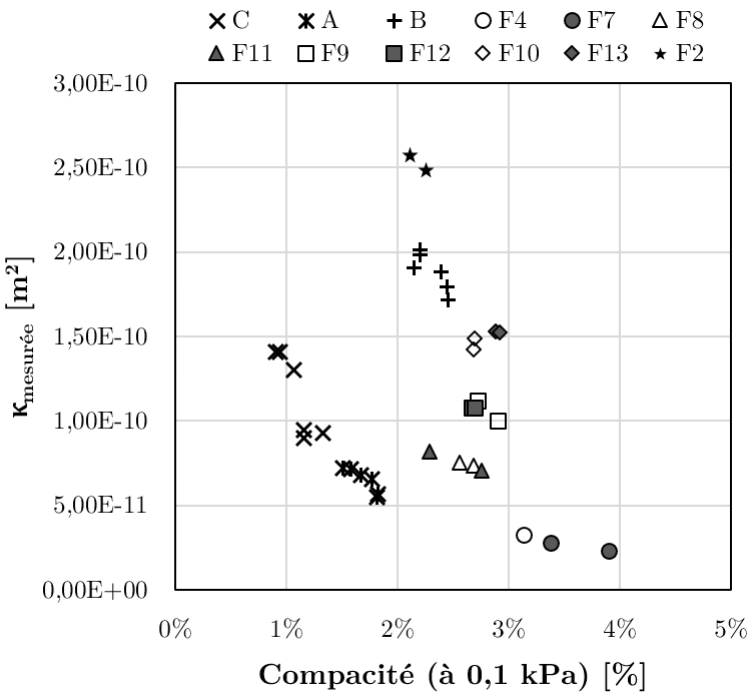


Figure 4-19 : Perméabilité expérimentale des différentes formettes LRGP et Alkegen

4.2 Comparaison des données expérimentales au modèle

L'objectif de cette section est d'appliquer le modèle général de perméabilité, couvrant à la fois les régimes d'écoulement continu et non continu, aux échantillons issus des formettes LRGP et Alkegen caractérisés précédemment, afin de comparer les valeurs théoriques obtenues aux perméabilités mesurées expérimentalement.

Une analyse préliminaire a d'abord été réalisée pour évaluer la sensibilité des modèles à la distribution des diamètres de fibres (FSD). Enfin, le développement méthodologique permettant le calcul des incertitudes, tant expérimentales que théoriques (associées au modèle), est également présenté.

4.2.1 Analyse des incertitudes

a. Analyse de sensibilité des modèles (FSD)

La détermination des distributions de diamètres de fibres (FSD) à partir d'images MEB reste une étape délicate, notamment en raison des incertitudes liées à la mesure et au traitement d'images. L'objectif de cette section est d'évaluer la sensibilité du modèle de perméabilité, développé pour des fibres microniques et/ou submicroniques, à la précision de cette distribution.

Pour estimer l'effet de la potentielle omission d'un diamètre de fibre dans la FSD sur la perméabilité, l'ajout d'une fibre de diamètre d_i à la distribution initiale est étudié. A partir des distributions de fibres mesurées au MEB pour les formettes LRGP et Alkegen, les fibres de diamètres extrêmes, la plus petite (d_{min}) et la plus grande (d_{max}), sont d'abord identifiées pour chaque FSD. Une nouvelle fibre de diamètre d_i, comprise entre $0{,}9 \times d_{min}$ et $1{,}1 \times d_{max}$, est ensuite ajoutée à la distribution, puis la perméabilité est recalculée grâce au modèle prédictif général (Eq. 3-16 et Eq. 3-17). Cette fibre ajoutée est volontairement définie dans une plage de diamètre légèrement plus large que celle mesurée initialement, de manière à simuler l'absence potentielle d'une fibre non mesurée, située à proximité des bornes de la distribution. La perméabilité modélisée à partir de la distribution initiale de fibres est notée κ_0, tandis que celle obtenue après l'ajout d'une fibre de diamètre d_i est notée κ_{add}.

Par ailleurs, l'effet de la suppression d'une fibre dans la distribution initiale est également étudié, afin d'évaluer la sensibilité des modèles à une mesure dupliquée de la même fibre. A partir d'une FSD composée de n fibres, une fibre est retirée, générant une nouvelle distribution de n-1 fibres. La perméabilité associée à cette distribution modifiée, notée κ_{remove}, est alors calculée, puis comparée à la perméabilité initiale κ_0.

Le ratio κ_{add}/κ_0 ou κ_{remove}/κ_0 permet ainsi de quantifier l'influence de l'ajout ou de la suppression d'une fibre de diamètre d_i dans la FSD sur la perméabilité modélisée (Figure 4-20). Trois échantillons issus de trois formettes différentes sont utilisés à titre d'exemple : F4-1, F8-1 et F9-2.

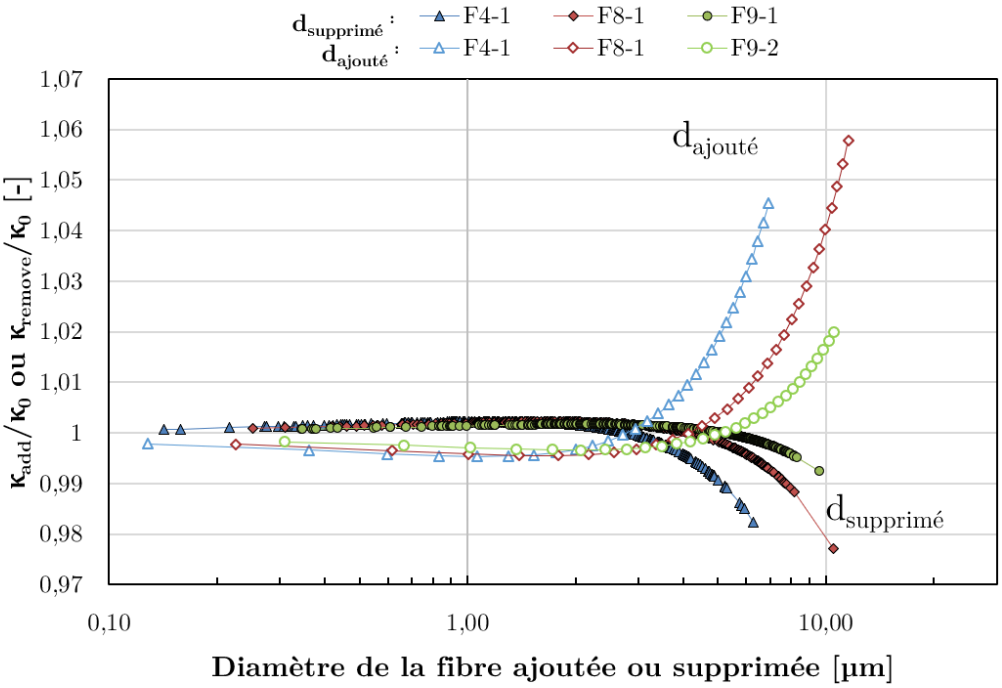


Figure 4-20 : Influence de l'ajout ou la suppression d'une fibre de diamètre donné dans la FSD sur la valeur de perméabilité calculée avec le modèle global

L'ajout d'une fibre dont le diamètre se situe proche de la borne supérieure de la distribution, induit une augmentation significative de la perméabilité. Bien que cette tendance

soit similaire pour les trois médias étudiés, l'amplitude de cette augmentation dépend de la distribution initiale étudiée. Pour une fibre ajoutée d'un diamètre inférieur à 3 µm, le rapport entre la perméabilité modifiée et la perméabilité initiale reste constant, avec une variation induite sur la perméabilité calculée plus faible que celles générées par l'ajout d'une fibre de diamètre supérieur à 3 µm.

En revanche, la suppression d'une fibre issue de la distribution initiale entraine un ratio de perméabilité au maximum de 0,98 pour F8-1, contre 1,06 lors de l'ajout d'une fibre. Les résultats montrent ainsi que l'influence de la suppression d'une fibre est, de manière générale, plus faible que celle liée à l'ajout d'une fibre supplémentaire.

En conclusion, le modèle de perméabilité apparait plus sensible à un sous-échantillonnage de la distribution, c'est-à-dire l'omission de mesures de certaines fibres, en particulier de grand diamètre, qu'à la duplication d'une mesure sur une même fibre. Cette sensibilité marquée pour les fibres épaisses souligne l'importance que ces fibres soient bien prises en compte lors des clichés MEB pour déterminer la distribution. A l'inverse, l'impact d'un sous-échantillonnage sur les fibres de plus petit diamètre reste limité, inférieur à 1 %.

Il convient également de souligner que ces résultats sont obtenus dans le cas de l'ajout ou de la suppression d'une seule fibre dans la FSD. L'impact de ces biais expérimentaux sera donc amplifié si plusieurs fibres étaient concernées.

Il est à noter que cette sensibilité obtenue concernant l'échantillonnage de la distribution, ne dépend pas seulement de notre nouvelle expression de perméabilité, mais est aussi présente avec les modèles classiques de la littérature, où on retrouve cette même tendance qu'en Figure 4-20.

Ces résultats illustrent l'importance de la détermination de la distribution de taille de fibres, malgré la difficulté de cette mesure. En effet, l'omission d'une ou plusieurs fibres, en particulier dans la plage des plus grands diamètres de la FSD, peut engendrer un impact significatif sur la perméabilité modélisée.

b. Incertitude de la perméabilité expérimentale

La perméabilité expérimentale κ_{exp} est déterminée à partir de la loi de Darcy, selon l'expression suivante :

$$\kappa_{exp} = \frac{\mu \, U_f \, Z}{\Delta P} \qquad \textit{Eq. 4-10}$$

Avec μ la viscosité dynamique du fluide en Pa.s, U_f la vitesse d'écoulement superficielle en m/s, Z l'épaisseur du média poreux en m et ΔP la perte de charge en Pa.

Comme la vitesse du fluide peut également s'exprimer à partir du débit d'air Q_v (en m^3/s) et de la surface du média filtrant Ω (en m^2), alors l'expression de la perméabilité devient :

$$\kappa_{exp} = \frac{\mu\, Q_v\, Z}{\Delta P\, \Omega} \qquad \textit{Eq. 4-11}$$

Ainsi, l'incertitude de la perméabilité expérimentale peut être évaluée par propagation des incertitudes selon la méthode des dérivées partielles, en suivant les directives du GUM (guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [118] :

$$\Delta\kappa_{exp} = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial\kappa_{exp}}{\partial Z}\right|\Delta Z\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa_{exp}}{\partial\Delta P}\right|\Delta(\Delta P)\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa_{exp}}{\partial Q_v}\right|\Delta Q_v\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa_{exp}}{\partial\Omega}\right|\Delta\Omega\right)^2} \qquad \textit{Eq. 4-12}$$

Les dérivées partielles sont les suivantes :

$$\frac{\partial\kappa_{exp}}{\partial Z} = \frac{\mu Q_v Z}{\Delta P\Omega} = \frac{\kappa}{Z} \qquad \textit{Eq. 4-13}$$

$$\frac{\partial\kappa_{exp}}{\partial\Delta P} = -\frac{\mu Q_v Z}{\Delta P^2\Omega} = -\frac{\kappa}{\Delta P} \qquad \textit{Eq. 4-14}$$

$$\frac{\partial\kappa_{exp}}{\partial Q_v} = \frac{\mu Q_v Z}{\Delta P\Omega} = \frac{\kappa}{Q_v} \qquad \textit{Eq. 4-15}$$

$$\frac{\partial\kappa_{exp}}{\partial\Omega} = \frac{\mu Q_v Z}{\Delta P\Omega^2} = -\frac{\kappa}{\Omega} \qquad \textit{Eq. 4-16}$$

L'incertitude relative sur la perméabilité expérimentale est alors donnée par l'expression :

$$\frac{\Delta\kappa_{exp}}{|\kappa|} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Z}{|Z|}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta P)}{|\Delta P|}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q_v}{|Q_v|}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\Omega}{|\Omega|}\right)^2} \qquad \textit{Eq. 4-17}$$

L'incertitude sur l'épaisseur Z dépend de deux incertitudes : d'une incertitude systématique, notée ΔZ_{app}, liée à la précision de l'appareil de mesure et d'une incertitude statistique, notée ΔZ_{mesure}, liée à la dispersion des cinq valeurs mesurées par médias.

L'incertitude statistique sur la moyenne des mesures est déterminée à partir de l'écart type σ_Z des n mesures d'épaisseur Z_i, et s'exprime par :

$$\Delta Z_{mesure} = \frac{\sigma_Z}{\sqrt{n}} \qquad \textit{Eq. 4-18}$$

Avec σ_z où $\bar{Z}$ est l'épaisseur moyenne :

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(Z_i - \bar{Z})^2} \qquad \textit{Eq. 4-19}$$

L'incertitude systématique ΔZ_{app}, qui n'a pas été fournie par le constructeur, est estimée à partir de la résolution de l'appareil :

$$\Delta Z_{app} = \frac{\text{résolution}}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}001 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 5{,}77 \times 10^{-7}\text{m} \qquad \textit{Eq. 4-20}$$

L'incertitude-type composée sur l'épaisseur se définit alors comme :

$$\Delta Z = \sqrt{\Delta Z_{\text{mesure}}^2 + \Delta Z_{\text{app}}^2} \qquad \textit{Eq. 4-21}$$

Dans le cas des formettes LRGP, pour lesquels une seule mesure d'épaisseur a été effectuée, l'incertitude relative sur Z est estimée à 2 %, de manière cohérente avec les incertitudes obtenues pour les mesures des formettes d'Alkegen.

L'incertitude relative indiquée par le fabricant du débitmètre *TSI 4100 Series* est de 2 %, celle du capteur de perte de charge est de 1 % et l'incertitude sur la surface du média filtrant est estimée à ±0,5 cm², soit 1,3 % en incertitude relative.

Sur ces bases, l'incertitude relative sur la perméabilité mesurée expérimentalement est d'environ 3,3 % pour les formettes LRGP, et varie selon les échantillons entre 2,9 % et 8 % pour les formettes Alkegen.

c. Incertitude des modèles de perméabilité

Le modèle général de perméabilité (κ_{mod}), couvrant à la fois les régimes d'écoulement continu et non continu, a été appliqué pour calculer la perméabilité des formettes (Eq. 4-22). Cette approche permet d'estimer la perméabilité à partir de données expérimentales mesurées. Il est donc nécessaire d'évaluer également l'incertitude associée au modèle.

$$\kappa_{mod} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{f_{Vi}}{\left[\left[H_a^{mod} + 1{,}33(1-\alpha)^{1,5}\frac{2\lambda}{d_i}\right]\frac{d_i^2}{16\alpha}\right]^{\frac{3}{4}}}} \right)^{\frac{4}{3}} \qquad \textit{Eq. 4-22}$$

Dans cette expression, le facteur hydrodynamique d'Happel modifié H_a^{mod} dépend de la compacité du média, elle-même déterminée à partir de l'épaisseur et du grammage mesurés expérimentalement. Le libre parcours moyen (λ) est quant à lui, calculé à l'aide de la relation empirique de Willeke (Eq. 1-15 de la section 1.2.2 du chapitre 1), en fonction de la pression absolue et de la température.

Ainsi, le modèle général de perméabilité dépend des variables suivantes : l'ensemble des diamètres de fibres mesurés par imagerie MEB, la température T, la pression P, le grammage

G et l'épaisseur du média Z. L'incertitude associée à ce modèle, notée $\Delta\kappa_{mod}$, s'exprime selon l'équation suivante :

$$\Delta\kappa_{mod} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial d_i}\right|\Delta d_i\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial T}\right|\Delta T\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial P}\right|\Delta(P)\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial G}\right|\Delta G\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial Z}\right|\Delta Z\right)^2} \qquad \textit{Eq. 4-23}$$

En tenant compte du grammage des médias expérimentaux, calculé à partir de la masse de l'échantillon (m) et de sa surface (Ω), l'incertitude liée au modèle général devient :

$$\Delta\kappa_{mod} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial d_i}\right|\Delta d_i\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial T}\right|\Delta T\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial m}\right|\Delta m\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial\Omega}\right|\Delta\Omega\right)^2 + \cdots \qquad \textit{Eq. 4-24}$$

$$\cdots + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial P}\right|\Delta(P)\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial Z}\right|\Delta Z\right)^2}$$

De par la complexité des dérivées partielles, celles-ci ont été estimées numériquement. La méthode des différences finies centrales a été utilisée, car elle permet d'approximer avec précision les dérivées partielles d'une fonction afin d'en trouver une solution approchée.

En notant κ la fonction de perméabilité (associée au modèle), la dérivée partielle de cette fonction par rapport à l'une de ses variables x_i, notée $\frac{\partial\kappa}{\partial x_i}$, peut être approximée de la manière suivante :

$$\frac{\partial\kappa}{\partial x_i} \approx \frac{\kappa(x_i + h) - \kappa(x_i - h)}{2h} \qquad \textit{Eq. 4-25}$$

Le pas h, représentant la perturbation appliquée au paramètre étudié x_i, a été défini de manière à s'adapter à l'échelle de ce paramètre, en fixant une constante ε à 10^{-6}. Un minimum de $h = 10^{-10}$ a été fixé afin d'éviter des valeurs de pas trop faibles, susceptibles d'entrainer des erreurs d'arrondis numériques.

$$h = \varepsilon \times |x_i| \qquad \textit{Eq. 4-26}$$

L'incertitude-type ΔZ de l'épaisseur est calculée selon la même méthode que celle utilisée pour la perméabilité expérimentale, en tenant compte à la fois de l'incertitude statistique liée à la dispersion des mesures et de l'incertitude systématique de l'appareil de mesure.

Les incertitudes-types des capteurs de pression absolue de température sont fixées respectivement à 1 mbar et 0,1 K.

Concernant les paramètres liés au grammage, l'incertitude-type est estimée à 0,5 cm^2 pour la mesure de la surface du média et à 1 mg pour la mesure de sa masse.

L'incertitude liée aux diamètres des fibres est plus complexe à définir que pour les autres grandeurs mesurées. Elle est principalement due à la résolution des images MEB, ainsi qu'à la subjectivité dans le tracé des contours des fibres, pouvant varier d'un opérateur à l'autre. Une évaluation rigoureuse aurait nécessité des mesures répétées par plusieurs opérateurs afin de

quantifier cette variabilité, mais cette démarche n'a pas pu être réalisée en raison du temps important qu'elle aurait requise. Par conséquent, une incertitude relative de 10 % a été retenue pour chaque diamètre di. L'incertitude globale liée aux diamètres est ensuite obtenue en combinant les contributions de chaque valeur de la distribution de diamètres (FSD), conformément à l'équation précédente (Eq. 4-24).

À cette incertitude de mesure s'ajoutent d'autres sources d'erreurs pouvant également affecter la représentativité de la FSD, et donc la fiabilité de la perméabilité modélisée : notamment l'omission de certaines fibres dans l'échantillonnage, ou à l'inverse, la mesure multiple d'une même fibre. L'analyse de sensibilité des modèles présentée précédemment a en effet mis en évidence que l'omission d'une fibre de diamètre donné, notamment dans la plage des diamètres les plus élevés, pouvait avoir un impact significatif sur la perméabilité calculée.

En pratique, l'échantillonnage peut en effet être incomplet. Il est possible que certaines fibres, mal définies ou peu visibles sur l'image, ne soit pas mesurées lors du traitement d'image. De plus, si les clichés MEB ne couvrent pas une zone suffisamment vaste pour être représentative de l'ensemble du média, certaines fibres peuvent être absentes de la FSD. Cette source d'erreur, liée à l'absence de fibres dans l'échantillonnage, est notée $\Delta\kappa_{miss}$.

Par ailleurs, il existe également un risque de mesures redondantes, notamment lorsque les images sont prises dans des zones adjacentes. Une même fibre peut alors être mesurée plusieurs fois, entrainant une sur-représentation de certaines tailles de fibres dans la FSD. Cette source d'erreur est notée $\Delta\kappa_{dup}$.

Ainsi, ces deux sources d'incertitude, liées à l'échantillonnage ont été prises en compte dans le calcul de l'incertitude globale associée au modèle de perméabilité.

$$\Delta\kappa_{mod} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial d_i}\right|\Delta d_i\right)^2 + (\Delta\kappa_{miss})^2 + \left(\Delta\kappa_{dupp}\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial T}\right|\Delta T\right)^2 + \cdots} \qquad \textit{Eq. 4-27}$$

$$\overline{\cdots + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial m}\right|\Delta m\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial\Omega}\right|\Delta\Omega\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial P}\right|\Delta(P)\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial\kappa}{\partial Z}\right|\Delta Z\right)^2}$$

Pour modéliser cette incertitude d'échantillonnage, une méthodologie s'inspirant de la méthode Bootstrap a été utilisée. La méthode Bootstrap non-paramétrique est une technique statistique utilisée pour estimer l'incertitude (ou la variabilité) d'une statistique (moyenne, médiane ou un paramètre d'un modèle) à partir d'un échantillon de données [119,120]. Le principe repose sur la simulation de nouveaux échantillons à partir des données existantes en effectuant un rééchantillonnage avec remise.

En s'inspirant de cette méthode, et en l'associant à un facteur de probabilité d'oubli ou de redondance, une étude de robustesse où l'on modélise des biais dans l'échantillonnage peut être effectuée. L'objectif serait d'avoir une première estimation de l'incertitude d'oubli ou de redondance des diamètres de fibres mesurés.

Pour déterminer l'incertitude $\Delta\kappa_{miss}$, on suppose qu'environ 10 % des fibres pourraient ne pas être détectées et donc non-mesurées. Pour chaque média, 1000 sous-échantillons sont créés en sélectionnant aléatoirement 90 % des diamètres mesurés de la FSD initiale, et la perméabilité de chaque sous-échantillon est calculée. L'incertitude ($\Delta\kappa_{miss}$) est ainsi estimée comme l'écart type des valeurs de perméabilité de tous les sous-échantillons.

De la même manière pour l'incertitude $\Delta\kappa_{dup}$, on suppose que 5 % des mesures pourraient provenir de la même fibre et donc être des duplicatas. Pour chaque média, on génère 1000 sous-échantillons en ajoutant 5% de diamètres supplémentaires dans la FSD initiale, choisis aléatoirement parmi l'ensemble des diamètres mesurés. La perméabilité de chaque sous-échantillon est calculée et l'incertitude ($\Delta\kappa_{dup}$) est déterminée comme l'écart type de toutes ces valeurs de perméabilité.

Il convient de souligner que les probabilités associées à l'ajout ou à la suppression de fibres dans la FSD, 10 % pour $\Delta\kappa_{miss}$ et 5 % pour $\Delta\kappa_{dup}$, ont été choisies de manière arbitraire, puisqu'une validation expérimentale est difficilement réalisable. Ces valeurs ont néanmoins été définies de façon réaliste, en tenant compte des biais potentiels lors de la mesure. Il a été supposé que le risque d'omission de certaines fibres, notamment aux extrémités de la distribution, est plus élevé que celui lié à une duplication accidentelle. Les images MEB ont en effet été prises dans des zones distinctes afin de limiter la probabilité de mesurer plusieurs fois une même fibre. Toutefois, l'incertitude liée à l'échantillonnage reste probablement sous-estimée, dans la mesure où elle ne prend pas en compte la possibilité d'omettre des fibres situées en dehors de la plage de diamètres observée.

En appliquant l'approche décrite précédemment, les incertitudes relatives globales ($\Delta\kappa_{mod}/\kappa_{mod}$) associées à la perméabilité modélisée ont été évaluées pour l'ensemble des médias étudiés (Figure 4-21). Ces incertitudes ont été décomposées selon les contributions des paramètres d'entrée des modèles : l'épaisseur du média, le grammage regroupant l'incertitude de la masse et de la surface du média, la mesure du diamètre des fibres, ainsi que la duplication ou l'absence de mesure de fibres. Les effets de la température et de la pression n'ont pas été représentés, leurs contributions sur la perméabilité étant négligeables (de l'ordre de 10^{-9} % et 10^{-14} % respectivement).

La majorité des incertitudes relatives globales ($\Delta\kappa/\kappa$) se situe autour de 4 %, à l'exception des médias A et C, qui présentent des valeurs plus élevées, atteignant respectivement environ 8 % et 7 %.

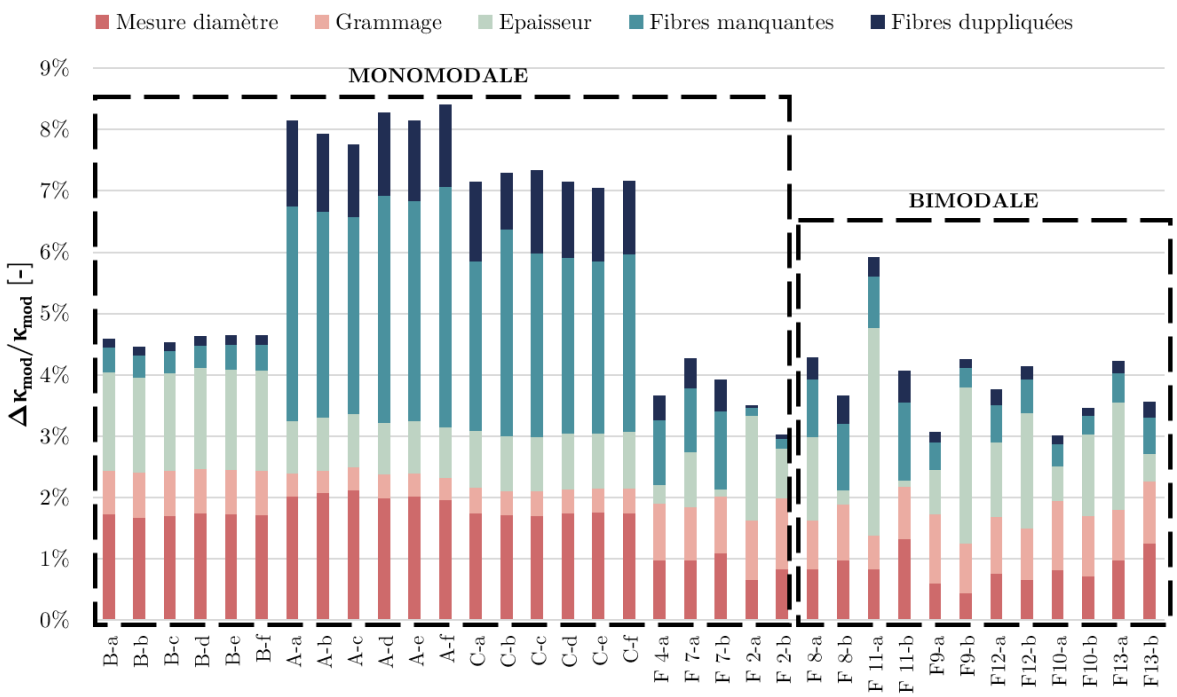


Figure 4-21: Incertitudes relatives globales de la perméabilité modélisée en régime d'écoulement non continu pour les différents médias expérimentaux étudiés

Parmi les différentes sources d'incertitudes liées aux paramètres d'entrée, le grammage et la duplication de fibres ont un impact relativement faible sur l'incertitude relative globale. En revanche, la mesure de l'épaisseur constitue une source notable d'incertitude, notamment en raison de la forte sensibilité des mesures sous une faible contrainte de 0,1 kPa.

La principale source d'incertitude réside toutefois dans la distribution des fibres, et plus spécifiquement l'omission de mesure de fibres. L'incertitude liée aux fibres manquantes contribue de manière plus significative que celle liée aux mesures dupliquées, ce qui est cohérent avec les résultats de l'analyse de sensibilité : l'ajout d'une fibre, en particulier si elle se situe dans la partie supérieure de la distribution, influence plus fortement la valeur de la perméabilité modélisée que la suppression d'une fibre.

En conclusion, l'incertitude relative globale, tenant compte des contributions des différents paramètres d'entrée, se situe entre 4 % et 8 % selon les échantillons. Il convient également de noter que cette estimation ne tient pas compte de l'incertitude propre au modèle analytique en lui-même, développé à partir des simulations avec une précision à +/- 10 %.

4.2.2 Médias de distribution monomodales

Le nouveau modèle global, couvrant à la fois les régimes d'écoulement continu et non continu, a été appliqué dans un premier temps aux échantillons issus des formettes LRGP et Alkegen ayant une distribution de fibres monomodale.

Parmi les échantillons étudiés, seuls les médias B et F2 sont exclusivement composés de fibres microniques, entrainant un régime d'écoulement continu. En revanche, les autres présentent une fraction non négligeable de fibres submicroniques, pour lesquelles l'écoulement doit être considéré comme non continu. L'ensemble de ces médias permet ainsi de tester la validité du modèle général sur des données expérimentales couvrant les deux régimes d'écoulement.

Les résultats obtenus avec ce modèle sont synthétisés dans la Figure 4-22, qui représente le rapport entre la perméabilité mesurée expérimentalement et celle modélisée.

L'incertitude associée à ce rapport est estimée selon l'expression suivante :

$$\Delta\left(\frac{\kappa_{exp}}{\kappa_{mod}}\right) = \sqrt{\left(\frac{\Delta\kappa_{mod}}{\kappa_{mod}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\kappa_{exp}}{\kappa_{exp}}\right)^2} \times \frac{\kappa_{exp}}{\kappa_{mod}} \qquad \textit{Eq. 4-28}$$

Pour l'ensemble des formettes LRGP, A, B et C, le modèle permet de prédire la perméabilité avec des écarts entre les valeurs modélisées et expérimentales se situant autour de ± 10 %. En revanche, les échantillons issus des formettes Alkegen présentent des écarts nettement plus importants, avec un rapport entre perméabilité expérimentale et modélisée compris entre 1,2 et 1,3.

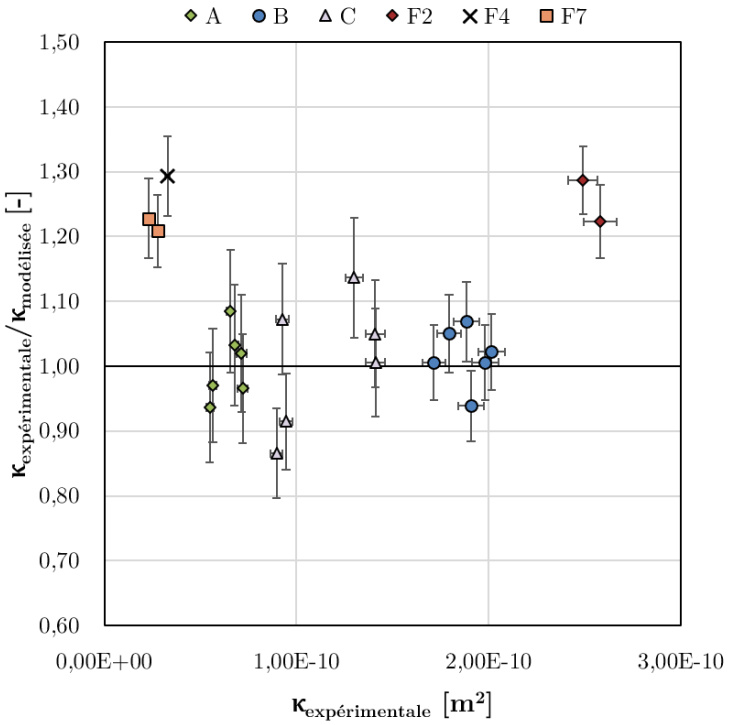


Figure 4-22: Comparaison des perméabilités expérimentales et modélisées des échantillons des formettes LRGP et Alkegen (distribution monomodale)

Plusieurs biais expérimentaux peuvent expliqués les écarts entre le modèle et les perméabilités mesurées des formettes Alkegen et LRGP.

En premier lieu, on peut s'interroger sur la représentativité de la FSD mesurée des différents médias. L'étude de sensibilité effectuée dans la section précédente a notamment mis en évidence la forte sensibilité des modèles à la qualité de l'échantillonnage.

De plus, la détermination de l'épaisseur des médias est aussi une mesure délicate, pouvant entrainer des écarts sur la détermination de la perméabilité expérimentale, mais aussi sur celle calculée à partir des modèles théoriques. Pour évaluer la sensibilité de la perméabilité théorique à ce paramètre, une étude paramétrique a été effectuée sur un média hypothétique.

Le média considéré est monomodal, constitué de fibres de diamètres 0,1 µm, de masse volumique 2600 kg/m^3 (valeur moyenne pour du verre) et d'un grammage fixé à 80 g/m^2. Une épaisseur initiale Z_0 de 1 mm a été choisie comme valeur de référence.

À partir de ces paramètres, la perméabilité initiale a été déterminées à l'aide du modèle théorique générale, notée κ_0. Ensuite, en modifiant uniquement la valeur de l'épaisseur Z, la perméabilité κ peut être recalculée afin d'étudier l'influence de cette variation.

La Figure 4-23 illustre l'évolution du rapport κ/κ_0 et de la compacité du média en fonction de la variation de l'épaisseur Z/Z_0. Ce graphique met en évidence l'influence de l'épaisseur, et donc de la compacité, sur la valeur de la perméabilité modélisée. Une variation de seulement 3 % de l'épaisseur entraine une variation de 4,3 % de la perméabilité, soulignant la forte sensibilité de cette dernière à ce paramètre. Ces résultats montrent qu'une faible incertitude sur l'épaisseur peut induire un écart non négligeable sur la perméabilité estimée.

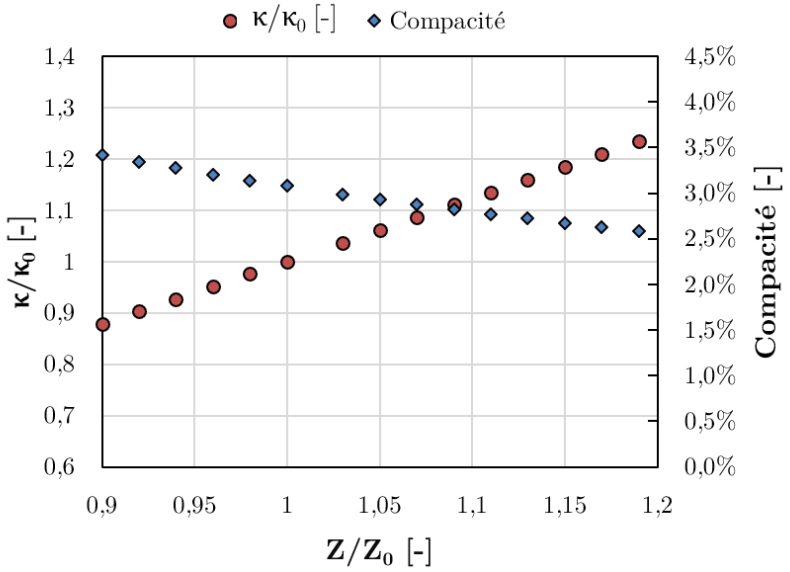


Figure 4-23 : Évolution de la perméabilité modélisée et de la compacité du média en modifiant l'épaisseur d'un média hypothétique

En conclusion, compte tenu de la forte compressibilité des médias fibreux, complexifiant la mesure précise de l'épaisseur, l'impact potentiel de ce biais sur la valeur de la perméabilité modélisée peut s'avérer significatif.

Par ailleurs, une étude supplémentaire a été menée sur la compressibilité des échantillons F4 et F7, ainsi que sur le protocole de mesure pour la détermination de leur courbe de compressibilité (voir section 4.1.2b. de ce chapitre). Pour rappel, cette méthode consiste à mesurer l'épaisseur des médias en appliquant successivement différentes contraintes, en allant de la plus faible (0,1 kPa) à la plus élevée (1,8 kPa).

Lors de cette nouvelle série d'essais, deux séries de mesures, nommées 1ère séries et 2ème série, ont été réalisées consécutivement sur les mêmes échantillons. Les résultats obtenus en Figure 4-24 et Figure 4-25, révèlent un écart entre les mesures des deux séries, en particulier aux faibles contraintes, indiquant que le média comprimé au cours de la première série n'a pas retrouvé son épaisseur initiale après la contrainte maximale, ou que la mesure à faible contrainte n'est pas fiable.

Pour évaluer la stabilité de cette déformation dans le temps, une troisième série de mesures a été réalisée 24 heures plus tard. Les résultats en Figure 4-24 et Figure 4-25 mettent en évidence un comportement différent entre les deux formettes. Pour la formette F4, les mesures à 24 heures sont quasi identiques à celles de la deuxième série, suggérant une stabilisation de l'épaisseur après la première compression. Bien que la tendance soit similaire pour l'échantillon de la formette F2, la mesure à 24 heures à faible contrainte (0,1 kPa) se trouve entre la valeur initiale de la première série et celle de la deuxième, indiquant que l'épaisseur ne s'est pas stabilisée.

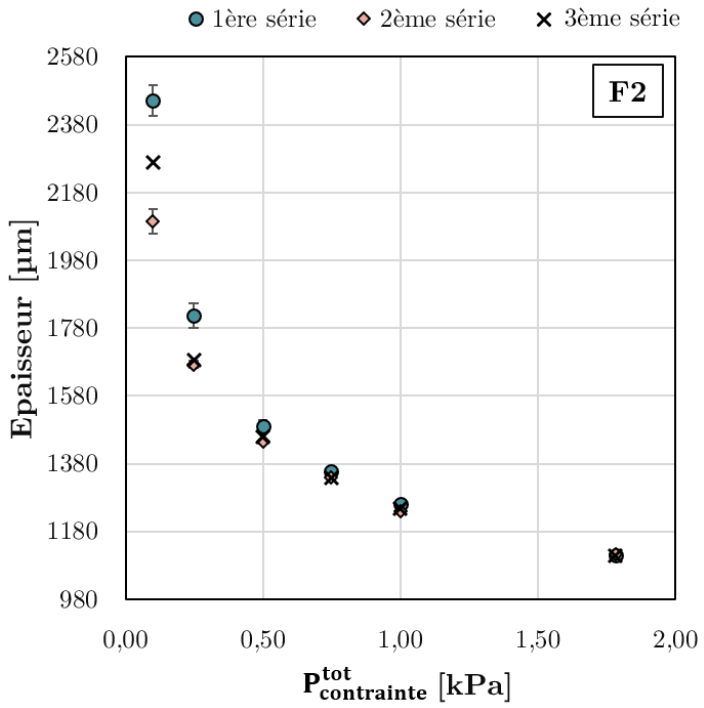


Figure 4-24 : Évolution de l'épaisseur d'un échantillon de la formette F2 en fonction de la contrainte appliquée, lors de trois séries de mesures successives : une 1ère et une 2ème consécutive, puis après 24h

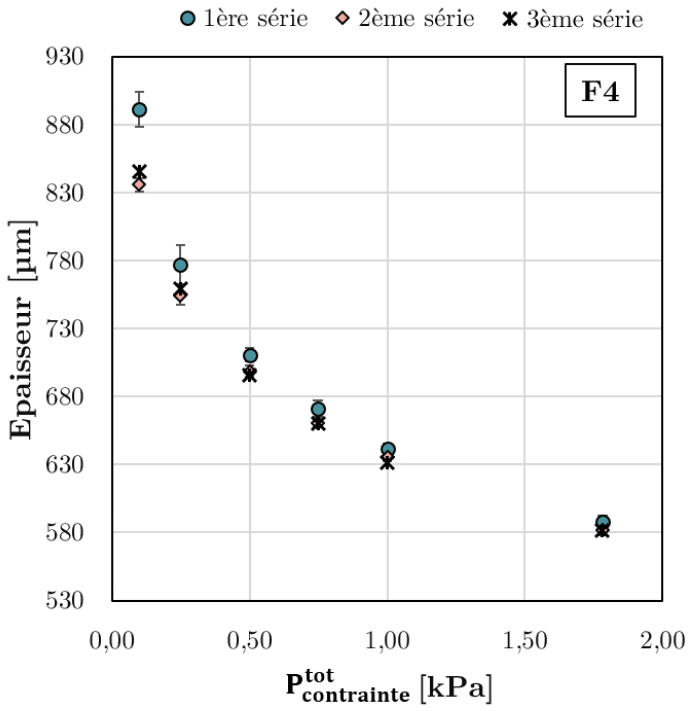


Figure 4-25 : Évolution de l'épaisseur d'un échantillon de la formette F4 en fonction de la contrainte appliquée, lors de trois séries de mesures successives : une 1ère et une 2ème consécutive, puis après 24h

Ces observations montrent que la méthodologie qui a été appliquée pour déterminer la courbe de compressibilité des médias, a pu induire une modification de l'épaisseur des médias. Il en vient donc à s'interroger sur l'épaisseur réelle du média au cours des essais de perméation.

Cette variation de l'épaisseur des médias pourrait expliquer les écarts plus importants entre modèle et expérience pour les échantillons des formettes Alkegen (F2, F4 et F7). En effet, il est à noter que les formettes LRGP (A, B et C), où l'écart entre la perméabilité modélisée et celle expérimentale est beaucoup plus faible, n'ont pas été soumis à la méthodologie pour déterminer la courbe de compressibilité : seule une mesure à une contrainte de 0,1 kPa et de 0,5 kPa a été effectuée. L'incertitude sur l'épaisseur des échantillons issus des formettes Alkegen pourrait donc être fortement sous-estimée.

4.2.3 Médias de distributions bimodales

Le modèle a ensuite été comparé aux échantillons de distributions bimodales, issus des formettes Alkegen. La Figure 4-26 présente le rapport entre la perméabilité mesurée expérimentalement et celle modélisée.

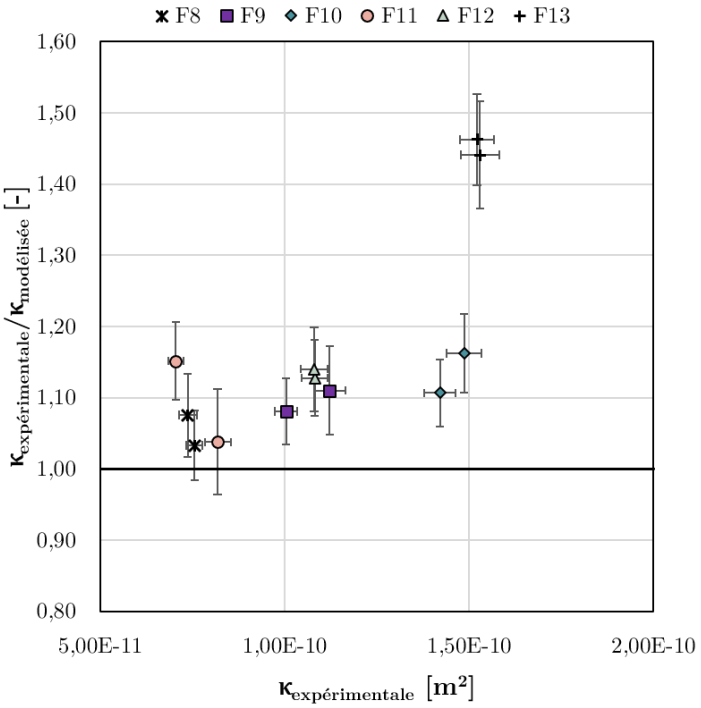


Figure 4-26: Comparaison des perméabilités expérimentales et modélisées des formettes Alkegen (distribution bimodale)

Pour la majorité des échantillons, les rapports entre la perméabilité expérimentale et la perméabilité modélisée sont compris entre 1 et 1,2. Toutefois, deux échantillons issus de la formette F13 présentent des écarts plus marqués, avec des rapports atteignant 1,4 à 1,5, indiquant une sous-estimation significative de la perméabilité modélisée par rapport aux mesures expérimentales.

L'incertitude liée à la détermination de l'épaisseur des médias peut en partie expliquer les écarts observés entre les perméabilités expérimentales et celles modélisées. En effet, les courbes de compressibilité ont été mesurées pour l'ensemble des échantillons issus des formettes Alkegen, ce qui a pu entraîner une modification de leur structure, et donc de son épaisseur, suite à l'application d'une contrainte importante comme démontré précédemment.

Par ailleurs, une autre source d'incertitude peut être liée aux distributions des diamètres de fibres (FSD) utilisées dans les modèles. Les FSD en nombre de ces formettes bimodales sont déterminés à partir d'analyses d'images au MEB. Afin de les convertir en fraction volumique, le calcul suivant est effectué pour chaque fibre i, à partir de son diamètre d_i et de sa longueur L_{fi} :

$$f_{Vi} = \frac{V_{d_i}}{V_i} = \frac{\frac{\pi d_i^2}{4} L_{fi}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\pi d_i^2}{4} L_{fi}} \qquad \textit{Eq. 4-29}$$

En l'absence d'information sur la longueur des fibres, il est pertinent d'examiner si une différence de longueur existe entre les deux lots de fibres utilisés pour constituer les distributions bimodales. En effet, chaque distribution bimodale est constituée d'un mélange, en proportion différente, de fibres centrées autour de 6 µm (correspondant aux formettes Alkegen monomodales F1 et F2), et de fibres centrées autour de 2,7 µm (correspondant à F4 et F7). Les distributions monomodales de ces échantillons sont comparées dans la Figure 4-27.

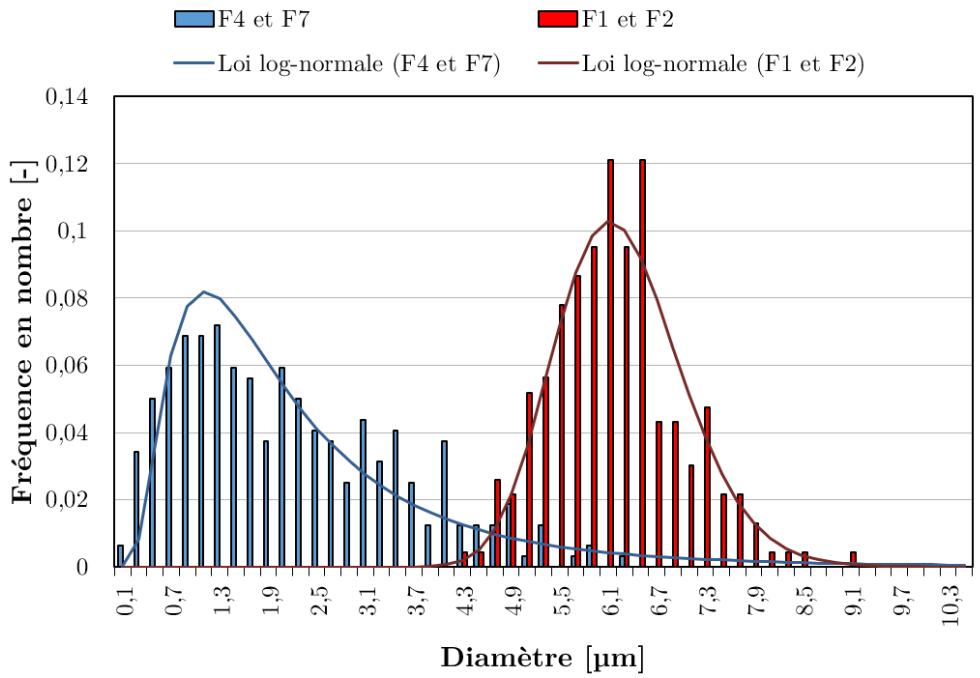


Figure 4-27 : Comparaison des distributions en nombre mesurées des formettes monomodales avec leur modélisation par une loi log-normale

Les distributions monomodales des diamètres d_i des deux populations de fibres mesurés au MEB peuvent être modélisées selon une loi log-normale. Singha *et al.* [10] ont en effet démontré que les distributions de fibres dans des médias monomodaux et monodisperses suivent généralement une loi log-normale, indépendamment de la taille des fibres ou des méthodes de production utilisées. Cette modélisation repose sur l'hypothèse que les logarithmes népériens des diamètres $\ln(d_i)$ suivent une loi normale caractérisée par une moyenne μ, estimée comme la moyenne des $\ln(d_i)$ et un écart type σ, calculé comme l'écart type des $\ln(d_i)$. La Figure 4-27 illustre la comparaison entre les distributions monomodales déterminées par analyse des clichés de MEB pour les deux populations de fibres (F1/F2 et F4/F7) et les distributions log-normales ajustées.

Compte tenu du faible chevauchement entre les deux distributions (Figure 4-27), nous avons considéré, en première approximation, que les deux lots de fibres sont distincts, séparés par un diamètre de fibre de 4,5 µm. Ne connaissant pas précisément la longueur des fibres, une hypothèse simplificatrice a été faite considérant que toutes les fibres ont la même longueur (**approche 1**). La relation devient alors :

$$f_{Vi} = \frac{\frac{\pi d_i^2}{4}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\pi d_i^2}{4}} \qquad \textit{Eq. 4-30}$$

Les distributions volumiques cumulées obtenues sous moyennant cette hypothèse sont présentées en Figure 4-28 pour trois formettes F8, F9 et F10. Cette approche a été utilisée tout au long du manuscrit pour convertir les distributions en nombre en distributions volumiques pour les formettes LRGP et Alkegen.

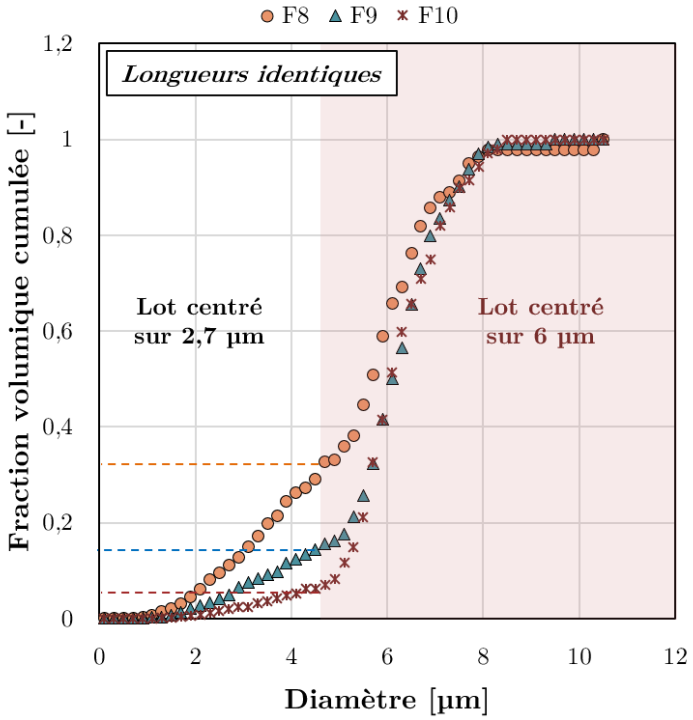


Figure 4-28 : Fraction volumique cumulée pour les formettes F8, F9, F10 (hypothèse de même longueur, approche 1)

En supposant que les deux lots de fibres de verre utilisés pour la fabrication des formettes, centrées sur des diamètres de 6 µm ou 2,7 µm, présentent une masse volumique identique, les fractions massiques peuvent être considérées équivalentes aux fractions volumiques. Ainsi, compte tenu des quantités de fibres introduites lors de la fabrication des formettes, celles-ci sont théoriquement constituées de 50 % (volumique) du lot centré sur 6 µm pour F8, de 75 % (volumique) pour F9 et de 90 % (volumique) pour F10.

Cependant, l'observation des distributions volumiques cumulées obtenues sous l'hypothèse d'une longueur identique pour les trois formettes (Figure 4-28) révèle un décalage. Les délimitations entre les deux populations de fibres ne correspondent pas aux fractions volumiques attendues : on observe plutôt une fraction volumique d'environ 68 % de fibres du lot centré sur 6 µm en considérant une plage comprise entre 4,5 et 10 µm pour F8, de 85 % pour F9 et de 95 % pour F10.

Ce décalage peut suggérer une différence de longueur entre les fibres des deux lots. Alors que la longueur des fibres du lot de 6 µm est connue, de l'ordre de 6 mm, celle des fibres du lot

de 2,7 µm n'a pas été précisément communiquée par l'entreprise les ayant fournies. Elle est toutefois estimée à quelques millimètres et semble supérieure à celle des fibres de 6 µm.

En fixant une séparation à 4,5 µm entre les deux populations et en conservant la longueur de 6 mm pour les fibres de diamètres supérieurs à 4,5 µm, une longueur ajustée de 12 mm pour les fibres de diamètres inférieurs à 4,5 µm **(approche 2)** permet d'obtenir une distribution cumulée en volume plus représentative du ratio massique/volumique attendu pour F8 (Figure 4-29). En appliquant ces longueurs corrigées aux distributions des formettes F9 et F10, les fractions volumiques de 75 % et 90 % pour les fibres du lot de 6 µm sont également retrouvées (Figure 4-29), ce qui semble confirmer l'hypothèse d'une différence de longueur entre les deux populations de fibres.

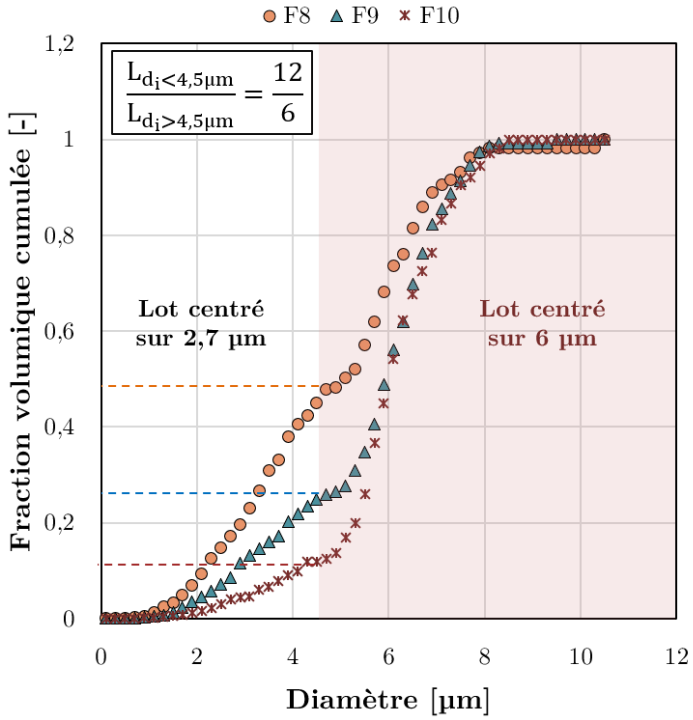


Figure 4-29 : Fraction volumique cumulée pour les formettes F8, F9, F10 (longueurs différentes, approche 2)

Sur la base des nouvelles distributions cumulées en volume, la perméabilité a été recalculée pour trois échantillons provenant de ces formettes. En Figure 4-30 est comparée la perméabilité mesurée expérimentalement avec la perméabilité modélisée en considérant une longueur identique ou différente entre les fibres issues des deux populations. Les résultats obtenus montrent que, malgré cette correction, la perméabilité modélisée sous-estime davantage la perméabilité expérimentale.

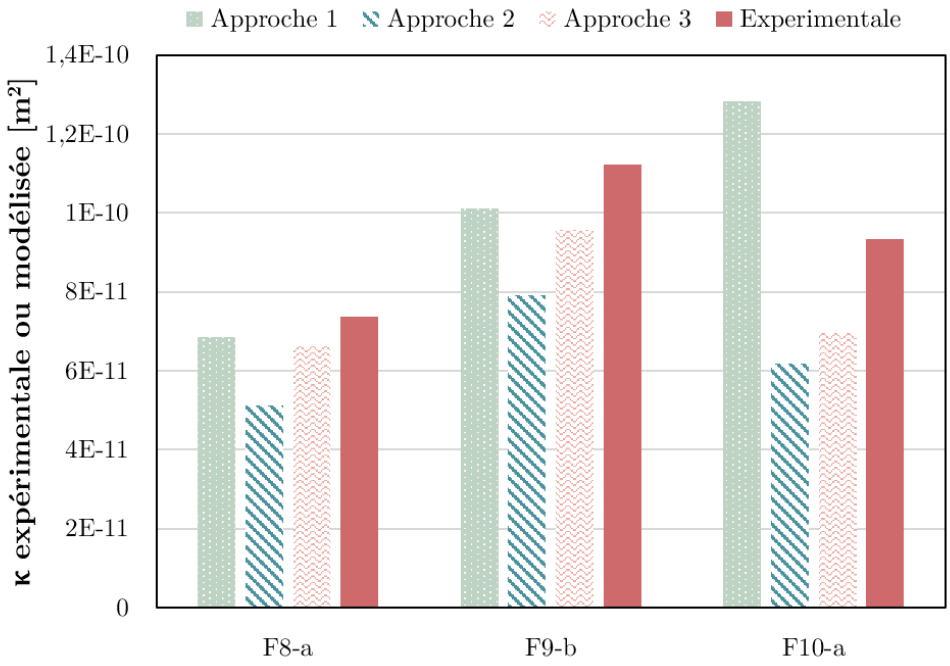


Figure 4-30 : Comparaison de la perméabilité expérimentale avec les perméabilités modélisées selon les trois approches[2]

Bien que l'ajustement des longueurs ait permis de retrouver les fractions volumiques attendues, cette méthode repose sur une séparation stricte entre les deux populations de fibres à partir d'un seuil fixé arbitrairement à 4,5 µm. Or, cette hypothèse semble approximative, dans la mesure où les distributions de diamètres des deux lots de fibres présentent en réalité une zone de recouvrement. Plus précisément, les fibres issues du lot de 6 µm (utilisées notamment dans les formettes F1 et F2) présentent des diamètres s'étendant de 4,39 µm à 9,10 µm, tandis que celles issues du lot de 2,7 µm (formettes F4 et F7) couvrent une plage de 0,14 µm à 6,29 µm. Cette superposition des plages de diamètres peut donc entrainer une classification erronée de certaines fibres, et par conséquent de leur longueur, donc biaiser la conversion de la distribution en nombre en distribution volumique.

Ainsi, la prise en compte du chevauchement entre les deux distributions bimodales a été testée (**approche 3**). À partir des deux lois log-normales représentant les distributions en nombre des deux populations de fibres, les distributions en nombre de mélanges correspondant aux formettes F8, F9 et F10 peuvent être retrouvées. Étant donné que les fractions en nombre des fibres issues de chaque population utilisée pour constituer ces formettes sont inconnues, ce paramètre a été ajusté de manière à s'approcher au mieux des distributions en nombre mesurées expérimentalement (Figure 4-31).

[2] L'approche 1 suppose que toutes les fibres, quel que soit leur diamètre, ont une longueur identique. L'approche 2 prend en compte des longueurs différentes pour les fibres de diamètres inférieurs ou supérieurs à 4,5 µm. Enfin, l'approche 3 intègre la superposition des deux lois log-normales représentatives des deux populations de fibres (Figure 4-27).

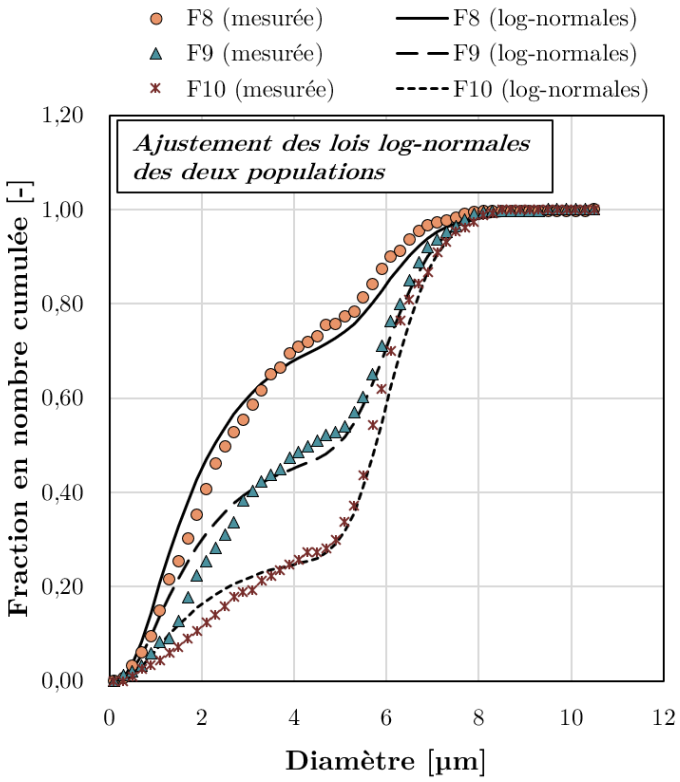


Figure 4-31: Comparaison des distributions en nombre mesurées et modélisées des formettes F8, F9 et F10 par ajustement des lois log-normales des deux populations de fibres

Une fois ces distributions en nombre établies, la conversion en fractions volumiques nécessite de prendre en compte la longueur moyenne des fibres pour chaque population. Pour la population de fibres centrée autour de 6 µm (lots F1 et F2), la longueur est connue et fixée à 6 mm. En revanche, la longueur des fibres de la seconde population, centrée autour de 2,7 µm, n'ayant pas été précisée par le fournisseur, cette longueur a été ajustée de manière à retrouver, pour la formette F8, une fraction volumique (ou massique) de 50 % pour la population de fibres centrée sur 6 µm, en supposant une masse volumique identique entre les deux lots. Cet ajustement a conduit à une longueur estimée de 8,7 mm pour cette population.

En appliquant ces longueurs respectives aux formettes F9 et F10, les fractions volumiques/massiques attendues de 75 % et 90 % pour les fibres de 6 µm sont également retrouvées (Figure 4-32).

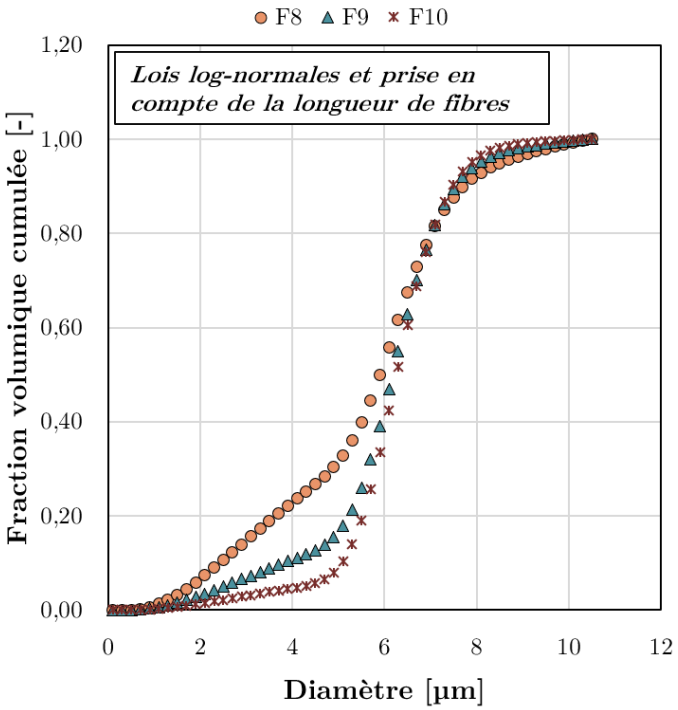


Figure 4-32: Distribution cumulée en nombre des formettes F8, F9, F10 obtenues à partir des lois log-normales ajustées, avec prise en compte d'une longueur différente pour les deux populations de fibres

L'ajustement des distributions de fibres à l'aide de lois log-normales, associé à une prise en compte des longueurs des fibres, semble permettre d'obtenir une représentation plus fidèle des fractions volumiques des médias bimodaux. Cependant, les valeurs de perméabilité modélisées restent inférieures aux valeurs expérimentales (Figure 4-30), malgré cette approche plus pertinente

Ce constat suggère que d'autres facteurs biaisent la validation expérimentale du modèle. En particulier, la représentativité de l'échantillonnage utilisé pour déterminer les distributions doit être interrogée. Les différentes méthodes testées pour la conversion des fractions en nombre en fractions volumiques supposent que les distributions obtenues à partir des images MEB sont représentatives du média dans son ensemble.

De plus, des hétérogénéités locales dans les médias, difficilement quantifiables, pourraient exister, induisant des passages préférentiels du fluide à travers la structure fibreuse, pouvant conduire à une perméabilité expérimentale plus élevée que celle estimée par le modèle.

En définitive, bien que les méthodes proposées permettent de mieux représenter la structure des médias, elles ne suffisent pas à expliquer l'ensemble des écarts observés et soulignent la difficulté à valider un modèle théorique de perméabilité avec des données expérimentales.

4.3 Conclusion

En conclusion, ce chapitre avait pour objectif de valider expérimentalement le modèle général de perméabilité pour des médias fibreux modèles à distributions monomodales ou bimodales polydisperses. Les résultats montrent une bonne concordance entre les perméabilités modélisées et expérimentales pour les formettes LRGP, avec des écarts généralement inférieurs à ± 10 %, à l'exception de deux échantillons. En revanche, des écarts plus significatifs ont été observés pour les formettes Alkegen, atteignant 20 % pour la majorité des échantillons et jusqu'à 50 % pour deux d'entre eux.

Ces écarts s'expliquent par plusieurs biais expérimentaux. Tout d'abord, la représentativité des distributions de diamètres de fibres (FSD) mesurées par MEB est limitée par une analyse surfacique, qui ne reflète pas nécessairement la structure interne du média, et par la sensibilité du modèle de perméabilité à l'omission de fibres épaisses. De plus, la conversion des distributions en nombre en distributions volumiques pour les formettes bimodales est complexifiée par l'absence de données précises sur les longueurs de fibres et par le chevauchement des distributions. Par ailleurs, la forte compressibilité des médias participe aussi à ces biais expérimentaux, en complexifiant la mesure précise de l'épaisseur. Enfin, la présence d'hétérogénéités locales n'est pas à exclure pour ces médias modèles fabriqués en laboratoire, bien qu'une attention particulière ait été portée à leur fabrication.

Ce chapitre met ainsi en évidence la complexité de la validation expérimentale d'un modèle de perméabilité. Pour surmonter ces limitations, la fabrication de médias parfaitement caractérisés, par exemple via une reconstruction numérique avec un logiciel comme GeoDict suivie d'une impression 3D, constituerait une perspective intéressante pour une validation plus robuste du modèle.

Chapitre 5 : Simulation numérique de l'efficacité de médias fibreux

Sommaire

Chapitre 5 : Simulation numérique de l'efficacité de médias fibreux 129
5.1 Modèles prédictifs d'efficacité de filtration unitaire 130
5.1.1 Simulation numérique des mécanismes de filtration 130
5.1.2 Efficacité de collecte par diffusion 132
5.1.3 Efficacité de collecte par interception 138
5.1.4 Efficacité de collecte par inertie 143
5.2 À la recherche d'une structure fibreuse optimale 148
5.2.1 Structures iso-perméables 148
5.2.2 Influence des caractéristiques structurales de médias iso-perméables sur l'efficacité de filtration 151
a. Structures iso-perméables de même compacité et diamètre équivalent 151
b. Structures iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différent 156
5.2.3 Figure de mérite 158
5.3 Conclusion 162

Ce chapitre a pour objectif d'étudier les modèles d'efficacité unitaire des mécanismes de diffusion, d'inertie et d'interception, appliqués à des structures numériques composées de fibres microniques. Dans un second temps, une analyse conjointe de la perte de charge et de l'efficacité de structures fibreuses sera menée afin d'identifier le potentiel d'optimisation des médias fibreux.

5.1 Modèles prédictifs d'efficacité de filtration unitaire

L'objectif de cette section est de caractériser les efficacités unitaires de collecte associées aux mécanismes de diffusion, d'interception et d'inertie, pour des structures composées de fibres de diamètre micronique, présentant une distribution monomodale à multimodale.

5.1.1 Simulation numérique des mécanismes de filtration

Des tests de filtration de particules ont été réalisés sur différentes structures numériques, afin de prédire l'efficacité de collecte dans les domaines diffusionnel et inertiel, en injectant des particules sphériques de diamètre compris entre 0,01 et 8 µm. Le nombre de particules injectées est fixé à 5000 pour chaque diamètre avec une vitesse de filtration de 10 cm/s.

Afin d'isoler les effets mécaniques de filtration, les interactions électrostatiques ont été exclues. Le mouvement des particules a ainsi été simulé en tenant compte du champ d'écoulement, de la friction des particules avec le fluide, de leur inertie et des écoulements diffusifs.

Dans un premier temps, la filtration de particules prenant en compte l'ensemble de ces mécanismes de diffusion, d'interception et d'inertie a été simulée afin d'estimer l'efficacité fractionnelle mécanique de filtration, notée $E_{meca_{simulée}}$, pour chaque particule i de diamètre d_{pi}. Cette efficacité peut être reliée à l'efficacité unitaire de collecte d'une fibre, notée $\eta_{meca_{simulée}}$:

$$E_{meca_{simulée}}(d_{pi}) = 1 - \exp\left(-4\,\eta_{meca_{simulée}}(d_{pi})\frac{\alpha}{1-\alpha}\frac{Z}{\pi\, d_f}\right) \qquad \textit{Eq. 5-1}$$

Avec α la compacité, Z l'épaisseur du média et d_f le diamètre de fibre.

Dans la littérature, la détermination de l'efficacité fractionnelle d'un média repose sur la détermination de l'efficacité unitaire globale ($\eta_{meca_{simulée}}$) de la fibre, qui résulte de la combinaison des efficacités propres à chaque mécanisme de collecte (diffusion, interception, inertie). Différents modèles ont été établis pour modéliser les efficacités unitaires par diffusion, par interception et par inertie (voir section 1.3.3, section 1.3.4 et section 1.3.5 du chapitre 1). Une des difficultés consiste cependant à isoler les contributions individuelles de chaque mécanisme à partir de l'efficacité globale.

Pour répondre à cet enjeu et simuler l'efficacité de filtration par diffusion, interception, ou inertie, deux simulations d'efficacité ont été effectuées pour chaque microstructure :

- Une simulation de l'efficacité de filtration mécanique globale en désactivant les interactions électrostatiques tout en activant le mouvement brownien. L'efficacité fractionnelle obtenue regroupe ainsi les effets de diffusion, d'interception et d'inertie en fonction du diamètre de particule considéré.
- Une seconde simulation en désactivant à la fois les effets électrostatiques et le mouvement brownien et en fixant la masse volumique des particules à celle du fluide, pour négliger les effets inertiels. L'efficacité fractionnelle obtenue résulte donc uniquement du mécanisme d'interception, ce qui permet de déterminer l'efficacité unitaire correspondante $\eta_{R_{simulée}}$ à partir de l'équation 5-1.

Conformément à Kasper *et al.* [67] qui considèrent la perméance globale d'une fibre, comme le produit des perméances de chaque mécanisme, l'efficacité unitaire globale d'une fibre (η_{fibre}) peut s'exprimer selon les efficacités des n mécanismes (η_i) considérés indépendants :

$$\eta_{fibre} = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - \eta_i) \qquad \textit{Eq. 5-2}$$

Pour des particules i de diamètre d_{pi} inférieure à celui de la MPPS (d_{MPPS}), généralement autour de 200 et 500 nm pour des médias fibreux non electret, seuls les mécanismes de diffusion et d'interception sont significatifs. On peut donc aisément retrouver l'efficacité unitaire de diffusion simulée ($\eta_{D_{simulée}}$) à partir des simulations de l'efficacité unitaire globale mécanique de collecte d'une fibre ($\eta_{meca_{simulée}}$) et de l'efficacité unitaire par interception ($\eta_{R_{simulée}}$), en considérant chaque mécanisme indépendant :

$$\eta_{D_{simulée}} = \frac{\eta_{meca}{}_{simulée}^{d_p<d_{MPPS}} - \eta_{R_{simulée}}^{d_p<d_{MPPS}}}{1 - \eta_{R_{simulée}}^{d_p<d_{MPPS}}} \qquad \textit{Eq. 5-3}$$

De la même manière, pour des diamètres de particules supérieures à celui de la MPPS, les mécanismes prépondérants sont l'interception et l'inertie. L'efficacité unitaire d'inertie simulée ($\eta_{I_{simulée}}$) peut ainsi être isolée à partir de l'efficacité unitaire globale ($\eta_{meca_{simulée}}$) et de l'efficacité unitaire par interception ($\eta_{R_{simulée}}$) :

$$\eta_{I_{simulée}} = \frac{\eta_{meca}{}_{simulée}^{d_p>d_{MPPS}} - \eta_{R_{simulée}}^{d_p>d_{MPPS}}}{1 - \eta_{R_{simulée}}^{d_p>d_{MPPS}}} \qquad \textit{Eq. 5-4}$$

À l'aide de cette méthodologie, il est donc possible de dissocier et quantifier numériquement les contributions spécifiques des mécanismes de diffusion, d'interception et d'inertie dans le processus de filtration, afin de les comparer aux différents modèles de la littérature.

5.1.2 Efficacité de collecte par diffusion

Que ce soit pour convertir les valeurs simulées d'efficacité globale en efficacité unitaire (Eq. 5-1), ou pour appliquer les modèles issus de la littérature, lesquels dépendent du nombre de Peclet, il est nécessaire de connaitre le diamètre des fibres constitutives des structures, paramètre clé des performances d'un média fibreux.

Dans un premier temps, des structures ayant une distribution monomodale de fibres ont été générées afin de fixer précisément le diamètre de fibre et de comparer directement les modèles existants aux résultats de simulation. Six structures monomodales (voir Tableau 5-1), présentant une compacité comprise entre 5 % et 20 %, et un diamètre de fibre variant entre 3,67 µm et 9,01 µm[3], ont ainsi été simulées.

Pour chaque structure, deux simulations ont été réalisées pour des diamètres de particules compris entre 0,01 et 0,1 µm : une première prenant en compte l'ensemble des mécanismes de filtration dit mécanique, et une seconde isolant l'efficacité due uniquement au mécanisme d'interception (section 5.1.1). L'efficacité unitaire par diffusion simulée peut ensuite être déduite.

Il est important de noter que pour certaines structures fibreuses ($\alpha > 10$ % et/ou $d_f < 2$ µm), les effets d'interception sont loin d'être négligeables, ce qui justifie l'application de la correction même pour des particules inférieures à 100 nm.

Tableau 5-1 : Caractéristiques des structures de distribution monomodale de fibres

Structures	d_1 (µm)	α (-)
Mono. 1	7,97	0,05
Mono. 2	6,09	0,20
Mono. 3	9,01	0,15
Mono. 4	6,37	0,15
Mono. 5	6,20	0,10
Mono. 6	3,67	0,10

Pour les diamètres de particules étudiés, les valeurs simulées de l'efficacité unitaire par diffusion sont comparées aux seize modèles recensés dans littérature (voir section 1.3.3 du chapitre 1).

La Figure 5-1 et la Figure 5-2 comparent l'évolution des efficacités unitaires par diffusion en fonction du diamètre de particule compris entre 0,01 µm et 0,1 µm, obtenues par simulation, aux valeurs prédites par les modèles issus de la littérature. Ces comparaisons sont présentées pour les structures Mono. 1 et Mono. 2. Les figures correspondant aux quatre autres

[3] Ces valeurs de diamètres sont issues de l'étude sur les médias iso-perméables de la section 5.2.2a.

distributions monomodales sont présentées dans l'annexe 5-A. Les acronymes liés aux différents modèles théoriques testés sont récapitulés dans le Tableau 5-2.

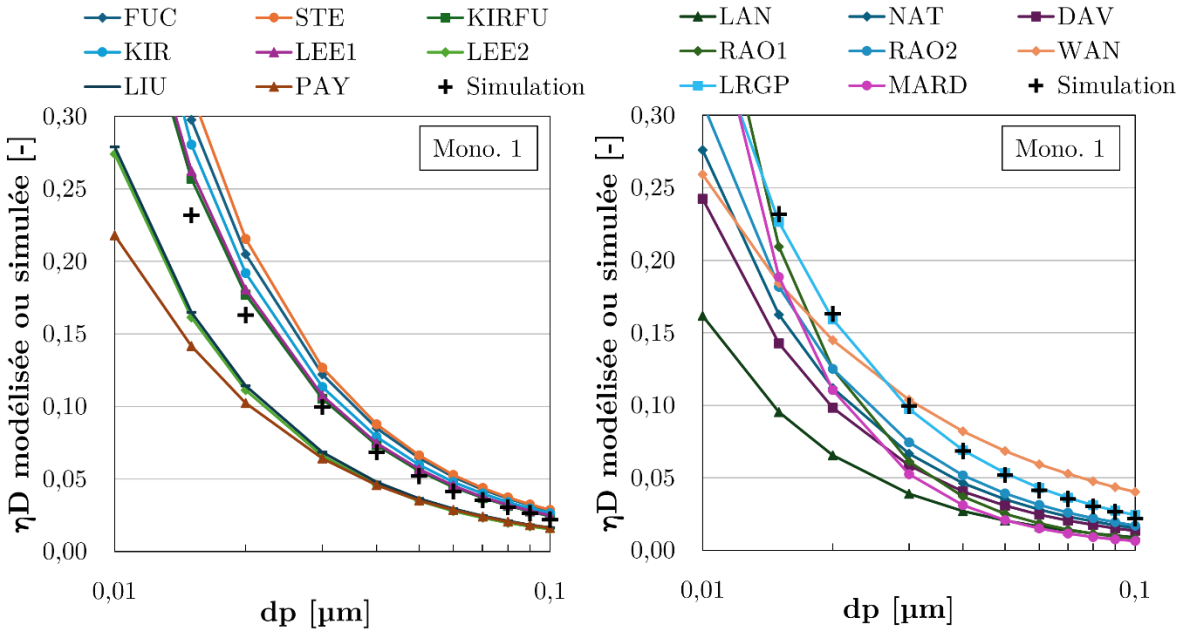


Figure 5-1 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 1 en fonction du diamètre de particule

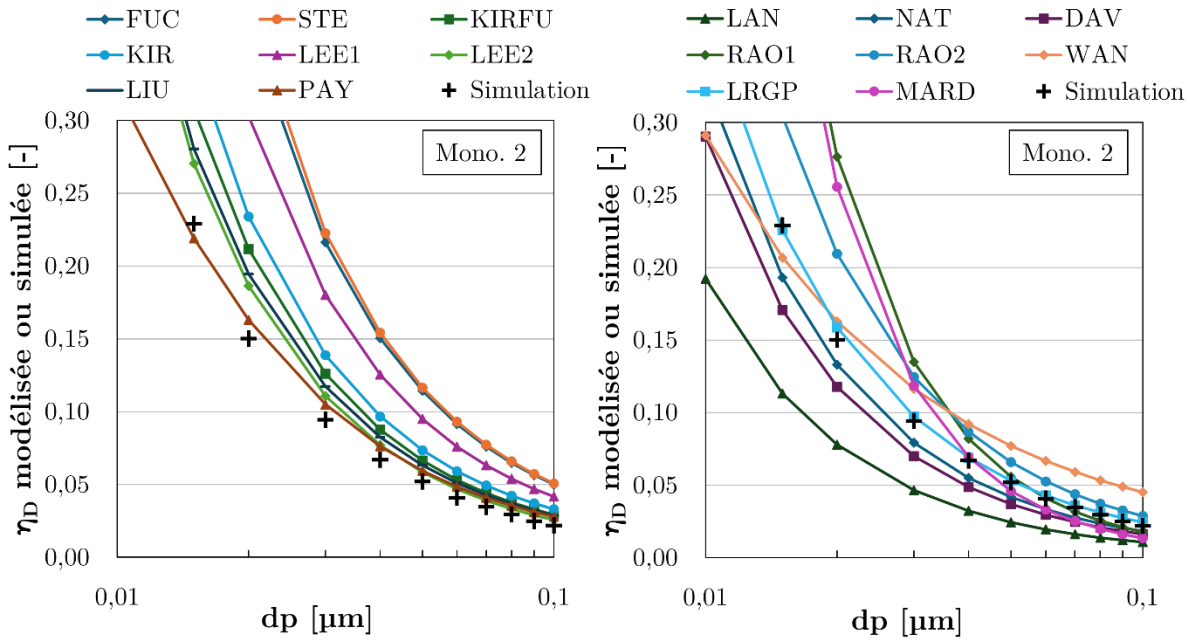


Figure 5-2 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 2 en fonction du diamètre de particule

Afin d'évaluer la qualité des prédictions par ces modèles, le critère qualitatif MRD est utilisé, de la même manière que pour l'étude de perméabilité. Il correspond à l'écart relatif moyen entre les efficacités unitaires fractionnelles simulées et modélisées pour un diamètre de particule d_i compris entre 0,01 µm et 0,1 µm (voir Tableau 5-2).

$$MRD = \frac{1}{N}\sum_{d_i}^{d_N} \frac{\left|\eta_{D_{simulée}}(d_i) - \eta_{D_{modélisée}}(d_i)\right|}{\eta_{D_{simulée}}(d_i)} \qquad \textit{Eq. 5-5}$$

Avec N le nombre de diamètres de particules différents entre 0,01 µm et 0,1 µm.

Tableau 5-2 : Écart relatif moyen (MRD) des modèles d'efficacité unitaire de diffusion pour des structures monomodales

Modèle	MRD pour 0,01 < dp < 0,1 µm					
	Mono. 1	**Mono. 2**	**Mono. 3**	**Mono. 4**	**Mono. 5**	**Mono. 6**
d_f (µm)	7,97	6,09	9,01	6,37	6,20	3,67
α (-)	0,05	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10
LRGP	**0,03**	**0,05**	**0,06**	**0,04**	**0,04**	**0,02**
Liu et Rubow (**LIU**)	0,29	0,25	0,04	0,05	0,11	0,08
Lee et Liu (2) (**LEE2**)	0,32	0,16	0,02	0,05	0,16	0,15
Rao et Faghri (2) (**RAO2**)	0,24	0,30	0,11	0,11	0,07	0,07
Payet et al. (**PAY**)	0,34	0,16	0,08	0,07	0,19	0,19
Kirsch et Fuchs (**KIRFU**)	0,08	0,32	0,23	0,23	0,16	0,17
Natanson cité par Matteson (**NAT**)	0,32	0,17	0,21	0,23	0,28	0,29
Kirsch et Zhulanov (**KIR**)	0,17	0,47	0,34	0,36	0,28	0,33
Davies (**DAV**)	0,40	0,27	0,32	0,32	0,35	0,35
Rao et Faghri (1) (**RAO1**)	0,44	0,31	0,32	0,36	0,36	0,38
Wang (**WAN**)	0,38	0,54	0,55	0,44	0,38	0,27
Mardanov (**MARD**)	0,51	0,36	0,41	0,44	0,43	0,44
Lee et Liu (1) (**LEE1**)	0,10	0,88	0,60	0,61	0,36	0,37
Langmuir (**LAN**)	0,60	0,51	0,54	0,55	0,58	0,59
Fuchs et Stechkina (**FUC**)	0,25	1,26	0,88	0,89	0,57	0,59
Stechkina et al. (**STE**)	0,29	1,32	0,93	0,95	0,63	0,65

Parmi les modèles de prédiction de l'efficacité unitaire fractionnelle par diffusion comparés dans cette étude, le modèle LRGP présente une meilleure prédiction pour toutes les structures monomodales étudiées. En effet, les valeurs de l'écart relatif moyen (MRD) restent inférieures à 6 %, indépendamment de la structure monomodale.

En particulier, les ratios entre les efficacités unitaires modélisées par ce modèle et celles simulées montrent une bonne prédiction, précise à ± 10 % pour des diamètres de particules compris entre 0,01 et 0,1 µm (Figure 5-3) et un nombre de Peclet entre 7 et 1300. Au-delà d'un diamètre de 0,08 µm, un léger écart entre les valeurs modélisées et simulées est observé. Toutefois, dans cette plage, les efficacités unitaires par diffusion sont très faibles et tendent vers zéro, ce qui limite l'impact de ces écarts sur l'efficacité globale de filtration.

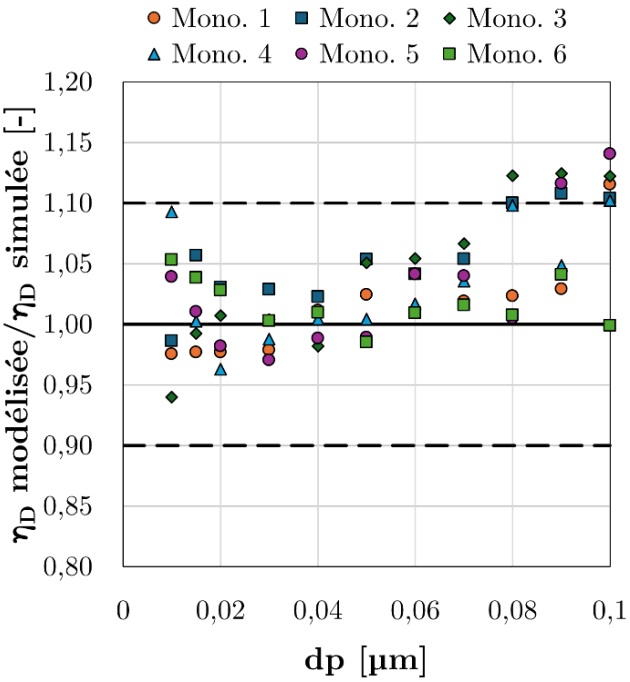


Figure 5-3 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par diffusion modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures monomodales

Le modèle LRGP apparaît ainsi comme le plus performant pour estimer l'efficacité unitaire par diffusion des structures monomodales. Afin de confirmer la pertinence de ce modèle pour des structures plus complexes, l'étude a été étendue à seize structures bimodales et six structures trimodales, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 5-3 et Tableau 5-4.

Tableau 5-3 : Caractéristiques des distributions bimodales

Structures	d_2 (µm)	d_1 (µm)	α	f_{V2}	f_{V1}
Bim. 1	11,66	5,00	0,05	0,70	0,30
Bim. 2	7,53	5,00	0,03	0,30	0,70
Bim. 3	21,99	5,00	0,08	0,80	0,20
Bim. 4	4,13	3,00	0,05	0,60	0,40
Bim. 5	12,67	3,00	0,10	0,75	0,25
Bim. 6	22,19	3,00	0,15	0,85	0,15
Bim. 7	5,14	1,20	0,10	0,22	0,78
Bim. 8	3,92	1,20	0,15	0,65	0,35
Bim. 9	8,13	1,20	0,20	0,75	0,25
Bim. 10	5,92	2,00	0,10	0,60	0,40
Bim. 11	12,86	2,00	0,15	0,75	0,25
Bim. 12	15,81	2,00	0,20	0,85	0,15
Bim. 13	4,06	2,95	0,10	0,74	0,26
Bim. 14	6,53	5,79	0,10	0,59	0,41
Bim. 15	10,72	6,79	0,15	0,70	0,30
Bim. 16	7,95	5,49	0,15	0,64	0,15

Tableau 5-4: Caractéristiques des distributions trimodales

Structures	d_3 (µm)	d_2 (µm)	d_1 (µm)	α	f_{V3}	f_{V2}	f_{V1}
Trim. 1	7,91	3,58	2,88	0,10	0,25	0,52	0,23
Trim. 2	8,14	6,91	3,33	0,10	0,16	0,74	0,11
Trim. 3	7,95	5,49	4,48	0,15	0,64	0,15	0,21
Trim. 4	11,33	8,61	6,18	0,15	0,62	0,15	0,22
Trim. 5	8,19	7,05	5,24	0,20	0,16	0,35	0,49
Trim. 6	10,84	7,00	4,43	0,05	0,69	0,15	0,16

L'objectif est de valider l'adaptabilité du modèle LRGP à des distributions de fibres, en associant ce modèle à un diamètre représentatif des structures plus complexes. Pour cette étude effectuée avec des fibres microniques, le diamètre équivalent (Eq. 3-9) déterminé au cours de cette étude dans la section 3.2.3 du chapitre 3 pour caractériser des fibres microniques dans le modèle de perméabilité en régime d'écoulement continu a été utilisé. En intégrant ce diamètre équivalent dans l'expression du nombre de Peclet, il devient alors possible de calculer l'efficacité unitaire fractionnelle par diffusion pour les structures bimodales et trimodales.

$$Pe = \frac{d_{eq}\, U_m}{\mathcal{D}} \qquad \textit{Eq. 5-6}$$

Avec $\mathcal{D}$ le coefficient de diffusion d'une particule sphérique i de diamètre d_{pi}, U_m la vitesse du fluide et d_{eq} le diamètre équivalent développé dans cette étude pour des fibres microniques.

Ce diamètre équivalent intervient également dans l'équation 5-1 pour déterminer les efficacités unitaires fractionnelles à partir des simulations effectuées pour chaque structure, que ce soit pour l'efficacité de filtration prenant en compte l'efficacité due uniquement au phénomène de d'interception (Eq. 5-7) ou l'ensemble des mécanismes dits mécaniques (Eq. 5-8). À partir de ces deux efficacités, celle par diffusion peut en être déduite.

$$E_{R_{simulée}}(d_{pi}) = 1 - \exp\left(-4\,\eta_{R_{simulée}}(d_{pi})\,\frac{\alpha}{1-\alpha}\,\frac{Z}{\pi\, d_{eq}}\right) \qquad \textit{Eq. 5-7}$$

$$E_{meca_{simulée}}(d_{pi}) = 1 - \exp\left(-4\,\eta_{meca_{simulée}}(d_{pi})\,\frac{\alpha}{1-\alpha}\,\frac{Z}{\pi\, d_{eq}}\right) \qquad \textit{Eq. 5-8}$$

La Figure 5-4 et la Figure 5-5 comparent les efficacités unitaires par diffusion simulée avec celle prédite pour des structures bimodales et trimodales. Le modèle LRGP associé au nouveau diamètre équivalent permet une bonne estimation de l'efficacité pour les différentes structures étudiées, avec une précision restant en majorité inférieure à ± 10 % pour des diamètres de particules compris entre 0,01 µm et 0,1 µm.

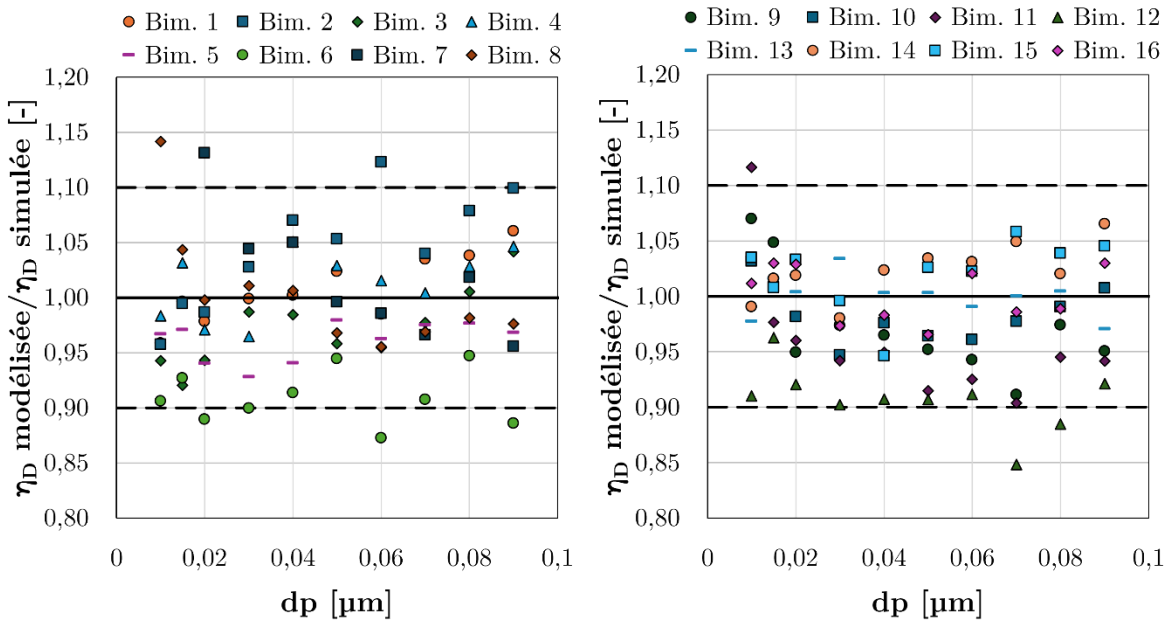


Figure 5-4 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par diffusion modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures bimodales

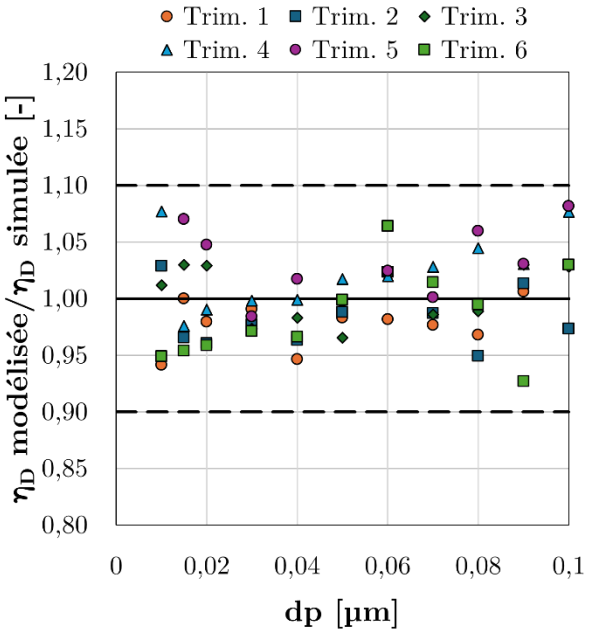


Figure 5-5 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par diffusion modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures trimodales

L'introduction du diamètre équivalent développé dans cette étude pour des fibres microniques permet ainsi d'étendre l'application du modèle LRGP à des structures bimodales et trimodales, avec une bonne prédiction des efficacités unitaires par diffusion pour une gamme de compacité entre 5 % et 20 % et un nombre de Peclet compris entre 7 et 1320.

Ces résultats soulèvent toutefois une question importante : ce diamètre équivalent, défini initialement pour déterminer la perméabilité de structures composées de fibres de taille micronique, puis validé dans le cadre du mécanisme de diffusion, peut-il également être utilisé

pour modéliser l'efficacité unitaire par interception ? La suite de cette étude porte donc sur l'évaluation des modèles prédictifs d'efficacité unitaire par interception et l'extension possible à des distributions multimodales.

5.1.3 Efficacité de collecte par interception

Comme pour l'étude des modèles d'efficacité unitaire par diffusion, ceux relatifs au mécanisme d'interception ont été analysés, dans un premier temps sur des structures monomodales, puis sur des structures bimodales et trimodales, afin d'intégrer ces distributions dans le paramètre d'interception R, défini comme le rapport entre le diamètre de particule et le diamètre de fibre représentatif de la structure.

Pour les six structures monomodales, décrites précédemment dans le Tableau 5-1, l'efficacité attribuée uniquement au mécanisme d'interception a été simulée. Les effets inertiels ont été négligés en fixant la masse volumique des particules à celle du fluide, et en désactivant les effets électrostatiques et le mouvement brownien (voir section 5.1.1).

Pour des diamètres de particule compris entre 0,3 et 8 µm, les valeurs simulées de l'efficacité unitaire par interception sont comparées aux neuf modèles issus de la littérature (voir section 1.3.4 du chapitre 1). La Figure 5-6 et la Figure 5-7 comparent l'évolution des efficacités unitaires par interception, simulée et modélisée, en fonction du diamètre de particules, respectivement pour les structures Mono. 1 et Mono. 2. Les résultats correspondant aux quatre autres structures sont présentés dans l'annexe 5-B. Les acronymes correspondant aux différents modèles prédictifs sont résumés dans le Tableau 5-5.

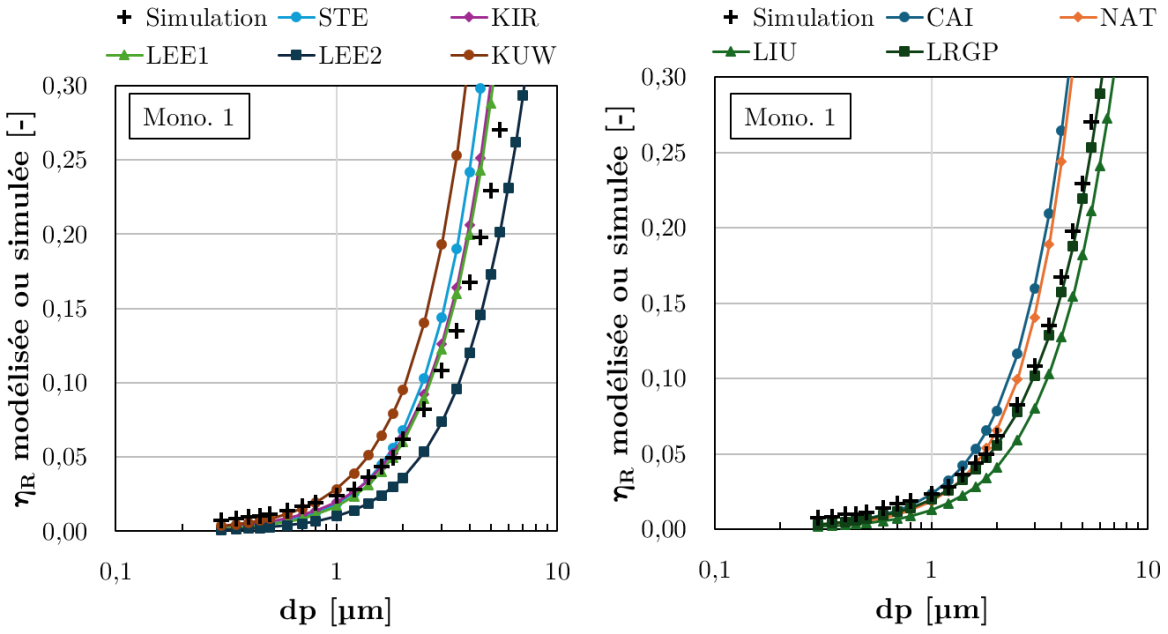


Figure 5-6 : Évolution des efficacités unitaires par interception simulées et modélisées pour la structure Mono. 1 en fonction du diamètre de particule

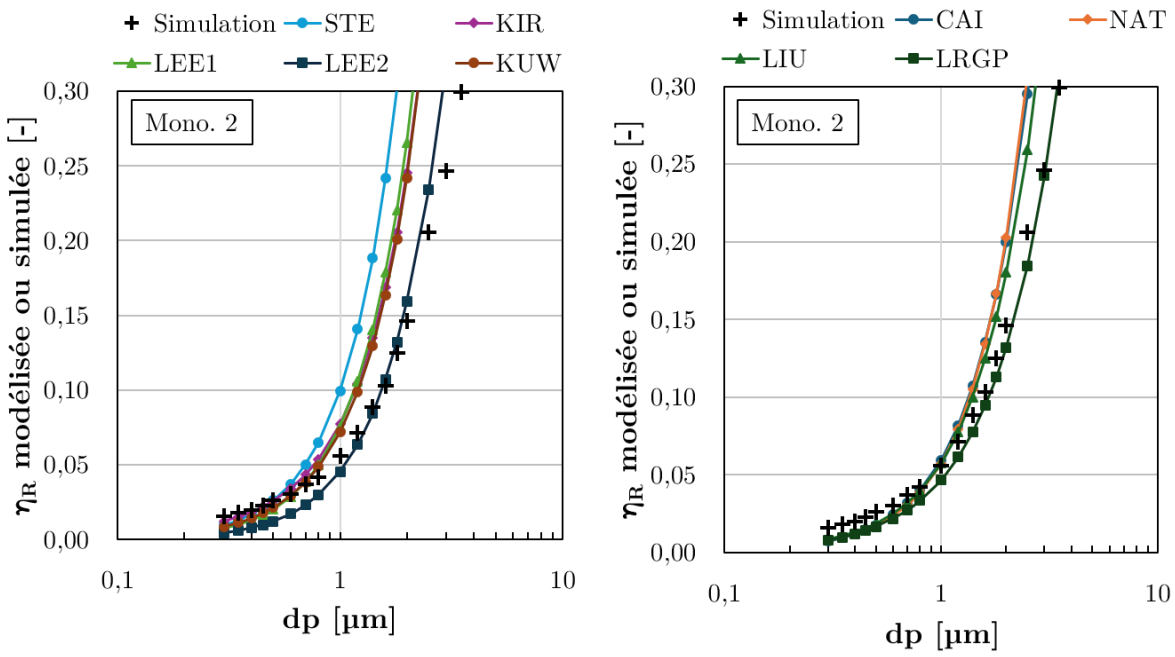


Figure 5-7 : Évolution des efficacités unitaires par interception simulées et modélisées pour la structure Mono. 2 en fonction du diamètre de particule

De manière similaire à l'étude du mécanisme de diffusion, le critère MRD a été utilisé pour comparer les valeurs d'efficacité unitaire fractionnelle simulées à celles modélisées, pour des diamètres de particules compris entre 0,3 µm et 8 µm (Tableau 5-5).

Tableau 5-5 : Écart relatif moyen (MRD) des modèles d'efficacité unitaire d'interception pour des structures monomodales

Modèle	**MRD pour 0,3 < dp < 8 µm**					
	Mono. 1	**Mono. 2**	**Mono. 3**	**Mono. 4**	**Mono. 5**	**Mono. 6**
d_f (µm)	7,97	6,09	9,01	6,37	6,20	3,67
α (-)	0,05	0,20	0,15	0,15	0,10	0,10
LRGP	0,18	0,22	0,20	0,21	0,15	0,10
Liu et Rubow (**LIU**)	0,39	0,25	0,29	0,24	0,22	0,12
Lee et Liu (2) (**LEE2**)	0,47	0,32	0,35	0,35	0,33	0,28
Kirsch et Zhulanov (**KIR**)	0,28	0,42	0,46	0,35	0,36	0,41
Lee et Liu (1) (**LEE1**)	0,32	0,54	0,56	0,45	0,41	0,35
Natanson cité par Matteson (**NAT**)	0,47	0,36	0,52	0,36	0,50	0,42
Cai **(CAI)**	0,48	0,34	0,48	0,37	0,50	0,45
Kuwabara **(KUW)**	0,66	0,45	0,64	0,48	0,69	0,69
Stechkina et al. (**STE**)	0,45	0,90	0,88	0,67	0,66	0,60

Parmi l'ensemble des modèles prédictifs du mécanisme d'interception, le modèle LRGP présente les prédictions les plus précises pour les six structures de distribution monomodale étudiées mais à tendance à sous évaluer les efficacités simulées avec des écarts relatifs moyens inférieurs à 20 %.

Les ratios entre les efficacités unitaires modélisées par ce modèle et celles simulées (Figure 5-8) montrent une précision à ± 10 %, pour des diamètres de particules supérieurs à 1,5 µm sur l'ensemble des six structures. En revanche, des écarts plus importants apparaissent pour des diamètres inférieurs à 1,5 µm, avec des ratios d'efficacité unitaire compris entre 0,7 et 0,9. Toutefois, dans cette plage de diamètre de particules et pour les structures fibreuses considérées, les valeurs d'efficacité unitaire par interception restent très faibles.

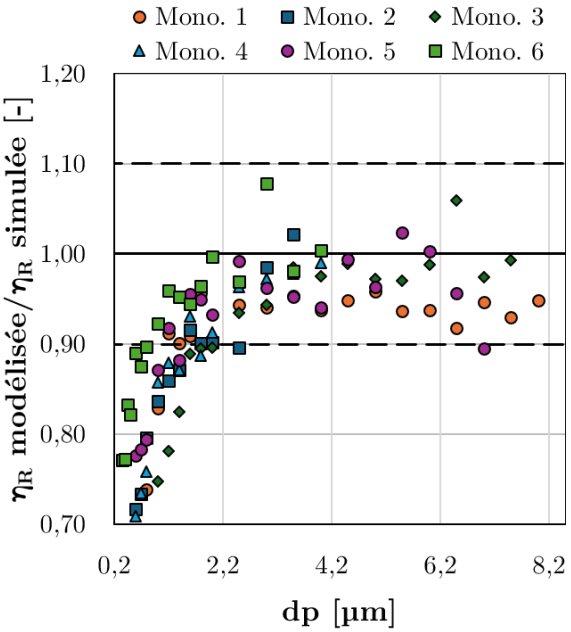


Figure 5-8 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par interception modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures monomodales

Le modèle LRGP apparaît ainsi comme le plus pertinent pour estimer l'efficacité unitaire par interception, avec une précision de ± 10 % pour des structures monomodales, pour un paramètre d'interception R compris entre 0,16 et 2,18.

Le mécanisme d'interception est caractérisé par le rapport R entre le diamètre de particule (d_p) et le diamètre de fibre. Ce paramètre est présent dans l'ensemble des modèles d'efficacité unitaire par interception. Pour les structures bimodales et trimodales étudiées, le diamètre équivalent (d_{eq}) est intégré dans le calcul du rapport R, afin de représenter la distribution des diamètres de fibres de la structure :

$$R = \frac{d_p}{d_{eq}} \qquad \textit{Eq. 5-9}$$

Ce diamètre, initialement introduit pour caractériser des fibres microniques dans le modèle de perméabilité, en absence de glissement s'est avéré pertinent pour représenter les structures dans le cadre du mécanisme de diffusion.

Comme précédemment, le diamètre équivalent est également intégré lors de la conversion des données simulées d'efficacité fractionnelle par interception en efficacité unitaire :

$$E_{R_{simulée}}(d_i) = 1 - \exp\left(-4\,\eta_{R_{simulée}}(d_i)\,\frac{\alpha}{1-\alpha}\,\frac{Z}{\pi\,\mathbf{d_{eq}}}\right) \qquad \textit{Eq. 5-10}$$

Le modèle LRGP intégrant le diamètre équivalent a été appliquée aux seize structures bimodales décrites précédemment dans le Tableau 5-3. La Figure 5-9 et la Figure 5-10 comparent les efficacités unitaires par interception simulées à celles prédites pour ces structures.

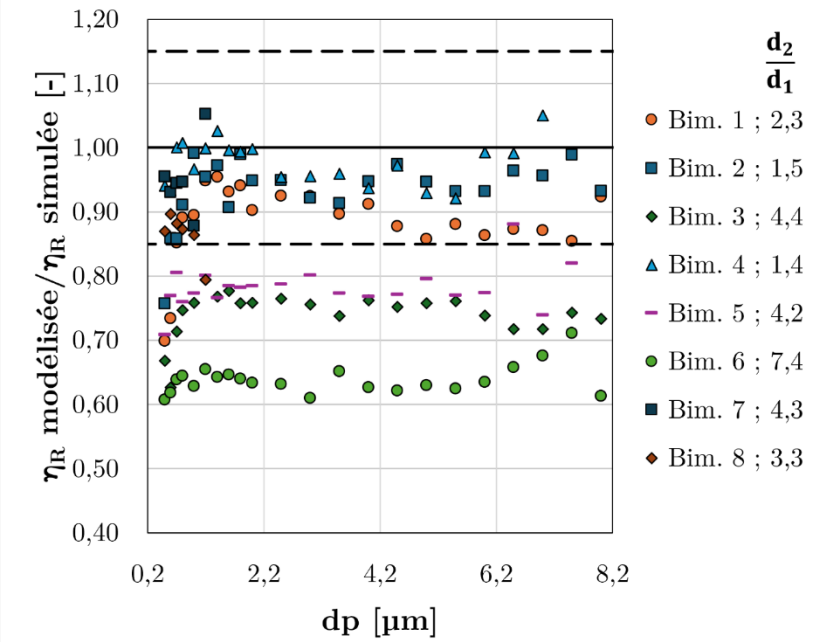


Figure 5-9 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par interception modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures bimodales (a)

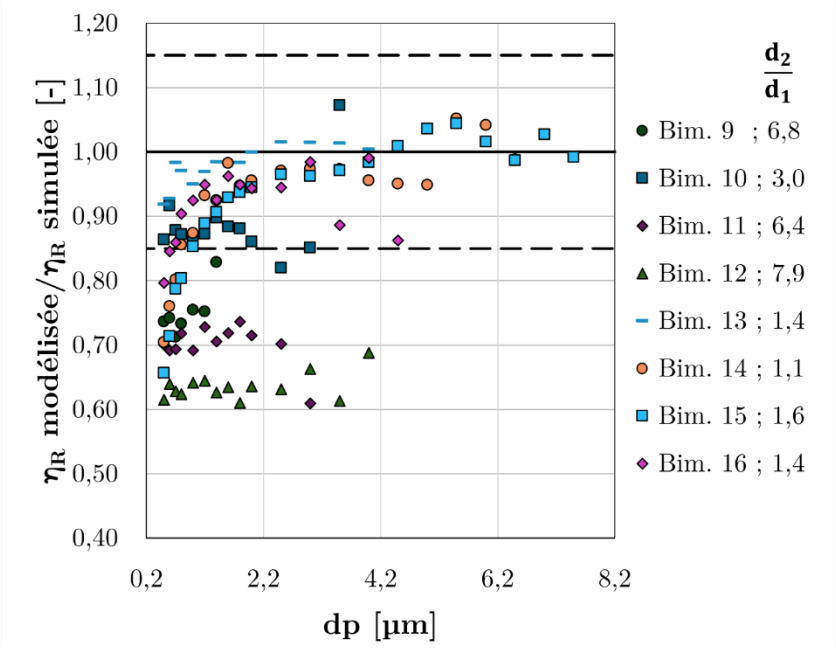


Figure 5-10 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par interception modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures bimodales (b)

La Figure 5-11 compare les MRD calculés pour les différentes structures pour un diamètre de particule compris entre 0,3 µm et 8 µm.

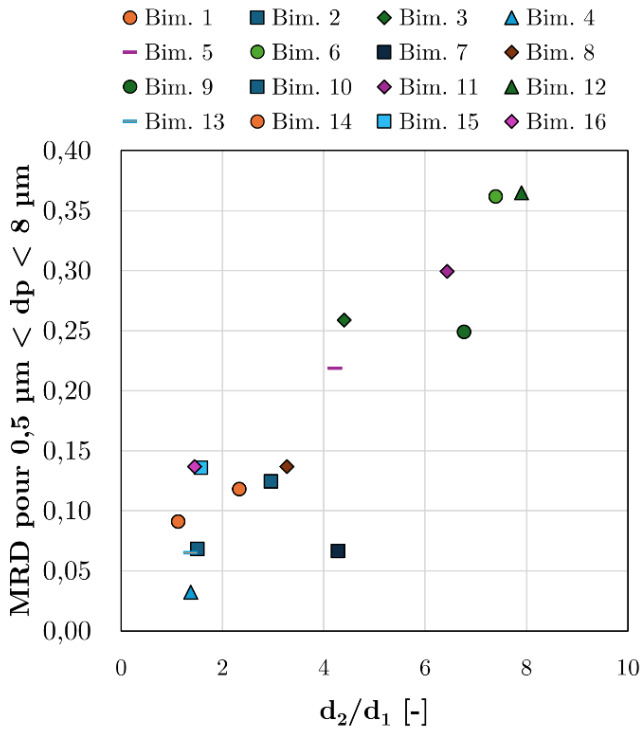


Figure 5-11 : Évolution de l'écart relatif moyen (MRD) sur une plage de diamètre de particule entre 0,3 et 8 µm en fonction du ratio entre les deux modes des distributions bimodales

Le modèle LRGP associé au diamètre équivalent offre une bonne précision, avec des écarts inférieurs à 15 %, pour des structures bimodales dont le ratio entre le diamètre des deux modes est inférieur à 4. En revanche, plus ce ratio augmente, plus l'écart entre les valeurs simulées et celles prédites par le modèle devient significatif. Cela suggère que le diamètre équivalent ne semble pas totalement pertinent pour modéliser le mécanisme d'interception, notamment pour des structures bimodales ayant un ratio élevé entre les deux modes. Les fibres fines qui contribuent davantage au mécanisme d'interception n'ont pas suffisamment de poids dans le diamètre équivalent. Cette sous-représentation est d'autant plus amplifiée que l'écart entre les deux modes est important.

L'application du modèle LRGP, couplé au diamètre équivalent, aux six structures trimodales simulées (Tableau 5-3), dont le ratio entre la fibre la plus fine et la plus épaisse reste inférieur à 2,7, conduit à des prédictions d'efficacité unitaire par interception à ± 15 % sur l'ensemble de la gamme de diamètres de particules étudiée (Figure 5-12).

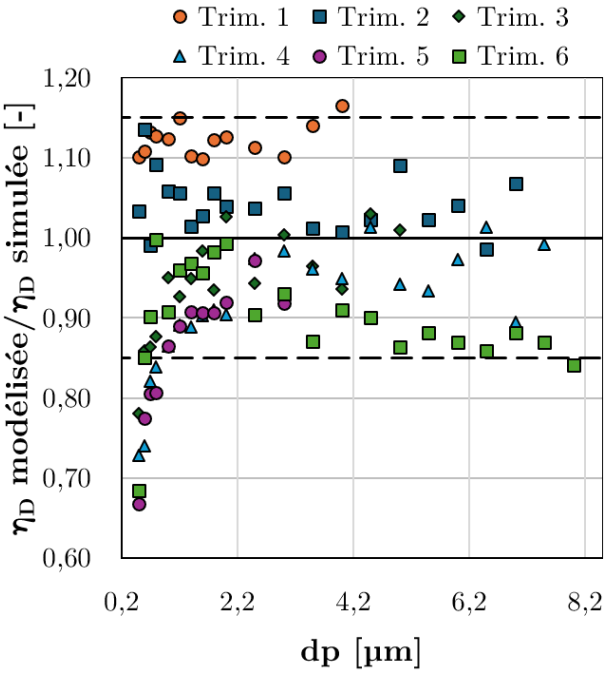


Figure 5-12 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par interception modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures trimodales

En conclusion, pour des distributions monomodales à trimodales, mais avec un ratio entre le plus petit et le plus grand diamètre inférieur à 4, le diamètre équivalent développé au cours de cette thèse permet, lorsqu'il est associé au modèle LRGP, d'obtenir des prédictions d'efficacité unitaire par interception avec une précision de ± 15 %. En revanche, pour des structures présentant des écarts plus importants entre les deux diamètres extrêmes de la distribution, ce diamètre équivalent ne reflète pas correctement l'influence des fibres fines, entrainant des écarts plus importants entre les valeurs simulées et modélisées.

Ce constat peut s'expliquer par la manière dont le diamètre équivalent a été défini, initialement pour prédire la perméabilité. Sa pertinence a été démontrée, non seulement pour la prédiction de la perte de charge, phénomène corrélé au frottement à la surface des fibres, mais également pour le mécanisme de diffusion, dépendant lui aussi de la surface disponible pour le dépôt des particules. En revanche, le mécanisme d'interception est principalement gouverné par l'aéraulique, c'est-à-dire par l'écoulement autour des fibres. Ainsi, cela limite la pertinence de ce diamètre équivalent dans ce mécanisme de collecte pour des structures multimodales, et nécessite le développement d'un autre diamètre équivalent plus représentatif de ces structures.

5.1.4 Efficacité de collecte par inertie

En considérant que l'interception et l'inertie sont deux mécanismes indépendants, la contribution de l'interception peut être retirée de l'efficacité mécanique globale simulée, afin d'isoler l'efficacité de filtration liée uniquement à l'inertie (voir section 5.1.1).

Les six modèles issus de la littérature (voir section 1.3.5 du chapitre 1), proposés par Langmuir (LAN), Friedlander (FRIE), Stechkina et al. (STE), Gougeon (GOU), Landhal et Hermann (LetH) et Ilias et Douglas (IetD), peuvent ainsi être appliqués aux structures monomodales présentés dans le Tableau 5-1, et comparés aux données simulées d'efficacité unitaire par inertie pour des diamètres de particules compris entre 1 et 8 µm.

La Figure 5-13 et la Figure 5-14 comparent l'évolution de l'efficacité unitaire par inertie, simulées et modélisées, en fonction du diamètre de particule pour les structures Mono. 1 et Mono. 5. Les figures relatives aux autres structures monomodales sont présentées dans l'annexe 5-C.

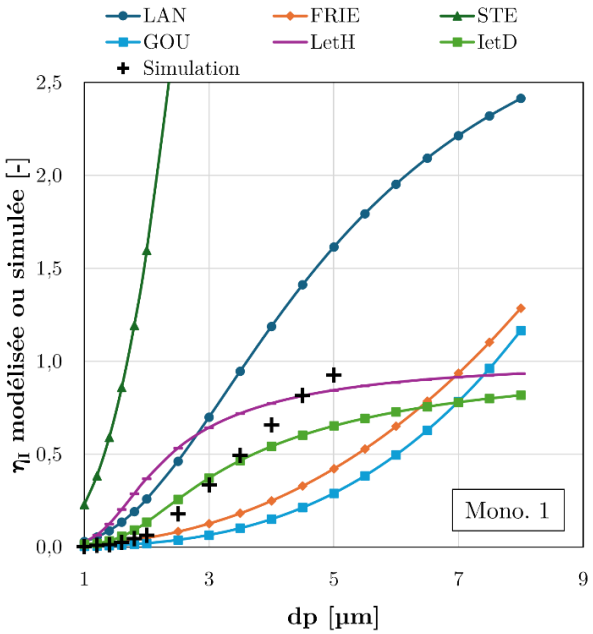


Figure 5-13 : Évolution des efficacités unitaires par inertie simulées et modélisées pour la structure Mono. 1 en fonction du diamètre de particule

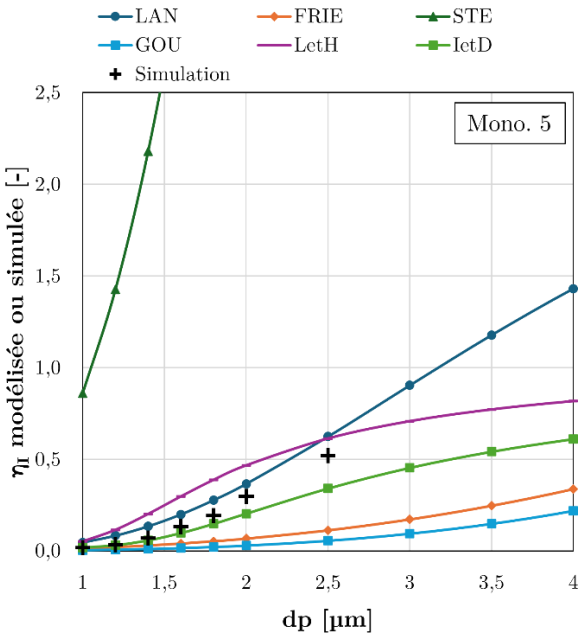


Figure 5-14 : Évolution des efficacités unitaires par inertie simulées et modélisées pour la structure Mono. 5 en fonction du diamètre de particule

Aucun des modèles prédictifs issus de la littérature n'apparait pertinent pour modéliser les efficacités unitaires par inertie pour toutes les structures monomodales, de diamètres et de compacité différentes

Il est cependant important de préciser que la méthode employée pour déterminer l'efficacité unitaire par inertie présente ses limites lorsque les structures sont fortement efficaces et que toutes les particules d'un diamètre donné sont collectées. Par exemple, pour la structure Mono. 5, l'efficacité mécanique globale atteint 100 % pour des diamètres de particules supérieurs à 2,5 µm. Dans ces conditions, il devient impossible de dissocier les contributions respectives des mécanismes d'interception et d'inertie, limitant ainsi le nombre de données simulées utilisables (Figure 5-14). Face à ce constat, la problématique liée aux structures très efficaces pour les grandes tailles de particules nécessiterait d'effectuer de nouvelles simulations, en particulier en diminuant l'épaisseur des structures, afin d'éviter que l'efficacité fractionnelle globale n'atteigne 100 % pour de nombreux diamètres de particules et de garantir un plus grand nombre de données utilisables pour évaluer les modèles. Ainsi, bien que l'approche proposée permette d'isoler l'efficacité unitaire par inertie, cette méthode montre ses limites lorsque la structure est fortement efficace, ce qui restreint la portée de l'analyse, en particulier dans la gamme de diamètres de particules où le mécanisme inertiel devient important.

Il est important de noter que l'obtention de ces données simulées repose sur une hypothèse forte : celle de considérer les mécanismes d'interception et d'inertie indépendants. Cette hypothèse simplificatrice permet, en théorie, de soustraire la contribution de l'interception à l'efficacité globale afin d'isoler celle de l'inertie. Cependant, en comparaison du mécanisme de diffusion, dont l'influence devient négligeable dès que le mécanisme d'interception commence à apparaitre, les mécanismes d'interception et d'inertie coexistent pour des diamètres de particules supérieurs à 1 µm.

Étant donné qu'aucun modèle de la littérature ne reproduit correctement les efficacités unitaires simulées, et qu'il semble difficile de séparer le mécanisme inertiel de celui par interception, trois modèles couplant ces deux mécanismes et proposés par Muhr (cité par Schweers *et al.* [121]), Ptak [122] et Schweers *et al.* [121], ont été testés (Tableau 5-6).

Le mécanisme de diffusion étant négligeable pour des diamètres de particules supérieurs à 1 µm, l'efficacité unitaire de fibre obtenue par simulation prend en compte les mécanismes d'interception et d'inertie. Elle peut donc être directement comparées aux modèles d'efficacité unitaire présentés dans le Tableau 5-6. La Figure 5-15 et la Figure 5-16 comparent ces efficacités unitaires simulées et modélisées en fonction du diamètre de particule pour les structures Mono. 1 et 5.

Tableau 5-6 : Expressions de l'efficacité unitaire par inertie et interception selon différents auteurs

Auteurs	**Expressions de η_{RI}**	
Muhr (1976) cité par Schweers *et al.* (1994) **[121]**	$\left[\frac{1}{\left(1+\frac{1{,}53-0{,}23\ln(\mathrm{Re_f})+0{,}0167\ln(\mathrm{Re_f})^2}{\mathrm{Stk}}\right)^2}+\frac{2}{3}\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{Stk}}\right]\times(1+\mathrm{R})$ Étude avec $\mathrm{Re_f}<500, \mathrm{R}<0{,}15, 1<\mathrm{Stk}<20$	*Eq. 5-11*
Ptak (1990) **[122]**	$\frac{\left(\mathrm{Stk}'-0{,}75\,\mathrm{Re_f^{-0{,}2}}\right)^2}{(\mathrm{Stk}'+0{,}4)^2}+\mathrm{R}^2$ Étude avec $0{,}6<\mathrm{Re_f}<6$ et $\mathrm{R}\leq 0{,}64$	*Eq. 5-12*
Schweers *et al.* (1994) **[121]**	$\left(\frac{\mathrm{Stk}'}{\mathrm{Stk}'+0{,}8}-\frac{2{,}46-\log_{10}(\mathrm{Re_f})-3{,}2\,\mathrm{R}}{10\sqrt{\mathrm{Stk}'}}\right)(1+\mathrm{R})$ Étude avec $1<\mathrm{Re_f}<60$ et $\mathrm{R}\leq 0{,}15$	*Eq. 5-13*

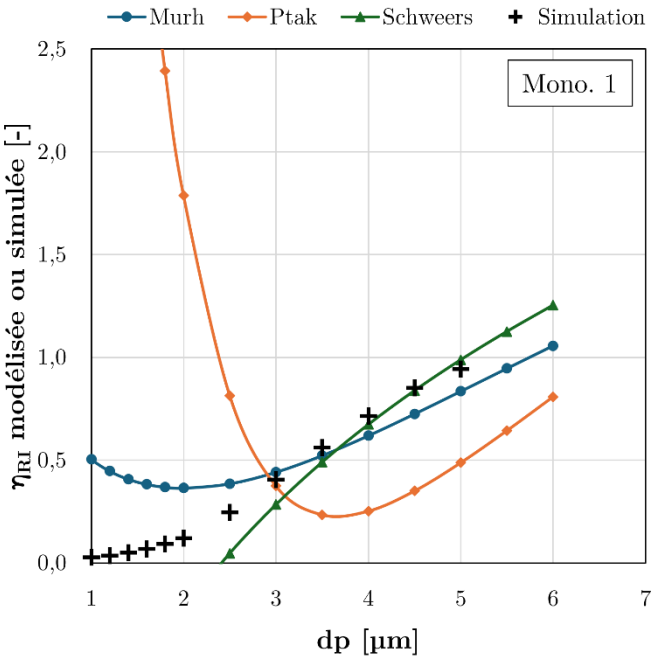


Figure 5-15 : Évolution des efficacités unitaires par inertie et interception, simulées et modélisées, pour la structure Mono. 1 en fonction du diamètre de particule

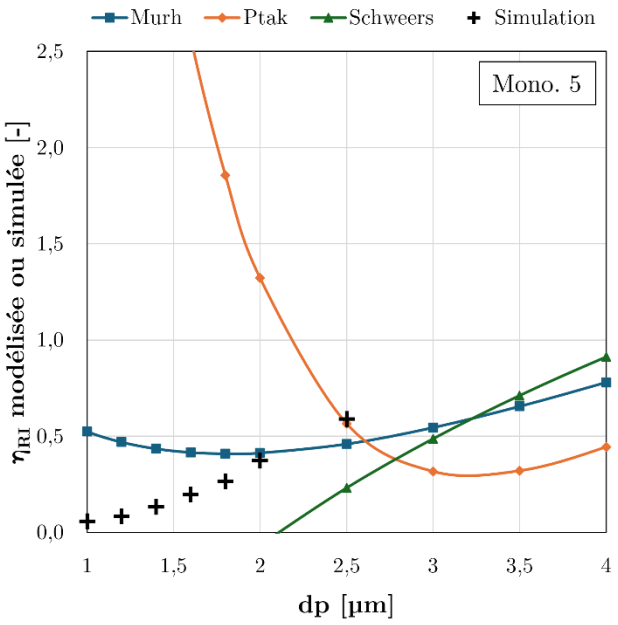


Figure 5-16 : Évolution des efficacités unitaires par inertie et interception, simulées et modélisées, pour la structure Mono. 5 en fonction du diamètre de particule

Les modèles de Muhr et de Ptak présentent une efficacité minimale ce qui est incohérent avec l'évolution observée des efficacités simulées. Ce comportement est probablement lié au fait que les conditions simulées ne correspondent pas aux plages de nombre de Reynolds de fibre ni aux valeurs du paramètre d'interception R pour lesquelles ces modèles ont été développés.

Pour la structure Mono.1, le modèle de Schweers présente une bonne adéquation avec les efficacités simulées à partir d'un diamètre de particules de 3,5 µm. Cependant, le nombre limité de données exploitables pour les autres structures, dont l'efficacité atteint 100 % pour des diamètres supérieurs à 2,5 µm, ne permet pas de valider complétement ce modèle.

En conclusion, les écarts observés entre les résultats simulés et les modèles soulignent la nécessité de développer ou d'adapter les modèles existants, afin de mieux représenter les phénomènes inertiels, qu'il s'agisse du mécanisme d'inertie seul ou bien du mécanisme couplé interception / inertie.

Par ailleurs, des simulations complémentaires devraient être effectuées, soit en diminuant l'épaisseur des structures fortement efficaces afin d'augmenter le nombre de données utilisables mais en faisant l'hypothèse que les mécanismes d'inertie et d'interception sont indépendants, soit en développant une nouvelle méthode permettant de simuler directement le mécanisme inertiel.

Au vu des difficultés rencontrées dans l'étude des efficacités unitaires de collecte associés aux différents mécanismes, la suite de l'étude se concentrera sur l'efficacité fractionnelle globale.

5.2 À la recherche d'une structure fibreuse optimale

Pour optimiser les performances des médias fibreux dans des applications de filtration ou de purification de l'air, un compromis doit être trouvé entre une faible perte de charge et une haute efficacité de filtration. Cet équilibre constitue un véritable défi technique, en particulier lorsque les applications exigent des performances élevées combinées à une faible consommation énergétique.

Comme présenté précédemment au cours de ces travaux, ces deux paramètres sont fortement influencés par les caractéristiques structurales des médias, telles que son épaisseur, sa compacité et la distribution des diamètres des fibres. Cela souligne la complexité de la recherche d'une structure dite « optimale », qui dépend fortement des exigences spécifiques à chaque application.

Dans cette optique, une étude a été menée sur des médias iso-perméables, afin d'étudier l'influence des caractéristiques des structures fibreuses sur l'efficacité de filtration.

5.2.1 Structures iso-perméables

À partir de l'approche développée au cours de cette thèse pour des fibres microniques en régime d'écoulement continu (Eq. 5-14), intégrant le facteur hydrodynamique d'Happel modifié et un nouveau diamètre équivalent représentatif de la distribution de diamètre de fibres de la structure fibreuse, il est envisageable en jouant sur la compacité et sur le diamètre équivalent (donc la distribution de tailles des fibres) d'obtenir différentes structures fibreuses ayant la même perméabilité

$$\kappa = d_{eq}^2 \frac{(5/2)^{\frac{1}{4}}}{32\,\alpha}\left(-\ln(\alpha) + \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 + 1}\right) \qquad \textit{Eq. 5-14}$$

En traçant les courbes d'iso-perméabilité, il est possible d'identifier les propriétés structurales spécifiques du filtre pour atteindre une perméabilité souhaitée. La Figure 5-17 présente différentes courbes d'iso-perméabilité entre 2×10^{-13} m² et 5×10^{-10} m², en fonction du diamètre équivalent et de la compacité.

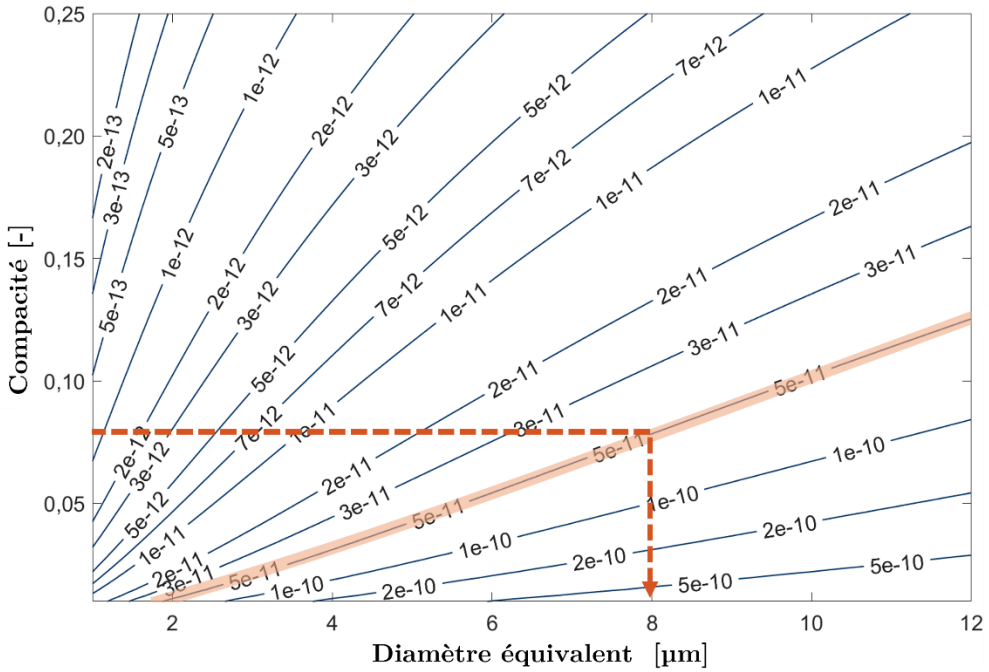


Figure 5-17 : Courbes d'iso-perméabilité en régime continu en fonction des paramètres structurales d'un média (compacité et diamètre équivalent)

À titre d'exemple, si une perméabilité de 5×10^{-11} m² est souhaitée, diverses structures présentant des combinaisons variées de compacité et de diamètre équivalent peuvent être utilisées. Par exemple, pour une compacité de 8 %, la distribution des diamètres de fibres devra conduire à un diamètre équivalent de 8 µm. Il est également important de souligner qu'il existe une infinité de distributions de diamètres de fibres pouvant conduire à ce même diamètre équivalent, qu'il s'agisse de distributions bimodales, trimodales ou multimodales, ce qui induit une grande diversité de médias potentiels.

En considérant une distribution bimodale (Eq. 3-9), il est possible de tracer des iso-courbes du diamètre équivalent en fixant un paramètre. Deux exemples sont présentés dans la Figure 5-18, où le diamètre des fibres fines (d_1) est fixé à 2 µm et 6 µm, respectivement. Les figures montrent que, pour un diamètre fin fixé (d_1), des médias avec différents couples ($d_2; f_{V1}$) peuvent conduire au même diamètre équivalent.

$$d_{eq}^{Bimodale} = \left[\frac{1}{\frac{f_{V1}}{d_1^{\frac{3}{2}}} + \frac{(1 - f_{V1})}{d_2^{\frac{3}{2}}}} \right]^{\frac{2}{3}} \qquad \textit{Eq. 5-15}$$

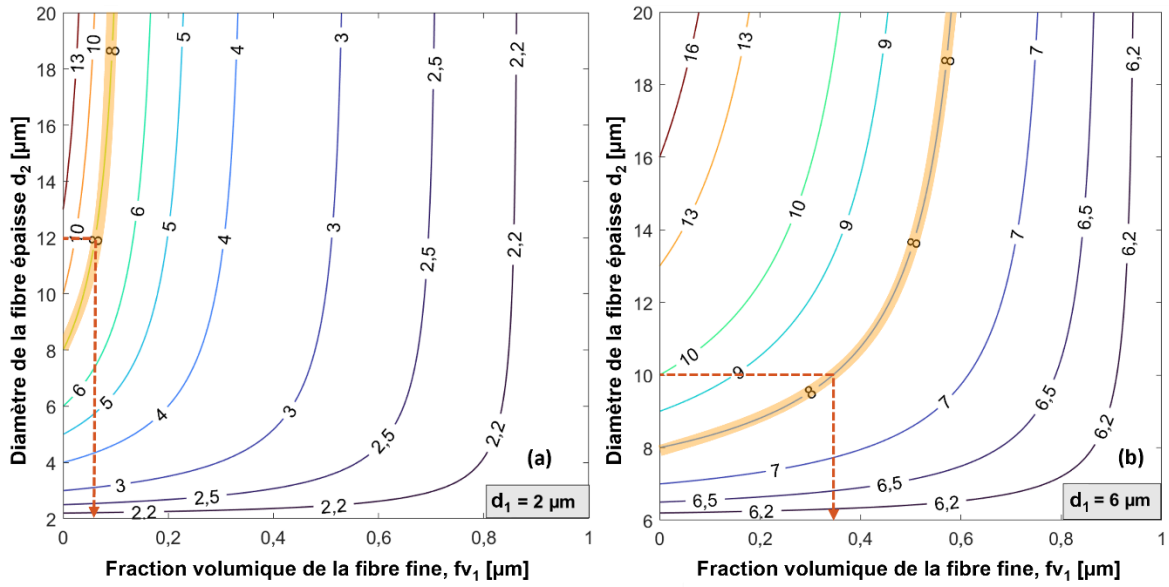


Figure 5-18 : Courbes iso-diamètre équivalent pour une distribution bimodales avec $d_1 = 2$ µm (a) ou $d_1 = 6$ µm (b)

En reprenant l'exemple présenté dans la Figure 5-17, plusieurs configurations de structures bimodales peuvent ainsi conduire à un diamètre équivalent de 8 µm (Figure 5-18). Si des fibres de 2 µm sont disponibles pour la conception du média, la structure fibreuse peut être constituée de 6 % en volume (ou en masse, en supposant une même masse volumique entre les deux fibres représentatives des deux modes) de fibres de 12 µm (Figure 5-18 a). De plus, compte tenu de l'allure de la courbe d'iso-diamètre équivalent à 8 µm, ce diamètre équivalent semble peu dépendant du diamètre de la fibre épaisse. En effet, l'augmentation du diamètre de la fibre épaisse au-delà de 8 µm engendre une faible variation de sa fraction volumique dans la distribution. À l'inverse, si l'on utilise des fibres de 6 µm, le filtre devra, par exemple, contenir environ 35 % en volume de fibres de 10 µm pour atteindre le diamètre équivalent de 8 µm.

Ces courbes d'iso-perméabilité et d'iso-diamètre équivalent peuvent ainsi permettre un premier choix basé sur des considérations économiques (coût des fibres selon le diamètre) ou techniques (possibilité de fabrication de fibres du diamètre sélectionné). La grande flexibilité d'associations de distributions de fibres et de compacité permet néanmoins d'espérer pouvoir concevoir une structure fibreuse de perméabilité souhaitée.

Dans un objectif d'optimisation des performances d'un média filtrant, différentes combinaisons de fibres peuvent conduire à une perte de charge équivalente pour une même épaisseur de média. Ainsi, l'amélioration de la tenue mécanique du filtre, ou encore la diminution des coûts d'achat selon les diamètres de fibres sélectionnées, sans modifier la perte de charge, est tout à fait envisageable.

Ces réflexions soulèvent une première question fondamentale : quel est l'impact de l'iso-perméabilité de structures fibreuses sur leur efficacité de filtration ?

5.2.2 Influence des caractéristiques structurales de médias iso-perméables sur l'efficacité de filtration

Pour explorer la problématique de l'influence de l'iso-perméabilité sur l'efficacité de filtration, l'étude s'est concentrée sur deux types de médias iso-perméables :

- Les médias iso-perméables de **même compacité et diamètre équivalent**, où les médias se différencient par leur distribution de taille de fibre qui peut être monomodale, bimodale ou trimodale. Chacun de ces médias correspond ainsi à un point donné sur une courbe d'iso-perméabilité de la Figure 5-17.
- Les médias iso-perméables de **compacité et diamètre équivalent différents**, ce qui correspond à balayer différents couples (compacité ; d_{eq}) situés le long d'une même courbe d'iso-perméabilité de la Figure 5-17.

a. Structures iso-perméables de même compacité et diamètre équivalent

La première étape de cette étude sur les médias iso-perméables consiste à analyser l'influence de la taille des fibres sur l'efficacité de filtration, tout en maintenant une perméabilité constante. Cela revient à générer plusieurs microstructures de même compacité et même diamètre équivalent, mais avec des distributions de tailles de fibres différentes : monomodales, bimodales et trimodales.

À partir des lignes d'iso-perméabilité, six couples (compacité ; d_{eq}) ont été testés, chacun représenté par une croix sur la Figure 5-19. Dans cette section, l'analyse se concentre sur le couple (10 % ; 6,20 µm), issu de la ligne d'iso-perméabilité de 2×10^{-11} m². Les résultats correspondant aux cinq autres couples sont résumés en annexe 5.D.

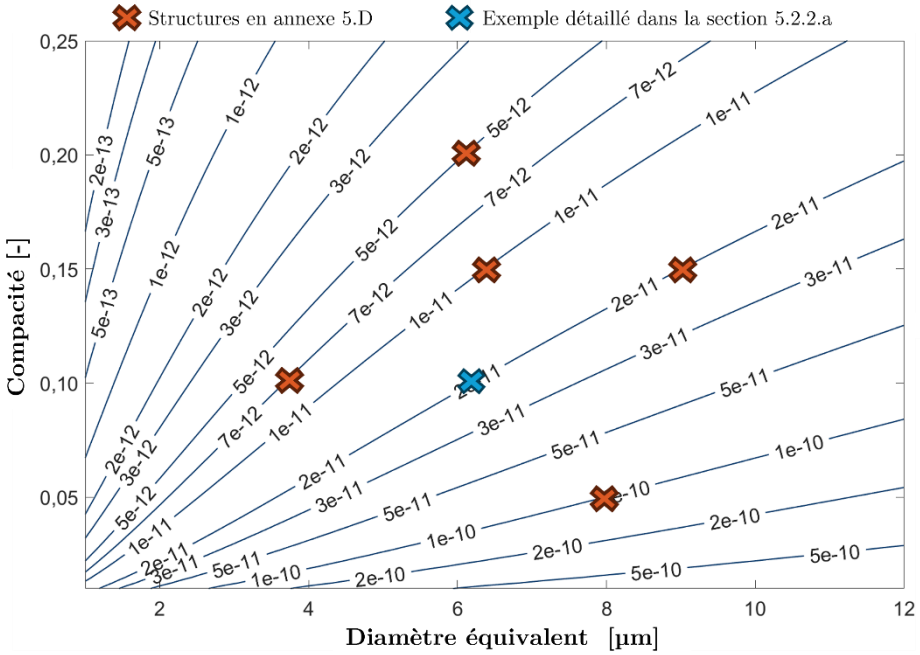


Figure 5-19 : Structures iso-perméables étudiées de même compacité et diamètre équivalent

Pour ce couple (10 % ; 6,20 µm), une structure de distribution monomodale, une de distribution bimodale et deux de distributions trimodales, toutes correspondant à un diamètre équivalent de 6,20 µm, ont été générées. Les propriétés de ces quatre microstructures sont résumées dans le Tableau 5-7. Les simulations d'écoulement ont confirmé que l'ensemble des structures présente bien une perméabilité identique, conforme à la valeur attendue de la courbe d'iso-perméabilité correspondante, et ce, indépendamment de la distribution de diamètres de fibres.

Tableau 5-7 : Propriétés des microstructures de même compacité de 10 % et diamètre équivalent de 6,20 µm sur l'iso-courbe 2×10^{-11} m^2

Structures	**α**	**d_1 (µm)**	**d_2 (µm)**	**d_3 (µm)**	**f_{v1}**	**f_{v2}**	**f_{v3}**	**d_{eq} (µm)** (eq. x)	**$\kappa_{simulée}$ (m^2)**
Mono.	0,10	6,20	/	/	1,00	/	/	6,20	$2,07 \times 10^{-11}$
Bim.	0,10	5,79	6,53	/	0,41	0,59	/	6,20	$2,07 \times 10^{-11}$
Trim. 1	0,10	3,33	6,91	8,14	0,11	0,74	0,16	6,20	$2,06 \times 10^{-11}$
Trim. 2	0,10	5,36	7,12	8,22	0,49	0,35	0,16	6,20	$2,05 \times 10^{-11}$

Pour chacune de ces structures, l'efficacité de collecte est simulée pour une distribution de particules allant de 0,01 µm à 8 µm, une vitesse de 10 cm/s et des épaisseurs de média équivalentes entre les différentes microstructures. La Figure 5-20 compare les efficacités fractionnelles de collecte en fonction du diamètre de particules, pour les quatre types de structures.

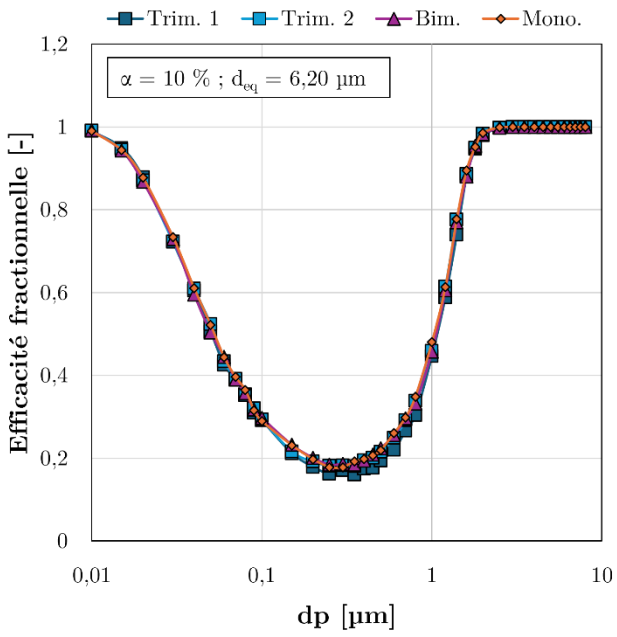


Figure 5-20 : Comparaison des efficacités fractionnelles de collecte de structures monomodales, bimodales et trimodales de même compacité et même diamètre équivalent

Les simulations d'efficacité de filtration (Figure 5-20) révèlent des résultats très similaires entre les différentes distributions de fibres. À compacité identique, les structures fibreuses présentant le même diamètre équivalent, et par conséquent une perméabilité identique,

montrent également une efficacité de collecte comparable. Ces conclusions sont confirmées par l'analyse des cinq autres microstructures présentant des couples compacité / d_{eq} et donc des perméabilités différentes (annexe 5.D).

Des simulations supplémentaires d'efficacité de filtration ont été réalisées sur ces structures, pour différentes vitesses de filtration : 2 cm/s, 5 cm/s et 20 cm/s. La Figure 5-21 compare les efficacités fractionnelles simulées pour trois types de distribution (monomodale, bimodale et trimodale), à compacité et diamètre équivalent identiques, selon différentes vitesses de filtration.

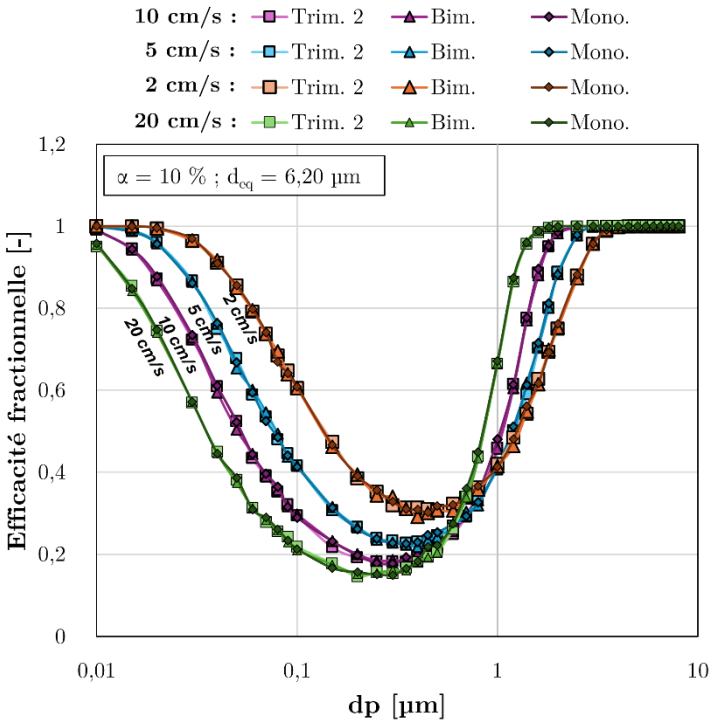


Figure 5-21 : Comparaison des efficacités fractionnelles de collecte pour différentes distributions (monomodale, bimodale, trimodale), à compacité et diamètre équivalent identiques, pour plusieurs vitesses de filtration

Pour une distribution donnée, les variations attendues de l'efficacité fractionnelle en fonction de la vitesse de filtration sont observées. Pour des diamètres de particules inférieurs à la MPPS (régime diffusionnel), l'efficacité diminue à mesure que la vitesse augmente. À l'inverse, pour les plus grands diamètres de particules, où les effets inertiels deviennent prédominants, l'efficacité augmente avec la vitesse.

Pour une vitesse de filtration donnée, les efficacités fractionnelles de filtration restent identiques pour les trois distributions de fibres, sur l'ensemble de la plage de diamètres de particules testée. Au vu de ces résultats, un potentiel d'optimisation de la structure fibreuse semble exister, que ce soit en termes de coût de fabrication et/ou de résistance mécanique, sans compromettre les performances, en jouant uniquement sur la taille des fibres.

Il convient de souligner que ces résultats ont été obtenus pour des structures bimodales et trimodales avec un ratio entre les diamètres fin et épais inférieur à 4. Dans cette situation, l'utilisation du diamètre équivalent s'est révélée pertinente (voir 5.1.2 et 5.1.3), notamment pour modéliser les mécanismes de diffusion et d'interception. En revanche, si ce ratio augmente, les écarts entre les efficacités fractionnelles des microstructures monomodales, bimodales et trimodales pourraient devenir significatifs, en particulier dans les plages de diamètres de particules où les mécanismes d'interception et d'inertie prédominent.

La simulation de structures iso-perméables, de même compacité et diamètre équivalent, avec des ratios de diamètre supérieurs à 4, n'a pas pu être réalisée. En effet, il s'est avéré impossible de conserver une résolution suffisante pour représenter les fibres fines tout en maintenant un nombre suffisant de fibres, fines et épaisses, dans un domaine de calcul compatible avec les ressources de la station de calcul disponible au laboratoire.

Les résultats précédents ont montré une efficacité de filtration similaire entre les structures, mais qu'en est-il de la zone de dépôt des particules au sein du média ?

Pour étudier cet aspect, la localisation des particules collectées en fonction de la profondeur de la structure a été analysée, pour différentes tailles de particules. En particulier, dix diamètres de particules ont été sélectionnés afin de couvrir l'ensemble de la plage étudiée (Figure 5-22).

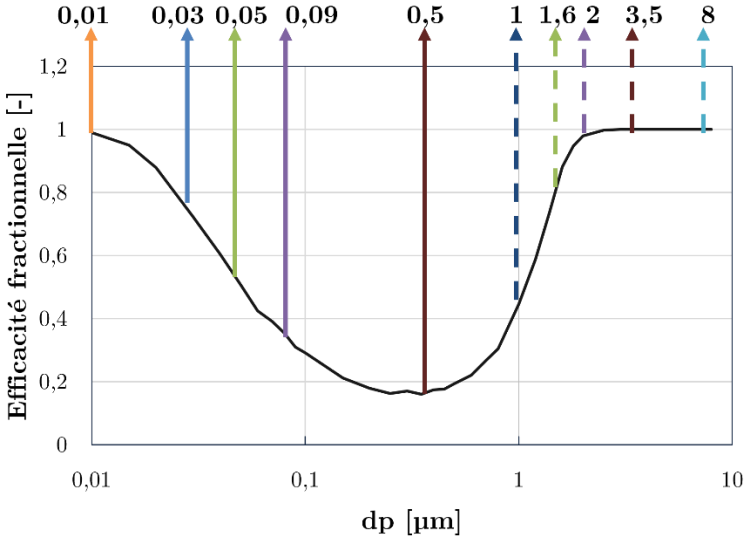


Figure 5-22 : Répartition des diamètres de particules analysés pour des structures de compacité 10 % et diamètre équivalent 6,20 µm

Pour chaque couche d'épaisseur (Z_i) et pour chaque diamètre de particules étudiées (d_p), le nombre de particules collectées a été extrait suite aux simulations. Ainsi, les taux de pénétration, T, des particules en fonction de la profondeur dans le média, pour chacune des structures (monomodales, bimodales et trimodales) peuvent être déterminés.

$$T\,(Z_i) = \frac{\text{nombre de particules non collectées à l'épaisseur } Z_i}{\text{nombre de particules injectées}} \qquad \textit{Eq. 5-16}$$

La Figure 5-23 compare l'évolution des taux de pénétration pour différents diamètres de particules, en fonction de la profondeur, pour les structures monomodales, bimodales et trimodales du couple (10 % ; 6,20 µm), issu de la ligne d'iso-perméabilité de 2×10^{-11} m².

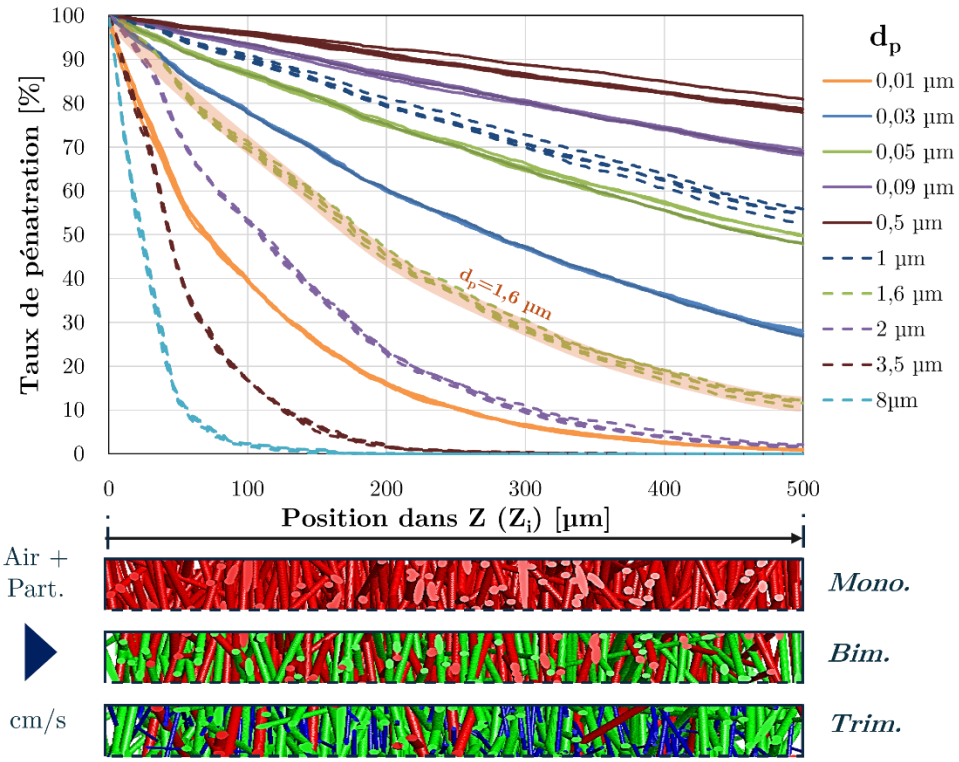


Figure 5-23 : Évolution des taux de pénétration dans les structures iso-perméables monomodales, bimodales et trimodales (couple 10 % ; 6,20 µm) pour différents diamètres de particules

Dans la Figure 5-23, prenons l'exemple des particules de diamètres 1,6 µm. Quatre courbes sont tracées, correspondant aux deux structures trimodales ainsi qu'aux structures monomodale et bimodale. Pour une épaisseur de 0 µm (face amont du média filtrant), 100 % des particules sont non filtrées. En se déplaçant dans la structure, le taux de pénétration diminue progressivement, reflétant la collecte des particules dans la profondeur.

Que ce soit pour ce diamètre de particules ou pour les autres présentés dans la Figure 5-23, les quatre courbes sont très similaires, quelle que soit la distribution de fibres raison pour laquelle elles n'ont pas été différenciées. Les particules semblent ainsi être collectées au même endroit, indépendamment de la distribution de diamètre des fibres, pour des structures iso-perméables de même compacité et même diamètre équivalent. Cela suggère que la cinétique de colmatage de ces différentes structures pourrait également être similaire.

b. Structures iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différent

Pour approfondir l'analyse, trois microstructures bimodales iso-perméables, présentant des compacités et diamètres équivalents différents, ont été générées et étudiées, et ce pour quatre courbes d'iso-perméabilité différentes (Figure 5-24).

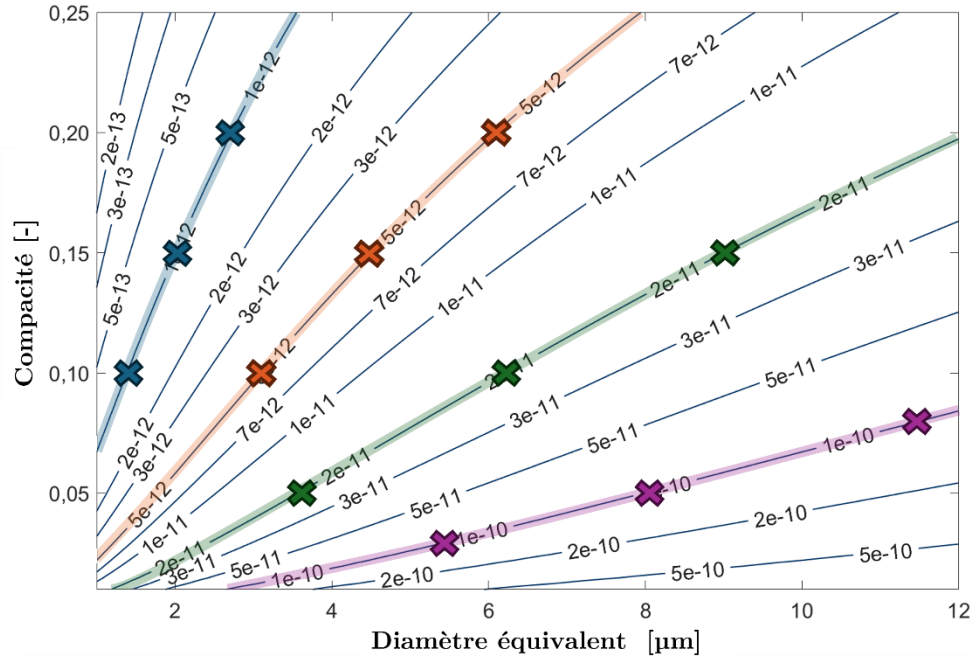


Figure 5-24 : Structures iso-perméables étudiées de compacité et diamètre équivalent différents

Dans cette section, sont présentés les résultats pour les structures issues des courbes d'iso-perméabilité de 2×10^{-11} m² et 10^{-12} m², dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 5-8. Les résultats correspondant aux structures issues des deux autres courbes d'iso-perméabilité sont présentés en annexe 5.E.

Tableau 5-8 : Paramètres des microstructures bimodales iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différents pour les courbes d'iso-perméabilité de 2×10^{-11} m^2 et 10^{-12} m^2

	Iso-perméabilité : 2×10^{-11} m²			**Iso-perméabilité : 10^{-12} m²**		
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas1	Cas 2	Cas 3
d_1 (µm)	3	3	3	1,2	1,2	1,2
f_{v1}	0,4	0,25	0,15	0,78	0,35	0,25
d_2 (µm)	4,32	12,67	22,19	5,14	3,92	8,13
f_{mv2}	0,6	0,75	0,85	0,22	0,65	0,75
α	**0,05**	**0,10**	**0,15**	**0,10**	**0,15**	**0,20**
d_{eq} (µm)	**3,57**	**6,20**	**9,01**	**1,39**	**2,01**	**5,15**
$\kappa_{simulée}$ (µm²)	20,7	20,5	20,3	1,06	1,07	1,09

Pour chacune de ces structures iso-perméables, dont la compacité et le diamètre équivalent diffèrent, l'efficacité fractionnelle de collecte est simulée pour une vitesse de filtration de 10 cm/s. La Figure 5-25 compare les efficacités fractionnelles obtenues pour les structures bimodales issues des courbes d'iso-perméabilité de 2×10^{-11} m² et 10^{-12} m².

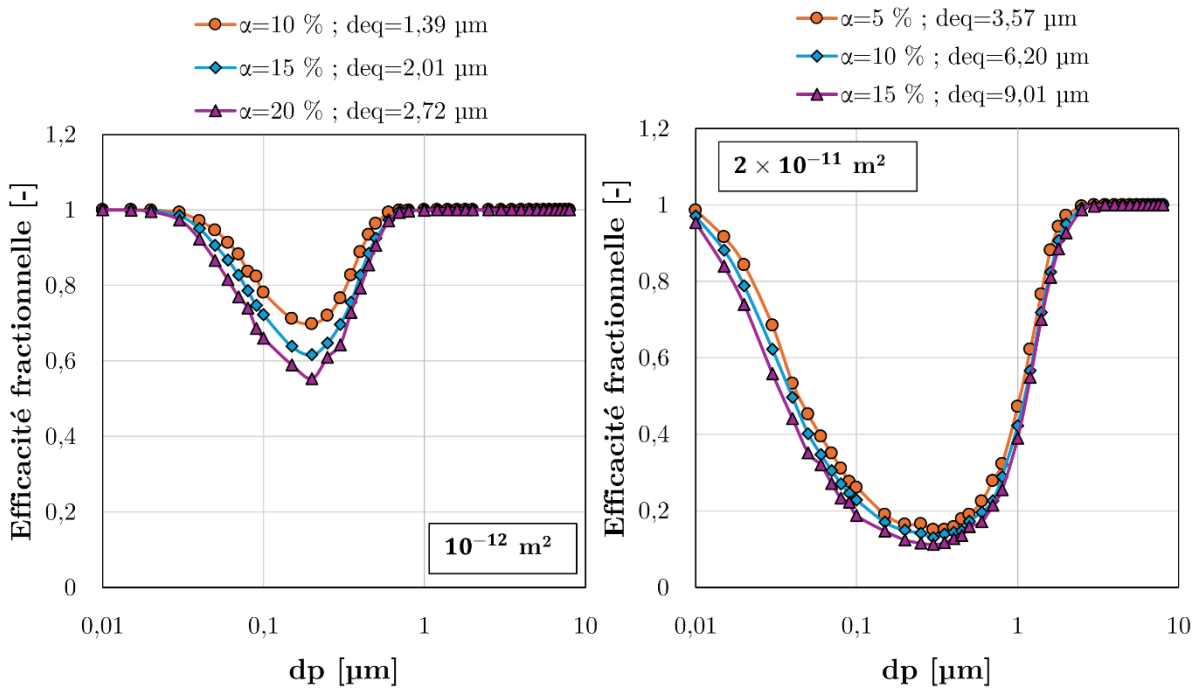


Figure 5-25 : Comparaison des efficacités fractionnelles de collecte pour des structures bimodales iso-perméables, de compacités et diamètres équivalents différents

Bien que les microstructures présentent une perméabilité identique, les efficacités fractionnelles de collecte sont quant à elles différentes, ce qui montre que l'influence respective des deux propriétés, compacité et diamètres de fibres, ne sont pas équivalentes dans la prédiction de la perméabilité et de l'efficacité. Une tendance semble apparaitre puisque la diminution de la compacité et du diamètre équivalent, à perméabilité constante, conduit à une efficacité accrue. Ce résultat suggère l'existence d'un optimum et la possibilité de fabriquer des structures offrant de meilleures efficacités tout en conservant la même perméabilité.

Dans la mesure où la structure fibreuse d'un média conditionne non seulement sa perméabilité, mais aussi sa tenue mécanique et son efficacité de filtration, il est essentiel de trouver un compromis entre ces différents paramètres pour concevoir des médias adaptés aux exigences spécifiques de chaque application.

5.2.3 Figure de mérite

Dans la littérature [59,79], la figure de mérite (*Figure of Merit*, FOM) ou facteur de qualité (*Quality Factor*, QF) est un paramètre couramment utilisé pour caractériser et comparer les performances des médias filtrants. Elle s'exprime en fonction de l'efficacité (E) et de la perte de charge (ΔP), permettant ainsi d'évaluer globalement les performances d'un média en tenant compte simultanément de ces deux critères. Un filtre idéal, combinant une très haute efficacité et une très faible perte de charge, présentera une valeur de FOM importante.

Dans cette étude, la FOM a été calculée pour un diamètre de particule donné, afin de s'affranchir de l'influence de la distribution granulométrique. En effet, un calcul basé sur l'efficacité de filtration totale rendrait ce paramètre dépendant de la distribution granulométrique de l'aérosol en amont, et non uniquement de la structure du média.

$$\mathrm{FOM}\,(d_{pi}) = \frac{-\ln\left(1 - \mathrm{E}\,(d_{pi})\right)}{\Delta P} \qquad \textit{Eq. 5-17}$$

Pour différents couples de compacité et de diamètre équivalent, la perte de charge et l'efficacité de filtration à une vitesse de 10 cm/s ont été simulées pour 29 structures présentant des distributions monomodales ou bimodales. À partir de ces résultats, le paramètre FOM peut être calculé pour différents diamètres de particules.

Pour un diamètre de particule de 0,03 µm, la Figure 5-26 présente les valeurs de FOM obtenues pour l'ensemble des structures correspondant à des couples (compacité ; d_{eq}) différents. Les structures les plus performantes sont celles associées aux valeurs de FOM les plus élevées, traduisant un bon compromis entre efficacité de filtration et perte de charge.

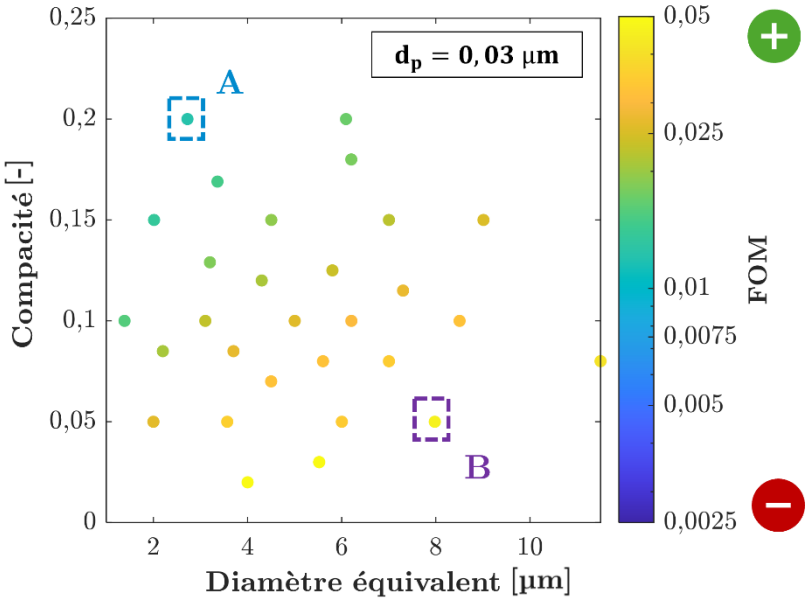


Figure 5-26 : Cartographie des FOM obtenues pour différentes structures simulées

Il convient de souligner que le paramètre FOM représente un rapport entre deux performances (efficacité et perte de charge). Ainsi, prenons l'exemple de deux points opposés, A et B, figurant sur la Figure 5-26, et correspondant respectivement à une faible et à une haute valeur de FOM.

D'après les valeurs de FOM, la structure B semble plus performante que la structure A (Tableau 5-9). Bien qu'elle présente une perte de charge très faible, son efficacité de filtration est également faible, ce qui, en l'état, la rend peu intéressante pour un procédé de filtration.

Tableau 5-9 : Comparaison des structures B et A de la Figure 5-26

Paramètres	**Structure B** 		**Structure A** 
$\mathbf{E(d_{pi} = 0,03\ \mu m)}$	0,49	<	0,97
ΔP (Pa)	14,5	<	297
FOM	0,046	>>	0,012

Cependant, il est possible de mettre en série plusieurs structures B jusqu'à atteindre la même efficacité que la structure A. Dans ce cas, l'association de 5,4 structures B permet d'atteindre une efficacité équivalente à celle de la structure A, soit 0,97. Le Tableau 5-10 montre que, même avec cette nouvelle configuration, la perte de charge cumulée de la structure résultante (notée B') reste inférieure à celle de la structure A. Cela justifie une valeur de FOM supérieure pour la structure B, à condition que cette mise en série aboutisse à une épaisseur cohérente et réalisable industriellement.

Tableau 5-10 : Comparaison de plusieurs structures B en série et une seule structure A

Paramètres	**Structure B'**  B×5,4		**Structure A** 
$\mathbf{E(d_{pi} = 0,03\ \mu m)}$	0,97	=	0,97
ΔP (Pa)	77,9	<	297
FOM	0,046	>>	0,012

Cette réflexion montre que, structurellement, la structure B est meilleure que A pour filtrer des particules de 0,03 µm avec une faible perte de charge, à condition d'adapter l'épaisseur du média. Le paramètre FOM met ainsi en évidence, non pas directement la structure la plus optimale, mais l'enchevêtrement de fibres le plus optimisé.

À partir des valeurs de FOM calculées pour les structures monomodales et bimodales simulées, et ce pour différentes tailles de particules, une tendance a pu être observée dans la cartographie des structures en fonction de leur compacité et de leur diamètre équivalent.

Par interpolation linéaire, en appliquant un maillage par triangulation de Delaunay[4], des lignes d'iso-FOM ont été tracées pour trois diamètres de particules :

- 0,03 µm, correspondant à des particules submicroniques, de diamètre inférieur à celui de la MPPS (Figure 5-27),
- 0,3 µm, correspondant à un diamètre proche de celui de la MPPS (Figure 5-28),
- 1 µm, représentant des particules microniques, de diamètre supérieur à celui de la MPPS (Figure 5-29).

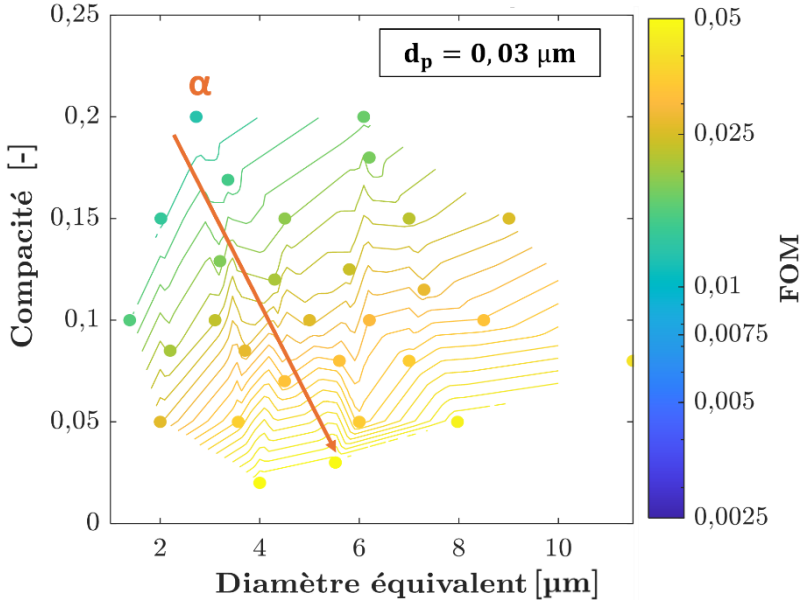


Figure 5-27 : Évolution des courbes d'iso-FOM pour des particules de diamètre 0,03 µm

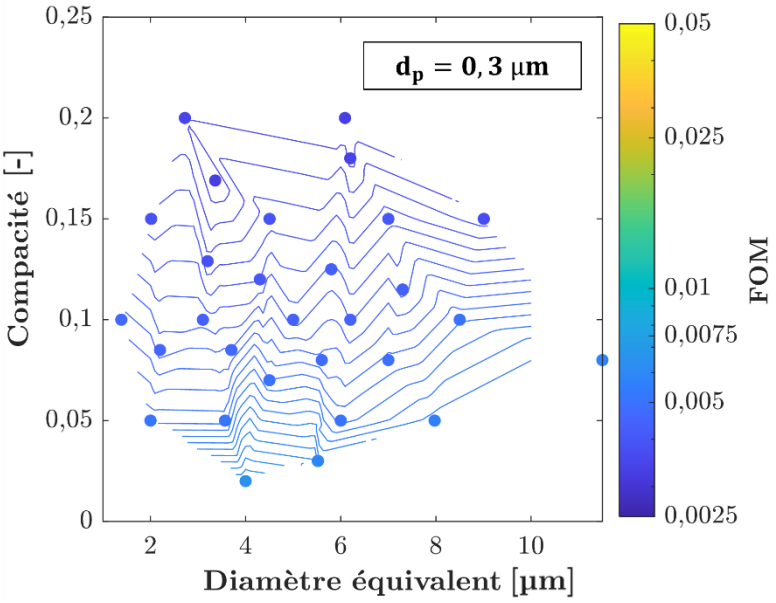


Figure 5-28 : Évolution des courbes d'iso-FOM pour des particules de diamètre 0,3 µm

[4] À partir des données d'entrée, le maillage selon la triangulation de Delaunay est une méthode permettant de subdiviser le plan en triangle, de telle sorte que le cercle circonscrit à chaque triangle ne contient aucun autre point d'entrée à l'intérieur de ce cercle.

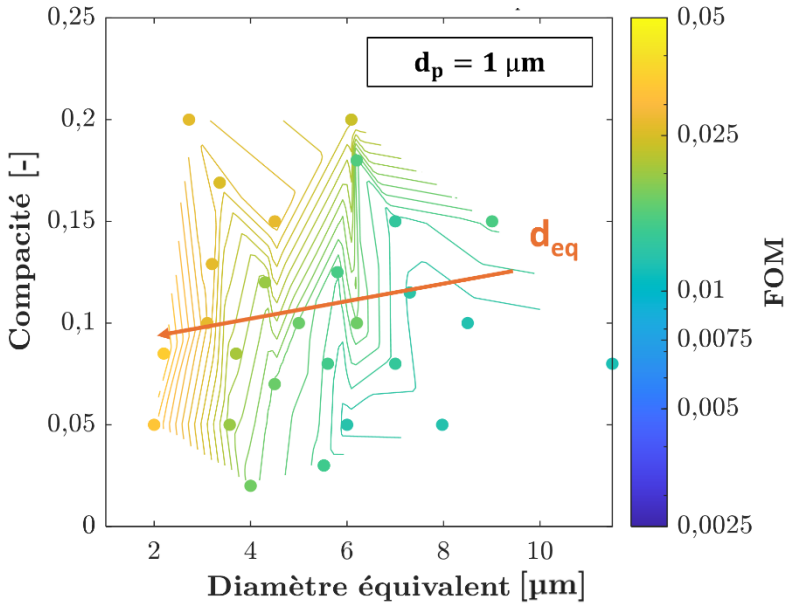


Figure 5-29 : Évolution des courbes d'iso-FOM pour des particules de diamètre 1 µm

La comparaison des trois figures met en évidence que l'optimum de performance, indiqué par une valeur élevée de FOM, varie selon la taille des particules à filtrer. Pour les particules submicroniques, la compacité semble être le paramètre le plus déterminant (Figure 5-27). En effet, augmenter le diamètre équivalent semble peu modifier la valeur de FOM pour ces tailles de particules. A l'inverse, pour des particules microniques, le diamètre équivalent sera le plus influent (Figure 5-29). Par ailleurs, au voisinage de la MPPS, aucune tendance nette ne se dégage (Figure 5-28).

Ainsi, l'enchevêtrement optimal de fibres dépend fortement de la taille des particules ciblées, justifiant l'utilisation du paramètre FOM de manière fractionnelle. Identifier la configuration optimale implique donc de connaître précisément la nature de l'aérosol à filtrer, afin d'ajuster les paramètres structurels du média en conséquence.

5.3 Conclusion

En conclusion, la modélisation de l'efficacité globale d'un média nécessite la caractérisation des efficacités unitaires associées aux différents mécanismes de filtration. L'étude menée sur des structures numériques, composées de fibres de diamètre micronique, a d'abord montré que le diamètre équivalent, initialement défini pour modéliser la perméabilité de telles structures, est également pertinent pour modéliser l'efficacité unitaire par diffusion, en particulier lorsqu'il est couplé au modèle de diffusion développé par l'équipe encadrante.

En revanche, dans le cadre du mécanisme d'interception, ce même diamètre équivalent a montré ses limites pour les structures présentant un écart important entre les diamètres minimal et maximal de la distribution de fibres, notamment lorsque que le ratio entre ces deux diamètres est supérieur à 4. Quant au mécanisme d'inertie, les écarts significatifs observés entre les données simulées et les modèles issus de la littérature indiquent la nécessité de développer un nouveau modèle, d'abord pour des structures simples, puis en l'étendant à des distributions multimodales plus complexes.

L'étude a également mis en évidence qu'il existe une infinité de configurations structurales possibles pour atteindre une même perméabilité. En fonction des critères de performance choisis, il est donc possible d'optimiser la structure du média selon des objectifs différents (efficacité, perte de charge, coût de fabrication, etc.).

Pour une optimisation technico-économique, outre l'efficacité de collecte du média et sa perte de charge, d'autres paramètres doivent également être pris en compte. Le coût des fibres, par exemple, dépend de nombreux facteurs comme leur diamètre, les procédés de fabrication, les volumes de production, ou encore des négociations entre fournisseurs et fabricants. Ces paramètres restent cependant difficiles à évaluer en raison de leur caractère confidentiel. Enfin, il est aussi impératif d'examiner la faisabilité du média, notamment en termes de résistance mécanique.

Conclusion générale et perspectives

Dans le domaine de l'épuration particulaire des gaz, qu'il s'agisse de la ventilation générale, de la protection individuelle et collective, ou encore de l'épuration industrielle, les filtres à fibres s'imposent comme les systèmes les plus performants. Ces médias fibreux, constitués d'un enchevêtrement de fibres de diamètres variés formant un matelas présentant une certaine compacité pour une épaisseur donnée, sont décrits principalement par deux paramètres clés : la perte de charge et l'efficacité fractionnelle de collecte des particules. L'optimisation de la structure d'un média pour une application donnée nécessite de relier les paramètres structurels (distribution granulométrique des diamètres de fibres, compacité, épaisseur) aux performances (efficacité, perte de charge) ; étape qui passe par le développement de modèles prédictifs robustes.

Dans la perspective de déterminer un « modèle universel », il est important d'étudier un grand nombre de structures fibreuses présentant des caractéristiques très différentes, pour balayer une grande plage de grammage, de compacité ou encore de distribution de tailles de fibres. Pour contourner les difficultés liées à la fabrication et à la caractérisation fine des structures fibreuses, le code numérique GeoDict a été privilégié. Des microstructures fibreuses parfaitement caractérisées y sont construites, afin d'y simuler des écoulements mono- et diphasiques qui les traversent pour en déterminer la perméabilité et l'efficacité fractionnelle. Une analyse de sensibilité a permis d'évaluer l'influence des paramètres de simulation sur les résultats obtenus, afin d'équilibrer précision et temps de calcul. L'étude a montré qu'une attention particulière doit notamment être apportée à la résolution du maillage et à la taille du domaine, en particulier celle de la surface face à l'écoulement.

L'évaluation des modèles de perméabilités recensés dans la littérature a révélé une forte dispersion et des écarts importants, pour un MRD compris entre 0,13 et 4,17, avec les valeurs de perméabilité simulée. Ces écarts peuvent être attribués, pour les modèles théoriques, aux différentes hypothèses émises lors de leur établissement (empilement idéalisé de fibres), et pour les modèles empiriques, aux données expérimentales obtenues dans des conditions opératoires différentes et aux incertitudes expérimentales sur les paramètres d'entrée des modèles (épaisseur, compacité, …). De plus, la plupart de ces modèles s'affranchissent de la distribution granulométrique des fibres, souvent réduite à une valeur de diamètre équivalent dont la détermination reste souvent floue. Face à ces limites, un premier modèle de perméabilité a été développé, pour des distributions microniques monomodales à multimodales. Ce dernier prédit les valeurs de perméabilités simulées à ±10 % sur une large gamme de compacités (de 1 à 20 %) et de diamètres de fibres (1,5 à 30 µm). Il a ensuite été étendu aux médias constitués de fibres submicroniques ou d'un mélange de fibres submicroniques et microniques, pour lesquels l'effet de glissement conduit à une perméabilité plus élevée. Ce modèle présente de très bonnes prédictions (±10 %) pour des distributions monomodales à quadrimodales, sur une large plage de diamètres, de compacités et de nombres de Knudsen, constituant une avancée dans la détermination d'un modèle universel de perméabilité.

Une étape essentielle reste toutefois la validation expérimentale pour confirmer la robustesse de ce modèle. Des formettes, fabriqués au laboratoire (LRGP) ou par l'entreprise Alkegen, ont été testés afin de confronter les perméabilités expérimentales mesurées aux prédictions du modèle. Si une bonne concordance a été obtenue pour la plupart des formettes LRGP, des écarts plus importants sont apparus pour celles d'Alkegen. Ces divergences peuvent s'expliquer par plusieurs biais expérimentaux : difficulté de mesurer l'épaisseur de médias compressibles, incertitudes liées à la détermination de la taille des fibres sur des images de microscopie électronique (réduite à une analyse de surface), hypothèses pour la conversion des distributions en nombre vers des distributions volumiques, ou encore la présence d'hétérogénéités locales dans les structures fabriquées. Ces limitations soulignent la complexité de la validation expérimentale et la nécessité d'améliorer la caractérisation des médias.

Par ailleurs, l'étude des modèles d'efficacité unitaire pour les mécanismes de diffusion, d'interception et d'inertie, appliqués à des structures numériques monomodales à multimodales, a montré que le diamètre équivalent, défini pour la perméabilité, est pertinent pour modéliser l'efficacité par diffusion. En revanche, pour l'interception, ce diamètre équivalent atteint ses limites lorsque l'écart entre les diamètres minimal et maximal est important. Pour l'inertie, les écarts significatifs avec les modèles existants indiquent la nécessité de développer un nouveau modèle adapté aux distributions multimodales. Au cours de ce travail, seuls les mécanismes de diffusion, d'interception et d'inertie ont été étudiés. L'efficacité liée aux effets électrostatiques devra aussi être caractérisée dans de futurs travaux. Ces forces, que l'on retrouve notamment dans les filtres électrets, permettent d'améliorer sensiblement l'efficacité du média sans augmenter la perte de charge.

Enfin, l'analyse conjointe de la perte de charge et de l'efficacité a révélé qu'une infinité de configurations structurales peuvent atteindre une même perméabilité, offrant un potentiel d'optimisation des médias en fonction des critères de performance choisis (efficacité, perte de charge, coût de fabrication, résistance mécanique) pour des applications visées. L'optimisation technico-économique reste néanmoins complexe, car le coût des fibres dépend de nombreux facteurs dont la plupart restent confidentiels (diamètre, procédés de fabrication, volumes de production). La résistance des médias doit également être rigoureusement évaluée que ce soit en termes de comportement face aux contraintes liées à l'écoulement mais aussi d'aptitude à être mis en forme lors du plissage.

En conclusion, les résultats obtenus ouvrent des perspectives prometteuses pour le développement d'approches d'optimisation multicritères, s'appuyant sur un modèle robuste de perméabilité applicable à des structures composées de fibres microniques et/ou submicroniques avec des distributions granulométriques complexes, et sur des premières avancées en matière de modélisation prédictive de l'efficacité unitaire d'une partie des mécanismes de filtration. Toutefois, ces travaux de modélisation reposent sur une structure simplifiée. Pour affiner les modèles établis de perméabilité et d'efficacité, il serait nécessaire d'intégrer des paramètres supplémentaires, tels que les hétérogénéités du média, l'ajout de liant, la non-linéarité des fibres (notamment observée dans les médias polymères), la présence d'agglomérats de fibres, ou

encore la géométrie de la section des fibres. Une analyse systématique de ces paramètres permettrait d'évaluer leur influence sur les valeurs de perméabilité et d'efficacité, en utilisant par exemple des structures numériques intégrant du liant, des agglomérats de fibres ou des fibres de formes variées. En cas d'écarts significatifs, il serait donc nécessaire d'améliorer les modèles développés.

Par ailleurs, la validation expérimentale des modèles s'est révélée complexe. La caractérisation précise de la distribution granulométrique des diamètres de fibres nécessite d'être améliorée, notamment en utilisant des techniques d'imagerie 3D, comme la tomographie. Cependant, la résolution actuelle reste limitée et la méthode peut entraîner des biais, étant donné que les mesures sont réalisées sur des échantillons de petite taille qui ne seront pas forcément représentatifs d'un média réel très hétérogène. Les problématiques liées à la mesure de l'épaisseur de médias fortement compressibles pourraient être surmontées en utilisant des médias moins compressibles, tels que ceux composés de fibres métalliques. Par ailleurs, une approche alternative consisterait à inverser la démarche, en validant les modèles sur des médias modélisés numériquement, puis fabriqués par impression 3D. Cette méthode, cependant, reste contrainte par la résolution actuelle des imprimantes 3D. À l'avenir, une validation expérimentale plus robuste, mobilisant des techniques avancées de caractérisation et de fabrication, constituera une étape indispensable pour confirmer et renforcer ces approches.

Nomenclature

Lettres latines

a_f	Surface spécifique des fibres (m^{-1})
a_1 et a_2	Paramètres d'anisotropie utilisé dans GeoDict (-)
C_{amont}	Concentration de particule en amont du filtre (g/m^3 ou $\#/m^3$)
C_{aval}	Concentration de particule en aval du filtre (g/m^3 ou $\#/m^3$)
C_{max}	Taux de compression maximale (-)
Cd	Coefficient de Liu et Rubow (efficacité unitaire par diffusion, Eq. 1-56) (-)
Cd'	Coefficient de Payet et al. (efficacité unitaire par diffusion, Eq. 1-57) (-)
CE	Coefficient d'épuration (-)
Cr	Coefficient de Liu et Rubow (efficacité unitaire par interception, Eq. 1-77) (-)
Cu	Coefficient de Cunningham (-)
$\mathcal{D}$	Coefficient de diffusion de la particule ($m^2.s^{-1}$)
g	Accélération gravitationnelle (m/s^2)
d_{eq}	Diamètre équivalent (m)
d_f	Diamètre des fibres (m)
d_i	Diamètre de la fibre i (m)
d_m	Diamètre de la surface de pression du mesureur d'épaisseur (m)
d_{mol}	Diamètre d'une molécule (m)
d_p	Diamètre d'une particule (m)
$d_{0,1}$	Diamètre équivalent Number weighted mean (Eq. 1-29) (m)
$d_{0,2}$	Diamètre équivalent Square root mean (Eq. 1-28) (m)
$d_{0,3}$	Diamètre équivalent Cube root mean (Eq. 1-33) (m)
$d_{1,1}$	Diamètre équivalent Area weighted mean (Eq. 1-30) (m)
$d_{2,1}$	Diamètre équivalent Volume weighted mean (Eq. 1-31) (m)
$d_{2,2}$	Diamètre équivalent Volume weighted permeability (Eq. 1-32) (m)
E	Efficacité de collecte (-)
E_{d_i}	Efficacité fractionnelle de collecte (-)
E_{meca}	Efficacité de collecte liée à la diffusion, l'inertie et l'interception (-)
f_{mi}	Fraction massique de la fibre i (-)
f_{ni}	Fraction en nombre de la fibre i (-)
f_{Vi}	Fraction volumique de la fibre i (-)
G	Grammage (g/m^2)
H	Facteur hydrodynamique (-)
H^{nat}	Paramètre de Natanson (efficacité unitaire par interception, Eq. 1-78) (-)
H_a^{mod}	Perméabilité adimensionnelle d'Happel modifié (-) (Eq. 1-23)
$H_{Fan}^{K\&Z}$	Facteur hydrodynamique de Kirsch et Zhulanov (-) (Eq. 1-36)
H_{Ha}	Facteur hydrodynamique d'Happel (-) (Eq. 1-22)
H_{Ku}	Facteur hydrodynamique de Kuwabara (-) (Eq. 1-35)
H_{La}	Facteur hydrodynamique de Lamb (-)

H_{Ye}	Facteur hydrodynamique de Yeh et Liu (-) (Eq. 1-39)
I	Paramètre de Stechkina et al. (efficacité unitaire par inertie, Eq. 1-95) (-)
k_B	Constante de Boltzmann (1,38 10^{-23} $J.K^{-1}$)
K_{nf}	Nombre de Knudsen de fibres (-)
K_{np}	Nombre de Knudsen de particules (-)
L_{amont}	Longueur de la zone d'établissement de l'écoulement en amont (m)
L_{aval}	Longueur de la zone d'établissement de l'écoulement en aval (m)
L_f	Longueur de fibres (m)
L_i	Longueur du domaine selon l'axe x, y ou z (m)
L_{vox}	Longueur des voxels (m)
N_{amont}	Nombre de voxel en z de la zone d'établissement de l'écoulement en amont (m)
N_{aval}	Nombre de voxel en z de la zone d'établissement de l'écoulement en amont (m)
N_i	Nombre de voxel selon l'axe x, y ou z (m)
n_{mol}	Nombre de molécules par unité de volume (#)
P	Pression (Pa)
P_{app}	Pression normalisée appliquée par le mesureur d'épaisseur (0,1 ou 0,5 kPa)
$P^{tot}_{contrainte}$	Pression totale appliquée avec le mesureur d'épaisseur (kPa)
P_{eau}	Pression induite par la masse d'eau ajoutée sur le mesureur d'épaisseur (kPa)
Pe	Nombre de Peclet (-)
Q_V	Débit d'air (m^3/s)
R	Rapport d'interception (d_p/d_f) (-)
Re_f	Reynolds de fibres (-)
Re_{pores}	Reynolds de pores (-)
r_p	Rayon de particules (m)
$R_{2/1}$	Rapport du diamètre épais sur le diamètre fin (-)
Stk	Nombre de Stokes (-)
T	Température (K)
$T(Z_i)$	Taux de pénétration des particules à l'épaisseur Z_i (-)
U_f	Vitesse d'écoulement superficielle (m/s)
V	Volume (m^3)
Z	Épaisseur du média (m)
Z_{min}	Épaisseur minimale du média pour une contrainte infinie (m)
Z_0	Épaisseur du média en absence de contrainte (m)

Abréviations

CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CFD	Computational Fluid Dynamics
EDX	Energy Dispersive X-ray
EJ	Le solveur Explicit Jump
EPA	Efficient Particulate Air Filter
FOM	Figure of Merit
FSD	Fiber Size Distribution

GeoDict	GEOmetric design and property prediction
HEPA	High Efficient Particulate Air Filter
ISO	International Organization for Standardization
LIR	Le solveur Left Identity Right
LRGP	Laboratoire Réactions et Génie des Procédés
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MPPS	Most Penetrating Particle Size
MRD	Mean Relative Discrepancy
PET	Polytéréphtalate d'EThylène
PM	Particle Matter
PP	Polypropylène
Simple FFT	Le solveur Simple Fast Fourier Transform
ULPA	Ultra Low Penetration Air Filter

Lettres grecques

α	Compacité (-)
α_i	Fraction solide des fibres de diamètre d_i (-)
γ	Coefficient de friction (-)
$\Delta\kappa_{miss}$	Incertitude liée à l'échantillonnage de la FSD (mesure incomplète) (-)
$\Delta\kappa_{dupp}$	Incertitude liée à l'échantillonnage de la FSD (mesure redondante) (-)
ΔP	Perte de charge (Pa)
δ	Constante dans la longueur de Brinkman (-)
ε	Porosité (-)
η	Efficacité unitaire (-)
η_D	Efficacité unitaire par diffusion (-)
η_R	Efficacité unitaire par interception (-)
η_I	Efficacité unitaire par inertie (-)
η_{RI}	Efficacité unitaire par inertie et interception (-)
η_{meca}	Efficacité unitaire de collecte liée à la diffusion, l'inertie et l'interception (-)
η_0	Expression de Mardanov (efficacité unitaire par diffusion, Eq. 1-58) (-)
η_∞	Expression de Mardanov (efficacité unitaire par diffusion, Eq. 1-59) (-)
κ	Perméabilité (m^2)
κ_i	Perméabilité d'un média composé de fibres de diamètre d_i (m^2)
κ_{add}	Perméabilité modélisée après ajout d'une fibre de diamètre d_i (m^2)
κ_{remove}	Perméabilité modélisée après suppression d'une fibre de diamètre d_i (m^2)
κ_0	Perméabilité modélisée à partir de la distribution initiale de fibres (m^2)
κ_f	Perméabilité de Forchheimer (s^3/kg)

λ_g	Libre parcours moyen du gaz (m)
μ	Viscosité dynamique du fluide kg/(m.s)
ρ	Masse volumique du fluide (kg/m^3)
ρ_f	Masse volumique moyenne des fibres (kg/m^3)
ρ_p	Masse volumique moyenne des particules (kg/m^3)
τ	Constante du modèle d'épaisseur des médias compressibles (kPa)
φ	Paramètre de résolution du maillage (-)
Ω	Surface du média filtrant (m^2)

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1-1 : Les différentes voies de fabrication des médias fibreux non-tissés [2,8,9] 9
Figure 1-2 : Plage de régime d'écoulement selon Kn_f [37] 16
Figure 1-3 : Représentation schématique des effets de glissement 17
Figure 1-4 : Modèles de perméabilité adimensionnelle 19
Figure 1-5 : Collecte des particules par inertie, interception et diffusion 26
Figure 1-6 : Évolution de l'efficacité fractionnelle de collecte 26
Figure 1-7 : Modèles d'efficacité unitaire par diffusion (a) 31
Figure 1-8 : Modèles d'efficacité unitaire par diffusion (b) 31
Figure 1-9 : Modèles d'efficacité unitaire par interception 32
Figure 1-10 : Modèles d'efficacité unitaire par inertie 35

Chapitre 2

Figure 2-1: Utilisation du code de calcul GeoDict à plusieurs échelles [1] 38
Figure 2-2 : Démarche simplifiée d'utilisation du code de calcul GeoDict 39
Figure 2-3: Domaine de calcul 40
Figure 2-4 : Evolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la perte de charge [3] 43
Figure 2-5: Position initiale des particules 46
Figure 2-6 : Paramètres étudiés dans l'analyse de sensibilité 48
Figure 2-7 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la résolution du maillage 50
Figure 2-8: Efficacité fractionnelle de la structure Trim. 1 en fonction de la résolution du maillage 50
Figure 2-9 : Évolution du rapport d'efficacité fractionnelle $Effn/Effn = max$ selon différentes résolutions du maillage 51
Figure 2-10 : Évolution de la compacité et de la perméabilité simulées en fonction de la taille du domaine cubique 52
Figure 2-11 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction d'une constante δ du critère de Brinkman pour des structures monomodales 54
Figure 2-12 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction d'une constante δ du critère de Brinkman pour des structures bimodales, trimodales et quadrimodales 55
Figure 2-13 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la réduction de l'épaisseur pour des structures monomodales 56
Figure 2-14 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la réduction de l'épaisseur pour des structures bimodales 57
Figure 2-15 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la taille des zones vides ajoutées en amont et aval 58

Figure 2-16 : Efficacité fractionnelle de la structure monomodale (2µm-20%) en fonction du nombre de particules 59
Figure 2-17 : Efficacité fractionnelle de la structure monomodale (4µm-20%) en fonction du nombre de particules 59

Chapitre 3

Figure 3-1: Évolution de la perméabilité simulée de distributions monomodales pour différentes valeurs de compacité 62
Figure 3-2 : Comparaison des perméabilités simulées et théoriques avec les modèles de Woudberg [4], Davies [1], Jackson et James [3], et Happel modifié [2] pour des structures monomodales 63
Figure 3-3 : Répartition des couples de diamètres étudiés en fonction du rapport $R2/1$ ou de l'écart entre les deux diamètres 65
Figure 3-4 : Évolution de la perméabilité simulée en fonction de la fraction volumique de fibre épaisse ($fv2$) et de la compacité (5%, 12%, 20%) pour les microstructures avec des fibres de 30 et 4,5 µm 66
Figure 3-5 : Évolution de la perméabilité simulée en fonction de la fraction volumique de fibre épaisse ($fv2$) et de la compacité (5%, 12%, 20%) pour les microstructures constituées de fibres de 6 et 2 µm 66
Figure 3-6 : Comparaison des perméabilités obtenues pour les diamètres équivalents $d0.2$, $d0.1$, $d1.1$, et $d0.3$ avec les données simulées pour 60 distributions bimodales 67
Figure 3-7 : Comparaison des perméabilités obtenues pour les diamètres équivalents $d2.1$ et $d2.2$ avec les données simulées pour 60 distributions bimodales 68
Figure 3-8 : Comparaison de la perméabilité simulée avec celles calculées selon différentes approches de la littérature 71
Figure 3-9 : Comparaison des données de perméabilité issues de la littérature avec la nouvelle approche (Gervais, Tafreshi et al., Payen et al.) 72
Figure 3-10 : Comparaison des données de perméabilité issues de la littérature avec la nouvelle approche (Tucny et al.) 73
Figure 3-11 : Évolution de la perméabilité selon la dimension de la surface perpendiculaire à l'écoulement 74
Figure 3-12 : Comparaison des perméabilités simulées avec GeoDict, version 2022, avec la nouvelle approche pour des distributions de fibres trimodales, quadrimodales et décamodales. 76
Figure 3-13 : Comparaison des perméabilités simulées et modélisées avec la nouvelle approche pour des distributions de fibres normales et log-normales 77
Figure 3-14 : Comparaison des perméabilités obtenues par différentes approches théoriques avec les données simulées issues de notre étude (distribution monomodale) 80
Figure 3-15 : Comparaison des perméabilités obtenues par différentes approches théoriques avec des données simulées issues de l'article de Kwak [15] (distribution monomodale) 81

Figure 3-16 : Comparaison du modèle de perméabilité globale ($\kappa_{globale}$) avec le modèle établi en régime continu ($\kappa_{régime\ continu}$) en fonction du diamètre de fibre pour une structure de compacité 5 % 82
Figure 3-17 : Comparaison des perméabilités obtenues par l'approche de Thomas et al. [21] avec les données simulées pour des distributions bimodales, trimodales et quadrimodales 83

Chapitre 4

Figure 4-1: Schéma du protocole de fabrication des médias modèles 88
Figure 4-2 : Exemple de médias modèles formés 90
Figure 4-3 : Exemple d'image MEB analysée pour la détermination de la distribution de taille de fibres 91
Figure 4-4: FSD des formettes de distribution monomodale (F4, F7, F1 et F2) 92
Figure 4-5: Comparaison des distributions granulométriques de fibres réalisées sur les deux faces de la formette F10 94
Figure 4-6 : Comparaison des distributions granulométriques de fibres réalisées sur les deux faces de la formette F9 94
Figure 4-7 : Comparaison des distributions obtenues par tomographie et par imagerie MEB pour un média commercial 95
Figure 4-8 : Épaisseurs mesurées des formettes LRGP à une contrainte de 0,1 kPa et 0,5 kPa (une seule mesure par échantillon) 96
Figure 4-9 : Épaisseurs mesurées des médias issus des formettes d'Alkegen à une contrainte de 0,1 kPa et 0,5 kPa (cinq mesures par échantillon) 97
Figure 4-10: Méthodologie expérimentale de mesure d'épaisseur sous différentes contraintes 97
Figure 4-11 : Influence des paramètres $Cmax$ et τ pour trois exemples théoriques 99
Figure 4-12 : Courbes de compressibilité modélisée des formettes 11 et 8 100
Figure 4-13 : Comparaison des taux de compressibilité moyen ($Cmax$) et de la constante τ moyenne pour chaque formette d'Alkegen 100
Figure 4-14 : Cartographie des médias de l'étude selon leur grammage et leur compacité (contrainte de 0,1 kPa) 101
Figure 4-15 : Cartographie des médias de l'étude selon leur grammage et leur compacité (contrainte de 0,5 kPa) 102
Figure 4-16 : Évolution de la perte de charge expérimentale en fonction de la vitesse d'écoulement pour trois médias (F9, F11 et F12) 103
Figure 4-17 : Évolution de la résistance à l'écoulement en fonction de la vitesse d'écoulement pour trois médias (F9, F11 et F12) 104
Figure 4-18 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge mesurée en fonction de la vitesse d'écoulement pour les médias compressibles étudiés (F9, F11 et F12) et leurs équivalents incompressibles - 1ère série : vitesses de perméation croissantes - 2ème série : vitesses de perméation décroissantes 105
Figure 4-19 : Perméabilité expérimentale des différentes formettes LRGP et Alkegen 107

Figure 4-20 : Influence de l'ajout ou la suppression d'une fibre de diamètre donné dans la FSD sur la valeur de perméabilité calculée avec le modèle global 108
Figure 4-21: Incertitudes relatives globales de la perméabilité modélisée en régime d'écoulement non continu pour les différents médias expérimentaux étudiés..... 115
Figure 4-22: Comparaison des perméabilités expérimentales et modélisées des échantillons des formettes LRGP et Alkegen (distribution monomodale) 116
Figure 4-23 : Évolution de la perméabilité modélisée et de la compacité du média en modifiant l'épaisseur d'un média hypothétique 117
Figure 4-24 : Évolution de l'épaisseur d'un échantillon de la formette F2 en fonction de la contrainte appliquée, lors de trois séries de mesures successives : une 1ère et une 2ème consécutive, puis après 24h 118
Figure 4-25 : Évolution de l'épaisseur d'un échantillon de la formette F4 en fonction de la contrainte appliquée, lors de trois séries de mesures successives : une 1ère et une 2ème consécutive, puis après 24h 119
Figure 4-26: Comparaison des perméabilités expérimentales et modélisées des formettes Alkegen (distribution bimodale) 120
Figure 4-27 : Comparaison des distributions en nombre mesurées des formettes monomodales avec leur modélisation par une loi log-normale 121
Figure 4-28 : Fraction volumique cumulée pour les formettes F8, F9, F10 (hypothèse de même longueur, approche 1) 122
Figure 4-29 : Fraction volumique cumulée pour les formettes F8, F9, F10 (longueurs différentes, approche 2)..... 123
Figure 4-30 : Comparaison de la perméabilité expérimentale avec les perméabilités modélisées selon les trois approches..... 124
Figure 4-31: Comparaison des distributions en nombre mesurées et modélisées des formettes F8, F9 et F10 par ajustement des lois log-normales des deux populations de fibres 125
Figure 4-32: Distribution cumulée en nombre des formettes F8, F9, F10 obtenues à partir des lois log-normales ajustées, avec prise en compte d'une longueur différente pour les deux populations de fibres..... 126

Chapitre 5

Figure 1-1 : Les différentes voies de fabrication des médias fibreux non-tissés [12,20,21].....9
Figure 1-2 : Plage de régime d'écoulement selon Kn_f [48]..... 16
Figure 1-3 : Représentation schématique des effets de glissement 17
Figure 1-4 : Modèles de perméabilité adimensionnelle..... 19
Figure 1-5 : Collecte des particules par inertie, interception et diffusion..... 26
Figure 1-6 : Évolution de l'efficacité fractionnelle de collecte..... 26
Figure 1-7 : Modèles d'efficacité unitaire par diffusion (a) 31
Figure 1-8 : Modèles d'efficacité unitaire par diffusion (b) 31
Figure 1-9 : Modèles d'efficacité unitaire par interception..... 32

Figure 1-10 : Modèles d'efficacité unitaire par inertie 35
Figure 2-1: Utilisation du code de calcul GeoDict à plusieurs échelles [98] 38
Figure 2-2 : Démarche simplifiée d'utilisation du code de calcul GeoDict 39
Figure 2-3: Domaine de calcul 40
Figure 2-4 : Evolution de la vitesse d'écoulement en fonction de la perte de charge [100] 43
Figure 2-5: Position initiale des particules 46
Figure 2-6 : Paramètres étudiés dans l'analyse de sensibilité 48
Figure 2-7 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la résolution du maillage 50
Figure 2-8: Efficacité fractionnelle de la structure Trim. 1 en fonction de la résolution du maillage 50
Figure 2-9 : Évolution du rapport d'efficacité fractionnelle $Effn/Effn = max$ selon différentes résolutions du maillage 51
Figure 2-10 : Évolution de la compacité et de la perméabilité simulées en fonction de la taille du domaine cubique 52
Figure 2-11 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction d'une constante δ du critère de Brinkman pour des structures monomodales 54
Figure 2-12 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction d'une constante δ du critère de Brinkman pour des structures bimodales, trimodales et quadrimodales 55
Figure 2-13 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la réduction de l'épaisseur pour des structures monomodales 56
Figure 2-14 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la réduction de l'épaisseur pour des structures bimodales 57
Figure 2-15 : Évolution du ratio de perméabilité en fonction de la taille des zones vides ajoutées en amont et aval 58
Figure 2-16 : Efficacité fractionnelle de la structure monomodale (2µm-20%) en fonction du nombre de particules 59
Figure 2-17 : Efficacité fractionnelle de la structure monomodale (4µm-20%) en fonction du nombre de particules 59
Figure 3-1: Évolution de la perméabilité simulée de distributions monomodales pour différentes valeurs de compacité 62
Figure 3-2 : Comparaison des perméabilités simulées et théoriques avec les modèles de Woudberg [50], Davies [53], Jackson et James [49], et Happel modifié [52] pour des structures monomodales 63
Figure 3-3 : Répartition des couples de diamètres étudiés en fonction du rapport $R2/1$ ou de l'écart entre les deux diamètres 65
Figure 3-4 : Évolution de la perméabilité simulée en fonction de la fraction volumique de fibre épaisse ($fv2$) et de la compacité (5%, 12%, 20%) pour les microstructures avec des fibres de 30 et 4,5 µm 66
Figure 3-5 : Évolution de la perméabilité simulée en fonction de la fraction volumique de fibre épaisse ($fv2$) et de la compacité (5%, 12%, 20%) pour les microstructures constituées de fibres de 6 et 2 µm 66

Figure 3-6 : Comparaison des perméabilités obtenues pour les diamètres équivalents $d0.2$, $d0.1$, $d1.1$, et $d0.3$ avec les données simulées pour 60 distributions bimodales 67
Figure 3-7 : Comparaison des perméabilités obtenues pour les diamètres équivalents $d2.1$ et $d2.2$ avec les données simulées pour 60 distributions bimodales 68
Figure 3-8 : Comparaison de la perméabilité simulée avec celles calculées selon différentes approches de la littérature 71
Figure 3-9 : Comparaison des données de perméabilité issues de la littérature avec la nouvelle approche (Gervais, Tafreshi et al., Payen et al.) 72
Figure 3-10 : Comparaison des données de perméabilité issues de la littérature avec la nouvelle approche (Tucny et al.) 73
Figure 3-11 : Évolution de la perméabilité selon la dimension de la surface perpendiculaire à l'écoulement 74
Figure 3-12 : Comparaison des perméabilités simulées avec GeoDict, version 2022, avec la nouvelle approche pour des distributions de fibres trimodales, quadrimodales et décamodales. 76
Figure 3-13 : Comparaison des perméabilités simulées et modélisées avec la nouvelle approche pour des distributions de fibres normales et log-normales 77
Figure 3-14 : Comparaison des perméabilités obtenues par différentes approches théoriques avec les données simulées issues de notre étude (distribution monomodale) 80
Figure 3-15 : Comparaison des perméabilités obtenues par différentes approches théoriques avec des données simulées issues de l'article de Kwak [64] (distribution monomodale) 81
Figure 3-16 : Comparaison du modèle de perméabilité globale ($\kappa_{globale}$) avec le modèle établi en régime continu ($\kappa_{régime\ continu}$) en fonction du diamètre de fibre pour une structure de compacité 5 % 82
Figure 3-17 : Comparaison des perméabilités obtenues par l'approche de Thomas et al. [109] avec les données simulées pour des distributions bimodales, trimodales et quadrimodales 83
Figure 4-1: Schéma du protocole de fabrication des médias modèles 88
Figure 4-2 : Exemple de médias modèles formés 90
Figure 4-3 : Exemple d'image MEB analysée pour la détermination de la distribution de taille de fibres 91
Figure 4-4: FSD des formettes de distribution monomodale (F4, F7, F1 et F2) 92
Figure 4-5: Comparaison des distributions granulométriques de fibres réalisées sur les deux faces de la formette F10 94
Figure 4-6 : Comparaison des distributions granulométriques de fibres réalisées sur les deux faces de la formette F9 94
Figure 4-7 : Comparaison des distributions obtenues par tomographie et par imagerie MEB pour un média commercial 95
Figure 4-8 : Épaisseurs mesurées des formettes LRGP à une contrainte de 0,1 kPa et 0,5 kPa (une seule mesure par échantillon) 96
Figure 4-9 : Épaisseurs mesurées des médias issus des formettes d'Alkegen à une contrainte de 0,1 kPa et 0,5 kPa (cinq mesures par échantillon) 97

Figure 4-10: Méthodologie expérimentale de mesure d'épaisseur sous différentes contraintes 97
Figure 4-11 : Influence des paramètres $Cmax$ et τ pour trois exemples théoriques..... 99
Figure 4-12 : Courbes de compressibilité modélisée des formettes 11 et 8 100
Figure 4-13 : Comparaison des taux de compressibilité moyen ($Cmax$) et de la constante τ moyenne pour chaque formette d'Alkegen 100
Figure 4-14 : Cartographie des médias de l'étude selon leur grammage et leur compacité (contrainte de 0,1 kPa) 101
Figure 4-15 : Cartographie des médias de l'étude selon leur grammage et leur compacité (contrainte de 0,5 kPa) 102
Figure 4-16 : Évolution de la perte de charge expérimentale en fonction de la vitesse d'écoulement pour trois médias (F9, F11 et F12) 103
Figure 4-17 : Évolution de la résistance à l'écoulement en fonction de la vitesse d'écoulement pour trois médias (F9, F11 et F12) 104
Figure 4-18 : Comparaison de l'évolution de la perte de charge mesurée en fonction de la vitesse d'écoulement pour les médias compressibles étudiés (F9, F11 et F12) et leurs équivalents incompressibles - 1ère série : vitesses de perméation croissantes - 2ème série : vitesses de perméation décroissantes 105
Figure 4-19 : Perméabilité expérimentale des différentes formettes LRGP et Alkegen 107
Figure 4-20 : Influence de l'ajout ou la suppression d'une fibre de diamètre donné dans la FSD sur la valeur de perméabilité calculée avec le modèle global 108
Figure 4-21: Incertitudes relatives globales de la perméabilité modélisée en régime d'écoulement non continu pour les différents médias expérimentaux étudiés..... 115
Figure 4-22: Comparaison des perméabilités expérimentales et modélisées des échantillons des formettes LRGP et Alkegen (distribution monomodale) 116
Figure 4-23 : Évolution de la perméabilité modélisée et de la compacité du média en modifiant l'épaisseur d'un média hypothétique 117
Figure 4-24 : Évolution de l'épaisseur d'un échantillon de la formette F2 en fonction de la contrainte appliquée, lors de trois séries de mesures successives : une 1ère et une 2ème consécutive, puis après 24h 118
Figure 4-25 : Évolution de l'épaisseur d'un échantillon de la formette F4 en fonction de la contrainte appliquée, lors de trois séries de mesures successives : une 1ère et une 2ème consécutive, puis après 24h 119
Figure 4-26: Comparaison des perméabilités expérimentales et modélisées des formettes Alkegen (distribution bimodale) 120
Figure 4-27 : Comparaison des distributions en nombre mesurées des formettes monomodales avec leur modélisation par une loi log-normale 121
Figure 4-28 : Fraction volumique cumulée pour les formettes F8, F9, F10 (hypothèse de même longueur, approche 1) 122
Figure 4-29 : Fraction volumique cumulée pour les formettes F8, F9, F10 (longueurs différentes, approche 2)..... 123

Figure 4-30 : Comparaison de la perméabilité expérimentale avec les perméabilités modélisées selon les trois approches..... 124
Figure 4-31: Comparaison des distributions en nombre mesurées et modélisées des formettes F8, F9 et F10 par ajustement des lois log-normales des deux populations de fibres 125
Figure 4-32: Distribution cumulée en nombre des formettes F8, F9, F10 obtenues à partir des lois log-normales ajustées, avec prise en compte d'une longueur différente pour les deux populations de fibres..... 126
Figure 5-1 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 1 en fonction du diamètre de particule..... 133
Figure 5-2 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 2 en fonction du diamètre de particule..... 133
Figure 5-3 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par diffusion modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures monomodales 135
Figure 5-4 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par diffusion modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures bimodales..... 137
Figure 5-5 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par diffusion modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures trimodales 137
Figure 5-6 : Évolution des efficacités unitaires par interception simulées et modélisées pour la structure Mono. 1 en fonction du diamètre de particule..... 138
Figure 5-7 : Évolution des efficacités unitaires par interception simulées et modélisées pour la structure Mono. 2 en fonction du diamètre de particule..... 139
Figure 5-8 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par interception modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures monomodales 140
Figure 5-9 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par interception modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures bimodales (a)..... 141
Figure 5-10 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par interception modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures bimodales (b)..... 141
Figure 5-11 : Évolution de l'écart relatif moyen (MRD) sur une plage de diamètre de particule entre 0,3 et 8 µm en fonction du ratio entre les deux modes des distributions bimodales..... 142
Figure 5-12 : Comparaison des efficacités unitaires fractionnelles par interception modélisées par le modèle LRGP et simulées pour des structures trimodales..... 143
Figure 5-13 : Évolution des efficacités unitaires par inertie simulées et modélisées pour la structure Mono. 1 en fonction du diamètre de particule..... 144
Figure 5-14 : Évolution des efficacités unitaires par inertie simulées et modélisées pour la structure Mono. 5 en fonction du diamètre de particule..... 144
Figure 5-15 : Évolution des efficacités unitaires par inertie et interception, simulées et modélisées, pour la structure Mono. 1 en fonction du diamètre de particule 146
Figure 5-16 : Évolution des efficacités unitaires par inertie et interception, simulées et modélisées, pour la structure Mono. 5 en fonction du diamètre de particule 147

Figure 5-17 : Courbes d'iso-perméabilité en régime continu en fonction des paramètres structurales d'un média (compacité et diamètre équivalent) 149
Figure 5-18 : Courbes iso-diamètre équivalent pour une distribution bimodales avec $d1$= 2 µm (a) ou $d1$= 6 µm (b)..... 150
Figure 5-19 : Structures iso-perméables étudiées de même compacité et diamètre équivalent 151
Figure 5-20 : Comparaison des efficacités fractionnelles de collecte de structures monomodales, bimodales et trimodales de même compacité et même diamètre équivalent.. 152
Figure 5-21 : Comparaison des efficacités fractionnelles de collecte pour différentes distributions (monomodale, bimodale, trimodale), à compacité et diamètre équivalent identiques, pour plusieurs vitesses de filtration 153
Figure 5-22 : Répartition des diamètres de particules analysés pour des structures de compacité 10 % et diamètre équivalent 6,20 µm 154
Figure 5-23 : Évolution des taux de pénétration dans les structures iso-perméables monomodales, bimodales et trimodales (couple 10 % ; 6,20 µm) pour différents diamètres de particules..... 155
Figure 5-24 : Structures iso-perméables étudiées de compacité et diamètre équivalent différents 156
Figure 5-25 : Comparaison des efficacités fractionnelles de collecte pour des structures bimodales iso-perméables, de compacités et diamètres équivalents différents 157
Figure 5-26 : Cartographie des FOM obtenues pour différentes structures simulées..... 158
Figure 5-27 : Évolution des courbes d'iso-FOM pour des particules de diamètre 0,03 µm ... 160
Figure 5-28 : Évolution des courbes d'iso-FOM pour des particules de diamètre 0,3 µm..... 160
Figure 5-29 : Évolution des courbes d'iso-FOM pour des particules de diamètre 1 µm..... 161

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1-1 : Plages des régimes d'écoulement laminaire, intermédiaire et turbulent 15
Tableau 1-2 : Expressions du facteur hydrodynamique pour un écoulement perpendiculaire aux fibres 18
Tableau 1-3 : Expressions de lois de mélange 20
Tableau 1-4 : Modèles de diamètres équivalents issus de la littérature 21
Tableau 1-5 : les coefficients β et γ pour différents modèles de diamètres équivalents selon l'expression de Tucny et al. [48] 21
Tableau 1-6 : Facteurs hydrodynamiques en régime continu 23
Tableau 1-7 : Facteur hydrodynamique en régime continu des modèles d'efficacités unitaires 27
Tableau 1-8 : Valeurs des constantes de Cunningham selon différents auteurs 28
Tableau 1-9 : Expressions de l'efficacité unitaire par diffusion selon différents auteurs 30
Tableau 1-10 : Expressions de l'efficacité unitaire par interception selon différents auteurs .. 33
Tableau 1-11 : Expressions de l'efficacité unitaire par inertie selon différents auteurs 34

Chapitre 2

Tableau 2-1: Paramètres d'anisotropie et orientation des fibres dans la structure 41
Tableau 2-2 : Paramètres structurels des structures Mono. 1, Mono. 2 et Trim. 1 49
Tableau 2-3 : Paramètres structurels des structures Mono. 3, Bim. 1, Bim. 2 et Quadri. 1 ... 54

Chapitre 3

Tableau 1-1 : Plages des régimes d'écoulement laminaire, intermédiaire et turbulent 15
Tableau 1-2 : Expressions du facteur hydrodynamique pour un écoulement perpendiculaire aux fibres 18
Tableau 1-3 : Expressions de lois de mélange 20
Tableau 1-4 : Modèles de diamètres équivalents issus de la littérature 21
Tableau 1-5 : les coefficients β et γ pour différents modèles de diamètres équivalents selon l'expression de Tucny et al. [59] 21
Tableau 1-6 : Facteurs hydrodynamiques en régime continu 23
Tableau 1-7 : Facteur hydrodynamique en régime continu des modèles d'efficacités unitaires 27
Tableau 1-8 : Valeurs des constantes de Cunningham selon différents auteurs 28
Tableau 1-9 : Expressions de l'efficacité unitaire par diffusion selon différents auteurs 30
Tableau 1-10 : Expressions de l'efficacité unitaire par interception selon différents auteurs .. 33
Tableau 1-11 : Expressions de l'efficacité unitaire par inertie selon différents auteurs 34
Tableau 2-1: Paramètres d'anisotropie et orientation des fibres dans la structure 41

Tableau 2-2 : Paramètres structurels des structures Mono. 1, Mono. 2 et Trim. 1 49
Tableau 2-3 : Paramètres structurels des structures Mono. 3, Bim. 1, Bim. 2 et Quadri. 1 ... 54
Tableau 3-1: Écart relatif moyen (MRD) des modèles de facteur hydrodynamique pour des structures monomodales 64
Tableau 3-2 : MRD pour différentes associations de diamètre équivalent et de facteur hydrodynamique pour des distributions bimodales de fibres 67
Tableau 3-3 : Écart relatif moyen pour différentes approches issues de la littérature 69
Tableau 3-4 : Caractéristiques structurales des médias numériques et expérimentaux de la littérature 72
Tableau 3-5 : Caractéristiques des structures log-normales et normales modélisées 77
Tableau 3-6 : MRD pour différentes approches de perméabilité avec glissement pour des distributions monomodales 80
Tableau 3-7 : Résumé du modèle prédictif de perméabilité en régime d'écoulement continu . 84
Tableau 3-8 : Résumé du modèle prédictif de perméabilité en régime d'écoulement non continu 84
Tableau 4-1 : Composition et grammage cibles des formettes 90
Tableau 4-2 : Caractéristiques des FSD des formettes LRGP et Alkegen de composition monomodale 92
Tableau 4-3: Caractéristiques des FSD des formettes Alkegen de composition bimodale 93
Tableau 4-4: Mesure d'épaisseur réalisée à différentes contraintes 98
Tableau 5-1 : Caractéristiques des structures de distribution monomodale de fibres 132
Tableau 5-2 : Écart relatif moyen (MRD) des modèles d'efficacité unitaire de diffusion pour des structures monomodales 134
Tableau 5-3 : Caractéristiques des distributions bimodales 135
Tableau 5-4: Caractéristiques des distributions trimodales 136
Tableau 5-5 : Écart relatif moyen (MRD) des modèles d'efficacité unitaire d'interception pour des structures monomodales 139
Tableau 5-6 : Expressions de l'efficacité unitaire par inertie et interception selon différents auteurs 146
Tableau 5-7 : Propriétés des microstructures de même compacité de 10 % et diamètre équivalent de 6,20 µm sur l'iso-courbe $2 \times 10 - 11$ m² 152
Tableau 5-8 : Paramètres des microstructures bimodales iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différents pour les courbes d'iso-perméabilité de $2 \times 10 - 11$ m² et $10 - 12$ m² 156
Tableau 5-9 : Comparaison des structures B et A de la Figure 5-26 159
Tableau 5-10 : Comparaison de plusieurs structures B en série et une seule structure A 159

Chapitre 4

Tableau 4-1 : Composition et grammage cibles des formettes 90

Tableau 4-2 : Caractéristiques des FSD des formettes LRGP et Alkegen de composition monomodale 92
Tableau 4-3: Caractéristiques des FSD des formettes Alkegen de composition bimodale..... 93
Tableau 4-4: Mesure d'épaisseur réalisée à différentes contraintes 98

Chapitre 5

Tableau 5-1 : Caractéristiques des structures de distribution monomodale de fibres 132
Tableau 5-2 : Écart relatif moyen (MRD) des modèles d'efficacité unitaire de diffusion pour des structures monomodales 134
Tableau 5-3 : Caractéristiques des distributions bimodales 135
Tableau 5-4: Caractéristiques des distributions trimodales 136
Tableau 5-5 : Écart relatif moyen (MRD) des modèles d'efficacité unitaire d'interception pour des structures monomodales 139
Tableau 5-6 : Expressions de l'efficacité unitaire par inertie et interception selon différents auteurs 146
Tableau 5-7 : Propriétés des microstructures de même compacité de 10 % et diamètre équivalent de 6,20 µm sur l'iso-courbe $2 \times 10 - 11$ m^2 152
Tableau 5-8 : Paramètres des microstructures bimodales iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différents pour les courbes d'iso-perméabilité de $2 \times 10 - 11$ m^2 et $10 - 12$ m^2 156
Tableau 5-9 : Comparaison des structures B et A de la Figure 5-26 159
Tableau 5-10 : Comparaison de plusieurs structures B en série et une seule structure A 159

Références bibliographiques

[1] World Health Organization, Air pollution, (2025). https://www.who.int/health-topics/air-pollution (accessed August 22, 2025).

[2] S. Medina, L. Adélaïde, V. Wagner, P. de Crouy Chanel, E. Real, A. Colette, F. Couvidat, B. Bessagnet, A. Durou, S. Host, M. Hulin, M. Corso, M. Pascal, Impact de pollution de l'air ambiant sur la mortalité en France métropolitaine. Réduction en lien avec le confinement du printemps 2020 et nouvelles données sur le poids total pour la période 2016-2019., 2021. www.santepubliquefrance.fr.

[3] L. Morawska, J.W. Tang, W. Bahnfleth, P.M. Bluyssen, A. Boerstra, G. Buonanno, J. Cao, S. Dancer, A. Floto, F. Franchimon, C. Haworth, J. Hogeling, C. Isaxon, J.L. Jimenez, J. Kurnitski, Y. Li, M. Loomans, G. Marks, L.C. Marr, L. Mazzarella, A.K. Melikov, S. Miller, D.K. Milton, W. Nazaroff, P.V. Nielsen, C. Noakes, J. Peccia, X. Querol, C. Sekhar, O. Seppänen, S. Tanabe, R. Tellier, K.W. Tham, P. Wargocki, A. Wierzbicka, M. Yao, How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised?, Environ. Int. 142 (2020) 105832. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832.

[4] T. Greenhalgh, C.R. MacIntyre, M.G. Baker, S. Bhattacharjee, A.A. Chughtai, D. Fisman, M. Kunasekaran, A. Kvalsvig, D. Lupton, M. Oliver, E. Tawfiq, M. Ungrin, J. Vipond, Masks and respirators for prevention of respiratory infections: a state of the science review, Clin. Microbiol. Rev. 37 (2024) e00124-23. https://doi.org/10.1128/cmr.00124-23.

[5] Directive 2008/50/CE, Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, (2008). http://data.europa.eu/eli/dir/2008/50/oj (accessed August 22, 2025).

[6] NF EN ISO 16890-1, Filtres à air de ventilation générale - Partie 1 : spécifications techniques, exigences et système de classification fondé sur l'efficacité des particules en suspension (ePM), (2017).

[7] World Energy Council, Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050 (executive summary), London, 2013.

[8] Camfil Farr, Optimisation économique du traitement d'air, n.d. https://www.camfil.com/en-us/ (accessed August 22, 2025).

[9] Ivan Sheffield, Schroeder Industries, Changes in Filtration and Contamination, (n.d.). https://www.machinerylubrication.com/Read/704/filtration-contamination (accessed August 22, 2025).

[10] K. Singha, S. Maity, M. Singha, P. Paul, D.P. Gon, Effects of Fiber Diameter Distribution of Nonwoven Fabrics on its Properties, Int. J. Text. Sci. 1 (2012) 7–14. https://doi.org/10.5923/j.textile.20120101.02.

[11] NF EN ISO 9092, Non-tissés — Vocabulaire, (2019).

[12] D. Thomas, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, J.-C. Appert-Collin, La filtration des aérosols, ISTE editions, London, 2017.

[13] NF EN 779, Filtres à air de ventilation générale pour l'élimination des particules - Détermination des performances de filtration, (2012).

[14] NF EN 1822-1, Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) - Partie 1 : classification, essais de performance et marquage, (2019).

[15] ISO 29763-1, Filtres à haut rendement et filtres pour l'élimination des particules dans l'air - Partie 1: Classification, essais de performance et marquage, (2024).

[16] NF EN 149, Appareils de protection respiratoire - Demi-masques filtrants contre les particules - Exigences, essais, marquage, (2009).
[17] NF EN 143, Appareils de protection respiratoire - Filtres à particules - Exigences, essais, marquage, (2021).
[18] NF EN 14683, Masques à usage médical - Exigences et méthodes d'essai, (2025).
[19] J. Payen, Matériaux non tissés, Text. Ind. (2013).
[20] I.M. Hutten, Handbook of Nonwoven Filter Media, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann Ltd, 2015.
[21] NF EN ISO 9073-2, Textiles - Méthodes d'essai pour nontissés - Partie 2 : détermination de l'épaisseur, (1997).
[22] E.W. Washburn, The Dynamics of Capillary Flow, Phys Rev 17 (1921) 273–283. https://doi.org/10.1103/PhysRev.17.273.
[23] S. Bourrous, L. Bouilloux, F.-X. Ouf, J.-C. Appert-Collin, D. Thomas, L. Tampère, Y. Morele, Measurement of the Nanoparticles Distribution in Flat and Pleated Filters During Clogging, Aerosol Sci. Technol. 48 (2014) 392–400. https://doi.org/10.1080/02786826.2013.878453.
[24] C. Thiery, Tomographie à rayons X, (2013).
[25] A. Charvet, S. Rolland Du Roscoat, M. Peralba, J.F. Bloch, Y. Gonthier, Contribution of synchrotron X-ray holotomography to the understanding of liquid distribution in a medium during liquid aerosol filtration, Chem. Eng. Sci. 66 (2011) 624–631. https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.008.
[26] S. S Manickam, J.R. McCutcheon, Characterization of polymeric nonwovens using porosimetry, porometry and X-ray computed tomography, J. Membr. Sci. 407–408 (2012) 108–115. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.03.022.
[27] P. Dixit, S.M. Ishtiaque, Layered nonwoven filter embodied with packing density gradient measured by X-ray computed tomography for enhanced filtration performance, J. Text. Inst. 114 (2023) 1455–1468. https://doi.org/10.1080/00405000.2022.2131345.
[28] R. Moreno-Atanasio, R.A. Williams, X. Jia, Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials, Particuology 8 (2010) 81–99. https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.01.001.
[29] F. Théron, E. Lys, A. Joubert, F. Bertrand, L. Le Coq, Characterization of the porous structure of a non-woven fibrous medium for air filtration at local and global scales using porosimetry and X-ray micro-tomography, Powder Technol. 320 (2017) 295–303. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.020.
[30] V.A. Hackley, C.F. Ferraris, The use of nomenclature in dispersion science and technology, US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2001.
[31] H. Zhang, J. Liu, X. Zhang, C. Huang, Y. Zhang, Y. Fu, X. Jin, Design of three-dimensional gradient nonwoven composites with robust dust holding capacity for air filtration, J. Appl. Polym. Sci. 136 (2019) 47827. https://doi.org/10.1002/app.47827.
[32] M.-C. Han, H.-W. He, W.-K. Kong, K. Dong, B.-Y. Wang, X. Yan, L.-M. Wang, X. Ning, High-performance Electret and Antibacterial Polypropylene Meltblown Nonwoven Materials Doped with Boehmite and ZnO Nanoparticles for Air Filtration, Fibers Polym. 23 (2022) 1947–1955. https://doi.org/10.1007/s12221-022-4786-8.

[33] S.-Y. Jeon, W.-J. Na, Y.-O. Choi, M.-G. Lee, H.-E. Kim, W.-R. Yu, In situ monitoring of structural changes in nonwoven mats under tensile loading using X-ray computer tomography, Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 63 (2014) 1–9. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.03.019.

[34] P. Soltani, M.S. Johari, M. Zarrebini, 3D Fiber Orientation Characterization of Nonwoven Fabrics using X-ray Micro-computed Tomography, (n.d.).

[35] M. Tausif, B. Duffy, S. Grishanov, H. Carr, S.J. Russell, Three-Dimensional Fiber Segment Orientation Distribution Using X-Ray Microtomography, Microsc. Microanal. 20 (2014) 1294–1303. https://doi.org/10.1017/S1431927614000695.

[36] T. Ishikawa, Y. Ishii, K. Nakasone, Y. Ohkoshi, K. Kyoung Hou, Structure analysis of needle-punched nonwoven fabrics by X-ray computed tomography, Text. Res. J. 89 (2019) 20–31. https://doi.org/10.1177/0040517517736470.

[37] D. Seguin, A. Montillet, J. Comiti, Experimental characterisation of flow regimes in various porous media—I: Limit of laminar flow regime, Chem. Eng. Sci. 53 (1998).

[38] J. Comiti, N.E. Sabiri, A. Montillet, Experimental characterization of flow regimes in various porous media — III: limit of Darcy's or creeping flow regime for Newtonian and purely viscous non-Newtonian fluids, Chem. Eng. Sci. 55 (2000) 3057–3061. https://doi.org/10.1016/S0009-2509(99)00556-4.

[39] A. Renoux, D. Boulaud, Les aérosols : physique et métrologie, Tec & doc-Lavoisier, Paris Londres New York, 1998.

[40] C.N. Davies, Air filtration, Academic Press, London New York, 1973.

[41] F.A. Dullien, Industriel Gas Cleaning, Academic Press, New York, 1989.

[42] R.C. Brown, Air Filtration : An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters, Perfamon Press, 1993.

[43] P. Forchheimer, Wasserbewegung durch boden, Z. Vereines Dtsch. Ingenieure 45 (1901) 1788.

[44] K. Willeke, Temperature dependence of particle slip in a gaseous medium, J. Aerosol Sci. 7 (1976).

[45] T. Ewart, Etude des écoulements gazeux isothermes en microconduit: du régime hydrodynamique au proche régime moléculaire libre, Université de Provence, 2007.

[46] J. PITAKARNNOP, Analyse expérimentale et simulation numérique d'écoulements raréfiés de gaz simples et de mélanges gazeux dans les microcanaux, Université de Toulouse, 2009.

[47] J. Pich, Pressure characteristics of fibrous aerosol filters, J. Colloid Interface Sci. 37 (1971).

[48] G.W. Jackson, D.F. James, The permeability of fibrous porous media, Can. J. Chem. Eng. 64 (1986) 364–374.

[49] S. Woudberg, Permeability prediction of an analytical pore-scale model for layered and isotropic fibrous porous media, Chem. Eng. Sci. 164 (2017) 232–245.

[50] Z. Zhu, Q. Wang, Q. Wu, On the examination of the Darcy permeability of soft fibrous porous media; new correlations, Chem. Eng. Sci. 173 (2017) 525–536.

[51] D. Thomas, N. Bardin-Monnier, A. Charvet, Effect of the fibre diameter polydispersity on the permeability of nonwoven filter media, Can. J. Chem. Eng. 101 (2023) 4138–4150.

[52] C.N. Davies, The Separation of Airborne Dust and Particles, Air Filtr. (1953).

[53] J. Happel, Viscous flow relative to arrays of cylinders, AIChE J. 5 (1959) 174–177.

[54] K.J. Mattern, W.M. Deen, "Mixing rules" for estimating the hydraulic permeability of fiber mixtures, AIChE J. 54 (2008) 32–41.

[55] D.S. Clague, R.J. Phillips, A numerical calculation of the hydraulic permeability of three-dimensional disordered fibrous media, Phys. Fluids 9 (1997) 1562–1572.

[56] H. Tafreshi, M.S. A Rahman, S. Jaganathan, Q. Wang, B. Pourdeyhimi, Analytical expressions for predicting permeability of bimodal fibrous porous media, Chem. Eng. Sci. 64 (2009) 1154–1159.

[57] R.C. Brown, A. Thorpe, Glass-fibre filters with bimodal fibre size distributions, Powder Technol. 118 (2001) 3–9.

[58] J.-M. Tucny, L. Spreutels, F. Drolet, S. Leclaire, F. Bertrand, D. Vidal, Impact of fiber diameter polydispersity on the permeability of fibrous media, Chem. Eng. Sci. 262 (2022) 117984.

[59] S. Fotovati, H. Vahedi Tafreshi, A. Ashari, S.A. Hosseini, B. Pourdeyhimi, Analytical expressions for predicting capture efficiency of bimodal fibrous filters, J. Aerosol Sci. 41 (2010) 295–305.

[60] S. Jaganathan, H. Vahedi Tafreshi, B. Pourdeyhimi, On the pressure drop prediction of filter media composed of fibers with bimodal diameter distributions, Powder Technol. 181 (2008) 89–95.

[61] P.C. Gervais, Etude expérimentale et numérique du colmatage de filtres plissés, Université de lorraine, 2013.

[62] M. Tomadakis, K. Fuselier, F. Almeer, A. Ferguson, V. Cowdrick, Transport through random bimodal and multimodal fiber structures, Chem. Eng. Sci. 212 (2020) 115298.

[63] D.-B. Kwak, S. Lee, Z. Pan, Y. Liang, H. Lee, D.Y.H. Pui, Semi-empirical equation for determining the pressure drop of nanofibers, Sep. Purif. Technol. 324 (2023) 124585. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124585.

[64] J. Pich, Pressure Drop of Fibrous Filters at Small Knudsen Numbers, Ann. Occup. Hyg. 9 (1966) 23–27. https://doi.org/10.1093/annhyg/9.1.23.

[65] A.A. Kirsch, Ur.V. Zhulanov, Measurement of aerosol penetration through high efficiency filters, J. Aerosol Sci. 9 (1978) 291–298.

[66] H.-C. Yeh, B.Y. Liu, Aerosol filtration by fibrous filters—I. theoretical, J. Aerosol Sci. 5 (1974).

[67] G. Kasper, O. Preining, M. Matteson, Penetration of a multistage diffusion battery at various temperatures, J. Aerosol Sci. 9 (1978).

[68] I.B. Stechkina, A.A. Kirsch, N.A. Fuchs, Studies on Fibrous Aerosol Filters—IV Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration, Ann. Occup. Hyg. 12 (1969) 1–8. https://doi.org/10.1093/annhyg/12.1.1.

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

[70] H. Lamb, Hydrodynamics, Camb. Univ. Press (1932).

[71] Millikan, Coefficients of Slip in Gases and the Law of Reflection of Molecules from the Surfaces of Solids and Liquids, Phys. Rev. 21 (1923).

[72] M. Allen, O. Raabe, Re-evaluation of millikan's oil drop data for the motion of small particles in air, J. Aerosol Sci. 13 (1982).

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

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

[75] M.D. Allen, O.G. Raabe, Slip Correction Measurements of Spherical Solid Aerosol Particles in an Improved Millikan Apparatus, Aerosol Sci. Technol. 4 (1985) 269–286. https://doi.org/10.1080/02786828508959055.

[76] D.K. Hutchins, M.H. Harper, R.L. Felder, Slip Correction Measurements for Solid Spherical Particles by Modulated Dynamic Light Scattering, Aerosol Sci. Technol. 22 (1995) 202–218. https://doi.org/10.1080/02786829408959741.

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

[78] H. Jung, G.W. Mulholland, D.Y.H. Pui, J.H. Kim, Re-evaluation of the slip correction parameter of certified PSL spheres using a nanometer differential mobility analyzer (NDMA), J. Aerosol Sci. 51 (2012) 24–34. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2012.04.005.

[79] B. Liu, K. Rubow, Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media, 5th World Filtr. Congr. 3 (1990) 112–119.

[80] S. Payet, D. Boulaud, G. Madelaine, A. Renoux, Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles, J. Aerosol Sci. 23 (1992).

[81] R.F. Mardanov, S.K. Zaripov, V.F. Sharafutdinov, The theoretical study of the efficiency of diffusion deposition of nanoaerosols in the extended range of the Peclet numbers, Particuology 77 (2023) 47–55. https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.08.005.

[82] N.A. Fuchs, I.B. Stechkina, A Note on the Theory of Fibrous Aerosol Filters, Ann. Occup. Hyg. 6 (1963) 27–30. https://doi.org/10.1093/annhyg/6.1.27.

[83] A.A. Kirsch, N.A. Fuchs, Studies on Fibrous Aerosol Filters—III Diffusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters, Ann. Occup. Hyg. 11 (1968) 299–304. https://doi.org/10.1093/annhyg/11.4.299.

[84] K.W. Lee, B.Y.H. Liu, Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, Aerosol Sci. Technol. 1 (1982) 147–161. https://doi.org/10.1080/02786828208958584.

[85] I. Langmuir, The production of rain by a chain reaction in cumulus clouds at temperatures above freezing, J. Atmospheric Sci. 5 (1948) 175–192. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0175:TPORBA>2.0.CO;2.

[86] N. Rao, M. Faghri, Computer Modeling of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, Aerosol Sci. Technol. 8 (1988) 133–156. https://doi.org/10.1080/02786828808959178.

[87] M. Matteson, Filtration : principles and practices, 2nd edition, revised and expanded, M. Dekker, New York Basel, 1987.

[88] J. Wang, D.R. Chen, D.Y.H. Pui, Modeling of filtration efficiency of nanoparticles in standard filter media, J. Nanoparticle Res. Interdiscip. Forum Nanoscale Sci. Technol. 9 (2007) 109–115.

[89] D. Thomas, Modélisation de l'efficacité unitaire de collecte par diffusion-Part II, Rapport LRGP/SAFE-2, 2022.

[90] G. Miecret, J. Gustavsson, Mathematic expression of HEPa and ULPA filters efficiency experimental verification - practical alliance to new efficiency test methods, Comtaminexpert (1989).

[91] A. Charvet, N. Bardin-Monnier, D. Thomas, Modélisation de l'efficacité unitaire par interception avec GeoDict, Rapport LRGP/SAFE-2, 2021.

[92] A. Charvet, N. Bardin-Monnier, E. Cabaset, D. Thomas, Numerical experimentations in filtration, GeoDict Innovation Conference, 6-7 February, Ramstein, 2024.

[93] S.K. Friedlander, R.A. Pasceri, N. Blakebrough, Biochemical and Biological Engineering, N. Blankenbrough, Academic, 1967.

[94] R. Gougeon, Filtration des aérosols liquides par les filtres à fibres en régimes d'interception et d'inertie, Service de documentation et d'édition multimédia, Centre d'études de Saclay, 1995.

[95] H. Landahl, R. Herrmann, Sampling of liquid aerosols by wires, cylinders, and slides, and the efficiency of impaction of the droplets, J. Colloid Sci. 4 (1949).

[96] S. Ilias, P.L. Douglas, Inertial impaction of aerosol particles on cylinders at intermediate and high reynolds numbers, Chem. Eng. Sci. 44 (1989) 81–99. https://doi.org/10.1016/0009-2509(89)85235-2.

[97] M. Dr.-Ing. Azimian, L. Cheng, A. Wiegmann, Filtration modeling and simulation with GeoDict®, from filter media to filter element, Math2Market GmbH, DE, 2020. https://doi.org/10.30423/report.m2m-2020-03 (accessed March 26, 2025).

[98] Math2Market GmbH, GeoDict User Guide : FiberGeo, Math2Market GmbH, DE, 2023. https://doi.org/10.30423/userguide.geodict (accessed March 3, 2025).

[99] Math2Market GmbH, GeoDict User Guide : FlowDict, Math2Market GmbH, DE, 2023. https://doi.org/10.30423/userguide.geodict (accessed March 3, 2025).

[100] S. Linden, A. Wiegmann, H. Hagen, The LIR space partitioning system applied to the Stokes equations, Graph. Models 82 (2015) 58–66.

[101] Math2Market GmbH, GeoDict User Guide : FilterDict, Math2Market GmbH, DE, 2023. https://doi.org/10.30423/userguide.geodict (accessed March 3, 2025).

[102] B. Emami, S. Fotovati, M.M. Amrei, H.V. Tafreshi, On the effects of fiber orientation in permeability of fibrous media to power-law fluids, Int. J. Heat Mass Transf. 60 (2013) 375–379.

[103] A.S. Sangani, A. Acrivos, Slow flow past periodic arrays of cylinders with application to heat transfer, Int. J. Multiph. Flow 8 (1982) 193–206.

[104] J. Payen, P. Vroman, M. Lewandowski, A. Perwuelz, S. Callé-Chazelet, D. Thomas, Influence of fiber diameter, fiber combinations and solid volume fraction on air filtration properties in nonwovens, Text. Res. J. 82 (2012) 1948–1959.

[105] M. Azimian, C. Kühnle, A. Wiegmann, Design and Optimization of Fibrous Filter Media Using Lifetime Multipass Simulations, Chem. Eng. Technol. 41 (2018) 928–935. https://doi.org/10.1002/ceat.201700585.

[106] Z. Pan, X. Zhang, Z. Sun, F. Jiang, L. Lin, Y. Liang, M. Tang, J. Wang, High fidelity simulation of ultrafine PM filtration by multiscale fibrous media characterized by a combination of X-ray CT and FIB-SEM, J. Membr. Sci. 620 (2021) 118925. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118925.

[107] P. Baron, K. Willeke, Aerosol measurement: principles, techniques, and applications, United States, 2001.

[108] D. Thomas, A. Charvet, N. Bardin-Monnier, E. Cabaset, Modélisation de la perte de charge d'un média fibreux en régime d'écoulement de transition - approche numérique, Congrès Fr. Sur Aérosols (2025).

[109] F. Lozano, Elaboration de matelas à base de fibres de verre par voie humide, (2019).

[110] M.A. Hubbe, A.A. Koukoulas, Wet-Laid Nonwovens Manufacture – Chemical Approaches Using Synthetic and Cellulosic Fibers, BioResources 11 (2016) 5500–5552. https://doi.org/10.15376/biores.11.2.Hubbe.

[111] G.A. Parks, The Isoelectric Points of Solid Oxides, Solid Hydroxides, and Aqueous Hydroxo Complex Systems, Chem. Rev. 65 (1965) 177–198.

[112] G. Sposito, On Points of Zero Charge, Environ. Sci. Technol. 33 (1999) 208–208.

[113] J. Jupille, Les surfaces du verre : structure et physico-chimie, Comptes Rendus Académie Sci. Sér. IV Phys. Astrophys. 2 (2001) 303–320.

[114] A. Carre, F. Roger, C. Varinot, Study of acid/base properties of oxide, oxide glass, and glass-ceramic surfaces, J. Colloid Interface Sci. 154 (1992) 174–183.

[115] M.A. Hubbe, A.A. Koukoulas, Wet-Laid Nonwovens Manufacture – Chemical Approaches Using Synthetic and Cellulosic Fibers, BioResources 11 (2016) 5500–5552.

[116] M. Latifi, H.V. Tafreshi, B. Pourdeyhimi, A Note on an Optical Method to Evaluate Fiber Dispersion in Wet-laid Nonwoven Process, Text. Res. J. 78 (2008) 518–523. https://doi.org/10.1177/0040517507081910.

[117] S. Fathi-Khalfbadam, M. Latifi, S. Sheikhzadeh-Najar, F. Towhidkhah, Analysis and Simulation of Fiber Dispersion in Water Using a Theoretical Analogous Model, J. Dispers. Sci. Technol. 32 (2011) 352–358.

[118] JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections), (2008).

[119] B. Efron, Missing Data, Imputation, and the Bootstrap, J. Am. Stat. Assoc. 89 (1994) 463–475.

[120] B. Efron, R.J. Tibshirani, An introduction to the bootstrap, Chapman & Hall, New York, 1993.

[121] E. Schweers, H. Umhauer, F. Löffler, Experimental Investigation of Particle Collection on Single Fibres of Different Configurations, Part. Part. Syst. Charact. 11 (1994) 275–283. https://doi.org/10.1002/ppsc.19940110402.

[122] T. Ptak, T. Jaroszczyk, Theoretical-experimental aerosol filtration model for fibrous filters at intermediate Reynolds numbers, in: Proc. 5th World Filtr. Congr. Nice Fr., 1990: pp. 5–8.

Annexes

Sommaire

Annexes 191

Annexe 2-A : Résolution du maillage 192

Annexe 3-A : Structures microniques modélisées via GeoDict 194

Annexe 3-B : Modèle de la littérature (Davies et Jackson et James) 196

Annexe 3-C : Structures submicroniques modélisées via GeoDict 198

Annexe 4-A : FSD des médias fibreux modèles 201

Annexe 4-B : Modélisation de l'épaisseur des formettes selon la contrainte appliquée 203

Annexe 5-A : Modélisation des efficacités unitaires par diffusion par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale) 205

Annexe 5-B : Modélisation des efficacités unitaires par interception par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale) 207

Annexe 5-C : Modélisation des efficacités unitaires par inertie par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale) 209

Annexe 5-D : Structures iso-perméables de même compacité et même diamètre équivalent 211

Annexe 5-E : Structures iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différents 213

Annexe 2-A : Résolution du maillage

- **Figure 2-4.1 : Structure 4 µm – 5% (Mono. 1) :**

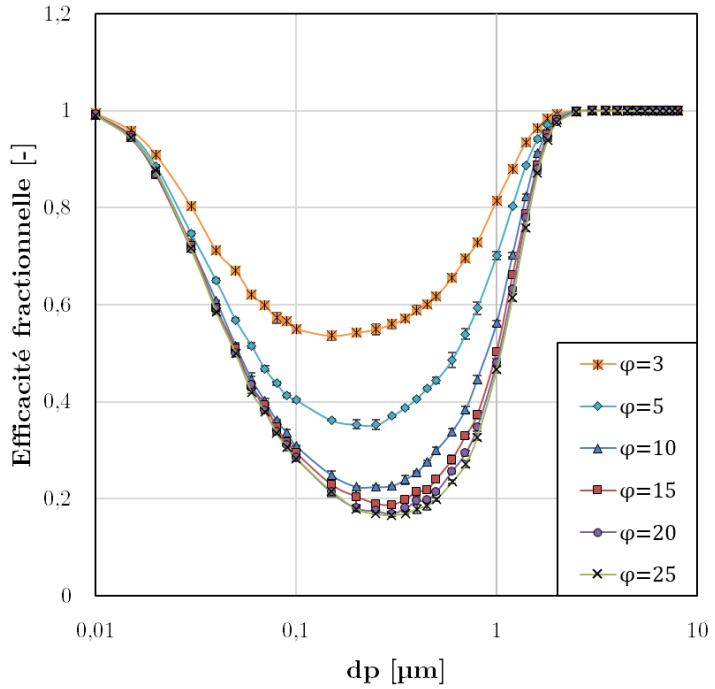


Figure 2.A.1 (a) : Efficacité fractionnelle de la structure Mono. 1 en fonction de la résolution du maillage

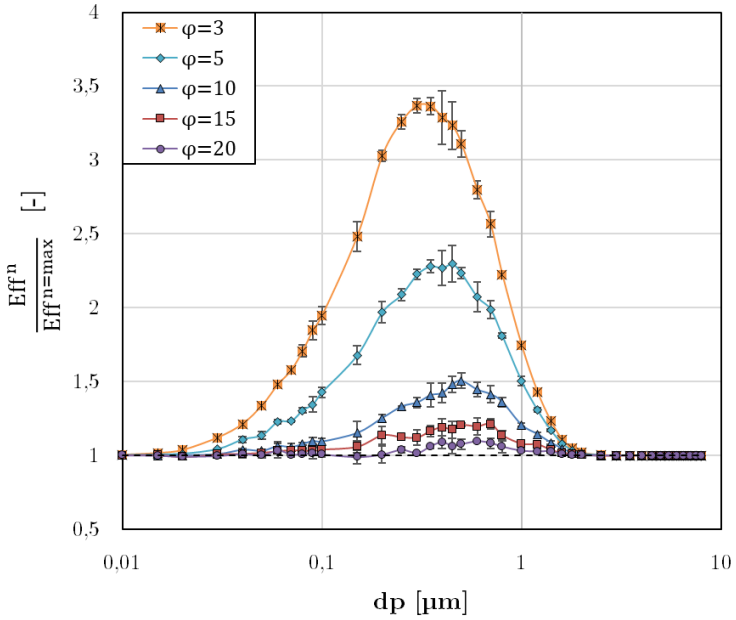


Figure 2.A.1 (b) : Évolution du rapport d'efficacité fractionnelle $Eff^n/Eff^{n=max}$ selon différentes résolutions du maillage (Mono. 1)

- **Figure 2-A.2 : Structure 4 µm – 20% (Mono. 2):**

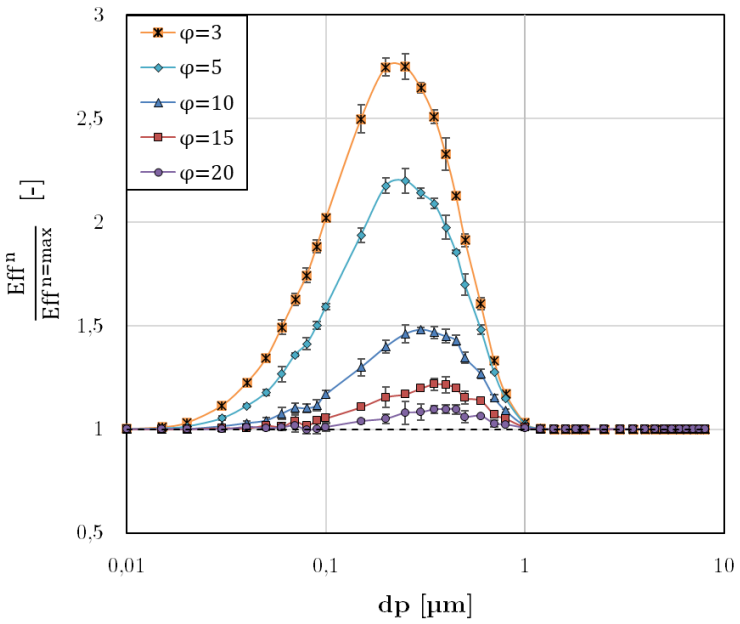


Figure 2.A.2 (a) : Efficacité fractionnelle de la structure Mono. 2 en fonction de la résolution du maillage

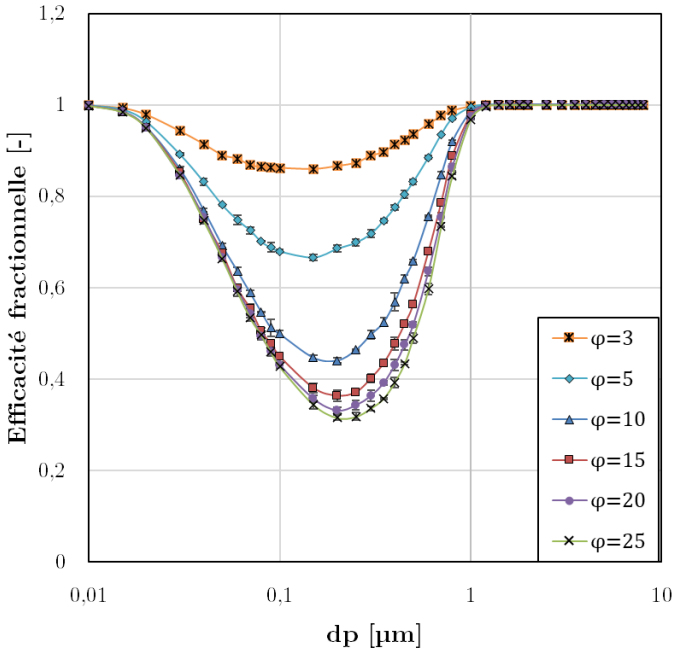


Figure 2.A.2 (b) : Évolution du rapport d'efficacité fractionnelle $Eff^n/Eff^{n=max}$ selon différentes résolutions du maillage (Mono. 2)

Annexe 3-A : Structures microniques modélisées via GeoDict

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques structurales des médias modélisées.

- **Tableau 3-A.1 : Distributions monomodales à quadrimodales de fibres**

d_1 (µm)	d_2 (µm)	d_3 (µm)	d_4 (µm)	f_{m1}	f_{m2}	f_{m3}	f_{m4}	d_{eq} (µm)	∝ (%)
30	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
4,5	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
20	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
5	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
6	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
2	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
8	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
1,5	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
25	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
3	/	/	/	1	/	/	/	/	1/5/12/20
4,5	30	/	/	0,75	0,25	/	/	5,38	1/5/12/20
4,5	30	/	/	0,50	0,50	/	/	6,88	1/5/12/20
4,5	30	/	/	0,25	0,75	/	/	10,19	1/5/12/20
4,5	30	/	/	0,10	0,90	/	/	15,78	1/5/12/20
5	20	/	/	0,75	0,25	/	/	5,89	1/5/12/20
5	20	/	/	0,50	0,50	/	/	7,34	1/5/12/20
5	20	/	/	0,25	0,75	/	/	10,19	1/5/12/20
5	20	/	/	0,10	0,90	/	/	14,04	1/5/12/20
2	6	/	/	0,75	0,25	/	/	2,32	1/5/12/20
2	6	/	/	0,50	0,50	/	/	2,82	1/5/12/20
2	6	/	/	0,25	0,75	/	/	3,72	1/5/12/20
2	6	/	/	0,10	0,90	/	/	4,75	1/5/12/20
1,5	8	/	/	0,75	0,25	/	/	1,79	1/5/12/20
1,5	8	/	/	0,50	0,50	/	/	2,26	1/5/12/20
1,5	8	/	/	0,25	0,75	/	/	3,27	1/5/12/20
1,5	8	/	/	0,10	0,90	/	/	4,83	1/5/12/20
3	25	/	/	0,75	0,25	/	/	3,60	1/5/12/20
3	25	/	/	0,50	0,50	/	/	4,63	1/5/12/20
3	25	/	/	0,25	0,75	/	/	6,99	1/5/12/20
3	25	/	/	0,10	0,90	/	/	11,27	1/5/12/20
1,5	6	20	/	0,25	0,25	0,50	/	3,43	20
1,5	6	20	/	0,25	0,25	0,50	/	3,43	12
1,5	6	20	/	0,10	0,40	0,50	/	5,11	20
6,5	7,4	11,5	/	0,43	0,15	0,42	/	7,97	5
7,7	9	9,7	/	0,20	0,30	0,50	/	9,01	15
5,3	7,8	8,6	/	0,52	0,15	0,33	/	6,37	15
5,2	7,1	8,2	/	0,49	0,35	0,16	/	6,09	20
1,5	4,5	8	20	0,25	0,25	0,25	0,25	3,2	20
1,5	4,5	8	20	0,15	0,15	0,20	0,50	4,32	20/12
5	8	10	16	0,20	0,10	0,30	0,40	8,84	5

5	8	10	14	0,55	0,10	0,15	0,20	6,37	10/15
3	4	6	8	0,30	0,10	0,20	0,40	4,60	5
9	12	17	20	0,20	0,10	0,20	0,50	14,4	5
2	3	4	6	0,20	0,10	0,20	0,50	3,56	7/10
5	8	10	16	0,27	0,10	0,30	0,33	8,12	20

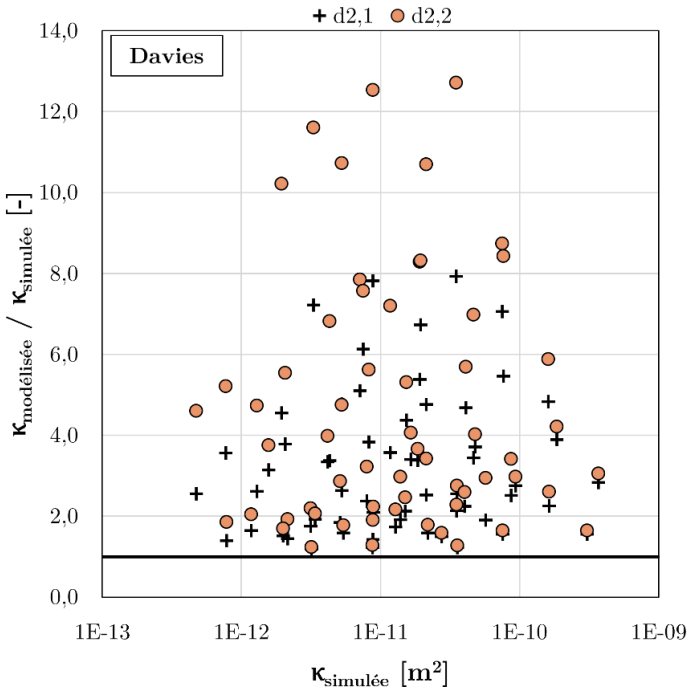
- **Tableau 3-A.2 : Distributions décamodales de fibres**

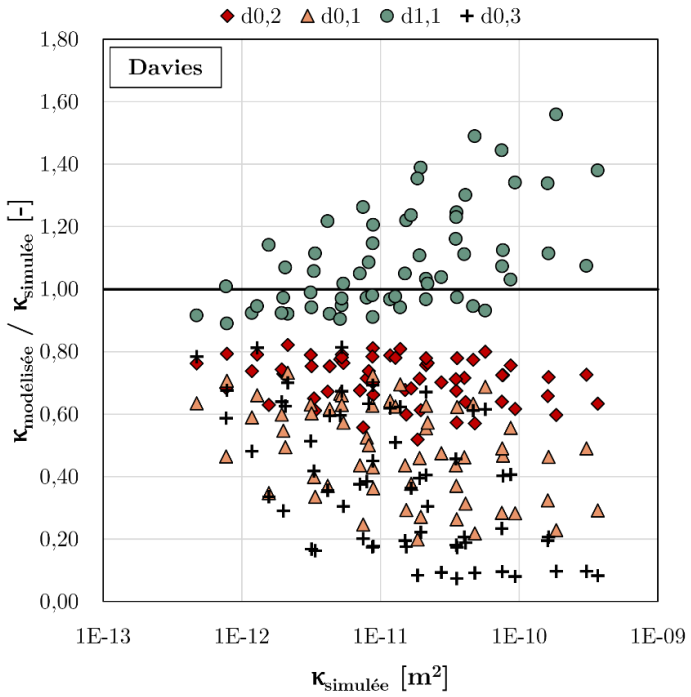
Média 1		**Média 2**		**Média 3**	
$\mathbf{d_i}$ **(µm)**	f_{mi}	$\mathbf{d_i}$ **(µm)**	f_{mi}	$\mathbf{d_i}$ **(µm)**	f_{mi}
2,1	0,1	2,1	0,10	5,1	0,1
3,1	0,1	3,1	0,11	6,2	0,1
3,2	0,1	3,2	0,04	7,4	0,1
3,4	0,1	3,4	0,06	7,5	0,1
3,9	0,1	3,9	0,05	7,7	0,1
4,6	0,1	4,6	0,30	8,8	0,1
4,7	0,1	4,7	0,09	10,5	0,1
6,3	0,1	6,3	0,01	11	0,1
7,2	0,1	7,2	0,20	11,7	0,1
9	0,1	9	0,04	13	0,1

Annexe 3-B : Modèle de la littérature (Davies et Jackson et James)

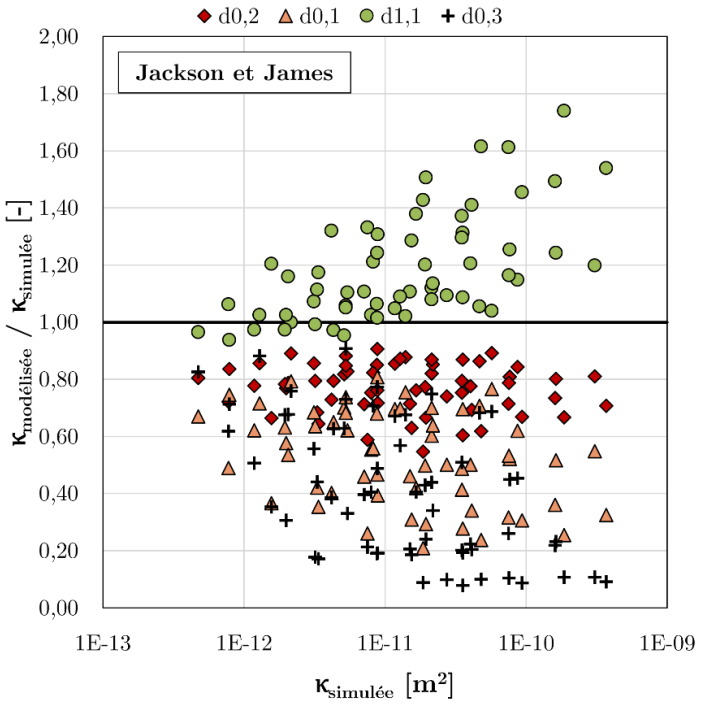
Les deux figures suivantes présentent les résultats de l'application du modèle de Davies ou de Jackson et James, tous deux associés à différentes expressions de diamètres équivalents, sur les structures simulées. L'objectif est de comparer les valeurs prédites par ces modèles vis-à-vis de la perméabilité numérique.

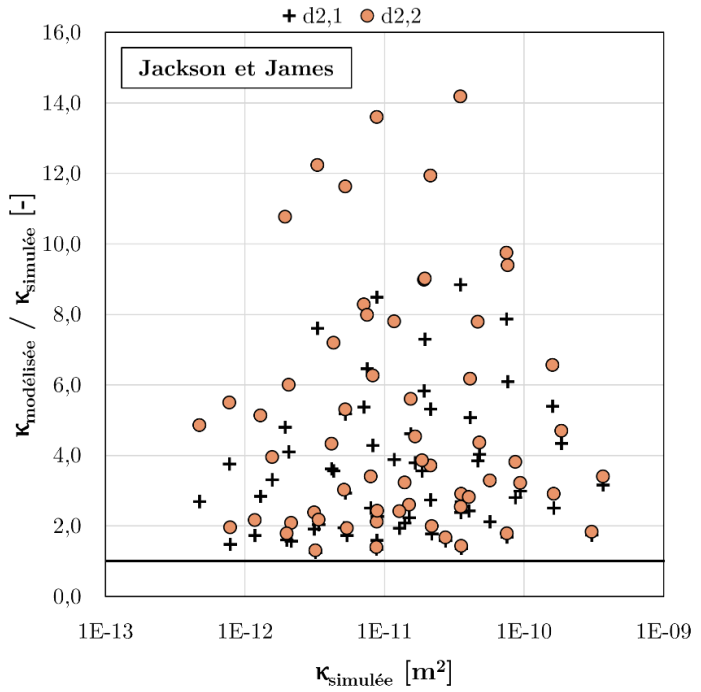
- **Figure 3-A.1 : Perméabilité adimensionnelle de Davies**





- **Figure 3-A.1 : Perméabilité adimensionnelle de Jackson et James**





Annexe 3-C : Structures submicroniques modélisées via GeoDict

Les tableaux suivants présentent les caractéristiques structurales des médias modélisées.

- **Tableau 3-C.1 : Distributions monomodales à quadrimodales de fibres**

d_1 (µm)	d_2 (µm)	d_3 (µm)	d_4 (µm)	f_{m1}	f_{m2}	f_{m3}	f_{m4}	α (%)
0,05	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5
0,06	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/12,5/15
0,07	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/12,5/15
0,08	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/12,5/15/20
0,09	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/12,5/15/20
0,1	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/12,5/15/20
0,15	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/12,5/15/20
0,2	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/12,5/15/20
0,35	/	/	/	1	/	/	/	3/5/10/15/20
0,5	/	/	/	1	/	/	/	3/5/10/15/20
1	/	/	/	1	/	/	/	3/5/10/20/25/40
2	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/15/20/25/30 /40/50
3	/	/	/	1	/	/	/	2/7,5/15/30/50
5	/	/	/	1	/	/	/	2/3/5/7,5/10/20/25/40
8	/	/	/	1	/	/	/	3/7,5/10/15/30/50
0,5	2	/	/	0,9	0,1	/	/	5
0,5	2	/	/	0,75	0,25	/	/	5
0,5	2	/	/	0,5	0,5	/	/	5
0,5	2	/	/	0,25	0,75	/	/	5
0,5	2	/	/	0,1	0,9	/	/	5
0,2	1	/	/	0,9	0,1	/	/	5/10/15
0,2	1	/	/	0,75	0,25	/	/	5/10/15
0,2	1	/	/	0,5	0,5	/	/	5/10/15
0,2	1	/	/	0,25	0,75	/	/	5/10/15
0,2	1	/	/	0,1	0,9	/	/	5/10/15
0,3	1,2	/	/	0,9	0,1	/	/	5/10/15
0,3	1,2	/	/	0,75	0,25	/	/	5/10/15
0,3	1,2	/	/	0,5	0,5	/	/	5/10/15
0,3	1,2	/	/	0,25	0,75	/	/	5/10/15
0,3	1,2	/	/	0,1	0,9	/	/	5/10/15
0,5	1,5	/	/	0,9	0,1	/	/	5/10/15
0,5	1,5	/	/	0,75	0,25	/	/	5/10/15
0,5	1,5	/	/	0,5	0,5	/	/	5/10/15
0,5	1,5	/	/	0,25	0,75	/	/	5/10/15
0,5	1,5	/	/	0,1	0,9	/	/	5/10/15
0,1	0,4	/	/	0,9	0,1	/	/	3/5/10
0,1	0,4	/	/	0,75	0,25	/	/	3/5/10
0,1	0,4	/	/	0,5	0,5	/	/	3/5/10

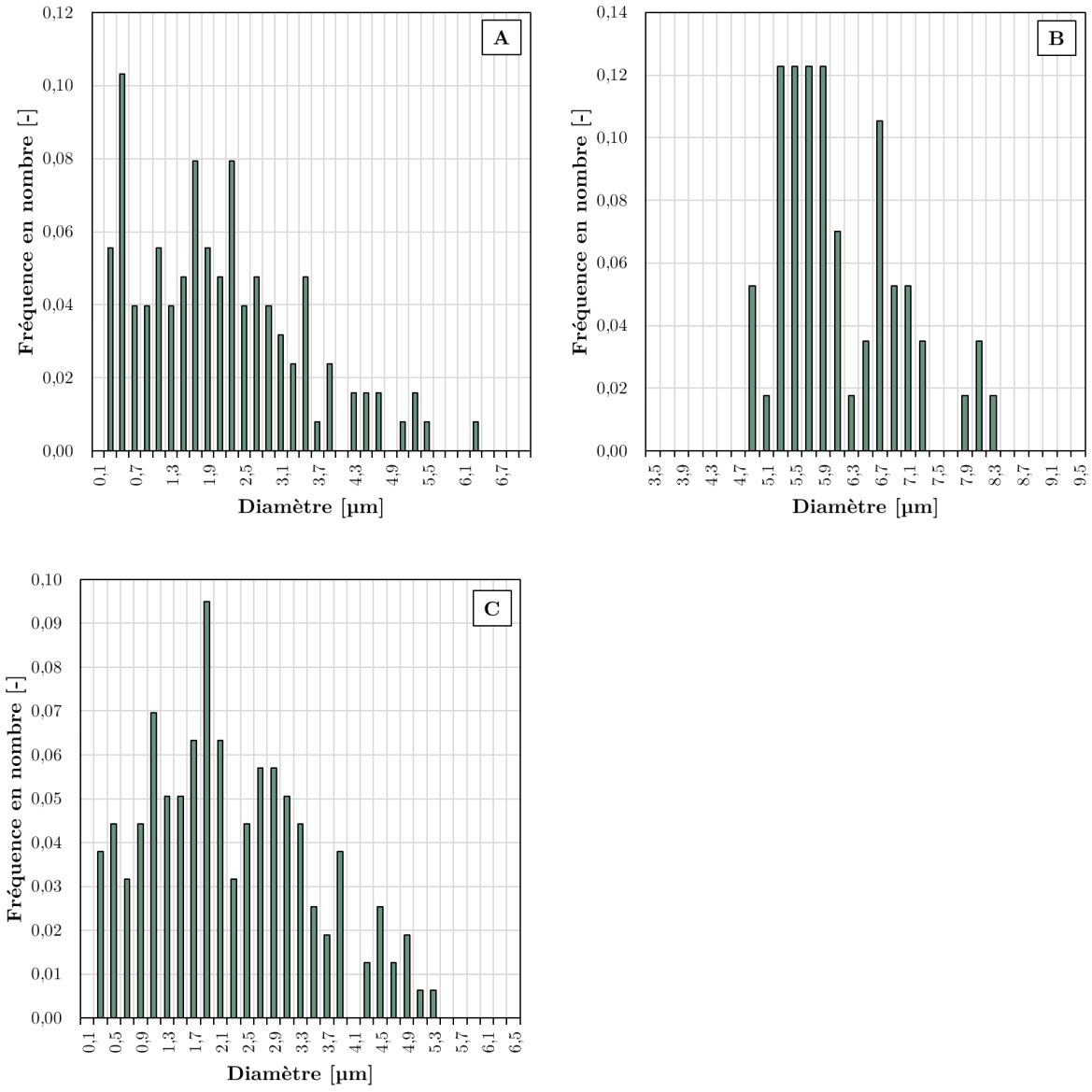
0,1	0,4	/	/	0,25	0,75	/	/	3/5/10
0,1	0,4	/	/	0,1	0,9	/	/	3/5/10
0,1	0,2	/	/	0,9	0,1	/	/	3/5/10
0,1	0,2	/	/	0,75	0,25	/	/	3/5/10
0,1	0,2	/	/	0,5	0,5	/	/	3/5/10
0,1	0,2	/	/	0,25	0,75	/	/	3/5/10
0,1	0,2	/	/	0,1	0,9	/	/	3/5/10
0,05	0,2	/	/	0,9	0,1	/	/	3/5
0,05	0,2	/	/	0,75	0,25	/	/	3/5
0,05	0,2	/	/	0,5	0,5	/	/	3/5
0,05	0,2	/	/	0,25	0,75	/	/	3/5
0,05	0,2	/	/	0,1	0,9	/	/	3/5
1,5	6	20	/	0,25	0,25	0,5	/	12/20
1,5	6	20	/	0,1	0,4	0,5	/	20
6,5	7,4	11,5	/	0,43	0,15	0,42	/	5
7,7	9	9,7	/	0,2	0,3	0,5	/	15
5,3	7,8	8,6	/	0,52	0,15	0,33	/	15
5,2	7,1	8,2	/	0,49	0,35	0,16	/	20
0,5	1,5	5	/	0,8	0,1	0,1	/	5/10
0,5	1,5	5	/	0,65	0,25	0,1	/	5/10
0,5	1,5	5	/	0,45	0,45	0,1	/	5/10
0,5	1,5	5	/	0,25	0,65	0,1	/	5/10
0,5	1,5	5	/	0,1	0,8	0,1	/	5/10
0,1	0,3	1	/	0,8	0,1	0,1	/	5/10
0,1	0,3	1	/	0,65	0,25	0,1	/	5/10
0,1	0,3	1	/	0,45	0,45	0,1	/	5/10
0,1	0,3	1	/	0,25	0,65	0,1	/	5/10
0,1	0,3	1	/	0,1	0,8	0,1	/	5/10
0,075	0,15	0,5	/	0,8	0,1	0,1	/	5/10
0,075	0,15	0,5	/	0,65	0,25	0,1	/	5/10
0,075	0,15	0,5	/	0,45	0,45	0,1	/	5/10
0,075	0,15	0,5	/	0,25	0,65	0,1	/	5/10
0,075	0,15	0,5	/	0,1	0,8	0,1	/	5/10
1,5	4,5	8	20	0,25	0,25	0,25	0,25	20
1,5	4,5	8	20	0,15	0,15	0,2	0,5	12/20
5	8	10	16	0,2	0,1	0,3	0,4	5
5	8	10	14	0,55	0,1	0,15	0,2	10/15
3	4	6	8	0,3	0,1	0,2	0,4	5
9	12	17	20	0,2	0,1	0,2	0,5	5
2	3	4	6	0,2	0,1	0,2	0,5	7/10
5	8	10	16	0,27	0,1	0,3	0,33	20
0,25	0,5	1,5	5	0,04	0,70	0,15	0,11	5/8/10
0,25	0,5	1,5	5	0,12	0,67	0,05	0,16	5
0,25	0,5	1,5	5	0,15	0,70	0,05	0,10	8/10
0,25	0,5	1,5	5	0,20	0,50	0,15	0,15	5
0,25	0,5	1,5	5	0,24	0,50	0,15	0,11	10
0,25	0,5	1,5	5	0,25	0,50	0,15	0,10	8

0,25	0,5	1,5	5	0,35	0,50	0,05	0,10	5/8/10
0,25	0,5	1,5	5	0,36	0,38	0,15	0,11	5/8/10
0,25	0,5	1,5	5	0,45	0,38	0,05	0,12	5/8/10
0,25	0,5	1,5	5	0,49	0,25	0,15	0,11	5/8/10
0,25	0,5	1,5	5	0,60	0,25	0,05	0,10	5/8/10
0,25	0,5	1,5	5	0,68	0,05	0,15	0,12	5/8/10
0,25	0,5	1,5	5	0,78	0,05	0,05	0,12	5/8/10
0,1	0,25	0,5	1	0,10	0,70	0,10	0,10	5/10/15
0,1	0,25	0,5	1	0,25	0,55	0,10	0,10	5/10/15
0,1	0,25	0,5	1	0,40	0,40	0,10	0,10	5/10/15
0,1	0,25	0,5	1	0,55	0,25	0,10	0,10	5/10/15
0,1	0,25	0,5	1	0,70	0,10	0,10	0,10	5/10/15

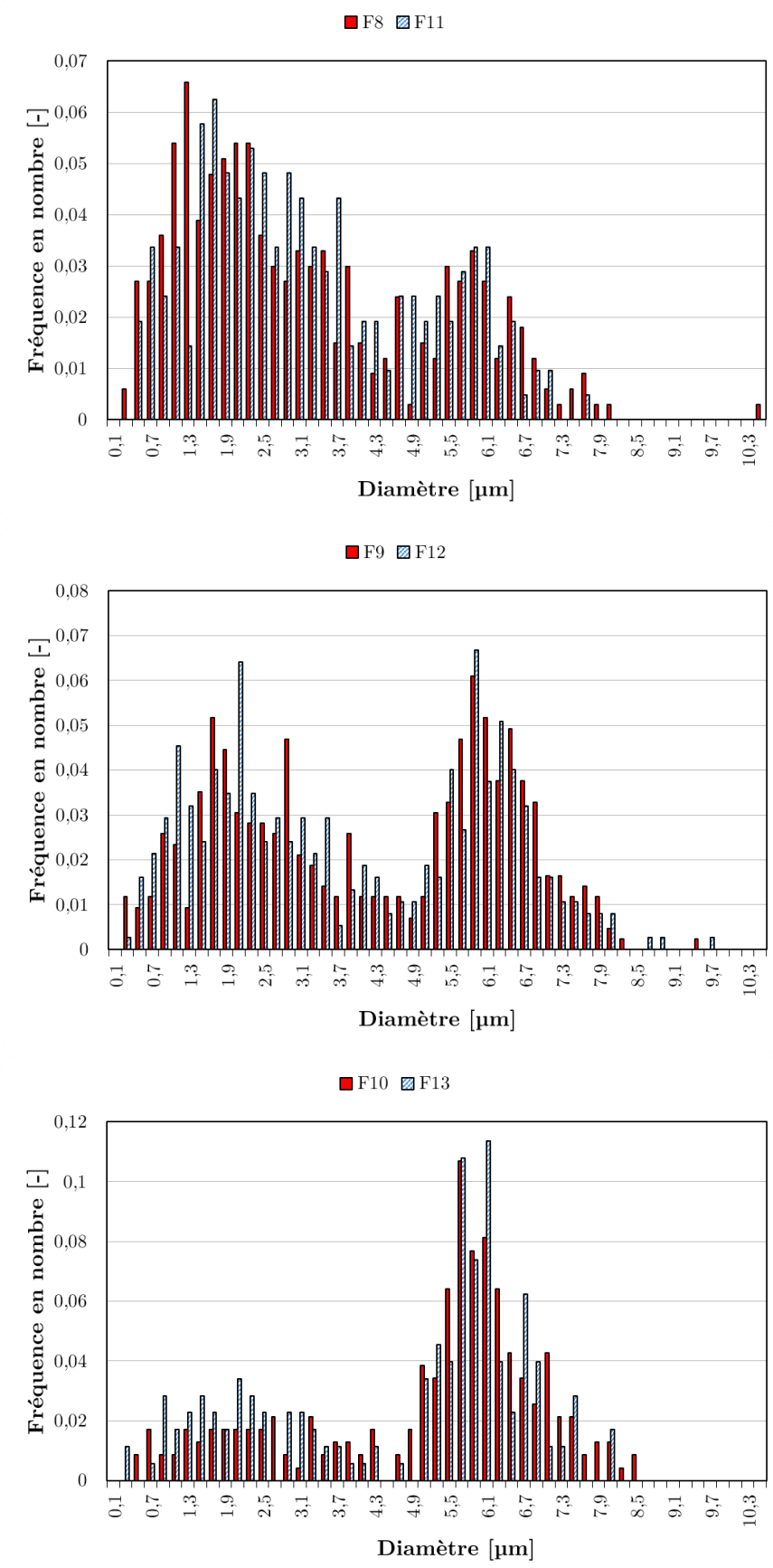
Annexe 4-A : FSD des médias fibreux modèles

Les distributions de fibres des médias modèles de distribution monomodale sont présentées en figure 4-A.1 et celles des formettes de distribution bimodale en 4-A.2.

- **Figure 4-A.1 : FSD des médias de distribution monomodale (A, B, C)**



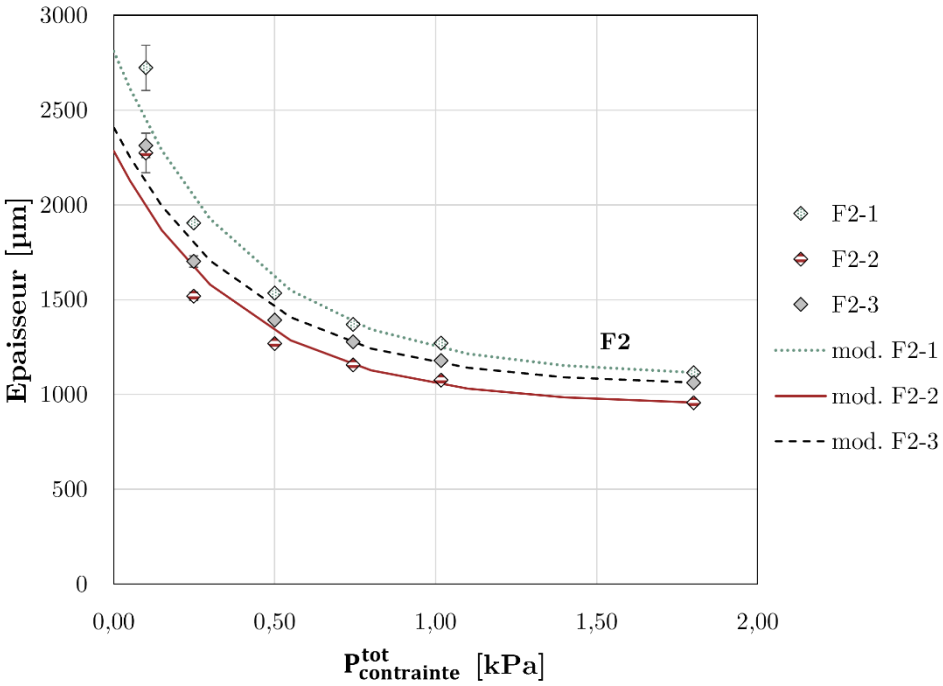
- **Figure 4-A.2 : FSD des formettes de distribution bimodale**



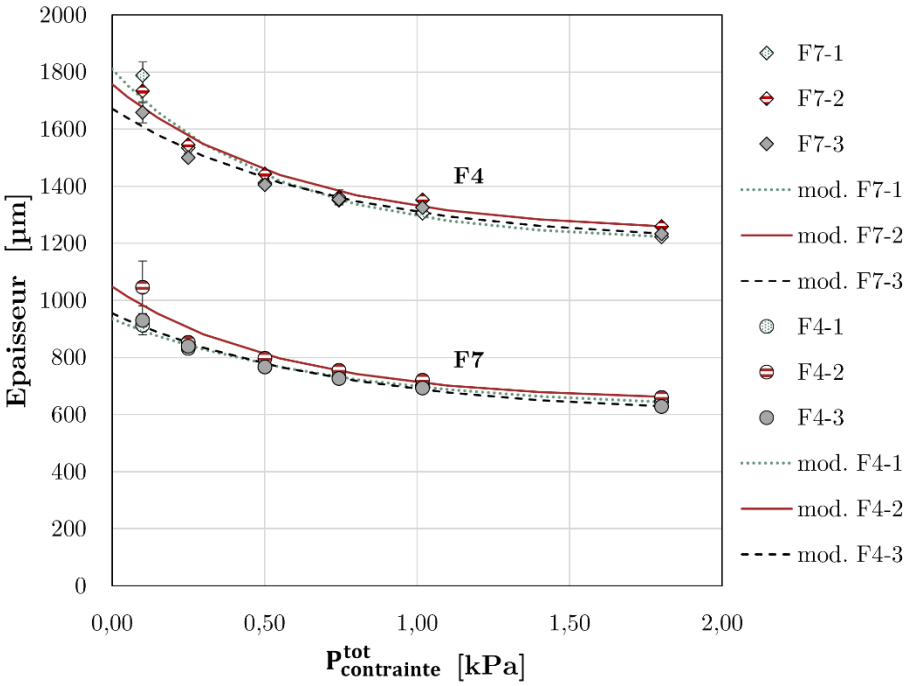
Annexe 4-B : Modélisation de l'épaisseur des formettes selon la contrainte appliquée

Les figures 4-B.1, 4-B.2, 4-B.3 et 4-B.4 présentent les courbes de compressibilité modélisée pour des échantillons issus de différentes formettes.

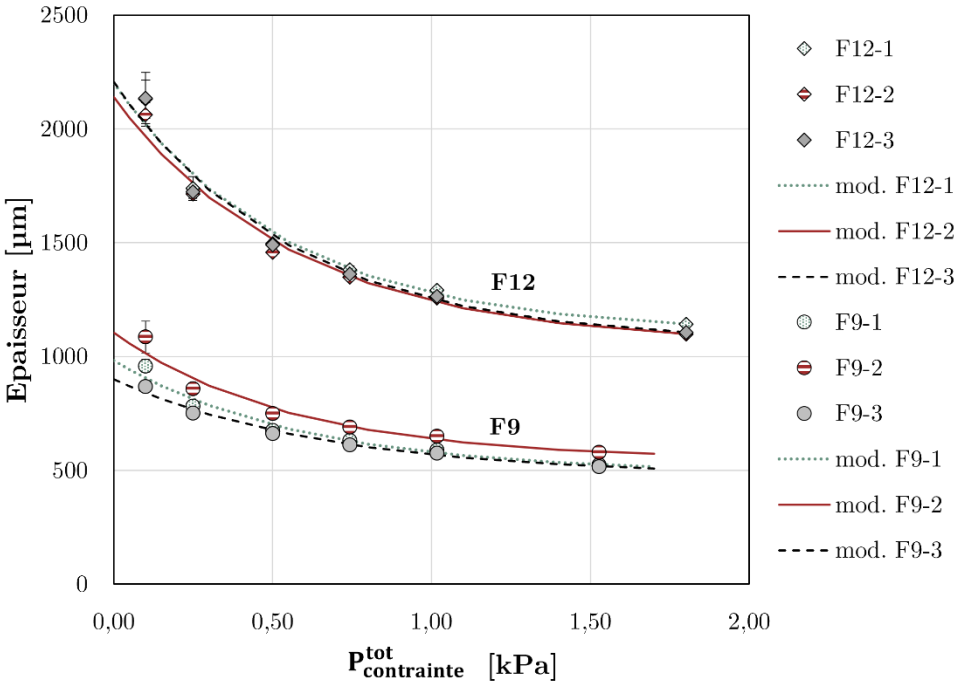
- **Figure 4-B.1 : Courbes de compressibilité des médias de la formette F2**



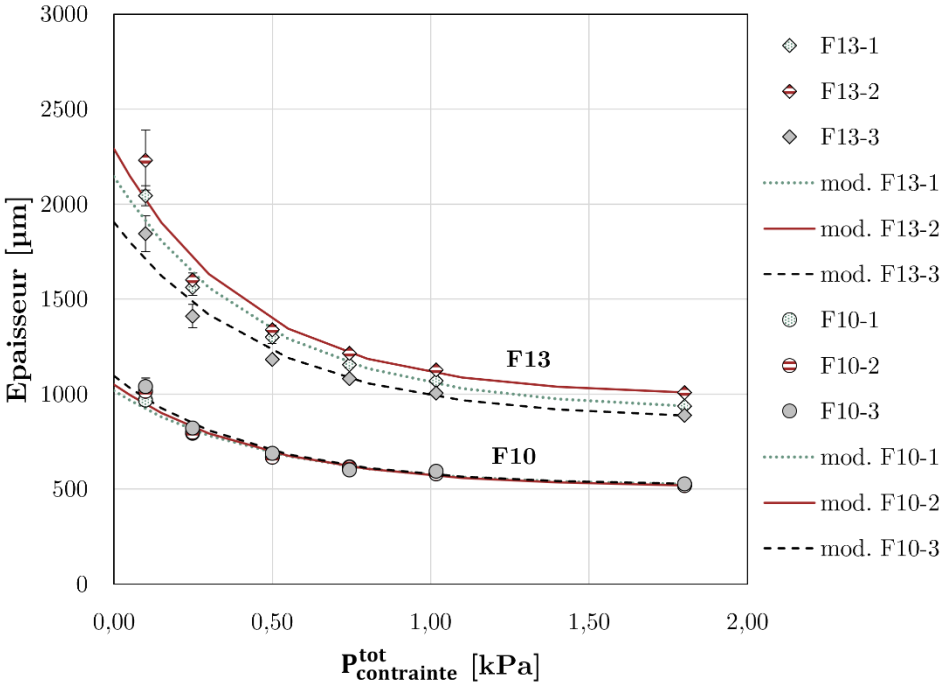
- **Figure 4-B.2 : Courbes de compressibilité des médias des formettes F7 et F4**



- **Figure 4-B.2 : Courbes de compressibilité des médias des formettes F12 et F9**



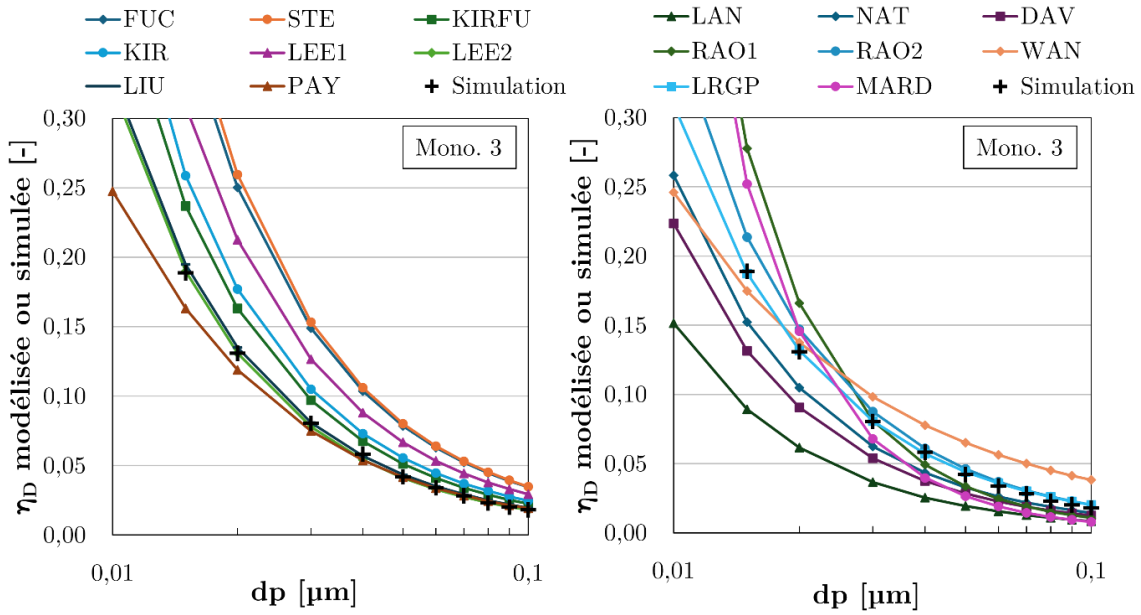
- **Figure 4-B.2 : Courbes de compressibilité des médias des formettes F13 et F10**



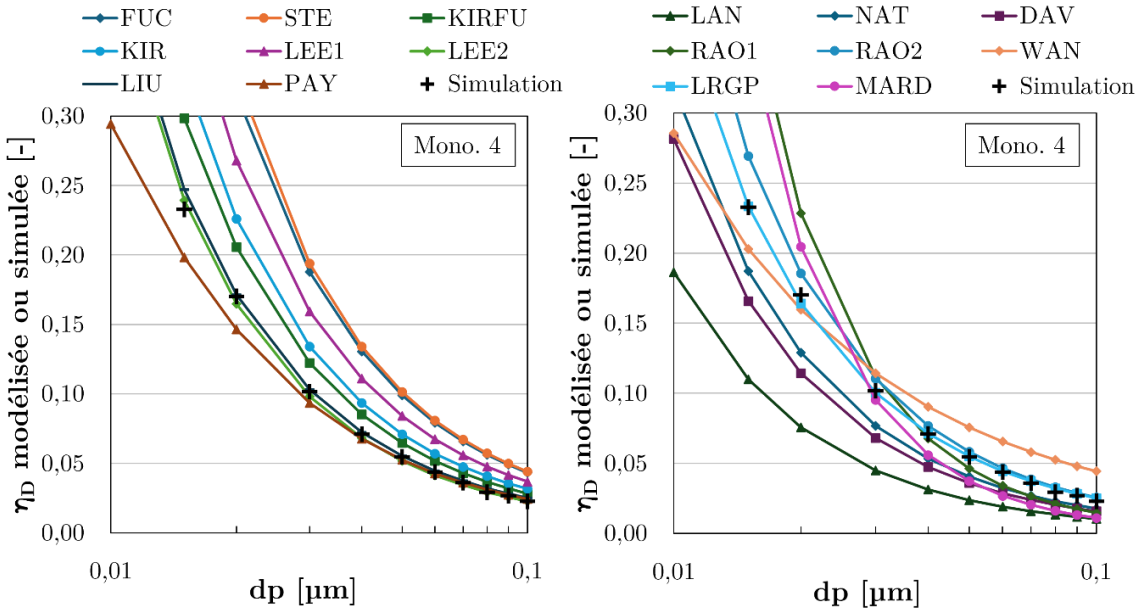
Annexe 5-A : Modélisation des efficacités unitaires par diffusion par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale)

Les figures suivantes présentent les évolutions des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour les structures Mono. 3, Mono. 4, Mono. 5 et Mono. 6 en fonction du diamètre de particule.

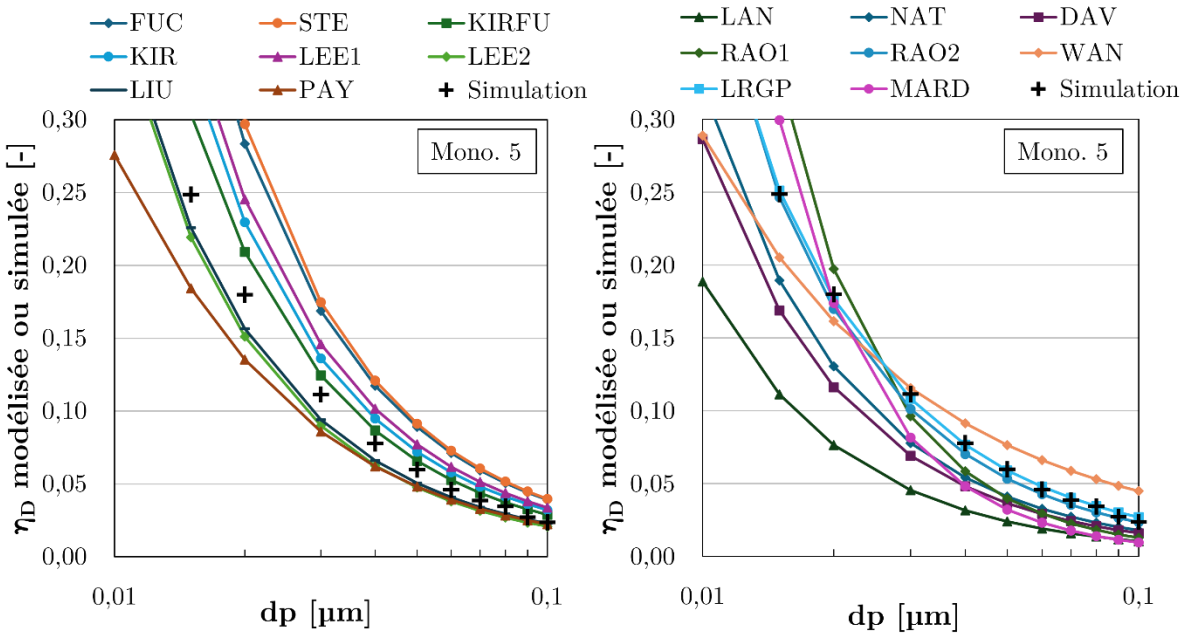
- **Figure 5-A.1 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 3 en fonction du diamètre de particule**



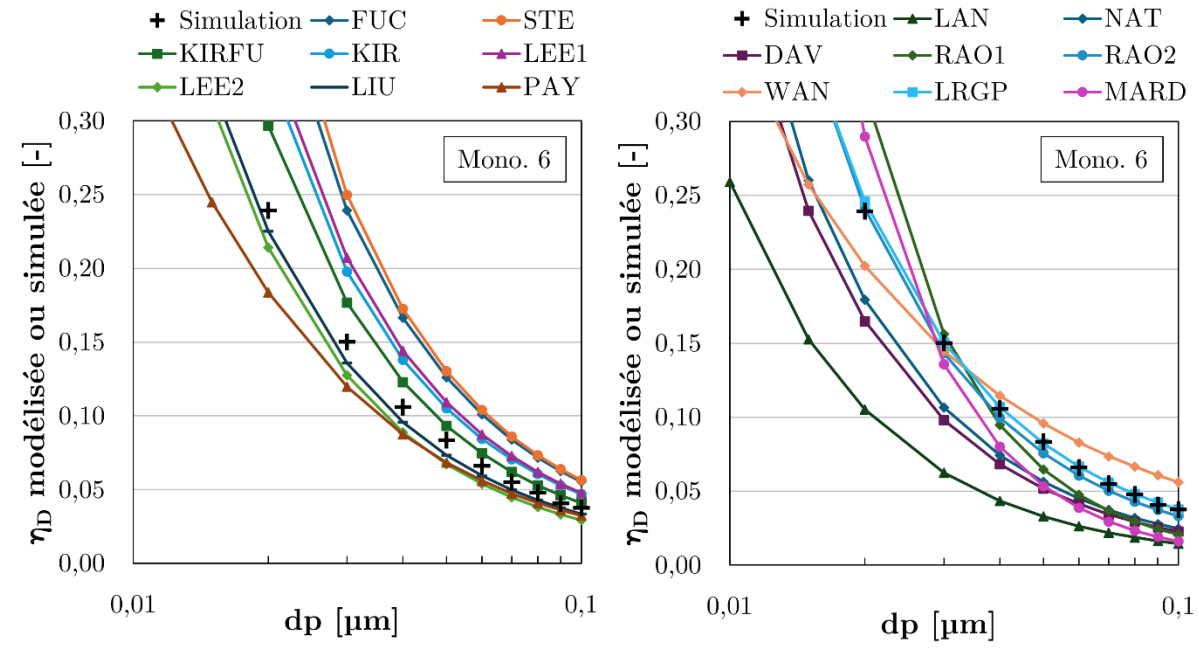
- **Figure 5-A.2 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 4 en fonction du diamètre de particule**



- **Figure 5-A.3 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 5 en fonction du diamètre de particule**



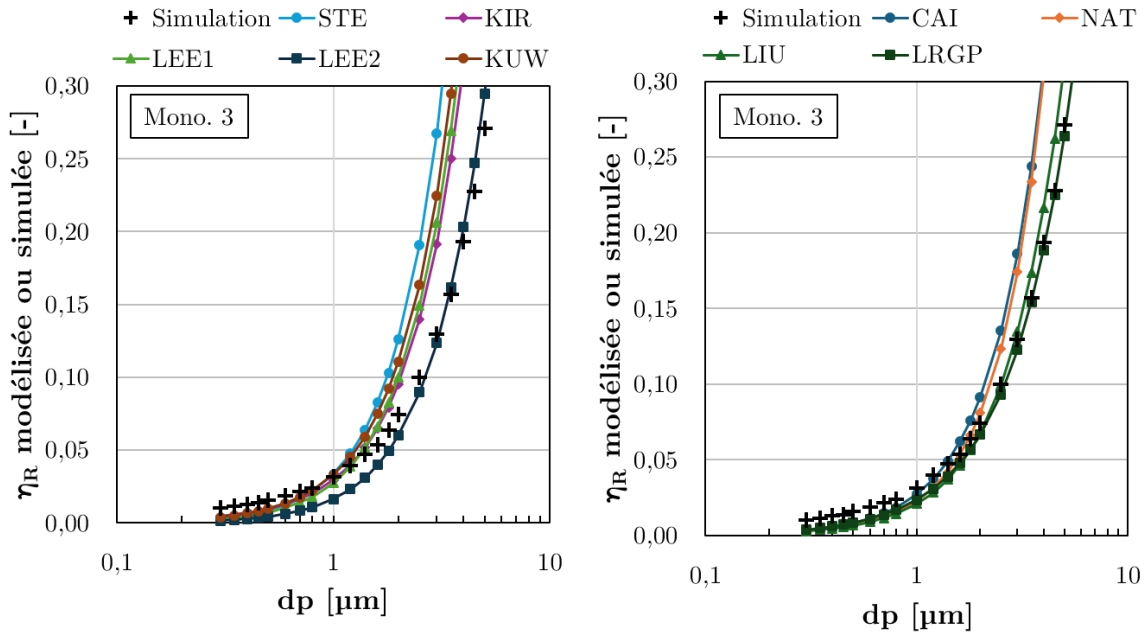
- **Figure 5-A.4 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 6 en fonction du diamètre de particule**



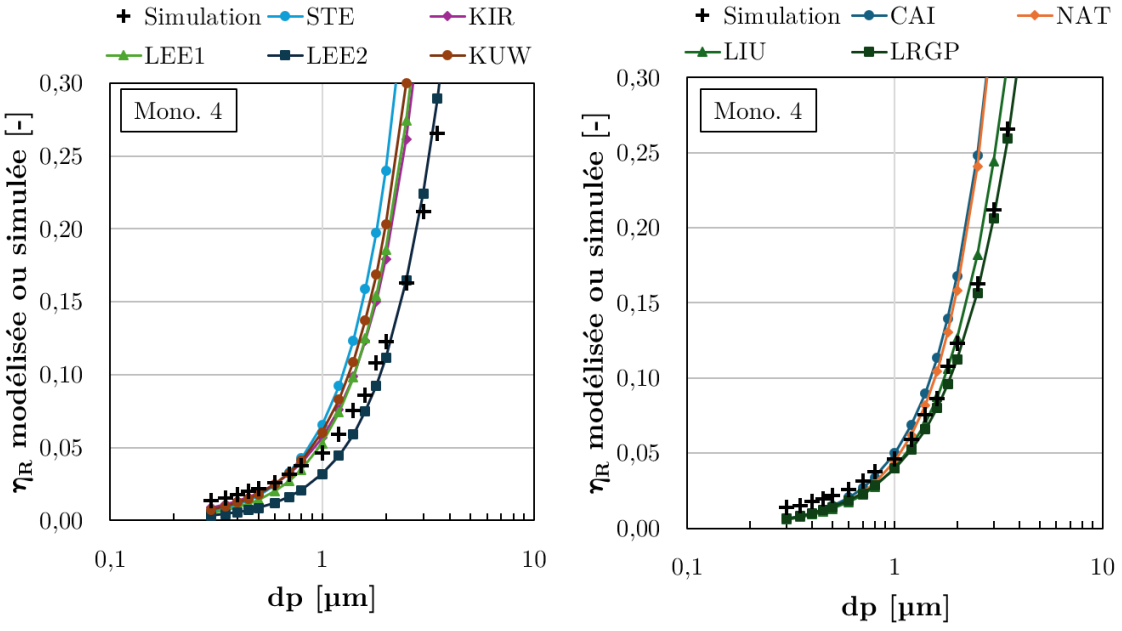
Annexe 5-B : Modélisation des efficacités unitaires par interception par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale)

Les figures suivantes présentent les évolutions des efficacités unitaires par interception simulées et modélisées pour les structures Mono. 3, Mono. 4, Mono. 5 et Mono. 6 en fonction du diamètre de particule.

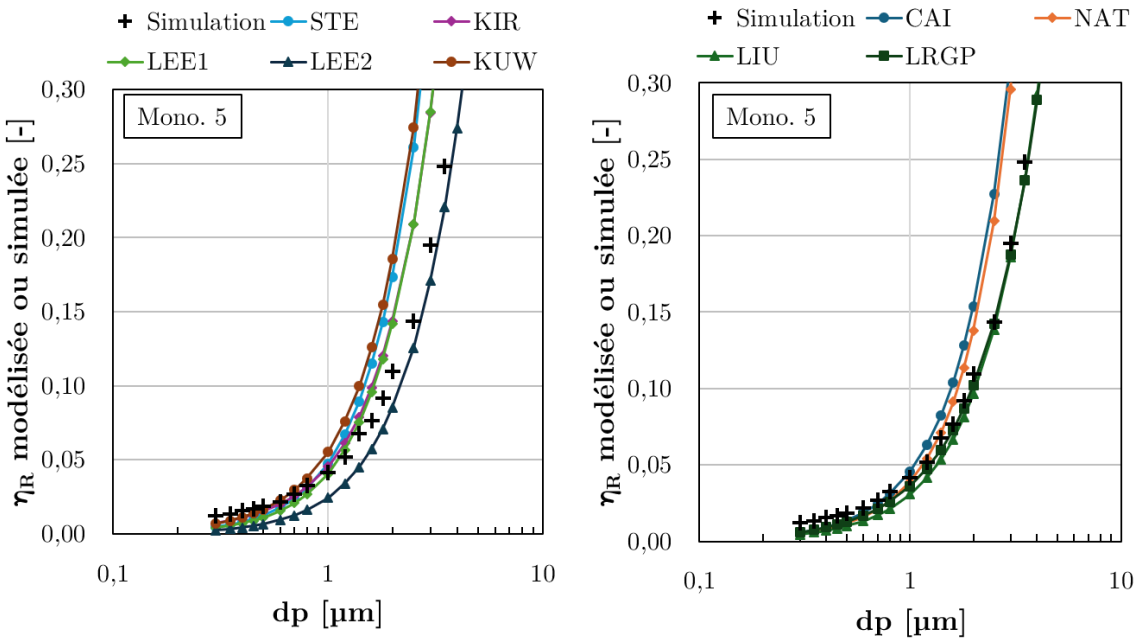
- **Figure 5-B.1 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 3 en fonction du diamètre de particule**



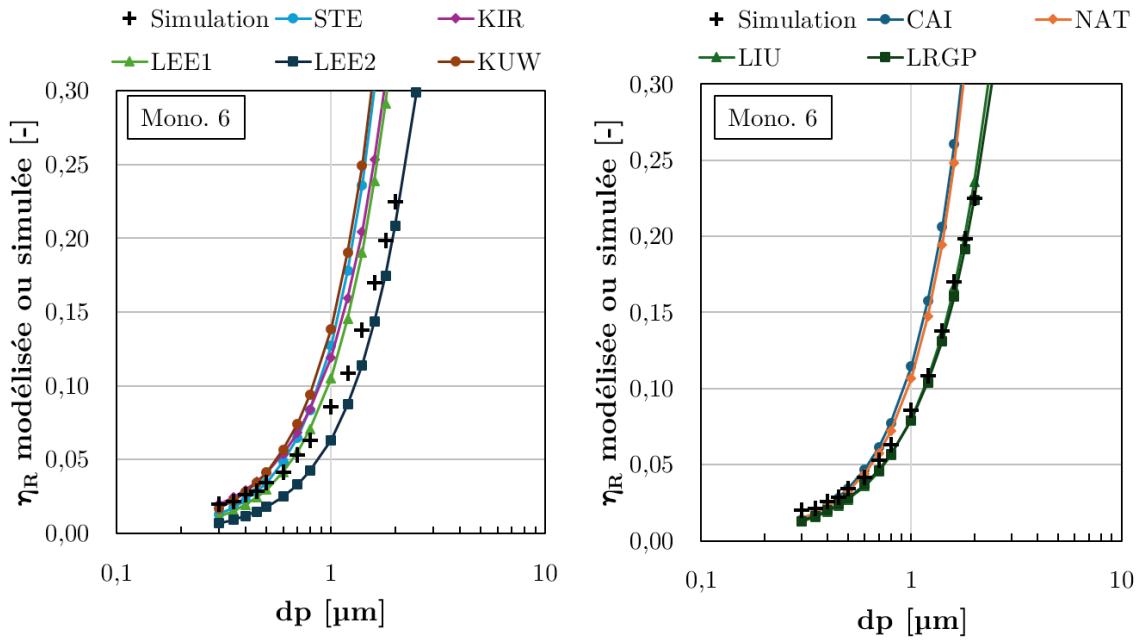
- **Figure 5-B.2 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 4 en fonction du diamètre de particule**



- **Figure 5-B.3 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 5 en fonction du diamètre de particule**



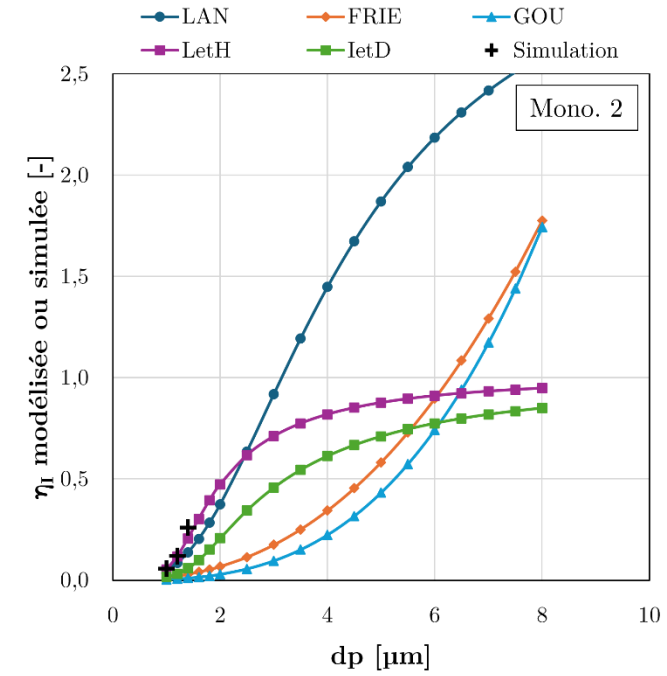
- **Figure 5-B.4 : Évolution des efficacités unitaires par diffusion simulées et modélisées pour la structure Mono. 6 en fonction du diamètre de particule**



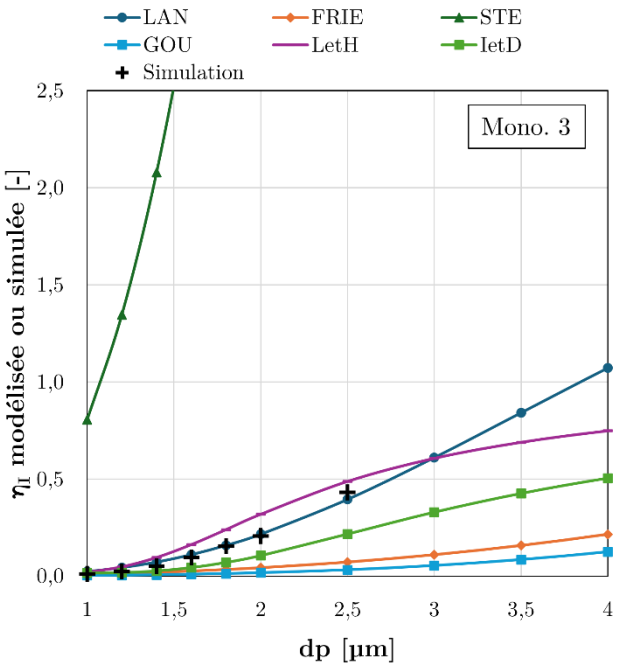
Annexe 5-C : Modélisation des efficacités unitaires par inertie par les modèles prédictifs de la littérature (Monomodale)

Les figures suivantes présentent les évolutions des efficacités unitaires par interception simulées et modélisées pour les structures Mono. 2, Mono. 3, et Mono. 4 en fonction du diamètre de particule. Pour la structure Mono. 2, le modèle STE donne des valeurs incohérentes.

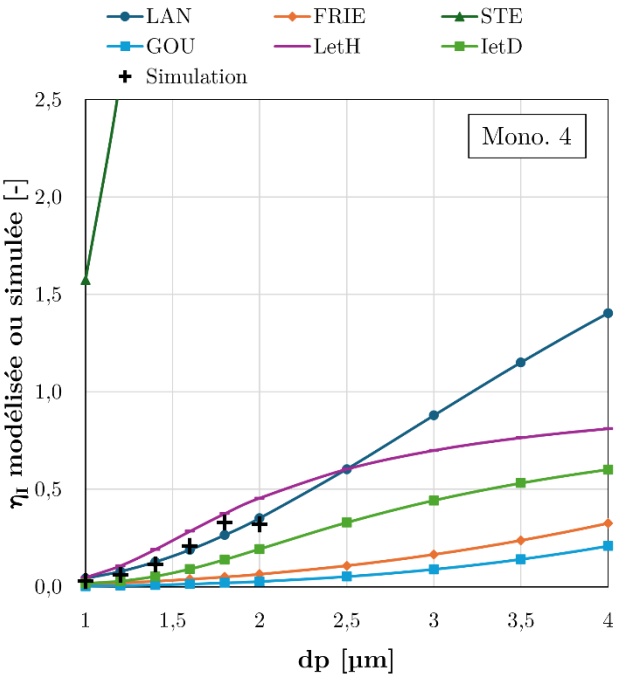
- **Figure 5-C.1 : Évolution des efficacités unitaires par inertie simulées et modélisées pour la structure Mono. 2 en fonction du diamètre de particule**



- **Figure 5-C.2 : Évolution des efficacités unitaires par inertie simulées et modélisées pour la structure Mono. 3 en fonction du diamètre de particule**



- **Figure 5-C.3 : Évolution des efficacités unitaires par inertie simulées et modélisées pour la structure Mono. 4 en fonction du diamètre de particule**



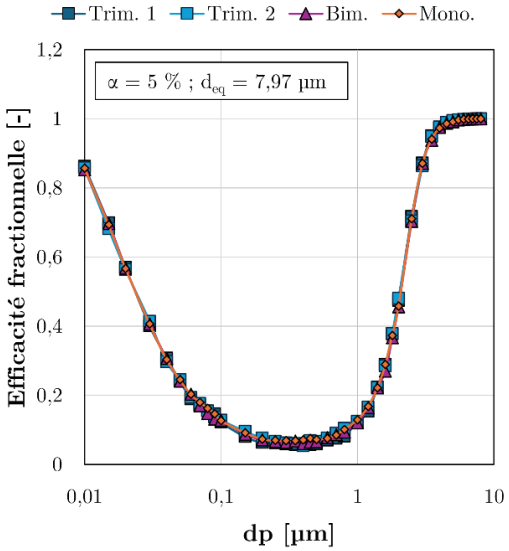
Annexe 5-D : Structures iso-perméables de même compacité et même diamètre équivalent

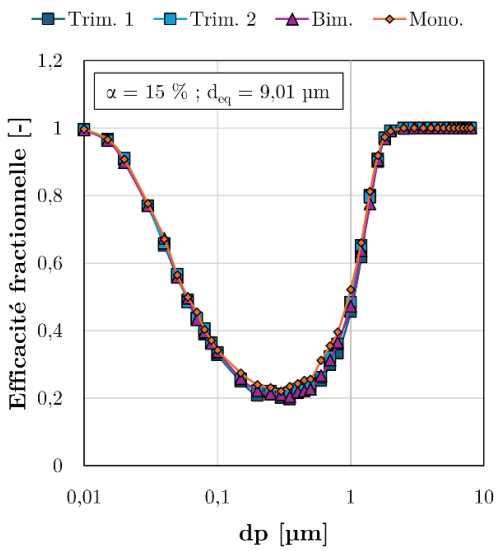
Le tableau 5-D.1 résume les caractéristiques des structures iso-perméables de même compacité et même diamètre équivalent étudiées, et la figure 5-D.1 compare les efficacités fractionnelles de collecte de structures monomodales, bimodales et trimodales de même compacité et même diamètre équivalent.

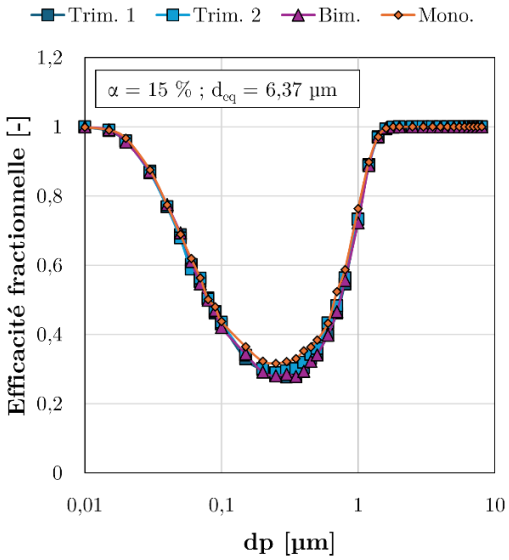
- **Tableau 5-D.1** : Caractéristiques des structures

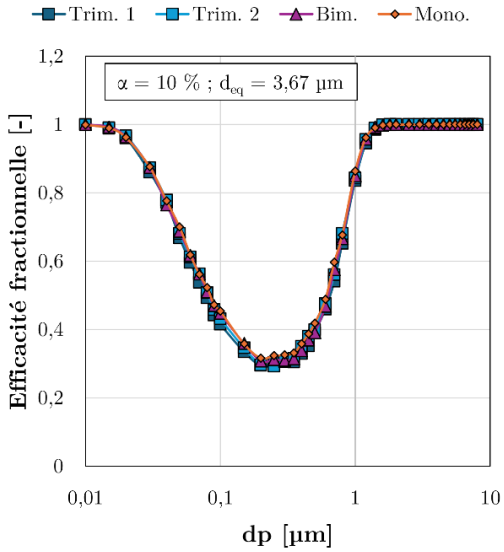
Iso-courbe	Structures	α	d_1 (µm)	d_2 (µm)	d_3 (µm)	f_{m1}	f_{m2}	f_{m3}	d_{eq} (µm) (Eq. 3-9)
1×10^{-10}	Mono.	0,05	7,97	/	/	1,00	/	/	7,97
	Bim.	0,05	7,17	8,59	/	0,38	0,62	/	7,97
	Trim. 1	0,05	4,43	7,00	10,84	0,16	0,15	0,69	7,98
	Trim. 2	0,05	6,47	7,38	11,53	0,43	0,15	0,42	7,97
2×10^{-11} (Bis)	Mono.	0,15	9,01	/	/	1,00	/	/	9,01
	Bim.	0,15	6,79	10,72	/	0,30	0,70	/	9,01
	Trim. 1	0,15	6,18	8,61	11,33	0,22	0,15	0,62	9,01
	Trim. 2	0,15	7,72	9,01	9,69	0,20	0,30	0,50	9,01
1×10^{-11}	Mono.	0,15	6,37	/	/	1,00	/	/	6,37
	Bim.	0,15	4,24	7,93	/	0,25	0,75	/	6,37
	Trim. 1	0,15	4,48	5,49	7,95	0,64	0,15	0,21	6,37
	Trim. 2	0,15	5,32	7,82	8,61	0,33	0,15	0,52	6,37
5×10^{-12}	Mono.	0,20	6,09	/	/	1,00	/	/	6,09
	Bim.	0,20	5,62	7,40	/	0,67	0,33	/	6,09
	Trim. 1	0,20	5,24	7,05	8,19	0,49	0,35	0,16	6,09
	Trim. 2	0,20	4,30	5,38	7,55	0,21	0,15	0,64	6,09
7×10^{-12}	Mono.	0,10	3,67	/	/	1,00	/	/	3,67
	Bim.	0,10	2,95	4,06	/	0,26	0,74	/	3,67
	Trim. 1	0,10	2,88	3,58	7,91	0,23	0,52	0,25	3,80
	Trim. 2	0,10	3,04	3,85	11,59	0,25	0,71	0,04	3,68

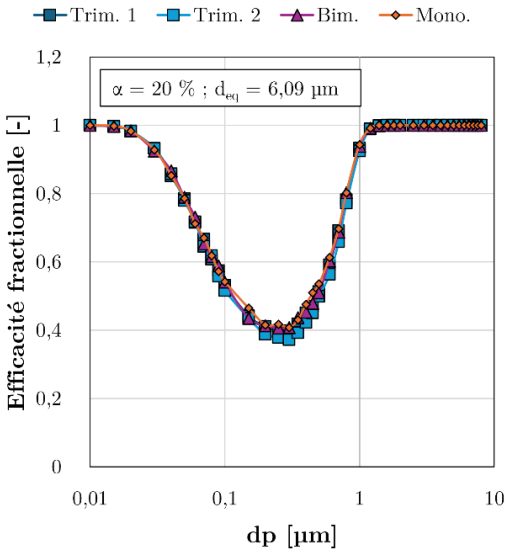
- **Figure 5-D.1 : Comparaison des efficacités fractionnelles de collecte de structures monomodales, bimodales et trimodales de même compacité et même diamètre équivalent.**











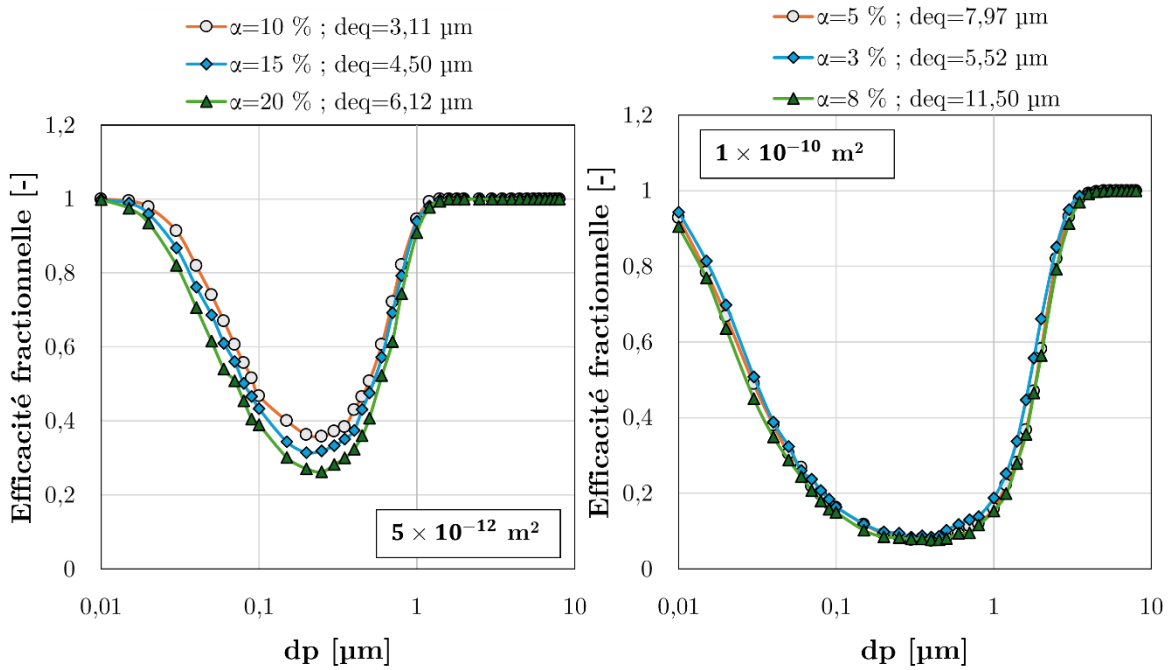
Annexe 5-E : Structures iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différents

Le tableau 5-E.1 résume les caractéristiques des structures iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différents, et la figure 5-E.1 compare les efficacités fractionnelles de collecte de ces structures bimodales iso-perméables.

- **Tableau 5-E.1 : Caractéristiques des structures**

	Iso-perméabilité : 1×10^{-10} m²			**Iso-perméabilité : 5×10^{-12} m²**		
	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas1	Cas 2	Cas 3
d_1 (µm)	5	5	5	2	2	2
f_{m1}	0,30	0,70	0,20	0,40	0,25	0,15
d_2 (µm)	11,66	7,53	21,99	5,92	12,86	15,81
f_{m2}	0,70	0,30	0,80	0,60	0,75	0,85
α	**0,05**	**0,03**	**0,08**	**0,10**	**0,15**	**0,20**
d_{eq} (µm)	**7,97**	**5,52**	**11,50**	**3,10**	**4,50**	**6,09**
$K_{simulée}$ (m^2)	1,02 $\times 10^{-10}$	1,03 $\times 10^{-10}$	1,02 $\times 10^{-10}$	5,16 $\times 10^{-12}$	5,28 $\times 10^{-12}$	5,52 $\times 10^{-12}$

- **Figure 5-E.1 : Comparaison des efficacités fractionnelles de collecte de structures bimodales iso-perméables de compacité et diamètre équivalent différents des structures du tableau 5-E.1**



Résumé :

Les procédés de séparation gaz/particules jouent un rôle essentiel dans de nombreux domaines : respect des normes environnementales, protection des opérateurs et amélioration de la qualité de l'air. Parmi eux, les milieux fibreux sont principalement utilisés pour la filtration et la purification de l'air. Leur performance peut être évaluée non seulement en termes d'efficacité, mais également en fonction de la perte de charge, qui dépend notamment de leur perméabilité. Ces travaux de thèse ont combiné des approches numérique et expérimentale pour étudier l'impact de la structure des médias fibreux sur leurs performances. Une étude numérique, réalisée avec le logiciel GeoDict, a permis de simuler les écoulements mono- et diphasiques à travers des microstructures fibreuses, évaluant ainsi leur perméabilité et leur efficacité fractionnelle. Les modèles de perméabilité issus de la littérature ont révélé une forte dispersion de leurs valeurs prédites. Un nouveau modèle a donc été développé pour estimer la perméabilité des médias présentant des distributions granulométriques de fibres, avec une précision inférieure à ±10 %. Conçu initialement pour des fibres microniques, il a ensuite été étendu aux fibres submicroniques ainsi qu'aux mélanges micro/submicroniques, afin de prendre en compte l'effet de glissement. Sur le plan expérimental, des médias (mono- et bimodaux) ont été fabriqués au laboratoire en s'affranchissant, par souci de simplification, de l'ajout de liant. Leurs propriétés structurales (grammage, épaisseur, compacité) et leur perméabilité ont été caractérisées, permettant de valider en partie le modèle de perméabilité proposé. L'étude expérimentale a en particulier mis en évidence les difficultés liées à la caractérisation des structures (épaisseur de médias compressibles, détermination de la taille des fibres sur des images 2D de microscopie électronique, absence d'information sur la longueur des fibres pour la conversion en distributions granulométriques volumique, prise en compte d'hétérogénéités locales), soulignant la nécessité soit d'utiliser des méthodes de caractérisation plus avancées, telles que la tomographie avec une résolution plus importante, soit de fabriquer par impression 3D des médias générés numériquement. L'étude des mécanismes de capture des particules (diffusion, inertie, interception) a également été menée sur des microstructures numériques. Le diamètre équivalent défini pour le modèle de perméabilité micronique s'est montré pertinent dans la modélisation de l'efficacité par diffusion, mais a présenté des limites pour son utilisation en interception. Pour l'inertie, les écarts avec les modèles existants dans la littérature indiquent la nécessité de poursuivre l'étude afin de développer un modèle d'efficacité unitaire, applicable à tout type de distributions de taille de fibres. Enfin, l'analyse conjointe de la perte de charge et de l'efficacité a permis d'identifier des configurations structurales présentant une meilleure efficacité pour une même perméabilité, ouvrant ainsi la voie à des stratégies d'optimisation de la structure fibreuse des médias filtrants selon divers critères de performances (efficacité, perte de charge, coût, résistance mécanique).

Mots-clés : filtration, écoulement, média fibreux, aérosol, simulation, expérimentation

Abstract

Gas/particle separation processes play a crucial role in various fields, including compliance with environmental standards, operator safety, and air quality improvement. Among these processes, fibrous media are mainly used for air filtration and purification. Their performance can be evaluated not only in terms of efficiency, but also in terms of pressure drop, which strongly depends on their permeability. This thesis work combined numerical and experimental approaches to investigate the impact of the structure of fibrous media on their performance. A numerical study, carried out using GeoDict software, simulated single- and two-phase flows through fibrous microstructures, thereby evaluating their permeability and fractional efficiency. Permeability models reported in the literature showed a large dispersion in their predicted values. A new model was therefore developed to estimate the permeability of media with fiber size distributions, achieving an accuracy of less than ±10%. Initially designed for micron-sized fibers, it was then extended to submicron fibers and micro/submicron blends, in order to account for slip effects. On the experimental side, mono- and bimodal fibrous media were manufactured in the laboratory, simplifying the process by eliminating the addition of binders. Their structural properties (basis eight, thickness, packing density) and permeability were characterized, allowing partial validation of the proposed permeability model. The experimental study particularly highlighted the challenges associated with structures characterization (thickness of compressible media, determination of fiber size from 2D scanning electron microscopy images, lack of fiber length information for conversion into volumetric distributions, consideration of local heterogeneities), highlighting the importance of using more advanced characterization methods, such as high-resolution tomography, or to manufacture digitally generated media by 3D printing. The mechanisms of particle capture (diffusion, inertia, interception) were also investigated on digital microstructures. The equivalent diameter defined for the micron permeability model proved to be relevant in modelling diffusion efficiency, but showed limitations for interception. For inertial capture, discrepancies with existing models in the literature indicated the need for further study to develop a unit efficiency model applicable to any type of fiber size distribution. Finally, the combined analysis of pressure drops and efficiency made it possible to identify structural configurations exhibiting improved efficiency for the same permeability, thereby paving the way for optimization strategies of fibrous filter media according to various performance criteria (efficiency, pressure drop, cost, and mechanical strength).

Keywords : filtration, fluid flow, fibrous media, aerosol, simulation, experimental study