

# EFFICACITE DE FILTRATION DE MEDIAS ISOPERMEABLES

E. Cabaset<sup>1\*</sup>, N. Bardin-Monnier<sup>1</sup>, A. Charvet<sup>1</sup> et D. Thomas<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

\*Courriel de l'orateur : elise.cabaset@univ-lorraine.fr

## TITLE

**Filtration efficiency of iso-permeable fibrous media**

## RESUME

Les médias fibreux non-tissés mis en œuvre pour la filtration d'aérosols doivent respecter l'équilibre entre faible perte de charge et haute efficacité de filtration. La création de microstructures par le logiciel GeoDict a permis d'une part de développer un modèle théorique de perméabilité et d'une part d'explorer l'efficacité de filtration de structures tridimensionnelles de même perméabilité. Les résultats indiquent que l'efficacité peut être améliorée en réduisant simultanément la compacité et le diamètre des fibres à perméabilité constante. Il en résulte une possibilité d'optimisation du coût et de la résistance mécanique sans compromettre les performances des médias fibreux.

## ABSTRACT

Now-woven fibrous media used for aerosol filtration have to maintain a balance between low pressure drop and high filtration efficiency. The creation of microstructures using the GeoDict software has been used to develop a theoretical permeability model and to explore the filtration efficiency of three-dimensional structures with the same permeability. The results indicate that the efficiency can be improved by simultaneously reducing the packing density and the equivalent diameter at constant permeability. The study suggests that cost and mechanical resistance optimization is possible without compromising the performance of the fibrous media.

**MOTS-CLES** : média fibreux, iso-perméabilité, simulation, filtration / **KEYWORDS** : fibrous media, permeability, simulation, filtration

## 1. INTRODUCTION

Les procédés de séparation gaz/particules sont utilisés dans de nombreux domaines en lien avec le respect des normes environnementales ou de la qualité de l'air, et la protection des opérateurs. Les médias fibreux sont principalement utilisés pour la filtration et la purification de l'air. Pour optimiser les performances de ces médias fibreux, deux paramètres clés doivent être équilibrés : maintenir une faible perte de charge tout en atteignant une haute efficacité de filtration. Ces deux paramètres sont fortement influencés par les caractéristiques structurelles du média, telles que sa compacité, son épaisseur et la distribution de taille des fibres. Le développement d'un outil d'aide à la décision pour optimiser ces paramètres nécessite des modèles théoriques robustes et applicables à une large gamme de structures fibreuses. Cette étude présente ainsi une première étape vers le développement d'un tel outil.

## 2. SIMULATION NUMERIQUE

Expérimentalement, la détermination de la perméabilité et de l'efficacité de filtration est difficile en raison des hétérogénéités locales de la fraction volumique solide, de la présence de liant mais également des incertitudes expérimentales dans la mesure de l'épaisseur d'une structure compressible, dans la détermination de la distribution de taille des fibres ou dans le comptage des particules. Une alternative pour surmonter ces biais expérimentaux est l'utilisation d'outils numériques, tels que GeoDict (2022), pour construire des structures 3D parfaitement caractérisées et déterminer leur perméabilité et leur efficacité de filtration.

Des microstructures cubiques ont été créées à l'aide de GeoDict, et leur perméabilité a été déduite de simulations d'écoulement pour une vitesse de fluide donnée. Pour assurer la précision de cette approche, cinq simulations ont été menées pour chaque microstructure - chacune avec une initialisation différente à travers une fonction aléatoire nommée *random seed* (RS) - permettant le calcul d'une perméabilité moyenne pour chaque type de structure.

De plus, une attention particulière a été accordée à la taille des voxels et à la taille du domaine de la microstructure (c'est-à-dire du nombre de voxels dans chaque direction). Une étude paramétrique sur ces deux paramètres a été menée pour chaque microstructure afin d'assurer la description la plus précise de l'écoulement.

Étant donné que la performance d'un filtre fibreux dépend non seulement de sa perméabilité mais aussi de son efficacité de filtration, des tests de filtration de particules ont été réalisés sur des microstructures ayant la même perméabilité. Ces simulations ont visé à prédire l'efficacité de collecte dans les domaines diffusif et inertiel en injectant des particules sphériques de diamètres compris entre 0,01 et 8  $\mu\text{m}$ . Pour chaque diamètre, 5000 particules ont été injectées à une vitesse de 10 cm/s. Le mouvement des particules a été simulé en tenant compte du champ d'écoulement calculé et est influencé par les écoulements diffusifs, la friction avec le fluide et son inertie. Les interactions électrostatiques ont été exclues de ces simulations pour isoler les effets mécaniques de filtration.

### 3. RESULTATS

La perméabilité d'un média fibreux dépend du carré du diamètre des fibres du média  $d_f$  divisé par une fonction de compacité  $f(\alpha)$ . Étant donné qu'un média filtrant non-tissé présente une structure complexe constituée d'un réseau aléatoire de fibres de diamètre variable, ces médias sont classiquement assimilés à des structures composées d'un seul diamètre de fibre équivalent. Une nouvelle approche a été développée, incorporant un nouveau diamètre équivalent (eq. 1) avec la fonction d'Happel modifiée (eq. 2). Sur une large gamme de compacités, de distribution et de diamètre de fibres, cette approche a montré une très bonne prédiction de la perméabilité avec des données expérimentales et numériques (Cabaset *et al* (2024 et 2025)).

**Nouveau diamètre équivalent :**  
Cabaset *et al* (2024 et 2025)

$$d_{eq} = \left[ \frac{1}{\sum_i \frac{m_i}{d_i^2}} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Eq. 1})$$

**Fonction d'Happel modifiée :**  
Thomas *et al* (2023)

$$\frac{1}{f(\alpha)} = \frac{(5/2)^{\frac{1}{4}}}{32 \alpha} \left( -\ln(\alpha) + \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 + 1} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

A partir de cette approche, il est possible d'identifier différentes conceptions de médias pour atteindre une perméabilité souhaitée (eq. 3). En effet, la perméabilité étant directement liée aux propriétés structurales du média, différents filtres peuvent avoir des compacités et des diamètres équivalents variables tout en maintenant la même perméabilité.

$$\kappa = d_{eq}^2 \frac{(5/2)^{\frac{1}{4}}}{32 \alpha} \left( -\ln(\alpha) + \frac{\alpha^2 - 1}{\alpha^2 + 1} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

Il est important de noter qu'une infinité de distributions de taille de fibres peut mener à un même diamètre équivalent. Ainsi des distributions de taille de fibres bimodales, trimodales ou multimodales avec diverses fractions massiques pour chaque diamètre de fibre peuvent conduire à la même perméabilité.

Ces considérations soulèvent une question fondamentale : des structures iso-perméables conduisent-elles nécessairement à la même efficacité de filtration ? Pour explorer cette problématique, notre étude s'est concentrée tout d'abord sur l'analyse de l'influence de la distribution de taille des fibres sur l'efficacité de filtration, tout en maintenant une perméabilité constante. Pour cela, des microstructures ont été générées, avec même compacité ( $\alpha$ ) et diamètre équivalent ( $d_{eq}$ ), mais avec différentes distributions de taille de fibres : monomodale, bimodale et trimodale. Les propriétés de ces structures sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1. Propriétés de microstructures de même compacité et diamètre équivalent

	Mono.	Bim.	CAS 1	Trim.	CAS 2
$d_1$ ( $\mu\text{m}$ )	6,2	5,8	5,4	3,3	
$fm_1$	100%	59%	49%	10%	
$d_2$ ( $\mu\text{m}$ )	/	6,5	7,1	6,9	
$fm_2$	/	41%	35%	74%	
$d_3$ ( $\mu\text{m}$ )	/	/	8,2	8,1	
$fm_3$	/	/	16%	16%	
$\alpha$	10%	10%	10%	10%	
$d_{eq}$ ( $\mu\text{m}$ )	6,2	6,2	6,2	6,2	
$\kappa_{simulée}$ ( $\text{m}^2$ )	$2,07 \times 10^{-11}$	$2,07 \times 10^{-11}$	$2,06 \times 10^{-11}$	$2,05 \times 10^{-11}$	

Les simulations de perméabilité ont confirmé que les différentes structures présentent une perméabilité identique, indépendamment du type de distribution des fibres (tableau 1).

Des simulations d'efficacité de collecte (figure 1) ont ensuite été réalisées sur ces structures. Les résultats ont révélé des efficacités de filtration très similaires pour les différentes distributions de fibres. Cette étude a ainsi démontré qu'à compacité identique, les structures fibreuses ayant le même diamètre équivalent - et par conséquent une perméabilité similaire - présentent également une efficacité de collecte comparable. Ces conclusions ont été renforcées par l'analyse d'autres microstructures de perméabilités différentes, testées à des vitesses de filtration de 2, 5, 10 et 20 cm/s. Ainsi un potentiel d'optimisation semble exister tant en termes de coût et de résistance mécanique sans compromettre les performances, grâce à la possibilité d'utiliser différentes distributions de fibres.

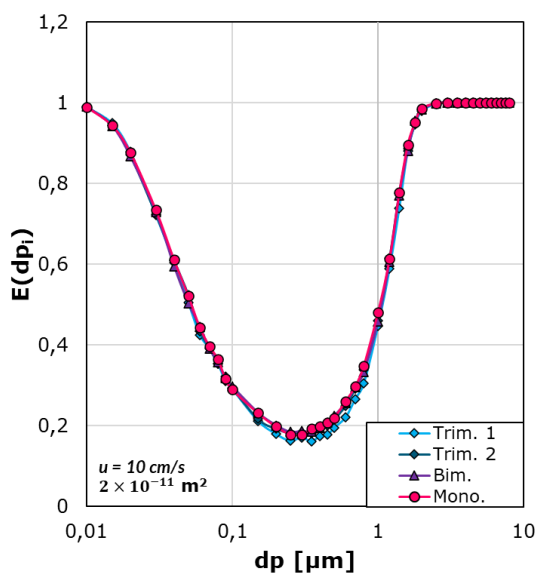


Figure 1. Efficacité fractionnelle de filtration pour des structures trimodales, bimodales et monomodales de même compacité et diamètre équivalent

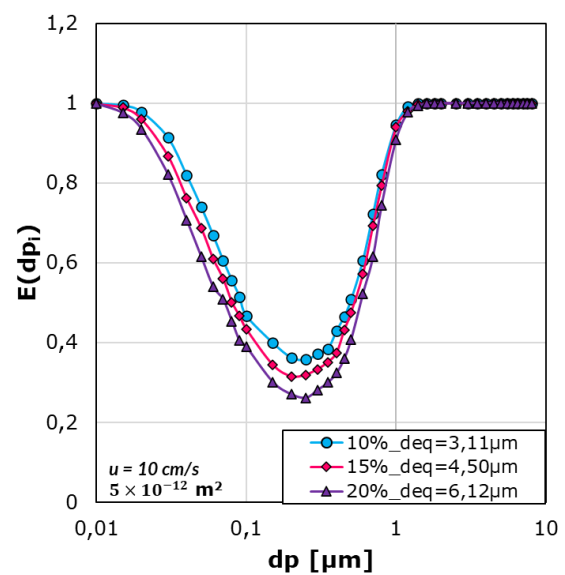


Figure 2. Efficacité fractionnelle de filtration pour différentes structures bimodales de même perméabilité

Pour approfondir l'analyse, trois microstructures bimodales supplémentaires ont été générées, toutes présentant une perméabilité proche de  $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ , mais se distinguant par leurs compacités et leurs diamètres équivalents. Le tableau 2 présente les caractéristiques détaillées de ces structures ainsi que leurs perméabilités simulées correspondantes.

Tableau 2. Propriétés de microstructures bimodales de même perméabilité ( $\alpha$  et  $d_{eq}$  différents)

	CAS 1	Bim. CAS 2	CAS 3
$d_1$ ( $\mu\text{m}$ )	5,9	12,9	15,8
$fm_1$	60%	75%	85%
$d_2$ ( $\mu\text{m}$ )	2	2	2
$fm_2$	40%	25%	15%
$\alpha$	10%	15%	20%
$d_{eq}$ ( $\mu\text{m}$ )	3,11	4,50	6,12
$\kappa_{simulée}$ ( $\text{m}^2$ )	$5,2 \times 10^{-12}$	$5,3 \times 10^{-12}$	$5,5 \times 10^{-12}$

Bien que les microstructures présentent une perméabilité identique, leur efficacité de filtration diffère quelle que soit la taille des particules (figure 2). En réduisant la compacité et le diamètre équivalent à perméabilité constante, l'efficacité augmente. Ce résultat suggère l'existence d'un optimum à déterminer, certaines structures offrant de meilleures performances que d'autres tout en maintenant la même perméabilité.

#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion, à compacité et diamètre équivalent identiques, les structures présentent une perméabilité et une efficacité de collecte identiques. Cependant, des structures de même perméabilité ne garantissent pas nécessairement une efficacité de collecte identique pour diverses combinaisons de diamètre équivalent et de fraction volumique solide.

Cette étude préliminaire met en évidence que l'efficacité du filtre peut être augmentée en diminuant la compacité et le diamètre équivalent tout en maintenant une iso-perméabilité. Ces résultats peuvent contribuer à concevoir un média filtrant optimum basé sur la perméabilité souhaitée.

Néanmoins, la mise en œuvre pratique de ces conclusions nécessite la prise en compte de paramètres économiques, tels que les coûts de fabrication, qui restent difficiles à évaluer en raison de leur nature confidentielle, ainsi que d'examiner la faisabilité du média en termes de résistance mécanique.

L'extension de l'étude visera à étendre l'approche pour vérifier les conclusions obtenues pour des fibres submicroniques, en prenant en compte les effets de glissement, afin d'élargir le champ d'application de nos résultats.

Thomas, D., Bardin-Monnier, N., Charvet, A. (2023) Effect of the fibre diameter polydispersity on the permeability of nonwoven filter media, *Can J Chem Eng.* 101, 4138-4150

Cabaset, E., Bardin-Monnier, N., Charvet, A., Thomas, D. (2025) Influence of multimodal fiber distribution on the permeability of fibrous media, *Chem Eng Sci.* 302, 120855

Cabaset, E., Charvet, A., Bardin-Monnier, N., Thomas, D. (2024) Influence d'une distribution de fibres multimodale sur la perméabilité de médias fibreux, Congrès Français sur les Aérosols 2024, Paris