

ESTIMATION DE L'EFFICACITÉ DE COLLECTE DES MÉDIAS FIBREUX PRÉSENTANT UNE DISTRIBUTION MULTIMODALE

D. THOMAS, A. CHARVET, N. BARDIN-MONNIER

Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France

*Courriel de l'orateur : Dominique.Thomas@univ-lorraine.fr

TITLE

Estimation of the collection efficiency of fibrous media with multimodal distribution

RESUME

L'objectif de cette étude concerne le développement d'un modèle d'efficacité intégrant la distribution granulométrique des fibres, afin d'optimiser la structure fibreuse des médias filtrants. Un modèle issu de la littérature, initialement conçu pour des mélanges de fibres bimodaux, a été validé sur un large ensemble de structures numériques et étendu à des distributions pentamodales.

ABSTRACT

The objective of this study is to develop an efficiency model that incorporates the particle size distribution of the fibres, with the aim of optimizing the fibrous structure of filtering media. A model from the literature, initially developed for bimodal fibre mixtures, was validated on a large set of numerical structures and extended to pentamodal distributions.

MOTS-CLÉS : efficacité, distribution multimodale, media fibreux / **KEYWORDS**: efficiency, multimodal distribution, fibrous media

1. INTRODUCTION

Les performances des médias filtrants non-tissés reposent principalement sur deux critères : la perte de charge et l'efficacité de filtration. Une étude précédente a permis d'analyser la perte de charge dans des médias fibreux composés de fibres de diamètres variés. Ces travaux ont abouti au développement d'un modèle prédictif intégrant la distribution granulométrique des fibres et l'effet de glissement (Thomas et al. (2023) et Cabaset *et al.* (2025)). Pour estimer la perméance d'un média fibreux, il est d'usage d'utiliser l'expression théorique (Eq 1) prenant en compte l'épaisseur (Z) du média, la compacité (α), le diamètre des fibres (df) et l'efficacité unitaire de collecte (η).

$$P = \exp \left(-4 \eta(df, dp) \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{Z}{\pi df} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

L'efficacité unitaire de collecte résulte de plusieurs mécanismes de collecte (diffusion, interception, inertie...) qui intègrent la compacité, le diamètre des fibres et des particules. L'équation 1 et les modèles d'efficacité unitaires supposent que toutes les fibres ont le même diamètre soit une distribution monomodale ce qui est loin de refléter la réalité de la plupart des médias fibreux filtrants qui présentent pour la majorité une distribution polydisperse de fibres.

Pour un milieu filtrant constitué d'un mélange homogène de fibres de deux diamètres distincts et en l'absence d'interactions entre celles-ci, Sakano *et al.* (2000) proposent une relation simple permettant d'estimer l'efficacité fractionnelle. Cette relation intègre l'efficacité unitaire de chaque type de fibre, pondérée par sa fraction massique. Frising et al. (2003) ont repris cette relation en remplaçant la fraction massique par la fraction volumique, les fibres pouvant être de nature diverse, et l'ont étendue à des milieux multimodaux. Ainsi, la perméance (P) d'un média fibreux d'épaisseur Z et composé de n fibres de diamètre df_i présentant une fraction volumique f_{v_i} peut être assimilée à n médias monomodaux de diamètre df_i , de compacité $f_{v_i} \alpha$ et de même épaisseur Z placés en série. La perméance du média est alors égale au produit des perméances de chacun des sous médias monomodaux :

$$P = \prod_{i=1}^n P_i \quad \text{Eq. 2}$$

avec

$$P_i = \exp \left(-4 \eta_i \frac{f_{v_i} \alpha}{1 - \alpha} \frac{Z}{\pi df_i} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

η_i étant l'efficacité unitaire de fibres intégrant l'ensemble des mécanismes de collecte (diffusion, interception et inertie). L'équation 2 peut, au final, s'écrire en termes d'efficacité :

$$E = 1 - \exp \left[-4 \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{Z}{\pi} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f v_i \eta_i}{d f_i} \right) \right] \quad \text{Eq. 4}$$

Cette approche a partiellement été validée expérimentalement par Sakano et al. (2005) sur un seul média de compacité 3%, composé de fibres de 12 et 39 μm , pour 3 fractions massiques différentes. Tom Frising (2003, 2005) a démontré la pertinence de cette approche sur quatre médias fibreux commerciaux caractérisés par une large distribution granulométrique de fibres. Les écarts observés ont été attribués aux incertitudes sur la caractérisation des médias (compacité, distribution granulométrique des fibres, épaisseur) et aux modèles d'efficacité unitaire des fibres (η_i) pour lesquels les validations expérimentales demeurent limitées.

2. APPROCHE CHOISIE

Afin de s'affranchir des biais inhérents à la caractérisation expérimentale des médias fibreux et au choix des modèles théoriques d'efficacité unitaire, une approche numérique a été privilégiée pour cette étude. Le code de calcul Geodict® permet de générer des structures fibreuses 3D très diversifiées et précisément définies afin d'y simuler des écoulements numériques d'air chargé en particules. Ces simulations permettent aisément la détermination, pour chacune des structures, de l'efficacité fractionnelle de filtration et de la perte de charge.

Les conditions opératoires ont été fixées comme suit :

- Vitesse de filtration : 5 cm/s
- Pression et température ambiantes
- Masse volumique des particules : 2160 kg/m³
- Gamme granulométrique des particules : 0,01 – 3 μm

Dans un premier temps, l'efficacité unitaire de collecte a été déterminée pour des médias fibreux monomodaux (diamètres de fibres $d_f = 1, 2, 3, 4$ et 5 μm) et pour différentes compacités (0,5 %, 1 %, 3 %, 5 %, 10 % et 15 %). Cette première étape permet de calculer, à partir de l'équation (1), pour chacune des structures, les efficacités fractionnelles unitaires de fibres de diamètre d_f ($\eta(d_f, d_p)$) qui seront utilisées pour le calcul de l'efficacité des structures multimodales. Cette approche permet de s'affranchir de l'utilisation des modèles théoriques d'efficacité unitaire, dont la pertinence reste à démontrer.

Dans un deuxième temps, des structures bimodales et pentamodales ont été construites numériquement en intégrant des fractions volumiques variables pour les différents diamètres de fibres. Cette approche permet d'étudier l'influence de la distribution de tailles de ces fibres sur les performances globales du média et de comparer le modèle (Eq 4) aux valeurs d'efficacité simulées.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Cas d'une distribution bimodale

Dix-huit structures bimodales ont été générées, chacune constituée de deux diamètres de fibres sélectionnés parmi 1, 2, 3, 4 et 5 μm , avec une compacité fixée à 5 %, 10 % ou 15 %. Pour chacune de ces structures, la fraction volumique des fibres de plus petit diamètre a ensuite été fixée successivement à 10 %, 25 %, 50 %, 75 % et 90 %. La figure 1 montre, à titre d'exemple, les évolutions simulée et calculée de l'efficacité fractionnelle obtenues sur mélange bimodal composé de fibres de 1 et 4 μm de compacité 5% et d'épaisseur 125 μm pour différentes fractions volumiques. Les résultats montrent une bonne corrélation entre les valeurs simulées et les valeurs calculées. Cette adéquation est confirmée par les moyennes relatives des écarts, qui varient entre 0,7 % et 10 % selon les fractions volumiques considérées. On peut également noter que l'augmentation de la fraction volumique des fibres les plus fines augmente l'efficacité fractionnelle de la structure fibreuse tout en diminuant la taille de la particule la plus pénétrante (minimum d'efficacité).

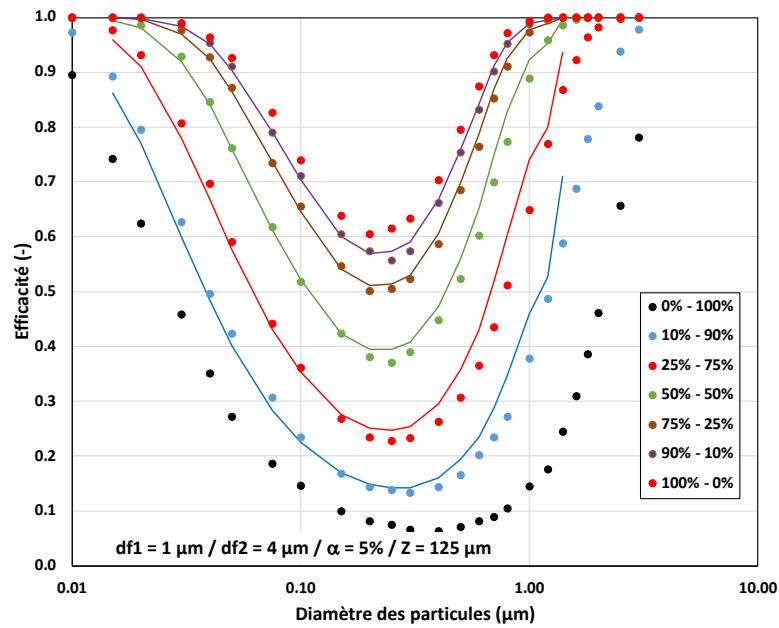


Figure 1 : Évolution de l'efficacité fractionnelle d'un média fibreux de distribution bimodale présentant différentes fractions volumiques de fibres fines (Points : valeurs simulées – trait continu : modèle (Eq.4))

La moyenne relative des écarts (Eq 5) entre les valeurs d'efficacité fractionnelles simulées et calculées (Eq.4) est comprise entre 0,1 et 10,7 % pour les 90 structures bimodales testées. Sur l'ensemble des 1550 données d'efficacité fractionnelle, la moyenne des écarts relatifs est égale à 1,9%.

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{E_{Sim_j} - E_{Mod_j}}{E_{Sim_j}} \right| \quad \text{Eq. 5}$$

Avec N le nombre d'efficacité fractionnelles simulées ou calculées par structure.

3.2. Cas d'une distribution pentamodale

Trente structures fibreuses monomodales, constituées de fibres de diamètres 1, 2, 3, 4 ou 5 μm et de compacités de 0,5, 1, 3, 5, 10 ou 15 %, ont été générées numériquement. L'efficacité unitaire associée à chaque diamètre de fibre, pour une compacité donnée, a ainsi pu être déterminée par simulation. Dans un second temps, six structures multimodales, de compacités fixées à 0,5, 1, 3, 5, 10 et 15 % et composées de fibres de 1, 2, 3, 4 et 5 μm dans des proportions volumiques variables, ont été générées puis étudiées numériquement (Tableau 1). Pour chacun de ces six médias, l'efficacité fractionnelle et la perte de charge ont été évaluées par simulation numérique.

Tableau 1: Caractéristiques des six structures fibreuses pentamodales étudiées

| Cas | α (%) | Diamètre (μm) / Fraction volumique (%) | | | | | Z (μm) | ΔP (Pa) | MRE (%) |
|-----|-------|--|------|------|------|------|--------|---------|------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | |
| C1 | 0,5 | 19,6 | 10,9 | 27,5 | 21,0 | 21,0 | 150 | 0,98 | 9,3 |
| C2 | 1 | 3,5 | 31,3 | 27,8 | 13,0 | 24,3 | 150 | 1,44 | 6,0 |
| C3 | 3 | 27,6 | 32,7 | 25,5 | 4,1 | 10,2 | 125 | 12,08 | 4,7 |
| C4 | 5 | 6,5 | 46,8 | 17,7 | 24,2 | 4,8 | 125 | 14,34 | 5,2 |
| C5 | 10 | 5,3 | 43,9 | 8,8 | 38,5 | 3,5 | 125 | 38,00 | 5,9 |
| C6 | 15 | 18,0 | 26,1 | 9,0 | 17,2 | 29,7 | 125 | 102,21 | 4,7 |

La figure 2 présente l'évolution des efficacités fractionnelles simulées et calculées pour les six structures. Force est de constater, au vu de la faible moyenne des écarts relatifs (Eq. 5) entre les valeurs d'efficacité fractionnelles simulées et calculées (Eq.4), une bonne adéquation pour chacune des structures,

Les médias fibreux 3 et 4 présentent des efficacités fractionnelles équivalentes. La structure 4 affiche, cependant, une perte de charge d'environ 19 % plus élevée que la structure 3, bien que sa compacité soit plus faible. Par ailleurs, la structure 2 montre une efficacité légèrement supérieure à celle de la structure 1, mais avec une perte de charge supérieure de 47 %. Ces deux exemples montrent clairement qu'une optimisation de la structure fibreuse est possible afin de minimiser la perte de charge donc les coûts de fonctionnement pour une efficacité fractionnelle de filtration identique.

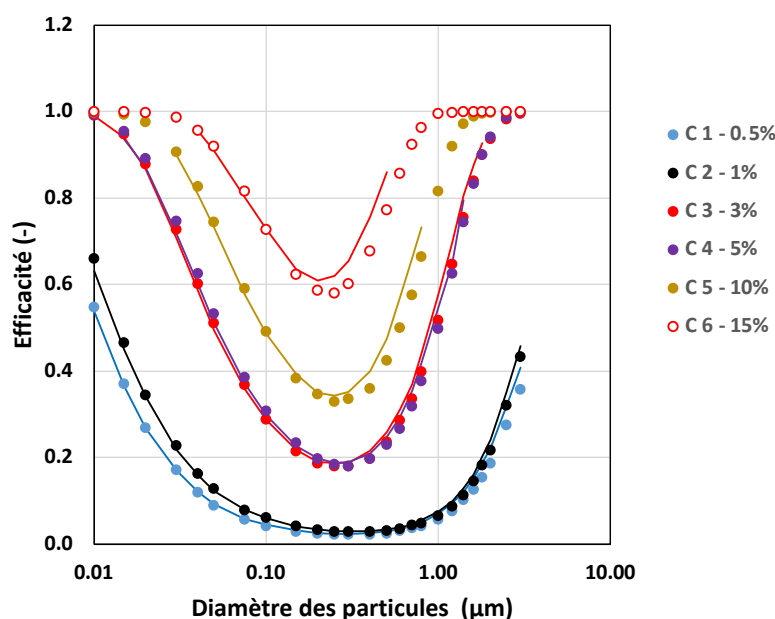


Figure 2 : Évolution de l'efficacité fractionnelle de média fibreux de distribution pentamodale composés de fibres de 1, 2, 3, 4 et 5 µm en proportion volumique variable. (Points : simulations – trait continu : modèle)

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Un modèle d'efficacité fractionnelle de médias fibreux présenté par Sakano et al. (2000) prenant en compte la fraction volumique des différents diamètres de fibres, a été validé sur des structures numériques bimodales, puis étendu à des structures pentamodales. La moyenne des écarts relatifs entre les efficacités fractionnelles simulées et modélisées est égale à 1,9% pour l'ensemble des 1550 données. Ce modèle ne requiert que la connaissance de la compacité, des fractions volumiques des fibres constitutives du média filtrant et des efficacités unitaires fractionnelles associées à chaque diamètre des fibres. Dans la présente étude, ces efficacités unitaires sont obtenues par simulation numérique sur des structures monomodales présentant la même compacité que les structures multimodales considérées. La poursuite des travaux portera sur l'étude de mélanges de fibres bimodales polydisperses, afin de mieux appréhender la structure réelle des médias filtrants, ainsi que sur la validation expérimentale du modèle.

REFERENCES

- Thomas D., Bardin-Monnier N. et Charvet A., Effect of the fibre diameter polydispersity on the permeability of nonwoven filter media. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2023; 101:4138-50.
- Cabaset E., Bardin-Monnier N., Charvet A. et Thomas D. Influence of multimodal fiber distribution on the permeability of fibrous media, *Chem Eng Sci.*302 (2025) 120855
- Sakano T., Otani Y., Namiki N. et Emi H., Particle collection of medium performance air filters consisting of binary fibers under dust loaded conditions, *Separation and Purification Technology*, 19(1):145–152, 2000
- Frising T., Thomas D., Contal P., Bemer D. et Leclerc D., Influence of filter fibre size distribution on filter efficiency calculations, *Trans IChemE*, vol 81, part A, 1179 -1184 October 2003
- Tom Frising, Etude de la filtration des aérosols liquides et de mélanges d'aérosols liquides et solides, Thèse INP Lorraine, 2005