

INCIDENCE DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES FIBRES SUR LA PERMEABILITE DES MEDIAS FIBREUX

D. Thomas*, N. Bardin-Monnier, A. Charvet

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

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

TITLE

Impact of Fiber Size Distribution on Fibrous Media Permeability

ABSTRACT

The objective of this study is to relate the fiber size distribution constituting the filter media to the permeability of 3D fibrous structures generated by GeoDict®. The study area covers a packing density between 0.03 and 0.25, monodisperse fibers between 1 and 8 μm or polydisperse fibers obeying a normal or log-normal law. For monodisperse fibers, the simulated permeability values were compared to values issued from various correlations identified in the literature. If the Davies or Jackson and James relations give a good estimate of the permeability, the modified Happel relation provides a better prediction. For a fiber size distribution, the modified Happel correlation, in which the fiber diameter is replaced by an equivalent fiber diameter, leads to a relative deviation of less than +/- 8% and +/- 4% for log-normal (geometric standard deviation: $\sigma_G \leq 2$) and normal (standard deviation: $\sigma \leq 1.5$) distributions respectively.

RESUME

L'objectif de cette étude est de relier la distribution granulométrique des fibres constitutives des médias filtrants à la perméabilité de structures fibreuses 3D générées par GeoDict®. Le domaine d'étude a porté sur des compacités de médias comprises entre 0,03 et 0,25, des fibres monodispersées comprises entre 1 et 8 μm ou des fibres polydispersées obéissant à une loi normale ou log-normale. Pour les fibres monodispersées, les valeurs de perméabilité obtenues ont été comparées à diverses corrélations identifiées dans la littérature. Si les relations de Davies ou Jackson et James donnent une bonne estimation de la perméabilité, celle de Happel modifiée permet une meilleure prédiction. Dans le cas d'une distribution granulométrique de fibres, la corrélation de Happel modifiée, dans laquelle le diamètre de la fibre est remplacé par un diamètre de fibre équivalent, conduit à un écart relatif inférieur à +/- 8 % et +/- 4 % pour des distributions respectivement log-normale (écart-type géométrique : $\sigma_G \leq 2$) et normale (écart-type : $\sigma \leq 1,5$).

KEYWORDS: permeability, fibrous media / **MOTS-CLÉS :** perméabilité, milieu fibreux

1. INTRODUCTION

Les filtres à fibres, constitués d'un enchevêtrement de fibres placées perpendiculairement à l'écoulement, sont les dispositifs les plus employés dans le domaine de la filtration des aérosols en raison de leur relatif faible coût associé à une performance élevée. Les critères de choix d'un filtre reposent sur une grande efficacité de collecte et une faible perte de charge afin de minimiser la dépense énergétique. Cette dernière est conditionnée par les conditions opératoires (vitesse de filtration, température), l'épaisseur et la perméabilité du média. Il existe dans la littérature de nombreuses corrélations, recensées par Jackson et James (1986), pour l'estimation de la perméabilité mais toutes reposent sur l'hypothèse d'une distribution monodisperse des fibres. Cette hypothèse peut sembler peu pertinente pour des médias fibreux car selon l'étude de Singha et al. (2012), la distribution du diamètre des fibres suit une loi log-normale indépendamment de la taille des fibres et des techniques de fabrication. Quelques études se sont intéressées à l'influence de mélange de deux fibres monodispersées (Clague et Philipps, 1997; Brown et Thorpe, 2001; Mattern et Deen, 2008; Tafreshi et al. , 2009; Gervais et al. , 2012) mais aucun consensus sur la façon d'estimer la perméabilité d'un tel média n'en est ressorti. Par ailleurs, aucune étude concernant la polydispersité des fibres n'a été relevée dans la littérature.

L'objectif de cette étude est donc de valider, dans un premier temps, une expression de la perméabilité parmi celles recensées dans la littérature à partir de valeurs de perméabilité de médias filtrants composés de fibres monodispersées et, dans un second temps, d'intégrer la polydispersité des fibres dans la détermination de la perméabilité.

2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Expérimentalement, la perméabilité (κ) est issue de la relation de Darcy (Eq. 1) à partir de la connaissance des valeurs de l'épaisseur Z et de la perte de charge du média filtrant (ΔP) et de la vitesse de perméation (U).

$$\kappa = \frac{Z}{\Delta P} \mu U \quad \text{Eq.1}$$

Cette approche expérimentale présente néanmoins deux difficultés. La première est liée à la détermination de la perméabilité qui nécessite une mesure précise de l'épaisseur du média filtrant (Z) et qui compte tenu du caractère compressible de ce dernier s'avère délicate. Par ailleurs, un des objectifs de cette étude étant de relier la perméabilité à la structure des médias, la détermination de la compacité et de la distribution granulométrique des fibres reste primordiale mais très ardue à réaliser. Ces constats couplés à la difficulté de se procurer des médias fibreux avec des caractéristiques très différentes afin de couvrir un large domaine, ont conduit à nous orienter vers la simulation numérique.

L'utilisation du code de calcul GeoDict® permet de générer des structures fibreuses parfaitement définies en termes d'épaisseur, de compacité et pour des distributions granulométriques de fibres cylindriques données (Fig.1).

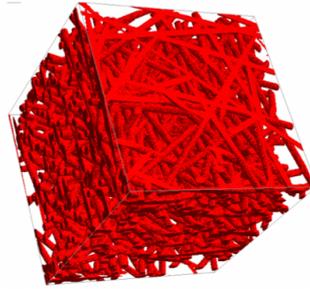


Figure 1 : Exemple de structure fibreuse simulée par GeoDict®

3. RESULTATS

La présente étude porte sur des structures fibreuses composées de fibres placées perpendiculairement à l'écoulement, avec des compacités comprises entre 3 et 25 %, des distributions granulométriques de fibres normale et log-normale (diamètres de fibres, df , variant de 1 à 8 μm pour des écart-types de 0 à 1,5, et des écart-types géométriques de 1 à 2). Afin de prendre en compte la variabilité des structures générées obéissant aux mêmes caractéristiques macroscopiques (distribution granulométrique des fibres, compacité), la valeur de perméabilité pour une structure donnée résulte d'une moyenne de 15 simulations.

3.1. Cas d'une distribution monodisperse

Les valeurs de perméabilités adimensionnelles (κ/df^2) obtenues par GeoDict® ont été comparées à celles relevées dans la littérature (Fig. 2). Les valeurs simulées s'inscrivent parfaitement dans le nuage de points des valeurs de la littérature, ce qui permet indirectement de valider la démarche et le code de calcul.

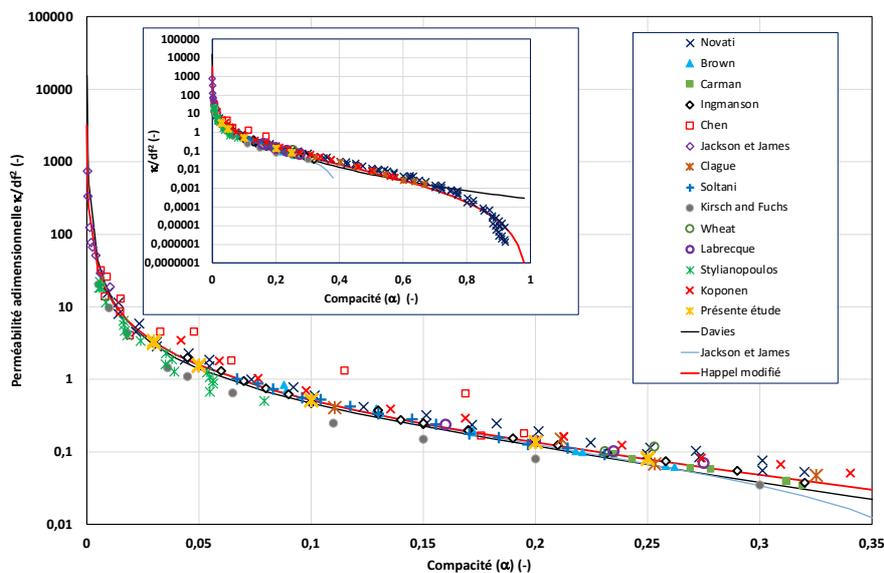


Figure 2 : Perméabilités adimensionnelles expérimentales, simulées et calculées en fonction de la compacité (Thomas et al, 2022).

Différentes expressions de la perméabilité recensées dans la littérature ont été testées sur des structures fibreuses monodisperses simulées (Thomas et al., 2022). Il ressort de cette confrontation que la relation de Jackson et James (1986) et celle de Davies (1973) bien que purement empiriques permettent une très bonne estimation de la perméabilité. Il est à noter que la relation théorique de Happel (1959) présente une meilleure estimation de nos valeurs en lui apportant un facteur correctif de $(5/2)^{1/4}$ (Eq. 2). Cette corrélation modifiée de Happel présente l'avantage de couvrir la totalité du domaine de compacité (α) (entre 0 et 1) contrairement aux deux précédentes qui montrent des divergences pour des valeurs de compacité supérieures 0,25 (Jackson et James, 1986) et 0,7 (Davies, 1973).

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

Avec cette nouvelle corrélation, l'écart entre les valeurs théoriques et simulées est au maximum de 5 % alors que l'écart type relatif sur les valeurs de la perméabilité simulée est inférieure à 10%. Il est à noter également que les valeurs expérimentales de perméabilité adimensionnelle relevée dans la littérature (Fig.2) présentent une certaine dispersion comparativement à la corrélation de Happel modifiée. Cette dispersion peut être imputée aux incertitudes sur les valeurs de l'épaisseur, de la compacité ou de la non prise en compte de la distribution granulométrique des fibres.

3.2. Cas d'une distribution polydispense

Afin de quantifier l'effet de la polydispersité des fibres sur les valeurs de la perméabilité, deux types de distribution granulométrique ont été étudiés : normale et log-normale. Pour chacune des distributions, le diamètre équivalent de fibre (df) à prendre en compte dans les expressions de la perméabilité adimensionnelle est le diamètre du volume moyen des fibres en considérant que les fibres ont toutes la même longueur. Ainsi pour une distribution normale caractérisée par un diamètre médian (d_{50}) et un écart type (σ) :

$$df = d_{50} \exp \left[\ln^2 \left(1 + \frac{\sigma}{d_{50}} \right) \right] \quad \text{Eq.3}$$

Pour une distribution log-normale de diamètre géométrique (d_G) et d'écart-type géométrique (σ_G) :

$$df = d_G \exp[\ln^2(\sigma_G)] \quad \text{Eq.4}$$

Dans le cas d'une distribution normale, l'écart observé entre la valeur calculée (Eq.2 et Eq.3) et celle obtenue sur les structures simulées reste inférieur à 4 %. L'écart demeure inférieur à 8 % dans le cas d'une distribution log-normale (Eq.2 et Eq.4).

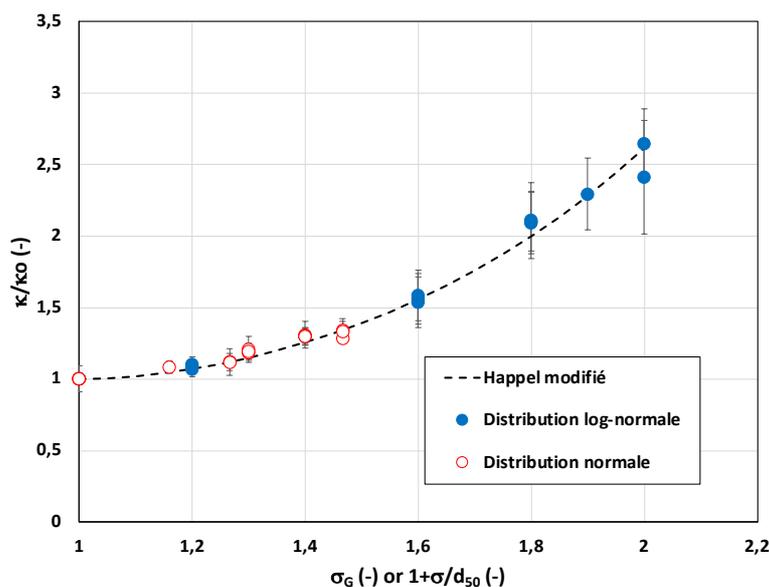


Figure 3 : Rapport (κ/κ_0) en fonction de σ_G ou $(1+\sigma/d_{50})$ pour respectivement une distribution log-normale ou normale.

La figure 3 présente le rapport des perméabilités (perméabilité du média de fibres polydispersées (κ) / perméabilité du média de fibres monodispersées (κ_0)) en fonction de l'écart type géométrique (σ_G) pour une distribution log-normale ou $(1 + \sigma/d_{50})$ pour une distribution normale. Cette figure met clairement en évidence une augmentation de la perméabilité avec la polydispersité de fibres. Dans le cas d'une distribution log-normale avec un écart-type géométrique inférieur à 1,2, la perméabilité du média fibreux n'est augmentée au maximum que d'un facteur 1,1 par rapport à un média composé de fibres monodispersées. Ce facteur peut atteindre 2,5 pour un écart-type géométrique de 2.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Concernant les milieux fibreux à fibres monodispersées, les valeurs de perméabilités [10^{-13} m² ; 10^{-10} m²] obtenues par simulation sur les filtres fibreux numériques avec des compacités comprises entre 3 et 25% et des diamètres de fibres entre 1 et 8 μ m peuvent être estimées avec la relation de Jackson et James (1986) ou celle de Davies (1973). Cependant, l'expression corrigée de Happel donne de meilleurs résultats avec une déviation relative de +/- 5 %. Il convient de noter que cet écart relatif est bien inférieur à l'écart-type relatif (10%) des valeurs simulées déterminées avec différents random seeds.

Deux expressions ont été proposées pour calculer le diamètre équivalent des fibres à utiliser dans la corrélation de perméabilité dans le cas de milieux fibreux présentant des distributions de taille de fibres obéissant à une loi normale ou log-normale. Ces expressions des diamètres de fibres équivalents couplées à la corrélation de Happel modifiée permettent une estimation de la perméabilité avec une déviation relative inférieure à +/- 8% et +/- 4% pour les distributions de fibres log-normales et normales respectivement.

L'utilisation de fibres polydispersées dans la fabrication de médias filtrants, permet de diminuer la perméabilité et par voie de conséquence de réduire la perte de charge. L'étude montre notamment une diminution d'un facteur 2 de l'impact énergétique avec l'utilisation de fibres polydispersées caractérisées par un écart type géométrique de 1,8, toutes choses égales par ailleurs. S'il est permis d'espérer un gain énergétique en modifiant la distribution granulométrique des fibres, cela ne doit pas se faire au détriment de l'efficacité de filtration. Cette interrogation oblige à poursuivre cette étude vers la détermination des efficacités de collecte pour réellement prendre en compte la distribution granulométrique des fibres dans les performances des médias filtrants.

Remerciements :

Cette étude a été menée dans le cadre du programme de recherche conjoint LIMA entre l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire et le Laboratoire Réactions et Génie des Procédés de l'Université de Lorraine/CNRS.

BROWN R.C., THORPE A., Glass-fibre filters with bimodal fibre size distributions, Powder Technology ,118, issue 1-2, 3-9 (2001)

CLAGUE S. et PHILLIPS R., A numerical calculation of the hydraulic permeability of three-dimensional disordered fibrous media, Phys. Fluids 9 (6), (1997)1562-1572

DAVIES C.N., Air filtration, Academic Press - London - New York (1973)

GERVAIS P.-C., BARDIN-MONNIER N., THOMAS D., Permeability modeling of fibrous media with bimodal fiber size distribution, Chemical Engineering Science, 73 (2012) 239-248

HAPPEL J., Viscous flow relative to arrays of cylinders, AIChE Journal, 5 (1959) 174 - 177

JACKSON G.W. et JAMES D. F., The permeability of fibrous porous media, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 64 (1986) 364 – 374

MATTERN K.J. and DEEN W.M., "Mixing Rules" for Estimating the Hydraulic Permeability of Fiber Mixtures, AIChE Journal, Vol 54, N°1 (2008) 32-41

TAFRESHI H.V., RAHMAN M.S., JAGANATHAN S., WANG Q., POURDEYHIMI B., Analytical expressions for predicting permeability of bimodal fibrous porous media, Chemical Engineering Science, 64 (2009) 1154-1159

THOMAS D., BARDIN-MONNIER N., CHARVET A., Effect of the Fibre Diameter Polydispersity on the Permeability of Nonwoven Filter Media, The Canadian Journal of Chemical Engineering, (2022) publication acceptée

SINGHA K., MAITY S., SINGHA M., PAUL P., GON D.P., Effects of Fiber Diameter Distribution of Nonwoven Fabrics on its Properties, International Journal of Textile Science, 1 (2012) 7-14