QUANTIFICATION NUMERIQUE DE L'IMPACT D'HETEROGENEITES LOCALES SUR LES PERFORMANCES DE MEDIAS FIBREUX

A.S. Rathore, N. Bardin-Monnier* et A. Charvet*

Université de Lorraine, CNRS, LRGP, F-54000 Nancy, France
*Courriel de l'orateur : nathalie.monnier@univ-lorraine.fr ou augustin.charvet@univ-lorraine.fr

TITLE

Quantification of the influence of local heterogeneities on fibrous filter performances by computational simulations.

RESUME

Le procédé de fabrication et le plissage des médias fibreux peuvent induire la formation d'hétérogénéités de compacité. Les fluctuations locales de cette propriété clé d'un filtre à fibres ne sont actuellement pas prises en compte dans les modèles prédictifs de leurs performances qui considèrent une compacité globale moyenne de la structure fibreuse. Une approche numérique a permis la quantification de l'impact de telles hétérogénéités locales. Les simulations mettent notamment en évidence que la présence de régions de moindre densité de fibres induit des passages d'écoulement préférentiels à travers ces zones et par conséquent une plus grande perméabilité et une plus faible efficacité du média filtrant. Un modèle analytique basé sur l'association en série et en parallèle de sous-domaines fibreux de compacité variable permet de valider les résultats de simulation et de prédire de façon satisfaisante les performances d'une structure fibreuse hétérogène.

ABSTRACT

The manufacturing process and the pleating of fibrous media can induce the formation of solid volume fraction heterogeneities. Local variations of this key property of a fiber filter are currently not taken into account in the predictive models of their performance which consider an average solid volume fraction of the fibrous structure. A numerical approach allowed the quantification of the influence of such local heterogeneities. In particular, the simulations show that the presence of regions of lower fibre density induces preferential paths through these zones and consequently a greater permeability and a lower efficiency of the filter media. An analytical model based on a series and parallel association of fibrous subdomains of variable solid volume fraction allows validating the simulation results and predicting satisfactorily the performances of a heterogeneous fibrous structure.

MOTS-CLES : médias fibreux, hétérogénéités, CFD **/ KEYWORDS :** fibrous media, heterogeneities, CFD

1. INTRODUCTION

Les médias fibreux, de par leur faible dépense énergétique et leur efficacité de collecte élevée comparativement aux autres séparateurs gaz/solide, sont les dispositifs les plus employés en filtration des aérosols. En raison de la méthode de fabrication de ces filtres, il est illusoire de penser qu'ils possèdent une structure homogène tant sur leur surface que dans leur épaisseur. Par ailleurs, pour retarder le colmatage de ces filtres et réduire la perte de charge, les installations de dépoussiérage sont généralement équipées de filtres à fibres plissés pour augmenter la surface de filtration tout en limitant l'encombrement. Cette méthode de plissage des filtres conduit également à des hétérogénéités locales dans la distribution des fibres et donc la compacité. Cette caractéristique du filtre étant un paramètre clé car lié à l'écoulement dans la structure fibreuse, il est essentiel de connaître les impacts d'hétérogénéités locales de compacité sur la performance globale d'un filtre. En effet, les corrélations habituellement utilisées pour prédire les performances en termes de perte de charge initiale et d'efficacité fractionnelle d'un milieu fibreux considèrent un filtre parfaitement homogène avec des propriétés structurelles globales et montrent donc certains écarts par rapport aux performances réelles des médias fibreux. Même si elles sont de plus en plus résolues, les techniques expérimentales disponibles telles que la micro-tomographie permettent d'accéder à des informations très localisées. Le recours à un outil numérique a ainsi été privilégié pour étudier l'effet des hétérogénéités sur la perméabilité et l'efficacité de filtration de structures fibreuses tridimensionnelles. En parallèle, une approche basée sur l'arrangement de structures fibreuses en parallèle (hétérogénéités de surface), en série (hétérogénéités dans l'épaisseur) ou une combinaison des deux a été mise en place pour prédire, par des corrélations simples, les performances de médias hétérogènes.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32887 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

2. APPROCHE NUMERIQUE

L'outil de simulation numérique mis en œuvre dans le cadre de ce travail est le logiciel GeoDict® développé par Math2Market GmbH. Ce code de calcul par éléments finis, basé sur une discrétisation en voxels (pixels volumétriques), est très largement utilisé dans la communauté scientifique pour étudier l'écoulement dans des structures poreuses. Le processus d'introduction des hétérogénéités en surface et dans la profondeur de la structure tridimensionnelle du filtre est réalisée en associant 16 sous-structures cubiques de compacité variable par tranche d'épaisseur (cf. Figure 1). La dimension de la structure et la discrétisation (taille des voxels) ont été choisies de façon à assurer une indépendance entre les résultats de perméabilité et ces paramètres de simulation, tout en veillant à limiter le temps de calcul. Les résultats de simulation sur des structures hétérogènes sont comparés avec un modèle considérant l'association en série/parallèle de structures homogènes de compacité variable.

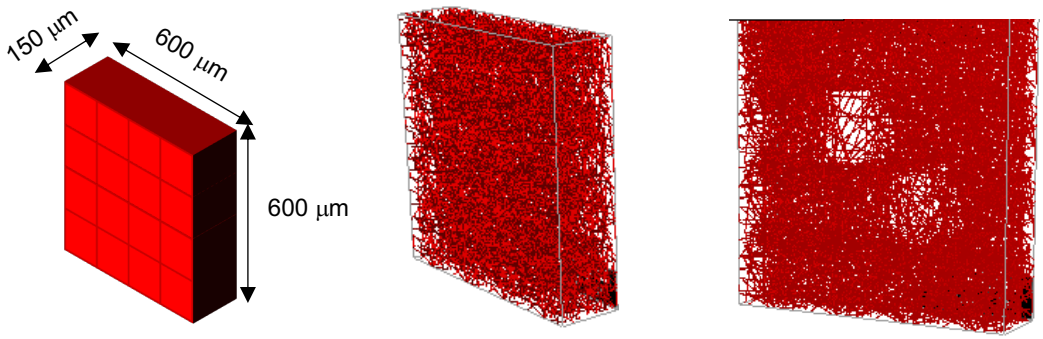

Figure 1 : Représentation schématique d'un média monocouche issu de la combinaison de 4 sous-structures dans les directions X et Y (gauche) ; Structure fibreuse monocouche homogène (centre) ; Structure fibreuse monocouche avec deux hétérogénéités surfaciques de faible compacité (droite)

3. RESULTATS

3.1. Impact d'hétérogénéités locales sur la perméabilité

La perméabilité d'un média fibreux monocouche homogène ($k_{hom.}$) constitué de fibres monodisperses de 3 µm de diamètre et d'une compacité de 5% est déterminée numériquement et comparée à la perméabilité d'un média fibreux hétérogène ($k_{hét.}$). La structure fibreuse hétérogène est obtenue en substituant un nombre variable de sous-domaines de la structure homogène par des sous-domaines de compacité égale à 2 ou 10% Ainsi, une fraction surfacique d'hétérogénéités de 0% correspond à un domaine homogène de compacité égale à 5%, une fraction de 50% à une substitution de 8 domaines alors qu'une fraction de 100% représente un domaine homogène de compacité égale à 2 ou 10%. Les hétérogénéités ont été réparties aléatoirement parmi les 16 sous-domaines et aucune influence de leur localisation n'a été mise en évidence et ce quelle que soit la fraction surfacique (Figure 2, gauche). Comme escompté, la présence de régions de moindre densité de fibres induit des passages d'écoulement préférentiels à travers ces zones et par conséquent une plus grande perméabilité globale du filtre. A contrario, l'ajout d'hétérogénéités plus compactes crée des régions plus résistantes à l'écoulement, limitant considérablement le passage du fluide et la perméabilité du filtre. Quel que soit le pourcentage d'hétérogénéités, la perméabilité des médias est parfaitement prédite par un modèle assimilant la structure fibreuse hétérogène à l'association en parallèle de 16 sous-domaines homogènes (ligne pointillée).

Il est important de noter que cette approche permet également de prédire la perméabilité d'un média monocouche constitué de sous-domaines de compacité variable (Figure 2, droite). Pour des médias multicouches, quelques divergences apparaissent entre les simulations et le modèle considérant des associations de sous domaines en série et en parallèle. En effet, cette approche suppose un champ d'écoulement uniforme à l'entrée de chaque couche. Cependant, les structures numériques étant constituées de couches contigües, la présence d'hétérogénéités dans la première couche induit des trajectoires préférentielles et un champ d'écoulement hétérogène à l'entrée de la deuxième couche.

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32887 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

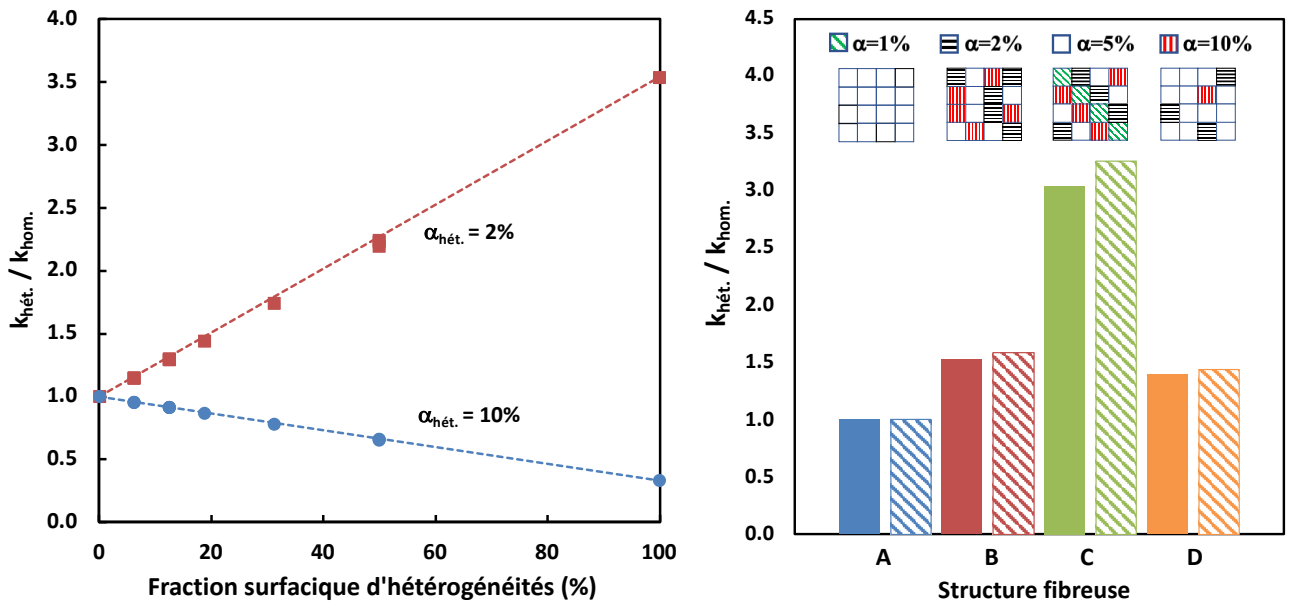

Figure 2 : Évolution de la perméabilité relative selon la fraction surfacique d'hétérogénéités pour des structures fibreuses monocouches (gauche) ; Comparaisons des perméabilités simulées (barres pleines) et calculées (barres hachurées) de médias présentant des hétérogénéités de compacité variable (droite)

3.2. Impact d'hétérogénéités locales sur l'efficacité de collecte

L'efficacité fractionnelle d'un média fibreux étant fonction de la compacité, la présence d'hétérogénéités moins compactes est à l'origine d'une diminution de l'efficacité de collecte, tant dans le domaine diffusionnel qu'inertiel. A l'inverse l'ajout de sous-domaines de compacité égale à 10% dans un média présentant une compacité initiale de 5% induit une amélioration de l'efficacité quelle que soit la taille des particules (Figure 3, gauche). Le modèle consistant en l'association en parallèle de 16 sous-domaines homogènes permet de prédire de façon satisfaisante l'efficacité d'une structure fibreuse hétérogène (Figure 3, droite).

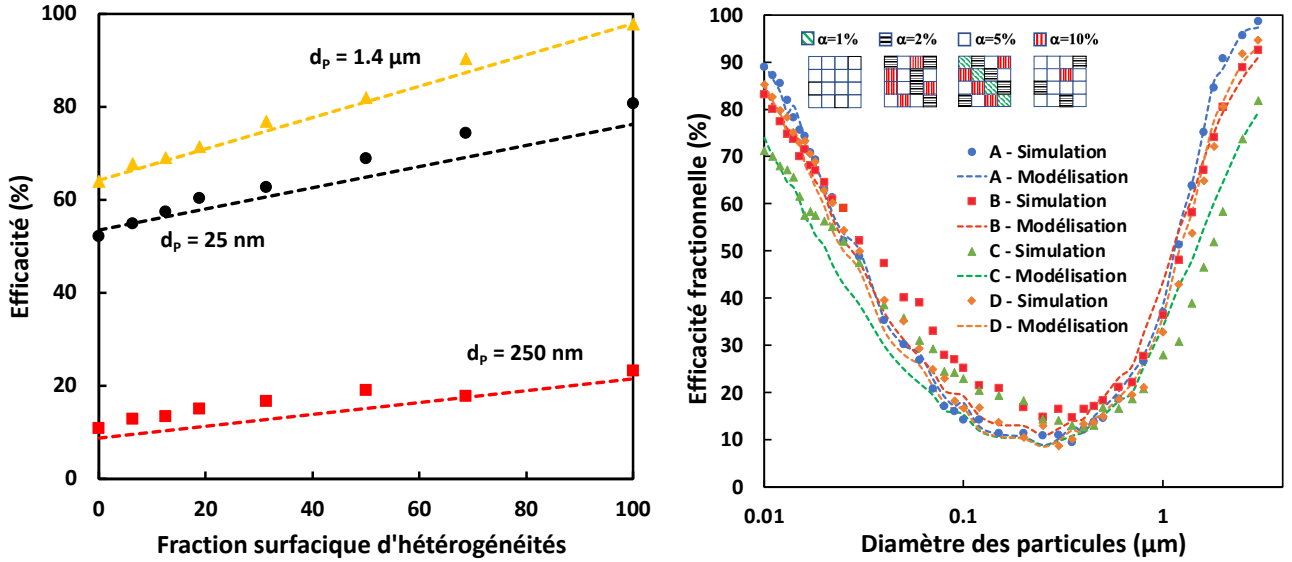

Figure 3 : Évolution de l'efficacité selon la fraction surfacique d'hétérogénéités compactes (10%) dans une structure fibreuse monocouche de compacité initiale égale à 5% (gauche) ; Comparaisons des efficacités simulées et modélisées de médias avec des distributions d'hétérogénéités de compacité variable (droite)

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32887
Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a mis en évidence un impact non négligeable d'hétérogénéités de compacité sur les performances d'un média fibreux, tant en termes de perméabilité que d'efficacité. Si la fraction surfacique d'hétérogénéités est prépondérante, leur localisation ne semble pas influer outre mesure l'écoulement au travers d'une structure fibreuse monocouche. Un modèle basé sur l'association en série et en parallèle de sous-domaines fibreux permet de prédire de façon satisfaisante la perméabilité et l'efficacité de la structure fibreuse hétérogène. Le travail devra être consolidé pour un plus grand nombre de configurations et poursuivi plus en avant dans le cas de médias multicouches et donc de présence d'hétérogénéités dans la profondeur du média. Les résultats de simulation et de modélisation devront également être confrontés à des données expérimentales, sous réserve du développement d'une technique de caractérisation des hétérogénéités locales de compacité.

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.