



Estimation de la perte de charge de médias non tissés composés de mélanges binaires de fibre

Pierre-Colin Gervais, Nathalie Monnier, Dominique Thomas

► To cite this version:

Pierre-Colin Gervais, Nathalie Monnier, Dominique Thomas. Estimation de la perte de charge de médias non tissés composés de mélanges binaires de fibre. 26ème Congrès Français sur les Aérosols, Jan 2011, Paris, France. pp.Gervais et al. <hal-00873010>

HAL Id: hal-00873010

<https://hal.science/hal-00873010v1>

Submitted on 14 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

ESTIMATION DE LA PERTE DE CHARGE DE MÉDIAS NONTISSÉES COMPOSÉS DE MÉLANGES BINAIRES DE FIBRE.

P.-C. Gervais*, N. Bardin-Monnier et D. Thomas

Laboratoire Réactions et Génie des Procédés (LRGP, UPR CNRS 3349), Nancy Université
1 rue Grandville, BP 20401, F-54001 Nancy cedex.

TITLE

Prediction of pressure drop for nonwovens with bimodal fiber size distribution.

ABSTRACT

Fibrous media are widely used in aerosol filtration. They are characterized by two main parameters: filtration efficiency and pressure drop. The pressure drop is of fundamental importance to many applications and has been subjected to research for many years. Special efforts have been made to develop models able to predict the pressure drop of fibrous media. In almost all of these studies, the fibrous medium is assumed to be made up of fibers with a unimodal fiber diameter distribution. However the most most commonly used fibrous filters consist of blends of coarse and fine fibers. In such filters, fine fibers contribute to the high filtration efficiency while coarse fibers provide mechanical rigidity. Pressure drop modeling of such fibrous media is not easy to perform (Jaganathan, et al., 2008). Geometries and flows simulations seem to be efficient tools to investigate this problem. This paper presents the comparison of experimental results with those obtained using GeoDict code, developed by the Fraunhofer ITWM. The validation of the code should allow using GeoDict as a general tool for flow prediction in specific porous media for a large range of operating conditions. To complet this first study, the development of a predictive analytical model is made in order to be able to estimate in a simple way the pressure drop of nonwovens with bimodal fiber size distribution.

RÉSUMÉ

Les médias fibreux sont couramment utilisés en filtration des aérosols. Ils sont caractérisés par deux paramètres fondamentaux : l'efficacité de filtration et la perte de charge. Dans la majorité des études visant à établir des modèles prédictifs, les médias sont considérés comme étant composés d'une distribution unimodale de taille de fibres. Cette hypothèse ne correspond pas aux configurations réelles de filtres où coexistent des fibres fines, contribuant à une efficacité de filtration élevée, et de plus grosses, assurant la rigidité mécanique de l'ensemble. Le développement de modèles prédictifs permettant d'optimiser le dimensionnement de ce type de médias n'est pas simple à réaliser (Jaganathan, et al., 2008). Les simulations de géométries et d'écoulements semblent être un outil tout à fait adapté pour répondre à ce problème. Le travail présenté a pour objectif de comparer des résultats obtenus expérimentalement à ceux simulés à l'aide du code de calcul GeoDict, développé par le Fraunhofer ITWM. La validation du code dans des configurations usuelles de fonctionnement devrait permettre d'en faire un outil général de prédiction d'écoulement en milieux poreux spécifiques pour une large gamme de conditions opératoires. Pour compléter cette première étude, le développement d'un modèle analytique prédictif est envisagé afin de pouvoir estimer de manière simple la perte de charge d'un média non-tissé composé d'un mélange binaire de fibre.

1 Introduction

Les médias fibreux utilisés en filtration des aérosols sont la plupart du temps des médias non-tissés où coexistent des fibres fines, contribuant à une efficacité de filtration élevée, et de plus grosses, assurant la rigidité mécanique de l'ensemble. Dans l'optique de prédire la durée de vie de tels filtres, conditionnée par une perte de charge acceptable tout en maintenant une efficacité suffisante, des modèles prédictifs sont conçus. Le développement de ces modèles de perte de charge n'est pas simple à réaliser et les simulations de géométries et d'écoulements sont les outils parfaits pour répondre à ce problème. La première partie de ce travail présente la génération des microgéométries et la résolution des équations d'écoulements de Stokes. Elles ont été réalisées avec un code de mécanique des fluides numérique, le code de calcul GeoDict (développé par le Fraunhofer ITWM, www.geodict.com). Les résultats obtenus via GeoDict ont ensuite été comparés à des données expérimentales provenant de plusieurs types de médias fibreux. Des mesures de perte de charge en fonction du débit de filtration ont été réalisées sur 5 médias fabriqués par le laboratoire GEMTEX (Payen, 2009) puis les résultats provenant d'une étude réalisée par Sakano (Sakano, et al., 2000) ont été utilisés. Cette double confrontation a ainsi permis de valider notre code de calcul dans des configurations usuelles de fonctionnement (gamme compacité, de diamètre et de mélanges de fibres, écoulements laminaires). Pour compléter l'approche numérique, le développement d'un modèle analytique prédictif a ensuite été abordé afin de pouvoir estimer de manière simple la perte de charge d'un média composé d'un mélange binaire de fibre. Une relation basée sur l'expression de la surface spécifique du mélange binaire est proposée. Ce modèle analytique permet d'estimer la perte de charge d'un média fibreux en écoulement laminaire assurant une bonne adéquation avec les résultats expérimentaux et avec les simulations numériques.

2 Simulations Numériques

2.1 Génération des microstructures

Afin de simuler des médias non-tissés composés d'un mélange binaire de fibre, une série de microstructures virtuelles en 3 dimensions est générée avec le logiciel GeoDict. Les options concernant les structures géométriques sont contrôlées par le module FiberGeo. Le choix de ces paramètres a fait l'objet d'une étude préalable afin d'être optimiser (Gervais, et al., 2010). Les microstructures générées pour cette étude sont des parallélépipèdes constitués de cellules volumiques élémentaires appelées voxels. Ceux-ci sont considérés comme étant vides (zone fluide) ou remplis (zone solide). La taille des domaines considérés ici est de $900 \mu\text{m} \times 900 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ avec une résolution de $1,5 \mu\text{m}$ par voxel. À l'intérieur des microstructures, chaque fibre est modélisée par un cylindre de longueur infini et de diamètre compris entre 7 et 30 voxels. L'orientation des fibres dépend du paramètre d'anisotropie β . En coordonnées polaires, β caractérise la distribution directionnelle des fibres, traduite par une fonction densité :

$$p(\theta, \varphi) = \frac{1}{4} \frac{\beta \sin \theta}{(1 + (\beta^2 - 1) \cos^2 \theta)^{3/2}}$$

Où $\theta \in [0, \pi)$ et $\varphi \in [0, 2\pi)$ sont respectivement l'altitude et la longitude. La probabilité $p(\theta, \varphi)$ étant indépendante de φ , elle exhibe une rotation symétrique autour de l'axe z. Si $\beta=1$, le système est isotrope, pour $\beta>1$, les fibres tendent à être parallèles au plan (xy).

2.2 Simulation des écoulements

L'ensemble des équations gouvernant la conservation de la quantité de mouvement et de la masse sont respectivement :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad [1a]$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad [1b]$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad [1c]$$

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \quad [2]$$

Où u,v et w sont les composantes de la vitesse respectivement suivant les directions x,y et z. p est la pression et μ la viscosité dynamique. La méthode des volumes finis appliquée dans GeoDict a permis de

résoudre les équations de Stokes en régime stationnaire pour des écoulements d'un fluide newtonien, incompressible et à faible vitesse ($Re < 1$). Il est à noter que la taille des domaines de simulation dépend de la capacité de calcul. Les résultats présentés ici ont été obtenus sur une station de calcul de 12 GB de RAM avec un processeur bi-quad-core AMD à 2.1 GHz. Chaque simulation dure entre 4 et 8 heures. Les figures 1 et 2 suivantes représentent respectivement un exemple de microstructure générée et de visualisation du champ de pression obtenu pour un des médias étudié.

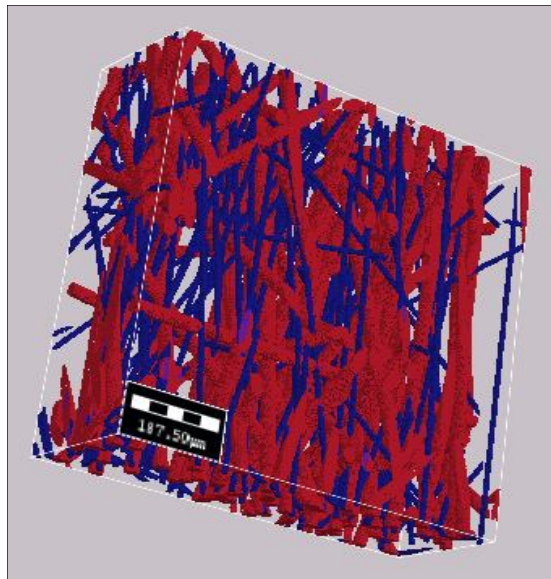


Fig. 1. Exemple d'une microstructure générée. $\alpha=18,3\%$, $\beta=5$, $d=10,9$ et $28 \mu\text{m}$, domaine de $900\mu\text{m} \times 900\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$.

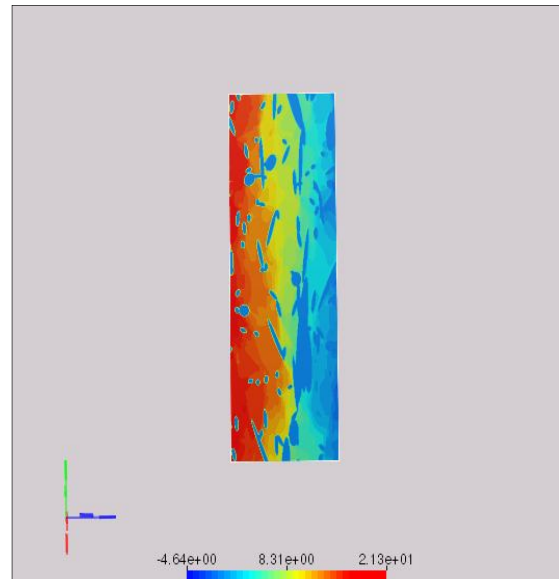


Fig. 2. Visualisation du champ de pression obtenu suivant le sens de l'écoulement (z) pour $V_f=10\text{cm/s}$.

3 Validation expérimentale

3.1 Matériel et méthodes

Afin de couvrir une large gamme de caractéristiques géométriques (compacité, épaisseur de filtre...), les résultats expérimentaux provenant de deux types de médias fibreux ont été confrontés aux simulations. Dans un premier temps, 5 médias fabriqués par le Laboratoire GEMTEX (Roubaix - France) lors des travaux de thèse de J. Payen (Payen, 2009) ont été étudié. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 1. Les mesures de perte de charge en fonction du débit de filtration ont été réalisées au LRGP.

Tab. 1. Caractéristiques de structure des médias fibreux conçus par Payen.

Réf.	$d_1 (\mu\text{m})$	$Y_1 (\%)$	$d_2 (\mu\text{m})$	$Y_2 (\%)$	$\alpha (\%)$	$Z (\mu\text{m})$
H	10,9	45	28,2	55	19,3	860
I	10,9	90	28,2	10	17,7	1010
J	10,9	85	28,2	15	18,3	930
K	10,9	58	45,1	42	17,4	920
L	10,9	23	45,1	77	13,8	1130

Dans un second temps, les résultats provenant d'une étude réalisée par Sakano (Sakano, et al., 2000) ont été utilisés. Les caractéristiques des médias sont présentées dans le tableau 2.

Tab. 2. Caractéristiques de structure des médias fibreux étudiés par Sakano.

diamètre des fibres fines	$d_f (\mu\text{m})$	12
diamètre des fibres épaisses	$d_e (\mu\text{m})$	39
fraction massique de fibres épaisses	$Y_2 (\%)$	0, 25, 50, 75, 100
épaisseur du filtre	$Z (\mu\text{m})$	10000
compacité	$\alpha (\%)$	3
surface de filtration	$A (\text{m}^2)$	19,6
vitesse de filtration	$V (\text{cm/s})$	17

3.2 Résultats

Afin de s'affranchir de la dépendance de la perte de charge vis-à-vis de la vitesse du fluide et de l'épaisseur des échantillons, la comparaison des résultats est réalisée en calculant les valeurs de perméabilité à partir des valeurs de perte de charge mesurées et simulées. On les obtient grâce à la loi de Darcy (Darcy, 1856) :

$$B = \frac{Z}{\Delta P} \cdot \mu \cdot U \quad [3]$$

Où B est la perméabilité, ΔP la perte de charge et U la vitesse en fût vide. Les figures 3 et 4 comparent les valeurs des perméabilités simulées en utilisant GeoDict avec celles issues des expériences réalisées respectivement sur les médias fibreux de Payen et par Sakano. Dans le cas des médias de Payen, les résultats indiquent que l'augmentation de la perméabilité entraîne une légère sous-estimation des valeurs simulées par rapport à celles obtenues expérimentalement. Dans le cas des médias de Sakano, les résultats indiquent qu'à compacité constante, l'augmentation de la proportion de fibres épaisses a tendance à accroître la valeur de la perméabilité du matériau. Cette augmentation entraînant une légère surestimation des valeurs simulées par rapport à celles obtenues expérimentalement. On note globalement une différence minimale entre les valeurs simulées avec GeoDict et celles déterminées expérimentalement. Cette confrontation permet ainsi de valider notre code de calcul dans la gamme compacité, de diamètre et de mélanges de fibres étudiés en écoulements laminaires.

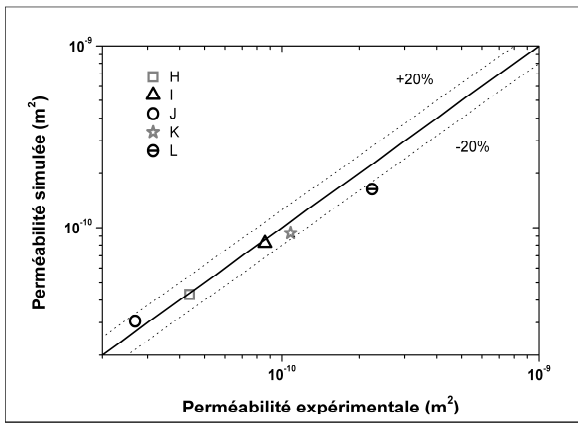


Fig. 3. Courbe de parité : perméabilité simulée en fonction de la perméabilité mesurée pour les médias de Payen.

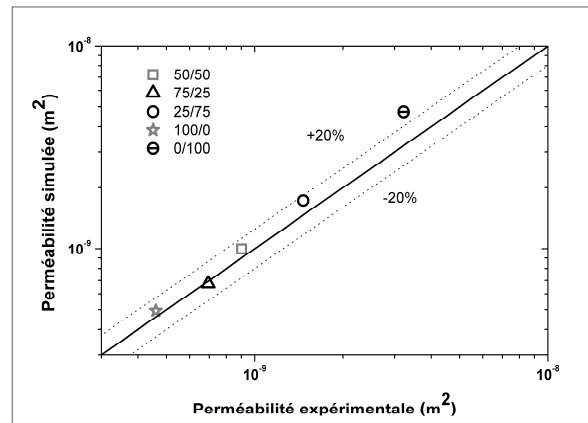


Fig. 4. Courbe de parité : perméabilité simulée en fonction de la perméabilité mesurée pour les médias de Sakano.

4 Modèle prédictif

4.1 Modèle Analytique

Pour compléter cette approche numérique, le développement d'un modèle analytique prédictif est envisagé afin de pouvoir estimer de manière simple la perte de charge d'un média composé d'un mélange binaire de fibre. La perte de charge d'un fluide en écoulement laminaire au travers d'une longueur Z d'un média poreux est estimée par la relation de Kozeny-Carman (Kozeny, 1927; Carman, 1956) :

$$\frac{\Delta P}{Z} = h_k \mu \frac{\alpha^2 \alpha^2}{1 - \alpha^3} U \quad [4]$$

Où μ et U sont respectivement la viscosité dynamique et la vitesse du fluide. h_k est connu comme le coefficient empirique de Kozeny-Carman. α est la compacité et a, la surface spécifique.

Pour les médias fibreux avec une forte porosité, Davies (Davies, 1952) donne une expression empirique de la perte de charge :

$$\frac{\Delta P}{Z} = 64 \frac{\alpha^{3/2}}{d^2} \mu (1 + 56\alpha^3) U \quad [5]$$

Pour les médias fibreux, a correspond au ratio surface des fibres/volume du filtre :

$$a = 4\alpha \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{d_i} \quad [6]$$

Avec Y_i , la fraction massique de fibre de diamètre d_i . Par identification entre l'expression de Davies [5] et celle de Kozeny-Carman [4], il est possible de déterminer l'expression de h_k :

$$h_k = 4 \frac{(1 - \alpha)^3}{\sqrt{\alpha}} (1 + 56\alpha^3) \quad [7]$$

En utilisant l'expression de la surface spécifique [6] et celle de h_k [7] dans l'expression [4], une nouvelle relation permettant d'estimer la perte de charge d'un média fibreux composé d'un mélange binaire est proposée en écoulement laminaire :

$$\frac{\Delta P}{Z} = 64\alpha^{3/2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{d_i} \right)^2 \mu (1 + 56\alpha^3) U \quad [8]$$

À noter que pour $Y_i=1$, la relation précédente permet de retrouver l'expression de Davies qui est utilisée pour prédire la perte de charge de médias fibreux composés d'une distribution unimodale de taille de fibres. En 2000, Sakano (Sakano, et al., 2000) a également eu une approche tenant compte de la polydispersité des fibres. Les auteurs ont proposés une expression basée sur l'hypothèse que chaque fibre contribue indépendamment à la perte de charge. Néanmoins, pour une distribution unimodale, leur expression ne permet pas de retrouver l'expression de Davies. De plus, la comparaison de ce modèle avec des valeurs expérimentales a montré qu'il surestimait les valeurs de perte de charge.

4.2 Résultats

La figure 5 compare les valeurs des perméabilités calculées à partir du modèle analytique [8] avec celles issues des expériences réalisées respectivement sur les médias fibreux de Payen et par Sakano. La comparaison met en évidence une bonne adéquation dans la gamme compacité, de diamètre et de mélanges de fibres étudiés en écoulements laminaires.

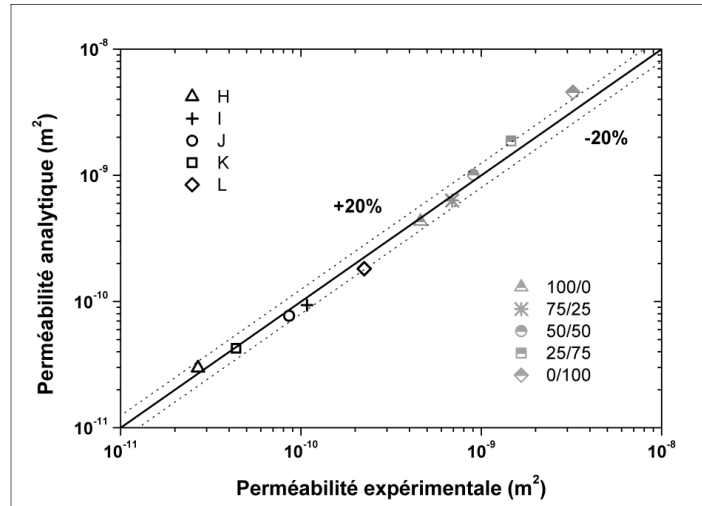


Fig. 5. Courbe de parité : perméabilité analytique en fonction de la perméabilité expérimentale pour les médias de Payen et de Sakano.

4.3 Application du modèle prédictif sur des médias fictifs

Afin de d'estimer la cohérence du modèle prédictif, celui-ci est confronté avec des résultats obtenus grâce à GeoDict portant sur des structures fictives représentatives. La taille des fibres fines est de 3 μm , celle des fibres épaisses de 50 μm avec des mélanges de proportions massiques fibres fines/fibres épaisses de 75/25, 50/50 et 25/75 et des valeurs de compacité de 5, 10 et 15%. La figure suivante compare les valeurs des perméabilités simulées avec celles calculées grâce au modèle analytique. Les résultats indiquent qu'à

compacité constante, l'augmentation de la proportion de fibres épaisses à tendance à accroître la valeur de la perméabilité du matériau. On remarque également qu'à proportion de fibres équivalente, l'augmentation de la compacité fait logiquement diminuer la valeur de la perméabilité.

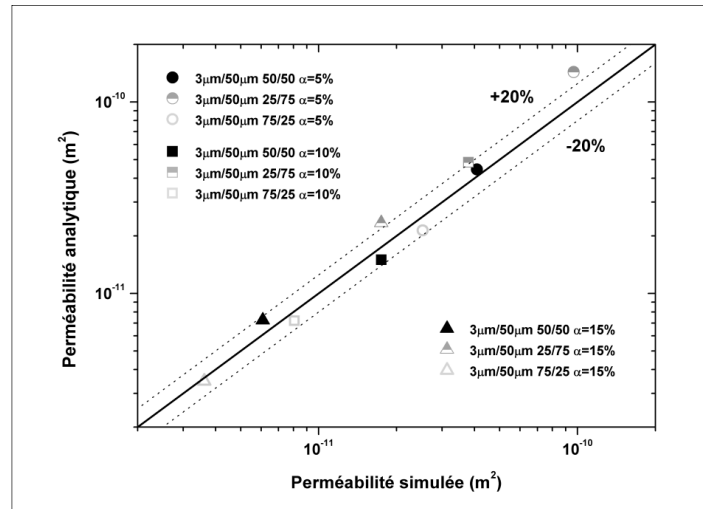


Fig. 6. Courbe de parité : perméabilité analytique en fonction de la perméabilité simulée pour les médias fictifs.

Cette confrontation permet essentiellement de se rendre compte de la bonne adéquation du modèle analytique avec les simulations numériques. Cette validation offre la possibilité d'utiliser ce modèle comme outil de prédiction facile à mettre en œuvre dans la gamme compacité, de diamètre et de mélanges de fibres étudiés en écoulements laminaires.

5 Conclusion

L'étude que nous avons menée s'inscrit dans le cadre du développement de modèles prédictifs de perte de charge de médias fibreux avec pour objectif de prédire la durée de vie de filtres utilisés en traitement des aérosols. L'établissement de ces modèles n'est pas simple à réaliser notamment pour les médias non-tissés composés d'un mélange binaire de fibre. Le code de calcul GeoDict a été utilisé pour générer des microgéométries et pour résoudre les écoulements. Cet outil CFD a permis d'obtenir des valeurs de perméabilités qui ont été comparés à des données expérimentales provenant de plusieurs types de médias fibreux. Cette double confrontation a ainsi permis de valider notre code de calcul dans des configurations usuelles de fonctionnement (gamme compacité, de diamètre et de mélanges de fibres, écoulements laminaires). Dans un second temps, un modèle analytique basé sur l'expression de la surface spécifique du mélange binaire a été développé. Les calculs réalisés ont été comparés aux résultats expérimentaux et aux simulations numériques. Ils ont permis de montrer que ce modèle estime de manière satisfaisante la perméabilité des médias fibreux en écoulement laminaire.

6 Références

- Carman P.C.** Flow of gases through porous media, New York, Academic Press, **1956**.
- Darcy H.** Les fontaines publiques de la ville de Dijon, éd. Dalmont, Paris, **1856**.
- Davies C.N.** The separation of airborne dust and mist particles, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf., **1952**. Vol. 1B. - pp. 185-198.
- Gervais P.-C., Bardin-Monnier N. et Thomas, D.** Détermination numérique de la perte de charge de filtres constitués d'un mélange binaire de fibres, Journées d'Étude sur les milieux poreux. Nancy, **2010**.
- Jaganathan S., Vahedi Tafreshi S. et Pourdeyhimi H.** On the pressure drop prediction of filter media composed of fibers with bimodal diameter distributions, Powder Technol., **2008**. 1: Vol. 181. - pp. 89-95.
- Kozeny J.** Über kapillare leitung des wassers im boden, Sitzungsber, Akad. Wiss. Wien, **1927**. pp. 271-306.
- Payen J.** Étude et développement de structures fibreuses nontissées dédiées à la filtration de particules fines dans l'air, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes. **Décembre 2009**.
- Sakano T. et al.** Particle collection of medium performance air filters consisting of binary fibers under dust loaded conditions, Sep. Purif. Technol., **2000**. Vol. 19. pp. 145-152.
- Thomas D. et al.** Pressure drop of fibrous media with bimodal fiber size distribution, Proc. European Conference on Fluid Particle Separation. Lyon, **2010**. pp. 137-138.