



HAL
open science

Comment identifier les régimes d'écoulement et déterminer les coefficients d'échange dans les mousses à cellules ouvertes

Prashant Kumar, Yann Jobic, Frederic Topin

► To cite this version:

Prashant Kumar, Yann Jobic, Frederic Topin. Comment identifier les régimes d'écoulement et déterminer les coefficients d'échange dans les mousses à cellules ouvertes. 25ieme Congrès Français de Thermique (SFT'2017), May 2017, Marseille, France. hal-01792922

HAL Id: hal-01792922

<https://hal.science/hal-01792922>

Submitted on 16 May 2018

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.

Comment identifier les régimes d'écoulement et déterminer les coefficients d'échange dans les mousses à cellules ouvertes.

Prashant KUMAR^{1*}, Yann JOBIC¹, Frédéric TOPIN¹

¹Laboratoire IUSTI, CNRS UMR 7343, Aix-Marseille Université
5 Rue Enrico Fermi, 13453 Marseille Cedex 14.

* (auteur correspondant : prashant.kumar@univ-amu.fr)

Résumé - L'utilisation de mousses à cellules ouvertes augmente rapidement dans de nombreux domaines. Les caractéristiques hydrauliques obtenues à partir de données de perte de charge sont largement dispersées dans la littérature, en raison de définitions et ambiguïtés diverses. Il semble que peu de définitions coïncident avec leur utilisation en fonction du type d'échantillons de mousse et de la porosité et donc, conduit à un ordre élevé de dispersion dans le rapport entre le coefficient de frottement et le Reynolds.

Les limites du choix des longueurs caractéristiques sont décrites et discutées pour différentes sections de brin. Il a été trouvé que la racine carrée de la perméabilité de Darcy est la plus adaptée aux structures de mousse de natures diverses et peut être facilement liée à différentes données de perte de charge. Les limites de différents régimes d'écoulement (Darcy, transition et inertiel) ont été obtenues en fonction du nombre de Reynolds. Ces limites ont été trouvés « universelles » et indépendantes de la morphologie des mousses.

Des simulations numériques directes 3-D à l'échelle du pore ont été effectuées sur des structures modèles pour calculer les coefficients d'échange volumétrique « brin-fluide ». Une étude systématique a été effectuée. Des corrélations empiriques ont été dérivées pour des porosités et tailles de brin variables ; elles ont été comparées aux données de la littérature.

Nomenclature

a_c	Surface spécifique, m^{-1}	Nu_{conv}	nombre de Nusselt convectif
C_L	longueur caractéristique, m	Nu_{vol}	nombre de Reynolds volumétrique
C_{For}	coefficient d'inertie, m^{-1}	Re	nombre de Reynolds
f	coefficient de frottement	<i>Symboles grecs</i>	
K_D	permeabilité Darcienne, m^2	ε_o	porosité

1. Introduction

Les données de la littérature à propos des écoulements dans les mousses à cellules ouvertes possèdent des différences assez grandes concernant la transition entre les régimes d'écoulement et la longueur caractéristique considérée pour décrire la relation entre f , facteur de frottement et Re , nombre de Reynolds. Les données sur f sont largement dispersées (e.g. Bonnet et al., [1]) et varient d'un auteur à l'autre. En raison de différences de définitions et des traitements de donnée de perte de charge, aucun critère de choix de longueur caractéristique C_L pour les écoulements linéaires et non linéaires dans des mousses à cellules ouvertes ne semble faire l'unanimité. Généralement C_L est lié au régime d'écoulement et peut varier en fonction du type de paramètre utilisé (caractéristiques morphologiques ou hydrauliques). De plus, l'ambiguïté dans plusieurs définitions de paramètres (par exemple la perméabilité ou la taille des pores) constitue une difficulté supplémentaire afin de comparer les données disponibles.

De nombreux auteurs utilisent un paramètre morphologique de la matrice de mousse, par exemple le diamètre de pore (d_p), le diamètre de pore équivalent (d_p^{eq}), diamètre hydraulique (d_h) ou diamètre du particule (D_p), comme échelle de longueur caractéristique (voir e.g. Boomsma et al., [2], Inayat et al., [3], Kumar and Topin [4]). Ce choix de longueur caractéristique est un choix naturel en raison de la structure régulière de ces mousses. Malheureusement, ce choix impacte directement la valeur du Reynolds, ce qui rend difficile une comparaison direct de résultats. Ces paramètres morphologiques conduisent à obtenir des pentes différentes dans le régime de Darcy, ce qui est contraire à la relation entre f et Re .

De plus, en raison de différences de définitions et de mesures des paramètres morphologiques (e.g. d_p , a_c , etc.) décrivant la relation $f - Re$ dans les mousses à cellules ouvertes, divers auteurs (e.g. Dukhan et al., [5]) ont proposé d'utiliser des grandeurs hydrauliques comme dimension caractéristique (e.g. $\sqrt{K_{For}}$, $\sqrt{K_D}$) qui ont l'avantage d'avoir la même dimension qu'une longueur caractéristique. Ce choix est intéressant, du fait que leur valeur peut être déterminée par un calcul direct connaissant la géométrie exacte du milieu poreux. En tant que tel, la perméabilité obtenue dans le régime visqueux correspond à la structure interne réelle du milieu poreux avec une très grande précision (Dybbbs et Edwards [6]). Cependant il est important de noter qu'il existe malgré tout une ambiguïté dans la définition de la perméabilité dans de nombreuses données de la littérature. Une différence notable est de considérer une perméabilité au sens de Darcy ou Forchheimer qui dépend du régime d'écoulement : visqueux pour K_D , inertiel pour K_{For} . Cette dernière ne semble pas recommandée pour l'identification des transitions de régime d'écoulement, à cause de cette dépendance intrinsèque.

Ensuite, nous chercherons à déterminer le coefficient de transfert de chaleur volumique fluide-mousse. Il peut être identifié soit à partir de données stationnaires en mesurant des températures fluide et solide soit en utilisant des méthodes transitoires en utilisant uniquement des mesures fluide en amont et aval de l'échantillon (e.g. single blow method [7], ou des sollicitations périodiques [8]). Les résultats des deux méthodes sont globaux et conduisent à des coefficients moyennés. En raison de la complexité de la morphologie interne du milieu poreux, il est extrêmement difficile d'étudier expérimentalement le flux et le transfert de chaleur de la géométrie à l'échelle des pores ; les informations de transfert de chaleur détaillées à l'intérieur d'un échantillon de mousse ne peuvent pas être obtenues expérimentalement.

Dans la littérature [7, 9-10], plusieurs corrélations ont été rapportées pour la relation entre le coefficient de transfert de chaleur volumétrique et le nombre de Reynolds. La forme générale de ces corrélations est : $Nu = CRe^m Pr^n$. D'autre part, la plupart des expériences et des simulations numériques ont été réalisées seulement à des vitesses élevées (en régime inertiel) sur un petit nombre d'échantillons de mousse. Aucune étude systématique du coefficient d'échange thermique de mousses n'est présente dans la littérature.

L'objectif du présent travail est dans une première partie d'obtenir une échelle de longueur caractéristique unique pour décrire la relation entre le coefficient de frottement et le nombre de Reynolds, ainsi qu'entre le nombre de Nusselt et le nombre de Reynolds. De plus, les limites du nombre de Reynolds pour décrire les régimes d'écoulement sont déterminées. Dans une seconde partie, nous déterminerons le coefficient de transfert de chaleur volumique fluide-mousse à partir de données stationnaires.

2. Simulations numériques 3-D à l'échelle du pore

Des mousses virtuelles périodiques ont été générées, sous forme d'une cellule unitaire de 4 mm de côté, avec une section transversale de ligament constant et une porosité variant de 0,60 à 0,95 (voir figure 1). Un maillage fin constitué de cellules polyédriques a été utilisé afin d'obtenir des résultats hydrauliques précis (plus de 200 000 cellules). Des simulations numériques directes utilisant un code commercial (StarCCM +) pour résoudre les équations de Navier-Stokes en phase fluide ont été réalisées sur le maillage volumique généré à partir des surfaces solides. Nous imposons un saut de pression entre 2 faces opposées de la cellule en association avec une condition de périodicité en vitesse. Les autres faces sont des symétries. Nous obtenons ainsi les champs de vitesse et pression au sein du pore en régime hydrauliquement établi. Nous avons fait varier le gradient de pression imposé pour accéder à une large gamme de nombres de Reynolds. Les champs de pression et de vitesse ont été calculés pour toute la phase fluide et ainsi, les paramètres hydrauliques ont été déduits à la macro-échelle. A partir des données locales de vitesse et pression nous pouvons extraire les grandeurs macroscopiques (perméabilité et coefficient inertiel) permettant la description des écoulement selon les lois classiques dans le domaine (cf. eq. 1,2)

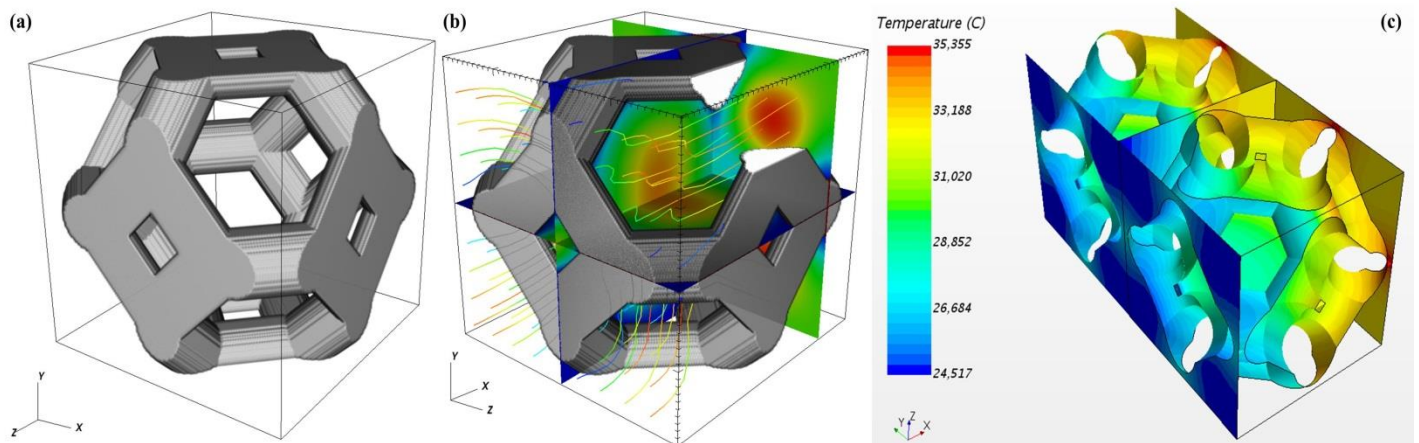


Figure 1. (a) Domaine de calcul: Cellule de type Kelvin de diamètre $d_{cell} = 4\text{mm}$. (b) Champ d'écoulement: amplitude de la vitesse à travers la mousse sur deux plans perpendiculaires et lignes de courant coloriées suivant la magnitude de la vitesse (c) Champ de température à l'interface fluide-solide.

Pour calculer le coefficient de transfert de chaleur des structures de mousse, un flux de chaleur ($1000\text{-}100000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) a été imposé à l'interface solide-fluide. Nous imposons le champ de vitesse obtenu précédemment sur tout le domaine et résolvons l'équation de la chaleur locale dans le fluide. Nous souhaitons accéder au coefficient d'échange en régime établi, phénomène qui se produit sur plusieurs cellules. Pour simplifier les calculs nous utilisons itérativement la même cellule et modifiant les conditions thermique en entrée jusqu'à obtention du régime établi. Cette procédure permet d'obtenir (pour un écoulement périodique établi) l'évolution amont-aval du coefficient d'échange thermique :

- (i) Imposer le profil de vitesse sur le domaine.
- (ii) Régler la température du fluide d'entrée à X- tandis que les autres parois (Y +, Y-, Z +, Z-) sont adiabatiques.
- (iii) Imposer le flux de chaleur à l'interface solide-fluide en fonction du nombre de Reynolds de manière à conserver une température moyenne en X+ à peu près constante.
- (iv) Résoudre et enregistrer la température locale du fluide à la sortie de la section X + et extraire le coefficient d'échange moyen de la cellule unitaire.

- (v) Imposer la température du fluide enregistrée sur la section X- et répéter les étapes (ii-iv).
- (vi) Répéter la procédure jusqu'à ce que le coefficient de transfert de chaleur entre deux cellules ne diffère pas de plus de 1%.

3. Recommandation sur l'utilisation de la perméabilité de Darcy

La loi d'écoulement à travers de milieux poreux dans un régime inertiel (Equation de Forchheimer) peut être généralisée pour tous les fluides en introduisant la viscosité et la densité du fluide donnant :

$$-\nabla \langle P \rangle^f = \frac{\mu_f}{K_D} \langle V \rangle^f + \rho C_{For} \|\langle V \rangle^f\| \langle V \rangle^f \quad (1)$$

On définit $\nabla \langle P \rangle^f$ comme étant le gradient de la pression moyenne sur toute la cellule représentative, et $\langle V \rangle^f$ la vitesse moyenne sur tout le volume fluide. Le gradient de pression est la somme de deux termes, la moyenne des gradients de pression locaux et la somme des forces de pressions sur les interfaces solide-fluide :

$$\nabla \langle P \rangle^f = \langle \nabla P \rangle - \int P n_{sf} dA = \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (2)$$

Il est important de noter que les effets visqueux sont négligeables dans le régime inertiel tandis que les effets inertiels le sont en régime visqueux. Cependant, leurs effets sont comparables dans le régime de transition qui conduit à un observable différent qui est modélisé par une loi cubique. Ces phénomènes physiques suggèrent que la perméabilité obtenue en régime visqueux est par définition celle de Darcy mais elle est aussi pertinente pour les régimes de transition, son influence étant encore forte dans ceux-ci. De plus, l'influence des effets inertiels augmentant en fonction du Reynolds, la perméabilité au sens de Darcy reste significative au tout début de ce régime, et diminue bien évidemment lorsque la vitesse augmente. L'identification du début et fin des régimes d'écoulement étant l'objectif fixé, un Reynolds basé sur la perméabilité de Darcy est alors suffisant. Ces différents points renforcent l'utilisation de la racine carrée de la perméabilité au sens de Darcy en tant que longueur caractéristique comme étant efficace et précise pour décrire les régimes d'écoulement. On peut également déduire que l'utilisation de caractéristiques hydrauliques intrinsèques (par exemple $\sqrt{K_D}$) comme échelle de longueur caractéristique réduit les ambiguïtés dans les définitions et les mesures sur tous les autres paramètres morphologiques.

Afin de traiter les données des références ci-dessus, nous allons utiliser une forme non dimensionnelle de l'Équation 2 reliant le comportement de la perte de charge avec la dynamique du facteur de frottement f . En particulier, si l'on divise les deux côtés de l'équation (2) par ρV^2 et qu'on le multiplie par une longueur de caractéristiques, K_D par exemple, l'équation suivante donne le facteur de frottement f :

$$f = \frac{1}{Re_{\sqrt{K_D}}} + \sqrt{K_D} \cdot C_{For} = \frac{1}{Re_{\sqrt{K_D}}} + c_F \quad (3)$$

Pour visualiser les différents régimes d'écoulement, on a présenté dans la figure 2 des données relatives à des perte de charge ($\nabla \langle P \rangle / V$) en fonction de $Re_{\sqrt{K_D}}$ (correspondant aux vitesses allant du régime visqueux au régime inertiel), pour des cellules idéalisées de type Kelvin, et de porosité 0,60 à 0,95 avec des diamètres de pores de 0,7 mm à 1,75 mm pour une section de brin explicitée en légende. Trois régimes sont alors clairement distingués. Spécifiquement, le régime de transition est également présenté, ce qui est habituellement omis dans la littérature, en raison de sa faible plage d'applicabilité. Les régimes de flux sont

présentés avec, d'une part, une perméabilité constante pour le régime visqueux et son Reynolds associé $Re_{\sqrt{K_D}}$ (voir Figure 2b), tandis que le coefficient inertiel suit une relation linéaire avec $Re_{\sqrt{K_D}}$ (voir Figure 2d). Le régime de transition suit quant à lui une tendance polynômiale de degrés deux comme attendu (voir Figure 2c).

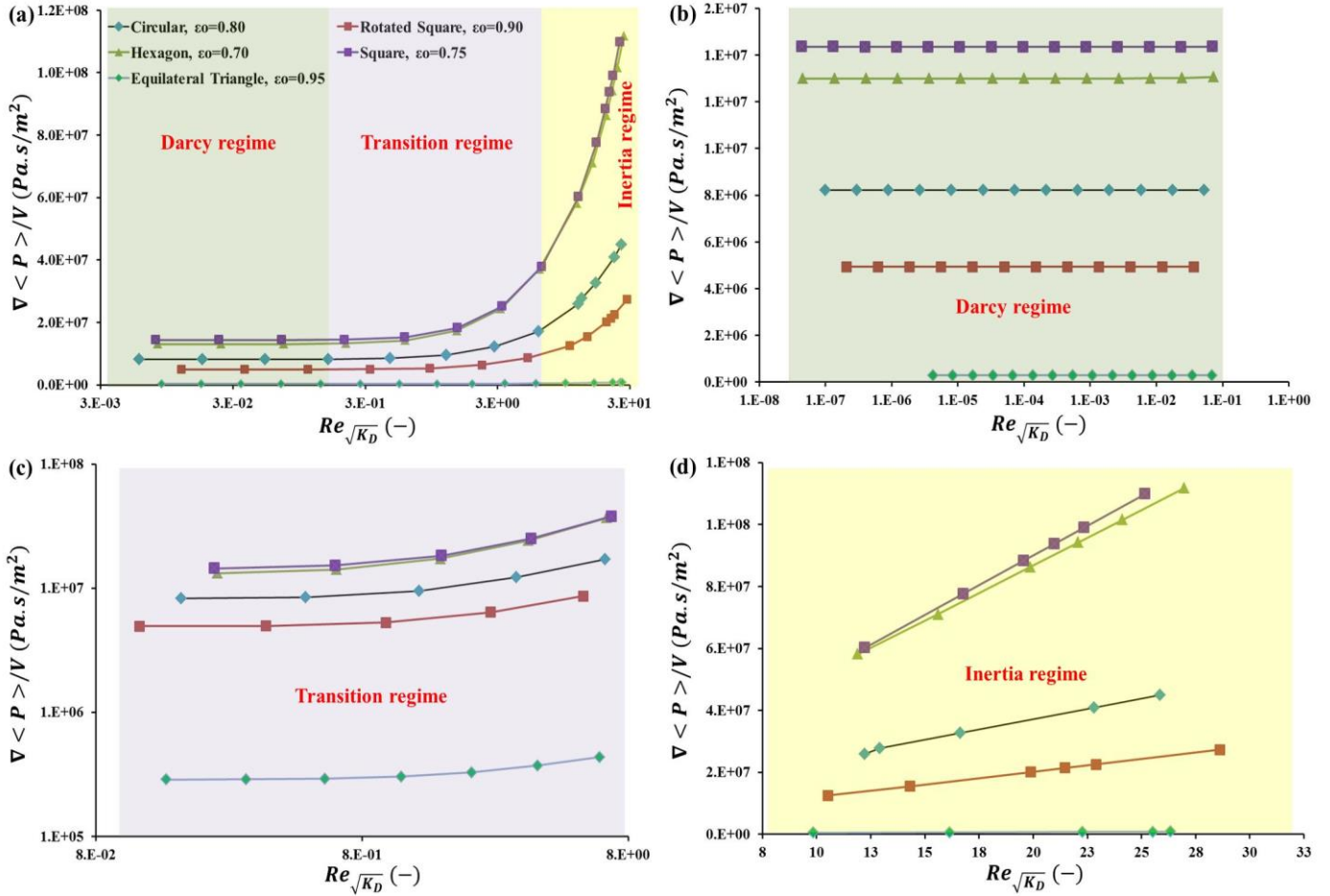


Figure 2. Tracé de $\nabla \langle P \rangle / V$ vs. $Re_{\sqrt{K_D}}$ présentant (a) les régimes visqueux, transitoire et inertiel, (b) zoom vue de régime visqueux uniquement, (c) zoom vue de régime transitoire uniquement, (d) zoom vue de régime inertiel uniquement. Les données montrées ici pour différentes sections de brin, différents diamètres de pores et porosité variable. Seule une partie du régime visqueux de (a) est présentée à l'échelle d'autres régimes.

On peut alors en déduire que la transition entre les régimes se produit au même nombre de Reynolds calculé sur $\sqrt{K_D}$, ce qui suggère qu'elle est indépendante de la morphologie de la mousse. Cela n'a jamais été décrit dans la littérature, à notre connaissance. De cette manière, trois régimes de flux principaux indépendamment de la structure de la mousse pourraient être facilement identifiés:

- Quand $Re_{\sqrt{K_D}} < 0.075$: Régime de Darcy,
- Quand $0.075 < Re_{\sqrt{K_D}} < 7.5$: Régime cubique et,
- Quand $Re_{\sqrt{K_D}} > 7.5$: Régime d'inertie.

4. Coefficient d'échange thermique

On a effectué une étude systématique sur le transfert convectif pour la forme circulaire de brin. Grâce à simulations numériques, on a l'accès pour déterminer le coefficient d'échange local. De ce coefficient thermique local, on peut calculer l'échange moyen sur toute la cellule. La méthodologie proposée dans la section 2 a été utilisé pour déterminer le coefficient d'échange convectif, h_{conv} (W/m²K) de la cellule unitaire:

$$h_{conv} = \frac{Q_{Foam \rightarrow Fluid}}{\Delta T_{Fluid-Solid} \cdot S_{Foam}} \quad (4)$$

où, $Q_{Foam \rightarrow Fluid}$ (W) est le flux de chaleur intégré sur toute la surface S_{Foam} (m²) de la mousse. $\Delta T_{Fluid-Solid}$ (K) est la différence des températures moyennes de chaque phase.

De même, pour le transfert de chaleur par convection dans des matériaux en mousse, on utilise également les coefficients volumétriques de transfert de chaleur. On peut calculer le coefficient d'échange volumétrique, h_{vol} (W/m³K) par :

$$h_{vol} = h_{conv} \cdot a_c \quad (5)$$

où, a_c (m⁻¹) est la surface spécifique d'une mousse.

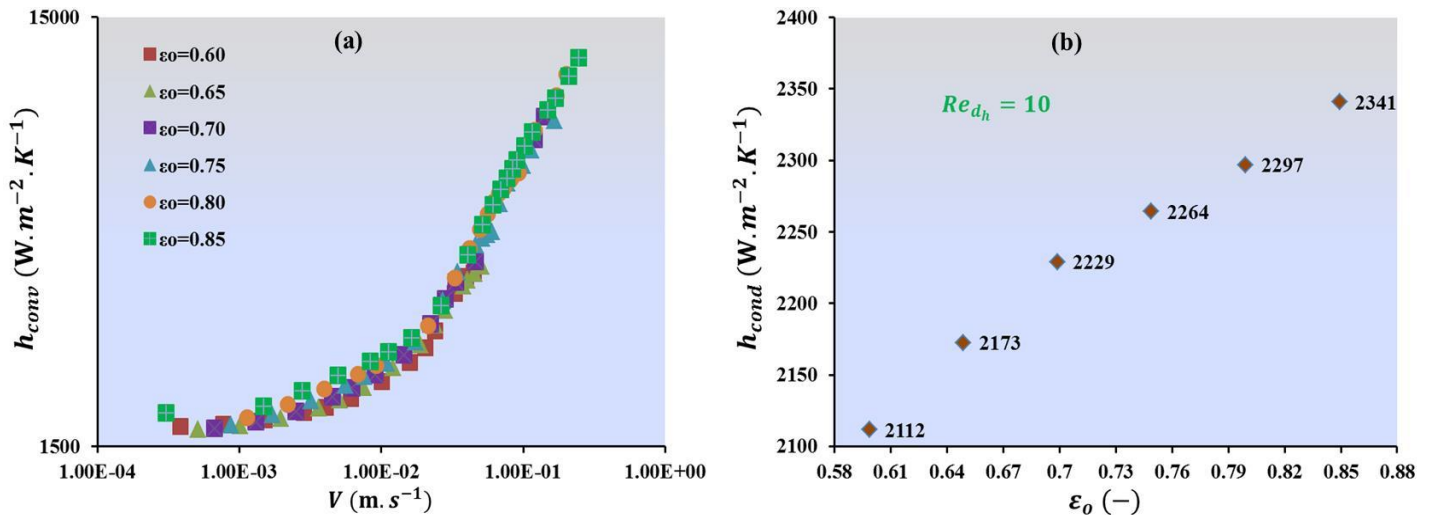


Figure 3. (a) Relation entre le coefficient de transfert thermique moyen de la surface de mousse et la vitesse. (b) Relation entre le coefficient de transfert thermique de la surface de mousse et la porosité pour un Reynolds donné.

Les résultats calculés montrent que le coefficient de transfert thermique la surface de mousse dépend fortement de la vitesse superficielle (voir Figure 3a). Il est évident que le coefficient de transfert thermique de la surface de mousse augmente avec la vitesse superficielle. De plus, pour un nombre de Reynolds donné ($Re_{dh} = 10$), on a observé que le transfert de chaleur augmente avec la porosité. On voit que les relations sont non linéaires entre le coefficient de transfert thermique, la vitesse superficielle et la porosité (voir Figure 3b).

Dans la littérature, les longueurs caractéristiques utilisées pour développer des corrélations empiriques sont assez arbitraires. Dans la plupart des cas, des corrélations pour prédire le coefficient de transfert de chaleur ont été obtenues en fonction directe du nombre de Reynolds et du nombre de Prandtl. Une analogie à la mécanique des fluides dans les mousses suggère qu'il doit y avoir une interception et donc, une valeur numérique constante doit apparaître dans les corrélations. Afin d'analyser en détail, nous avons utilisé différents

nombre de Reynolds pour établir une relation entre le coefficient de transfert de chaleur et le nombre de Nusselt. Cela nous permettra d'obtenir une longueur caractéristique basé sur soit un paramètre hydraulique soit morphologique. Les nombres de Reynolds sont définis:

$$\left. \begin{aligned} Re_{\sqrt{K_D}} &= \rho V \sqrt{K_D} / \mu \\ Re_{a_c} &= \rho V (1/a_c) / \mu \\ Re_{d_h} &= \rho V (4\varepsilon_o/a_c) / \mu \\ Re_{hyd} &= \rho V (K_D \cdot C_{For}) / \mu \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

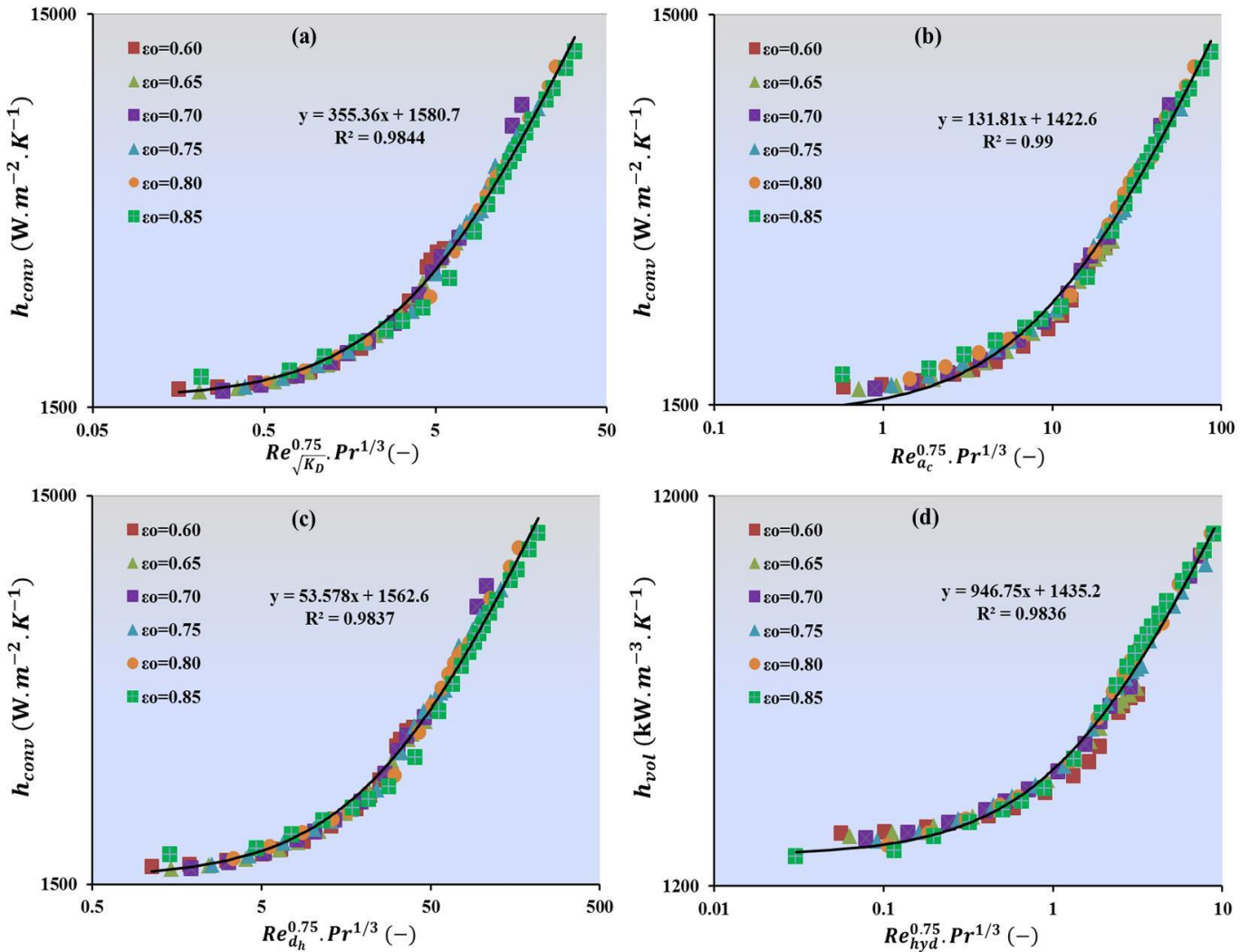


Figure 4. Relations variées entre h_{conv} (et h_{vol}) et le nombre de Reynolds.

On peut voir dans la figure 4 qu'une relation unique a été obtenue pour h_{conv} et h_{vol} . L'avantage significatif de ces corrélations est qu'elles sont basées sur un type de relation identique entre le nombre de Reynolds ayant l'exposant 0.75 et le nombre de Prandtl ayant l'exposant 1/3. La seule différence entre ces corrélations est que les constantes numériques diffèrent et dépendent de la définition de la longueur caractéristique utilisée. De plus, le coefficient de transfert de chaleur est normalement exprimé sous la forme de Nusselt. On peut observer qu'une corrélation unique du nombre de Nusselt (moyen et volumétrique) a été obtenue lorsque la longueur caractéristique est un paramètre morphologique. Aucune relation n'a été obtenue avec succès lorsque la longueur caractéristique est basée sur les paramètres hydrauliques. On peut observer que la tendance du nombre de Nusselt en fonction de la gamme des nombres de Reynolds présente deux régimes (voir Figure 5).

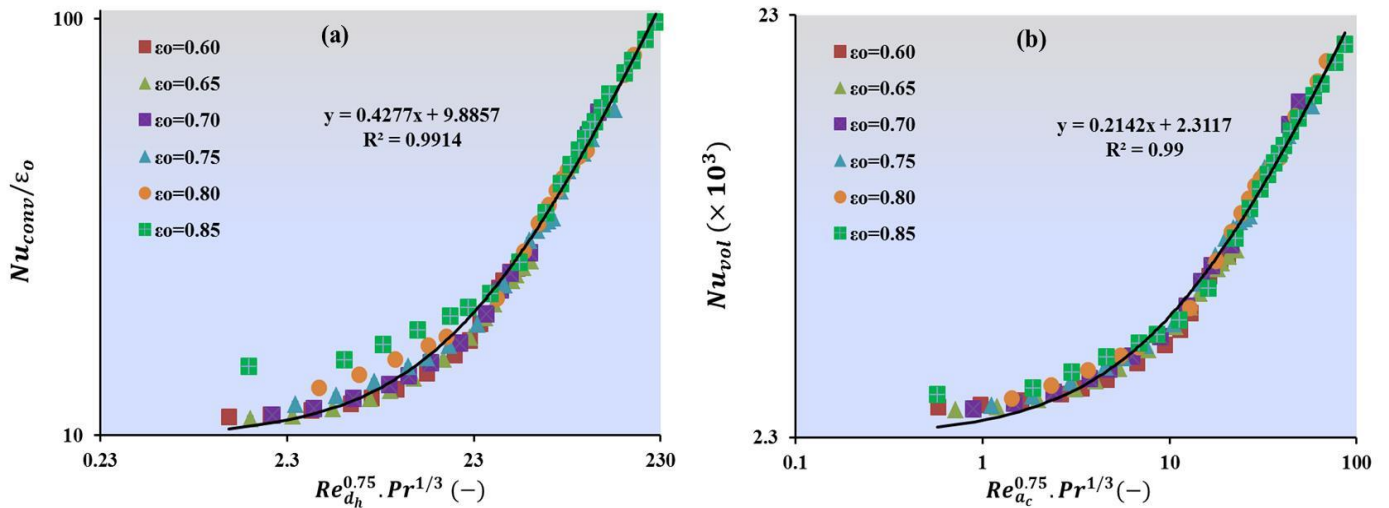


Figure 5. Relations variées entre Nu_{conv} (et Nu_{vol}) et le nombre de Reynolds.

5. Conclusion

La racine carrée de perméabilité en régime visqueux pur est recommandée comme longueur caractéristique pour caractériser la relation de $f - Re$. Différente gamme de nombre de Reynolds pour délimiter les régimes de flux a été obtenue. Ces intervalles transitoires du nombre de Reynolds semblent être «universels» et se révèlent indépendants de la morphologie des mousses. Ce travail simule numériquement le transfert de chaleur par convection dans des matériaux moussés représentés par une structure idéale de type Kelvin. Des études paramétriques ont été réalisées avec différents diamètres moyens de pores, porosités, les températures et les vitesses. Le coefficient de transfert thermique moyen augmente avec le nombre de Reynolds et il dépend de la porosité pour un nombre de Reynolds donné. Les corrélations pour prédire les nombres locaux et volumétriques de Nusselt (Nu_{conv} and Nu_{vol}) sont valides dans toute la gamme de porosité (0.60-0.85) pour la section droite du brin circulaire dans différents régimes d'écoulement.

Références

- [1] Bonnet, J.-P., Topin, F., Tadrist, L., Transport in Porous Media 73(2): 233-254 (2008).
- [2] Boomsma, K., Poulikakos, D., Ventikos, Y., Int. J. Heat Fluid Flow. 24, 825–834 (2003).
- [3] Inayat, A., Schwerdtfeger, J., Freund, H., Korner, C., Singer, R. F., Schwieger, W., Chem. Eng. Sci., 66 (12), 2758-2763 (2011).
- [4] Kumar, P., Topin, F., Transp. Porous Med. 105 (1), 57-81 (2014).
- [5] Dukhan, N., Bagci, O., Ozdemir, M., Int. J. Heat Mass Transf. 77, 114–123 (2014).
- [6] Dybbs, A., Edwards, R. V., Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media. NATO ASI Series, Series E. The Hague, pp. 199–256. Martinus Nijhoff Publishers, Leiden (1984).
- [7] Fu, X., Viskanta, R., Gore, J.P., Exp. Thermal Fluid Sci. 17 (4), 285–293 (1998).
- [8] Hugo, J.M., Brun, E., Topin, F., Tadrist, L., J. Porous Med. 16 (1), 41-58 (2013).
- [9] Zhang, H.Y., Huang, X.Y., Int. J. Heat Mass Transfer 43 (18), 3417–3432 (2000).
- [10] Hwang, J.J., Hwang, G.J., Yeh, R.H., Chao, C.H., ASME J. Heat Transf. 124 (1), 120-129 (2002).

Remerciements

Les auteurs expriment leur reconnaissance à l'ANR pour leur soutien financier dans le cadre du projet FOAM et de tous les partenaires du projet pour leur assistance.