

Approche expérimentale des écoulements liquide-gaz à co-courant dans les mousses métalliques.

Jean-Philippe BONNET^{1*}, Frédéric TOPIN, Lounès TADRIST

¹Université Paul Cézanne, Département en Procédés Propres et Environnement (DPPE – UMR 6181), Europôle de l'Arbois, BP. 80, Bâtiment Laennec, Hall C, 13545 Aix en Provence Cedex 04

² Laboratoire IUSTI, UMR CNRS 6595, 5 rue E. Fermi. 13453 Marseille

* (auteur correspondant : jean-philippe.bonnet@ec-marseille.fr)

Résumé - Le manque crucial de données relatives aux écoulements diphasiques dans les matériaux de type mousses métalliques nous amène à réaliser une étude expérimentale des écoulements liquide-gaz à co-courant dans trois échantillons de mousse. En fonction des paramètres de contrôle que sont les débits (liquide et gaz) et la taille de pore, nous présentons nos observables (saturation, pression et gradient de pression).

Nous avons établi la première base de données qui couvre une large gamme de taille de pores, de débit liquide et gaz. Nous avons confronté nos résultats expérimentaux avec ceux prédits par les modèles diphasiques inertiels (type Forchheimer généralisé) et les corrélations empiriques type Lockhart et Martinelli. L'utilisation d'un seul paramètre de contrôle dans les modèles s'avère insuffisante pour traduire finement le comportement de l'écoulement diphasique.

Nous avons montré que ces deux approches sont utilisables en l'état pour effectuer des dimensionnements à des fins industrielles. Cependant, aucun argument ne se dégage objectivement pour privilégier l'une ou l'autre d'entre elles.

Nomenclature

D_p	diamètre de pore, m	X	titre
G	indice gaz	Z	position, m
K	perméabilité, m^2	β	coefficient inertiel, m^{-1}
L	indice <i>liquide</i>	ε	porosité
P	pression, Pa	μ	viscosité dynamique, $kg.m.s^{-1}$
S_L	saturation liquide	Φ	multiplicateur de phase
u	vitesse débitante, $m.s^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg m^{-3}$

1. Introduction

Les propriétés de résistance mécanique liées à la structure même des matériaux de type « mousse solide » associées aux propriétés thermophysiques du métal, font des mousses métalliques un candidat performant pour un grand nombre d'applications industrielles où les écoulements s'effectuent avec d'importants échanges de chaleur et souvent avec changement de phase. L'originalité du matériau réside principalement dans ses propriétés favorables pour assurer simultanément des fonctions très différentes (mélangeur, support de catalyseur, échangeur de chaleur...) avec de haut niveau de performances.

A l'heure actuelle, il n'existe aucun modèle de prédiction des pertes de pression en écoulement liquide-gaz à co-courant spécifique aux mousses métalliques [1]. A ce titre, nous avons spécialement conçu un banc expérimental afin d'étudier l'hydrodynamique et l'impact de la géométrie poreuse sur la structure de ces écoulements en milieux très fortement poreux ($\varepsilon \sim 0.9$).

Cette étude a pour support un nombre conséquent de données, obtenues pour les mêmes échantillons. Il s'agit de propriétés morphologiques (taille et orientation de pores, porosité...)

d'une part [2] et de propriétés en écoulement monophasique (perméabilité et coefficient inertiel) d'autre part [3].

2. Dispositif expérimental

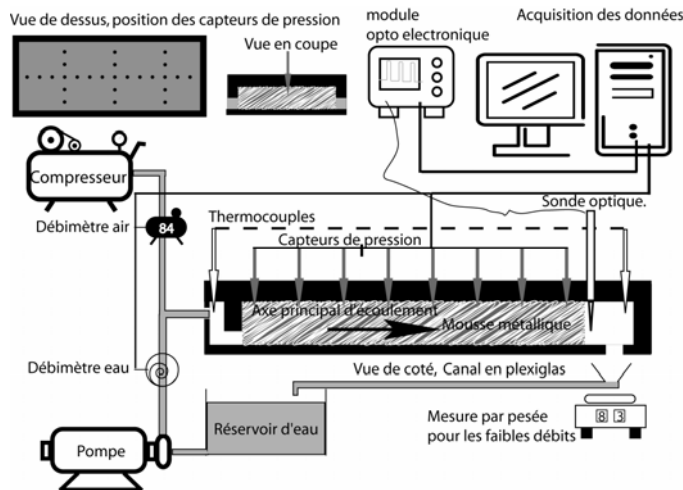


Figure 1 : Dispositif d'étude. Mesure des profils de pression et du taux de vide local.

la partie centrale du canal. Afin de s'affranchir des effets de la gravité, l'écoulement unidimensionnel s'effectue dans le plan horizontal. La faible épaisseur de l'échantillon (5 mm), le court temps de séjour des bulles dans l'échantillon, ainsi que l'effet de mélange induit par la structure de la mousse, permettent de négliger la stratification des phases dans l'écoulement. De plus, plusieurs auteurs [4, 5] ont mis en évidence que dans les cas limites d'écoulements verticaux, où le régime est de type pulsé ou à bulles, le sens de l'écoulement (ascendant ou descendant) n'avait que peu ou pas d'influence sur les pertes de pression. Les conditions d'écoulement stationnaire sont atteintes avant le démarrage de l'acquisition. Le grand nombre de capteurs de pression permet de mesurer le gradient de pression local. Une fréquence d'acquisition adaptée permet de détecter et suivre les poches d'air qui se déplacent. La saturation est mesurée localement, au centre du canal, 2 mm derrière l'échantillon de mousse. Celle-ci est obtenue par intégration du signal binaire instantané délivré par le capteur à fibre optique [6]. La partie sensible de la sonde est constituée d'une pointe saphir conique de 5 μm de diamètre.

Ce travail est basé sur la mesure conjointe de profils de pression associés au titre et à la saturation, pour des écoulements diphasiques adiabatiques établis dans une mousse métallique. L'acquisition des pressions, températures et débits, se fait de manière simultanée. Le gaz et le liquide utilisés sont de l'eau distillée et de l'air. Les fluides sont mélangés en amont du canal grâce à un raccord en « T ». La section d'essais (250 mm de long, 50 mm de largeur et d'épaisseur ajustable) est instrumentée par 12 capteurs de pression placés tous les cm le long de l'axe principal de l'écoulement dans

Echantillon *	D_p (μm)	ε	K (m^2)	β (m^{-1})
NC 4753	400	0.90	2.28E-09	2194
NC 2733	831	0.91	6.19E-09	1130
NC 1116	2452	0.89	2.98E-08	400

Table 1 : Propriétés géométriques et d'écoulement des échantillons de l'étude [7].

3. Résultats

3.1. Profils et gradients de pression

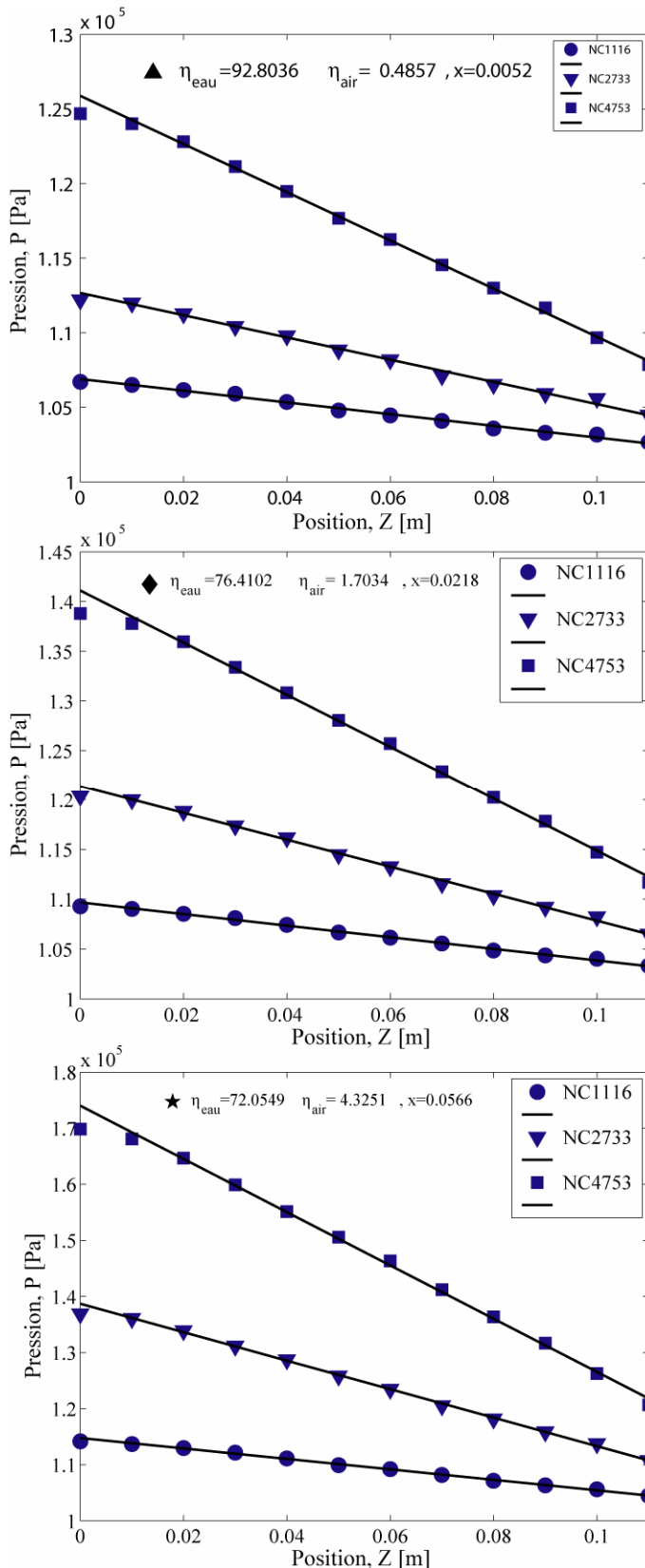


Figure 2 : Variation de la pression en fonction de la position longitudinale dans le canal pour trois mousses. Données expérimentales et modèle linéaire. Débits de fluides en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Nous montrons ici l'impact de la structure de la mousse sur les profils de pression. Pour trois couples de débits (η_L, η_G), nous avons mesuré les pertes de pression générées par trois échantillons de mousses qui sont représentatifs des taille de pores usuelles de ces matériaux. L'acquisition des signaux temporels de pression se fait à 500 Hz. La cohabitation des deux phases liquide et gaz dans l'écoulement engendre des fluctuations de pression de fortes amplitudes. Ici, seules les moyennes temporelles sont étudiées. Les profils de pression sont reportés sur la figure 2.

Chaque symbole correspond à un échantillon de mousse. Le point d'abscisse $Z = 0$ est situé à l'intérieur de l'échantillon de mousse, à une distance supérieure à 3 cm du début de l'échantillon).

Comme cela était attendu, les résultats expérimentaux mettent en évidence que pour un couple donné de valeurs de débits, les pertes de pressions sont d'autant plus fortes que la taille des pores est faible. Les écarts obtenus entre les points expérimentaux et un modèle de perte de pression linéaire en fonction de la position sont faibles. Pour les conditions d'écoulement diphasique testées, les effets liés à la présence d'une phase compressible n'apparaissent pas sur l'allure des profils de pression. Par ailleurs, ce constat nous permet de justifier par la suite l'hypothèse de saturation constante le long de l'axe de l'écoulement. Ainsi, les gradients de pression présentés correspondent à la pente du profil de pression linéaire qui minimise les écarts avec l'expérience.

3.2. Modèles

Nous proposons de tester ici deux modèles de pertes de pression en écoulement liquide gaz à co-courant.

L'approche proposée par Lockhart et Martinelli [8] pour l'étude des écoulements liquide-gaz à co-courant en conduite horizontale qui a été rapidement étendue au cas des écoulements en milieux poreux.

$$\Phi_L^2 = \frac{(dP/dZ)_{u_L, u_G}}{(dP/dZ)_{u_L}}; \quad \chi^2 = \frac{\Phi_G^2}{\Phi_L^2} = \frac{(dP/dZ)_{L, u_L}}{(dP/dZ)_{G, u_G}} \quad (1)$$

$(dP/dz)_{u_L, u_G}$ est la perte de pression mesurée en écoulement diphasique. $(dP/dz)_{u_L}$ est la perte de pression par unité de longueur que l'on mesurerait si le liquide s'écoulait seul (indice u_L) avec la même vitesse débitante qu'en écoulement diphasique. La fonction Φ_L est appelée multiplicateur de phase liquide. Ses valeurs sont reportées en fonction du paramètre de Martinelli χ^2 . Celui-ci est défini comme le rapport des deux multiplicateurs de phase, gaz et liquide. En première approximation, les corrélations établies en milieux poreux [9-11] associent à chaque valeur de paramètre de Martinelli une valeur unique du multiplicateur de phase.

Fourar et Lenormand [12] proposent un modèle original de description des écoulements à forts débits en milieux poreux et en fractures isolées. Ce modèle est basé sur la généralisation de la loi de Forchheimer associé à une formulation couplée de la perméabilité et du coefficient inertiel relatif :

$$-\left. \frac{dP}{dZ} \right|_{u_L, u_G} = \frac{\mu_L}{K} (F_L u_L) + \beta \rho_L (F_L u_L)^2 \quad (2)$$

Les auteurs proposent d'introduire une seule et unique fonction F dans chacun des deux termes. C'est au travers de cette fonction F que l'écoulement d'un fluide en présence d'un autre est caractérisé. En première approximation, et sans qu'il n'y ai de justification physique précise à cela, l'approche repose sur l'hypothèse que les valeurs de F_L ne dépendent que de la saturation S_L .

Les valeurs expérimentales du multiplicateur de phase Φ_L en fonction du paramètre de Martinelli obtenues pour l'échantillon NC4753 sont reportées sur la figure 3 et celles de F_L en fonction de S_L obtenues pour l'échantillon NC2733 sur la figure 4. Pour les deux approches, bien que les données se répartissent selon une tendance nette, (Φ_L (resp. F_L) décroît avec χ (resp. S_L)), il apparaît que les variations de Φ_L à χ constant (resp. F_L à S_L constant) ne correspondent pas à de la dispersion expérimentale mais à un impact de la nature du régime d'écoulement.

Pour des valeurs de paramètres de Martinelli χ constantes, comprises entre 3 et 10, nous pouvons observer que les variations de Φ_L atteignent plus de 25%. A χ constant, les valeurs du multiplicateur de phase Φ_L augmentent systématiquement avec la valeur du titre (figure 3b). A ce niveau de l'étude, le nombre de données que nous possédons est insuffisant pour permettre de quantifier de manière précise cette dépendance.

Le constat est le même pour l'approche de Fourar et Lenormand. L'utilisation d'un seul paramètre de contrôle dans les modèles s'avère insuffisante pour traduire finement le comportement de l'écoulement diphasique.

En revanche, l'utilisation de ces corrélations pour prédire l'ordre de grandeur de la perte de pression diphasique à des fins de dimensionnement est satisfaisante. En effet, les corrélations établies par Midoux et Rao dans des milieux poreux de type lit de billes, permettent de prédire raisonnablement, et ce indifféremment de la taille de pore, les pertes de pression dans les mousses (écart type modèle / expérience inférieur à 25%). De même, la corrélation de Martinelli donne des résultats comparables pour $c=10$ sans qu'il y ait de justification au choix de cette constante. L'utilisation de l'approche « fonction F » permet également une prédiction satisfaisante des gradients de pression.

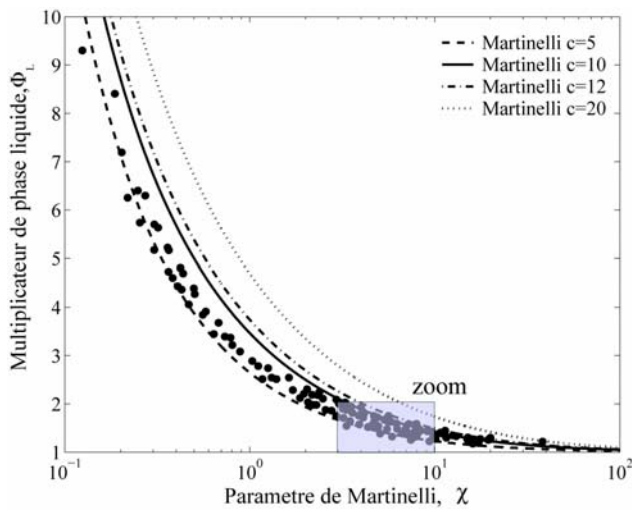


Figure 3a : Multiplicateur de phase en fonction du paramètre de Martinelli. Comparaison avec les corrélations établies en tube. NC4753.

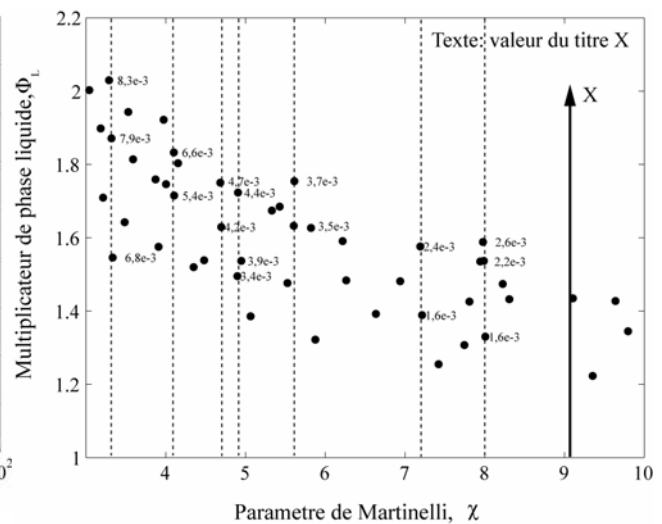


Figure 3b : Détail de la figure précédente. Mise en évidence de l'impact de la valeur du titre sur les valeurs de Φ_L

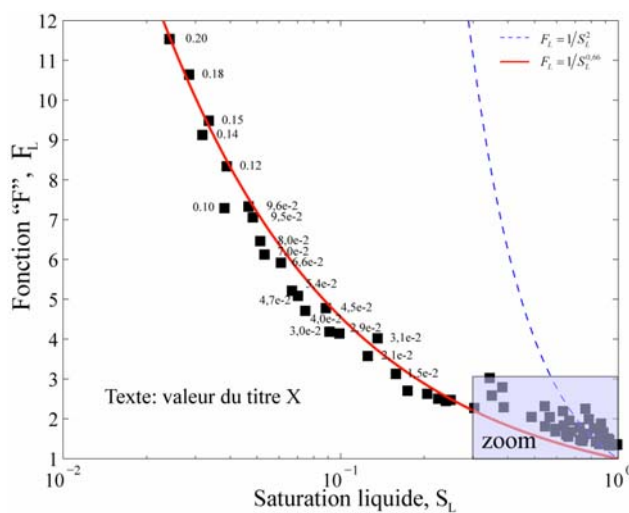


Figure 4a : Variations de la fonction F_L en fonction de la saturation en liquide. Le modèle proposé pour des écoulements en fracture ne permet pas de décrire les variations de la fonction pour les mousses solides. NC2733.

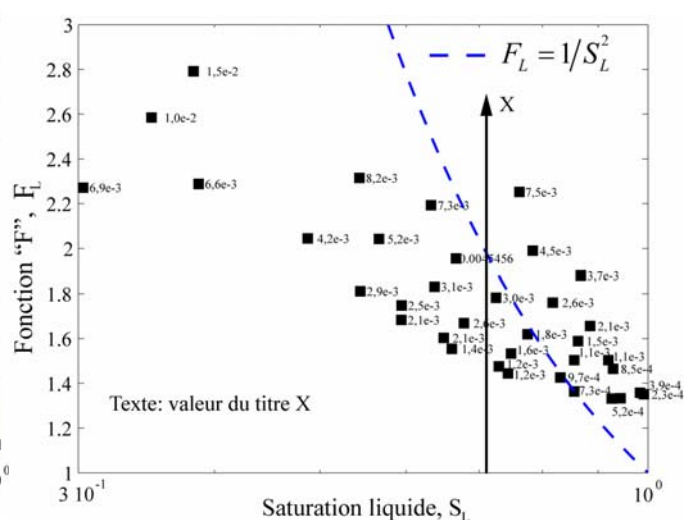


Figure 4b : Détail de la figure précédente pour les plus fortes valeurs de saturation. Mise en évidence de l'impact de la valeur du titre sur les valeurs de F_L

4. Conclusions

Nous avons confronté nos résultats expérimentaux avec ceux prédits par les modèles diphasiques inertiels (type Forchheimer généralisé) et les corrélations empiriques type Lockhart et Martinelli. Trois échantillons aux tailles de pores très différentes ont servi de base à cette comparaison. Tous les modèles ont été testés avec les mêmes jeux de données (170

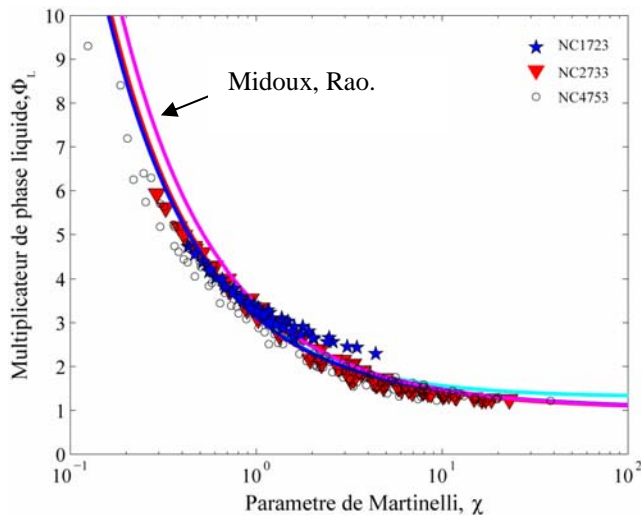


Figure 5 : Superposition des résultats obtenus pour trois échantillons de mousse. Le caractère non bijectif de la fonction empêche de conclure sur un éventuel impact de la structure poreuse sur les valeurs du multiplicateur de phase liquide.

valeurs de débits, titres, saturations et gradients de pression).

D'une manière globale, quel que soit le modèle utilisé, la superposition des résultats montre que le comportement d'ensemble est sensiblement le même d'un échantillon à l'autre. L'utilisation d'un seul paramètre de contrôle dans les modèles s'avère insuffisante pour traduire finement le comportement de l'écoulement diphasique. En revanche, ces corrélations sont adaptées et utilisables en l'état pour effectuer du dimensionnement (écart inférieur à 25 % en terme de gradient de pression).

Références

1. Stemmet, C.P., et al., *Hydrodynamics of gas-liquid counter-current flow in solid foam packings*. Chemical Engineering Science, 2005. **60**: p. 6422 - 6429.
2. Vicente, J., F. Topin, and J.-V. Daurelle, *Open celled material structural properties measurement: from morphology to transport properties*. Material transaction, 2006. **47**(9): p. 2195-2202.
3. Topin, F., et al., *Experimental analysis of multiphase flow in metallic foam: convective boiling, flow laws and heat transfer*. Advanced material Engineering, 2006. **8**(9): p. 890-899.
4. Ellman, M.J., *Caractéristiques des réacteurs triphasés à lit fixe fonctionnant à cocourant vers le bas*, in *Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, Nancy*. 1988: France.
5. Yang, X., Wild, G. et Euzen, J.P., *A Comparison of the Hydrodynamics of Packed Bed Reactors with Cocurrent Upflow and Downflow of Gas and Liquid*. Chem. Eng. Sci., 1992. **47**: p. 1323-1325.
6. Bonnet, J.P., *Phénomènes de transport dans les mousses métalliques : approche expérimentale des écoulements monophasiques et liquide-gaz*, in *IUSTI*. 2007, université de Provence: France.
7. Bonnet, J.P., F. Topin, and L. Tadrist, *Flow laws in metal foams: compressibility and pore size effects*. Transport in porous media, 2007(DOI 10.1007/s11242-007-9169-5).
8. Lockhart, R.W. and R.C. Martinelli, *Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in Pipes*. Chem. Eng. Progr., 1949. **45**: p. 39-48.
9. Midoux, N., M. Favier, and J.C. Charpentier, *Flow pattern, pressure loss and liquid holdup data in gas-liquid downflow packed beds with foaming and nonfoaming hydrocarbons*. J. Chem. Eng. Japan, 1976. **9**(5): p. 350-356.
10. Rao, V.G., M.S. Ananth, and Y.B.G. Varma, *Hydrodynamics of two-phase cocurrent downflow through packed beds*. AIChE Journal, 1983. **29**(3): p. 467-483.
11. Sato, Y., et al., *Pressure Loss and Liquid Holdup in Packed Bed Reactor with Cocurrent Gas-Liquid Downflow*. J. Chem. Eng. Japan, 1973. **6**(147).
12. Fourar, M. and R. Lenormand, *A new model for two-phase flows at high velocities through porous media and fractures*. Journal of Petroleum Science and Engineering 2001. **30**: p. 121-127.