

# Écoulement diphasique adiabatique dans les mousses métalliques

Jean-Philippe BONNET\*, Frédéric TOPIN, Lounès TADRIST

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

\*(auteur correspondant : [Jean-Philippe.Bonnet@polytech.univ-mrs.fr](mailto:Jean-Philippe.Bonnet@polytech.univ-mrs.fr))

**Résumé** - Nous étudions l'impact de la structure des mousses métalliques sur les propriétés d'écoulement diphasique. Cinq échantillons de mousses sont étudiés ; la taille de pore varie entre 500 et 5000  $\mu\text{m}$ . Pression, titre, taux de vide sont mesurés simultanément pour des écoulements co-courant d'eau et d'air à travers la structure solide de la mousse. La conception du dispositif expérimental permet l'étude spatiale et temporelle des signaux de pression. Des régimes à bulles, des régimes pulsés, et des brouillards sont observés.

## Nomenclature

$D_p$	diamètre de pore, $m$	$\alpha$	taux de vide
$K$	perméabilité, $m^2$	$\beta$	coefficient inertiel, $m^{-1}$
$P$	pression, $Pa$	$\varepsilon$	porosité
$PPI$	<i>Pore Per linear Inch</i>	$\mu$	viscosité dynamique, $kg.m.s^{-1}$
$V$	volume, $m^3$	$\Phi^2$	multiplicateur diphasique
$X$	titre	$\eta$	densité de flux massique, $kg m^{-2} s^{-1}$
$z$	position, $m$	$\rho$	masse volumique, $kg m^{-3}$

## 1 Introduction

Nous étudions les écoulements diphasiques liquide/gaz co-courant au travers d'une structure poreuse type mousse métallique à pores ouverts. Les propriétés morphologiques de ce matériau, associées aux propriétés thermophysiques du métal, font de cette structure s'effectuer avec d'importants échanges de chaleur, et souvent avec changement de phase (bouilleur, réacteur catalytique gaz-liquide-solide, échangeur...). La surface de contact « fluide / solide » relativement élevée permet d'éviter les limitations de transfert de masse et de chaleur dans des conditions de réaction. A l'inverse de lits de billes, la structure ouverte de la mousse, associée à une forte porosité, autorise de faibles pertes de charges en écoulement [1].

Il existe un grand nombre d'études concernant les structures d'écoulements diphasiques dans les milieux poreux (lits de billes, empilements de fibres...[2-4]). Cependant, de nombreuses interrogations restent ouvertes concernant la compréhension des mécanismes gouvernant les conditions d'écoulements diphasiques. Les corrélations permettant la prédiction des lois d'écoulements diphasiques ne sont valables que pour les conditions expérimentales où elles ont été établies (fort impact de la géométrie poreuse, sensibilité à la configuration testée). A notre connaissance, il n'existe que deux études concernant les écoulements gaz liquide dans les mousses métalliques. [5] étudient les écoulements eau-air dans des mousses (5-40PPI) dans le cas particulier où les fluides s'écoulent à contre courant. [6] proposent une étude originale d'écoulement avec changement de phase « liquide /vapeur » au travers d'un échantillon en cuivre (40PPI,  $D_p=200\mu\text{m}$ ). La conclusion de cette étude montre que seule une approche physique des phénomènes hydrodynamiques de base doit être en mesure d'améliorer la connaissance des ces écoulements. Dans ce but, [7] effectuent une

étude approfondie des lois d'écoulement monophasique dans les mousses métalliques et proposent une corrélation entre les paramètres d'écoulements monophasiques et les paramètres géométriques caractéristiques de la mousse. Ils montrent que la taille des pores gouverne les propriétés d'écoulements monophasiques au travers des mousses métalliques.

Nous réalisons une étude expérimentale de la dynamique des écoulements diphasiques dans les mousses métalliques. Afin de nous affranchir de l'impact du changement de phase sur les structures écoulements, nous utilisons un mélange d'eau et d'air.

## 2 Dispositif expérimental

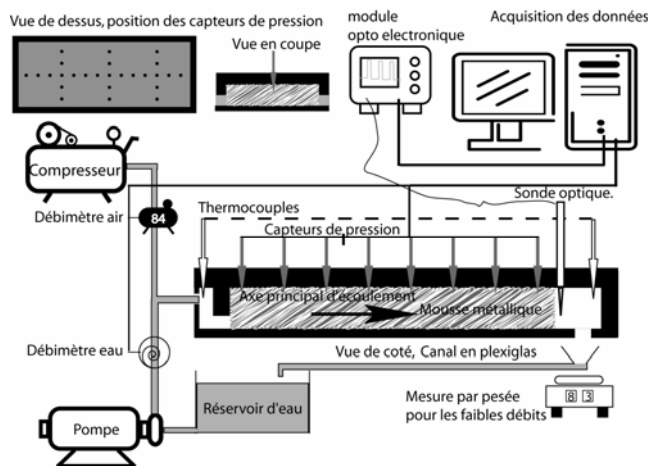


Figure 1 : Dispositif d'étude. Mesure des profils de pression et du taux de vide local.

central 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 ( $5 \cdot 10^{-3}$  m), 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 [8, 9] ont mis en évidence que dans les cas limites d'écoulements verticaux, où le régime est de type pulsé ou à bulle, le sens de l'écoulement (ascendant ou descendant) n'avait que peu ou pas d'influence sur les pertes de pression.

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. Le taux de vide est mesuré localement, au centre du canal, 2 mm derrière l'échantillon de mousse. La sonde est une fibre optique où la partie sensible est constituée d'une pointe saphir conique de  $5 \mu\text{m}$  de diamètre. Après traitement, la réponse du capteur est un signal carré TTL à deux niveaux. [10].

## 3 Signaux de pression

L'acquisition des signaux de pression s'effectue à 500Hz, lorsque le régime d'écoulement est établi. Sur les figures 2 et 3 sont reportées respectivement les fluctuations de pression types pour les écoulements diphasiques, et les écoulements monophasiques eau, en trois points du canal. Notons que les niveaux de pression sont identiques. Dans le cas monophasique, l'amplitude des signaux de pression, rapportée au niveau de pression du point de mesure,

Ce travail est basé sur la mesure conjointe de profils de pressions associés au taux de vide et au titre, 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 la partie

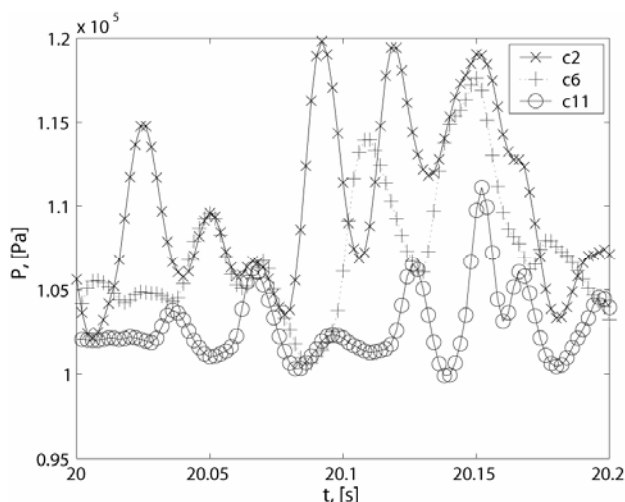


Figure 2 : Signaux de pression temporels mesurés en trois positions du canal. Ecoulement diphasique.  $\eta_{eau}=92 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ;  $\eta_{air}=2 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

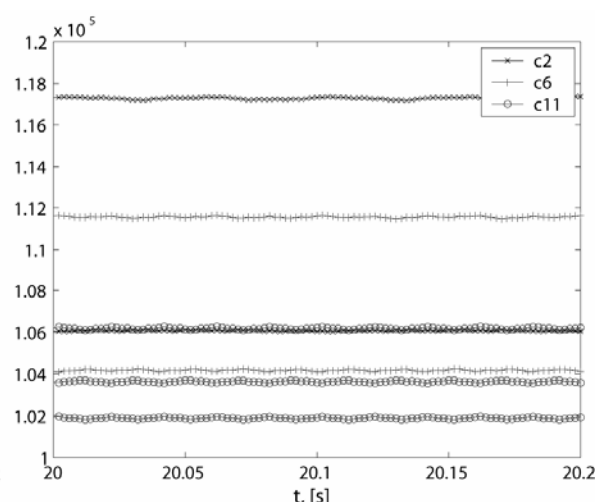


Figure 3 : Signaux de pression temporels mesurés en trois positions du canal. Ecoulement monophasique en eau pour trois débits.

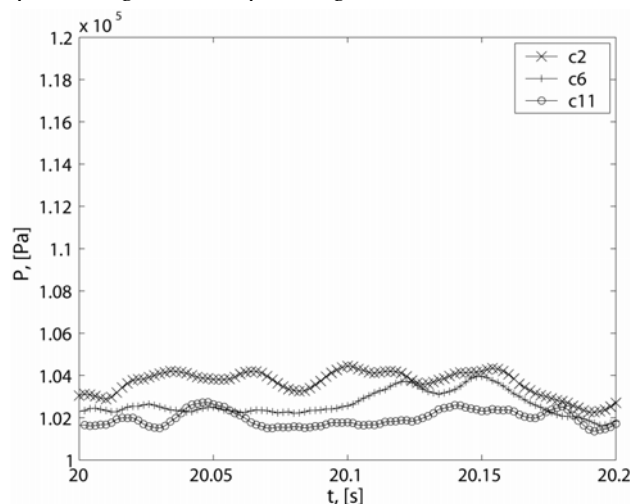


Figure 4 : Signaux de pression temporels mesurés en trois positions du canal. Ecoulement  $\eta_{eau}=108 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ;  $\eta_{air}=0.2 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

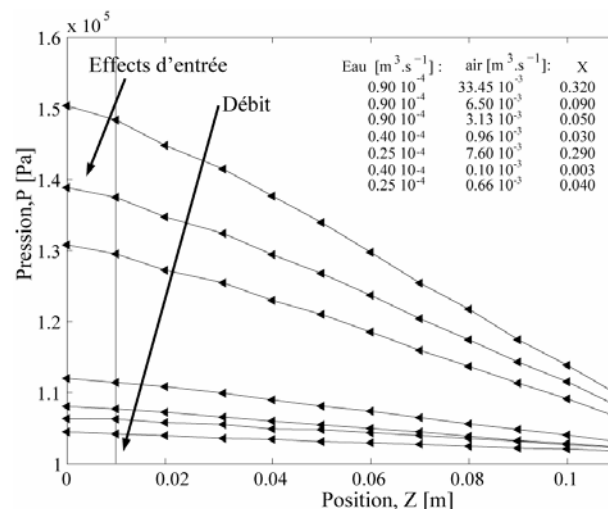


Figure 5 : Profils de pression moyens pour différents rapports de débits. NC1723.  $D_p=1840\mu\text{m}$

n'excède jamais 0.5% i.e.  $\|\tilde{P}(z)\|/\bar{P}(z) \ll 0.5\%$  quel que soit le débit. Clairement, la cohabitation des deux phases dans l'écoulement engendre des fluctuations de pression de fortes amplitudes. Qualitativement, nous observons que l'amplitude des fluctuations de pression est maximale là où le niveau de pression est le plus élevé : en entrée du canal.

L'étude systématique de ces signaux de pressions pour différentes valeurs de rapports de débits, montre que l'amplitude et l'écart type des fluctuations de pression sont directement reliés aux structures de l'écoulement[11]. Les faibles valeurs étant attribuées aux régimes de faibles interactions entre phases (petites poches de gaz dans le liquide) et les fortes valeurs aux régimes de grandes interactions entre phases (plug...). Une analyse fréquentielle de ces signaux doit conduire à l'identification des zones de transition de régime pour l'ensemble des conditions expérimentales testées.

Les profils de pression obtenus par moyenne temporelle des signaux de pression sur soixante secondes sont reportés pour différentes valeurs de rapports de débits sur la figure 5. Pour les régimes d'écoulements ne présentant pas de « plug » constitués d'une seule phase, les profils de pressions peuvent être raisonnablement décrits par un modèle linéaire. Cela

signifie que l'écoulement peut être décrit par l'écoulement d'un fluide homogène incompressible.

La pente du profil de pression est d'autant plus importante que le débit massique total est élevé. Une carte des gradients de pression diphasique pour l'échantillon 1723 est donnée pour des titres variant entre  $10^{-3}$  et  $10^{-1}$ . L'observation visuelle de la veine d'essais met en évidence le passage d'écoulements majoritairement liquides dans lesquels se trouvent, plus ou moins dispersées, de petites poches de gaz jusqu'à des régimes de type brouillard à très fort taux de vide. A chaque couple  $(\eta_{eau}, \eta_{air})$  correspond un seul régime d'écoulement. En revanche, à titre fixé, plusieurs régimes sont observables suivant les débits. Le gradient de pression correspondant est fixé par la structure de l'écoulement.

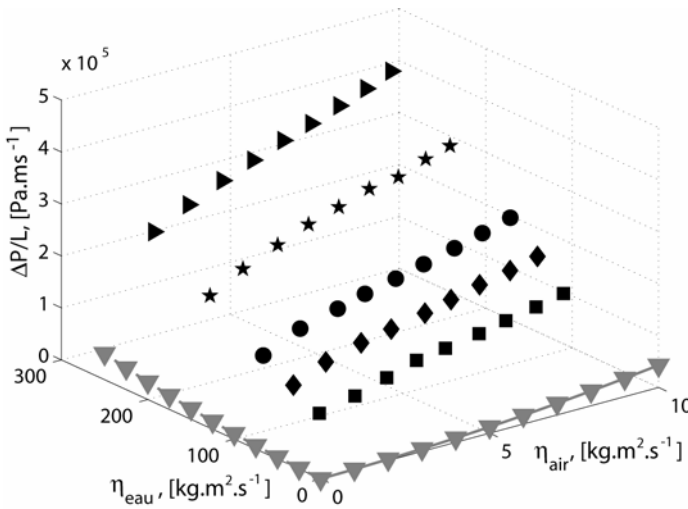


Figure 6 : Carte des gradients de pression pour différents rapports de débits. 1 symbole par débit d'eau fixé. NC1723.

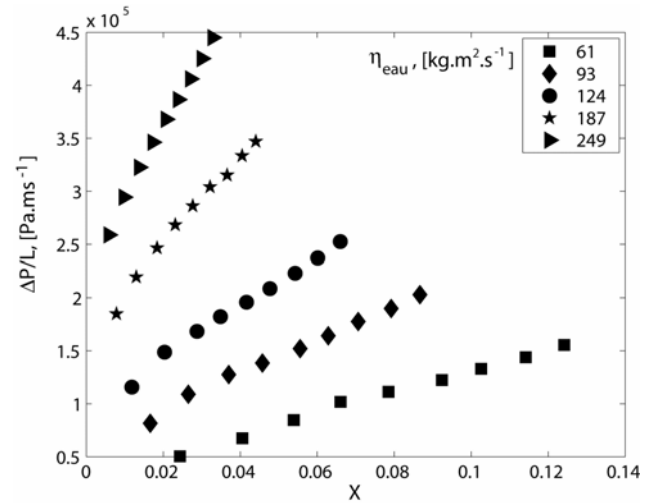


Figure 7 : gradients de pression en fonction du titre impact du régime d'écoulement sur les pertes de pression. NC1723.

#### 4 Taux de vide

L'intégration dans le temps du signal TTL fourni par le module optoélectronique permet d'accéder à la valeur moyenne du taux de vide local. La suite du traitement est basée sur l'hypothèse que la valeur du taux de vide est constante le long de l'axe principal de l'écoulement. Sur la figure 8 sont reportées, pour l'échantillon NC1723, les valeurs expérimentales du taux de vide en fonction du titre. Les courbes continues donnent en fonction du titre (X) la valeur du taux de vide ( $\alpha$ ) selon [12], pour des rapports de vitesses entre phases compris entre 0.1 et 10. Les points correspondent aux mesures.

$$\frac{V_G}{V_L} = \frac{X}{1-X} \frac{\rho_L}{\rho_G} \frac{1-\alpha}{\alpha} \quad (1)$$

$$X = \frac{\eta_{air}}{\eta_{air} + \eta_{eau}} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{V_{air}}{V_{air} + V_{eau}} \quad (2)$$

La vitesse de glissement  $V_{glis} = V_G - V_L$  est une caractéristique du régime d'écoulement. Pour l'ensemble des couples de débits  $(\eta_{eau}, \eta_{air})$  étudiés, la vitesse de déplacement du gaz est toujours au moins égale (vitesse de glissement nulle) ou supérieure à celle du liquide ; cela signifie que nous sommes dans des configurations d'écoulement où la structure solide a

tendance à retenir davantage la phase liquide que la phase gazeuse. Le couplage des cartes de pression diphasique, des fluctuations de pression temporelles, associé aux valeurs de vitesse de glissement doit conduire à identifier les frontières de transition entre régimes d'écoulements caractéristiques.

## 5 Multiplicateur diphasique

Les corrélations de type « Lockhart- Martinelli » proposent de reporter en fonction du titre la perte de pression d'un écoulement diphasique « gaz-liquide » moyennant l'hypothèse suivante : pour toutes les configurations d'écoulement, les variations de pression de la phase liquide sont égales aux variations de pression de la phase gazeuse. La formulation proposée est la suivante :

$$\Phi^2 = \frac{(dP/dz)_{LG}}{(dP/dz)_L} \quad (3)$$

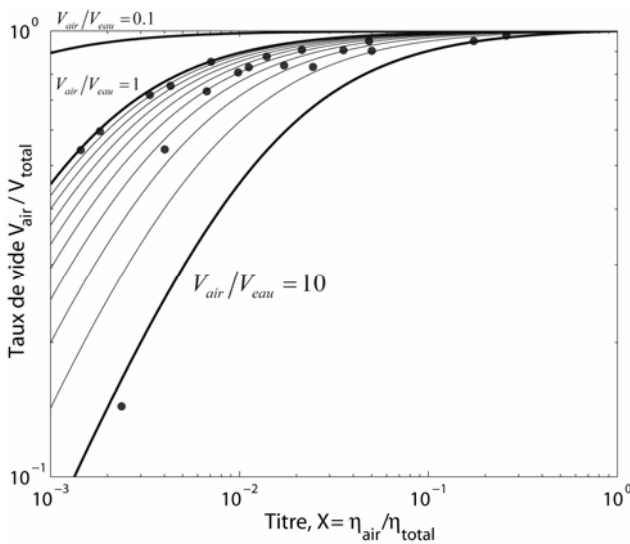


Figure 8 : Variation du taux de vide en fonction du titre. Trait continu: modèle (1). NC1723.

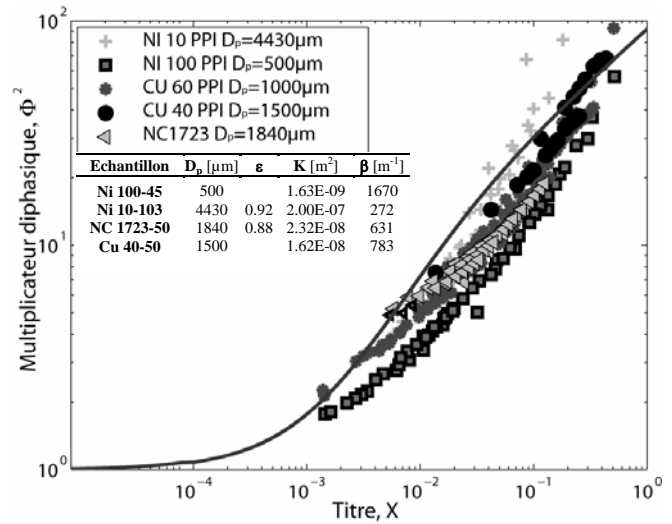


Figure 9 : Multiplicateur diphasique unique en fonction du titre pour chaque échantillon.

Elle décrit la perte de pression diphasique  $(dP/dz)_{LG}$  en fonction de la perte de pression monophasique liquide  $(dP/dz)_L$ , si celui-ci s'écoulait seul, avec le même débit massique, à travers la même structure poreuse. Les lois de perte de pression monophasique pour chacun des échantillons étudiés sont connues grâce à de précédentes études [7]. Nous avons montré que les lois d'écoulement dans ces milieux sont de type Forchheimer, où les paramètres (perméabilité et coefficient inertiel) sont directement reliés à la taille des pores.

Cinq multiplicateurs diphasiques expérimentaux, correspondant à cinq échantillons dont la taille de pore varie entre 5000 μm (10 PPI) et 500μm (100 PPI) sont reportés sur la figure 9. Pour chaque échantillon, les valeurs de  $\Phi^2$  en fonction du titre décrivent une courbe unique. L'allure décrite par chacune d'entre elle est identique pour tous les échantillons. De plus, pour une valeur de titre donnée, les valeurs sont assez similaires. La texture de la mousse n'a donc que peu d'impact sur les écarts entre les pertes de pression diphasique et monophasique. Remarquons que la valeur de  $\Phi^2$  pour un titre unitaire n'est fonction que du débit massique total  $\eta$ :

$$\Phi^2 \Big|_{x=1} = \frac{(dP/dz)_G}{(dP/dz)_L} = \frac{2 \left( \frac{\mu_G}{K} \eta + \beta \eta^2 \right)}{\left( \frac{\mu_L}{K} \eta + \beta \eta^2 \right)} \quad (4)$$

Dans le cas des échantillons que nous avons testés, la porosité ne varie que très peu, ce qui explique probablement que les valeurs de  $\Phi^2$  se rassemblent sur une courbe presque unique pour l'ensemble des échantillons. Les faibles écarts peuvent être associés aux variations de la surface spécifique avec la taille de pore. Par conséquent, la rétention de liquide par la surface de la mousse est plus importante pour les faibles tailles de pores et la section utile de passage offerte au gaz a tendance à diminuer.

## 6 Conclusion

Nous disposons d'un dispositif expérimental et d'une procédure de traitement des données adaptés à l'étude des écoulements diphasiques en milieux poreux. Une analyse statistique et fréquentielle des signaux de pression haute fréquence est en cours afin d'identifier et de cartographier les zones de transition de régime. Nous avons montré que pour les régimes d'écoulements étudiés, l'impact de la taille de pore sur le rapport entre les pertes de charge monophasique et diphasique est négligeable. Le dispositif expérimental sera complété par une campagne d'observation en caméra rapide des structures d'écoulement.

## Références

1. Bonnet, J.P., F. Topin, and L. Tadrist. *Etude expérimentale des propriétés de transport des mousses métalliques : influence de la morphologie*. in SFT'06. 2006. Ile de Ré.
2. Attou A., B.C., *Revue des aspects hydrodynamiques des réacteurs catalytiques gaz-liquide-solide à lit fixe arrosé*. Revue de l'IFP, 1999. **54** (1): p. 29-66.
3. Carbonel, R.G., *Multiphase Flow Models in Packed Beds*. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP 2000. **55**(4): p. 417-425.
4. Jamialahmadi, M., H. Muller-Steinhagen, and M.R. Izadpanah, *Pressure drop, gas hold-up and heat transfer during single and two-phase flow through porous media*. International Journal of Heat and Fluid Flow 2005. **26**: p. 156-172.
5. Stemmet, C.P., et al., *Hydrodynamics of gas-liquid counter-current flow in solid foam packings*. Chemical Engineering Science, 2005. **60**: p. 6422 - 6429.
6. Madani, B., et al., *Flow laws in metallic foams: experimental determination of inertial and viscous contribution*. Journal of porous media, 2006. **10**(1).
7. 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.
8. Ellman, M.J. and . *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.
9. 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.
10. DESRATS, C., *Etude expérimentale de l'ébullition d'hydrocarbures dans les échangeurs à plaques et ailettes. Analyse des écoulements et des transferts de chaleur par une approche locale*, in *Commissariat à l'Energie Atomique de Grenoble, Groupement pour la Recherche sur les Echangeurs Thermiques (CEA - GRETh)*. 2006: France.
11. Bonnet, J.P., F. Topin, and L. Tadrist. *Experimental analysis of fluid flow and heat transfer in metallic foams* in ICAPM2006, *3rd International Conference on Applications of Porous Media*. 2006. Marakkesh.
12. Wallis, G., *One-Dimensional Two-Phase Flow* 1969, New-York, NY: Mc graw Hill.