

# Transfert de chaleur dans un canal poreux parcouru par un écoulement gravitaire d'huile : Mesure du coefficient d'échange pariétal.

Jean-Michel HUGO<sup>1\*</sup>, Frédéric TOPIN<sup>1</sup>, Laurent GUERBE<sup>2</sup>, Thierry ETCHEBARNE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire IUSTI CNRS UMR 6695, Technopole de Château-Gombert,  
5, rue Enrico FERMI, 13453 MARSEILLE Cedex 13

<sup>2</sup>Groupe SOGEFI, 1, rue Charles TELLIER, 14500 VIRE

\* (auteur correspondant : [Jean-Michel.HUGO@Polytech.univ-mrs.fr](mailto:Jean-Michel.HUGO@Polytech.univ-mrs.fr))

**Résumé** - Nous présentons un dispositif expérimental basé sur la mesure conjointe des flux et températures de parois d'un canal poreux, soumis à un écoulement d'huile, permettant de quantifier un coefficient d'échange de chaleur. L'écoulement s'effectue verticalement sous l'effet de la gravité au travers de mousse métallique. Les paramètres de contrôle du dispositif sont le débit et la température de l'huile en entrée du canal ainsi que les densités de flux de chaleur imposés en parois du canal. Les résultats obtenus montrent l'importance de la saturation de la mousse métallique en huile. Nous montrons que le coefficient d'échange varie de manière non régulière avec le débit. Une valeur maximale similaire est atteinte pour toutes les mousses testées.

## Nomenclature

$Q$	densité de flux de chaleur, $W/m^2$	<i>Symboles grec</i>	
$L$	largeur de mousse, $m$	$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
$S_p$	surface spécifique	$\varepsilon$	porosité
$S$	surface d'échange, $m^2$	$\eta$	densité de débit massique, $kg.m^{-2}s^{-1}$
$H$	hauteur de mousse, $m$	<i>Indices et exposants</i>	
$D_p$	diamètre de pore	$h$	huile
$T$	température, $K$	$p$	paroi

## 1. Introduction

Les mousses métalliques présentent des propriétés intéressantes pour la réalisation d'échangeurs performants ; celles-ci permettent une forte augmentation des performances thermiques sans accroître notablement les pertes de charge. De plus, ces structures cellulaires tridimensionnelles possèdent des propriétés mécaniques intéressantes, des surfaces spécifiques relativement importantes, ainsi qu'une conductivité thermique effective assez élevée du fait de la texture de la matrice solide. Ceci peut permettre de réaliser des échangeurs de grande compacité et simultanément réduire les coûts de fabrication.

A l'heure actuelle de nombreux travaux ont été réalisés concernant l'amélioration des procédés de fabrication ainsi que de leurs propriétés mécaniques [1]. Les travaux concernant la caractérisation thermique et hydraulique sont de plus en plus nombreux, mais restent encore limités. Cependant plusieurs études expérimentales ont montré que l'adjonction d'une mousse dans un canal où circule un fluide en convection forcée augmente de manière significative les transferts de chaleur à la paroi [2-7].

Nous réalisons une étude expérimentale des écoulements gravitaires d'huile et des transferts de chaleur dans un canal poreux constitué d'une mousse d'aluminium. Nous déterminons la loi d'évolution du coefficient d'échange pariétal en fonction de la densité de débit massique d'huile qui traverse le canal. Nous comparons les coefficients obtenus, ainsi

que les densités de débits massiques maximaux, pour différentes mousses. Nous montrons un comportement non régulier de ce coefficient en fonction du débit. La deuxième partie de ce travail concerne les essais d'interprétation de ce phénomène au travers d'analyses plus locales des flux de chaleur échangés.

## 2. Dispositif expérimental

### 2.1. Présentation du dispositif expérimental

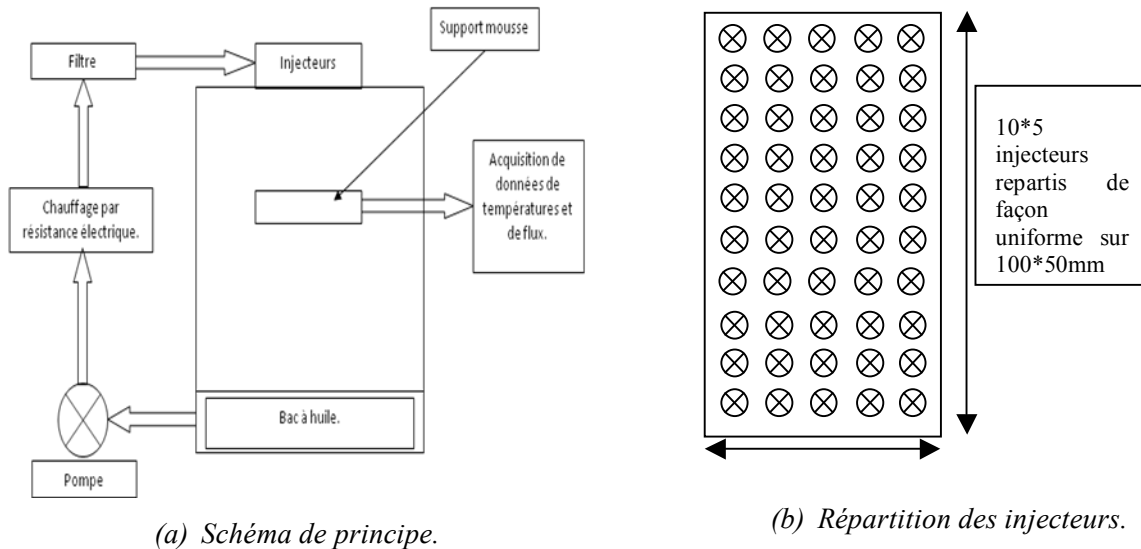


Figure 1 : Schéma d'ensemble du dispositif expérimental. Boucle fluide.

Le banc d'étude (figure 1a) se décompose en trois parties : La boucle fluide, le canal poreux avec son enceinte, ainsi que l'ensemble des capteurs et de la chaîne d'acquisition. Les paramètres de contrôle sont la puissance de chauffe des parois du canal ainsi que le débit d'huile. Les paramètres mesurés sont la densité de flux de chaleur traversant la paroi vers la mousse et les températures moyennes de parois et de l'huile. La boucle fluide est alimentée par une pompe volumétrique à engrenages entraînée par un moteur électrique et contrôlée par un variateur de fréquence pour assurer un débit d'huile constant. La pompe a été étalonnée par pesée chronométrée. La plage de densité de débits massiques étudiée est 0-20 kg/m<sup>2</sup>s. Un système de buses d'injection d'huile (figure 1b) permet d'obtenir un ensemble de jets répartis de façon homogène et identique à la surface de la mousse quel que soit le débit. Un thermoplongeur inséré sur la boucle fluide en amont des injecteurs permet le contrôle de la température d'huile.

La veine d'essai (figure 2) est contenue dans une enceinte isolante, posée sur un bac en acier permettant de récolter l'huile après son passage dans le canal poreux. Celui-ci est maintenu par un bras supporté par un pied extérieur. Un système d'ouverture par lamelles escamotables permet de faire passer le bras de levier à l'intérieur de la veine et de régler la hauteur du canal, et donc la hauteur de chute de l'huile. Cette ouverture permet également de faire passer les instruments de mesures.

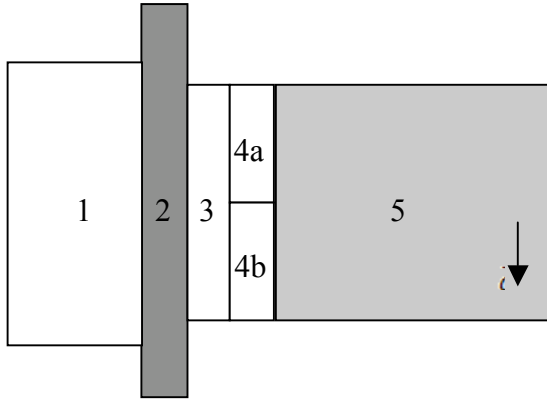


Figure 2 : Canal poreux et support mousse, vue éclatée : 1- Isolant thermique, 2- Parois du canal en PVC 3- résistance chauffante, 4- Fluxmètres haut (4a) et bas (4b) avec thermocouple de type T intégrés, 5- Mousse métallique.

Le canal poreux est constitué de deux parois en PVC entre lesquelles, la mousse d'aluminium est maintenue par serrage. Nous avons testé des mousses ERG 10, 20 et 40 PPI de dimensions  $10 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ . Entre la mousse et la paroi du canal viennent se positionner des résistances chauffantes planes et des fluxmètres avec thermocouples de type T intégrés (figure 2). Les résistances chauffantes ( $10 \times 5 \text{ cm}^2$ ) permettent d'imposer une densité de flux de chaleur uniforme sur les parois du canal. Celui-ci est mesuré par les fluxmètres (un de  $2.5 \times 10 \text{ cm}^2$  et quatre de  $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ ) positionnés entre la mousse et les résistances. Ils sont arrangés de façon à mesurer la répartition des flux sur la longueur ou sur la hauteur de la mousse. La gamme de flux imposé varie entre 0 et  $2.5 \text{ W/cm}^2$ . Les pertes thermiques sont négligeables grâce à l'isolation.

## 2.2. Modèle utilisé

Il existe plusieurs études concernant les transferts de chaleur dans les mousses métalliques en convection forcée. Celles-ci montrent une augmentation des échanges globalement proportionnels à la surface spécifique. En revanche, nous n'avons aucun travail concernant les écoulements gravitaire. Les nombres de Nusselt pariétaux sont usuellement exprimés sous la forme [7-10] :

$$Nu = C \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^n = \frac{h \cdot D_p}{\lambda_h} \quad (1)$$

La viscosité de l'huile variant fortement avec la température de l'huile, nous ne reportons pas, ici, les coefficients d'échange en fonction du nombre de Reynolds, mais en fonction du densité de débit massique d'huile. Cependant, la température de l'huile est stabilisée aux alentours de  $36^\circ\text{C}$  ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ) sur l'ensemble des expériences présentées ici. Pour la détermination des coefficients d'échange pariétaux nous avons choisi le modèle suivant :

$$Q = h_{\text{pariétal}} \cdot S_{\text{canal}} \cdot \Delta T = h_{\text{pariétal}} \cdot S_{\text{canal}} \cdot (T_{\text{paroi}} - T_{\text{huile}}) \quad (2)$$

La température de l'huile est la moyenne arithmétique entre l'entrée et la sortie du canal. En effet, dans les conditions testées, l'écart entrée-sortie reste toujours inférieur à quelques degrés.

## 3. Analyse et discussion des résultats

### 3.1. Coefficient d'échange maximal

Nous avons constaté sur les différentes mousses utilisées dans les expériences, que chacune admettait un débit critique, à partir duquel le coefficient d'échange de chaleur n'évolue plus. Au-delà de ce débit critique, une partie de l'huile tombant sur la mousse déborde et ne traverse donc pas le canal. La valeur de ce débit dépend fortement de la taille

des pores qui conditionnent les propriétés d'écoulement de la mousse, mais aussi de la viscosité de l'huile et donc de la température. Pour chaque mousse nous avons déterminé un coefficient d'échange maximal (figure 3).

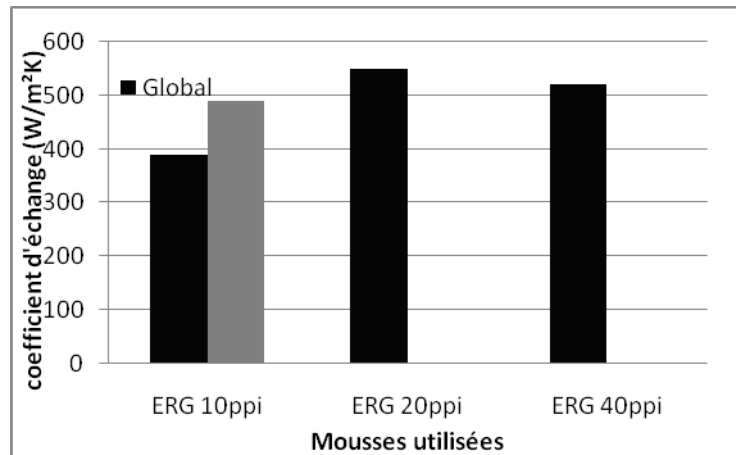


Figure 3 : Coefficients d'échange maximaux atteints lors de la saturation. Pour la mousse 10ppi le dispositif expérimental ne permet d'atteindre un débit suffisant pour saturer complètement la mousse. Les densités de débit massique atteints sont :  $23\text{kg/m}^2\text{s}$  (10ppi),  $9\text{kg/m}^2\text{s}$  (20ppi) et  $6\text{kg/m}^2\text{s}$  (40ppi).

Globalement, le coefficient maximal est atteint pour des débits très différents, mais sa valeur est sensiblement la même pour toutes les mousses testées ici. En effet, à débit donné, la surface spécifique croît inversement à la taille de pore. Pour un gradient de pression donné, le débit varie proportionnellement à la taille de pore. En écoulement gravitaire ces deux effets se compensent donc.

### 3.2. Evolution du coefficient d'échange pariétal en fonction du densité de débit massique d'huile

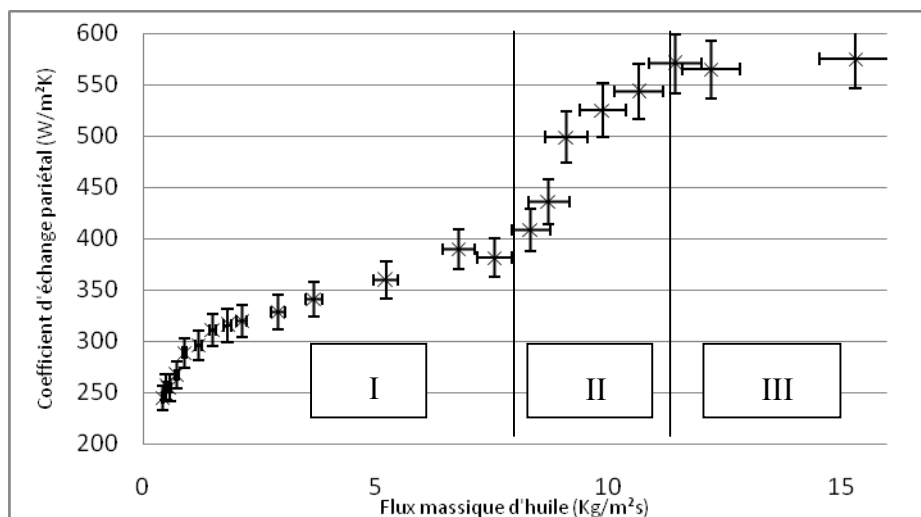


Figure 4 : Evolution du coefficient d'échange de chaleur pariétal pour une mousse d'aluminium ERG 20PPI

Nous constatons que l'évolution du coefficient d'échange en fonction du débit massique peut se diviser en trois zones de densité de débit massiques (Figure 4). La zone I correspond aux faibles densités de débit massiques pour lesquels le coefficient d'échange varie en racine carrée du débit (1). La zone II montre une brusque augmentation du coefficient d'échange. Enfin dans la zone III, le coefficient d'échange n'évolue quasiment plus.

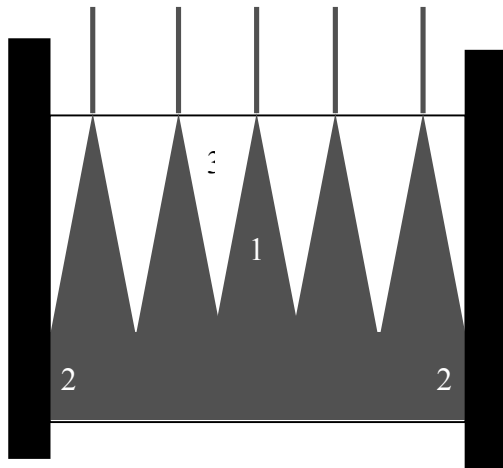


Figure 5 : Etalement des jets d'huile sous forme de cône (1) dans la mousse. Les cônes d'huile atteignent les parois (2) du canal au voisinage de la sortie. 3- air présent dans la mousse.

L'observation de la veine d'essais au cours des manipulations nous permet de corréler qualitativement ces comportements à la saturation de la mousse en huile. Zone I, la mousse n'est pas saturée et les jets d'huile s'étalent progressivement dans la mousse (figure 5). La mousse se sature très rapidement de façon homogène dans la zone II. Enfin dans la zone III la mousse est complètement saturée et le débit critique peut être atteint.

Ces résultats se retrouvent sur une mousse ERG 40PPI de diamètre de pore plus petit. La saturation apparaît pour des débits plus petits. On observe les mêmes zones que décrites précédemment.

### 3.3. Evolution du coefficient d'échange pariétal local

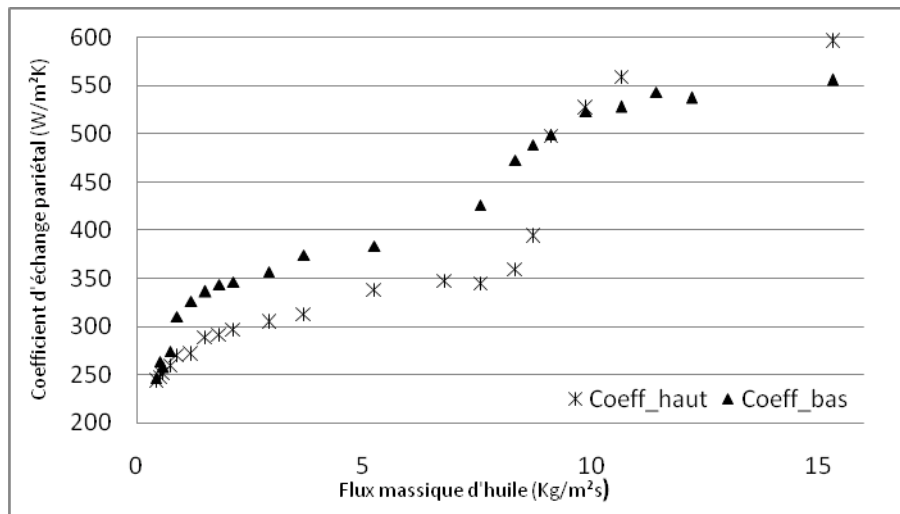


Figure 6 : Comparaison du coefficient d'échange local pour les moitiés haute et basse d'une paroi du canal (ERG 20PPI).

Lors de la transition des zones II et III, la mousse se sature d'abord en partie basse (figure 5). Notre dispositif expérimental nous permet de déterminer simultanément deux coefficients d'échange dans la mousse. Nous avons donc quantifié le coefficient d'échange pour les moitiés haute et basse d'une des parois du canal.

Nous retrouvons pour les coefficients haut et bas la même évolution en fonction du débit (figure 6). 3 comportements distincts sont observables. Cependant, les transitions entre les zones se font à débit plus faible pour la moitié basse de la mousse. Ceci recoupe les observations, le bas de la mousse se saturant pour des débits plus faibles.

## 4. Conclusion

Nous avons déterminé le coefficient d'échange de chaleur pariétal en écoulement gravitaire dans un canal poreux constitué de mousse métallique. Nous avons étudié l'influence du débit sur ce paramètre et mis en évidence 3 comportements distincts liés à la saturation de la mousse en huile. Nous montrons qu'un coefficient d'échange maximal de valeur sensiblement constante pour les mousses testées est atteint dans ces conditions. Cela indique que c'est la texture (forme) de la matrice solide qui conditionne ce paramètre plutôt que la taille de pore dans les conditions étudiées. Nous montrons que dans nos conditions opératoires la corrélation (1) n'est pas utilisable sur toute la plage de débit.

Il serait également intéressant d'avoir plus de deux zones de mesures du coefficient d'échange local. L'influence du niveau de température moyen dans la mousse doit également être étudiée, la viscosité de l'huile variant fortement avec sa température.

Les mesures que nous avons effectuées ont montré l'importance de la saturation en huile de la mousse. Il serait donc intéressant de pouvoir déterminer l'impact de celle-ci sur les échanges de chaleur en fonction du débit d'huile. La saturation pourrait être déterminée par pesée de la mousse lors des mesures en écoulement.

Enfin, la distribution des jets et/ou de leur diamètre est un des paramètres qui peut influencer notablement les échanges de chaleur ainsi que la répartition de l'huile dans la mousse.

## Références

- [1] Banhart, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams, *Prog. Mater. Sci* 46 (2001) 559-632
- [2] Madani, B., F. Topin, et al. (2005). Mesure du coefficient de transfert de chaleur local paroi-fluide dans un canal à mousse métallique en écoulement liquide et en ébullition. 12ième JITH, Tanger, Maroc.
- [3] Vicente, J., et al. Thermal conductivity of metallic foam: simulation on real x-ray tomographed porous medium and photothermal experiments in IHTC13, 13TH International Heat Transfer Conference. 2006. Sydney
- [4] Bhattacharya, A. V. V. Calmidi, R. L. Mahajan, Thermophysical properties of high porosity metal foams, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 45, 1017-1031, Elsevier, 2002.
- [5] Boomsma, D. Poulikakos, On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 44, 827-836, Elsevier, 2001.
- [6] Topin, F., J.-P. Bonnet, et al. (2006). "Experimental analysis of multiphase flow in metallic foam: convective boiling, flow laws and heat transfer." *Advanced material Engineering* 8(9): 890-899.
- [7] Madani, B., F. Topin, et al. (2006). "Flow laws in metallic foams: experimental determination of inertial and viscous contribution." *Journal of porous media* 10(1):51-70.
- [8] Lu, T. J., H. A. Stone, et al. (1998). "Heat transfer in open- cell metal foams." *Acta Materialia* 46(10): 3619-3635.
- [9] Serret, D., T. Stamboul, and F. Topin. Transferts dans les mousses métalliques : Mesure du coefficient d'échange de chaleur entre phases in Congrès de la SFT, SFT 07. 2007 p707-713. Ille des Embiez.
- [10] Dukhan, N., et al., One-dimensional heat transfer analysis in open-cell 10-ppi metal foam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005. 48: p. 5112–5120.