

Intensification des transferts de chaleur par convection forcée en conduite de section carrée avec des ferrofluides

Wahid CHERIEF¹, Yvan AVENAS¹, Sébastien FERROUILLAT², Afef LBOUC¹, Laurent JOSSIC³, Mickael PETIT⁴

¹ G2Elab – Université de Grenoble – UMR 5269 – BP 46, 38402 Saint Martin d’Hères Cedex

² LEGI – Université de Grenoble – UMR 5519 – BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9

³ Laboratoire Rhéologie et Procédés – Université de Grenoble – UMR 5520 – BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9

⁴ SATIE, ENS Cachan - CNAM - Université de Cergy Pontoise - CNRS UMR 8029, 94230 Cachan

RESUME –Cet article propose une contribution à l’étude de l’intensification des transferts de chaleur en utilisant des ferrofluides soumis à un champ magnétique. Le régime d’écoulement est laminaire et la section du canal est carrée. Dans un premier temps, un banc expérimental est présenté et validé en utilisant de l’eau comme fluide caloporteur. Une large partie de cette description est consacrée à la source de champ magnétique. Dans un second temps, des mesures de coefficient d’échange et de pertes de charge avec de l’eau permettent de valider le banc expérimental. Enfin, des mesures du même type sont proposées avec et sans champ magnétique. Une étude conjointe de la pression hydraulique nécessaire permet de conclure sur l’intérêt des ferrofluides dans ce type d’application.

MOTS-CLES – Ferrofluide, refroidissement, coefficient d’échange, pertes de charge, champ magnétique, caractérisation.

1. Introduction

Les convertisseurs statiques d’énergie à base d’électronique de puissance sont de plus en plus présents dans de nombreux secteurs industriels tels que l’aéronautique (avion plus électrique), l’automobile (voitures électriques et hybrides), ou encore les énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien...). Grâce aux avancées technologiques, les dispositifs électroniques deviennent moins volumineux et plus performants, ce qui entraîne une augmentation importante des densités de flux thermique dissipées par les composants semi-conducteurs pouvant ainsi atteindre plusieurs centaines de W/cm^2 . Par conséquent, des systèmes de refroidissement efficaces doivent être intégrés afin de limiter le niveau de température des composants électroniques, assurer leur bon fonctionnement et augmenter leur durée de vie. Pour de telles contraintes thermiques, le refroidissement liquide est souvent utilisé.

Les limites de tels systèmes de refroidissement sont toutefois très vite atteintes notamment à cause de la faible conductivité thermique du fluide caloporteur. Ces dernières années, un intérêt particulier a ainsi été porté aux nanofluides (suspension colloïdales de particules nanométriques) afin d’améliorer les échanges convectifs. Ces derniers ont fait l’objet, depuis une dizaine d’années, d’une activité de recherche intensive [1]. L’objectif de ces suspensions est d’améliorer les propriétés thermo-physiques des fluides caloporteurs de base afin d’intensifier les transferts thermiques. Cette approche utilise des nanoparticules solides permettant d’augmenter en premier lieu la conductivité thermique du fluide de base ainsi que le coefficient d’échange en convection forcée. Cependant, l’augmentation conjointe de la viscosité des nanofluides, par rapport au fluide de base, implique généralement une augmentation des pertes de charge. Par conséquent, bien qu’une amélioration des transferts thermiques soit observée, la puissance de pompage requise est augmentée comparée au cas du fluide de base. Afin d’évaluer l’intérêt applicatif des nanofluides pour intensifier les transferts de chaleur, il est indispensable de les caractériser par un bilan énergétique global [2, 3].

Une solution à ce problème peut consister à utiliser des suspensions de nanoparticules magnétiques (ferrofluides) qui, associées à un champ magnétique, permettent d’intensifier encore plus les échanges thermiques convectifs [4-7]. Toutefois, les résultats de la littérature ne permettent pas à ce jour de confirmer cette hypothèse. L’article proposé a donc pour objectif d’apporter des éléments de réponse à cette problématique. Cette réponse pouvant être différente en fonction de la nature du champ magnétique (uniforme, variable dans l’espace ou dans le temps, ...), du régime de l’écoulement et de la géométrie d’étude, nous nous limiterons ici à de la convection forcée dans un canal de section

carrée de dimension millimétrique, en régime laminaire. Les résultats dépendant également de la constitution et de la nature du fluide utilisé, plusieurs ferrofluides seront caractérisés (différents solvants, concentrations et tailles de particules).

Le dispositif de test sera présenté dans un premier temps. Dans un second temps, des mesures valideront le banc expérimental grâce à une caractérisation thermo-hydraulique en utilisant de l'eau comme fluide caloporteur. Enfin, les ferrofluides seront étudiés sans champ puis avec un champ magnétique afin de pouvoir conclure sur l'intérêt des ferrofluides dans des applications de refroidissement.

2. Présentation du banc de caractérisation des ferrofluides

Le banc de caractérisation est constitué de deux parties principales : la boucle de mesures thermo-hydrauliques et la source de champ magnétique. Elles seront toutes deux décrites dans les parties suivantes.

2.1 Boucle hydraulique

Le principe de la boucle de tests est présenté sur la figure 1. Celle-ci comprend une section d'essai permettant, grâce à l'utilisation de thermocouples et de capteurs de pression, d'estimer le coefficient d'échange convectif et les pertes de charge du fluide en écoulement. Cette section d'essai a une longueur de 1,5 m. Elle est constituée d'un conduit de section carrée de dimension 4mm*4mm. Seule une partie de la section d'essai est instrumentée (zone utile sur la figure 1 – longueur 1m) afin de laisser une longueur minimale permettant à l'écoulement de s'établir hydrauliquement. Comme le montre la figure 2, deux parois sont réalisées en cuivre et deux autres le sont avec un matériau isolant afin de donner une direction privilégiée au flux de chaleur. Cela permettra, pour les tests finaux, d'imposer au ferrofluide un champ magnétique dans la direction parallèle et dans la direction perpendiculaire au flux de chaleur et ainsi d'observer l'influence de la direction du champ sur l'intensification des transferts de chaleur. La source de chaleur est constituée par des résistances en film pour lesquelles la forme des conducteurs a été réalisée afin de limiter le champ magnétique induit par la circulation du courant de chauffe. Enfin, les mesures de température sont effectuées par des thermocouples intégrés à la paroi comme le montre la figure 2. Deux autres thermocouples sont disposés à l'entrée et à la sortie de la section d'essai afin de réaliser un bilan thermique qui permet, a posteriori, d'estimer la puissance globale qui a été transmise au fluide caloporteur. Enfin, la section d'essai est isolée thermiquement afin de limiter les pertes thermiques (non représenté sur la figure 1).

Outre la section d'essai, la boucle comprend également une pompe volumétrique, un débitmètre à engrenage et un échangeur afin d'extraire les pertes dissipées par les résistances chauffantes. Cet échangeur est de type multitubulaire à contre-courant et a été dimensionné et réalisé spécialement pour cette boucle.

Notons que le circuit hydraulique a été dimensionné pour limiter le volume de fluide à 100 ml. Cette contrainte est principalement due au coût assez important de certains ferrofluides et à notre volonté de pouvoir en caractériser plusieurs. C'est donc la raison pour laquelle nous effectuons les mesures de perte de charge en utilisant deux capteurs de pression absolue et non le capteur de pression relative qui est un consommateur important de fluide. Il n'est donc placé ici que pour la phase de calibration de la mesure de pression et pour vérifier, sur certains fluides, les mesures obtenues avec les capteurs de pression absolue.

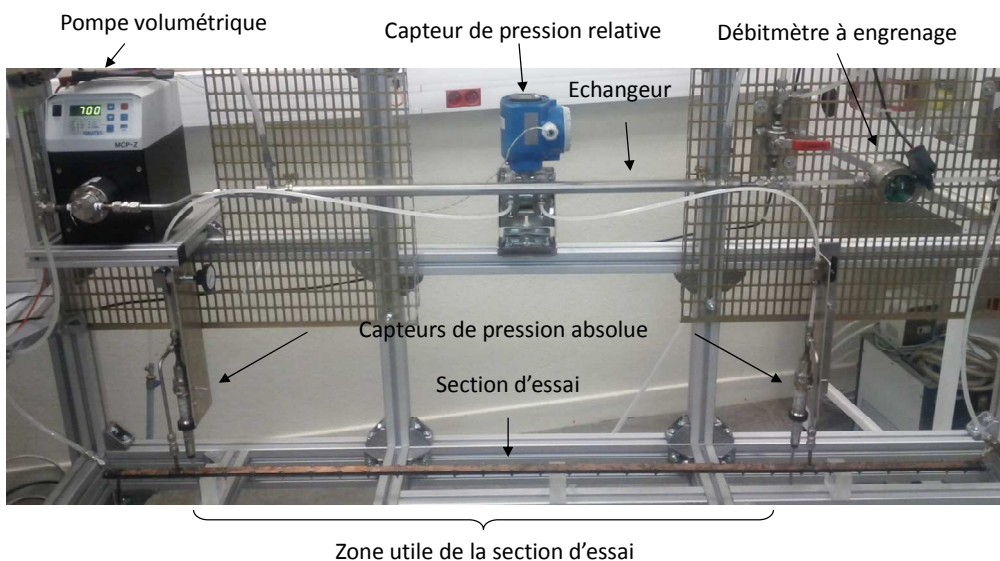


Figure 1 : Constitution de la boucle de tests thermo-hydrauliques

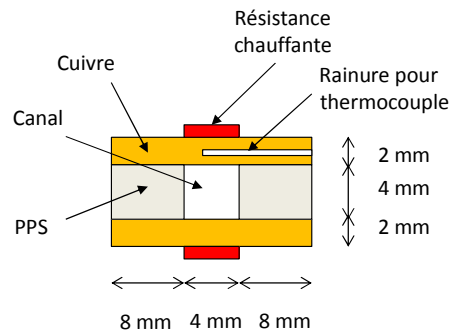


Figure 2 : Vue en coupe de la section d'essai

Dans l'article final, nous présenterons avec plus de détails comment est instrumentée la boucle (appareils, précisions de mesure, localisation des thermocouples) et nous expliquerons comment obtenir, à partir de celle-ci, une estimation du coefficient d'échange convectif.

2.2 Source de champ magnétique

Etant données nos contraintes, la source de champ magnétique doit être capable d'imposer un champ quasiment uniforme sur toute la longueur utile de la section d'essai c'est-à-dire sur une longueur de 1m. Nous nous sommes imposé d'avoir une induction maximale de l'ordre de 0,5 T, valeur d'induction facilement atteignable avec des aimants. Cette induction doit être variable afin d'évaluer son rôle sur le comportement thermo-hydraulique du ferrofluide.

Afin de ne pas avoir une structure trop difficile à manipuler, la source de champ est réalisée à partir d'un assemblage de dix circuits magnétiques en forme de U et de longueur 100mm. La figure 3 présente la réalisation d'un de ces circuits magnétiques. Nous voyons que le champ est induit par l'utilisation de 16 aimants NdFeB N48 (Supermagnete) de dimension 15mm*15mm*50mm. L'entrefer est de 30 mm afin de laisser la place pour la section d'essai (8 mm de hauteur) et pour l'isolant thermique permettant de limiter les pertes autour de la section d'essai. Des simulations et des tests préliminaires montrent que l'induction maximale est de l'ordre de 0,6 T. Le niveau d'induction sera modifié en rajoutant des entrefers dans la structure.

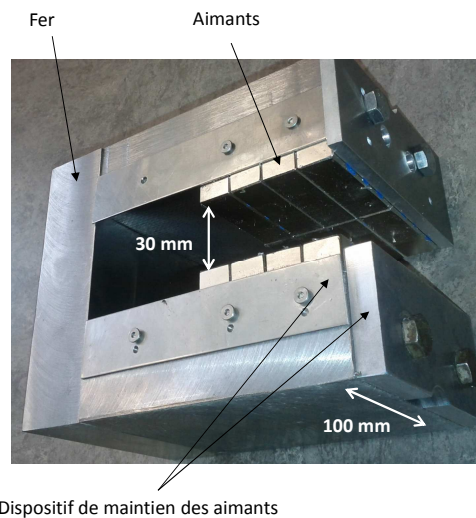


Figure 3 : Bloc élémentaire pour la création du champ magnétique

Outre la facilité de mise en œuvre, la réalisation de la source en plusieurs blocs distincts permet de caractériser le ferrofluide sous différentes contraintes de champ magnétique. On peut par exemple ne mettre qu'un seul U, ou encore alterner la direction du champ magnétique...

L'article final présentera des résultats de mesure de l'induction magnétique dans l'entrefer dans différentes configurations de placement des blocs élémentaires.

3. Résultats expérimentaux

Les tests seront présentés en plusieurs étapes dans l'article final. Tout d'abord, nous validerons notre banc expérimental en utilisant de l'eau et en vérifiant les résultats obtenus avec des corrélations classiques. Par exemple, la figure 4 présente la comparaison entre les pertes de charge obtenues expérimentalement et les pertes de charge théoriques estimées par l'équation suivante dans le cas d'un canal carré [8] :

$$\Delta P = 0.89 \frac{64}{\text{Re}} \frac{L}{D_h} \rho \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

avec L la longueur de la zone utilisée de la section d'essai, D_h le diamètre hydraulique, Re le nombre de Reynolds et v la vitesse moyenne du fluide.

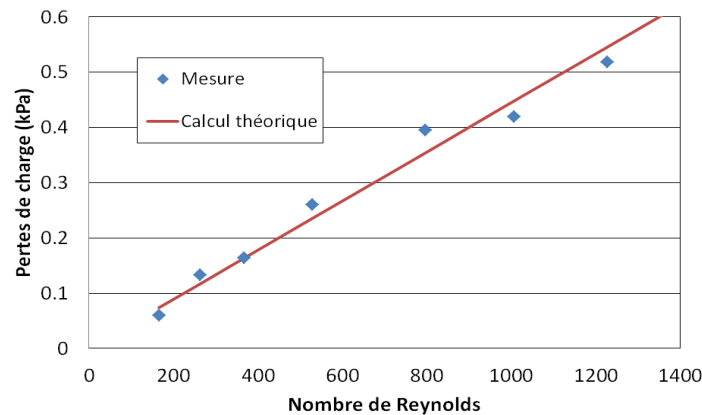


Figure 4 : Pertes de charge dans la section d'essai en utilisant de l'eau

Une fois l'étude avec de l'eau effectuée, l'article final présentera des résultats de mesures du coefficient d'échange convectif et des pertes de charge dans la section d'essai. Cela sera fait dans un premier temps en utilisant des ferrofluides sans champ magnétique puis, dans un deuxième temps, avec différentes configurations du champ magnétique.

Enfin, nous présenterons une étude permettant de conclure sur l'intérêt des ferrofluides par rapport aux nanofluides classiques.

4. Conclusion

Cet article est une contribution à l'étude de l'intensification des transferts de chaleur grâce à des ferrofluides soumis à un champ magnétique. Pour cela, un dispositif expérimental original est mis en œuvre. Il permet de mesurer le coefficient d'échange et les pertes de charge. L'intérêt de cette dernière mesure est d'estimer la puissance hydraulique nécessaire au refroidissement et ainsi d'évaluer l'intérêt ou non de cette méthode. L'étude reste toutefois limitée au cas d'étude d'un fluide en écoulement en régime laminaire dans un canal de section carré millimétrique.

Les perspectives à ce travail sont la caractérisation thermo-hydraulique de ce type de fluide dans d'autres conditions d'écoulement (régime turbulent, autres géométries) et dans des conditions plus proches de l'application (refroidissement de modules de puissance par exemple).

5. Références

- [1] Gruss et Ribeiro, « Nanofluides pour les applications Thermiques », Dossier Tech. de l'Ing. (2009).
- [2] S. Ferrouillat et al "Influence of nanoparticle shape factor on convective heat transfer and energetic performance of water-based SiO₂ and ZnO nanofluids.", Applied Thermal Engineering, (2013).
- [3] S. Ferrouillat et al "Hydraulic and heat transfer study of SiO₂/water nanofluids in horizontal tubes with imposed wall temperature boundary conditions.", International Journal of Heat and Fluid Flow, (2011).
- [4] M. Motozawa et al "Variation of forced convective heat transfer in rectangular duct flow of a magnetic fluid under magnetic field.", 13th Int. Conf. on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions (ERMR2012). Turquie (2012).
- [5] J. Philip et al "Enhancement of thermal conductivity in magnetite based nanofluid due to chainlike structures.", Applied Physics Letters, (2007).
- [6] M. Lajvardi et al "Experimental investigation for enhanced ferrofluid heat transfer under magnetic field effect." Journal of Magnetism and Magnetic Materials, (2010).
- [7] R. Azizian et al., "Effect of magnetic field on laminar convective heat transfer of magnetite nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, (2014).
- [8] I.E. Idel'cik, "Mémento des pertes de charges", éditions Eyrolles, 3^e édition, 1986.