

Étude expérimentale d'un système statique de génération de pression magnétothermique

Mickael Petit^{1,2}, Yvan Avenas¹, Afef Kedous-Lebouc¹, Wahid Cherief¹, Elisabeth Rullière¹

¹Univ. Grenoble Alpes, G2Elab, F-38000 Grenoble, France
CNRS, G2Elab, F-38000 Grenoble, France

²SATIE, ENS Cachan - CNAM - Université de Cergy Pontoise - CNRS UMR 8029, 94230 Cachan

RÉSUMÉ - Le refroidissement par convection forcée des composants électroniques de puissance, bien que très efficace, nécessite généralement l'utilisation d'une pompe mécanique réduisant le rendement global du système et sa fiabilité. Il a déjà été montré, que l'utilisation des ferrofluides à basse température de Curie produisait un écoulement de ce dernier, sans aucune pièce mécanique en mouvement, lorsqu'il est soumis à l'action conjuguée d'un champ magnétique et d'un gradient de température. Cet article met en évidence, de manière expérimentale, la création de pression statique au sein d'un ferrofluide. Cette pression est mesurée en fonction de l'induction imposée et du gradient de température. Les résultats dans des conditions stationnaires et instationnaires seront discutés.

Mots-clés— *Ferrofluide à faible TC, Pompe Statique, Refroidissement, Couplage Magnétothermique*

1. INTRODUCTION

Malgré le rendement élevé des convertisseurs électroniques de forte puissance modernes, la dissipation de chaleur dans les dispositifs semi-conducteurs n'est pas négligeable en raison des pertes par conduction et par commutation [1]. Afin d'améliorer les caractéristiques du convertisseur (réduction de la tension d'ondulation, du bruit audible, du volume, du poids, etc.), la fréquence de découpage doit être augmentée [2], au risque d'intensifier les pertes dans les interrupteurs électroniques. Aujourd'hui, l'électronique de puissance est omniprésente dans de nombreux domaines, en particulier dans les transports, pour lesquels le poids et le volume des convertisseurs sont des contraintes de première importance. La réduction de la taille et l'augmentation de la puissance conduisent à l'augmentation des densités des pertes. Un échange thermique avec l'environnement extérieur de l'ordre de 500W/cm² est une exigence pratique de l'électronique de puissance moderne tandis que la température de jonction maximale reste dans une plage de 125°C à 200°C. Le refroidissement et la gestion thermique sont donc un défi majeur pour les prochaines évolutions de l'électronique de puissance. Plusieurs techniques de refroidissement très efficaces, basées sur la circulation d'un fluide caloporteur ont été développées. Il s'agit par exemple des systèmes de refroidissement intégrés à la semelle des composants [3], des dispositifs de refroidissement par microjets [4] ou par spray [5,6]. Toutefois ces derniers nécessitent l'utilisation d'une pompe mécanique qui diminue les performances de l'ensemble de la chaîne de conversion et sa

fiabilité. D'autres systèmes de refroidissement sont donc proposés dans la littérature scientifique et dans les applications industrielles comme les caloducs, les caloducs oscillants, les boucles à pompage capillaire, ou encore l'utilisation de métaux liquides associés à une pompe magnétohydrodynamique [7]. L'objectif principal est d'enlever la pompe mécanique du système et de créer un système de pompage statique (sans pièces mécaniques en mouvement) et dans certains cas autonome.

Dans cet article, une solution basée sur l'utilisation de ferrofluides est proposée afin de supprimer la pompe mécanique des systèmes de refroidissement. Les ferrofluides sont des suspensions colloïdales de particules magnétiques dans un solvant tels que le kérosène, l'oléfin-paraffin ou l'eau [8]. Par exemple, la rotation ou le déplacement linéaire d'un champ magnétique glissant permet l'attraction et le déplacement du ferrofluide [9]. Ce système n'a pas besoin d'une pompe mécanique, mais la création d'un champ magnétique variable dans l'espace. Ce champ magnétique est obtenu par un système de courant polyphasé, complexe et consommateur d'énergie, perdant ainsi la notion d'autonomie. Cette dernière peut toutefois être atteinte en utilisant des ferrofluides thermosensibles. Dans ce cas, leurs propriétés magnétiques changent fortement avec la température [10]. Par exemple, les ferrites manganèse-zinc en suspension ont une température de Curie voisine de 150°C et leur aimantation à saturation diminue fortement à partir de 50°C jusqu'à leur point de Curie. Cet effet peut être utilisé pour intensifier la convection naturelle par un phénomène de magnétoconvection [11,12] ou pour réaliser des pompes statiques autonomes [13,14,15,16]. La température de Curie des ferrofluides Mn-Zn, étant proche de la température de fonctionnement des dispositifs de l'électronique de puissance, ces derniers sont de bons candidats pour le refroidissement statique des composants de ce domaine [17].

Le but de ce document est de donner des résultats complémentaires par rapport aux travaux antérieurs sur les pompes passives utilisant un ferrofluide à faible température de Curie. En effet, la création d'une pression statique en utilisant le phénomène magnétothermique a déjà été validé expérimentalement, mais peu de résultats expérimentaux ont été publiés. De plus certains auteurs comme Bermudez-Torres [18] ont montré une différence non négligeable entre la

pression statique évaluée de manière théorique et la valeur expérimentale mesurée. Cette différence n'a toutefois pas été expliquée, car leur dispositif expérimental n'était pas assez instrumenté pour cela. Cet article propose donc d'étudier plus en détail la création de cette pression statique dans un tube droit, rempli d'un ferrofluide à base de MnZn et soumis à un champ magnétique.

La partie suivante présente le principe physique l'effet magnétothermique. Ensuite, un dispositif expérimental est décrit. Enfin, les résultats sont discutés.

2. PRINCIPE PHYSIQUE D'UNE POMPE MAGNETOTHERMIQUE

Les ferrofluides ont un comportement paramagnétique [19]. Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, les particules en suspension, monodomains magnétiques, sont soumises à un couple tendant à les aligner sur ce dernier. Cependant ces particules sont de taille nanométrique et soumises à l'agitation thermique, qui les maintient en suspension, et qui tend à désorienter ces dernières par rapport au champ appliqué. Il existe donc, au sein du fluide, une compétition entre les interactions magnétiques tendant à aligner les particules et l'agitation thermique qui les désoriente. Il en résulte que la polarisation du fluide J est dépendante non seulement du champ appliqué H , mais aussi de la température T , comme le montre la figure 1 [20].

Cette figure montre qu'à champ magnétique constant, un ferrofluide chaud est moins perméable qu'un ferrofluide froid. Un gradient de température à proximité d'un ferrofluide soumis à un champ magnétique créé ainsi un déséquilibre de perméabilité relative μ_r qui induit à son tour un gradient de pression au sein du ferrofluide comme le montre la figure 2. Ce principe est à la base du pompage magnétothermique.

Par le passé, certains auteurs ont essayé de prédire la pression statique engendrée par ce couplage [14,21]. Cependant les calculs théoriques et les mesures expérimentales ont toujours divergé. Nous proposons ici un nouveau dispositif expérimental, instrumenté plus finement permettant d'expliquer ces différences.

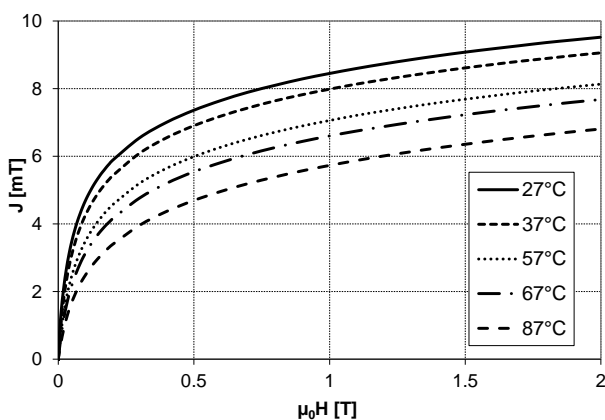


Fig.1 Diminution de la polarisation d'un ferrofluide Mn-Zn avec la température

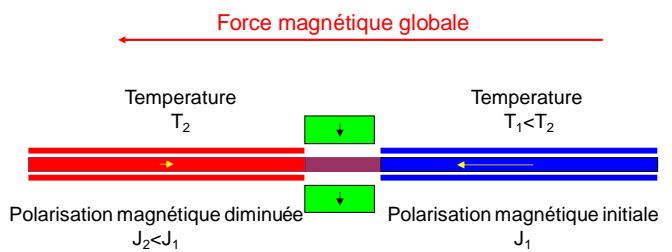


Fig.2 Principe de création d'une pression statique par couplage magnétothermique

3. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

3.1. Le système thermique

Un dispositif expérimental original nous permet de mesurer l'effet du couplage entre un gradient de température et un champ magnétique (figure 3). Ce dispositif permet de mesurer la pression de part et d'autre d'un canal rempli de ferrofluide subissant des gradients thermiques, et la température tout au long de ce canal. Les résultats présentés ici complètent ceux obtenus par Matsuki et coll. [14] et Ricetti [16]. Néanmoins, par rapport à ces derniers, nous avons rajouté des mesures de température le long du canal qui, comme nous le verrons plus tard, permettent d'étendre les conclusions sur les analyses des résultats obtenus.

La différence de température entre les deux extrémités chaude et froide du canal est obtenue en chauffant un côté avec une résistance bobinée et en refroidissant l'autre avec un échangeur eau-eau. Ce dernier est composé de deux tubes concentriques. Le tube interne contient le ferrofluide et le second est traversé par un écoulement d'eau à température ambiante. Les longueurs respectives des zones froides, chaudes et du canal entre les deux sont 50, 40 et 57 mm. Les diamètres internes sont respectivement 8, 8 et 7 mm.

Un thermocouple de type K est placé au niveau de la source chaude et deux autres le sont au niveau de la source froide. Une procédure de calibration préliminaire nous a permis d'estimer une erreur de +/- 0,2°C sur les mesures de température. La zone entre les sources chaude et froide est constituée d'un tube en PMMA (Polyméthyl Metacrylate) et contient 5 thermocouples de type K séparés entre eux de 10 mm. La tenue mécanique de l'ensemble est assurée par trois tiges filetées qui permettent une compression des différents joints assurant l'étanchéité. Les mesures de pression sont obtenues par l'utilisation d'un capteur différentiel de type Vegadif65 (erreur de mesure inférieure à 30 mPa) qui est connecté aux deux extrémités. Le remplissage du système est assuré par une seringue à travers une membrane de type Septum.

3.2. La source de champ magnétique

Le champ magnétique est affecté au canal rempli de ferrofluide par l'utilisation d'un électroaimant comprenant un circuit magnétique en fer et un bobinage de 100 spires alimenté par un courant variant de 0 à 12 A. Dans ces conditions, l'induction magnétique dans l'entrefer varie de 0 à 250mT. La figure 4 représente les pôles de cet électroaimant avec le canal de ferrofluide se trouvant dans l'entrefer. Ces derniers sont refroidis par une circulation d'eau à température ambiante. La section de chaque pôle est 57 mm * 15 mm. La distance entre

un pôle et le tube de ferrofluide est 4 mm. La source froide est espacée du pôle de 2 mm.

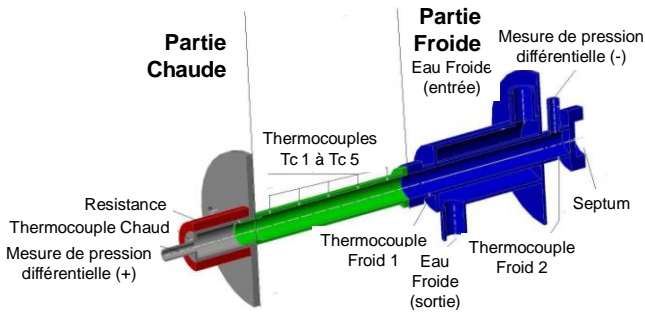


Fig.3 Schéma du dispositif de test (hors circuit magnétique)

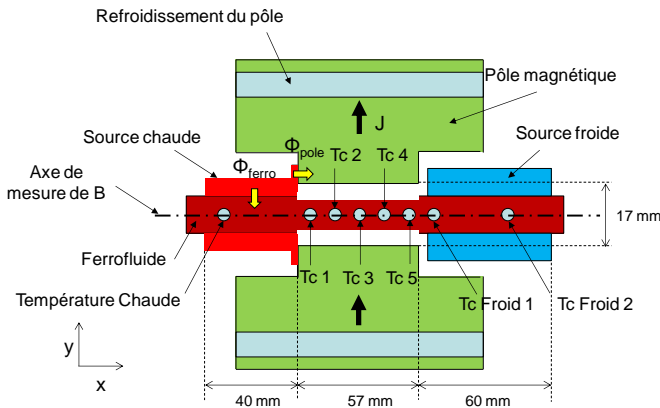
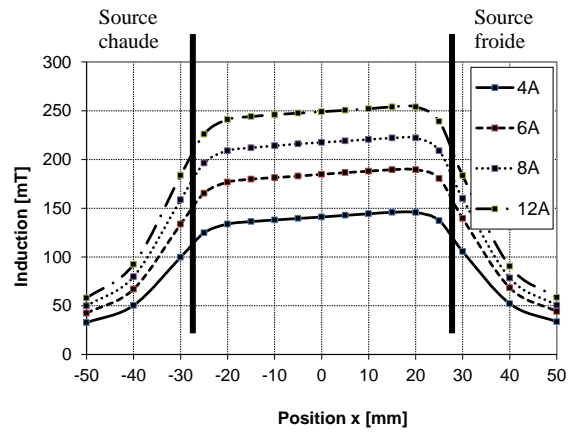


Fig.4 Les pôles magnétiques et les mesures de température

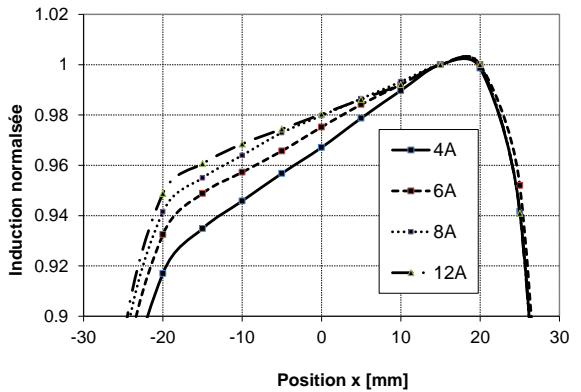
Une mesure d'induction a été effectuée afin de vérifier la répartition du champ magnétique dans l'entrefer à l'aide d'un gaussmètre (Magnet-Physik FH-21) couplé à une sonde transversale (n°1401). La figure 5a présente l'évolution de la composante y de cette induction (voir figure 4) le long de la ligne médiane de l'entrefer pour différentes valeurs de courant. Cette induction n'est pas constante à cause d'une légère dissymétrie de l'entrefer, ce dernier étant 1 mm plus grand d'un côté que de l'autre.

La figure 5b représente l'évolution de l'induction normalisée (c'est-à-dire le rapport entre l'induction mesurée localement et l'induction maximale mesurée pour un courant donné). Nous voyons que la variation de cette induction normalisée dépend largement de la valeur du courant ce qui peut s'expliquer par l'apparition de saturations locales au niveau du fer.

Après la caractérisation magnétique, le dispositif thermique a été fixé sur le circuit magnétique comme représenté sur la figure 4. La source chaude se retrouve donc en contact quasi-direct avec le circuit magnétique qui est lui-même refroidi ce qui crée l'apparition d'un flux thermique entre la résistance chauffante et l'eau de refroidissement noté $\Phi_{pôle}$. Comme nous le verrons plus tard, l'intérêt de cette fixation est d'assurer une température de source chaude ne dépendant quasiment pas des flux thermiques Φ_{ferro} entrant dans le ferrofluide. Cette hypothèse est bien entendue seulement vraie si $\Phi_{ferro} \ll \Phi_{pôle}$ ce qui se trouve être le cas dans notre dispositif de caractérisation.



a. Induction



b. Induction normalisée (zoom)

Fig.5 Induction au niveau du canal de ferrofluide

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Avant de caractériser l'influence du champ magnétique et du gradient thermique sur la pression, le ferrofluide a été testé sans champ, mais avec un gradient de température. Dans ce cas aucune variation de pression n'a été détectée. Les paragraphes suivants présentent dans un premier temps l'effet du champ magnétique seul (sans gradient de température) puis de l'effet couplé de ces deux grandeurs physiques.

4.1. Mesure de la pression statique sans gradient de température

La figure 6 représente l'évolution de la pression statique engendrée dans le dispositif en fonction de l'induction dans l'entrefer et sans gradient thermique. Cette pression est normalement nulle, mais le défaut de parallélisme entre les deux pôles engendre une variation de pression qui, comme nous le verrons plus tard, n'est pas négligeable par rapport à la pression obtenue avec présence d'un gradient de température. Elle peut en effet atteindre 20% de la pression engendrée par un couplage magnétothermique. Cette pression sera ainsi soustraite des résultats qui seront obtenus plus tard quand un champ magnétique et un gradient de température seront appliqués de manière simultanée.

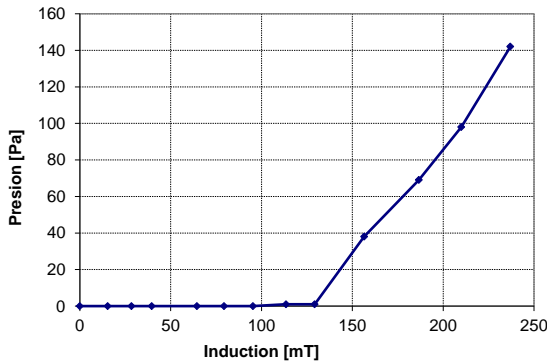


Fig.6 Pression statique en fonction de l'induction sans gradient de température

4.2. Mesure de la pression statique avec un gradient de température

Des résultats complémentaires ont montré que l'action simultanée d'un gradient thermique et d'un champ magnétique induisait la création d'une pression statique dans le dispositif. La pression a ainsi été mesurée en fonction de l'induction et pour deux valeurs de flux thermique (puissance injectée dans la résistance bobinée). Le premier test a été effectué avec une puissance de 9,5W et le deuxième avec une puissance de 4,8W.

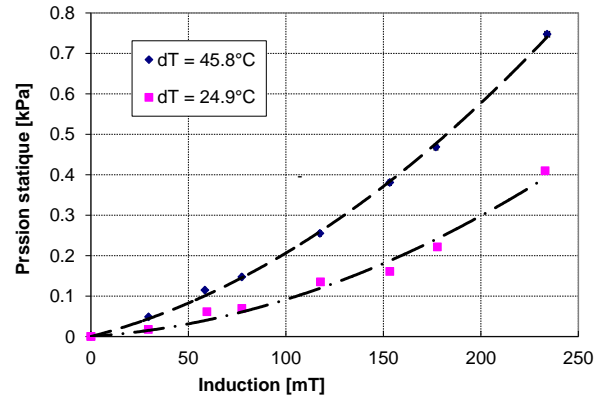
Le tableau 1 donne les valeurs des températures au niveau des sources chaude et froide et les différences de température entrant ces deux dernières pour chaque cas. L'évolution de la pression statique en fonction de l'induction est, elle, donnée en figure 7 pour les deux valeurs de puissance. Sur cette figure, la mesure de pression statique est corrigée comme indiqué dans le paragraphe 4.1. Sur cette figure, nous supposons que le gradient de température est identique quel que soit le niveau d'induction, ce qui est inexact, car l'induction modifie bien entendu les transferts de chaleur dans le tube. Toutefois, la réalisation du dispositif de test, tel qu'il est présenté en figure 4, permet de limiter la variation de température de la source chaude grâce à la création du flux de fuite $\Phi_{pôle}$. Comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, la variation du gradient de température est effectivement très faible en fonction de l'induction ce qui nous amène à ne présenter qu'une seule valeur de température pour chaque niveau de flux de chaleur injecté.

Tableau 1. Mesures de température sans induction

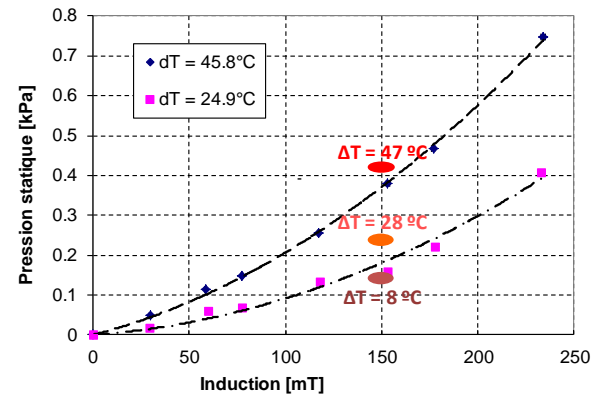
Flux de chaleur (W)	Température de source froide T_c (°C)	Température de source chaude T_h (°C)	$T_h - T_c$ (°C)
4,8	26,8	51,7	24,9
9,5	24,4	70,2	45,8

Ces résultats sont également comparés à ceux obtenus par Bermudez-Torres [18] qui a polarisé un ferrofluide à base de MnZn avec un aimant permanent cylindrique permettant une induction de l'ordre de 150mT au centre du cylindre. Il a mesuré la pression statique pour trois valeurs du gradient de température : 8, 28 et 47°C. Même si une comparaison directe ne peut pas être faite avec nos résultats puisque les géométries, les valeurs d'induction et les fluides sont légèrement différents, il est intéressant de voir que les ordres de grandeur et l'évolution de la pression absolue en fonction du gradient de température restent très proches. Ces travaux nous permettent

ainsi de bien confirmer que la pression statique obtenue avec un couplage magnétothermique reste limitée, notamment si des applications de refroidissement sont visées par la suite. Ces faibles valeurs sont toutefois assez surprenantes, car des calculs théoriques, menés par exemple par Bermudez-Torres [18], montrent qu'elles devraient être largement plus importantes. Le paragraphe suivant tente de donner des éléments de réponse à cette problématique.



a. Résultats expérimentaux



b. Comparaison avec les résultats de Bermudez-Torres (B=150mT) [18]

Fig.7 Pression statique en fonction de l'induction pour deux flux de chaleur

4.3. Evolution du gradient thermique lorsqu'un champ magnétique est appliqué

Les résultats précédents étaient tous donnés dans des conditions de régime stationnaire. Nous allons maintenant observer le comportement thermique du ferrofluide dans des conditions dynamiques c'est-à-dire quand le courant dans l'électroaimant est mis en route ou lorsqu'il est coupé. Dans cette expérience, la durée de changement d'état (induction on / induction off), de l'ordre de 1s, est très courte par rapport aux constantes de temps du système. Lorsque l'électroaimant fonctionne, l'induction vaut 250mT. Lorsque ce dernier est éteint, l'induction vaut 7mT à cause d'un champ rémanent. Cette valeur étant toutefois très faible devant 250mT, nous considérerons par la suite qu'elle est nulle.

La figure 8 présente l'évolution de la température le long du ferrofluide pendant et après l'application du champ magnétique. Nous pouvons voir que la différence de température entre source chaude et source froide reste assez

proche dans les deux cas puisqu'elle n'est réduite que de 5% lorsqu'un champ magnétique est appliqué. Cette figure montre aussi que le gradient thermique dans le ferrofluide (thermocouples $Tc1$ à $Tc5$) est largement réduit en présence du champ. Cette réduction prouve que les transferts de chaleur sont largement améliorés dans ce dernier cas ce qui peut s'expliquer par l'apparition d'un mouvement convectif dans le fluide lorsqu'un champ magnétique est appliqué. On parle alors de magnétoconvection.

La réduction du gradient thermique dans le ferrofluide induit en conséquence une diminution de la pression statique ce qui peut ainsi largement expliquer pourquoi les mesures expérimentales donnent des valeurs inférieures aux valeurs théoriques. En effet, Bermudez-Torres considère dans son analyse théorique que le gradient thermique dans le ferrofluide n'est pas influencé par le champ magnétique ce qui, comme nous venons de le voir, est inexact.

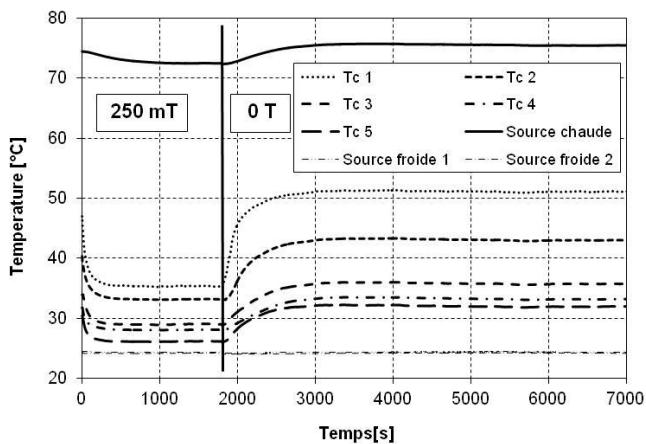


Fig.8 Température dans le ferrofluide avec et sans champ magnétique

Afin de confirmer l'observation que nous venons de faire, nous avons comparé les temps de montée et de descente de la température du thermocouple $Tc1$ suite à des changements d'état du champ magnétique. En effet, les mouvements convectifs induisent normalement un accroissement de la dynamique des échanges thermiques par rapport à un problème purement conductif. Nous allons ainsi vérifier que cette hypothèse reste encore valable dans ce cas.

Pour cela, nous allons tracer une valeur normalisée de la variation de température. Cette dernière, notée $T_n(t)$, est définie par l'équation suivante :

$$T_n(t) = \frac{T(t) - T_0}{T_\infty - T_0} \quad (1)$$

où T_0 est la température initiale juste avant le changement d'état du champ magnétique, $T(t)$ la température du thermocouple considéré et T_∞ la température finale.

La figure 9 montre bien que l'évolution de la température normalisée est plus rapide dans le cas où un champ est appliqué par rapport au cas où le champ est coupé. Ce semble confirmer notre hypothèse de la présence d'un phénomène de magnétoconvection dans le canal.

5. CONCLUSIONS

Le travail présenté confirme, grâce à une étude expérimentale, qu'une pression hydrostatique peut être engendrée par l'action couplée d'un gradient thermique et d'un champ magnétique et cela, sans la présence de pièces mécaniques en mouvement. Cette pression statique est principalement due aux propriétés magnétiques thermosensibles du ferrofluide MnZn.

Cet article a permis de mettre en évidence la forte probabilité de la présence d'un mouvement convectif dans le fluide lorsqu'un champ magnétique est appliqué qui a tendance à réduire les valeurs de pression statiques mesurées. Cette réduction pourrait également être due à d'autres phénomènes comme l'agglomération de particules magnétiques dans les zones à fort gradient de champ mais cela reste à confirmer dans le futur.

La prochaine étape consistera à contrôler et modéliser le phénomène de magnétoconvection afin d'augmenter la pression statique. Une prise en compte du couplage entre les équations de Maxwell et de Navier-Stokes devra être effectuée. Une autre étape importante sera la réalisation d'une boucle fermée et l'évaluation de sa capacité à refroidir des composants électroniques ou électroniques de puissance.

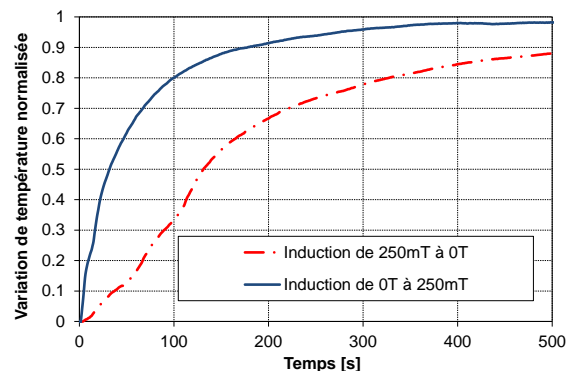


Fig.9 Evolution de la température normalisée du thermocouple $Tc1$ lorsque l'induction est mise en route ou coupée

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Grenoble-INP qui a participé en partie au financement de ces travaux par l'intermédiaire d'un projet BQR.

7. REFERENCES

- [1] Mohan N., Undeland T. M., Robbins W-P., 2003, Power Electronics, Converters, Applications, and Design, third ed. Wiley, New-York.
- [2] Jankovskis J., Stepins D., Pikulins D., 2010, Effect of increasing switching frequency in frequency modulated power converters, 9th ISETC, 115-118.
- [3] Rondier P., Fakes M., Vasilescu C., Tellier R., 2008, Power Electronic Cooling Device, Valeo Equipement Electrique, US Patent N° 7,417,857 B2.
- [4] Leland J-E., Ponnappan R., Klasing K-S., 2002, Experimental investigation of an air microjet array impingement cooling device, Aerospace Sciences Meeting N°37, 16, 187-1912.
- [5] Pautsch A-G., Shedd T-A., 2005, Spray impingement cooling with single - and multiple - nozzle arrays, Int. Journal of Heat and Mass Trans, 48, 3167-3175.

- [6] Cole G.S., Scarine R-P., 2002, Method and two-phase spray cooling apparatus, US Patent N° US 6,498,725.
- [7] Tawk M., Avenas Y., Kedous-Lebouc A., Petit M., 2011, Study and realization of a high power density electronics device cooling loop using a liquid metal coolant, ECCE conf., 36-43.
- [8] Auzans E., Zins D., Blums E., Massart R., 1999, Synthesis and properties of Mn-Zn ferrite ferrofluids, *Journal of materials science*, 34, 1253-1260
- [9] Mao L., Shihab E., Xiaowei H., Markus Z., Hur K, 2011, Direct observation of closed-loop ferrohydrodynamic pumping under travelling magnetic field, *Phys. Rev. B*, 84, 104431-104438.
- [10] Rosensweig R.E., 1985, *Ferrohydrodynamics*, Cambridge University Press.
- [11] Souhar M., Aniss S., Brancher J-p., 1999, Convection de Rayleigh_Benard dans les liquides magnetiques en cellule de Hele_Shaw annulaire, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 12, 61-72.
- [12] Zablotsky D., Mezulis A., Blums E., 2013, Formation of magnetoconvection by photoabsorptive methods in ferrofluid layers, *C. R. Mecanique*, 341, 449-454.
- [13] Love L-J., Jansen J-F., McKinght T-E., Roth Y., Phelps T-J., 2004, A Magnetocaloric Pump for Microfluidic applications, *IEEE Trans on Nanobioscience*, 3, 101-110.
- [14] Matsuki H., Yamasawa K., Murakami K., 1977, Experimental considerations on a new automatic cooling device using temperature-sensitive magnetic fluid, *IEEE Trans. Magn.*, 13, 1143-1145.
- [15] Li Q., Wenlei W., Sun H., Xuan Y., 2008, Investigation on operational characteristics of a miniature automatic cooling device, *Int. Journal of Heat and Mass Tran.*, 51, 5033-5039.
- [16] Riccetti M., 2009, Optimization and characterization of a magnetocaloric pump using ferrofluids, Thesis of Mechanical Engineering, University of Puerto Rico, Mayaguez (Puerto Rico).
- [17] Fumoto K., Yamagishi. H., Ikegawa M., 2007, A mini heat transport device based on thermo-sensitive magnetic fluid, *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 11, 201-210.
- [18] Bermúdez-Torres E-O., 2008, Design and Mechanical Characterization of a Magnetocaloric Pump, Thesis of Mechanical Engineering, Master of University of Puerto Rico, Mayaguez (Puerto Rico).
- [19] Massart R., Bacri J-C., Perzynski R., 1995, *Liquides magnétiques ou ferrofluides*, Editions T.I., ref. d2180.
- [20] Petit M., 2012, Contribution à l'étude des systèmes de refroidissement basés sur le couplage magnétothermique dans les ferrofluides à faible température de Curie : mise en place d'outils de caractérisation et de modélisation, PhD thesis, Grenoble University, Grenoble (France).
- [21] Greivell N.E., Hannaford B., 1997, The design of a ferrofluid magnetic pipette, *IEEE transactions on biomedical engineering*, 44, 129-135.