



**HAL**  
open science

## Etude expérimentale d'un système statique de génération de pression magnétothermique

Mickaël Petit, Afef Kedous-Lebouc, Yvan Avenas, Wahid Cherief, Elisabeth  
Rullière

► **To cite this version:**

Mickaël Petit, Afef Kedous-Lebouc, Yvan Avenas, Wahid Cherief, Elisabeth Rullière. Etude expérimentale d'un système statique de génération de pression magnétothermique. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065356

**HAL Id: hal-01065356**

**<https://hal.science/hal-01065356>**

Submitted on 18 Sep 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Etude expérimentale d'un système statique de génération de pression magnétothermique

Mickaël Petit<sup>(1,2)</sup>, Yvan Avenas<sup>(1)</sup>, Wahid Cherief<sup>(1)</sup>, Afef Kebous-Lebouc<sup>(1)</sup>, Elisabeth Rullière<sup>(1)</sup>

<sup>1</sup>G2elab, Grenoble Alpes Université - CNRS UMR 5269, 38402 S<sup>t</sup> Martin d'Hères

<sup>2</sup>SATIE, ENS Cachan - CNAM - Université de Cergy Pontoise - CNRS UMR 8029, 94230 Cachan

**RESUME** - 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. Ce papier 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 statiques et transitoires seront discutés.

**MOTS-CLES** - Ferrofluide à faible TC, Pompe Statique, Refroidissement de composants électroniques, 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  $500\text{W}/\text{cm}^2$  est une exigence pratique de l'électronique de puissance moderne tandis que la température de jonction maximale reste dans une plage de  $125\text{ }^\circ\text{C}$  à  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . 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. Les systèmes de refroidissement intégrés à la semelle des composants [3], les dispositifs de refroidissement par microjets [4] ou par spray [5,6] sont très efficaces, mais ils 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 magnéto-hydro-dynamique [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 ce papier, 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 de l'eau, un solvant minéral ou organique. Par exemple, la rotation ou le déplacement linéaire d'un champ magnétique glissant permet l'attraction et le déplacement du ferrofluide [8]. 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 [9]. Par exemple, les ferrites manganèse-zinc en suspension ont une température de Curie voisine de  $150\text{ }^\circ\text{C}$  et leur aimantation à saturation diminue fortement à partir de  $50\text{ }^\circ\text{C}$  jusqu'à leur point de Curie. Cet effet peut être utilisé pour réaliser des pompes statiques autonomes [10, 11, 12, 13]. 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 statiques des composants de ce domaine.

Le but de ce document est de donner des résultats complémentaires par rapport aux travaux antérieurs sur ce sujet. En particulier, la pression statique sera discutée. La première partie présente le principe physique et la théorie de l'effet magnétothermique. Ensuite, un dispositif expérimental est décrit. Enfin, les résultats sont discutés.

## 2. Principe physique d'une pompe magnétothermique

Les ferrofluides ont un comportement paramagnétique [14]. Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, les particules en suspensions, mono-domaines 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 désorientent. 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.

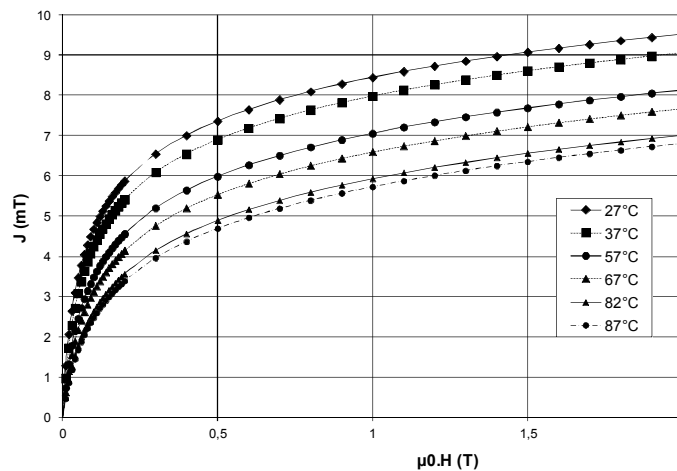


Figure 1 : Diminution de la polarisation d'un ferrofluide Mn-Zn avec la température

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 crée ainsi un déséquilibre de perméabilité relative  $\mu_r$  qui induit à son tour un gradient de pression au sein du ferrofluide comme nous l'expliquerons dans l'article final et comme le montre la Figure 2. Ce principe est à la base du pompage magnétothermique.

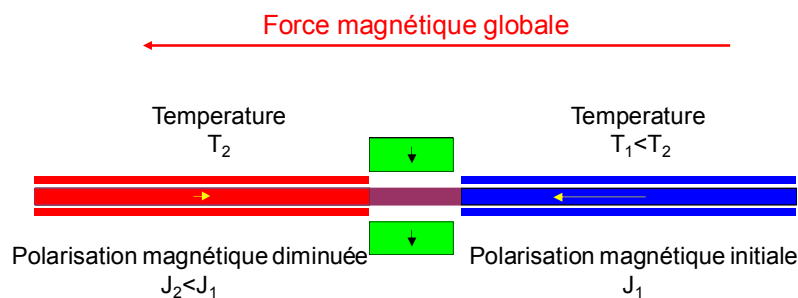


Figure 2 : Principe de création d'une pression statique par couplage magnétothermique

Par le passé, certains auteurs ont essayé de prédire la pression statique engendrée par ce couplage [11, 15]. 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.

## 3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, montré sur la Figure 3, nous permet de mesurer les effets conjugués d'un gradient thermique et d'un champ magnétique sur la pression hydrostatique au sein d'un ferrofluide. Comme le montre cette figure, un barreau de ferrofluide est placé sous un champ magnétique, généré par un électroaimant. De part et d'autre des pôles magnétiques, le ferrofluide est porté à deux températures différentes. Une pression hydrostatique est alors mesurée aux extrémités du barreau de ferrofluide.

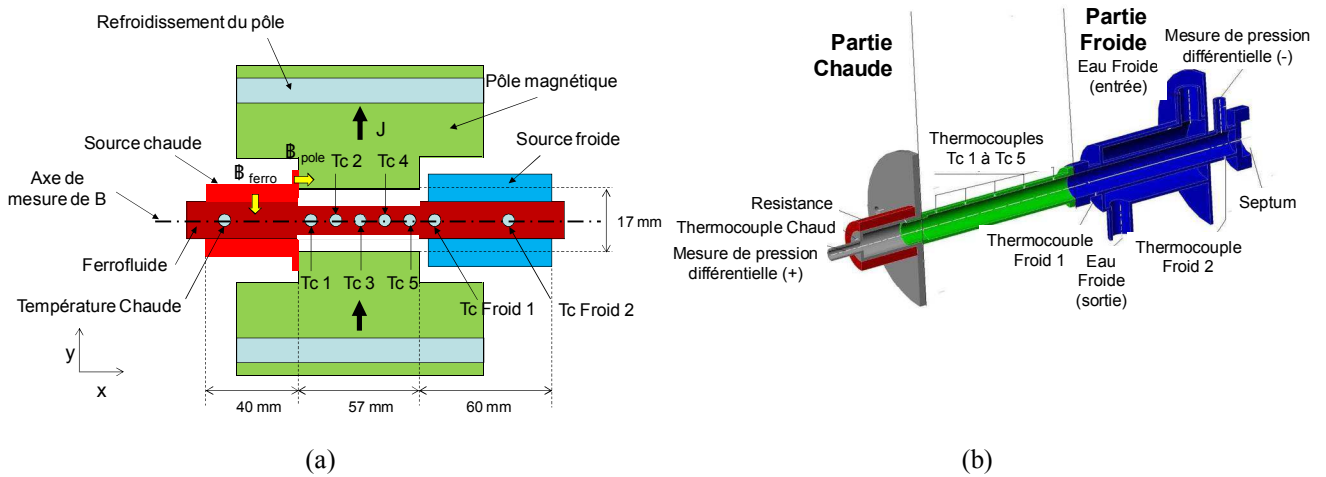


Figure 3 : Représentation du dispositif expérimental

Le champ magnétique  $H_0$  est appliqué à l'aide d'un électroaimant, capable d'appliquer une induction  $B_0$  comprise entre -250 et + 250mT. La température froide est imposée par un échangeur eau-eau coaxial. La source chaude est créée par une résistance bobinée non inductive. Un descriptif et une analyse plus précise de ces composants seront proposés dans l'article final.

L'induction imposée par l'électroaimant est mesurée au centre de ce dernier, sous le barreau de ferrofluide. La pression hydrostatique est mesurée à l'aide d'un capteur de pression différentielle raccordé de part et d'autre du dispositif. Enfin un réseau de huit thermocouples permet de suivre, en temps réel, l'évolution de la température au sein de notre fluide magnétique. Ces derniers permettent de suivre l'évolution dynamique du gradient de température engendré par les sources chaudes et froides.

## 4. Résultats et discussions

Dans le papier final, les résultats pratiques seront présentés selon différents points. Nous traiterons de l'effet du gradient thermique seul, puis de l'effet du champ magnétique seul. Enfin, nous aborderons l'effet du couplage magnétothermique. Comme le montre la Figure 4.a, en régime statique, la pression hydrostatique augmente avec l'écart de température, entre les sources froide et chaude, et avec l'induction imposée. Les résultats que nous montrons sont proches de ceux mesurés par une équipe Porto-ricaine [16], mais sous induction fixée.

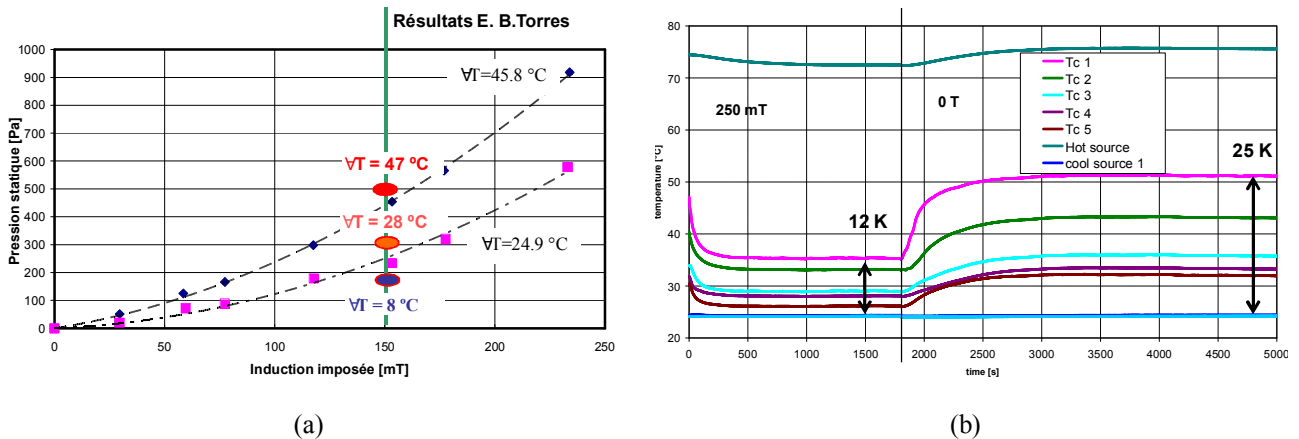


Figure 4 : Evolution de la pression statique avec l'induction (a)  
Evolution des températures internes du canal en fonction du temps (b)

Une étude en régime dynamique permet de mettre en évidence un effet de magnéto-convection parasite. Ce dernier provoque une homogénéisation de la température du ferrofluide placé sous les pôles de l'électroaimant, comme le montre la Figure 4.b, ce qui va à l'encontre d'une création de pression hydrostatique par couplage magnétothermique.

## 5. Conclusion et perspective

Un dispositif expérimental a permis de vérifier la création de pression statique par couplage magnétothermique au sein d'un ferrofluide à basse température de Curie. Cette pression est d'autant plus élevée que l'induction appliquée au ferrofluide est grande et que l'écart de température entre les sources froide et chaude est important. Ceci nous confirme la possibilité de créer un mouvement du ferrofluide permettant la fabrication d'un système de refroidissement autonome

et autorégulé. Par une instrumentation fine, ce dispositif a pu mettre en évidence la présence d'un mouvement de convection parasite mettant en péril la pression hydrostatique initialement désirée.

L'étape suivante de ce travail sera de modéliser ce mouvement parasite, en prenant en compte les différents couplages pouvant exister dans les ferrofluides, dans le but du contrôler et de pouvoir prédire la pression hydrostatique créée par une telle pompe.

## 6. Références

- [1] N. Mohan, T. M. Undeland, W.P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3<sup>rd</sup> Edition, 2003
- [2] J. Jankovskis, D. Stepins, D. Pikulins, Effect of increasing switching frequency in frequency modulated power converters, 9<sup>th</sup> International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), 11-12 Nov. 2010, pages 115-118.
- [3] P. Rondier, M. Fakes, C. Vasilescu, R. Tellier, Power Electronic Cooling Device, Valeo Equipement Electrique, Patent No: US 7,417,857 B2, Aug. 26, 2008.
- [4] J.E. Leland, R. Ponnappan, K.S. Klasing, Experimental Investigation of an air microjet array impingement cooling device, Aerospace Sciences Meeting N°37, 2002, vol 16 pages 187-1912
- [5] A.G. Pautsch, T.A. Shedd, Spray impingement cooling with single  $\bar{\nu}$  and multiple  $\bar{\nu}$  nozzle arrays, International Journal Of Heat and Mass Transfer, Volume 48, issue 15, July 2005, Pages 3167-3175.
- [6] G.S.Cole and al, Method and two-phase spray cooling apparatus, US Patent N° US 6,498,725, B2, Dec.24 2002.
- [7] M. Tawk, Y. Avenas, A. Kedous-Lebouc, M. Petit, Study and realization of a high power density electronics device cooling loop using a liquid metal coolant.
- [8] L.Mao and al, Direct observation of closed-loop ferrohydrodynamic pumping under travelling magnetic field, Physical review B84, Sept. 15 2011.
- [9] R.E.Rosensweig, Ferrohydrodynamics, Cambridge University Press, 1985, ISBN 0521256240, 1985
- [10] L. J. Love, J.F. Jansen, T.E. McKinght, Y. Roth, T.J. Phelps, A Magnetocaloric Pump for Microfluidic applications, IEEE transactions on nanobioscience, vol.3, June 2004
- [11] H. Matsuki, K. Yamasawa, K. Murakami, Experimental considerations on a new automatic cooling device using temperature-sensitive magnetic fluid., 1977
- [12] Q. Li, W. Wenlei, H. Sun, Y. Xuan, investigation on operational characteristics of a miniature automatic cooling device.
- [13] Miguel Riccetti, Optimization and characterization of a magnetocaloric pump using ferrofluids, doctoral thesis, 2009, University of Porto-Rico
- [14] R. Massart, J.C. Bacri, R. Perzynski, Liquides magnétiques ou ferrofluides, techniques de l'ingénieur, 2012
- [15] N.E. Greivell, B. Hannaford, The design of a ferrofluid magnetic pipette, IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING , VOL. 44, N°3, march 1997..
- [16] E. O. Bermudez-Torres, "Design and Mechanical Characterization of a magnetocaloric pump", université de Porto-Rico, Thèse de doctorat, 2007.