

Etude du refroidissement d'un système électromagnétique plongé dans un bain de fluide magnétique

R. Zanella^{1,2}, X. Mininger¹, F. Bouillault¹, C. Nore², E. Berthelot¹, et M. Almanza³

¹GeePs - Group of electrical engineering - Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, 3 & 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif-sur-Yvette CEDEX, France,

E-mail : xavier.mininger@geeps.centralesupelec.fr,

²LIMSI, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Bât 508, rue John von Neumann, Campus Universitaire, F-91405 Orsay, France, E-mail : zanella@limsi.fr

³SATIE, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 61 A. Président Wilson, 94230 Cachan

RESUME - Cet article montre comment dans un système électromagnétique le remplacement du fluide de refroidissement par un ferrofluide permet d'améliorer les échanges thermiques. La première partie présente les équations du couplage thermo-fluidique et la modélisation numérique associée. Le dispositif expérimental permettant la validation du modèle, constitué principalement d'une bobine plongée dans un bain d'huile et de l'instrumentation associée, est ensuite présenté. Par la suite des résultats de simulation viennent illustrer le comportement thermique du dispositif.

Mots-clés—ferrofluide, refroidissement, convection magneto-thermique.

1. INTRODUCTION

Un ferrofluide est une suspension colloïdale de nanoparticules magnétiques dans un solvant, de l'huile dans notre cas [1]. La présence d'un champ magnétique exerce alors sur les particules des forces qui peuvent se transmettre au fluide et participer à sa mise en mouvement. Plusieurs expressions de forces semblent possibles pour étudier cet effet. A été retenue celle donnée par la force d'Helmholtz qui met en avant la nécessité d'avoir un gradient de la température pour obtenir un effet de convection magnéto-thermique [2].

Ce phénomène pourrait donc conduire à une amélioration du refroidissement de systèmes électromagnétiques et permettre l'utilisation uniquement de la convection naturelle, s'affranchissant ainsi de dispositif de pompage. Par ailleurs, il peut être envisageable d'utiliser des huiles végétales qui bien que très visqueuses sont biodégradables et non toxiques. Quelques travaux relatifs au refroidissement de prototypes de transformateurs montrent l'intérêt de l'utilisation de ferrofluides [3], [4]. Nos travaux s'inscrivent dans cette lignée en essayant de mettre en avant les paramètres influents de l'étude. Le dispositif est constitué d'une bobine plongée dans une cuve cylindrique remplie d'un liquide à base d'huile de refroidissement de transformateur Midel avec ou sans des nanoparticules de magnétite [5], [6].

2. MODELISATION

2.1. Equations du problème

L'étude du phénomène de convection magnéto-thermique nécessite la considération de trois physiques : l'électromagnétisme, la fluidique et la thermique. La première est régie par les équations de la magnétostatique (éq.1), on considère donc une succession d'états statiques.

$$\nabla \times H = J, \quad \text{et} \quad \nabla \cdot \mu_0 (H + M) = 0 \quad (1)$$

Dans l'équation (1), H est le champ magnétique et M l'aimantation résultant de la présence des nanoparticules, J étant la densité de courant. Pour les fortes dilutions, on peut supposer que les particules sont sans interaction magnétique entre elles, nous avons alors un comportement paramagnétique du fluide, qui peut être régi par la théorie de Langevin. Pour les faibles champs, l'aimantation est alors proportionnelle au champ magnétique et peut se mettre sous la forme $M = \chi(T) H$, où χ est la susceptibilité magnétique, inversement proportionnelle à la température T , si celle-ci est loin de la température du point de Curie. Les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible newtonien sont considérées pour décrire l'écoulement. A la force magnétique F_m , il est ajouté une force de flottaison résultant de la variation de la densité volumique avec la température dans le cadre de l'approximation de Boussinesq.

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} + \frac{1}{\rho} \nabla p - \text{div}(\nu(T) \text{grad } \mathbf{u}) =$$

$$\alpha g(T - T_0) \mathbf{e}_z + F_m \quad (2)$$

\mathbf{u} représente la vitesse de déplacement du fluide, p la terme de pression, T la température, T_0 la température extérieure, ρ la densité du fluide à la température T_0 , ν la viscosité cinématique et α le coefficient d'expansion thermique. La force magnétique d'Helmholtz peut s'écrire [2] :

$$F_m = -\frac{1}{2} \mu_0 H^2 \text{grad } \chi(T) \quad (3)$$

Les dissipations visqueuses étant négligées, l'équation de conservation d'énergie pour l'aspect thermique se ramène à :

$$\rho c \partial_t T + \rho c (\mathbf{u} \cdot \nabla) T - \lambda \Delta T = q_T \quad (4)$$

où c est la capacité thermique, λ la conductivité thermique et q_T la source de chaleur liée aux pertes joule dans le bobinage, égale à J^2 / σ , avec σ la conductivité du cuivre.

2.2. Dispositif expérimental

Le système expérimental est illustré en Fig. 1, des thermocouples sont placés dans le fluide afin de mesurer l'évolution de la température à partir du moment où le courant constant est injecté dans le bobinage. Afin de s'assurer que les conditions expérimentales sont celles de la modélisation, un asservissement de la puissance en pilotant le courant a été mis en place à l'aide d'une instrumentation « temps réel » dSPACE, permettant de compenser les variations de résistance de la bobine lorsque la température augmente. De plus, l'alimentation permet de contrôler le sens du courant dans chacune des deux couches du bobinage, conduisant alors à l'existence ou non d'un champ magnétique dans le liquide

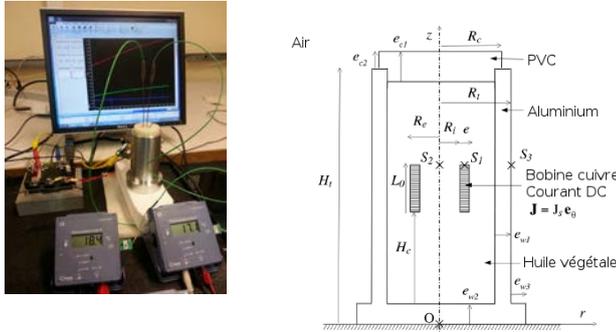


Fig. 1. Expérimentation et géométrie du dispositif, dimension caractéristique $H_i = 12.5\text{cm}$

La modélisation est réalisée à l'aide de la méthode des éléments finis sur une géométrie 2D axisymétrique du dispositif (Fig.1). Le bobinage est considéré dans la modélisation à l'aide d'une homogénéisation de la conductivité thermique et de la capacité thermique entre les différents matériaux (cuivre et huile). Les paramètres matériaux de l'huile sont considérés, si ce n'est la viscosité, indépendants de la température. L'échange thermique sur les frontières est imposé à l'aide d'une condition de Robin avec un coefficient de convection $h=8\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. La température ambiante considérée est de 295K . L'ensemble de la modélisation couplée est intégré dans le logiciel SFEMaNS [6].

3. RESULTATS

Pour les essais, le courant est d'environ 6A afin d'injecter une puissance de $7,8\text{W}$. Sur la figure 2, sont représentées les évolutions temporelles de la température en trois points du dispositif : sur la bobine, sur le bouchon et sur la partie latérale de la cuve (points S1, S2, S3, Fig.1)

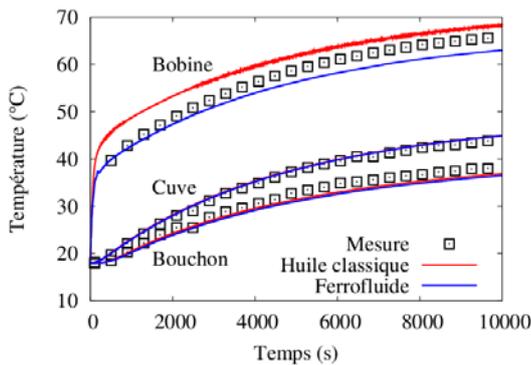


Fig. 2. Evolution de la température en fonction du temps

Dans le cas où le fluide est de l'huile, une concordance des plus satisfaisantes avec les résultats issus de l'expérimentation est obtenue. Les résultats de simulation montrent que le remplacement de l'huile par un ferrofluide, conduisant à une modification des propriétés physiques du fluide et à l'introduction d'une force magnétique, permettrait dans le cas présent d'abaisser la température de la bobine d'environ cinq degrés. Ceci est obtenu grâce à une modification du profil des vitesses du fluide (Fig. 3). Bien que les vitesses maximales soient plus faibles avec le ferrofluide, une deuxième cellule de convection apparaît en-dessous de la bobine, favorisant l'évacuation de la chaleur produite à cet endroit.

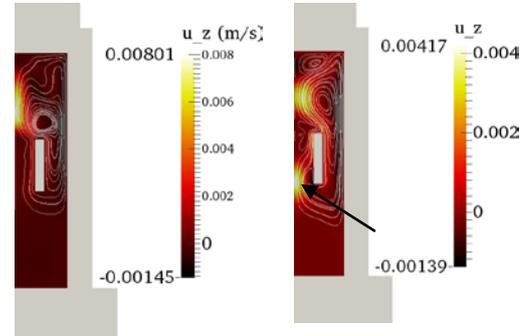


Fig. 3. Distribution de la composante suivant l'axe Oz de la vitesse à gauche dans l'huile, à droite dans le ferrofluide. Une seconde cellule de convection est apparue dans le ferrofluide (flèche).

4. CONCLUSIONS

Ce résumé a présenté rapidement le phénomène de convection magneto-thermique, avec comme application le refroidissement d'un système électromagnétique. Dans l'article final, nous étudierons plus en détail les paramètres permettant de profiter au mieux de cet effet pour optimiser les échanges thermiques en présence d'un fluide. Nous espérons pouvoir présenter également des résultats expérimentaux avec un ferrofluide.

5. REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet financé par le labex LaSIPS. Le développement des codes et les simulations ont été réalisés avec des ressources HPC de l'IDRIS

6. REFERENCES

- [1] J.L Neuringer and R.E. Rosenweig : Ferrohydrodynamic, Phys. Fluids, vol. 7, no. 12, pp. 1927–1937, Dec. 1964
- [2] L.J. Love, J.F. Jansen : ferrofluid field induced flow for microfluidic application, IEEE Trans. On mechatronics, vol. 10, N°1, February 2015
- [3] G.-Y. Jeong, S. P. Jang, H.-Y. Lee, J.-C. Lee, S. Choi, et S.-H. Lee, "Magnetic-Thermal-Fluidic Analysis for Cooling Performance of Magnetic Nanofluids Comparing With Transformer Oil and Air by Using Fully Coupled Finite Element Method," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no.5, pp. 1865-1868, 2013.
- [4] L. Pîslaru-Danescu, A. M. Morega, G. Telipan, M. Morega, J. B. Dumitru, et V. Marinescu, "Magnetic Nanofluid Applications in Electrical Engineering," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 11, pp. 5489-5497, 2013.
- [5] N. Puigmal, A. N. Djoudi, E. Berthelot, R. Zanella, and X. Mininger, "Etudes numériques et expérimentales du refroidissement par bain d'huile d'un système électromagnétique," in Proc. NUMELEC Conf., Paris, France, Nov. 2017
- [6] R. Zanella, C. Nore, F. Bouillault, L. Cappanera, I. Tomas, X. Mininger, and J.-L. Guermond : "Study of Magnetoconvection Impact on a Coil Cooling by Ferrofluid with a Spectral/Finite-Element Method", IEEE Trans. Magn., issue99, pp. 1-4, 2017