

# Etude numérique de l'impact de la magnétoconvection sur le refroidissement d'une bobine par du ferrofluide

Raphaël Zanella<sup>1,2</sup>, Caroline Nore<sup>1</sup>, Frédéric Bouillault<sup>2</sup>, Xavier Mininger<sup>2</sup>, Jean-Luc Guermond<sup>3</sup>, Ignacio Tomas<sup>3</sup> & Loic Cappanera<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LIMSI, CNRS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, Bât 508, rue John von Neumann, Campus Universitaire, F-91405 Orsay, France

<sup>2</sup> GeePs, UMR 8507 CNRS / CentraleSupélec - Universités UPMC et UPSud, 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon, 91192 Gif sur Yvette cedex, France

<sup>3</sup> Department of Mathematics, Texas A&M University, College Station, TX 77843 USA

zanella@limsi.fr

Un ferrofluide est une suspension de nanoparticules magnétiques, de la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  typiquement, dans un liquide non magnétique et non conducteur, tel de l'eau ou de l'huile [1]. Sous l'action d'un champ magnétique extérieur, le ferrofluide, entraîné par les nanoparticules, est mis en mouvement [2]. La force magnétique est proportionnelle à la magnétisation du ferrofluide et au champ magnétique. Du fait de la dépendance de la magnétisation par rapport à la température, un phénomène appelé magnétoconvection est généré en présence d'un gradient de température. L'apport de ce phénomène sur le transfert thermique dans un cas simplifié de transformateur électrique immergé, problème déjà abordé dans [3,4], est mis en évidence numériquement.

Un système constitué d'une bobine plongée dans une cuve cylindrique de ferrofluide à base d'huile végétale est considéré. Les équations de Navier-Stokes incompressible, de la magnétostatique et de la température sont résolues simultanément par le code de recherche SFEMaNS [5]. Les points notables du modèle sont le terme de forçage magnétique, appelée force de Kelvin,  $\mu_0 M \nabla H$  ( $M$  : magnétisation,  $H$  : intensité du champ magnétique) dans le principe fondamental de la dynamique ainsi que le terme source correspondant à l'effet Joule  $j^2/\sigma$  ( $j$  : densité de courant,  $\sigma$  : conductivité électrique de la bobine) dans l'équation de la température. L'algorithme est basé sur une méthode spectrale / éléments finis et permet de prédire la température dans le système entier, bobine incluse, ainsi que l'écoulement du ferrofluide. Avec les paramètres utilisés, la solution est axisymétrique et converge vers un état stationnaire. La comparaison avec l'huile végétale pure montre que la magnétoconvection affecte l'écoulement en générant notamment une cellule de convection supplémentaire. La température est ainsi réduite de quelques degrés grâce aux nanoparticules.

## Références

1. R. E. Rosensweig, "Magnetic Fluids," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, vol. 19, pp. 437-63, 1987.
2. J. L. Neuringer, and R. E. Rosensweig, "Ferrohydrodynamics," *The Physics of Fluids*, vol. 7, no. 12, pp. 1927-1937, Dec. 1964.
3. G.-Y. Jeong, S. P. Jang, H.-Y. Lee, J.-C. Lee, S. Choi, and 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, May 2013.
4. L. Pîslaru-Danescu, A. M. Morega, G. Telipan, M. Morega, J. B. Dumitru, and V. Marinescu, "Magnetic Nanofluid Applications in Electrical Engineering," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 49, no. 11, pp. 5489-5497, Nov. 2013.
5. J.-L. Guermond, R. Laguerre, J. Léorat, C. Nore, "Nonlinear magnetohydrodynamics in axisymmetric heterogeneous domains using a Fourier/finite element technique and an interior penalty method," *J. Comp. Physics*, vol. 228, pp. 2739-2757, 2009.