Étude expérimentale du développement d'instabilités thermoconvectives dans un fluide rhéofluidifiant par une méthodologie IRM

M. DARBOULI, C. METIVIER, S. LECLERC ,
C. NOUAR, D. STEMMELEN , M. BOUTERAA

LEMTA UMR 7563 CNRS - Université de Lorraine,
ENSEM 2 Avenue de la Forêt de Haye TSA 60604
54518 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex
mohamed.darbouli@univ-lorraine.fr

Résumé étendu

L'étude des transferts thermiques par conduction et convection représente un vaste champ d'applications industrielles et environnementales. La plupart des fluides non-Newtoniens rencontrés présentent un caractère rhéofluidifiant, c'est à dire une diminution de la viscosité avec une augmentation du taux de cisaillement. Dans cette étude, la configuration étudiée est celle de Rayleigh-Bénard, pour laquelle l'origine de l'instabilité convective est due à un gradient vertical de température entre deux plaques horizontales, distantes de d, qui induit une force de poussée d'Archimède. Tant que le nombre de Rayleigh $Ra = \dfrac{\rho g \beta \Delta T d^3}{\mu \kappa}$, c'est à dire l'intensité du gradient thermique, reste faible, le fluide reste au repos et le régime est conductif. Il a été observé expérimentalement et prouvé théoriquement que pour les fluides Newtoniens, des structures convectives (sous forme de rouleaux) se forment, à partir d'une valeur critique du nombre de Rayleigh $Ra_c = 1708$. L'effet de la rhéofluidification sur les conditions d'instabilités ainsi que sur les motifs de convection a été peu examiné. Dans le cas où le fluide présente un plateau Newtonien à faibles valeurs de taux de cisaillement, les études expérimentales [1]-[2] et théoriques (analyse linéaire de stabilité) [3]-[5] indiquent que le nombre de Rayleigh est similaire à celui obtenu pour un fluide Newtonien. Dans ces études théoriques, le comportement rhéofluidifiant est décrit par le modèle de Carreau :

$$\mu = \mu_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \tag{1}$$

où μ_0 est la viscosité à faible taux de cisaillement $\dot{\gamma}$, λ le temps de relaxation du fluide et n l'indice de rhéofluidification. Les analyses faiblement non linéaires développées dans [3]-[5], mettent en évidence une transition surcritique pour un degré de rhéofluidifation $\alpha = \dfrac{n-1}{2} \lambda^2 \dfrac{\kappa^2}{d^4}$ faible. L'augmentation du degré de rhéofluidification conduit à une bifurcation sous-critique dès lors que $\alpha > \alpha_c = 2.14\ 10^{-4}$. Par ailleurs, les seules structures stables possibles proches du démarrage sont des rouleaux d'après [5].

Nous proposons d'étudier expérimentalement l'influence de la rhéofluidification sur l'apparition des instabilités thermoconvectives et leur évolution en utilisant l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM). Cette technique est utilisée pour mesurer les champs de vitesse et de température. Le fluide rhéofluidifiant utilisé est une solution aqueuse de gomme de Xanthane (polymère semi rigide) à différentes concentrations massiques comprises entre 0.1 et 0.2 %. Ces fluides sont bien décrits par le modèle de Carreau, leurs propriétés rhéologiques ont été mesurées. L'augmentation de la concentration a pour effet

d'augmenter μ_0, ainsi que le degré de rhéofluidification. Néanmoins, dans la gamme de concentrations étudiées, le degré de rhéofluidification est $\alpha \sim 10^{-7}$. D'après [5], le type de bifurcation attendu est surcritique.

La cavité de Rayleigh-Bénard est cylindrique, de diamètre $D = 0.12$ m et de hauteur $d = 0.02$ m, c'est à dire de rapport d'aspect $\Gamma = D/d = 6$. La température des plaques supérieures et inférieures en saphir $T1$ et $T2$ sont contrôlées par des bains thermostatés.

La validation du dispositif avec un fluide Newtonien (sirop de glucose) permet d'obtenir par visualisation des champs de vitesse le démarrage de l'instabilité pour $Ra = 1747$ et permet de montrer que les structures thermoconvectives sont des rouleaux, ce qui est en bon accord avec la théorie. L'expérience a été poursuivie jusqu'à $Ra \approx 3Ra_c$. Dans cette gamme de Ra, les rouleaux sont stables.

Concernant les fluides rhéofluidifiants, les résultats expérimentaux pour les différentes concentrations utilisées montrent que le nombre de Rayleigh critique est $Ra_c = 1708 \pm 6\%$, ce qui en accord avec la théorie linéaire. Pour les concentrations de 0.1% et 0.15%, des rouleaux apparaissent au démarrage de l'instabilité. Ce motif de convection reste stable jusqu'à $Ra \approx 2Ra_c$. Pour $Ra > 2Ra_c$, les rouleaux ne sont plus stables et des motifs plus complexes apparaissent. Pour les concentrations de 0.18% et 0.2%, des polygones apparaissent au démarrage de l'instabilité. Ces polygones restent stable jusqu'à $Ra \approx 1.5Ra_c$. Pour $Ra > 1.5Ra_c$, les polygones perdent leur stabilité et des rouleaux apparaissent.

Des valeurs quantitatives de vitesse sont proposées et comparées aux résultats théoriques. Finalement, des premiers résultats de champs de température obtenus par IRM seront présentés.

Références

[1] S. F. Liang, and A. Acrivos. Experiments on buoyancy-driven convection in non-Newtonian fluids. Rheol. Acta **9**, 447-455 (1970).

[2] H. Ozoe, and S.W. Churchill. Hydrodynamic stability and natural convection in Newtonian and non-Newtonian fluids heated from below. AIChE J. **69 (131)**, 126-132 (1973).

[3] N. J. Balmforth, A. Rust , "Weakly nonlinear viscoplastic convection," J. Non-Newtonian Fluid Mech. **158**, 36 (2008).

[4] B. Albaalbaki, R. E. Khayat, "Pattern selection in the thermal convection of non-Newtonian fluids," J. Fluid Mech. **668**, 500 (2011).

[5] M. Boutera, C. Nouar, E. Plaut, C. Métivier, and A. Kalck, , "Weakly nonlinear analysis of Rayleigh-Bénard convection in shear-thinning fluids : nature of the bifurcation and pattern selection,". J. Fluid Mech. **767**, 696 (2015).