



Sédimentation d'une particule sphérique dans une suspension isodense cisailée de façon oscillante

Frédéric Blanc, Elisabeth Lemaire, François Peters

► To cite this version:

Frédéric Blanc, Elisabeth Lemaire, François Peters. Sédimentation d'une particule sphérique dans une suspension isodense cisailée de façon oscillante. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440374

HAL Id: hal-03440374

<https://hal.science/hal-03440374>

Submitted on 22 Nov 2021

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.

Sédimentation d'une particule sphérique dans une suspension isodense cisailée de façon oscillante

Frédéric Blanc, Elisabeth Lemaire, François Peters

Laboratoire de Physique de la Matière Condensée. CNRS-Université de Nice, UMR 7336, 06108
Nice Cedex 2, France

Résumé :

Les expériences qui sont présentées ici concernent la sédimentation d'une sphère dense de diamètre millimétrique dans une suspension isodense de particules plus petites dispersées dans un fluide newtonien, le tout étant placé dans une cellule de Couette d'axe vertical montée sur un rhéomètre. La vitesse de sédimentation stationnaire de la sphère constitue une mesure de la viscosité qu'elle ressent. Elle dépend de la microstructure induite par le mouvement même de la sphère. Lorsque le cylindre interne de la cellule de Couette est mis en mouvement de rotation oscillante, on peut assister à une modification de la vitesse de sédimentation. Cette modification dépend à la fois de l'amplitude et de la fréquence du cisaillement oscillant. Elle peut être interprétée comme l'influence du cisaillement (orthogonal) oscillant sur la microstructure induite par la sédimentation.

Abstract :

The experiments presented here relate to the settling of a dense millimeter sized sphere in a suspension of neutrally buoyant smaller particles in a Newtonian fluid, the whole being placed in a Couette cell mounted on a rheometer. The terminal settling velocity of the sphere is related to the viscosity profile around it. It depends on the microstructure induced by the motion of the sphere itself. When oscillatory rotation of the inner cylinder of the Couette cell is set, a modification of the sedimentation velocity is observed. This change is dependent on both the amplitude and frequency of the oscillatory shear. It can be interpreted as the influence of (orthogonal) oscillatory shear on the microstructure induced by settling.

1 Introduction

Lorsqu'une suspension de particules solides immergées dans un liquide newtonien est cisailée, la distribution spatiale relative des particules, qui peut être au départ isotrope, est modifiée. Cette microstructure dynamique, renouvelée constamment par l'action du cisaillement, est communément décrite par la fonction de distribution de paires de particules, qui mesure la probabilité de présence d'une particule au voisinage d'une particule de référence en fonction de la position relative des deux particules par rapport aux axes du cisaillement. Dans un écoulement de cisaillement simple, en première approximation, les paires de particules sont préférentiellement orientées dans la direction de compression de l'écoulement, avec une zone de déplétion dans le quadrant de dilatation. Cette microstructure a été très étudiée d'un point de vue numérique [1, 2, 3], théorique [4] et expérimental [5, 6, 7] dans le domaine des suspensions browniennes, mais aussi pour les suspensions non-browniennes qui nous occupent ici [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. La fonction de distribution de paires déterminée expérimentalement au sein d'une suspension cisailée de particules de diamètre $170\mu m$ et de fraction volumique 35% est représentée sur la figure 1. Dans de telles suspensions, les particules s'approchent très près les unes des autres, et ce d'autant plus que la fraction volumique est importante [8]. Les interactions hydrodynamiques de même que les autres forces deviennent donc très importantes. Ces dernières sont même à l'origine de l'asymétrie de la microstructure [15]. Dans les cas de particules de taille 170 microns, nous avons montré qu'il s'agissait de forces de contact direct [13]. L'ensemble de ces interactions

est à l'origine d'une forte augmentation de la viscosité, ainsi que de l'apparition de contraintes normales [8, 16, 17, 18, 19]. L'existence de cette microstructure a d'abord été mise en évidence par des

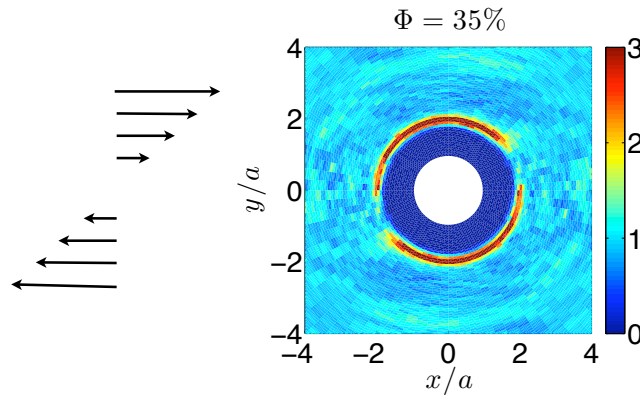


FIGURE 1 – Fonction de distribution de paires. Particules de diamètre $170\mu m$ (fraction volumique 35% [14])

expériences de rhéologie en inversion de cisaillement publiées par Gadala-Maria et Acrivos [20] : ces auteurs ont montré qu'une suspension préalablement cisailée et soumise à une inversion du sens de cisaillement présentait une diminution brusque de viscosité avant de revenir à la viscosité stationnaire, et ce sur une déformation caractéristique de l'ordre de l'unité. Ainsi, l'inversion du cisaillement induit une réorganisation de la microstructure, à l'origine d'une diminution de la viscosité, diminution relative d'autant plus importante que la fraction volumique est importante. Ces expériences ont été récemment revisitées grâce à des techniques de rhéométrie locale [21]. Le minimum de viscosité a pu être identifié à un état où la microstructure influe peu sur la rhéologie, vraisemblablement à cause de l'éloignement transitoire entre les particules. D'autre part, le rapport de la viscosité stationnaire sur la viscosité au minimum semble diverger lorsque la fraction volumique approche sa valeur maximale, ce qui signifie que l'influence de la microstructure est déterminante à ces hautes fractions volumiques.

Des expériences en cisaillement oscillant [20, 22, 23] ont également montré que la viscosité mesurée dépendait de façon importante de l'amplitude du cisaillement : lorsque l'amplitude est grande devant 1, on retrouve la viscosité stationnaire. La microstructure stationnaire est donc reconstruite complètement à chaque oscillation. En revanche, une diminution de l'amplitude de la déformation induit une diminution de la viscosité, qui augmente de nouveau pour des amplitudes inférieures à une valeur typique de 1. Cette valeur typique diminue pour des fractions volumiques croissantes. Lors de simulations de monocouches de particules, Bricker et Butler [24] ont mis en évidence des évolutions comparables de la viscosité avec l'amplitude de déformation, qu'ils ont pu relier à des variations de la microstructure. L'évolution de cette microstructure met en jeu des mécanismes irréversibles du point de vue hydrodynamique, ainsi que le montrent les expériences publiées par Pine et al. [25] et Corte et al. [26] concernant des suspensions non-browniennes cisailées de façon oscillante. Ces auteurs ont pu montrer que pour des amplitudes de déformation importante, les particules subissaient un mouvement de diffusion induit par le cisaillement, sans limite dans le temps. En revanche, pour des amplitudes inférieures à une valeur critique dépendant de la fraction volumique, ce mouvement de diffusion disparaît quasiment au bout d'un régime transitoire. Cet état final où les particules ne se rencontrent plus correspond également à une viscosité plus faible que la viscosité stationnaire.

La sédimentation d'une sphère de rayon a_f dans une suspension isodense de particules de rayon a_s au repos a déjà donné lieu à quelques études [27, 28], notamment en raison de l'intérêt présenté par la technique de rhéométrie par chute de particules. Ces études ont en particulier montré des effets de bords non-newtoniens très importants, surtout pour des fractions volumiques élevées (supérieures à 40%). Dans le cas d'un récipient cylindrique de section circulaire de rayon R_{cyl} , lorsque R_{cyl}/a_s est inférieur à une centaine, cela se traduit par un retard important à l'établissement d'une vitesse stationnaire pour la sphère qui chute [28]. D'autre part la viscosité apparente déduite de la vitesse stationnaire, qui est diminuée par les parois, conduit manifestement à une surestimation de la viscosité. Malheureusement,

les auteurs ne comparent pas systématiquement la viscosité apparente avec la viscosité mesurée par un rhéomètre rotatif plus classique. De même l'origine des effets de bords restent en grande partie inconnus.

En ce qui concerne la microstructure, elle est induite par le passage même de la sphère, et dépend donc, comme le taux de cisaillement et la déformation cumulée subie par la suspension, de la position relative à la sphère. De ce fait, on peut supposer que cette microstructure est orientée par le tenseur de gradient de vitesse, et présente une symétrie axiale autour de l'axe vertical, comme la représentation schématique de la figure 2 le suggère. La question que nous posons ici est la suivante : dans quelle mesure un cisaillement simple dans le plan orthogonal à l'axe vertical est-il capable de modifier la microstructure induite par la chute de la sphère autour d'elle, et donc le profil de viscosité ainsi que sa vitesse de sédimentation. L'utilisation d'un cisaillement pour modifier la microstructure et la viscosité

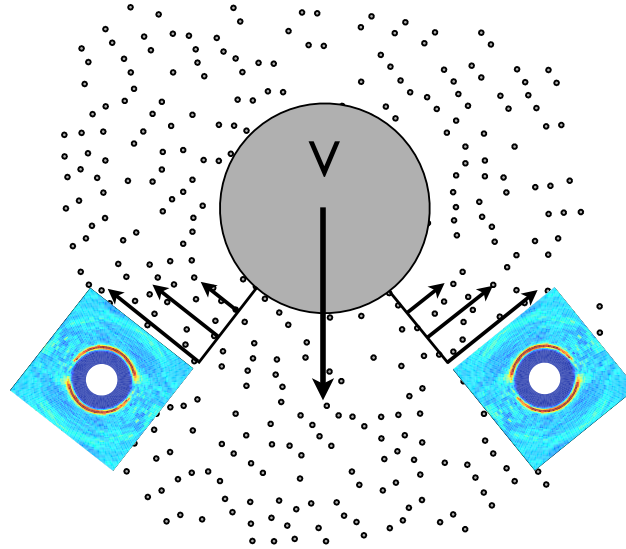


FIGURE 2 – Représentation schématique de la microstructure induite par la sédimentation d'une sphère au sein d'une suspension.

apparente d'un liquide cisailé par ailleurs de façon orthogonale s'est déjà montrée fructueuse dans le cas de la sédimentation d'une suspension de particules dans un fluide à seuil [29] ou dans le cas de deux écoulements rhéométriques [30, 23]. Dans cette dernière étude, Barral a superposé à un écoulement torsionnel plan un écrasement oscillant en faisant vibrer un des plans de la géométrie. De cette façon, il a obtenu une diminution importante de la viscosité sentie par l'écoulement de cisaillement permanent.

2 Etude expérimentale

2.1 Caractéristiques des matériaux utilisés

Les suspensions sont constituées de particules de PMMA de diamètres $31 \pm 4 \mu\text{m}$ (Société Microbeads) et de masse volumique approximative $\rho_s = 1178 \text{ kg.m}^{-3}$. Ces particules sont immergées dans un liquide newtonien de même masse volumique et indice optique (Société Cargille). Les suspensions ainsi constituées sont transparentes pourvu que la température soit fixée à 34°C . La viscosité du fluide suspendant à cette température vaut $\eta_0 = 1.02 \text{ Pa.s}$. A la fraction volumique étudiée ici, 45%, la viscosité de la suspension vaut $\eta = 30.6 \text{ Pa.s}$. La figure 3 représente la viscosité réduite η/η_0 en fonction de la déformation totale après une inversion de cisaillement prise comme origine de la déformation. La brusque diminution de la viscosité et le retour à sa valeur stationnaire $\eta/\eta_0 = 30$ correspond à une réorganisation de la microstructure qui doit s'adapter à la nouvelle direction du cisaillement [21].

Les sphères dont la chute est étudiée sont des billes de roulement en acier de diamètre $2a_f = 1 \text{ mm}$, et de densité $\rho_f = 7700 \text{ kg.m}^{-3}$.

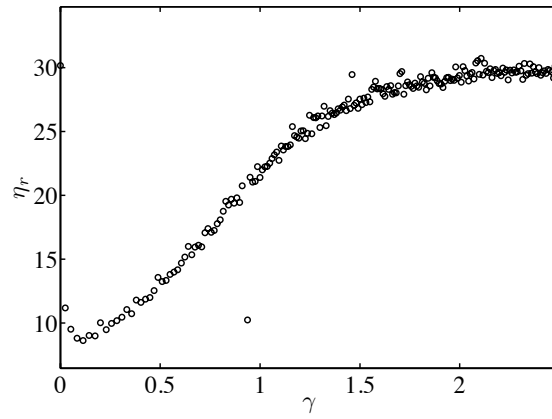


FIGURE 3 – Viscosité réduite en fonction de la déformation totale après inversion du cisaillement

2.2 Dispositif expérimental

La suspension est placée dans un récipient cylindrique de diamètre $2R_o=48$ mm et de hauteur 10 cm fixé sur un rhéomètre Thermofisher Mars II (Figure 4). Le rotor est un cylindre de diamètre $2R_i=28$ mm et de hauteur 10 cm. Les pièces de la géométrie sont transparentes et de même indice que la suspension. L'ensemble du dispositif est inséré dans une boîte dont la température est contrôlée au dixième de degré, si bien que la sphère sédimentant est parfaitement visible. La surface extérieure du

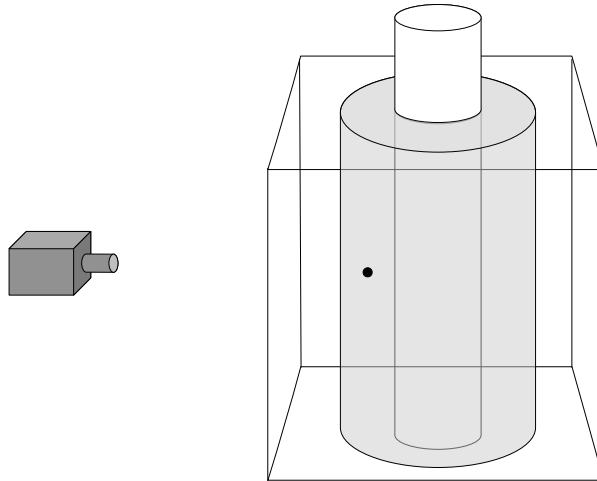


FIGURE 4 – Représentation schématique du dispositif expérimental

récipient est un cylindre vertical de section carrée. Une caméra (Basler acA 2000-340) placée devant une des faces du récipient permet la visualisation de la sphère au cours de son mouvement. Un capot placé sur le récipient et percé d'un trou de diamètre 1mm à la distance 19 mm de l'axe de la géométrie, c'est à dire au centre de l'entrefer, permet l'introduction de la bille. Le cylindre interne est mis en rotation à la fréquence f de sorte que son déplacement angulaire $A(t)$ s'écrit :

$$A = A_0 \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

2.3 Résultats préliminaires

La figure 5 représente la vitesse de sédimentation d'une sphère dans une suspension de fraction volumique 45% , avec et sans oscillation du cylindre interne. L'amplitude d'oscillation vaut $A_0=9.10^{-2}$ rad, la fréquence $f=1$ Hz. Dans les deux cas, la vitesse de sédimentation se stabilise à une distance d'environ

20 $a_f = 10$ mm de la surface libre ($z=0$) du liquide, ce qui correspond à la valeur de l'entrefer $R_o - R_i$. En l'absence d'oscillation, la viscosité déduite de la vitesse de sédimentation v_s , $\eta_{app} = 2/9a_f^2(\rho_f - \rho_s)g/v_s$, vaut environ 16 Pa.s. Cette valeur inférieure à la viscosité stationnaire mesurée en rhéométrie de Couette suggère que la structuration de la suspension par le passage de la sphère n'est pas complète. D'autre part, l'oscillation du cylindre induit le doublement de la vitesse de sédimentation de la sphère, c'est à dire la diminution de moitié de la viscosité apparente de la suspension. Ceci est à comparer à la courbe de la figure 3, qui montre que la viscosité de la suspension est divisée par trois lorsque la microstructure est détruite par l'inversion du cisaillement. L'amplitude de la déformation oscillante peut ici être évaluée par $\gamma_0 \sim A_0 R_i / (R_o - R_i) \sim 0.126$ qui est donc comparable à la déformation nécessaire pour obtenir le minimum de viscosité lors de l'inversion de cisaillement (figure 3). Il est donc possible de modifier de façon très significative la microstructure stationnaire induite par la sédimentation de la sphère grâce à l'application d'un cisaillement de symétrie complètement différente. Cette diminution de viscosité est fortement dépendante de l'amplitude et de la fréquence d'oscillation.

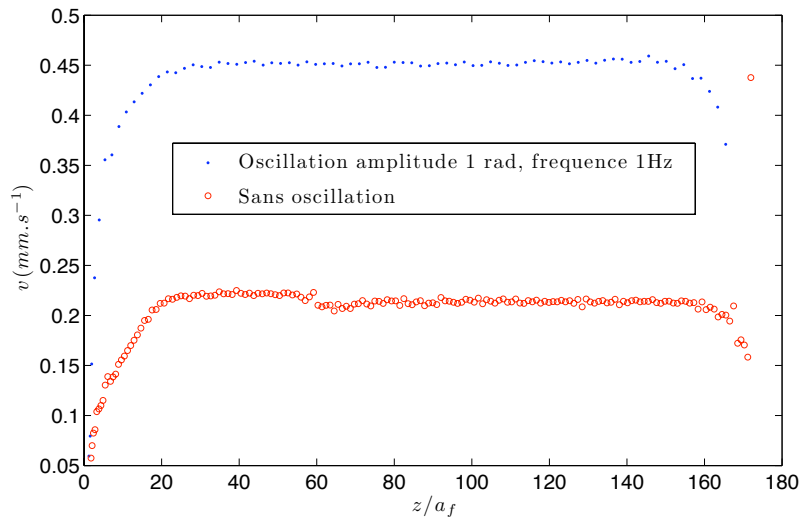


FIGURE 5 – Représentation schématique du dispositif expérimental

Références

- [1] Bossis, G. and Brady, J. (1987) Self-diffusion of brownian particles in concentrated suspensions under shear. *The Journal of chemical physics* **87** 5437.
- [2] Foss, D. R. and Brady, J. F. (2000) Structure, diffusion and rheology of brownian suspensions by stokesian dynamics simulation. *Journal of Fluid Mechanics* **407** 167–200.
- [3] Morris, J. and Katyal, B. (2002) Microstructure from simulated brownian suspension flows at large shear rate. *Physics of Fluids* **14** 1920.
- [4] Brady, J. and Morris, J. (1997) Microstructure of strongly sheared suspensions and its impact on rheology and diffusion. *Journal of Fluid Mechanics* **348** 103–139.
- [5] Wagner, N. J. and Ackerson, B. J. (1992) Analysis of nonequilibrium structures of shearing colloidal suspensions. *The Journal of chemical physics* **97** 1473.
- [6] Gao, C., Kulkarni, S., Morris, J., and Gilchrist, J. (2010) Direct investigation of anisotropic suspension structure in pressure-driven flow. *Physical Review E* **81** 041403.
- [7] Cheng, X., McCoy, J. H., Israelachvili, J. N., and Cohen, I. (2011) Imaging the microscopic structure of shear thinning and thickening colloidal suspensions. *Science* **333** 1276–1279.
- [8] Sierou, A. and Brady, J. (2002) Rheology and microstructure in concentrated noncolloidal suspensions. *Journal of Rheology* **46** 1031.

- [9] Drazer, G., Koplik, J., Khusid, B., and Acrivos, A. (2004) Microstructure and velocity fluctuations in sheared suspensions. *Journal of Fluid Mechanics* **511** 237–263.
- [10] Yeo, K. and Maxey, M. (2010) Dynamics of concentrated suspensions of non-colloidal particles in couette flow. *Journal of Fluid Mechanics* **649** 205–231.
- [11] Wilson, H. and Davis, R. (2000) The viscosity of a dilute suspension of rough spheres. *Journal of Fluid Mechanics* **421** 339–367.
- [12] Rampall, I., Smart, J., and Leighton, D. (1997) The influence of surface roughness on the particle-pair distribution function of dilute suspensions of non-colloidal spheres in simple shear flow. *J. Fluid Mech.* **339** 1–24.
- [13] Blanc, F., Peters, F., and Lemaire, E. (2011) Experimental signature of the pair trajectories of rough spheres in the shear-induced microstructure in noncolloidal suspensions. *Physical Review Letters* **107** 208302.
- [14] Blanc, F., Lemaire, E., Meunier, A., and Peters, F. (2013) Microstructure in sheared non-brownian concentrated suspensions. *Journal of Rheology* **57** 273–292.
- [15] Drazer, G., Koplik, J., Khusid, B., and Acrivos, A. (2002) Deterministic and stochastic behaviour of non-brownian spheres in sheared suspensions. *Journal of Fluid Mechanics* **460** 307–335.
- [16] Zarraga, I., Hill, D., and Leighton Jr, D. (2000) The characterization of the total stress of concentrated suspensions of noncolloidal spheres in newtonian fluids. *Journal of Rheology* **44** 185.
- [17] Deboeuf, A., Gauthier, G., Martin, J., Yurkovetsky, Y., and Morris, J. F. (2009) Particle pressure in a sheared suspension : A bridge from osmosis to granular dilatancy. *Physical review letters* **102** 108301.
- [18] Boyer, F., Pouliquen, O., and Guazzelli, É. (2011) Suspensions in a tilted trough : second normal stress difference. *J. Fluid Mech.* **686** 5.
- [19] Dbouk, T., Lobry, L., and Lemaire, E. (2013) Normal stresses in concentrated non-brownian suspensions. *Journal of Fluid Mechanics* **715** 239–272.
- [20] Gadala-Maria, F. and Acrivos, A. (1980) Shear-induced structure in a concentrated suspension of solid spheres. *Journal of Rheology* **24** 799.
- [21] Blanc, F., Peters, F., and Lemaire, E. (2011) Local transient rheological behavior of concentrated suspensions. *Journal of Rheology* **55** 835.
- [22] Bricker, J. M. and Butler, J. E. (2006) Oscillatory shear of suspensions of noncolloidal particles. *Journal of rheology* **50** 711–728.
- [23] Barral, Q. (2011) *Superposition d'écoulements orthogonaux dans des fluides complexes : mise en place de l'expérience, application aux suspensions et aux fluides à seuil*. Ph.D. thesis, Université Paris-Est.
- [24] Bricker, J. and Butler, J. (2007) Correlation between stresses and microstructure in concentrated suspensions of non-brownian spheres subject to unsteady shear flows. *Journal of rheology* **51** 735.
- [25] Pine, D., Gollub, J., Brady, J., and Leshansky, A. (2005) Chaos and threshold for irreversibility in sheared suspensions. *Nature* **438** 997–1000.
- [26] Corté L., Chaikin, P., Gollub, J., and Pine, D. (2008) Random organization in periodically driven systems. *Nature Physics* **4** 420–424.
- [27] Mondy, L., Graham, A., and Jensen, J. (1986) Continuum approximations and particle interactions in concentrated suspensions. *Journal of Rheology* **30** 1031–1052.
- [28] Reardon, P. T., Graham, A. L., Feng, S., Chawla, V., Admuthe, R. S., and Mondy, L. A. (2007) Non-newtonian end effects in falling ball viscometry of concentrated suspensions. *Rheologica acta* **46** 413–424.
- [29] Ovarlez, G., Bertrand, F., Coussot, P., and Chateau, X. (2012) Shear-induced sedimentation in yield stress fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*.
- [30] Hanotin, C., Kiesgen de Richter, S., Marchal, P., Michot, L., and Baravian, C. (2012) Vibration-induced liquefaction of granular suspensions. *Physical Review Letters* **108** 198301.