



# Etudes numériques et expérimentales sur les suspensions de fibres et de sphères solides

Patrice Laure, Grégory Beaume, Edith Peuvrel-Disdier, Michel Vincent

► **To cite this version:**

Patrice Laure, Grégory Beaume, Edith Peuvrel-Disdier, Michel Vincent. Etudes numériques et expérimentales sur les suspensions de fibres et de sphères solides. Association Française de Mécanique. CFM'09 - XIXème Congrès Français de mécanique, Aug 2009, Marseille, France. CFM, 5 p., 2009. <hal-00509320>

**HAL Id: hal-00509320**

**<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00509320>**

Submitted on 26 Jan 2012

**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.

# Etudes numériques et expérimentales sur les suspensions de fibres et de sphères solides

P. LAURE <sup>a</sup>, G. BEAUME<sup>b,c</sup>, E. PEUVREL-DISDIER <sup>c</sup>, M. VINCENT <sup>c</sup>

*a. Laboratoire J.-A. Dieudonné, UMR 6621 CNRS, Parc Valrose, 06108 Nice cedex 2, b. Schneider Electric, Technopôle 38 TEC, F-38000 Grenoble, c. Centre de Mise Forme des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris-UMR 7635 CNRS, 06904 Sophia Antipolis*

## Résumé :

*Une méthode numérique a été développée afin de permettre le calcul du mouvement de particules solides dans un fluide en cisaillement. Les calculs sur un volume élémentaire permettent d'étudier l'évolution de l'orientation de particules allongées pour un fluide chargé en particules sphériques. Finalement, des observations expérimentales sont faites en utilisant des outils de rhéo-optique.*

## Abstract :

*This paper is devoted the behavior of suspension of fiber-spheres particles. We pointed out by experimental and numerical observations that the Jeffery approximation is no more valid as the concentration of spherical particles increases*

**Mots clefs :** Eléments Finis, Domaines Fictifs, Suspension, Orientation de Fibre, Rhéo-Optique

## 1 Introduction

L'orientation de particules allongées dans des fluides de différentes natures est un problème important dans de nombreuses applications. En particulier de nombreux matériaux composites sont fabriqués par l'ajout de particules sphériques et de fibres plus ou moins longues dans une matrice de polymère. Cela a pour but d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau composite. Cette amélioration va fortement dépendre de l'orientation des fibres et du degré de dispersion des différentes particules dans le produit final. Par conséquent, une meilleure description du mouvement des particules solides dans un fluide complexe est importante pour mieux évaluer l'influence du procédé d'injection sur les caractéristiques mécaniques du composite après solidification.

Nous avons développé une méthode numérique qui permet de calculer le mouvement des fibres en utilisant une méthode éléments finis et une approche multi-domaine avec deux phases (le fluide visqueux et le corps rigide) [1]. Cette formulation est bien adaptée pour étudier les suspensions de micro ou nano particules dans un écoulement de cisaillement et peut être facilement étendue aux fluides visco-élastiques. Les calculs sont faits sur un volume élémentaire soumis à un champ de cisaillement constant qui peut-être imposé en utilisant les conditions limites bipériodiques de Lee Edwards [2]. On restreint notre étude à une suspension composée d'une fibre et de sphères. L'objectif est d'analyser l'influence de la concentration en sphères sur la rotation de la fibre. Bien que le mouvement d'une fibre isolé est bien décrite par la théorie de Jeffery [3], le comportement d'une fibre en interaction avec des particules sphériques est moins étudié.

D'un autre côté, des observations expérimentales sont faites en utilisant un rhéomètre plan-plan transparent couplé à un microscope optique [4]. On trouve que si la concentration en particule augmente la période de rotation de la fibre augmente. De plus la fibre peut changer de plan de rotation : elle peut rester dans le plan de cisaillement, puis brusquement passer dans le plan perpendiculaire. Le nombre de fois où ce changement de plan de rotation intervient, augmente avec la concentration en particules sphériques.

## 2 Le mouvement de Jeffery

Il est bien connu que le mouvement d'une particule axisymétrique dans un fluide Newtonien soumis à un cisaillement simple est décomposé en un mouvement de rotation autour de son axe de symétrie et la rotation de cet axe par rapport à l'axe de vortécité de l'écoulement non perturbé [3]. Les relations de Jeffery [3] donnent l'évolution du vecteur  $\mathbf{p} = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$  colinéaire à cet axe. Pour un rapport d'aspect  $\beta$  et un cisaillement simple ( $\mathbf{v} = (\dot{\gamma}y, 0, 0)$ ), on obtient une solution analytique pour les deux angles

$$\tan \phi = \frac{1}{\beta} \tan \left( C_\phi - \frac{\beta}{\beta^2 + 1} \dot{\gamma} t \right) \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{C_\theta}{(\beta^2 \sin^2 \phi + \cos^2 \phi)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

où les deux coefficients  $C_\phi$  et  $C_\theta$  dépendent des conditions initiales. Le cisaillement macroscopique  $\dot{\gamma}$  peut directement être relié à la période de rotation  $T$

$$T = \frac{2\pi}{\dot{\gamma}} \left( \frac{\beta^2 + 1}{\beta} \right) \quad (3)$$

Si  $\theta_0 \neq \pi/2$ , la fibre a un mouvement de rotation autour de l'axe  $Oz$ . L'amplitude de cette orbite va dépendre de la position initiale et le mouvement ressemble à un mouvement de "kayaking". Malheureusement, le dispositif expérimental peut seulement enregistrer le mouvement de la fibre dans le plan  $(x, z)$ . Ce mouvement est décrit par l'angle  $\alpha$  pour lequel la solution de Jeffery s'écrit (voir figure 1b) :

$$\tan \left( \frac{\pi}{2} - \alpha \right) = C_\theta \cos \left( -\frac{2\pi t}{T} + C_\phi \right) \quad (4)$$

Il faut noter que la solution de Jeffery est obtenue analytiquement pour une ellipsoïde mais elle peut être étendue aux particules cylindriques si on utilise un rapport de forme équivalent [5].

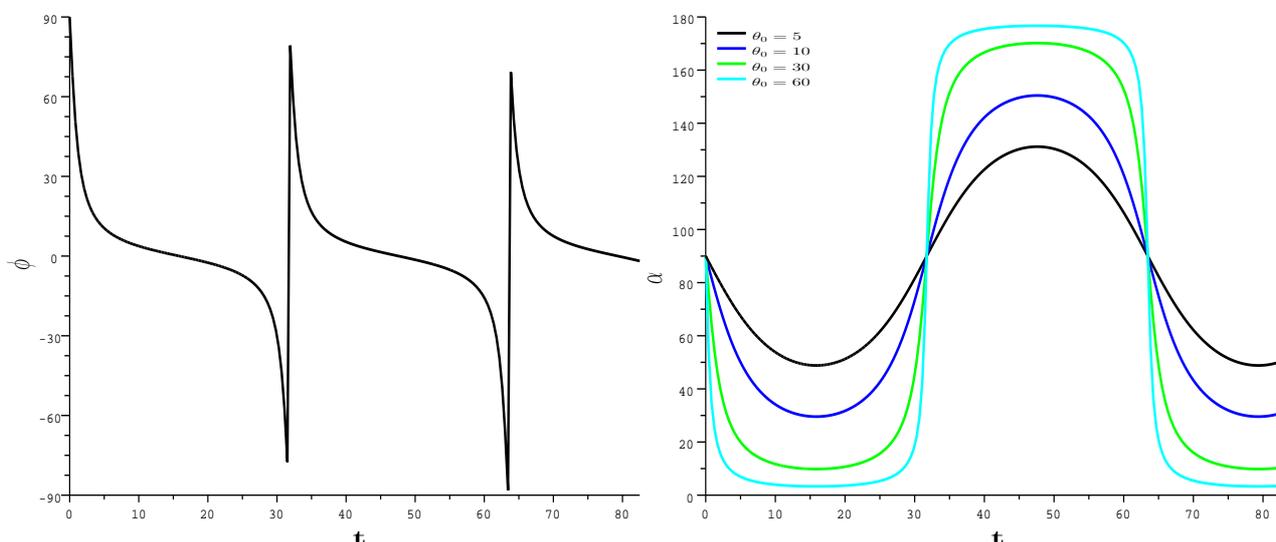


FIG. 1 – Evolution des angles  $\phi$  et  $\alpha$  pour des valeurs initiales différentes de  $\theta$ ;  $\beta = 10$  et  $\dot{\gamma} = 1$ .

### 3 Observations expérimentales

#### 3.1 Le dispositif rhéo-optique

La suspension est observée pendant qu'elle est soumise à un cisaillement simple à la température de la pièce ( $21^\circ C$ ) à l'aide d'un rhéomètre contra-rotatif transparent. Ce rhéomètre est constitué de deux disques en verre de  $40\text{ mm}$  de diamètre qui tournent en sens inverse [6]. Chaque disque est piloté par un moteur. L'intérêt de ce dispositif est que la vitesse de ces deux plateaux peut être ajustée afin que la vitesse d'une particule soit nulle dans le référentiel du laboratoire [6].

Cela permet d'observer le comportement de cette particule dans un fluide durant un temps suffisamment long et ainsi de mesurer, par exemple, sa période de rotation. L'observation est faite dans le plan engendré par la vorticité et le champ de vitesse à l'aide d'un microscope optique Wild Leitz. Les images sont enregistrées et stockées par un système vidéo.

#### 3.2 L'effet de la concentration des particules sphériques sur la rotation d'une fibre

Les expériences sont faites pour des particules sphériques et cylindriques en verre dans une huile de silicone Newtonienne ayant une forte viscosité ( $\eta = 200\text{ Pa.s}$ ). Le rayon des sphères est compris entre 100 et 150

$\mu m$  ; les fibres ont un rayon entre 20 et 14  $\mu m$  et un rapport d'aspect de 5 à 30. La mesure de l'angle  $\alpha$  a été effectuée pour une fibre isolée et quatre concentrations,  $\Phi_s$  de particules sphériques : 0, 5, 8 et 10 % (voir figure 2).

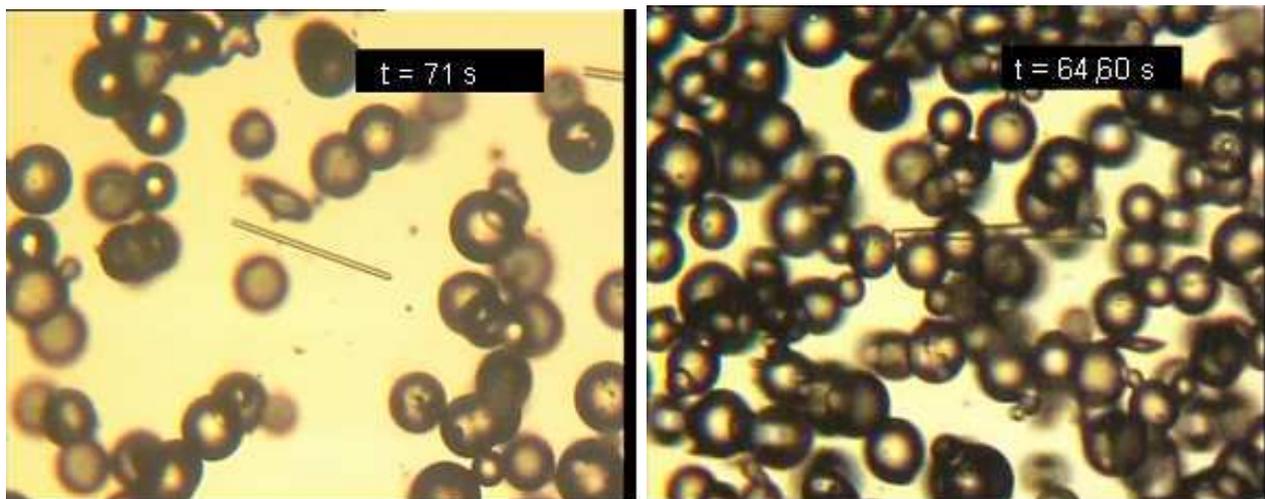


FIG. 2 – Le système sphères-fibre pour différentes concentrations volumiques : (a)  $\Phi_s = 5\%$  ; (b)  $\Phi_s = 10\%$

Pour les concentrations de 0 et 5%, le mouvement d'une fibre isolée est bien décrite par la formule analytique (4). Cependant comme il est montré sur la figure 3b, le mouvement de la fibre est plus complexe pour des concentrations plus grandes car l'angle  $\alpha$  peut aussi être égal à 0 ou  $\pi$ . Cela signifie que la fibre qui était initialement dans le plan contenant l'axe de vorticité va dans le plan du cisaillement. Ce comportement n'est pas prévu par les formules de Jeffery.

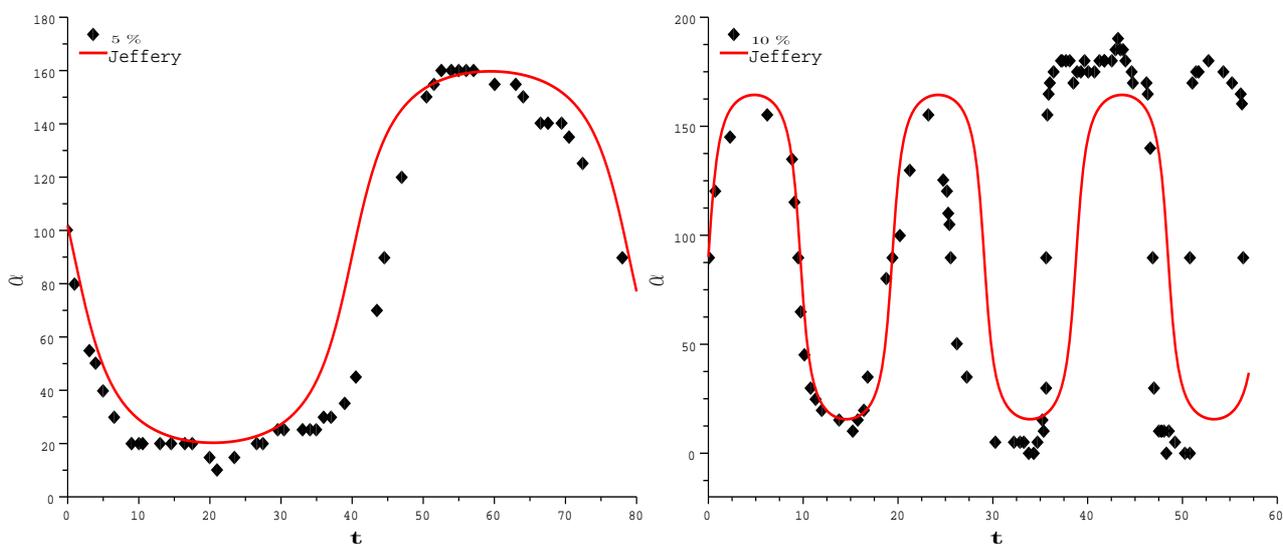


FIG. 3 – Mesures de l'angle  $\alpha$  pour les deux concentrations  $\Phi_s = 5$  et 10 % ; les courbes rouges (ou continues) correspondent   la solution de Jeffery.

## 4 Résultats numériques

On utilise une méthode éléments finis pour la simulation d'un écoulement de suspension [1]. Cette formulation est basée sur une approche de domaines fictifs [7], qui consiste à considérer le système complet fluide-particules comme un fluide. Le domaine total est séparé en deux sous domaines qui sont respectivement associés aux domaines fluides et solides. Le comportement de corps rigide dans la partie solide est pris en compte en ajoutant une contrainte de rigidité à la formulation faible à l'aide d'un multiplicateur de Lagrange [1].

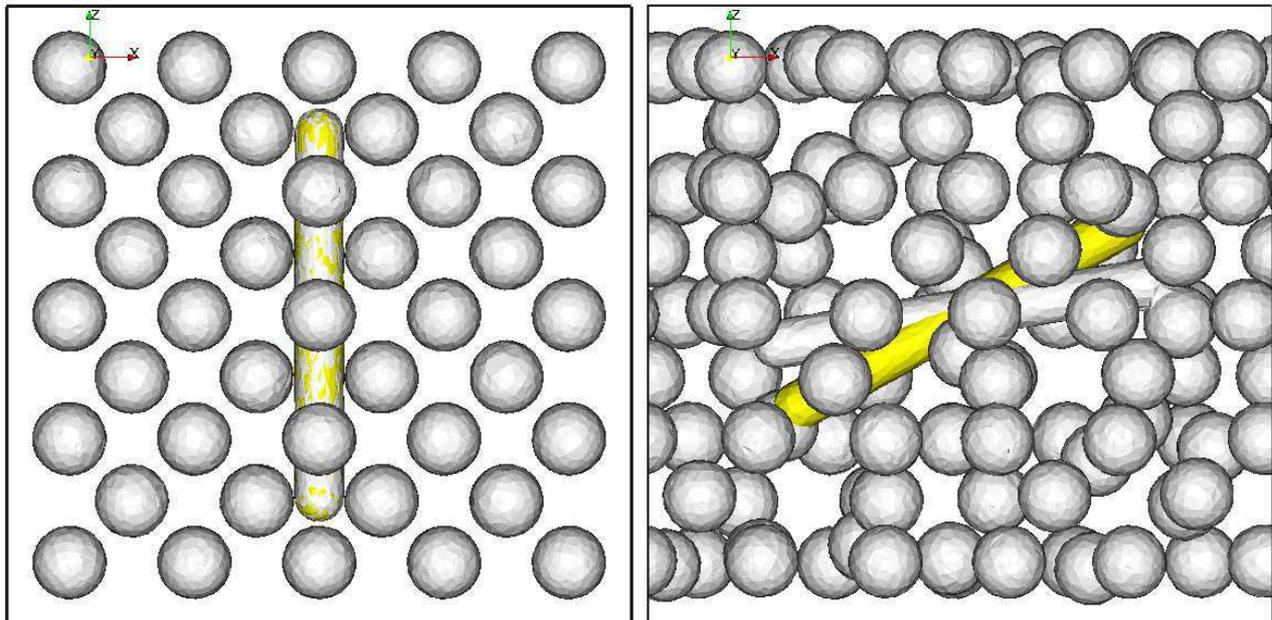


FIG. 4 – Evolution de la suspension à  $\Phi_s = 9\%$  dans le plan  $(0xz)$  (le plan de l'expérience) : (a) situation initiale ; (b)  $t = 14\text{ s}$ . La fibre jaune montre la solution à 0% (solution de Jeffery) ; les autres paramètres sont  $\dot{\gamma} = 1\text{ s}^{-1}$  et  $\Delta t = .01$

Les calculs sont effectués sur un cube de taille unitaire avec des conditions aux limites périodiques dans la direction  $0x$  (voir figure 4). La suspension est composée d'une fibre de rapport d'aspect  $\beta = 8.6$  et de rayon 0.04 entourée de particules sphériques de rayon .06 pour une concentration de 0% ; 2.5% ; 5% et 9%.

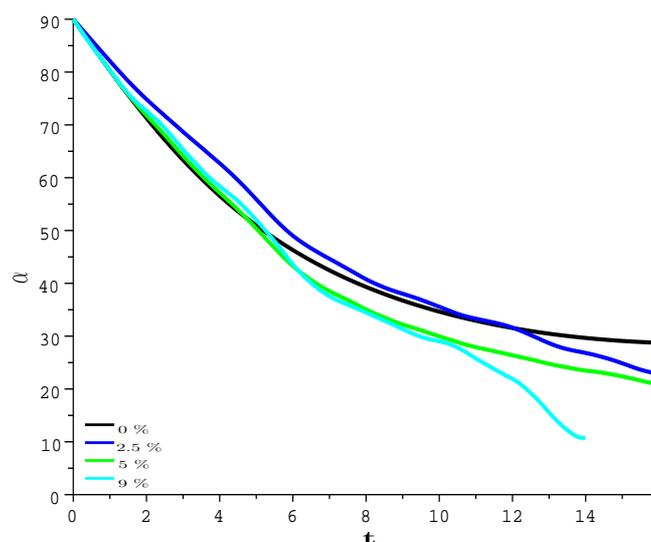


FIG. 5 – Evolution de l'angle  $\alpha$  calculé par la simulation numérique directe pour  $\Phi_s = 0\%$  ; 2.5% ; 5% et 9%.

La figure 5 montre que la solution de Jeffery n'est plus valide pour décrire le mouvement de la fibre quand

elle interagit avec d'autres particules sphériques. On peut voir que la valeur minimale de  $\alpha$  se rapproche de zéro et cela signifie que la fibre tend à être orientée dans le plan du cisaillement. Cela implique que l'équation macroscopique de Folgar et Tucker qui décrit le comportement d'une suspension de fibres doit être utilisée avec précaution pour des suspensions plus complexes.

## Références

- [1] Laure P., Beaume G., Basset O., Silva L., and Coupez T. Numerical methods for solid particles in particulate flow simulations. *European J. Comp. Mechanics*, 16, 365–383, 2007.
- [2] Lees A. and Edwards S. The computer study of transport process under extreme condition. *J. Phys. C : Solid State Phys.*, 5, 1921–1928, 1972.
- [3] Jeffery G. The motion of ellipsoidal particles immersed in viscous fluid. *Proc. R. Soc. London, A* 102, 161–179, 1922.
- [4] Astruc M., Vervoort S., Nouatin H., Coupez T., Puydt Y. D., Navard P., and Peuvrel-Disdier E. Experimental and numerical study of the motion and the erosion of fillers suspended in viscoelastic fluids under simple shear flow. *Rheologica Acta*, 42(5), 421–431, 2003.
- [5] Moses K., Advani S., and Reinhardt A. Investigation of fiber motion near solid boundaries in simple shear flow. *Rheology Acta*, 40, 306 – 306, 2001.
- [6] Seyvet O. Etude rhéo-optique de l'imprégnation et de la dispersion d'agglomérats de silice et de noirs de carbone en suspension dans des polymères. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris, 1999.
- [7] Glowinski R., Pan T., and Periaux J. A fictitious domain method for dirichlet problem and applications. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 111, 283–303, 1994.