

L'expérience de Taylor dans une suspension de particules

M. SOUZY^a, P. PHAM^b, C. ABID^c, E. VILLERMAUX^d, B.
METZGER^e

a. Aix-Marseille Université, IUSTI-CNRS UMR 7343, 13453 Marseille Cedex 13,
France, mathieu.souzy@gmail.com

b. Université de Floride, Dep. of Chem. Eng., Gainesville, Floride 32611, USA
phamphon1985@ufl.edu

c. Aix-Marseille Université, IUSTI-CNRS UMR 7343, 13453 Marseille Cedex 13,
France, cherifa.abid@univ-amu.fr

d. Aix-Marseille Université, IRPHE-CNRS 7342, 13384 Marseille Cedex 13, France,
villermaux@irphe.univ-mrs.fr

e. Aix-Marseille Université, IUSTI-CNRS UMR 7343, 13453 Marseille Cedex 13,
France, bloen.metzger@univ-amu.fr

Résumé :

Nous re-visitions l'expérience de Taylor dans une suspension de particules soumise à un cisaillement périodique afin d'étudier l'effet de la diffusion induite par cisaillement sur la dispersion d'une goutte de colorant. Au delà d'une déformation critique, la dispersion de la goutte augmente fortement. Le coefficient de diffusion effectif de la goutte est mesuré et comparé à celui des particules.

Abstract :

We revisit Taylor's experiment in a periodically sheared suspension of particles to investigate the effect of shear-induced diffusion on the dispersion of a blob of dye. Above a critical strain, the blob dispersion is found to increase significantly. The effective diffusion coefficient of the blob is measured and compared to the particle diffusion coefficient.

Mots clefs : Suspension de particules, diffusion induite par cisaillement, mélange, irréversibilité.

1 Introduction

L'expérience de Taylor illustre la réversibilité des écoulements de Stokes (G. I. Taylor¹, 1966). En plaçant une goutte de colorant dans un fluide visqueux, si l'on

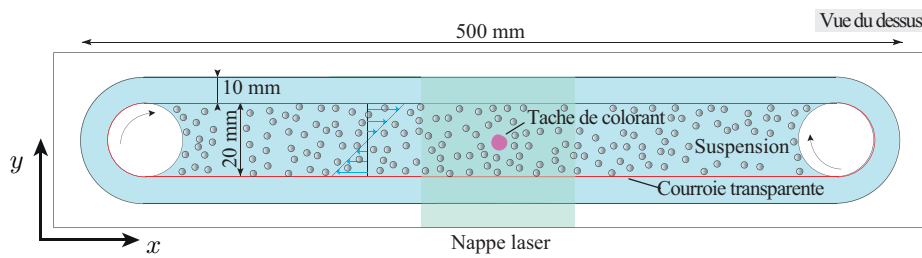


Figure 1: Schéma du dispositif expérimental.

cisaille le fluide de façon périodique, celle-ci se reforme à l'identique (aux effets de diffusion Brownienne près) à la fin de chaque cycle. Cette expérience est particulièrement adaptée pour étudier l'effet de la diffusion induite par cisaillement sur le processus de mélange. En effet, lorsqu'une suspension est soumise à un cisaillement, les collisions successives entre les particules dévient ces dernières de leur trajectoire affine^{2,3,4} et il a été montré, qu'en cisaillement périodique, ce phénomène entraîne une perte de réversibilité⁵ au delà d'une déformation critique, γ_c . Si l'on observe la position des particules de façon stroboscopique (*i.e.* à la fin de chaque cycle), celles-ci opèrent une marche aléatoire qui s'apparente à un mouvement diffusif^{5,6}. Ce mouvement diffusif n'est pas d'origine thermique mais provient de la réorganisation permanente des particules lorsque la suspension est soumise à un cisaillement. Les particules se comportent comme autant de petits agitateurs au sein du fluide. Dans cet article, nous étudions l'impact de cette perte de réversibilité sur le processus de mélange d'une goutte de colorant soumise à un cisaillement périodique dans une suspension de particules non-browniennes.

2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental, présenté Figure 1, est une cellule de Couette plan-plan. Une courroie transparente en mylar, tendue à l'aide de deux cylindres, est entraînée par une platine de rotation afin de générer un écoulement de cisaillement constant. Le fluide est une mixture ayant la même densité et le même indice de réfraction optique que les particules qui sont des sphères mono-disperses de PMMA de diamètre $d = 2\text{mm}$. La fraction volumique en particules est $\phi = 35\%$. Les expériences sont réalisées à bas nombre de Reynolds ($Re \approx 0.05$). La suspension est cisailée périodiquement avec une amplitude de déformation γ_0 .

Nous avons dans un premier temps mesuré les trajectoires des particules. Pour cela, un fluorophore (rhodamine 6G) est introduit de façon homogène dans la suspension. En éclairant la suspension à l'aide d'une nappe laser, les particules situées dans le plan de la nappe apparaissent tels des disques blancs, voir Figure 2a. La position des particules est mesurée à la fin de chaque cycle par une méthode de "tracking". Les trajectoires

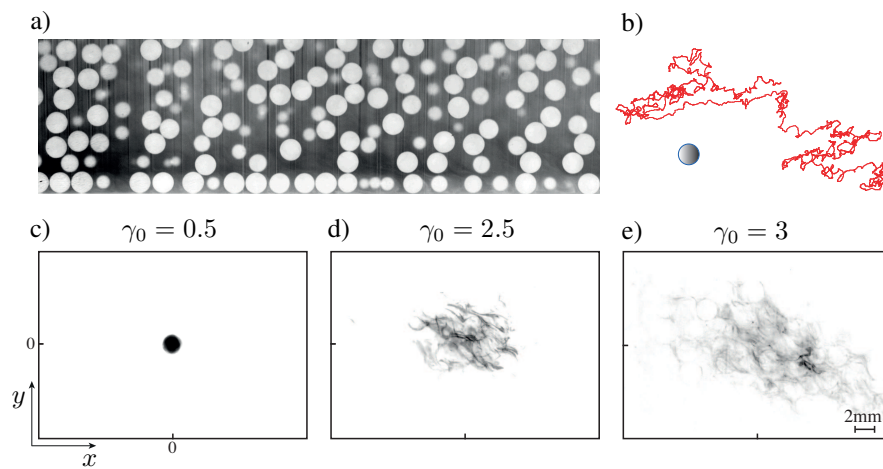


Figure 2: a) Image de la suspension, vue du dessus. Les particules apparaissent comme des disques blancs. b) Trajectoire stroboscopique d'une particule lorsque la suspension est cisailée au delà de γ_c . Image d'une goutte de colorant après 40 cycles (superposition sur 10 expériences), pour différentes amplitudes de déformation cyclique : $\gamma_0 =$ a) 0.5, b) 2.5, c) 3.

stroboscopiques des particules, qui en effet s'apparentent à un mouvement diffusif, voir Figure 2b, sont utilisées pour calculer le déplacement quadratique moyen et définir le coefficient de diffusion des particules, D_p .

Dans un second temps, afin de caractériser le processus de mélange de la goutte de colorant, la suspension (sans rhodamine) est d'abord pré-cisaillée durant 20 cycles. Puis, la goutte de colorant est insérée à l'aide d'une seringue au coeur de la suspension. La suspension est ensuite cisailée durant 40 cycles, et une photographie de la goutte de colorant est prise à la fin de chaque cycle. Le coefficient de diffusion moléculaire de la rhodamine, $D_0 \approx 10^{-13} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, est tel que pour ces expériences, l'effet de la diffusion moléculaire est négligeable (Culberston *et al.*⁷).

3 Résultats

La figure 2 (c, d et e) montrent l'état du nuage (moyenné sur dix expériences) au bout de 40 cycles pour des expériences réalisées à différentes amplitudes de déformation $\gamma_0 = 0.5, 2.5$ et 3. A faible amplitude de déformation, le système est réversible : la goutte de colorant, comme dans l'expérience de Taylor, revient à son état initial à la fin de chaque cycle (Figure 2c). Lorsque l'amplitude de déformation augmente, le système perd sa réversibilité : la goutte se disperse alors rapidement (Figure 2d et e).

Afin de quantifier la dispersion de la goutte dans la direction transverse à l'écoulement, l'intensité lumineuse (proportionnelle à la concentration locale en colorant) est projetée sur l'axe y après chaque cycle puis fitté par une gaussienne dont le seul paramètre

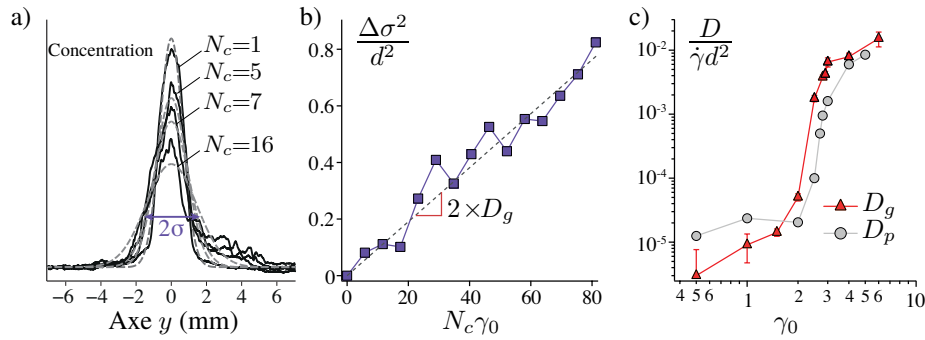


Figure 3: a) Evolution du profil de concentration du nuage (moyenné sur dix expériences) obtenu pour une amplitude de déformation $\gamma_0 = 2.5$. Une gaussienne (pointillés gris) d'écart-type σ est ajustée à ces profils. b) Variance correspondante $\Delta\sigma^2/d^2 = (\sigma^2 - \sigma^2(t=0))/d^2$ en fonction de l'amplitude de déformation cumulée $N_c\gamma_0$. c) Coefficient de diffusion des particules et de la goutte de colorant en fonction de l'amplitude de déformation.

ajustable est l'écart-type σ , voir Figure 3a. La dispersion du nuage s'apparente à un processus de diffusion car la variance adimensionnée $\Delta\sigma^2/d^2 = (\sigma^2 - \sigma^2(t=0))/d^2$ augmente linéairement avec la déformation cumulée $N_c\gamma_0$ (équivalent au temps), voir Figure 3b. Le coefficient effectif de dispersion du nuage, D_g , est obtenu en fittant cette courbe par $\Delta\sigma^2/d^2 = 2D_g N_c\gamma_0$.

La figure 3c compare les coefficients de diffusion des particules, D_p , et de la goutte de colorant, D_g , obtenus pour des expériences réalisées à différentes amplitudes de déformation. Dans les deux cas, les coefficients de diffusion ont été normalisé par $\dot{\gamma}d^2$, où $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement. Le comportement du système est remarquable. Pour une déformation inférieure à $\gamma_0 = 2$, les coefficients de diffusion sont très faibles. En revanche, au delà de cette valeur critique, les coefficients de diffusion augmentent brutalement (sur près de 3 ordres de grandeur).

4 Conclusion

Nous avons étudié la dispersion d'une goutte de colorant immergée dans une suspension de particules soumise à un cisaillement périodique. Pour une amplitude de déformation, $\gamma_0 < \gamma_c = 2$, le mouvement des particules est réversible : comme dans l'expérience de Taylor, la goutte de colorant se reforme à l'identique à la fin de chaque cycle de cisaillement. Pour des déformations plus importantes, les collisions entre particules brisent la réversibilité du problème. L'agitation des particules, qui augmente brutalement avec l'amplitude de déformation imposée, induit une rapide dispersion de la goutte de colorant. Cette agitation des particules au sein du fluide s'avère être un mécanisme efficace d'intensification du mélange.

Références

- [1] G. I. Taylor, J. Friedman, *Low Reynolds Number Flows*, Nat. Com. on Fluid Mech. Films (Encyc. Brit. Educ. Corp.), United States, 1966.
- [2] F. Blanc, F. Peters, E. Lemaire, Experimental signature of the pair-trajectories of rough spheres in the shear-induced microstructure in non-colloidal suspensions, *Phys. Rev. Lett.* 107, 208302, 2011.
- [3] E. C. Eckstein, D. G. Bailey, A. H. Shapiro, Self-diffusion of particles in shear flow of a suspension. *Jour. of Fluid Mech.*, 79(01), 191-208, 1977.
- [4] B. Metzger, O. Rahli, X. Yin, Heat transfer across sheared suspensions: role of the shear-induced diffusion, *Jour. of Fluid Mech.*, 724, 527-552, 2013.
- [5] D. J. Pine, J. P. Gollub, J. F. Brady, A. M. Leshansky, Chaos and threshold for irreversibility in sheared suspensions. *Nature*, 438(7070), 997-1000, 2005.
- [6] B. Metzger, J. E. Butler, Clouds of particles in a periodic shear flow. *Phys. of Fluids*, 24(2), 021703, 2012.
- [7] C. T. Culbertson, S. C. Jacobson, J. M. Ramsey, Diffusion coefficient measurements in microfluidic devices. *Talanta*, 56(2), 365-373, 2002.
- [8] V. Breedveld, D. van den Ende, A. Tripathi, A. Acrivos, The measurement of the shear-induced particle and fluid tracer diffusivities in concentrated suspensions by a novel method, *Jour. of Fluid Mech.*, 375, 297-318, 1998.