



HAL
open science

Sédimentation de particules à travers un réseau de tourbillons

Laurence Bergounoux, Gilles Bouchet, Elisabeth Guazzelli

► **To cite this version:**

Laurence Bergounoux, Gilles Bouchet, Elisabeth Guazzelli. Sédimentation de particules à travers un réseau de tourbillons. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. hal-03421470

HAL Id: hal-03421470

<https://hal.science/hal-03421470>

Submitted on 9 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 de particules à travers un réseau de tourbillons

L. BERGOUGNOUX, G. BOUCHET, E. GUAZZELLI

Laboratoire IUSTI, 5 rue Enrico Fermi, 13453 MARSEILLE Cedex 13

Résumé :

Les écoulements de particules sont présents dans un grand nombre de processus naturels ou industriels. Dans bien des cas, la sédimentation des particules est un phénomène dominant, complexe et fascinant, qu'il est important de contrôler et de comprendre de façon fondamentale. De nombreuses avancées ont été réalisées à bas nombres de Reynolds (sans inertie) mais le régime inertiel et turbulent n'a reçu que peu d'attention. L'objet de cette communication est l'étude de la sédimentation de particules sur un écoulement constitué d'un réseau bidimensionnel de tourbillons.

Abstract :

The dynamics of solid particles suspended in a fluid are a complex and fascinating problem of fluid mechanics, with applications in environmental and industrial processes, where sedimentation plays a central and fundamental role. Many advances have been made at low Reynolds numbers (without inertia) but the inertial and turbulent regimes have received poor attention. This communication deals with the sedimentation of particles on a flow of a two-dimensional array of vortices.

Mots clefs : sédimentation, tourbillons, électro-convection.

1 Introduction

Les écoulements de particules sont présents dans un grand nombre de processus naturels ou industriels. Les transports de sédiments dans les rivières et estuaires, de polluants dans l'atmosphère, la bioconvection du zooplancton, les courants de gravité et de turbidité près des rivages côtiers, les écoulements pyroclastiques lors d'éruptions volcaniques en sont quelques exemples dans le domaine de l'environnement. Dans l'industrie, les procédés impliquant des écoulements de particules sont très nombreux : réacteurs à lits fluidisés, traitement des eaux, industries agroalimentaires, pharmaceutiques et cosmétiques. Dans tous ces exemples, la sédimentation des particules est un phénomène dominant, complexe et fascinant, qu'il est important de contrôler et de comprendre de façon fondamentale.

De nombreuses avancées ont été réalisées à bas nombres de Reynolds (sans inertie) [1, 2, 3, 4]. Mais le régime inertiel et turbulent n'a reçu que peu d'attention, tant du côté expérimental [5, 6] que du côté de la simulation numérique [7, 8, 9]. Les quelques travaux existants semblent suggérer une vitesse moyenne de sédimentation supérieure à la vitesse terminale de chute d'une particule et des régions plus concentrées dans les zones de faible vorticité. Mais cela reste à confirmer et une étude plus poussée de la structure de la suspension reste à faire.

Nous nous proposons ici d'étudier les effets collectifs entre particules sédimentant sous l'effet de la gravité en présence d'un écoulement 'turbulent' bidimensionnel. Comme nous le verrons plus tard, nous entendons par écoulement 'turbulent', un écoulement constitué d'un réseau de tourbillons créés par électro-convection dont nous contrôlons la position, la taille et la vitesse.

2 Contexte physique

Bien qu'elle soit considérée comme un des exemples les plus simples d'écoulements de suspension, la sédimentation de particules est un problème compliqué de par l'importance des interactions hydrodynamiques multicorps à longues portées. En effet, lorsqu'une suspension de sphères identiques sédimente à faible nombre de Reynolds, le changement continu de la microstructure de la suspension et les

interactions hydrodynamiques qui en résultent, induisent des fluctuations de vitesse de l'ordre de la vitesse moyenne de sédimentation et dont la taille, initialement celle du récipient où la suspension sédimente, décroît jusqu'à se stabiliser autour de 20 à 30 distance inter-particule (figure 1) [2, 10].

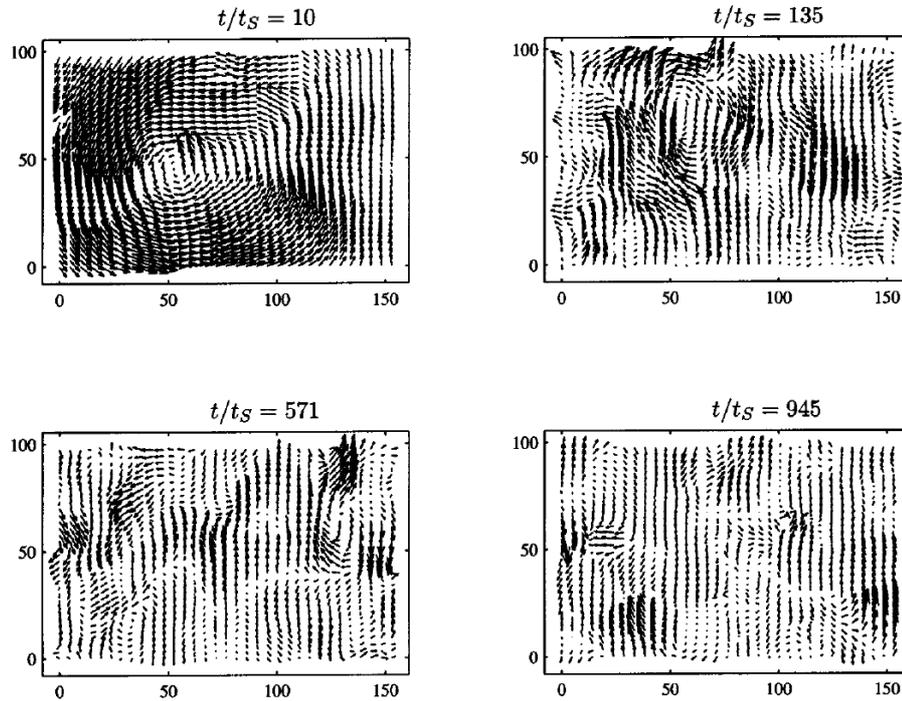


FIG. 1 – Champs de fluctuation de vitesse lors de la sédimentation d'une suspension diluée pour différents temps [2]. La taille des structures diminue jusqu'à se stabiliser, dans le même temps l'amplitude des fluctuations décroît elle-aussi.

Nous nous proposons à présent d'étudier la sédimentation dans un écoulement composé de structures tourbillonnaires, et ce dans un régime inertiel. Afin de contrôler de façon précise la taille des tourbillons hydrodynamiques, leur intensité ainsi que leur distribution, nous avons mis en place un dispositif d'électro-convection.

3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (figure 2) est constitué d'une cuve en verre de $200 \times 30 \times 500 \text{ mm}^3$ (LxPxH), une attention particulière ayant été apportée pour qu'une des parois de verre soit la plus fine possible. Cette cuve est remplie d'eau additionnée d'acide acétique (permettant de contrôler la concentration en électrolytes). A l'aide de deux électrodes en carbone immergées de part et d'autre de la cuve, nous faisons circuler un courant continu de faible intensité à travers le fluide. Enfin, un réseau d'aimants permanents (dont nous pouvons contrôler à la fois la taille, la position et l'intensité du champ magnétique) est placé contre la paroi arrière (fine) de la cuve, le champ magnétique, normal à la paroi, étant dirigé alternativement dans un sens puis dans l'autre. Le champ magnétique ainsi constitué, couplé au champ électrique, permet de générer, au sein du fluide, un réseau de forces de Lorentz, toutes dirigées suivant la direction de la gravité, mais orientées alternativement vers le haut ou vers le bas. Ces forces de Lorentz génèrent des écoulements de cisaillement qui, en raison du confinement créé par le réseau d'aimants, donnent naissance à un réseau de tourbillons, dont la taille est contrôlée par la distance entre les aimants (et les dimensions de la cuve pour les tourbillons se trouvant à la périphérie) et dont l'intensité est contrôlée par le champ magnétique des aimants permanents et l'intensité du courant électrique (et la viscosité du fluide). La génération d'écoulement tourbillonnaire par électro-convection sur de faibles épaisseurs fût entre autre utilisée pour des études menées sur la turbulence 2D [11].

Le champ de vitesse au sein du fluide est mesuré par PIV [12]. Pour cela, le fluide estensemencé avec des microsphères de verre creuses argentées de 20 à 30 μm de diamètre et est éclairé par deux tranches Laser.

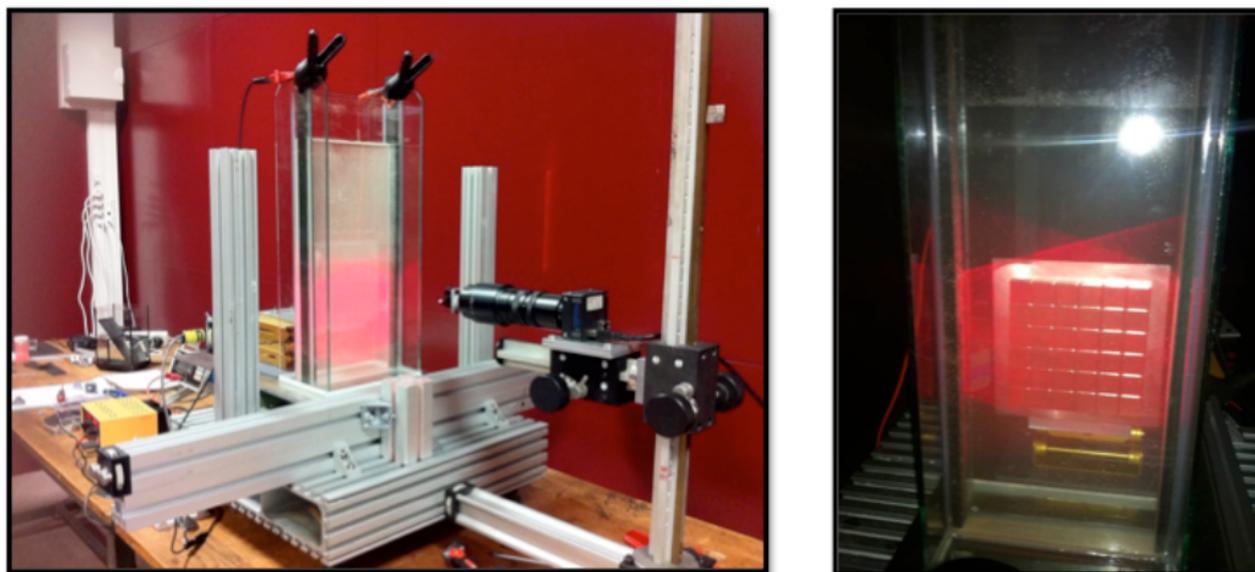


FIG. 2 – Dispositif expérimental : les électrodes sont immergées de part et d’autre de la cuve ; les aimants sont placés contre la vitre arrière de la cuve ; le fluide,ensemencé, est éclairé par deux tranches Laser.

Si le champ électrique entre les deux électrodes est à peu près uniforme, en revanche, le champ magnétique de chacun des aimants (tous identiques dans notre cas) décroît très rapidement avec la distance (dans la direction perpendiculaire à la paroi de verre). Notre objectif étant d’étudier la sédimentation de particules sur un réseau bidimensionnel de tourbillons, notre première étape a donc consisté à étudier le champ de vitesse et plus particulièrement son évolution dans la direction perpendiculaire au plan des aimants.

4 Résultats

4.1 Champ de vitesse

Nous avons représenté sur la figure 3 le champ de vitesse obtenu pour un réseau d’aimants de section 20 mm x 20 mm ; le fluide est parcouru par un courant de 50 mA.

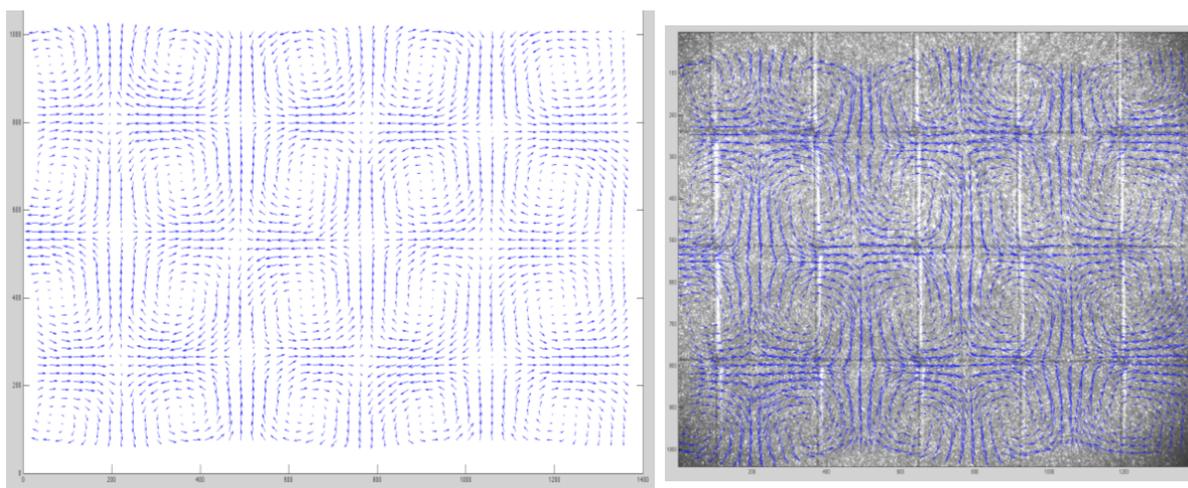


FIG. 3 – Champ de vitesse obtenu par électro-convection.

Le réseau alterné d’aimants permet de générer un réseau régulier de tourbillons contra-rotatifs dont les cœurs sont situés sur les arêtes ; les maxima de vitesse sont situés au centre des aimants. La taille des tourbillons est fixée par la taille des aimants.

4.2 Effet de l'intensité du courant sur le champ de vitesse

Partant d'un réseau d'aimants de section 20 mm x 20 mm, nous avons fait varier l'intensité du courant électrique circulant entre les deux électrodes.

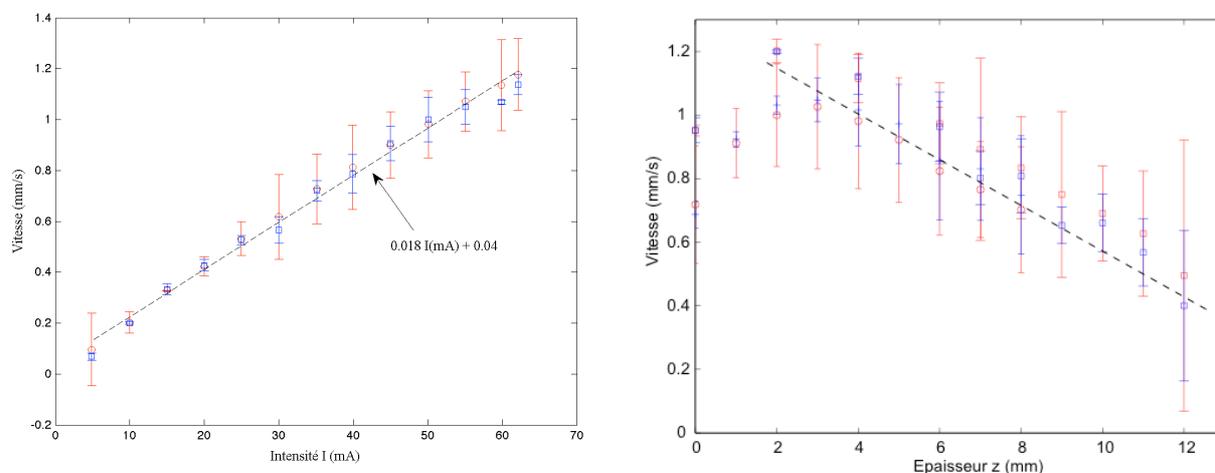


FIG. 4 – Variation du maximum de vitesse des tourbillons en fonction de l'intensité du courant circulant dans le fluide entre les deux électrodes (à gauche) et de la distance à la paroi de verre située face au réseau d'aimants (à droite) ; rouge : vitesse horizontale ; bleu : vitesse verticale.

Nous avons pu vérifier que la vitesse des tourbillons varie linéairement avec l'intensité du courant parcourant l'électrolyte (figure 4 à gauche). Pour des intensités supérieures à 60 mA, l'électrolyse de l'eau génère des bulles de gaz qui créent de petits courants de convection venant perturber le réseau de tourbillons (en particulier, on peut constater une légère dissymétrie sur la vitesse verticale ascendante ou descendante de chaque tourbillon). Cet effet est renforcé par une augmentation de la température au voisinage des électrodes.

4.3 Effet du champ magnétique sur le champ de vitesse

Pour un courant de 60 mA et un réseau d'aimants de section 20 mm x 20 mm, nous avons sondé le champ de vitesse dans tout le volume du fluide en déplaçant le plan Laser perpendiculairement au plan des aimants. Sur la figure 4, à droite, nous pouvons constater que le maximum de vitesse des tourbillons présente deux zones : une première, située proche de la paroi de verre en contact avec le réseau d'aimants, dans laquelle la vitesse augmente, et une seconde, dans laquelle elle diminue de façon linéaire. La première zone, d'une épaisseur d'environ 2 mm, est gouvernée par la couche limite se développant sur la paroi de verre. La seconde est gouvernée par la décroissance spatiale du champ magnétique. Au-delà d'une distance de l'ordre de 20 mm, les tourbillons ne sont plus détectables.

Sur la figure 5, nous avons représenté la variation du maximum de vitesse des tourbillons pour deux réseaux d'aimants de même section (20 mm x 20 mm) mais d'épaisseurs différentes. Même si nous n'avons pas pu mesurer l'intensité des champs magnétiques de chaque aimant, nous avons pu constater que cette intensité était dépendante de l'épaisseur des aimants. Cette variation d'intensité a pour conséquence une croissance plus faible de la vitesse avec l'intensité du courant électrique (la pente de la courbe correspondant aux aimants de 5 mm d'épaisseur est plus faible que celle correspondant aux aimants de 10 mm d'épaisseur).

Enfin, nous avons vérifié que si l'on fait varier la taille (section) des aimants, la taille des tourbillons varie exactement dans les mêmes proportions (figure 6), avec pour conséquence, à épaisseur constante, que le maximum de vitesse de tourbillons est d'autant plus faible que la section des aimants est plus faible (l'intensité du champ magnétique dépendant de la section des aimants).

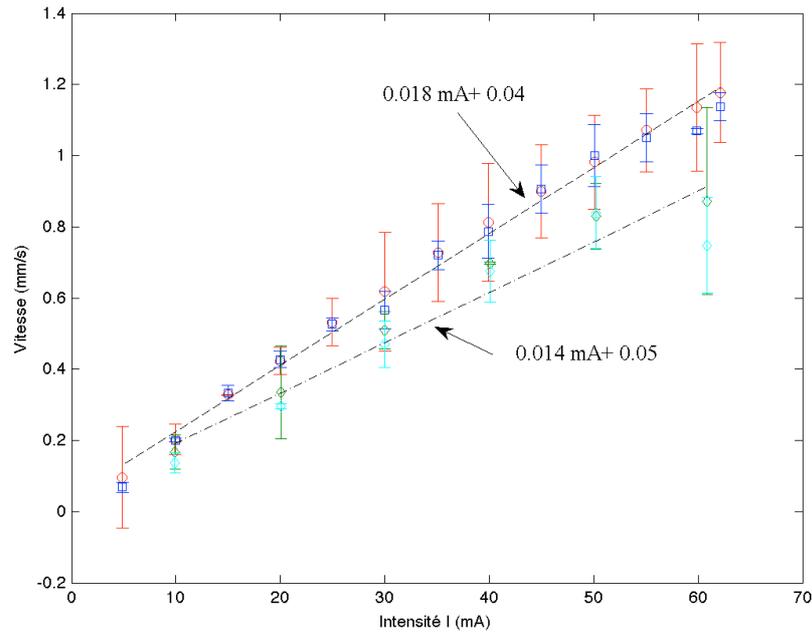


FIG. 5 – Variation du maximum de vitesse des tourbillons en fonction de la distance à la paroi pour deux réseaux d’aimants d’épaisseurs différentes (pente de 0.018 pour une épaisseur de 10 mm, pente de 0.014 pour une épaisseur de 5 mm) ; rouge, vert : vitesse horizontale ; bleu, cyan : vitesse verticale.

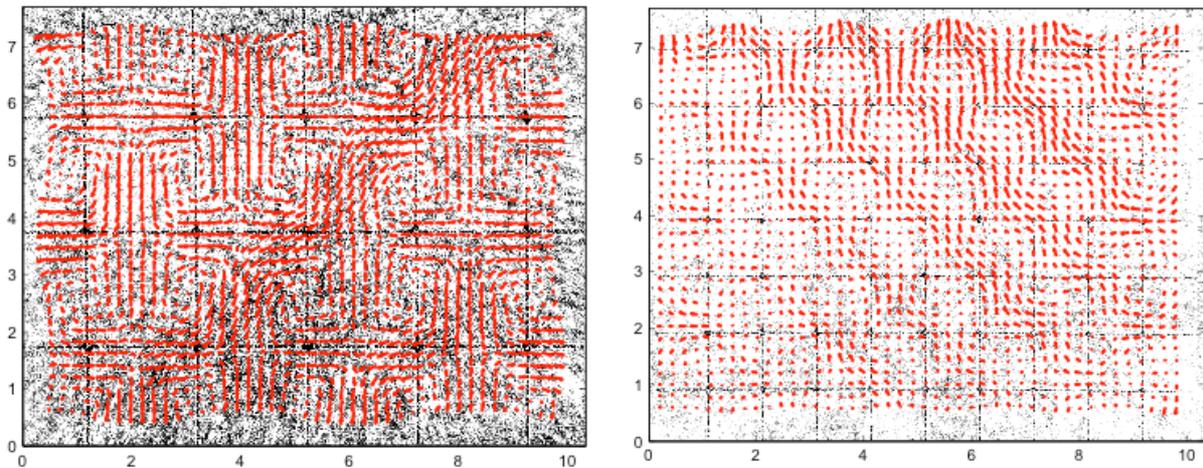


FIG. 6 – Evolution du réseau de tourbillons en fonction de la section des aimants ; à gauche, les aimants ont une arête de 2 cm ; à droite, ils ont une arête de 1 cm.

5 Sédimentation

Notre second objectif a été d’étudier l’effet d’un tel réseau de tourbillons sur la trajectoire de particules en chute libre. Compte tenu de la vitesse des tourbillons (de l’ordre de 1 mm/s), nous avons choisi des particules de polystyrène de 300 μm de diamètre. Le polystyrène ayant une masse volumique de 1050 kg/m^3 , de telles particules ont une vitesse de Stokes V_s de l’ordre de 2.4 mm/s et des nombres de Stokes de l’ordre de 10^{-5} -

10^{-3} , le nombre de Stokes étant défini par : $St = \frac{2\Delta\rho \cdot a_p^2 / 9\mu}{L/U} = \frac{V_s / g}{L/U}$, où $\Delta\rho$ est la différence de masse volumique fluide/particules, a_p est le rayon des particules, U est la vitesse maximale au sein des tourbillons et L est le diamètre des tourbillons.

Après avoir vérifié qu’en l’absence de champ électrique les particules ont bien des trajectoires verticales rectilignes, nous avons suivi la trajectoire de différentes particules en présence de champ électrique. Sur la figure 7, on constate bien que les particules isolées sont déviées par les tourbillons.

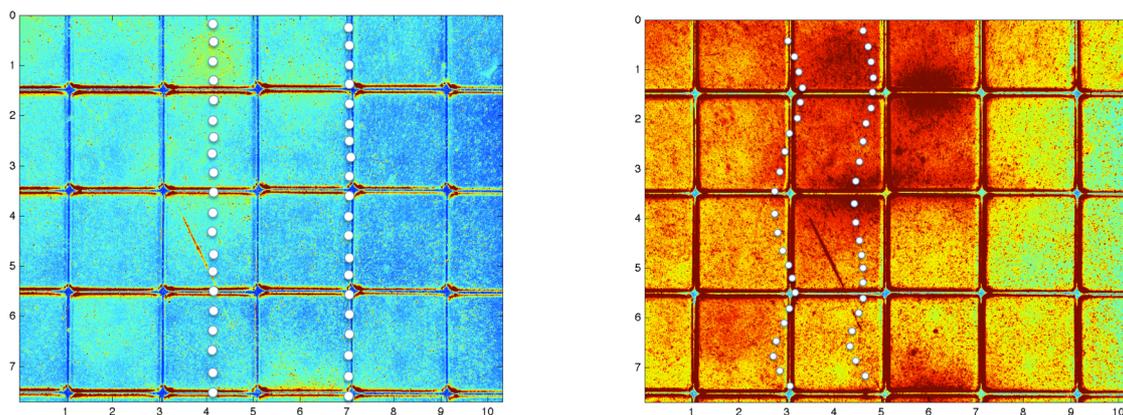


FIG. 7 – Trajectoires de particules de polystyrène en chute libre sur un réseau de tourbillons ; à gauche, sans courant, à droite, avec un courant de 40mA d'intensité ; les aimants (initialement gris) apparaissent en fond d'image avec de 'fausses couleurs'.

6 Conclusion

Dans cette étude préliminaire, nous avons montré qu'il était possible de générer par électro-convection un réseau de tourbillons de taille et d'intensité réglables. Bien que le champ magnétique ait une décroissance spatiale rapide, nous avons montré qu'il était possible d'obtenir un réseau de tourbillons sur une épaisseur de l'ordre du centimètre, tout à fait suffisante pour mener une étude de l'impact des tourbillons sur la sédimentation de particules. Enfin, nous avons montré que les tourbillons avaient bien un impact sur la trajectoire de particules de faible nombre de Stokes. Il reste à présent à étudier l'impact de ces tourbillons sur la sédimentation d'une suspension plus ou moins dense, ainsi que la rétro-action que peut avoir cette suspension sur le réseau de tourbillons. Pour cela, un protocole permettant de mesurer simultanément le champ de vitesse du fluide et celui des particules est à l'étude.

References

- [1] E. Guazzelli, "Evolution of particle-velocity correlations in sedimentation", *Phys. Fluids* 13, 1537 (2001).
- [2] L. Bergougnoux, S. Ghicini, E. Guazzelli, and E. J. Hinch, "Spreading fronts and fluctuations in sedimentation", *Phys. Fluids* 15, 1875-1887 (2003).
- [3] L. Bergougnoux, E. Guazzelli, "Non-Poisson statistics of settling spheres", *Phys. Fluids* 21 091701 (2009).
- [4] D. Chahata Gomez, L. Bergougnoux, E. Guazzelli, and E. J. Hinch, "Fluctuations and stratification in sedimentation of dilute suspensions of spheres", *Phys. Fluids* 21 093304 (2009).
- [5] A. Aliseda, A. Cartelier, F. Hainaux and J. C. Lasheras, "Effect of preferential concentration on the settling velocity of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence", *J. Fluid Mech.* 468, 77 (2002).
- [6] T. S. Yang and S. S. Shy, "The settling velocity of heavy particles in an aqueous near-isotropic turbulence", *Phys. Fluids* 15, 868 (2003).
- [7] T. Bosse, L. Kleiser and E. Meiburg, "Small particles in homogeneous turbulence : Settling velocity enhancement by two-way coupling", *Phys. Fluids* 18, 027102 (2006).
- [8] Y. Yang and U. Lei, "The role of the turbulent scales on the settling velocity of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence", *J. Fluid Mech.* 371, 179 (1998).
- [9] P. Wang and M. R. Maxey, "Settling velocity and concentration distribution of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence", *J. Fluid Mech.* 256, 27 (1993).
- [10] E. Guazzelli, "Evolution of particle-velocity correlations in sedimentation", *Phys. Fluids* 13, 1537 (2001).
- [11] P. Tabeling, B. Perrin and S. Fauve, "Instability of a linear array of forced vortices", *Europhys. Lett.* 3, 459 (1987).
- [12] Nous avons utilisé pour traiter nos mesures le programme DPIVsoft développé par P. Meunier et T. Leweke du Laboratoire IRPHE, Marseille UMR 6594 <https://www.irphe.univ-mrs.fr/~meunier/>