

# Fragmentation d'agrégats de particules et de fibres en turbulence

H. M. De La Rosa Zambrano, C. Brouzet, G. Verhille, et P. Le Gal

Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, IRPHE, 13013 Marseille, France

[legal@irphe.univ-mrs.fr](mailto:legal@irphe.univ-mrs.fr); [verhille@irphe.univ-mrs.fr](mailto:verhille@irphe.univ-mrs.fr)

...

## Résumé :

*Nous présentons ici les résultats de deux expériences de laboratoire relatives à l'agrégation de particules ou de fibres dans la zone inertielle de la turbulence. Dans les deux cas, des particules ou des fibres sont placées dans un écoulement de von Kármán dont l'intensité de la turbulence est modifiée par le taux de rotation des deux disques ailetés contra-rotatifs. Des traitements d'images à l'aide de deux ou d'une seule caméra vidéo permettent de décrire la formation des agrégats ainsi que leurs tailles. Des modèles théoriques sont finalement construits et comparés aux résultats expérimentaux.*

## Abstract :

*We present here the main results of two laboratory experiments relating to the aggregation of particles or of fibers in the inertial range of turbulence. In both cases, particles or fibers are placed in a von Kármán flow whose turbulence intensity is modified by the rotation rate of the two counter-rotating bladed disks. Image processing using two or a single video camera is used to describe the formation of aggregates and determine their sizes. Theoretical models will eventually be constructed and compared to the experimental results.*

**Mots clefs : turbulence, agrégation, fragmentation, fibres, particules**

## 1 Introduction

Les agrégats de particules sont fréquemment rencontrés dans de nombreux écoulements naturels et industriels. Nous décrivons ici le processus de fragmentation d'agrégats de particules par la turbulence lorsque ces particules et les agrégats qu'elles forment, possèdent une échelle appartenant à la zone inertielle de la turbulence, donc plus grande que l'échelle de Kolmogorov – ce qui fait l'originalité de notre étude par rapport aux nombreuses analyses de floes de taille sub-Kolmogorov [1]. Nous allons décrire ici deux expériences ; la première est réalisée avec des particules magnétiques que nous avons fabriquées au laboratoire et la deuxième expérience est relative à l'agrégation de fibres souples. Dans les deux cas, nous avons utilisé un écoulement de von Kármán turbulent dans lequel ont été placées

particules magnétiques ou fibres. Des traitements d'images permettent dans les deux cas de décrire le processus de fragmentation et/ou d'agrégation et de valider nos modèles théoriques.

## 2 Principaux résultats

### 2.1 Fragmentation d'agrégats de particules magnétiques

Dans une première expérience, nous plaçons des particules millimétriques, aimantées et agrégées par leurs champs magnétiques, dans un écoulement turbulent de von Kármán à nombre de Reynolds élevé ( $Re_T \sim 600-1000$  ; échelle de Kolmogorov  $\eta \sim 28-65 \mu m$ ). Les fluctuations turbulentes imposent des contraintes qui fragmentent les agrégats alors que la cohésion est assurée par les forces et couples magnétiques entre les dipôles. Grâce à des analyses d'images vidéo, nous avons effectué la reconstruction en trois dimensions des agrégats et avons mesuré leurs tailles caractéristiques. La figure 1 présente un exemple de ces images vidéo ainsi que la reconstruction tri-dimensionnelle qu'elles ont donné et qui permet d'estimer le nombre de particules dans chaque agrégats .

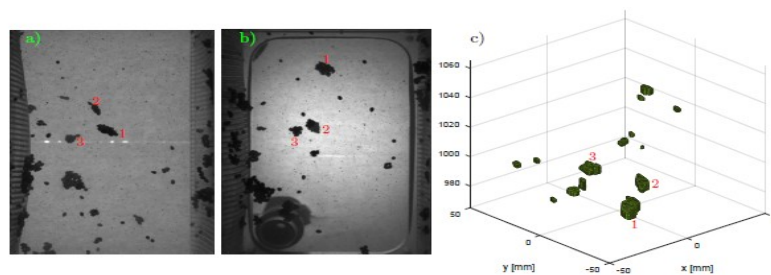


Figure 1 : Exemples d'images vidéo (a, b) provenant de deux caméras qui permettent la reconstruction tri-dimensionnelle de chaque agrégat (c).

Le nombre moyen de particules constituant un agrégat peut alors être déduit du volume de chaque agrégat en fonction de l'intensité de la turbulence. En supposant une loi d'échelles « à la Kolmogorov » pour les incréments de fluctuations de vitesse, nous sommes capables de prédire théoriquement la taille moyenne des agrégats en fonction du taux de turbulence ou de la fréquence de rotation  $f$  des disques (adimensionnée par la fréquence seuil  $f_c$ ). Pour  $f/f_c > 1$ , les particules sont essentiellement isolées dans l'écoulement.

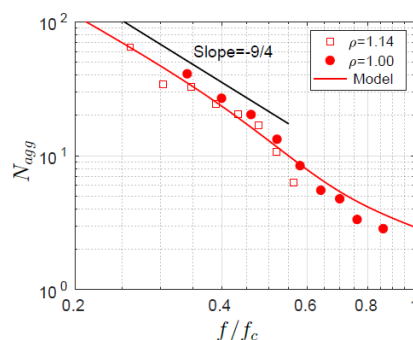


Figure 2 : Comparaison du modèle théorique (-) avec nos mesures dans de l'eau pure et dans de l'eau salée. L'exposant  $-9/4$  est calculé par le modèle pour les plus gros agrégats à faible taux de turbulence.

Le modèle possède plusieurs coefficients comme les dimensions fractales des agrégats qui sont déterminées expérimentalement, ou encore leur taux de compaction dont les valeurs sont contraintes même si elles permettent un ajustement du modèle aux mesures. Les résultats expérimentaux sont en très bon accord avec notre modèle de fragmentation [2] comme on peut le constater sur la figure 2.

Notons que dans cette expérience, la concentration de particules (1000 pour 8 litres) est insuffisante pour provoquer leur agrégation par collision.

## 2.2 Agrégation de fibres flexibles

Dans un deuxième temps, nous avons remplacé les particules magnétiques par des fibres souples de silicone, de longueur 5cm et de diamètre 0.8 mm. Contrairement au cas précédent avec les particules magnétiques, la force de cohésion n'est ici pas caractérisée précisément : elle dépend de l'élasticité des fibres, des frottements entre fibres et de leur concentration. Par contre, contrairement au cas des particules magnétiques, la concentration en fibres est maintenant suffisante pour former des agrégats lorsque l'intensité de la turbulence est inférieure à un certain seuil. La figure 3 illustre cette agrégation à faible taux de rotation des disques.

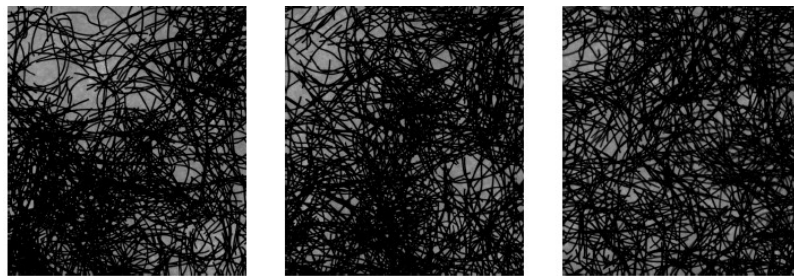


Figure3 : Visualisation de trois expériences avec 1327 fibres souples pour un taux de rotation des disques de l'écoulement de von Kármán de 3.5 Hz , 4.5 Hz et 10 Hz.

Par analyse des images vidéo, la moyenne des surfaces observées sans fibres (correspondant aux projections des volumes vides de fibres) est calculée pour chaque taux de turbulence et pour différentes concentration de fibres. Ces mesures présentées en figure 4, attestent qu'à fort taux de turbulence, l'écoulement avec les fibres reste homogène tandis qu'à plus faible taux de turbulence, des agrégats de fibres apparaissent.

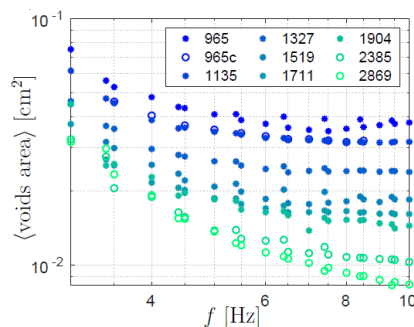


Figure 4 : Mesure des taux de vide moyen en fonction du taux de rotation des disques, pour différentes concentrations de fibres. Lorsque l'écoulement reste homogène, le taux de vide est constant. Par contre en dessous d'un seuil, la surface moyenne des vides varie avec l'intensité de la turbulence.

Quand le système reste homogène, c'est à dire sans formation d'agrégat, la position des plateaux varie avec la puissance  $-3/2$  du nombre de fibres (voir figure 5). Ce résultat diffère des prédictions théoriques faites pour des réseaux bidimensionnels de fibres de longueurs identiques et dispersées sur un plan [4]. Une analyse théorique s'appuyant sur l'équilibre entre agrégation et fragmentation permet alors de montrer l'existence d'un seuil de transition pour la formation des agrégats. Ce seuil est fonction entre autres de l'intensité de la turbulence et du nombre de fibres  $N_{fib}$ .

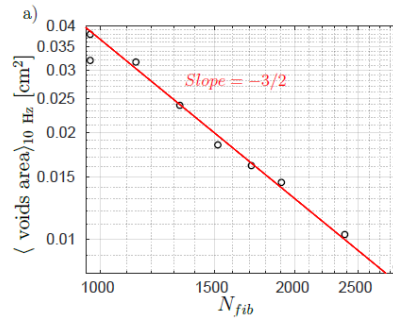


Figure 5: Evolution du taux de vide moyen en fonction du nombre total de fibres  $N_{fib}$  dans le cas où il n'y a pas de formation d'agrégat, c'est à dire pour  $f/f_c > 1$ .

Par contre, dans l'état actuel de notre compréhension de la physique du système, nous ne savons pas encore discriminer entre deux processus de fragmentation des agrégats. Dans un premier scénario, c'est la taille de l'agrégat entier qui impose un seuil de rupture alors que dans le second, l'agrégat peut se casser partiellement et perdre de ce fait une partie des fibres le constituant. Ces deux modèles de fragmentation mènent à deux lois d'échelle différentes pour les seuils d'agrégation/fragmentation.

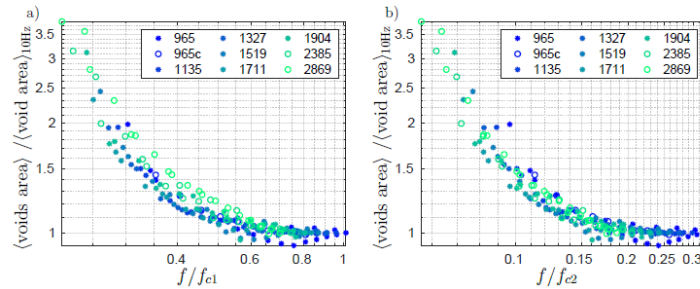


Figure 6: Surface moyenne des vides normalisée, en fonction des fréquences normalisées par le seuil d'agrégation/fragmentation. a) premier scénario, le seuil  $f_{c1} = N_{fib}^{1/3}$  et b) deuxième scénario où  $f_{c2} = N_{fib}^{1/2}$ , tandis que la surface moyenne est normalisée en utilisant la surface de vide moyenne à 10 Hz. Les deux cas montrent un bon rassemblement des données sur une courbe maîtresse.

Malheureusement comme le prouve la figure 6, bien que nos expériences rassemblent toutes les données expérimentales de la figure 4 sur une unique courbe maîtresse, elles ne permettent pas pour autant d'éliminer un des deux scénarios [3]. Des expériences supplémentaires où le rapport d'aspect des fibres serait varié systématiquement devraient permettre de valider l'un des deux scénarios.

## Références

- [1] B. Oyegbile, P. Ay, and S. Narra, Flocculation kinetics and hydrodynamic interactions in natural and engineered flow systems: A review, *Env. Eng. Res.* **21**, 1 (2016).
- [2] H. M. De La Rosa Zambrano, G. Verhille, P. Le Gal, Fragmentation of magnetic particle aggregates in turbulence, *Phys. Rev. Fluids* **3**, 084605 (2018).
- [3] H. M. De La Rosa Zambrano, Fragmentation des agrégats dans le domaine inertiel de la turbulence, Thèse, Aix Marseille Université (2019).
- [4] R. E. Miles. Random polygons determined by random lines in a plane. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 52(4):901–907, October 1964.