

A Marseille, le 5 février 2021.

Rapport sur le manuscrit de thèse de Mme Sofía Allende Contador :

Dynamics and statistics of elongated and flexible particles in turbulent flows

Sofía Allende Contador présente dans son manuscrit de thèse les travaux qu'elle a réalisés sous la direction de Jérémie Bec sur le transport de particules anisotropes dans des écoulements turbulents. Cette thématique de recherche est très active actuellement de par ses nombreux champs d'application allant de la modélisation fondamentale de la turbulence à la maintenance des centrales électriques en passant par la modélisation du cycle de vie du plancton qui joue un rôle majeur dans la captation du CO_2 dans les océans. Les résultats présentés ici sont issus de simulations numériques directes et sont interprétés théoriquement à l'aide des connaissances actuelles sur la turbulence. Le manuscrit est agréable à lire, bien organisé. Les différents chapitres s'enchainent logiquement et montrent une progression dans la complexité des phénomènes abordés. Ces travaux de thèse ont déjà donné lieu à 2 publications dans des journaux de rang A.

Le premier chapitre est un chapitre introductif qui présente plusieurs applications en lien avec le transport de particules en turbulence : propagation de virus, dispersion de particules inertielles (cendres volcaniques) et non inertielles (plancton)... Ces différentes applications permettent d'introduire naturellement la grande variété de particules que l'on peut rencontrer en étudiant ce thème de recherche : particules sphériques, anisotropes, déformables, actives ... Dans un deuxième temps, un état de l'art présente les principaux résultats de la littérature : concentration préférentielle due à l'inertie, taux de rotation de sphéroïdes rigides non inertiels en turbulence, fibres élastiques en écoulement visqueux et en turbulence. Les résultats mis en avant ici illustrent les différents points qui vont être abordés au cours du manuscrit : le rôle de l'inertie dans le transport de particules rigide, l'importance de l'instabilité de flambage pour la déformation de fibre en régime laminaire. Cela donne une grande cohérence à l'ensemble.

Le deuxième chapitre présente les principaux résultats sur la turbulence en s'appuyant sur des simulations numériques directes de l'équation de Navier-Stokes réalisées à l'aide du code LaTu développé dans l'équipe. C'est à cette occasion que les principales grandeurs caractéristiques de la turbulence sont définies (échelle intégrale, échelle de Kolmogorov, degrés de liberté du système, ...). L'étude du flux d'énergie entre les échelles permet d'introduire les deux modèles les plus connus de la turbulence : un modèle de champ moyen (K41) et un modèle prenant en compte l'intermittence (K62). Les principaux résultats et les limites de chaque modèle sont alors exposés. J'ai particulièrement apprécié la présentation du modèle de Kolmogorov 1962 qui est ici très claire.

Le troisième chapitre présente les premiers résultats de la thèse sur la dynamique de sphéroïdes inertiels ponctuels. Il est ici fait le choix de ne considérer que l'inertie de la particule et de négliger les effets inertiels du fluide. Il aurait pu être utile de discuter ces différentes hypothèses, notamment sur la modélisation du couple agissant sur la particule qui semblent ne pas toujours être négligeable même pour de petites particules (*cf.* Gustavsson *et al.*, New J. Phys., 21 (2019), 083008). Les résultats présentés ici sont obtenus en faisant varier systématiquement le rapport d'aspect de la particule et son inertie. Il est montré que la dynamique du centre de masse est entièrement capturée par le nombre de Stokes "harmonique" St^* . Ainsi la distribution et le temps de corrélation de la vitesse ainsi que la variance du taux d'accélération suivent une courbe maîtresse lorsque l'on fait varier ce paramètre. Cette observation met en évidence qu'en très bonne approximation la dynamique du centre de masse de la particule et son orientation sont découplées. Cela ouvre des pistes pour la modélisation stochastique du transport de particules anisotropes sub Kolmogorov. Les discussions sur les statistiques de l'orientation et sur le phénomène de concentration préférentiel sont moins détaillées mais mettent en évidence quelques résultats intéressants notamment sur l'influence de l'inertie de la particule sur leurs taux de rotation et que le phénomène de concentration préférentiel soit toujours observé pour des nombres de Stokes $St^* \sim 0.7$. Des études supplémentaires sont toutefois nécessaires pour pleinement comprendre ces observations. Malgré ces critiques, je pense que ce chapitre présente des résultats

originaux qui pourraient faire l'objet d'une publication.

Le quatrième chapitre est une étude sur la dynamique de fibres flexibles plus petites que l'échelle de Kolmogorov. Ces résultats ont été publiés dans *Physical Review Letter*. La première partie est une mise en équation du problème. L'équation d'évolution de la fibre est établie à partir d'un bilan de force locale. La force hydrodynamique est déterminée à l'aide du modèle slender body qui est expliqué de façon pédagogique en partant de l'équation de Stokes. La déformabilité des fibres est ici quantifiée par une flexibilité adimensionnée \mathcal{F} définie par le rapport entre le temps de relaxation de la fibre et le temps de Kolmogorov. Quelque soit la rigidité considérée, la fibre reste principalement étirée de par son alignement préférentiel avec le tenseur des gradients de vitesse et les déformations observées sont dues à une instabilité de flambage. Ces déformations sont détectées de façon équivalente soit par l'énergie élastique de la fibre, soit par la norme du vecteur bout-à-bout. La probabilité d'observer un événement de flambage suit une loi d'Arrhenius et est entièrement déterminée par le taux de compression. L'accord, sans paramètre ajustable, entre la prédiction théorique et la mesure de la probabilité d'observer un événement de flambage est remarquable. Enfin, en plus des résultats déjà publiés, la dernière partie décrit des phénomènes de super flambage où la fibre se retourne entièrement et dont le taux est constant et suit également une loi d'Arrhenius. En conclusion de ce chapitre, quelques pistes de recherche sont évoquées : l'effet de l'inertie, le comportement de fibres grandes devant l'échelle de Kolmogorov et l'influence de parois. Je pense qu'il serait également intéressant d'étudier l'effet des déformations sur la dispersion des particules, les trajectoires étant ici celles de traceurs.

Le cinquième chapitre est dédié à une étude pionnière sur la fragmentation de fibres flexibles en turbulence. Les résultats obtenus ont été publiés dans *Philosophical Transaction of the Royal Society A*. Deux modes de fragmentation sont identifiés. Le premier est lié à la tension qui apparaît lorsque la fibre est étirée par les gradients de l'écoulement. La fibre casse alors en deux portions égales. Le second est lié aux fortes courbures qui peuvent apparaître lors de l'instabilité de flambage. Le nombre de fragments est alors donné par le mode de déformation excité. Dans ce cas, il a également été observé une possible cascade de fragmentation, les nouveaux fragments étant également soumis à la compression de l'écoulement. Ce phénomène montre l'importance de la prise en compte du temps de corrélation des structures turbulentes lors du développement de modèle stochastique. A cette occasion, la gestion des conditions aux limites lors de la fragmentation auraient pu être discutés ainsi que le rôle de l'inertie de la fibre qui a été négligée ici. Enfin, les taux de fragmentation de chaque processus de fragmentation sont modélisés à l'aide des résultats sur les déformations de fibres en prenant en compte l'intermittence de la turbulence.

La conclusion est l'occasion de rappeler les principaux résultats obtenus au cours de cette thèse. De nouvelles pistes de recherche sont également proposées à cours et moyen terme en détaillant dans chaque cas l'intérêt, les principales difficultés et la marche à suivre. Cela montre le recul qu'a Sofía Allende Contador sur son sujet de thèse.

A la lumière de la quantité et de la qualité du travail présenté ici je donne un avis très favorable à la soutenance de thèse de Sofía Allende Contador.

Gautier Verhille