

Écoulement granulaire et ségrégation en tambour tournant lisse ou rugueux

U. D'ORTONA^a, N. THOMAS^b, R.M. LUEPTOW^c

a. M2P2, AMU-CNRS-ECM, Marseille, France, umberto@L3m.univ-mrs.fr

b. M2P2, AMU-CNRS-ECM, Marseille, France, nathalie.thomas@univ-amu.fr

c. Dep. of Mech. Eng., Northwestern University, Evanston, USA,
r-lueptow@northwestern.edu

Résumé :

La ségrégation axiale en tambour tournant sphérique est étudiée à travers l'influence du taux de remplissage et de la rugosité des parois. L'étude des écoulements monodisperses a mis en évidence la courbure des trajectoires des particules et l'existence de cellules de convection. Nous montrons comment ces deux caractéristiques, couplées à la ségrégation amène à une organisation axiale en trois bandes petites/grandes/petites ou grandes/petites/grandes selon le phénomène dominant.

Abstract :

Axial segregation is studied in spherical rotating drums through the influence of fill level and roughness of the walls. The study of monodisperse shows that the trajectories of particles are curved and that two global convection cells are present in the drum. We explain how these two phenomena, combined with granular segregation, leads to the axial organisation in three bands small/large/small (SLS) or large/small/large (LSL).

Mots clefs : Écoulement granulaire, ségrégation axiale, conditions limites, modélisation, DEM

Introduction

Les écoulements granulaires bidisperses en tambour tournant sphérique ségrègent axialement en formant 3 bandes, une à chaque pôle, et une à l'équateur. Pour des faibles taux de remplissage, les grandes particules se placent à l'équateur (fig. 1b) ; pour de forts taux de remplissage, elles se placent au voisinage des pôles (fig. 1a). Ce phénomène a été observé expérimentalement [1] et numériquement [2] pour une sphère de 14 cm de diamètre remplie à parts égales de billes de 2 et 4 mm.

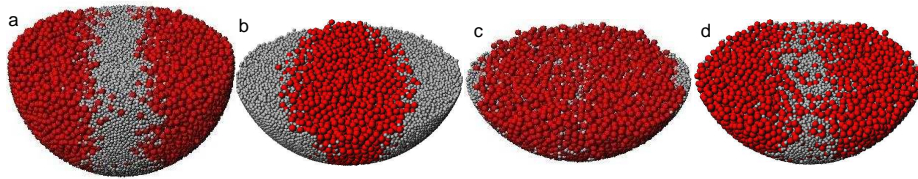


FIGURE 1 – Ségrégation axiale dans un tambour tournant sphérique rempli à parts égales de particules de 2 et 4 mm. Tambour (a) et (b) lisse, (c) rugueux 1.5 mm, (d) rugueux 2 mm.

Le taux de remplissage influence le type de ségrégation axiale obtenu, variant entre LSL (pour Large-Small-Large) ou SLS. D'autres paramètres modifient la ségrégation : augmenter le rapport de taille entre les billes et augmenter la vitesse de rotation favorisent la ségrégation LSL. De manière plus inattendue, la rugosité du tambour modifie également le type de ségrégation obtenu.

Résultats

Si l'on compare les figures 1b, c et d, les parois sont, respectivement, lisse, puis rugueuses faites de billes de 1.5 mm, puis 2 mm. On voit que la ségrégation est passée de SLS à LSL en augmentant la rugosité.

Pour comprendre l'origine de cette ségrégation axiale et du changement de type de ségrégation en fonction du taux de remplissage ou de la rugosité de la paroi, nous avons étudié des écoulements monodisperses, constitués de billes de 2 mm dans des tambours tournants sphériques lisses ou rugueux.

La figure 2 montre une vue de dessus des trajectoires moyennes de particules dans un écoulement monodisperse (2 mm) dans un tambour lisse (bleu) ou rugueux 2 mm (rouge) de 14 cm de diamètre rempli à 30%. Au départ (étoiles), les particules sont dans la zone statique à 2 mm au dessus de la paroi du tambour, elles ne s'écoulent pas et se déplacent suivant une ligne droite verticale. Elles atteignent la zone en écoulement, au voisinage de la surface libre, où elles suivent une trajectoire courbe jusqu'à atteindre la zone statique où elles se déplacent de nouveau en suivant une ligne droite.

Deux choses sont à remarquer sur ces trajectoires. Comme nous l'avons déjà dit, les particules ne s'écoulent pas en ligne droite, mais en suivant des courbes plus ou moins marquées en fonction de la position dans le

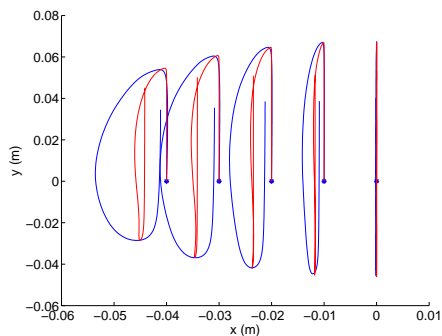


FIGURE 2 – Comparaison (vue de dessus) de trajectoires moyennes de particules (2 mm) partant du même point (représenté par une étoile) pour une sphère lisse (bleu) ou rugueuse (2 mm) remplie à 30%. L'axe de rotation est horizontal et se situe à $y = 0$.

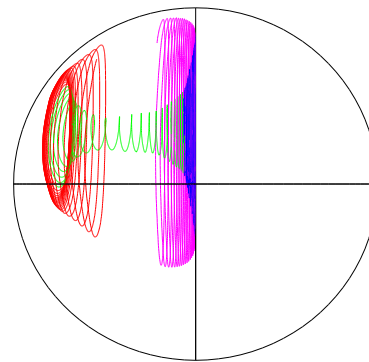


FIGURE 3 – Trajectoire moyenne d'une particule dans un tambour tournant sphérique pour des temps successifs : $t = 0-15$ s rouge, 15-30 s vert, 30-45 s bleu et 45-60 s violet. La trajectoire se déplace suivant une cellule de convection.

tambour. La trajectoire en $x = 0$ est droite pour des raisons de symétrie. On remarque aussi que dans le cas de la sphère lisse (trajectoires bleues), la courbure est beaucoup plus marquée que dans le cas de la sphère rugueuse (trajectoires rouges). La seconde chose à remarquer est que, après un passage dans la zone en écoulement, les trajectoires reviennent dans la zone statique avec un léger décalage vers l'extérieur du tambour. Ce décalage vers le pôle est beaucoup plus important dans le cas de la sphère rugueuse. Si l'on suit une trajectoire pendant plus longtemps (figure 3), on se rend compte que la particule n'atteint pas le pôle, mais revient vers l'équateur en s'écoulant en dessous de la surface libre, rejoint la surface libre à l'équateur et repart vers le pôle. Puis la trajectoire revient sur ses pas. L'existence de deux cellules de convection a été obtenue numériquement et vérifiée expérimentalement en étudiant la déformation d'une bande de particules de couleur [3].

Les trajectoires en écoulement monodisperse vont permettre de mieux comprendre les mécanismes qui aboutissent aux ségrégations axiales LSL et SLS. Les cellules de convection décalent les particules qui s'écoulent à la surface vers les pôles, et les particules qui s'écoulent sous la surface vers l'équateur où elles remontent à la surface. Combiné à la ségrégation granulaire (les grandes particules remontent à la surface lors de l'écoulement), on voit que les cellules de convection vont pousser les grandes

particules vers les pôles, et donc favorisent la ségrégation LSL.

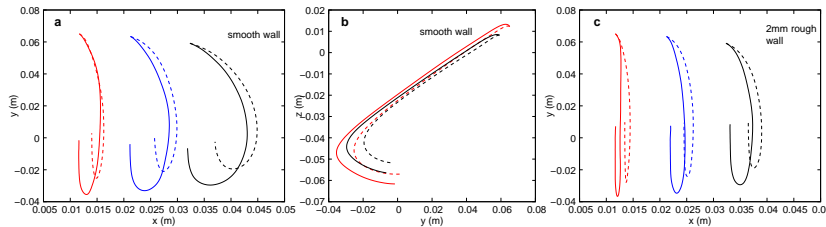


FIGURE 4 – Comparaison de paires de trajectoires de particules de 2 mm (pointillé) et 4 mm (courbes continues) partant du même point dans la zone en écoulement, mais à différente position axiale dans un tambour rempli à 30% ayant une paroi lisse ((a) vue du dessus, (b) vue de coté) ou rugueuse 2 mm (c).

Le mécanisme menant à la ségrégation SLS est un peu plus complexe. Nous avons vu que les trajectoires des particules en écoulement étaient courbes et que cette courbure dépendait de la rugosité de la parois, mais aussi du remplissage du tambour tournant. Si on étudie ces trajectoires dans un écoulement bidisperse durant les premiers instants, il est possible d'obtenir des trajectoires moyennes de petites et grandes particules à tous les endroits du tambour (figure 4). Par la suite, les ségrégations radiale et axiale se mettant en place, les différentes zones du tambour deviendront essentiellement monodisperses.

La figure 4 montre des paires de trajectoires de particules de 2 mm et 4 mm partant du même point dans la zone en écoulement pour des tambours lisse ou rugueux. Tout comme dans le cas monodisperse, les trajectoires en tambour lisse sont plus courbes que dans le cas rugueux. Si l'on suit une paire de trajectoire (fig. 4a), les grandes et petites particules partent approximativement dans la même direction, mais quand l'écoulement se termine et qu'elles atteignent la zone statique, les grandes particules se trouvent plus près du centre du tambour que les petites. Pour comprendre ce mécanisme, il suffit de regarder la vue de côté (fig. 4b). Pour chaque paire de particules, on voit que les grandes particules restent proches de la surface d'écoulement tandis que les petites plongent dans l'écoulement. Ces dernières atteindront la zone statique plus vite pendant que les grandes continuent à s'écouler et profitent de la courbure de leur trajectoire pour se rapprocher du centre du tambour. Ce mouvement des deux types de particules induit un flux différentiel des grandes particules vers l'équateur et des petites vers les pôles menant à une ségrégation SLS.

Pour le cas rugueux (fig. 4c), les trajectoires étant moins courbes, la

différence de position d'arrivée dans la zone statique est moins marquée et le flux différentiel sera plus faible. Le même phénomène est observé dans le cas du tambour avec des taux de remplissage plus élevés [2, 4].

On comprend maintenant que l'organisation en ségrégation axiale LSL ou SLS résulte d'une compétition entre 2 mécanismes : les cellules de convection qui ramènent les particules de surface (donc les grandes) vers les pôles, et les trajectoires courbes qui combinées à la ségrégation induisent un flux différentiel de grandes particules vers l'équateur et de petites vers les pôles.

Conclusions

La ségrégation axiale dans un tambour tournant sphérique est influencée par le taux de remplissage, le rapport de taille entre les particules, la vitesse de rotation, mais également par la rugosité des parois. En augmentant rugosité ou le remplissage, l'écoulement global dans le tambour se modifie et favorise la ségrégation axiale LSL. A contrario, un faible remplissage ou un tambour lisse favorise la ségrégation SLS. Cette organisation de la ségrégation axiale est la résultante de deux phénomènes en compétition : des cellules de convection qui poussent les grandes particules, en surface, vers les pôles, et des trajectoires courbes qui ramènent les grandes particules vers l'équateur.

Références

- [1] P. Chen, J.M. Ottino, and R.M. Lueptow, Onset Mechanism for Granular Axial Band Formation in Rotating Tumblers, *Phys. Rev. Lett.* 104, 188002 (2010)
- [2] U. D'Ortona, N. Thomas, and R.M. Lueptow, Influence of Rough and Smooth Walls on Granular Segregation Patterns Macroscale, *to be submitted to Phys. Rev. E*
- [3] Z. Zaman, U. D'Ortona, P.B. Umbanhowar, J.M. Ottino, and R.M. Lueptow, Slow axial drift in three-dimensional granular tumbler flow, *Phys. Rev. E* 88, 012208 (2013)
- [4] U. D'Ortona, N. Thomas, and R.M. Lueptow, Influence of Rough and Smooth Walls on Macroscale Flows in Tumblers, *to be submitted to Phys. Rev. E*