

Écoulements à surface libre de matériau granulaire partiellement cohésif

P. JOP^a

a. Surface du Verre et Interfaces (SVI) CNRS : UMR125, SAINT-GOBAIN
39 Quai Lucien Lefranc, 93303 Aubervilliers, France - pierre.jop@saint-gobain.com

Résumé :

Mélanger des grains et un liquide est souvent la première étape d'un procédé industriel, mais le caractère triphasique du milieu rend les descriptions générales difficiles : La cohésion induite par les ponts capillaires et la progression du liquide dans le système produisent des hétérogénéités locales de comportements mécaniques. Dans cette communication nous présenterons le comportement de grains cohésifs dans un écoulement granulaire de surface. Nous nous attacherons à montrer qu'une cohésion même infime induit des phénomènes de ségrégation notables que nous caractériserons. Nous montrerons l'impact de cette ségrégation sur les profils de vitesse de ces écoulements en lien avec la rhéologie des matériaux granulaires cohésifs.

Abstract :

Mixing grains with liquid is often the first step of industrial processes. However, the description of this system is difficult due to the presence of three phases : the cohesion, which is induced by the capillary bridges, and the spreading of the liquid inside the media produce local distributions of liquid content. We show that cohesive grains in a free surface flows tend to segregate toward the surface even for very tiny cohesive forces. We will show its impact on the velocity profiles and try to link them to the granular rheology.

Mots clefs : cohésion, matériaux granulaires, écoulement granulaire, ségrégation, rhéologie

1 Introduction

Les procédés utilisant de la matière granulaire constituent une part très importante des applications industrielles. Que ce soient des matières premières (fusion du verre, sables et ciments de l'industrie du bâtiment) ou des produits intermédiaires (granulation de poudres, industrie alimentaire, pharmaceutique), ces matériaux, dont la rhéologie est assez bien connue [1], sont souvent mis en oeuvre avec l'ajout de liquide. Plusieurs questions se posent alors : Comment se propage le liquide entre les grains ? Comment le liquide modifie le comportement du matériau granulaire ? Quel est le devenir d'un groupe de grains mouillés dans le système ? Les deux premières questions ont été étudiées dans la littérature généralement à partir de simulations numériques permettant d'accéder aux distributions de forces de tous les

contacts [2, 3, 4, 5]. En revanche le dernier point est moins compris. Il constitue la suite d'un processus de mélange entre un liquide et des grains, lorsque des grains mouillés s'écoulent dans un environnement de grains secs. Cette question peut aussi illustrer l'écoulement mixte de poudres de diverses natures qui possèderaient des propriétés de cohésion différentes. Dans cette communication, nous nous intéresserons à des simulations numériques d'écoulements à surface libre de sphères dont nous modifions les propriétés des contacts : cette situation est une modélisation simplifiée de grains mouillés par un liquide et vise davantage à modéliser des attractions de type Van der Waals.

2 Système modèle de sphères adhésives

Nous réalisons des simulations numériques tridimensionnelles. Le système est constitué d'un plan très rugueux désordonné composé de sphères fixes. Ce plan est incliné à un angle θ permettant d'obtenir des écoulements granulaires stationnaires. Le système est périodique dans la direction de l'écoulement, ainsi que dans la direction transverse. Les simulations sont réalisées avec le logiciel de dynamique des contacts [6] LMGC90 [7]. Les grains sont sphériques et ont tous le même rayon. La rugosité extrême du fond ainsi que l'inclinaison utilisée permettent de prévenir la cristallisation du milieu. Le reste des propriétés est identique pour tous les grains (densité, coefficient de restitution, coefficient de friction) mis à part sauf une propriété de surface : une petite fraction des grains pourra créer des contacts cohésifs avec les grains voisins.

Le volume simulé a une périodicité de $15d \times 15d$ et contient environ 5000 sphères. Le coefficient de friction est fixé à 0.3. Dans la plupart des simulations, seulement une fraction de 1% des grains est rendue cohésive. Nous avons choisi un modèle simplifié de cohésion : la force de cohésion N_c est attractive et non nulle dès que le contact est établi et elle disparaît dès sa rupture après un petit cycle d'hystérésis imitant la présence d'un pont liquide. Il est à noter que nous ne simulons pas la propagation de liquide ici. Les propriétés de cohésion sont intrinsèques aux particules et n'évoluent pas au cours de la simulation. Dans les simulations présentées ici, nous nous restreindrons à l'étude d'une seule inclinaison de 26° par rapport à l'horizontale. Nous quantifierons par la suite la cohésion par le nombre de Bond granulaire B_o , calculé comme le rapport de la force de cohésion sur le poids des grains.

Pour initier les simulations, nous imposerons une vitesse initiale aux grains proche de leur vitesse d'écoulement stationnaire. Cela permettra de raccourcir les temps des régimes transitoires liés à l'accélération des grains. Nous simulerons ensuite l'écoulement jusqu'à l'obtention d'un régime stationnaire ou quasi statique.

3 Résultats

3.1 Évolution temporelle du profil de vitesse

L'écoulement de référence (sans sphère adhésives) présente une petite phase d'accélération avant de se stabiliser dans un régime stationnaire. Le profil de vitesse suit alors une loi de Bagnold ($u \propto h^{3/2} - (h - z)^{3/2}$). Pour la cohésion extrême ($B_o = 1000$), le profil de vitesse présente une décélération très rapide, avant de recommencer à accélérer puis à se stabiliser dans un état stationnaire différent : le bas du profil de vitesse suit la loi de Bagnold, et le haut du profil se raidit (Fig. 1 gauche).

La première décélération résulte de la plus grande résistance au cisaillement du milieu en présence de cohésion. Pour comprendre l'accélération ultérieure, il convient d'analyser l'évolution de la densité

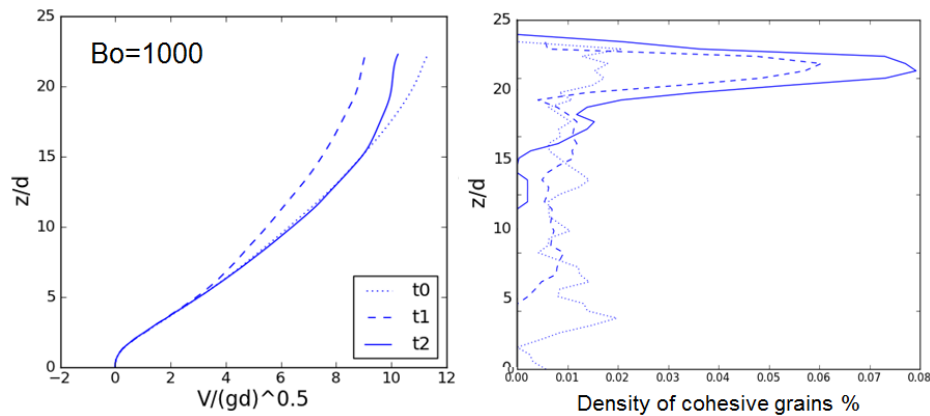


FIGURE 1 – Profil de vitesse (gauche) et de pourcentage local de particules cohésives (droite) à trois instants, pour un nombre de Bond granulaire $B_o = 1000$: $t_0 = 0$, $t_1 = 150\sqrt{d/g}$, $t_2 = 800\sqrt{d/g}$.

locale des particules cohésive (Fig. 1*droite*). La répartition aléatoire initiale de 1% est progressivement concentrée proche de la surface. Il est à noter qu'à ce nombre de Bond (1000), les contacts entre les grains sont quasi permanents : Même au fond de l'écoulement, la force de cohésion est toujours 40 fois supérieure à la pression moyenne qui s'exerce sur les grains. Étant donné que les sphères ont la même taille ici, chaque grain cohésif s'entoure de 12 voisins qui constituent un agrégat de diamètre trois fois plus gros que les grains. Cette différence de taille engendre donc une ségrégation vers la surface libre. La concentration maximale obtenue à la surface ($0.078 \approx 1/13$) est en accord avec ces agrégats. De même, l'écoulement stationnaire à une inclinaison de 26° correspond à un coefficient de friction effectif constant. Nous pouvons faire l'hypothèse que les agrégats se comportent comme de grosses sphères suivant la même loi rhéologique que les petits grains $\mu(I)$ où I est le nombre inertiel $I = \dot{\gamma}d/\sqrt{P/\rho}$, avec $\dot{\gamma}$ le cisaillement du matériau, P la pression locale et ρ la densité du milieu [8]. Puisque la partie haute de l'écoulement est constituée de gros agrégat, le cisaillement local doit être plus faible, confirmant le résultat de la simulation.

3.2 Influence du nombre de Bond

Le cas précédent est particulier puisque les agrégats ne changent plus de forme au cours de l'écoulement. Nous avons fait varier le nombre de Bond de 0.1 à 1000. Les résultats sur l'évolution de l'altitude moyenne des grains cohésif est représenté sur la figure 2. Pour $B_o = 100$, l'évolution est identique à une cohésion extrême. En revanche pour des nombre de Bond moins élevés, nous remarquons une évolution plus lente de l'altitude. Cela traduit une vitesse de ségrégation plus lente. Il est à noter que même le cas de cohésion la plus faible ($B_o = 0.1$) a un comportement différent de la simulation sans cohésion ($B_o = 0$).

Nous mesurons dans les simulations l'évolution temporelle de la coordinance moyenne des sphères cohésives. Les résultats sont présentés sur la figure 3. Les coordinances sont presque constantes exception faite des simulations avec le $B_o = 10$. Pour cette cohésion, la remonté des sphères s'accompagne d'une diminution de la force de pression moyenne relativement à la force de cohésion. Au-delà, la cohésion est trop forte et les sphères ont toujours 12 voisins, en deçà, la ségrégation est moins efficace. La figure 3*droite* montre que cette coordinance mesurée, à $t = 900\sqrt{d/g}$, présente une transition marqué pour $B_o = 4$, même si une très faible cohésion suffit à augmenter significativement le nombre de coordinance.

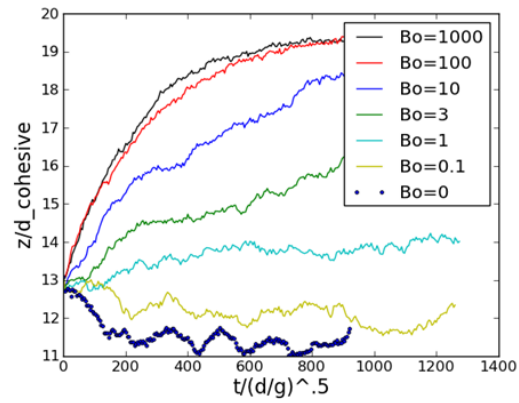


FIGURE 2 – Evolution temporelle du centre de masse des grains cohésifs pour différents nombre de Bond.

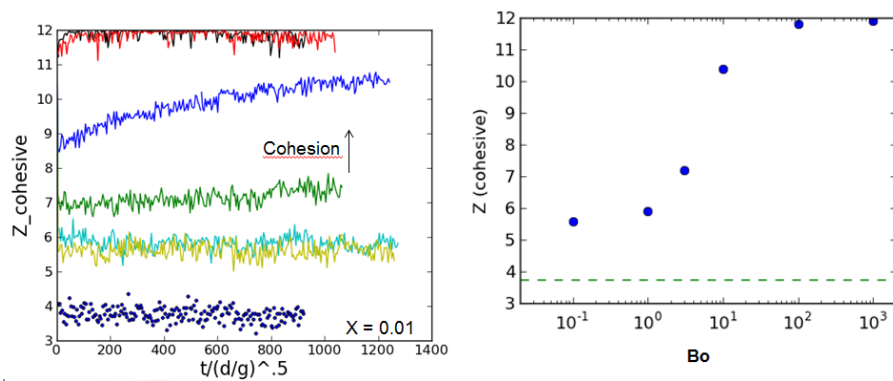


FIGURE 3 – gauche : Évolution temporelle du nombre de coordenance Z des grains cohésifs pour différents nombre de Bond. droite : Évolution du nombre de coordenance Z des grains cohésifs dans le régime quasi-stationnaire en fonction du nombre de Bond.

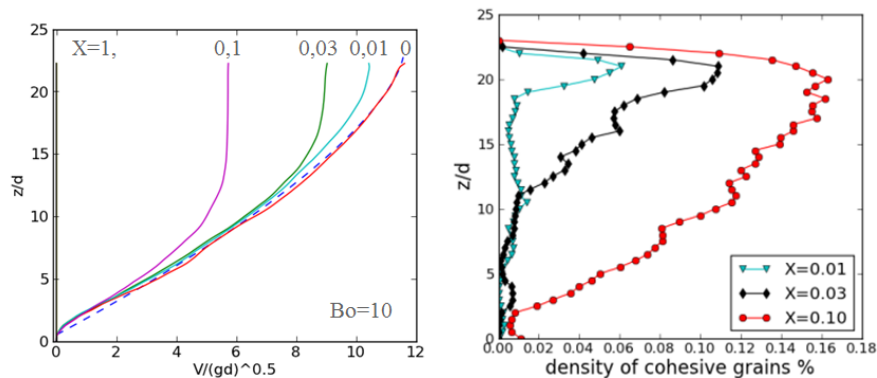


FIGURE 4 – gauche : Profils de vitesse stationnaire en fonction de la concentration initiale de grains cohésifs. droite : Profils de concentration selon la verticale en grains cohésifs.

3.3 Influence de la fraction de grains cohésifs

Les simulations précédentes ont été réalisées avec un pourcentage de grains cohésifs très faible $X = 0.01$. Les figures 4 montrent comment les profils stationnaires de vitesse et de concentration dépendent de la concentration initiale en grains pour un nombre de Bond fixe, $B_o = 10$. Lorsque la fraction cohésive augmente, le profil de vitesse est moins cisailé en partie haute. La force de cohésion est même suffisante pour créer un écoulement bouchon sur la partie supérieure à $X = 0.1$. Il est intéressant de noter que la fraction locale à la surface a augmenté jusqu'à 16% avant que la cohésion ne rigidifie la couche. Pour un système 100% cohésif, l'inclinaison du plan n'est pas suffisante pour cisailier le matériau.

4 Conclusion

L'introduction de grains cohésifs dans un écoulement granulaire mène à une ségrégation de ceux-ci vers la surface. Cette remontée est liée à l'augmentation de la coordinance des grains cohésifs. Ils se comportent alors comme des grains plus volumineux. Nous avons aussi mis en évidence le rôle de l'environnement initial de ces grains sur l'évolution ultérieure. Ces résultats préliminaires montrent que d'un point de vue des applications industrielles, il faut élaborer des stratégies pour éviter que l'écoulement de poudres de cohésions différentes ou de grains humides dans un milieu granulaire sec ne conduise à une séparation partielle des constituants.

Références

- [1] P. Jop, Rheological properties of dense granular flows, *Comptes Rendus Physique*, 16 (2015) 62–72.
- [2] S. Herminghaus, Dynamics of wet granular matter, *Advances in Physics*, 54 (2005) 221–261.
- [3] P. G. Rognon, J.-N. Roux, D. Wolf, M. Naaïm and F. Chevoir, Rheophysics of cohesive granular materials, *Europhys. Lett.*, 74 (2006) 4, 644–650.
- [4] V. Richefeu, M. S. El Youssoufi, and F. Radjai, Shear strength properties of wet granular materials, *Phys. Rev. E*, 73 (2006) 051304.
- [5] G. Lefebvre, P. Jop, Erosion dynamics of a wet granular medium, *Phys. Rev. E*, (2013).
- [6] F. Radjai, Contact dynamics method, *E. J. Envir. Civil Eng.* 12 (2008) 871–900.

- [7] LMGC90, https://git-xen.lmgc.univ-montp2.fr/lmgc90/lmgc90_user.
- [8] GDR MiDi, On dense granular flows, Euro. Phys. J. E, 14 (2004) 341–365.