

# Dynamique et mécanisme d'accrétion granulaire

G. SAINGIER, A. SAURET, P. JOP

Surface du Verre et Interfaces, UMR 125 CNRS/Saint-Gobain,  
39, Quai Lucien Lefranc, F-93303 Aubervilliers, Cedex, France  
guillaume.saingier@saint-gobain.com

## Résumé :

*Les matériaux granulaires humides sont couramment utilisés dans le génie civil ou l'industrie agro-alimentaire. Cependant, les mécanismes impliqués dans le mélange des grains et des liquides restent méconnus. Nous étudions expérimentalement la dynamique de croissance d'un agrégat humide horizontal produit par accrétion d'un jet granulaire sec impactant un substrat humide. L'imagerie par tomographie aux rayons X démontre que l'agrégat est complètement saturé et que sa cohésion résulte de la succion capillaire liée au saut de pression à l'interface liquide/air. Nous mettons en évidence que le processus d'accrétion est caractérisé par deux régimes de croissance différents dépendant de la dépression hydrostatique dans le matériau. À faible dépression, la croissance présente un comportement diffusif alors qu'elle devient linéaire avec le temps à plus forte dépression. Une compétition entre le déplacement visqueux du liquide dans le matériau granulaire et la dynamique de capture est proposée pour modéliser la transition observée sur la dynamique de croissance.*

## Abstract :

*Wet granular aggregates are commonly used in civil engineering or food industry. However, the physical mechanisms involved in the mixing of grains and liquids are not well understood. Here, we experimentally study the growth dynamics of a horizontal wet granular aggregate produced by accretion when a dry granular jet impacts a wet substrate. The tomographic imaging demonstrates that the wet aggregate is fully saturated and its cohesion is related to the capillary suction due to the pressure drop at the liquid/air interface. We highlight that the accretion process is characterized by two different growth dynamics depending on the hydrostatic depression in the material. At low depression, the growth dynamics exhibits a diffusive regime whereas the dynamics becomes linear for higher depressions. A competition between the viscous displacement of the fluid into the granular material and the sticking dynamics is proposed to understand the transition in the growth dynamics.*

**Mots clefs : Matériaux granulaires - accrétion - capillarité - mélange**

## 1 Introduction

Les matériaux granulaires sont souvent utilisés comme matières premières dans l'industrie [1]. En outre, la préparation de nombreux matériaux de construction comme le mortier ou le plâtre nécessite de mélanger des grains initialement secs avec du liquide et des additifs pour obtenir de nouvelles propriétés

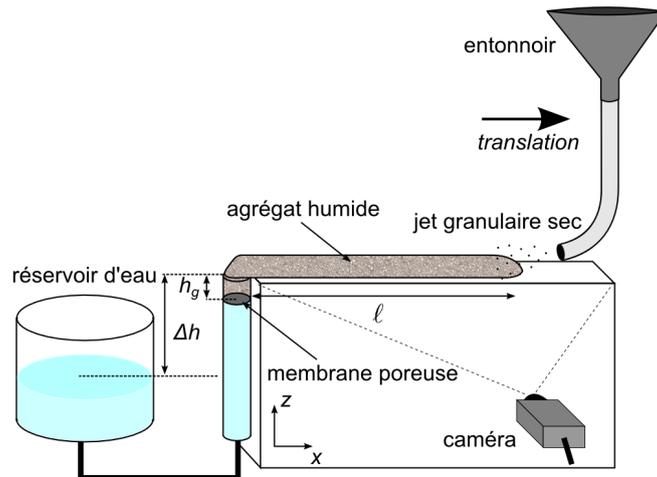


FIGURE 1 – Schéma du dispositif expérimental d'accrétion.

mécaniques ou chimiques. Lorsqu'un grand volume de liquide est ajouté une suspension granulaire est obtenue, présentant un comportement fluide complexe [2, 3]. À l'inverse, l'apport de petites quantités de liquide crée de la cohésion dans le matériau en formant des ponts capillaires entre les grains [4, 5, 6]. Pour des volumes intermédiaires, des hétérogénéités spatiales peuvent apparaître dans le matériau granulaire humide, notamment pendant le mélange, et produire des bulles ou des agrégats qui vont localement impacter les propriétés mécaniques du matériau final.

La plupart des études sur les matériaux granulaires humides ont porté sur la répartition ou la dynamique d'écoulement du fluide au sein d'un empilement granulaire statique [7, 8]. Le matériau granulaire se comporte alors comme un matériau poreux et le transport du liquide est assuré par la capillarité, faisant apparaître une dynamique du type Lucas-Washburn [9].

Récemment, des situations dynamiques ont été étudiées soit en déposant au goutte à goutte une suspension granulaire dense sur un substrat sec [10], soit en versant un jet dilué de grains secs sur un substrat humide [11]. Dans chacun des cas, une tour granulaire cohésive est créée mais l'origine physique de la dynamique de croissance est différente. Dans le premier cas, elle résulte de la compétition entre le drainage du liquide et la fréquence de chute des gouttes. Dans l'autre, la dynamique est limitée par l'accrétion des grains secs sur la structure humide. Néanmoins ce processus d'accrétion n'est toujours pas compris et l'origine de la dynamique de croissance ainsi que le mécanisme de capture reste à expliquer. Dans cet article, nous proposons d'étudier le processus d'accrétion entre un matériau granulaire humide et des grains secs en écoulement au moyen d'une expérience modèle d'accrétion à dépression hydrostatique constante. Ce dispositif expérimental permet de s'affranchir de la gravité et met en évidence une transition entre deux régimes de croissance.

## 2 Dispositif expérimental

Nous avons réalisé des expériences d'accrétion granulaire en utilisant des billes de verres sphériques de diamètres  $d_g = 300\text{-}350 \mu\text{m}$  versées à débit et vitesse constants sur un substrat humide composé des mêmes billes (voir Fig. 1). Le substrat granulaire humide, de  $h_g = 10 \text{ mm}$  de hauteur, est préparé dans un tube en polypropylène de 10 mm de diamètre puis est connecté à un réservoir d'eau afin d'imprégner les grains. Le substrat humide et le liquide sont séparés par une membrane poreuse ne laissant passer

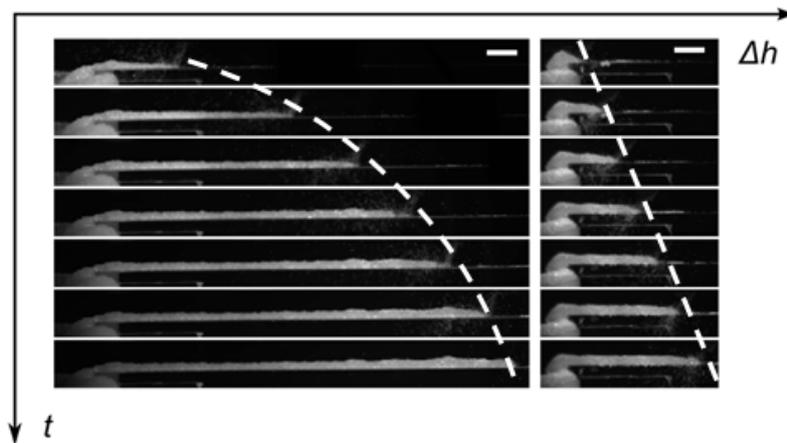


FIGURE 2 – Séries de photographies de la croissance d'agrégats pour différentes dépressions hydrostatiques reliées à  $\Delta h$ . (à gauche)  $\Delta h = 0,5$  cm (à droite)  $\Delta h = 4,9$  cm. Les clichés sont séparés de 40 s et la barre d'échelle vaut 1 cm.

que le liquide et le niveau d'eau du réservoir peut être ajusté pour modifier la dépression hydrostatique dans le substrat. On note  $\Delta h$  la différence de hauteur entre le niveau d'eau et le haut du matériau humide. Les billes de verre sont versées via un entonnoir en inox à un débit de 1,1 g/s dans un tube en inox de 20 cm présentant une extrémité flexible afin d'orienter le jet. Un agrégat granulaire croît horizontalement sur un fin support en PMMA de 6 mm de largeur, permettant l'évacuation des grains secs non capturés durant l'expérience. L'extrémité du tube est maintenue à environ 10 mm du support pour que les grains impactent à une vitesse constante (de l'ordre de 1,6 m/s). Le système d'alimentation est placé sur un chariot mobile permettant une translation au cours de l'expérience pour maintenir une distance constante entre le jet et l'agrégat. La croissance de ce dernier est enregistrée avec une caméra CCD à faible fréquence d'acquisition (0,5 Hz) et analysée par traitement d'image.

### 3 Résultats expérimentaux

Différentes expériences de croissances ont été réalisées en faisant varier la différence de hauteur  $\Delta h$  entre la position du niveau d'eau et celle de l'agrégat pour modifier la dépression hydrostatique d'une expérience à une autre. En augmentant  $\Delta h$ , un changement de dynamique de croissance est observé [voir Fig. 2]. Pour comprendre cette évolution, nous proposons une étude de la structure interne de l'agrégat et de sa dynamique de croissance.

#### 3.1 Microstructure de l'agrégat

La microstructure de l'agrégat est observée grâce à des expériences de tomographie aux rayons X réalisées avec un tomographe de laboratoire. Les rayons X sont générés par un canon à électrons bombardant une plaque de tungstène, ce qui produit des photons d'énergie 40 keV. La résolution spatiale est de 7,5  $\mu\text{m}$  et la fenêtre de détection de 13 mm  $\times$  10 mm. Pour ces expériences, l'agrégat est formé en remplaçant l'eau par une solution aqueuse d'iodure de zinc ( $\text{ZnI}_2$ ) à 0,5 g/mL afin d'augmenter le contraste d'absorption entre les différentes phases (billes de verre, liquide et air) [8]. La réalisation d'une reconstruction tomographique 3D nécessite l'acquisition de 1395 projections également espacées pour couvrir un angle total de 180° et dure environ 40 min.

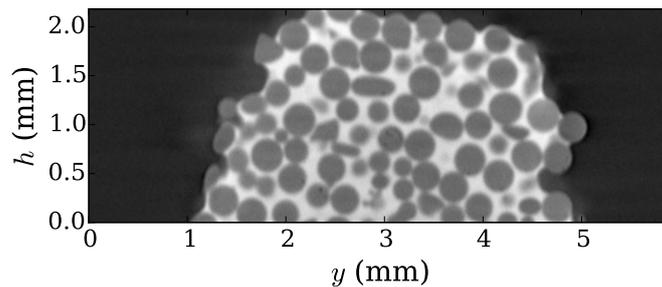


FIGURE 3 – Coupe verticale d’une reconstruction tomographique 3D d’un agrégat humide. Le liquide apparaît en blanc, les billes en gris et l’air en noir.

Les reconstructions tomographiques montrent que les agrégats sont complètement saturés et ne présentent quasiment aucune bulle d’air (voir Fig. 3). L’agrégat est donc dans le régime capillaire et sa cohésion est assurée par la dépression capillaire imposée aux ménisques à l’interface eau/air. Il en résulte que la dépression hydrostatique est la même dans tout l’agrégat au cours de la croissance puisque  $\Delta h$  est fixe. A l’interface liquide/air, le saut de pression capillaire associé à la courbure locale des ménisques compense la différence de pression hydrostatique :

$$p_0 - \rho g \Delta h = p_0 - \frac{2\gamma \cos \theta}{R}, \quad (1)$$

où  $p_0$  est la pression atmosphérique,  $\gamma = 72 \text{ mN/m}$  ( $\pm 1 \text{ mN/m}$ ) est la tension de surface de l’eau,  $\theta = 27^\circ$  ( $\pm 5^\circ$ ) est l’angle de contact de l’eau sur les billes de verre et  $R$  est le rayon de courbure des ménisques à l’interface avec l’air. La courbure des ménisques à l’équilibre augmente donc avec la différence de hauteur  $\Delta h$ , entraînant une rétraction des interfaces pour s’adapter à la géométrie des grains.

### 3.2 Dynamique de croissance

On constate que la dynamique de croissance des agrégats ralentit lorsque la différence de hauteur  $\Delta h$  augmente comme le montre la Fig. 2 avec des croissances temporelles d’agrégat pour deux valeurs de  $\Delta h$ . En réalisant une série d’expériences à différents  $\Delta h$ , il apparaît que l’évolution de la longueur de l’agrégat  $\ell$  en fonction du temps passe d’un régime diffusif où  $\ell \propto \sqrt{t}$ , à faible  $\Delta h$  à un régime linéaire où  $\ell \propto t$ , à grand  $\Delta h$  [Fig. 4(a)].

L’existence de ces deux régimes peut être interprétées en considérant les mécanismes locaux d’accrétion. L’agrégat se construit en capturant des grains secs à l’interface liquide/air du matériau granulaire humide. Le liquide doit donc pénétrer à travers les couches de grains pour atteindre sa position d’équilibre et être accessible aux grains secs. Lorsque  $\Delta h$  est faible, le rayon de courbure des ménisques  $R$  est très grand, rendant la capture efficace. Par conséquent, la dynamique de croissance de l’agrégat est limitée par l’apport du liquide à l’interface, que l’on peut modéliser par le déplacement visqueux d’un fluide au sein d’une matrice poreuse. En résolvant l’équation de Darcy unidirectionnelle, le régime visqueux peut être décrit par la loi de Lucas-Washburn [9] :

$$\ell_{visc}(t) = \sqrt{\frac{2k\Delta p t}{\eta}}, \quad (2)$$

où  $k$  est la perméabilité de l’empilement,  $\eta$  la viscosité de l’eau et  $\Delta p = p_c - \rho g \Delta h$  la pression capillaire

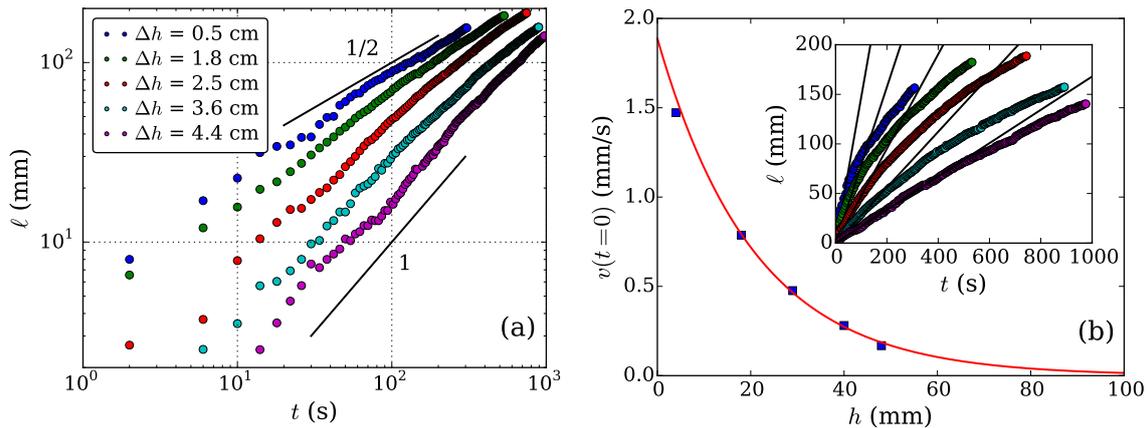


FIGURE 4 – (a) Évolution temporelle de la longueur de l’agrégat pour différentes valeurs de  $\Delta h$ . Les tracés des lois de puissance sont indicatifs. (b) Variation de la vitesse initiale de croissance en fonction de la différence de hauteur  $\Delta h$  entre le niveau d’eau et l’agrégat. La ligne pleine est issue d’un ajustement exponentiel des données. Encart : Calcul de la vitesse initiale à partir de la croissance temporelle des agrégats.

corrigée par la différence de pression hydrostatique. La pression  $p_c$  est définie comme  $2\gamma \cos \theta / r_p$  où  $r_p$  est le rayon moyen des pores. A l’inverse, lorsque  $\Delta h$  est grand, le rayon de courbure des ménisques est très faible et le liquide peu accessible aux grains impactant l’interface. Dans ce cas, l’efficacité du processus de capture devient le paramètre limitant de la croissance de l’agrégat. En écrivant le taux de croissance de l’agrégat comme le rapport de grains capturés sur la quantité totale de grains impactant, il vient :

$$\frac{d\ell_{\text{capt}}}{dt} = P_{\text{capt}} \frac{Q_g}{\rho_s \phi S}, \quad (3)$$

où  $\phi$  est la compacité de l’empilement granulaire ( $\phi = 0,63 \pm 0,01$ ),  $S$  est la section de l’agrégat et  $P_{\text{capt}}$  est la probabilité de capture définie comme le rapport de grains collés sur la quantité de grains impactant. En supposant que cette probabilité est constante pour  $\Delta h$  fixé, la longueur de l’agrégat croît linéairement dans le régime de capture :

$$\ell_{\text{capt}}(t) = P_{\text{capt}} \frac{Q_g}{\rho_s \phi S} t. \quad (4)$$

La transition entre ces deux régimes est pilotée par l’efficacité du processus d’accrétion qui dépend de la différence de hauteur  $\Delta h$ . Une mesure de celle-ci est effectuée en relevant la vitesse initiale de croissance  $v(t = 0, \Delta h)$  pour chaque agrégat. En effet, le taux de croissance initial résulte de la probabilité de capture des grains et non du déplacement du fluide puisque celui-ci est déjà disponible à l’interface avec l’air. L’évolution de  $v(t = 0)$  avec  $\Delta h$  est tracée sur la Fig. 4(b) et peut être correctement ajustée avec une décroissance exponentielle :

$$v(t = 0, \Delta h) = v_0 \exp\left(-\frac{\Delta h}{h^*}\right), \quad (5)$$

où  $v_0$  est la vitesse de croissance dans le régime de capture à  $\Delta h = 0$  et  $h^*$  est la longueur caractéristique de décroissance de la probabilité de capture. Un résultat similaire a été obtenu pour la vitesse de croissance de tours granulaires verticales formées par accrétion à partir d’un jet de grains secs et présentant

une dynamique de croissance logarithmique en temps [11]. Par ailleurs la valeur observée pour  $h^*$  est comparable à celle issue de nos données expérimentales. Ceci indique que la dynamique de croissance des tours résulte de la variation de dépression hydrostatique au sein de l'agrégat humide.

## 4 Conclusion

Nous avons étudié la dynamique d'accrétion dans les matériaux granulaires humides en considérant une expérience modèle de croissance d'agrégat et en modifiant la dépression imposée dans la phase humide [12]. L'imagerie par tomographie aux rayons X démontre que l'agrégat est en régime capillaire et que sa cohésion est reliée à la dépression capillaire aux interfaces liquide/air. Deux régimes de croissance ont été mis en évidence en fonction de la dépression hydrostatique dans le matériau. Le régime visqueux est limité par le transport du liquide au sein du matériau vers les interfaces alors que le régime de capture résulte de l'efficacité du processus de capture des grains par le liquide. Ce travail démontre l'importance du comportement des interfaces sec/humide dans les phénomènes d'agglomération de grains en présence de liquide, utilisés notamment dans l'industrie pour les procédés de granulation.

## Références

- [1] J. Duran. Sands, Powders, and Grains : An Introduction to the Physics of Granular Materials, Springer-Verlag, New-York (2012).
- [2] C. Bonnoit, T. Darnige, E. Clement, & A. Lindner. Inclined plane rheometry of a dense granular suspension, *J. Rheol.* **54**, 65 (2010).
- [3] F. Boyer, E. Guazzelli, & O. Pouliquen. Unifying suspension and granular rheology, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 188301 (2011).
- [4] S. Herminghaus. Dynamics of wet granular matter, *Adv. Phys.* **54**, 221-244 (2005).
- [5] N. Mitarai & F. Nori. Wet granular materials, *Adv. Phys.* **55**, 1-45 (2006).
- [6] A. Kudrolli. Sticky sand, *Nat. Mater.* **7**, 175-175 (2008).
- [7] M. Reyssat, L. Y. Sangue, E. A. Van Nierop, & H. A. Stone. Imbibition in layered systems of packed beads, *Europhys. Lett.* **86**, 56002 (2009).
- [8] M. Scheel, R. Seeman, M. Brinkman, M. di Michel, A. Sheppard, B. Breidenbach, & S. Herminghaus. Morphological clues to wet granular pile stability, *Nat. Mater.* **7**, 189 (2008).
- [9] W. Washburn. The dynamics of capillary flow, *Phys. Rev.* **17**, 273 (1921).
- [10] J. Chopin & A. Kudrolli. Building designed granular towers one drop at a time, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 208304 (2011).
- [11] F. Pacheco-Vázquez, F. Moreau, N. Vandewalle, & S. Dorbolo. Sculpting sandcastles grain by grain : self-assembled sand towers, *Phys. Rev. E* **86**, 051303 (2012).
- [12] G. Saingier, A. Sauret & P. Jop. Accretion dynamics on wet granular materials, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 208001 (2017).