



HAL
open science

Procédé de densification de sable par vibrations horizontales. Etude expérimentale des mouvements granulaires en géométrie 3D.

Ahmed Raihane, Olivier Bonnefoy, Jean-Louis Gelet, Gérard Thomas,
Jean-Marc Chaix

► To cite this version:

Ahmed Raihane, Olivier Bonnefoy, Jean-Louis Gelet, Gérard Thomas, Jean-Marc Chaix. Procédé de densification de sable par vibrations horizontales. Etude expérimentale des mouvements granulaires en géométrie 3D.. XI° Congrès de la Société Française de Génie des Procédés. Des réponses industrielles pour une société en mutation., Oct 2007, Saint Etienne, France. pp.ISBN=2-910239-70-5. hal-00457925

HAL Id: hal-00457925

<https://hal.science/hal-00457925>

Submitted on 18 Feb 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Procédé de densification de sable par vibrations horizontales. Etude expérimentale des mouvements granulaires en géométrie 3D.

RAIHANE AHMED⁽¹⁾, BONNEFOY OLIVIER^{(1)*}, GELET JEAN-LOUIS⁽²⁾, THOMAS GÉRARD⁽¹⁾, CHAIX JEAN-MARC⁽³⁾

⁽¹⁾ Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SPIN, Département PMMC, LPMG UMR 5148, 158 Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2, France

⁽²⁾ Ferraz-Shawmut, 6, rue de Vaucanson. 69720 Saint-Bonnet de Mûre.

⁽³⁾ SIMAP-LTPCM, INPGrenoble-CNRS-UJF. BP 75 Domaine Universitaire. 38402 Saint-Martin d'Hères

Résumé

Cette étude expérimentale d'un milieu granulaire 3D soumis à des vibrations horizontales montre que ce milieu subit une transition vers la fluidisation pour une valeur critique de l'accélération Γ_{cl} croissante avec la fréquence. Deux rouleaux de convection contrarotatifs ont été observés. Des mouvements ascensionnels de grains sur les parois perpendiculaires aux vibrations sont observés pour fortes valeurs de Γ . Partant d'un état initial peu dense $C_i \sim 0,6$, les vibrations horizontales ont tendance à le densifier. Le taux de densification augmente presque linéairement avec l'accélération. Il décroît ensuite pour se stabiliser finalement pour les fortes accélérations.

Mots-Clés:

vibrations horizontales ; géométrie 3D ; fluidisation ; convection ; densification

I. Introduction

La manipulation des matériaux granulaires au moyen de procédés vibratoires est omniprésente dans nos industries. La société FERRAZ-SHAWMUT, leader dans son domaine de protection des semi-conducteurs, utilise un tel procédé dans l'élaboration de ses fusibles. Ces derniers sont composés d'une coque en céramique dans laquelle est positionnée une lame métallique. Un procédé vibratoire est utilisé afin de remplir la coque par du sable et le densifier. En effet, le but poursuivi est d'obtenir un empilement granulaire le plus compact possible et le plus homogène autour de la lame métallique afin d'améliorer la fonction de coupure du fusible. A titre d'exemple, une variation de la compacité de 0,67 à 0,63 s'accompagne d'un dysfonctionnement du fusible. La densification est réalisée en vibrant le fusible soit horizontalement, soit verticalement, au moyen de chocs périodiques.

Beaucoup d'études se sont intéressées aux milieux granulaires vibrés. Les vibrations verticales ont été exhaustivement étudiées (Fauve *et al.*, 1989 ; Knight *et al.*, 1995 ; Rouèche *et al.*, 2005). En revanche, il existe relativement peu d'études traitant des vibrations horizontales. Ces études sont en majorité menées dans une géométrie bidimensionnelle ou quasi-2D et se sont intéressées principalement à deux phénomènes. D'une part, la transition vers la fluidisation étudiée numériquement par (Ristow *et al.*, 1997), et expérimentalement par (Tennakoon *et al.*, 1999 ; Metcalfe *et al.*, 2002). D'autre part, les mouvements convectifs où il a été montré numériquement et expérimentalement l'existence de rouleaux contrarotatifs de convection (Liffman *et al.*, 1997 ; Medved *et al.*, 1999 ; Saluena et Poschel, 2000 ; Hsiau *et al.*, 2002). Cependant, le nombre et le sens de rotation des rouleaux de convection ne font pas consensus.

* Corresponding Author: obonnefoy@emse.fr

Nous proposons ici de nous intéresser aux mouvements granulaires dans un milieu en 3D soumis à des vibrations horizontales, et leurs influences sur la compacité de l'empilement. Dans une première partie, nous présenterons le dispositif expérimental permettant de fournir des vibrations sinusoïdales purement horizontales. Une deuxième partie sera consacrée à une description qualitative des différents phénomènes observés expérimentalement. En particulier, nous nous intéresserons à la transition vers la fluidisation et aux mouvements convectifs et à leur influence sur la compacité du milieu granulaire. L'influence de la géométrie du récipient sera également étudiée. Dans une troisième partie, nous nous intéressons à l'empilement relaxé après vibrations. Par une approche quantitative nous décrivons l'évolution de la compacité relaxée en fonction de l'accélération des vibrations.

II. Dispositif expérimental

Le montage expérimental utilisé est représenté sur la Figure 1. Pour fournir des vibrations sinusoïdales, nous utilisons un pot vibrant électromagnétique S 513 de la société Tira. Il est piloté par un amplificateur de puissance de type BAA 120 (Tira) et par un contrôleur de vibration sinusoïdal DSC4 (Ling Dynamic Systems) relié à un accéléromètre piézoélectrique de type 4371 V (Bruel et Kjaer) pour clore la boucle d'asservissement. Le pot vibrant est relié par un bras de transmission à une table mobile montée sur quatre chariots guidés par des rails en queue d'aronde. Avec un autre accéléromètre relié à un oscilloscope, nous avons pu vérifier que la table vibrante suit bien la consigne imposée. Nous avons également essayé de quantifier les vibrations parasites dans les deux autres directions. Nous en concluons que les vibrations transverses sont quasiment nulles. Pour les vibrations verticales, nous obtenons un faible signal mais qui se confond avec l'imprécision de l'appareil de mesure, ce qui nous ne permet pas de conclure. Cependant, visuellement, on ne voit pas de vibrations verticales parasites.

Nous utilisons les repères suivants autour du point O au centre du récipient : Ox désigne la direction des vibrations, Oy la direction transverse aux vibrations et Oz l'axe vertical. L'axe Ox sera aussi appelé axe Sud-Nord en allant du pot vibrant vers le récipient et l'axe Oy constituera l'axe Est-Ouest. Le récipient utilisé est en plexiglas à parois lisses de dimensions $L_x = 40$ mm, $L_y = 80$ mm et $L_z = 80$ mm.

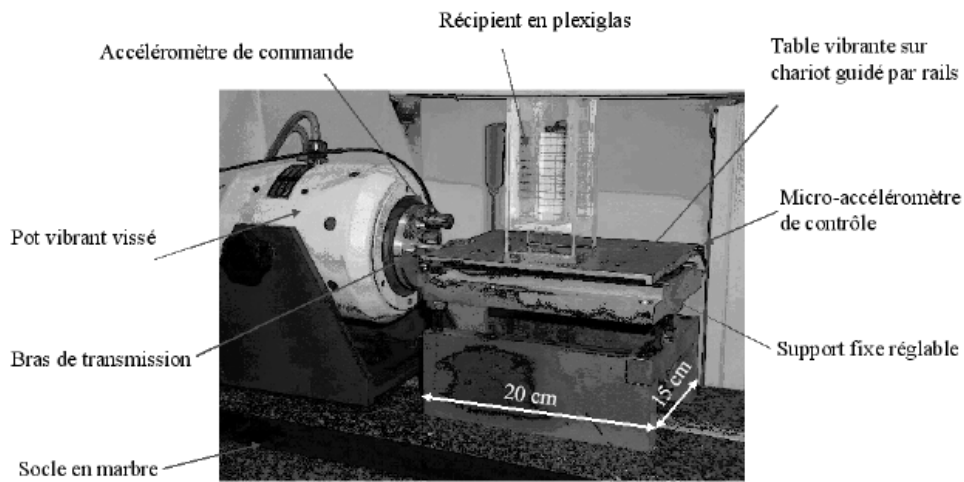


Figure 1. Dispositif expérimental. Le pot vibrant et le support de la table vibrante sont vissés sur le socle en marbre. Le récipient en plexiglas est collé sur la table vibrante.

Le matériau granulaire utilisé est un sable arrondi composé majoritairement de silice (98.4%). Le diamètre moyen des grains est $d \sim 0,66$ mm. Ce sable présente une certaine dispersion en taille que nous caractérisons par le coefficient de variation CV (span) qui mesure la largeur de la distribution. Il est défini par :

$CV = (d_{90\%} - d_{10\%}) / d_{50\%}$ où $d_n\%$ représente la taille en dessous de laquelle se trouvent $n\%$ en masse des grains. Le sable que nous utilisons est caractérisé par : $d_{10\%} = 0,46$ mm, $d_{50\%} = 0,64$ mm et $d_{90\%} = 0,89$ mm, ce qui conduit à un coefficient de variation de 0,68. Cette valeur est assez faible et notre sable est relativement homogène. Nous n'observons pas au cours de nos expériences des phénomènes de ségrégation tel que le « Brazil nut effect » (Rosato *et al*, 1987), phénomène probable pour des milieux granulaires vibrés ayant des distributions de taille plus étalées (CV typiquement supérieur à l'unité).

L'empilement granulaire est obtenu par un remplissage en vrac dont la surface est rendue plane.

Les vibrations appliquées au milieu granulaire sont sinusoïdales suivant une direction horizontale Ox, et sont représentées par la fonction $x(t) = A \sin(2\pi f t)$, où A et f désignent l'amplitude et la fréquence des vibrations. On introduit aussi l'accélération relative Γ définie par le rapport de l'amplitude maximale de l'accélération et de l'accélération de la pesanteur g :

$$\Gamma = A(2\pi f)^2 / g .$$

Une expérience typique consiste à augmenter l'accélération relative Γ à fréquence fixée. Nous pouvons ainsi explorer des valeurs de Γ entre 0 et 8 pour une fréquence $f = 50$ Hz. D'autres fréquences comprises entre 15 et 300 Hz ont été également explorées.

III. Description qualitative

III.1 Transition vers la fluidisation et mouvements convectifs

Partant du repos, quand on augmente Γ à fréquence fixée, nous observons différents comportements selon les valeurs de Γ . Nous présenterons ici cette évolution pour la fréquence $f = 50$ Hz et pour un empilement initial de hauteur $H \sim 85$ d et une compacité statique $C \sim 0,61$.

- ❖ $0 < \Gamma < 0,4$: Pour ces valeurs de Γ , l'empilement se comporte comme un bloc solide qui suit le mouvement des parois. L'empilement ne subit aucun changement par rapport à son état initial.
- ❖ $0,4 < \Gamma < \Gamma_{c1}$: La surface devient d'abord parfaitement plane et la hauteur de l'empilement diminue de plus en plus en augmentant Γ . Ainsi, le milieu se densifie : la compacité dynamique est supérieure de $\sim 5\%$ à la compacité statique initiale. Nous observons également, à la surface, qu'un mouvement de "frémissement" de quelques grains s'initie. Les grains vibrent sur place et quelques uns sautillent d'un endroit à l'autre. Il s'agit d'un mouvement désordonné des grains. Ce mouvement s'accroît quand Γ augmente et reste localisé sur une couche superficielle d'épaisseur $e \sim 2d$. L'empilement en dessous de cette couche semble immobile dans le référentiel du récipient, il se comporte comme un bloc solide qui suit le mouvement des parois.
- ❖ $\Gamma_{c1} \sim 0,8$: Nous observons une transition d'un mouvement désordonné des grains vers un mouvement collectif. Les grains montent à la surface de l'empilement au milieu de la cellule pour se diriger vers les parois et descendre le long des parois Nord et Sud, ce qui correspond à l'apparition de deux rouleaux de convection contrarotatifs (Figure 2).
- ❖ Cette transition appelée transition vers la fluidisation (ou l'écoulement) a été étudiée expérimentalement par (Tennakoon *et al*, 1999 ; Metcalfe *et al*, 2002). Selon ces auteurs, cette transition dépend essentiellement de la valeur de Γ et très peu de la fréquence dans le domaine des fréquences étudiées (7-15Hz). Cependant, nous observons que cette transition dépend fortement de la fréquence et que la valeur de Γ critique augmente avec la fréquence. Nous observons également que cette transition se passe de manière différente pour des hautes fréquences (~ 300 Hz). Pour ces fréquences, nous n'observons quasiment pas le mouvement de frémissement des grains à la surface qui précède cette transition pour les faibles fréquences. Tout l'empilement

semble immobile dans le référentiel du récipient en dessous de Γ critique ($\Gamma_{c1} \sim 1,5$ pour $f = 300$ Hz). Au passage de cette valeur, quelques grains commencent à descendre le long des parois et le mouvement collectif s'initie.

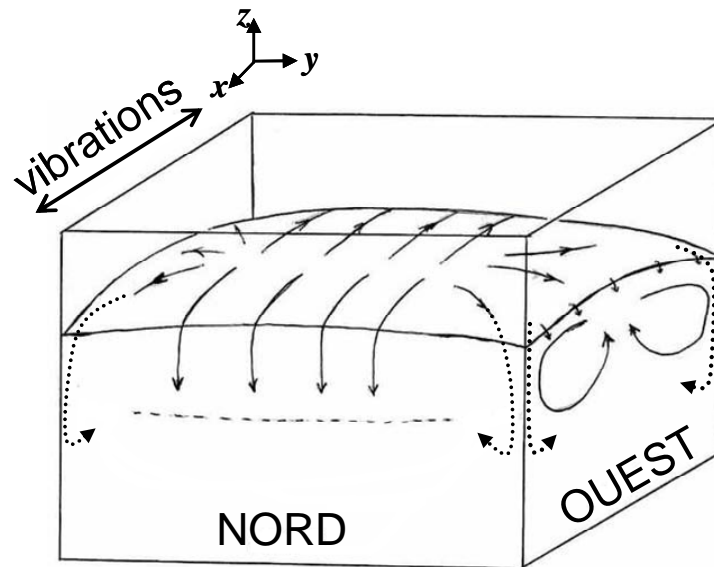


Figure 2. Schéma des mouvements granulaires constituant les deux rouleaux de convection. La ligne discontinue indique la zone où les grains disparaissent de la surface N et S vers le cœur de l'empilement. Les flèches en pointillé indiquent le mouvement au niveau des arêtes à partir de Γ_{c2} .

- ❖ $\Gamma_{c1} < \Gamma < \Gamma_{c2}$: En augmentant Γ , le mouvement convectif se précise. L'empilement se ségrège en deux couches : une couche superficielle fluidisée et un bloc inférieur solide qui suit le mouvement du récipient (Figure 2). Les deux rouleaux de convection contrarotatifs sont localisés dans la zone fluidisée qui devient de plus en plus profonde. La vitesse des grains dans cette zone augmente également. Selon le principe de dilatance de Reynolds, pour avoir des mouvements de grains, le milieu doit se dilater. L'augmentation de vitesse devrait donc s'accompagner d'une dilatation du milieu or nous observons le contraire. Pour expliquer ce paradoxe apparent, nous faisons l'hypothèse que la couche fluidisée se dilate en même temps que le bloc solide inférieur se densifie. La densification de ce dernier est plus importante que la décompaction de la couche fluidisée. La compacité dynamique globale est alors supérieure de $\sim 10\%$ à la compacité statique initiale. Dans cet intervalle de Γ , la surface libre de l'empilement a une forme de dôme plan de faible courbure et de faite parallèle aux faces Nord et Sud.
- ❖ $\Gamma > \Gamma_{c2} \sim 2$: L'épaisseur de la couche fluidisée continue d'augmenter avec Γ . En revanche, un phénomène nouveau apparaît. La symétrie 2D observée auparavant est brisée. Le long des quatre arêtes verticales, les grains descendent désormais plus rapidement et plus profondément que ceux situés au centre des parois Nord et Sud. Cette chute accélérée est observée jusqu'à une distance de 4 ou 5 mm de l'arête. Juste à proximité, on observe une remontée de quelques grains (Figure 2). Pour des accélérations relatives supérieures à 4, on distingue 3 zones sur la face Nord (Figure 3) :
 - ❖ dans la partie centrale supérieure, les grains descendent (rouleau de convection de la couche fluidisée),
 - ❖ dans la partie centrale inférieure, les grains remontent (assez lentement),
 - ❖ le long des deux arêtes Nord-Est et Nord-Ouest, les grains descendent (assez rapidement).

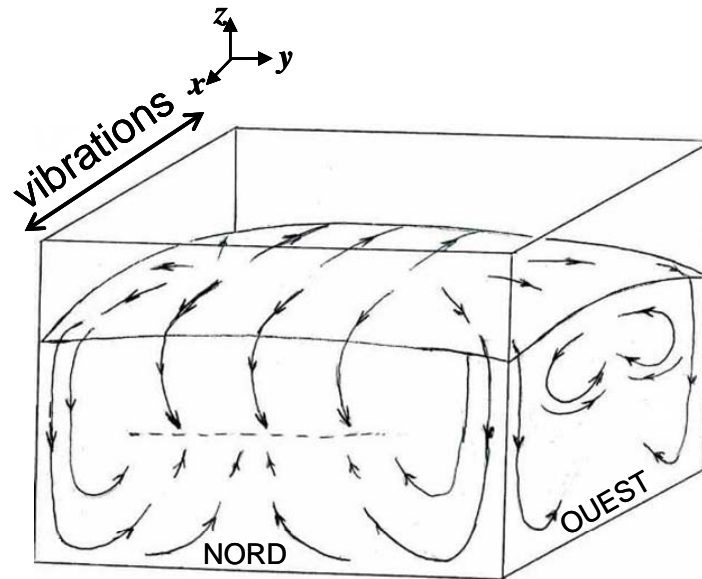


Figure 3. Schéma des mouvements granulaires pour $\Gamma > 4$ et $f = 50$ Hz. Sur la paroi Nord, le milieu est divisé en deux zones selon le sens de mouvement des grains. Sur la paroi Ouest, nous observons toujours les deux rouleaux de convection dans la partie supérieure. En dessous, le mouvement des grains est difficile à observer.

La frontière horizontale entre les deux parties centrales correspond à une zone où les grains quittent la paroi pour pénétrer dans le cœur de l'empilement.

Nous pensons que les mouvements ascensionnels des grains dans la zone centrale inférieure sont dus au mouvement de chute des grains le long des arêtes. Cependant, nous ne pouvons pas affirmer qu'il s'agit ici de la création de deux nouveaux rouleaux de convection inférieurs comme ceux observés par (Medved *et al.*, 1999). Le mouvement des grains sur les parois Est et Ouest ne met en évidence que les deux rouleaux supérieurs. La complexité des phénomènes observés et l'absence de symétrie 2D souligne l'intérêt d'une véritable étude 3D telle que menée ici.

Dans cet intervalle de Γ , il est difficile d'estimer la compacité dynamique de l'empilement en se basant uniquement sur des mesures visuelles. Cependant, nous pouvons affirmer que pour des fortes valeurs de Γ ($\Gamma > 4$) l'empilement se dilate fortement avec une couche supérieure très agitée et lâche et une couche inférieure moins agitée et plus dense.

En conclusion, un empilement granulaire 3D initialement homogène en compacité perd cette homogénéité quand il est soumis à des vibrations horizontales à cause des mouvements convectifs qui se créent en son sein. Pour une valeur de l'accélération relative comprise entre Γ_{c1} et Γ_{c2} , le milieu se sépare en deux zones : une couche superficielle qui s'aère et une couche inférieure qui se densifie. Au delà de Γ_{c2} , on observe trois zones : une couche centrale supérieure, une couche centrale inférieure où la vitesse des grains est plus faible et les zones à proximité des arêtes où la vitesse des grains est plus forte. Remarquons que ce phénomène d'inhomogénéisation n'existe pas pour les empilements vibrés verticalement, comme le montre (Rouèche *et al.*, 2005) par analyse de tomographie X.

III.2 Influence de la géométrie du récipient

Dans ce paragraphe, nous nous plaçons dans les mêmes conditions opératoires que précédemment à ceci près que nous avons fait pivoter le récipient de 90°. De la sorte, les dimensions deviennent $L_x = 80$ mm, $L_y = 40$ mm et $L_z = 80$ mm. A fréquence fixée, nous faisons varier l'accélération relative Γ en partant du repos. Nous observons globalement les mêmes trois phénomènes constatés précédemment : une transition vers la fluidisation, l'apparition des deux rouleaux de convection contrarotatifs et la brisure de symétrie (valeurs critiques Γ_{c1} et Γ_{c2}). Cependant, nous avons relevé quelques différences. La valeur de Γ_{c1} est

inférieure à celle relevée pour la géométrie du récipient définie par $L_x = 40$ mm et $L_y = 80$ mm. Pour $f=50$ Hz, Γ_{c1} passe de 0,8 à 0,65.

Pour des accélérations comprises entre Γ_{c1} et Γ_{c2} , nous retrouvons une forme de la surface libre de dôme plan mais avec une courbure beaucoup plus élevée. Nous avons également constaté que l'influence des arêtes sur les mouvements des grains est plus importante dans ce cas de figure. Ce qui se manifeste par une valeur plus faible pour Γ_{c2} et par une déformation des rouleaux de convection qui s'allongent au niveau des arêtes (Figure 4).

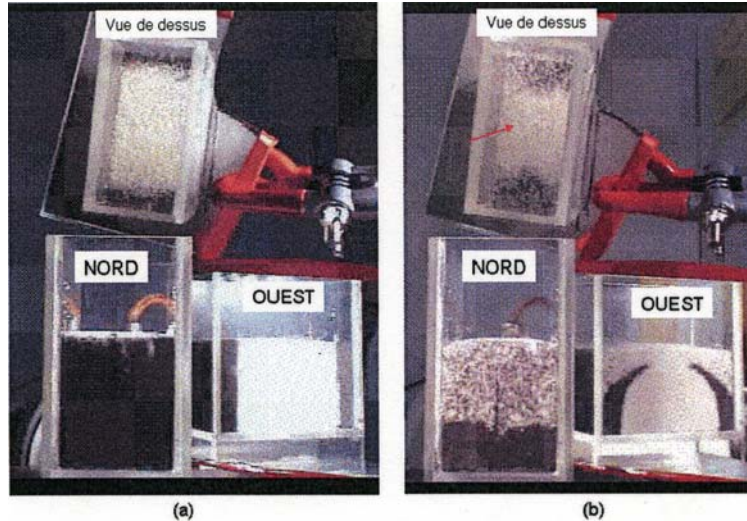


Figure 4. Photos d'un empilement granulaire, avec $L_x = 80$ mm et $L_y = 40$ mm, formé de sable normal et sable coloré en noir. Deux miroirs permettent d'avoir trois vues différentes de l'empilement. (a) état initial ; (b) après vibrations à $f=50$ Hz et $\Gamma=1,5$. La forme de la bande noire indique la forme des cellules de convection.

IV. Approche quantitative

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'influence des vibrations horizontales sur la compacité globale de l'empilement granulaire après relaxation et plus précisément à l'influence de l'accélération relative Γ pour une fréquence fixée, ici $f=50$ Hz.

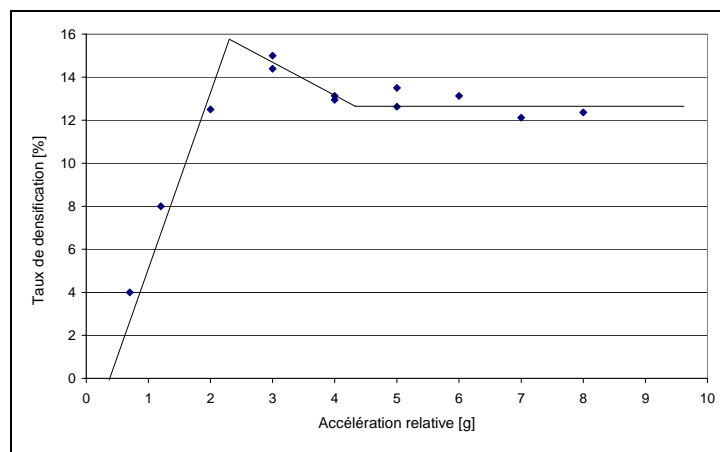


Figure 5. Taux de densification de l'empilement relaxé en fonction de l'accélération Γ .

Différentes accélérations ont été explorées en partant toujours d'un même état initial en terme de compacité moyenne : $C_i \sim 0,59$. Pour chaque accélération, l'empilement a été vibré jusqu'à atteindre un état « stationnaire » puis relaxé par arrêt instantané des vibrations. La Figure 5 présente l'influence de ce traitement sur la compacité relaxée.

Nous observons que pour toutes les accélérations étudiées nous obtenons une densification de l'empilement par rapport à l'état initial qui était relativement peu dense. Nous distinguons trois zones. Dans une première zone, pour des accélérations relatives inférieures à 2,5, le taux de densification augmente avec l'accélération. L'efficacité de la densification diminue ensuite puis se stabilise pour des accélérations supérieures à 4,5.

Nous avons observé précédemment qu'en régime dynamique pour des accélérations inférieures à Γ_{c2} (~ 2 pour $f=50$ Hz) nous obtenons des taux de densification de plus en plus importants quand on augmente Γ (voir paragraphe 3.1). Nous retrouvons ici ce comportement et cette tendance en régime relaxé pour ces accélérations. Pour les fortes accélérations, nous n'avons pas pu constater de densification par rapport à l'état initial en régime dynamique à cause de la forte agitation des grains au niveau de la surface. En revanche, nous observons qu'à la relaxation, l'empilement se tasse considérablement comme le montre la Figure 6.



Figure 6. Vue de la face Est d'un empilement vibré à $f=50$ Hz et $\Gamma=6$. (a) en vibration ; (b) relaxé

Pour tenter d'expliquer l'évolution du taux de densification avec l'accélération, nous faisons l'hypothèse qu'à la transition vers la fluidisation, l'empilement se ségrège en trois couches (Figure 7). Une couche superficielle fluidisée, une couche basse immobile dans le référentiel du récipient et insensible aux vibrations et une couche intermédiaire, lieu de réarrangements granulaires contribuant à sa densification. La couche basse et la couche intermédiaire composent le bloc solide décrit dans le paragraphe 3.1 (Voir la Figure 2).

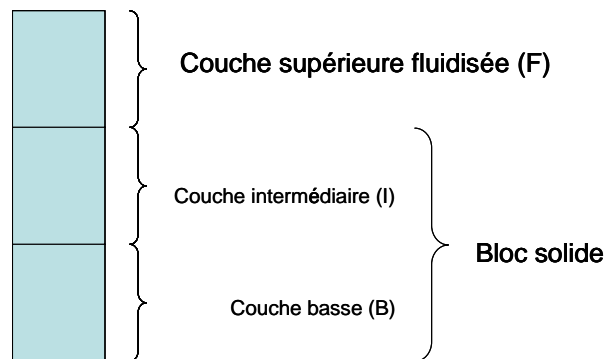


Figure 7. Structure de l'empilement granulaire sous vibrations.

Dans la première zone, quand on augmente l'accélération, l'épaisseur de la couche intermédiaire qui se densifie augmente au détriment de la couche basse peu dense jusqu'à l'éroder totalement. Simultanément, la couche I cède peu de terrain à la couche supérieure fluidisée. Il en résulte une augmentation de la compacité relaxée avec l'accélération. Dans la deuxième zone, le modèle que nous proposons attribue la décroissance de la compacité à l'augmentation de l'épaisseur de la couche supérieure fluidisée au détriment de la couche I ce qui est en accord avec les observations expérimentales faites dans le paragraphe 3.1.

Dans la troisième zone, on observe expérimentalement qu'une augmentation de l'accélération se traduit par une nette augmentation de la vitesse de déplacement des grains mais par une faible variation de la compacité dynamique. Comme la compacité relaxée ne dépend pas de

l'accélération dans cette zone, nous déduisons qu'elle dépend beaucoup plus de la compacité dynamique que de la vitesse des grains avant relaxation.

V. Conclusion

Nous nous sommes intéressés à un empilement granulaire en géométrie 3D soumis à des vibrations horizontales. En augmentant l'accélération, l'empilement subit une transition vers la fluidisation pour une valeur critique Γ_{c1} tout en subissant une densification. Le milieu se ségrège en deux couches : une couche superficielle fluidisée et un bloc inférieur solide, lieu de réarrangements granulaires locaux responsables de la densification. Des mouvements convectifs s'initient dans la zone fluidisée pour donner naissance à deux rouleaux de convection contrarotatifs. Au-delà d'une valeur critique Γ_{c2} , nous observons sur les parois perpendiculaires aux vibrations trois zones : une couche centrale supérieure, une couche centrale inférieure où la vitesse des grains est plus faible et les zones à proximité des arêtes où la vitesse des grains est plus forte. La géométrie du récipient peut influencer les valeurs de ces accélérations critiques.

Partant d'un empilement peu dense $C_i \sim 0,6$, les vibrations horizontales ont tendance à le densifier. Le taux de densification augmente presque linéairement avec l'accélération. Il décroît ensuite pour se stabiliser finalement pour les fortes accélérations.

Références

- Fauve, S., Douady S., Laroche C., 1989. Collective Behaviors of Granular Masses under Vertical Vibrations. *Journal de Physique* 50(C-3), 187-191.
- Hsiau, S.S., Ou M.Y., Tai C.H., 2002. The flow behavior of granular material due to horizontal shaking. *Advanced Powder Technology* 13(2), 167-180.
- Knight, J.B., Ehrichs E.E., Kuperman V.Y., Flint J.K., Jaeger H.M., Nagel S.R., 1996. Experimental study of granular convection. *Physical Review E* 54(5), 5726-5738.
- Liffman, K., Metcalfe G., Cleary P., 1997. Granular convection and transport due to horizontal shaking. *Physical Review Letters* 79(23), 4574-4576.
- Medved, M., Dawson D., Jaeger H.M., Nagel S.R., 1999. Convection in horizontally vibrated granular material. *Chaos* 9(3), 691-696.
- Metcalfe, G., Tennakoon S.G.K., Kondic L., Schaeffer D.G., Behringer R.P., 2002. Granular friction, Coulomb failure, and the fluid-solid transition for horizontally shaken granular materials. *Physical Review E* 65(3), Art. No. 031302 Part 1
- Ristow, G.H., Straßburger G., Rehberg I., 1997. Phase diagram and scaling of granular materials under horizontal vibrations. *Physical Review Letters* 79(5), 833-836.
- Rosato, A, Strandburg, K.J., Prinz F, Swendsen R.H., 1987. Why the Brazil nuts are on top: Size segregation of particulate matter by shaking. *Physical Review Letters* 58(10), 1038-1040.
- Rouèche, E., Thomas G., Gelet J.L., Missiaen J.M., 2005. Study of vibrated granular arrangements by X-ray tomography. *Powder & Grains*, Vol. 2, Ed. R. Gardia-Rojo, H.J. Herrmann and S. Mc Namara, Balkema, 1173-1176.
- Saluena, C., Pöschel T., 2000. Convection in horizontally shaken granular material. *European Physical Journal E* 1(1), 55-59.
- Tennakoon, S.G.K., Kondic L., Behringer R.P., 1999. Onset of flow in a horizontally vibrated granular bed: Convection by horizontal shearing. *Europhysics Letters* 45(4), 470-475.