



## **Etude de procédés de compaction par vibrations horizontales en milieu ouvert ou fermé - Approches expérimentales et numériques.**

Olivier Bonnefoy, Sébastien Nadler, Gérard Thomas, Jean-Marc Chaix,  
Jean-Louis Gelet

► **To cite this version:**

Olivier Bonnefoy, Sébastien Nadler, Gérard Thomas, Jean-Marc Chaix, Jean-Louis Gelet. Etude de procédés de compaction par vibrations horizontales en milieu ouvert ou fermé - Approches expérimentales et numériques.. Jean-François Joly. XIV Congrès de la Société Française de Génie des Procédés, Oct 2013, Lyon, France. Lavoisier technique et Documentation - Edition SFGP, Thème A2 De la génération au conditionnement des solides (104), pp.No 496, 2013. <hal-00875473>

**HAL Id: hal-00875473**

**<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00875473>**

Submitted on 22 Oct 2013

**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.

# Etude de procédés de compaction par vibrations horizontales en milieu ouvert ou fermé – Approches expérimentales et numériques.

BONNEFOY Olivier<sup>a</sup>, NADLER Sébastien<sup>a</sup>, THOMAS Gérard<sup>a\*</sup>, CHAIX Jean-Marc<sup>b</sup>, GELET Jean-Louis<sup>c</sup>

<sup>a</sup>ENSM-SE, Centre SPIN, CNRS-LGF-UMR5307

158 Cours Fauriel, F-42100 Saint-Etienne cedex

<sup>b</sup>Laboratoire SIMAP, UMR 5266, Grenoble-INP-CNRS-UJF

1130 rue de la piscine, BP75, F-38402 Saint-Martin d'Hères cedex

<sup>c</sup>MERSEN, 6 rue Vaucanson, F-69720 Saint Bonnet de Mure

## Résumé

Les procédés de compaction par vibrations sont largement utilisés dans l'industrie (génie civil par exemple pour densifier les soubassements de routes). Plus récemment, dans le domaine des fusibles, les vibrations horizontales ont permis d'améliorer le remplissage de sable dans les récipients contenant les éléments fusibles. L'objectif scientifique est de développer la compréhension des mécanismes mis en jeu dans un milieu granulaire vibré horizontalement permettant d'optimiser le procédé industriel. Deux approches ont été utilisées en parallèle, l'une expérimentale, l'autre par simulation numérique.

L'approche expérimentale a été réalisée sur des grains de silice de diamètre moyen 500  $\mu\text{m}$ . Un récipient de dimensions allant de 1.5 centimètre à 80 cm est soumis à un mouvement sinusoïdal de fréquence comprise entre 20 et 200 Hz, avec des accélérations allant jusqu'à 10 g. Le dispositif instrumenté permet la mesure instantanée de la force, de l'accélération, de la vitesse des grains aux parois (PIV) et de la densité globale du milieu. L'approche numérique est basée sur la méthode des éléments discrets (DEM). Nous avons développé des méthodes spécifiques d'analyse des résultats pour assurer la comparaison avec l'expérience. Elles permettent d'obtenir des informations qui ne sont pas accessibles expérimentalement comme les densités, vitesses et contraintes locales dans l'ensemble de l'empilement. Dans le cas d'un récipient ouvert, la simulation permet de retrouver les résultats expérimentaux : rouleaux de convections, seuils de comportement, influence de l'accélération... Des résultats originaux ont été établis dans les expériences et les simulations comme une croissance de la vitesse des grains avec la longueur du récipient. La simulation a aussi permis d'obtenir des résultats comme l'influence du coefficient de friction sur le sens des rouleaux et la caractérisation des contraintes au sein de l'empilement.

Le comportement du sable dans un récipient fermé (milieu confiné) a été étudié expérimentalement au cours d'un remplissage progressif. De nettes différences par rapport au milieu ouvert ont été constatées lorsque le taux de remplissage devient élevé. Des mesures d'accélération et de force sur l'ensemble du dispositif ont permis de définir et mesurer une masse apparente et l'énergie dissipée par le dispositif.

**Mots-clés :** Milieu granulaire, vibrations horizontales, densification, simulation, DEM

## 1. Introduction

Les dispositifs de remplissage de fusibles à haut pouvoir de coupure par du sable constituent une étape importante des procédés d'élaboration. L'objectif principal est d'obtenir un milieu granulaire le plus dense et le plus homogène possible. Pour une étude systématique, le système de vibrations sinusoïdales contrôlées présente des avantages par rapport à des procédés par chocs, en particulier de meilleurs contrôles et reproductibilité des vibrations et des paramètres. Au niveau scientifique, les phénomènes physiques constatés lors d'une expérience de compaction granulaire par vibration horizontale sont caractérisés par la présence de rouleaux de convection induits par des vitesses contrastées des grains, et une densification locale ou globale du milieu granulaire. Un de nos objectifs est de mieux contrôler et

---

\* Authors(s) to whom the correspondence should be sent: [gthomas@emse.fr](mailto:gthomas@emse.fr)

prévoir les résultats de l'étape de vibration dans un procédé d'élaboration d'un milieu granulaire dense, comme celui de fabrication d'un fusible industriel. Pour cela, une étude paramétrique s'avère utile.

La bibliographie nous a montré que certaines études restaient à mettre en œuvre et/ou à développer, et en particulier la mise en œuvre et l'exploitation d'une méthode de simulations permettant d'étudier les milieux granulaires soumis à des vibrations horizontales. Les principaux paramètres étudiés sont la fréquence, et l'accélération (Raihane 2009, Nadler 2011). L'étude de l'influence de paramètres originaux comme la friction des grains ou la taille du récipient, dans le cas des vibrations horizontales mérite d'être développée.

De plus, il convient de distinguer, dans les méthodes de remplissage et de tassement par vibrations du milieu granulaire ou d'une poudre, celles qui s'appliquent à des systèmes ouverts ou fermés.

En général les études portent sur des systèmes ouverts, le matériau granulaire (le sable par exemple) étant enfermé dans un récipient parallélépipédique clos sur cinq faces, le haut étant laissé à l'air libre. Le procédé industriel est basé sur un remplissage sous vibration avec un toit (cellule constituant un système fermé sur six faces). La densification par vibration dans un tel milieu fermé n'a jamais, à notre connaissance, été étudiée. Nous nous proposons d'effectuer cette étude avec une évaluation de la qualité du remplissage (temps nécessaire, masse introduite). Les différences constatées entre milieu ouvert et fermé seront analysées.

Dans une première étude d'un milieu granulaire contenu dans une boîte ouverte sur le dessus, les résultats expérimentaux obtenus seront comparés à des résultats de modélisation basée sur la méthode des éléments discrets (DEM).

Une seconde étude sera ensuite présentée dans le cas d'un remplissage, où un couvercle ainsi qu'un système d'alimentation en grains par entonnoir ont été fixés sur le dessus de la boîte. Une instrumentation nouvelle combinant capteur de force et accéléromètre a été élaborée dans ce cas : ce dispositif permet d'estimer la puissance dissipée dans le milieu vibré (Matchett 2000, Gelet 2009, Nadler 2012).

## **2. Dispositifs expérimentaux, matériaux et méthodes**

### **2.1 Dispositif de vibrations horizontales et instrumentation**

Le dispositif expérimental combine un pot vibrant électromagnétique et un plateau métallique coulissant monté sur des roulements à billes sur lequel une boîte parallélépipédique est collée (figure 1). Le pot délivre une accélération sinusoïdale, contrôlée par un accéléromètre fixé au plateau. Une caméra rapide couplée à un logiciel PIV – Particle Image Velocimetry- permet également de suivre les vitesses de grains à la paroi du récipient transparent. Un profilomètre optique permet de déduire la compacité globale du milieu granulaire en déterminant la surface supérieure de l'empilement. Pour des petites boîtes, les densités locales après vibration ont été estimées par tomographie X. Les récipients sont constitués de plexiglas d'environ 10 mm d'épaisseur. Pour faciliter le repérage des faces du récipient, une terminologie Nord/Sud/Est/Ouest est associée à l'expérience de vibration : la direction Nord/Sud est celle des vibrations. En système ouvert, le récipient ne comporte que cinq faces, avec quatre faces latérales assez hautes pour éviter toute perte de matière ; il reste ouvert sur le dessus.

En système fermé, le récipient comporte en plus une face supérieure fermée, avec un trou d'accès pour un entonnoir de diamètre 10 mm permettant d'alimenter en sable le récipient même en conditions dynamiques. Cette étude a été réalisée à fréquence constante,  $f=50$  Hz.

La mesure de la force exercée par le pot vibrant (maximum 650 N) et de l'accélération ressentie par le dispositif vibré ont été enregistrées simultanément à l'aide d'un capteur de force et d'un accéléromètre reliés par le biais d'une carte d'acquisition pilotée par le logiciel Labview.

### **2.2 Milieu granulaire**

Le milieu granulaire est un sable constitué de quartz  $\alpha$  de masse volumique  $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ , de granulométrie présentant un diamètre moyen en nombre  $\langle d_g \rangle = 508 \text{ } \mu\text{m}$  avec un écart type de  $122 \text{ } \mu\text{m}$ . Les grains ont une forme peu à bien arrondie, d'après la classification de Powers (Powers 1953). L'angle de talus du tas de sable a été mesuré ( $37,5^\circ$ ). La coulabilité a été caractérisée par une mesure au Flodex : l'indice 4 obtenu correspond à un milieu non cohésif et très fluide.

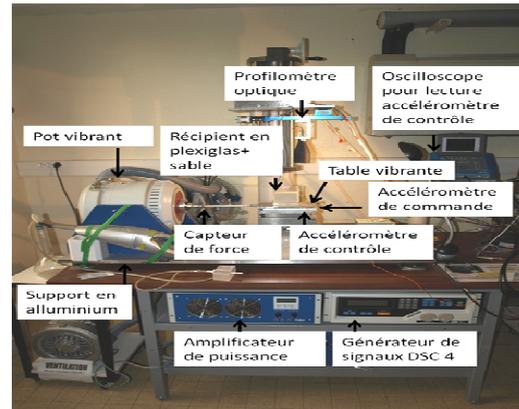
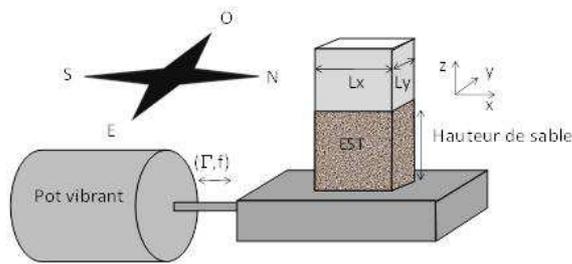


Figure 1. Montage expérimental, principe et réalisation.

### 2.3 Méthode de simulation des mouvements granulaires

Afin d'obtenir des informations sur l'évolution du système granulaire sous vibration, un logiciel fondé sur la méthode DEM (Cundall 1979) des éléments discrets (Discret Element Method) a été utilisé (ITASCA®). Nous avons écrit des codes (MATLAB et FISH-PFC) permettant de comparer les résultats simulés et expérimentaux.

La méthode des éléments discrets repose sur le calcul, à chaque incrément de temps, des forces s'exerçant sur les grains. En laissant aux grains la possibilité de s'interpénétrer légèrement, nous pouvons alors simuler les chocs se produisant dans le milieu granulaire en introduisant dans ce cas une force de répulsion fonction de la distance d'interpénétration entre grains ou entre grains et paroi. Les autres forces (friction, amortissement, pesanteur) dépendent de divers paramètres caractérisant le matériau granulaire, comme les coefficients de friction, le coefficient de restitution lors des chocs entre grains, la densité volumique des grains. Le déplacement s'opérant pendant un pas de temps choisi assez petit pour permettre la simulation des chocs ( $\approx 10^{-4}$ s) est ensuite évalué grâce aux lois de Newton. Les paramètres choisis dans le modèle reprennent, dans la mesure du possible, ceux de l'expérience. Si cette opération n'est pas possible, nous basons la valeur des paramètres sur celle donnée dans la bibliographie (Ollagnier 2007, Nadler 2012). Un travail de post-traitement permet de passer des informations relatives aux grains (description lagrangienne) aux informations relatives au milieu granulaire en fonction de la position examinée par rapport à la boîte vibrée (description eulérienne). Diverses valeurs comme la compacité et les vitesses de grain peuvent ainsi être comparées aux valeurs expérimentales. Des informations nouvelles comme les contraintes, les flux de grains ou encore les vitesses à l'intérieur de l'empilement granulaire sont rendues accessibles par l'outil de simulation. L'introduction de conditions aux limites périodiques permet de réduire avantageusement le temps de calcul et de représenter une boîte très large (théoriquement infinie) dans la direction horizontale  $L_y$  perpendiculaire à l'axe des vibrations. L'influence de la dimension de la cellule périodique a été étudiée : 10 fois le diamètre moyen des grains constitue la dimension minimale et optimale à donner à la cellule pour obtenir des résultats représentatifs. En effet, la phénoménologie n'évolue plus si on augmente encore la taille de la cellule alors que le temps de calcul continue à augmenter. Une distinction est établie entre le coefficient de friction local  $\mu_{g/g}$ , et le coefficient de friction équivalent global  $\mu_s$  propre à l'ensemble du milieu granulaire.

Un test de validité de nos algorithmes et des paramètres choisis, a été effectué en comparant les profils de vitesses des grains en face Nord obtenus par simulation et à l'aide du dispositif expérimental ( $\Gamma=3$ ,  $f=50$  Hz). Une excellente corrélation entre les vitesses de grains mesurées dans les expériences et celles obtenues en simulation a été établie pour des grains de même forme et de même diamètre (grains sphériques de 2 mm) : les vitesses maximales en face Nord et la largeur du pic à mi-hauteur sont identiques. Une bonne corrélation est également trouvée pour des grains de différents diamètres et de forme identique (sphère (mod) et sable (exp)) : pour des grains de diamètre moyen 0,5 mm et 1 mm, on retrouve les mêmes vitesses de chute maximale mais la largeur de pic à mi-hauteur du profil de vitesse en face Nord est légèrement plus étroite en simulation que dans l'expérience. L'influence de la taille des grains a été mise en évidence. Le passage à des grains de diamètre double entraîne une division par 7 de

la vitesse de chute en face Nord. Le comportement des grains reste similaire malgré l'augmentation de la taille des grains: présence de rouleaux, densification par zones, sensibilité aux autres paramètres (accélération, taille de boîte). Nous avons de ce fait choisi d'utiliser dans nos travaux des grains de diamètre double et une paroi périodique, compromis qui s'est avéré nécessaire afin de limiter les temps de calcul.

### 3. Etude de l'effet de vibrations horizontales sur le comportement du milieu granulaire en système ouvert

#### 3.1 Phénoménologie

Les principaux phénomènes relatifs au comportement du milieu granulaire vibré horizontalement ont été identifiés. On constate l'apparition d'un espace de faible densité près des parois Nord/Sud, confirmé par les études DEM. Celui-ci est l'une des causes de l'apparition des rouleaux de convection (déjà indiqués dans la bibliographie). Un régime stationnaire met environ 6 secondes à s'installer d'après la simulation. Cette valeur est cohérente avec celle donnée par la bibliographie, ou par nos propres expériences. En régime stationnaire, on constate l'équilibre des flux de grains entre les différentes zones du milieu granulaire vibré. Il n'y a plus d'évolution locale ou globale de densité en régime stationnaire. Notons que les différences phénoménologiques sont très faibles à partir de 2 secondes de vibration. Les mesures de densités et de vitesses, locales ou globales, qui ont été réalisées à partir de cette période peuvent être considérées comme obtenues en régime quasi-stationnaire. Ce compromis s'est avéré nécessaire pour diminuer le temps de calcul. Les trois états du système –état initial, dynamique (sous vibrations) et relaxé– dépendent de facteurs variés, notamment du type de remplissage et des conditions de vibrations pour un matériau donné. Le régime stationnaire met de 1 à 6 secondes à s'installer.

Quand l'agitation du système devient de plus en plus marquée, par exemple en augmentant l'accélération, on peut observer successivement plusieurs phénomènes en dynamique. D'abord un frémissement superficiel du milieu pour des accélérations relatives de l'ordre de 0,8 à 1 ; puis trois zones s'établissent dans l'empilement vibré : une zone sur le fond où les grains restent pratiquement immobiles, une zone intermédiaire où des grains glissent les uns sur les autres, et une zone superficielle, sur le haut du récipient, partiellement fluidisée. Enfin, aux très fortes accélérations ( $\Gamma > 8$ ), tout l'empilement est fluidisé. La figure 2 montre les états obtenus après relaxation, à partir d'un système dynamique stationnaire : le système est fortement non homogène tant que  $\Gamma$  reste inférieur à 6. Au-delà la zone II est partout présente, et le système devient homogène quelle que soit l'altitude considérée.

#### 3.2 Etude paramétrique

Les principaux paramètres étudiés sont ceux liés au procédé (accélération  $\Gamma$  relativement à la pesanteur, fréquence  $f$  des vibrations sinusoïdales, dimensions  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$  de la boîte) et ceux liés au milieu granulaire (taille moyenne et distribution de taille, forme des grains, paramètres de friction grain-grain ou grain-paroi). Les résultats de simulation (mod) et observés expérimentalement (exp) sont comparés ci-dessous.

La vitesse des grains augmente avec l'accélération (mod+exp), comme le montre la figure 3. Elle augmente aussi avec la taille de la boîte (mod+exp), le coefficient de friction (mod) entre grains  $\mu_{g/g}$  ou grain/paroi  $\mu_{g/m}$ . Cette vitesse diminue par contre quand la fréquence augmente (résultat de modélisation confirmé par la bibliographie). Ceci peut s'expliquer qualitativement par le fait qu'un mouvement de faible fréquence (typiquement 10 Hz) laisse au milieu granulaire le temps de développer des mouvements amples de ballottements dans la boîte, avec des vitesses élevées, alors que des fréquences élevées ( $10^3$  Hz), pour une même accélération (typiquement,  $\Gamma=3$ ), conduisent à de faibles réarrangements locaux.

On retrouve des évolutions similaires de densité quand on augmente l'accélération (figure 4), la taille de la boîte, ou que l'on diminue la fréquence. Quand les couches du fond de la boîte sont mises en mouvement, la compacité globale augmente. Mais inversement une fluidisation des couches de surface peut conduire à une perte de compacité en dynamique.

Pour  $\mu_{g/g}$  proche de 0, on note une inversion des rouleaux de convection (mod). La densité moyenne augmente quand  $\mu_{g/g}$  diminue (mod).

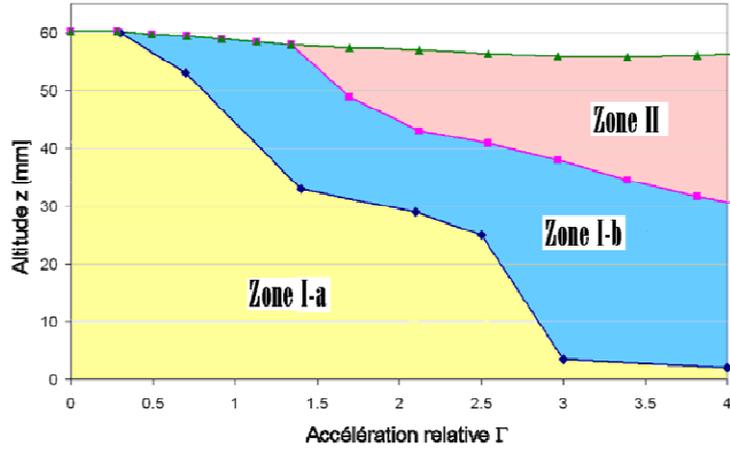


Figure 2. Diagramme donnant les compacités relaxées  $C$  du milieu granulaire en fonction de l'accélération délivrée et de l'altitude  $z$  dans l'empilement. Zone I-a : zone inférieure solide,  $C=C_{ini}$  (entre 61 et 68 % selon le protocole de remplissage) Zone I-b : zone intermédiaire solide ( $C \approx 67-68\%$ ) Zone II : zone supérieure fluidisée ( $C < 64\%$ ).

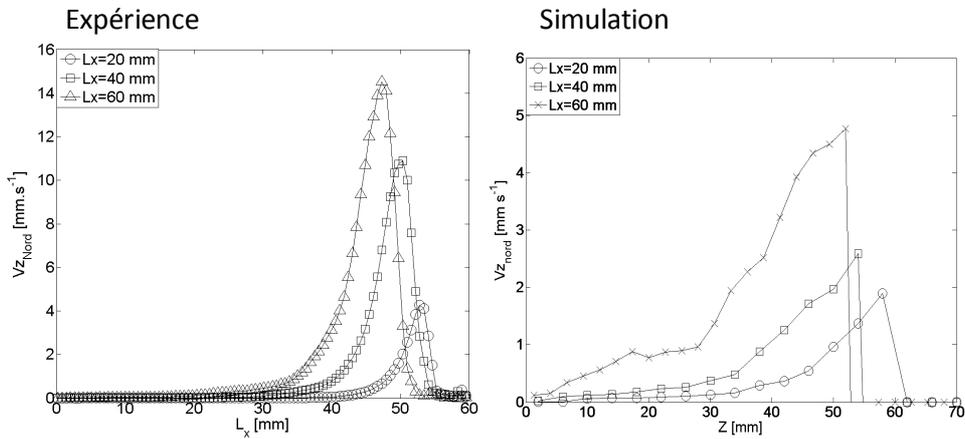


Figure 3. Résultats expérimentaux et numériques: influence de la taille  $L_x$  de la boîte sur les profils de vitesses  $v(z)$  des grains en face Nord

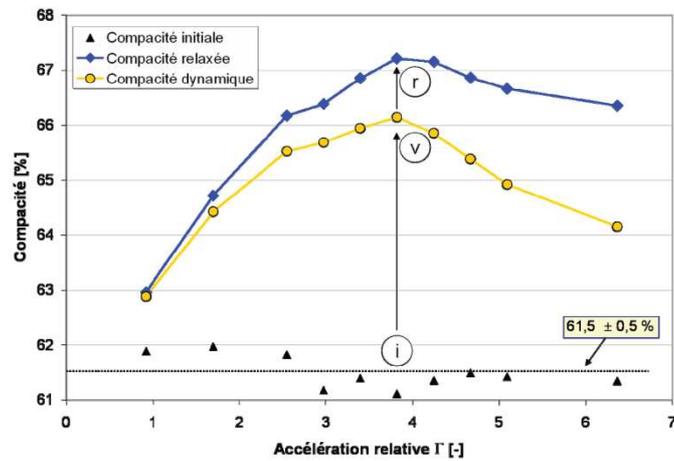


Figure 4. Evolution des densités initiale (i), vibrée (v) et relaxée (r) en fonction de  $\Gamma$  pour un milieu granulaire initial lâche ( $C_{ini} \approx 61,5\%$ ). Hauteur d'empilement  $H_{ini}=60$  mm, boîte  $L_x=40$  mm,  $L_y=80$  mm. D'après Raihane et al.

Cette inversion dépend du coefficient de friction et pourrait expliquer certains résultats numériques surprenants présents dans la littérature (Liffman 1997).

En simulation et en expérience, aucune ségrégation significative n'est constatée. Dans toutes nos études, une bonne corrélation se manifeste entre résultats de simulation DEM et expériences dans l'étude des milieux granulaires vibrés de manière horizontale.

L'étude des contraintes au niveau du milieu granulaire en régime dynamique apporte des informations originales. On constate une zone de faible cisaillement à l'altitude où les vitesses des grains s'annulent ainsi qu'une zone de glissement total à l'altitude où les vitesses instantanées horizontales passent d'une orientation Nord/Sud à une orientation Sud/Nord.

## 4. Etude de l'effet de vibrations horizontales sur le comportement du milieu granulaire en système fermé

### 4.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental précédent consiste en une enceinte dépourvue de plafond, accueillant une quantité de sable constante au cours de l'expérience. Pour élargir nos connaissances et pour se rapprocher des conditions industrielles de fabrication de fusible, nous avons réalisé une série d'expériences avec un récipient muni d'un plafond percé d'un orifice de 5 mm de diamètre (Figure 5). Dans cette configuration, le remplissage de la boîte par des grains se fait pendant les vibrations.

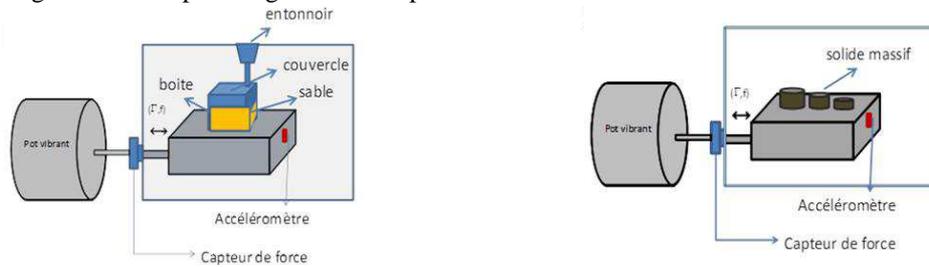


Figure 5. Dispositif expérimental en mode « granulaire » et en mode « étalonnage »

### 4.2 Phénoménologie

Tant que la surface libre de l'empilement granulaire vibré n'est pas en contact avec le plafond du récipient, la phénoménologie est identique à celle décrite précédemment. Lorsque le milieu granulaire arrive au contact de l'orifice d'alimentation, le débit entrant diminue significativement et devient limité par la vitesse à laquelle les grains se déplacent vers les zones du récipient non encore occupées par les grains. Ces zones sont situées dans les angles formés par le plafond et les quatre parois verticales ; leur forme dépend de la localisation de l'orifice d'alimentation (centre ou bord du récipient). Enfin, quand ces zones deviennent elles-mêmes remplies, de très faibles réarrangements peuvent encore intervenir dans l'empilement granulaire et conduire à une plus grande densification, sur des périodes très longues par rapport à la période de vibration de 20 ms. Typiquement, il faut attendre plusieurs milliers de secondes pour obtenir un régime stationnaire, caractérisé par une masse constante de sable dans la boîte. Les plus forts taux de remplissage sont obtenus pour les plus fortes accélérations. Pour  $\Gamma=10$ , il atteint 68%, ce qui correspond à la compacité maximale (RCP) du milieu granulaire. Dans ces conditions, le milieu granulaire est complètement bloqué (comportement opposé à celui constaté en milieu ouvert).

Nous avons mesuré la puissance mécanique  $P_{sable}$  dissipée par les chocs et les frottements entre grains (et grains – parois). Pour cela, nous avons soustrait la puissance mécanique dissipée par le système à vide (récipient, rails, plaque, ... sans sable) à la puissance dissipée par le système contenant du sable. Chacune des deux puissances est calculée par la formule ci-dessous où  $\vec{F}_{(t)}$  représente la force exercée par le pot vibrant sur le système, et  $\vec{v}_{(t)}$  représente la vitesse du système (obtenue par intégration de l'accélération) :

$$P_{sable} = P_{système+sable} - P_{système} \quad \text{avec} \quad P = \frac{1}{n.T} \cdot \int_0^{nT} \vec{F}_{(t)} \cdot \vec{v}_{(t)} \cdot dt \quad \text{et} \quad n = 100$$

Comme l'illustre la Fig. 6, cette puissance dissipée, nulle lorsque le récipient est vide, augmente au fur et à mesure que le taux de remplissage augmente (il y a davantage de grains donc davantage d'énergie dissipée). Elle atteint un maximum puis chute brutalement lorsque le taux de remplissage est tel que le milieu granulaire est bloqué (disparition des mouvements relatifs entre grains, établissement de contacts permanents). Dans ce cas, la masse apparente du sable bloqué est celle d'un solide massif soumis à des vibrations. La fin de la compaction peut être détectée par le fait que la dissipation d'énergie induite par le milieu granulaire devient identique à celle d'un solide massif de même masse. A la suite de cette étude expérimentale, un brevet sur le contrôle du remplissage de fusible a été déposé (Gelet 2010).

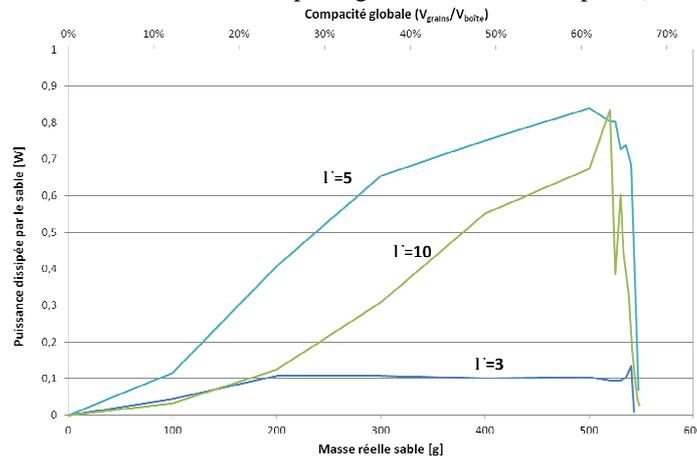


Figure 6. Evolution de la puissance mécanique dissipée par les chocs et frottements entre grains et parois en fonction de la masse de sable embarquée, pour différentes accélérations relatives. Système confiné (boîte fermée) de dimensions  $L_x=40$  mm,  $L_y=80$  mm,  $L_z=95$  mm.

## 5. Conclusion

Cette étude présente des résultats expérimentaux obtenus en faisant vibrer horizontalement un milieu granulaire (grains de sable, 500  $\mu$ m). Elle montre qu'un empilement initialement lâche et homogène, se densifie progressivement lorsque l'intensité des vibrations est augmentée. Plus précisément, on observe la propagation vers le bas d'une zone de forte compacité dans laquelle les grains bougent peu les uns à par rapport aux autres. Cette zone est surmontée d'une couche de faible compacité caractérisée par des mouvements convectifs de grande amplitude. L'effet antagoniste de ces deux zones sur la compacité globale se traduit par l'existence d'une accélération critique qui maximise la densité du milieu granulaire. Dans le cas étudié, une accélération horizontale de 4g permet d'atteindre en quelques secondes une compacité dynamique de 66% et une compacité relaxée de 67%.

Lorsque le milieu granulaire n'est pas à surface libre mais se trouve confiné dans les six directions de l'espace, configuration que l'on peut obtenir en alimentant un récipient en continu pendant les vibrations, on peut atteindre des compacités relaxées de 68% en imposant des vibrations de forte intensité (10g) pendant plusieurs dizaines de minutes. La mesure de la puissance mécanique dissipée par les chocs et frottements entre les grains se révèle être un outil précis pour caractériser la fin de remplissage. En effet, lorsque le milieu granulaire se bloque par manque de volume libre, cette puissance dissipée chute très brutalement. Cette caractéristique a conduit notre partenaire industriel à déposer un brevet.

Cette étude présente également des résultats obtenus par simulation numérique. Le milieu granulaire réel a été modélisé par la méthode des éléments discrets (DEM). Un accord qualitatif et quantitatif a été trouvé entre les deux approches. Les simulations numériques ont en outre permis d'étudier l'influence du coefficient de friction sur les mouvements convectifs. Pour un coefficient de friction grain-paroi de 0,5, nous avons trouvé que les rouleaux de convection changeaient de sens de rotation lorsque le coefficient de friction grain-grain devenait inférieur à 0,1.

## Remerciements

Nous remercions le fond unique interministériel FUI, les pôles de compétitivité Céramique de Limoges et le pôle MIPI de Nancy pour leur intérêt et le soutien apporté à ce projet de 2009 à 2012.

## Références

- Brevet en France n° 1059004 déposé le 2 novembre 2010 au nom de MERSEN France SB sas. Inventeurs : Gelet J.-L., Thomas G., Bonnefoy O., Nadler S.
- Cundall, P. A. et Strack O. D. L., 1979, *Geotechnique*, vol. 29, n°. 1, 47.
- Liffman, K., Metcalfe G. et Cleary P., 1997, *Physical Review Letters*, vol. 79, n°. 23, p. 4574.
- Matchett, A. J., Yanagida T., Okudaira Y., et Kobayashi S., 2000, *Powder Technology*, vol. 107, n°. 1–2, p. 13.
- Nadler, S., Chaix J.M., Bonnefoy O., Gelet J.L., et Thomas G., 2011, *Eur.Phys. J. E.* 34, 66.
- Nadler, S., "Comportement d'un milieu granulaire soumis à des vibrations horizontales", 2012, thèse, ENSMSE
- Ollagnier, A., Doremus P., Imbaut D., 2007, EuroPm Toulouse, 335.
- Powers, M. C., 1953, *Journal of Sedimentary Research*, vol. 23, n°. 2, 117.
- Raihane, A., Bonnefoy O., Gelet J. L., Chaix J. M., et Thomas G., 2009, *Powder Technology*, vol. 190, n°. 1–2, 252.
- 

## Densification processes by horizontal vibrations in open or close systems – Experimental and numerical approaches.

BONNEFOY Olivier<sup>a</sup>, NADLER Sébastien<sup>a</sup>, THOMAS Gérard<sup>a\*</sup>, CHAIX Jean-Marc<sup>b</sup>, GELET Jean-Louis<sup>c</sup>

<sup>a</sup>ENSMSE, Centre SPIN, CNRS-LGF-UMR5307

158 Cours Fauriel, F-42100 Saint-Etienne cedex

<sup>b</sup>Laboratoire SIMAP, UMR 5266, Grenoble-INP-CNRS-UJF

1130 rue de la piscine, BP75, F-38402 Saint-Martin d'Hères cedex

<sup>c</sup>MERSEN 6 rue Vaucanson, F-69720 Saint Bonnet de Mure

## Abstract

This work on the densification of a granular medium under horizontal vibrations was realised in the context of an industrial study on sand in fuses. The scientific purpose is the understanding of the mechanisms involved in horizontally vibrated granular media, either in open box as in closed systems. Both experiments and computer simulations were used to follow the behaviour of the sand packing.

Experiments were conducted with 500 µm silica grains. Sinusoidal accelerations up to 10 g were applied to a container of a few centimetres using frequencies between 20 and 200 Hz. The experimental device enables instantaneous force, acceleration, grain velocity on the walls (PIV) and mean bulk density to be measured. Discrete element method (DEM) was used for the computer simulations. Specific techniques were developed to analyse the results and compare them with experiments. Computer simulations provided data which are not experimentally available such as local values of density, velocities and stress inside the particle packing. In the case of an open container, simulation results are in good agreement with experimental ones (convection rolls, thresholds, effect of acceleration...). Original results are obtained in both experiments and simulations, such as the grain velocity increasing with the container length. Simulation provided specific results such as the effect of friction coefficients on the direction of rotation of convection rolls and the characterization of stress inside the particle packing.

The behaviour of sand in a closed container (confined medium) was studied during a progressive filling. Significant differences were observed when the filling rate becomes high. The dissipated energy and the apparent mass of the vibrated device were defined and measured using acceleration and force measurements. The highest densities were reached for very high relative acceleration.

**Keywords:** Granular Media, Horizontal vibrations, Densification, Simulation, Discrete Element Method

---

\* Authors(s) to whom the correspondence should be sent: [gthomas@emse.fr](mailto:gthomas@emse.fr)