

Dossier de Candidature de

Philippe Ribière

Au sein du DSM/DRECAM/SPEC/Groupe Instabilité et Turbulence.

Résumé des activités de recherche

Mon travail de thèse portait sur la compaction des milieux granulaires, et plus précisément sur le lien entre l'évolution globale de l'échantillon et son évolution à l'échelle du grain. Cette étude expérimentale et numérique, a permis de mettre en évidence divers mouvements de grains, dont certains grands déplacements qui influent notablement sur l'évolution de l'échantillon malgré leur faible occurrence. Cette étude a aussi renforcé l'analogie, déjà forte, entre les empilements granulaires sous sollicitations et les systèmes vitreux et a permis de vérifier expérimentalement certaines prédictions théoriques. L'observation fine de l'empilement à l'échelle du grain m'a finalement amené à proposer une interprétation des effets mémoire dans les milieux granulaires.

Intérêts de l'étude des milieux granulaires et des mousses

Les milieux granulaires sont des matériaux très présents, dans la nature et dans de nombreuses activités humaines. Les industries pharmaceutiques et agroalimentaires utilisent abondamment des poudres pour fabriquer divers comprimés, les entreprises de génie civil réalisent de nombreuses études des sols afin de vérifier leur stabilité en vue de la construction de routes ou de bâtiments. De même, les mousses sont couramment utilisées dans diverses industries telles que les industries agroalimentaires, les industries pétrolières, les industries de cosmétique ainsi que dans la lutte contre les incendies et la séparation des minerais. Etudier les propriétés de ces milieux complexes est donc intéressant à de nombreux points de vue.

Néanmoins ces matériaux demeurent mal compris. En effet, ils possèdent des propriétés qui se rapprochent à la fois de celles des solides (existence de module d'élasticité, ...) et celles des liquides (par exemple, sous certaines conditions, ils coulent). Par ailleurs, ces milieux présentent aussi certaines caractéristiques communes à tous les systèmes hors équilibre, comme le vieillissement lent ou les effets mémoire. Ces phénomènes, bien que fréquemment observés, restent mal compris et font l'objet de nombreuses études dans divers domaines de la physique. Ils témoignent de l'analogie entre ces systèmes et d'autres systèmes hors équilibre comme, par exemple, les systèmes vitreux. De ce point de vue, l'étude de ces milieux possède un attrait plus fondamental puisque les résultats obtenus dans ce domaine peuvent être transposés, dans une certaine mesure, aux autres systèmes hors équilibre. D'ores et déjà, l'analogie entre systèmes granulaires sous sollicitations et les systèmes vitreux s'est révélée fructueuse [Nicodemi 1997, D'Anna 2003, Bertin 2005, Richard 2005, Dauchot 2005].

Etude expérimentale

Pour réaliser l'étude de la compaction des milieux granulaires, j'ai utilisé le dispositif expérimental, photographié figure 1.a, dont disposait le laboratoire [Philippe 2002]. Ce dispositif permet de soumettre un échantillon granulaire à des sollicitations discrètes et de mesurer, après un nombre donné de sollicitations, son évolution de compacité par γ -densimétrie. Afin d'observer le mouvement des billes dans l'empilement, j'ai adapté une technique d'imagerie en fluide iso-indice sur cette manipulation. L'échantillon est placé dans un liquide de même indice de réfraction que le verre des billes. Le liquide interstitiel contient en outre un fluorophore. La position des billes est alors révélée à l'aide d'une nappe de lumière. Les images des coupes de l'empilement granulaire, comme celle présentée sur la figure 1.b sont analysées afin de reconstruire la structure tridimensionnelle.

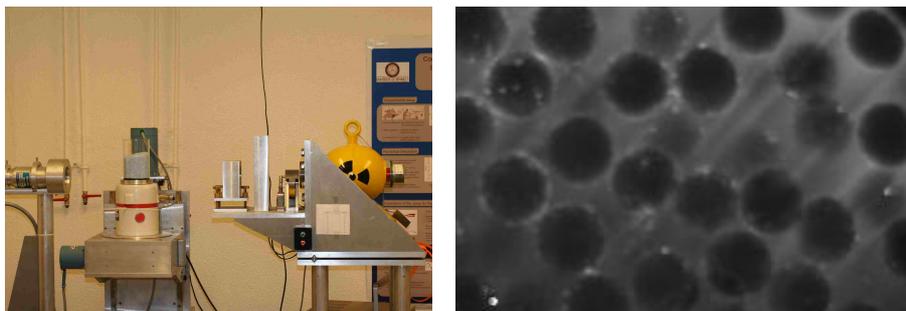


Figure 1 : (a) Photo du montage expérimental. (b) Image d'une coupe de l'empilement granulaire. Les billes apparaissent dans le liquide iso-indice qui fluoresce. L'ensemble de l'expérience est piloté par ordinateur

Lors de ma thèse, des expériences de compaction ont aussi été réalisées à l'ESRF sur des empilements granulaires secs, dont la structure est alors accessible par tomographie au rayon X [Richard 2003]. L'objectif de cette étude était de comparer les résultats ainsi obtenus à ceux du laboratoire, dans un empilement saturé en fluide. La figure 2 présente le résultat de deux reconstructions 3D, l'une d'un empilement de grain et l'autre d'une mousse.

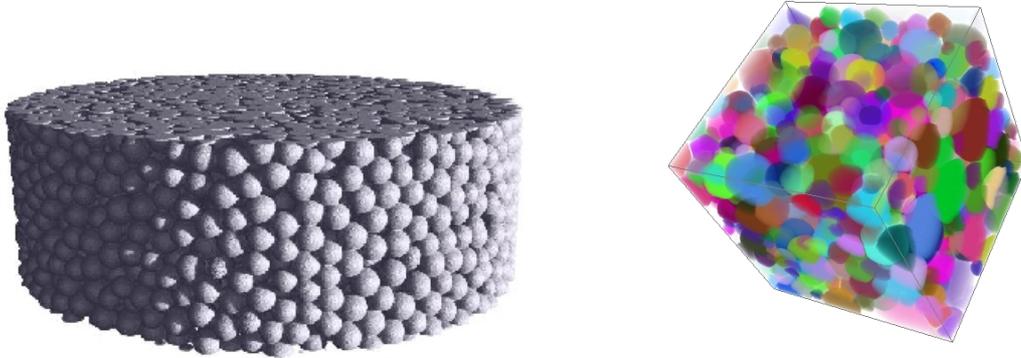


Figure 2: Reconstruction d'un empilement granulaire et d'une mousse à partir d'images obtenues par tomographie au rayon X à l'ESRF.

Etude numérique et théorique

Lors de ma thèse, j'ai aussi réalisé une simulation numérique Monte Carlo de la compaction des milieux granulaires [Mehta 1993, Philippe 2001]. Cette simulation modélise le déplacement des grains au sein de l'empilement lors d'une sollicitation en un temps court, ce qui permet de simuler un grand nombre de sollicitations. Bien que peu réaliste dans son principe, elle parvient à reproduire la très grande majorité des résultats expérimentaux car elle tient compte de la contrainte essentielle des milieux granulaires : la contrainte stérique.

Afin de compléter cette approche, j'ai aussi développé une simulation de Dynamique Moléculaire. Grâce à cette approche, il est possible de définir de véritables contacts entre les grains et d'étudier la répartition des forces au sein de l'empilement. Enfin une autre approche a été entreprise au sein du laboratoire afin de simuler l'ensemble des sollicitations à l'aide d'un code de Dynamique des Contacts, dans le cadre d'une collaboration avec le GRASP de Liège.

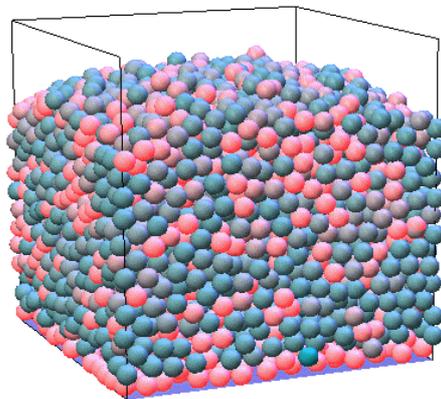


Figure 3 : Image de l'empilement utilisé lors des simulations de compaction

Principaux résultats obtenus

J'ai tout d'abord établi un lien entre les simulations Monte Carlo et l'expérience. Pour cela, j'ai observé à l'aide de caméras rapides (1000 images/seconde et 10000 images/secondes) la dilatation de l'empilement lors d'une sollicitation et j'ai ainsi pu établir une correspondance univoque entre les paramètres de contrôle de l'expérience et ceux de la simulation.

L'un des objectifs de ma thèse était de corréler l'évolution globale de la compacité avec des observations à l'échelle du grain. Lors de cette étude, j'ai pu observer deux types de mouvements dans les empilements granulaires : d'une part le mouvement des grains dans la cage créé par ses voisins ainsi que la déformation de la structure des cages, d'autre part la sortie d'un grain d'une cage. Ces derniers événements, que nous avons pu observer expérimentalement et numériquement, sont des événements très rares mais qui ont une importance particulière pour l'évolution de la compacité, comme l'ont révélé diverses simulations numériques. L'observation de ces mouvements à l'échelle du grain a aussi permis de renforcer l'analogie entre les empilements granulaires sous sollicitations et système vitreux par les nombreuses similarités observées dans le comportement des deux systèmes [Ott 1990, Marty 2005]

J'ai aussi vérifié expérimentalement certaines prédictions faites à l'aide de la théorie d'Edwards sur les milieux granulaires dans leur état stationnaire. Sam Edwards a proposé une statistique fondée sur une hypothèse similaire à l'hypothèse microcanique usuelle, mais adaptée aux milieux granulaires qui sont des systèmes athermiques. Cette théorie prévoit entre autre chose que l'état stationnaire atteint par un échantillon granulaire après un grand nombre de sollicitations est entièrement caractérisé par un seul et unique paramètre, sa compacité. En utilisant des sollicitations de formes différentes, nous avons pu vérifier que deux empilements de même compacité à l'état stationnaire sont effectivement identiques : ils présentent les mêmes caractéristiques et se comportent de la même manière vis-à-vis d'une perturbation extérieure [Rivière PhD, article en préparation].

Cependant lors de la phase de vieillissement, tant que l'état stationnaire n'est pas atteint, deux empilements peuvent avoir même compacité sans pour autant être identiques, ce qui donne lieu à des effets de mémoire. Soumis aux mêmes sollicitations, deux empilements de même compacité mais préparés par deux méthodes différentes ont un comportement différent [Josserand 2000]. Nous nous sommes intéressés aux origines de ces effets mémoire à l'échelle du grain et nous avons mis en évidence l'importance des queues de distribution non gaussienne pour la compréhension de ces effets. Ainsi, l'explication de l'effet mémoire dans les milieux granulaires est analogue à celle donnée dans les systèmes vitreux. Nous avons aussi pu trouver une origine structurelle à l'effet mémoire dans les empilements de grains. Ce résultat est lui aussi fort intéressant puisqu'il laisse entrevoir la possibilité de prédire l'évolution d'un empilement de grains à une perturbation extérieure grâce à une analyse fine de sa structure [Rivière PhD, article soumis].

Collaborations

Lors de ma thèse, je me suis rendu dans les divers laboratoires avec lequel l'équipe travaille. Ainsi, j'ai travaillé avec W. Losert de l'Université du Maryland et j'ai été

récemment invité par Tomaso Aste dans son laboratoire, afin de travailler sur son tomographe X dédié à l'étude des empilements granulaires afin d'étudier le lien entre la structure de l'échantillon et son évolution [Kabla 2004, Aste 2005]. J'ai aussi travaillé en collaboration avec François Ludewig du GRASP sur les simulations de Dynamique des Contacts. J'ai par ailleurs été invité à faire une conférence à Naples dans le laboratoire d'Antonio Coniglio et Mario Nicodemi afin de travailler sur les avancées théoriques de l'analogie entre systèmes granulaires et systèmes vitreux, en particulier sur la possibilité d'une mesure d'une température granulaire lors d'expérience de compaction.

Nouveaux travaux de recherche

Je débute actuellement de nouvelles expériences sur les émulsions. L'objectif de ce projet est de faire relaxer la structure locale d'une émulsion par réinjection successive de liquide dans la phase continue afin d'obtenir différents échantillons dont les caractéristiques seront mieux contrôlées et comprises. En effet, l'un des problèmes actuels des expériences sur les mousses et émulsions est que le résultat des expériences semble dépendre des conditions de préparation des mousses. Des contraintes sont générées dans l'échantillon lors de sa préparation qu'il convient de faire relaxer avant tout autre expérience [Cantat 2005].

Références

- G. D'Anna, P. Mayor, A. Barrat, V. Loreto and E. Nori, *Nature*, **424**, 909 (2003)
Observing brownian motion in vibration-fluidized granular media.
- T. Aste, M. Saadatfar, T.J. Senden, ", *Phys. Rev. E*. 71, 061302 (2005)
The Geometrical Structure of Disordered Sphere Packings.
- E. Bertin, J.P. Bouchaud and F. Lequeux, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 015702 (2005)
Subdiffusion and Dynamical Heterogeneities in a lattice glass model.
- I. Cantat and O. Pitois, *J. Phys.: Condens. Matter* 17 S3455 (2005)
Mechanical probing of liquid foam ageing
- O. Dauchot, G. Marty and R. Biroli, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 265701 (2005)
Dynamical heterogeneity close to the jamming transition in a sheared granular media.
- C. Josserand, A. Tkachenko, D. Mueth and H. M. Jaeger, *Phys. Rev. Lett.*, **85** (2000)
Memory effects in granular material.
- A. Kabla, G. Debrégeas, J.M. di Meglio and T.J. Senden, arXiv:cond-mat/0412074v1 (2004)
X ray observation of micro-failures in granular piles approaching an avalanche.
- G. Marty and O. Dauchot, *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 015701 (2005)
Subdiffusion and cage effect in a sheared granular materials.
- A. Mehta, Springer Verlag (1993)
Granular Matter.

M. Nicodemi, A. Coniglio and H. J. Hermann, J. Phys. A., **30**, 379 (1997)
The compaction in granular media and frustrated ising models.

A. Ott, J.P. Bouchaud, D. Langevin and W. Urbach, Phys. Rev. Lett., **65**, 2201 (1990)
Anomalous diffusion in "living polymers": A genuine Levy flight?

P. Philippe and D. Bideau, Phys. Rev. E, **63**, 051304 (2001)
Numerical model for granular compaction under vertical tapping.

P. Philippe and D. Bideau, Europhys. Lett., **60**, 677 (2002)
Compaction dynamics of a granular medium under vertical tapping.

P. Ribière, P. Richard, R. Delannay, D. Bideau, M. Toiya, and W. Losert, Phys. Rev. Lett. **95**, 268001 (2005)
Effect of Rare Events on Out-of-Equilibrium Relaxation.

P. Ribière, PHD, soutenue le 12/12/2005, en ligne.
Etude de la compaction des milieux granulaires : de l'échelle locale à l'échelle globale.

P. Richard, P. Philippe, F. Barbe, S. Bourlès, X. Thibault, and D. Bideau, Phys. Rev. E **68**, 020301 (2003)
Analysis by x-ray microtomography of a granular packing undergoing compaction.

P. Richard, M. Nicodemi, R. Delannay, P. Ribière and D. Bideau, Nature Mat., 4, 121 (2005)
Slow relaxation and compaction of granular systems.