

Fluidification d'un empilement granulaire par des ultrasons de puissance focalisés

P. Lidon^a, N. Taberlet^b, S. Manneville^c

a. Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon,
pierre.lidon@ens-lyon.fr

b. Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon,
nicolas.taberlet@ens-lyon.fr

c. Laboratoire de Physique, École Normale Supérieure de Lyon,
sebastien.manneville@ens-lyon.fr

Résumé :

Dans cette étude, nous décrivons des résultats expérimentaux sur la dynamique d'un empilement granulaire soumis à des ultrasons de puissance focalisés. La pression de radiation acoustique permet d'induire à distance des réarrangements du matériau, et même d'y créer un écoulement. La fluidification observée est intermittente pour une gamme de pression, et hystérétique pour une excitation cyclique. Les résultats expérimentaux sont reproduits qualitativement par des simulations numériques et par un modèle heuristique simple, adapté du modèle des pièges.

Abstract :

In this study, we report experimental results on the dynamics of a granular packing submitted to high-intensity focused ultrasound. Acoustic radiation pressure triggers remotely local rearrangements within the pile and can even induce large-scale flows. The observed fluidization process appears to be intermittent within a range of acoustic pressure, and hysteretic when pressure is cycled. Experimental results are qualitatively reproduced by numerical simulation and a simple heuristic model based on trap model.

Mots clefs : Empilement granulaire, fluidification, ultrasons de puissance, pression de radiation acoustique, intermittence, hystérésis, dynamique moléculaire, modèle des pièges

1 Introduction

Depuis la première proposition de Liu et Nagel [1], de nombreuses études (*e.g.*

[2, 3]) ont apporté des corrections au diagramme de phase du jamming mais une compréhension complète de la transition de jamming reste hors d'atteinte. Les matériaux granulaires, de nature athermique, apparaissent comme un excellent candidat pour l'étude de cette transition, quoique l'existence de frottement solide apporte une complexité supplémentaire.

Dans de nombreuses études expérimentales, la fluidication d'un empilement granulaire est provoquée par une action de contact avec le matériau, en imposant un mouvement des parois du conteneur ou en injectant un fluide interstitiel par exemple. Nous proposons ici une méthode originale pour fluidifier à distance un empilement granulaire, en tirant profit de la pression de radiation acoustique. Cet effet non linéaire a déjà été employé dans des contextes thérapeutiques [4] ou biologiques [5], mais pas dans les contextes des matériaux vitreux mous.

2 Résultats expérimentaux

2.1 Description du dispositif

Les ultrasons sont produits par un transducteur piezoélectrique résonant à 5 MHz, qui crée une onde acoustique intense (la pression atteint jusqu'à 12 bars au point focal), focalisée sur une zone de diamètre 1 mm et de longueur 3 mm.

Les ultrasons sont focalisés à la base d'un sédiment de billes de verre, de diamètre compris entre 500 μm et 600 μm , dans de l'eau. Nous observons l'empilement à l'aide d'une caméra CCD rapide.

Le sédiment est excité par une série de trains d'ondes de 0.5 s, envoyés toutes les 2 s : de la sorte, le sédiment a le temps de revenir au repos entre chaque excitation.

2.2 Observations

Pour des ultrasons suffisamment intenses (pour une pression typiquement de l'ordre de 8 bars), la pression de radiation acoustique permet de générer un écoulement du sédiment. Par une analyse de PIV, nous pouvons obtenir un profil de vitesses résolu en temps de l'empilement.

En outre, dans une gamme de pression, la fluidification est intermittente, la proportion d'excitations induisant un mouvement augmentant avec la pression. Cette intermittence s'avère assez robuste à la préparation du sédiment et n'est pas corrélée à des vibrations mécaniques extérieures.

Enfin, lorsque l'on réalise des cycles d'amplitude de l'excitation, la fluidification présente une hystérèse pour des pressions correspondant à la gamme où l'on observait de l'intermittence. La branche d'amplitude décroissante est assez reproductible d'un cycle à l'autre, tandis que la branche croissante varie notablement. Intermittence et hystérésis semblent être la signature d'une bistabilité du système, évoquant une transition de premier ordre.

3 Interprétation des résultats

3.1 Simulations numériques

Afin de reproduire les résultats observés, nous avons réalisé des simulations de dynamique moléculaire. Le frottement solide est modélisé par le modèle de Cundall [6], correspondant à une force dépendant de l'histoire du contact. L'effet de la pression de radiation acoustique est pris en compte via un champ de force constant dans le temps, à répartition spatiale gaussienne. Enfin, nous ne prenons pas en compte la présence du fluide interstitiel.

Pour des paramètres géométriques représentatifs de l'expérience, la simulation reproduit qualitativement les observations, malgré les hypothèses grossières de la modélisation. Il semble donc que les ingrédients physiques de la simulation soient suffisants pour expliquer nos résultats.

3.2 Modèle heuristique

S'inspirant du modèle des pièges [7], nous proposons un modèle simple où le système possède deux états, fluidisé ou non. La fluidification est considérée comme un franchissement de barrière activé par la pression de radiation acoustique, modélisée par un bruit thermique. En considérant que la température d'un état précédemment fluidisé est supérieure à celle d'un état au repos, les résultats de ce modèle sont en bon accord qualitatif avec les résultats expérimentaux.

References

- [1] Liu A.J. et Nagel S.R., *Jamming is not just cool anymore*. Nature, vol.396, 1998
- [2] Bi D., Zhang J., Chakraborty, B. et Behringer, R.P. , *Jamming by shear*. Nature, vol.480, 2011
- [3] Ikeda A., Berthier L. et Sollich, P. *Unified study of glass and jamming rheology in soft particle systems*. Phys. Rev. Lett., vol.109, 2012
- [4] Kennedy J.E., *High-intensity focused ultrasound in the treatment of solid tumours*. Nat. Rev. Cancer, vol.4, 2005
- [5] Bercoff J., Tanter M. et Fink M., *3D ultrasound-based dynamic and transient elastography: first in vitro results*. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., vol.51, 2004
- [6] Cundall P.A. et Strack O.D.L., *A discrete numerical model for granular assemblies*. Géotechnique, vol.29, 1979

- [7] Bouchaud J.P., *Weak ergodicity breaking and aging in disordered systems*. J. Phys. I, vol.2, 1992