

# Force de traînée dans un milieu granulaire "chaud"

A. SEGUIN<sup>a,b</sup>, C. COULAIS<sup>a,b</sup>, Y. BERTHO<sup>b</sup>, P. GONDRET<sup>b</sup>

a. SPHYNX/SPEC, CEA-Saclay, URA 2464 CNRS, 91191 Gif-sur-Yvette, France

b. Laboratoire FAST, Université Paris-Sud, CNRS, Bât. 502, Campus universitaire, 91405 ORSAY

## Résumé :

*Nous étudions expérimentalement le déplacement à vitesse constante d'un disque intrus dans un empilement 2D dense de plus petits disques constituant un milieu granulaire modèle. Nous mesurons la force de traînée sur l'intrus, en variant sa vitesse et sa taille ainsi que la "température" du milieu par vibration. Deux régimes sont observés: à basse température (faibles vibrations), la force de traînée ne dépend pas de la vitesse de l'objet tandis qu'à haute température (fortes vibrations), la force de traînée présente une dépendance linéaire avec cette vitesse.*

## Abstract :

*We study experimentally the horizontal displacement at constant velocity of an intruder disk in a 2D dense vibrated packing of smaller disks as a model granular medium. We measure the drag force on the intruder, varying its velocity, its size, and the "temperature" of the grains by vibration. Two regimes are observed: at low temperature (low vibrations), the drag force does not depend on the intruder velocity while at high temperature (high vibrations), the drag force exhibits a linear dependance with this velocity.*

**Mots clés : milieux granulaires, rhéologie, expériences, force de traînée, viscosité**

Le dispositif expérimental utilisé ici est constitué d'une assemblée d'environ 8000 petits disques de diamètre moyen  $d_g = 4,5$  mm disposés entre deux plaques horizontales de verre et confinés latéralement dans un cadre de côté  $L \simeq 50$  cm (pour de précision, se référer à [1, 2]). La fraction solide caractérisant la compacité de l'empilement est d'environ 80%. Un plus gros disque, appelé "intrus",

de diamètre  $d$  ( $8 \leq d \leq 32$  mm), est placé d'un côté de l'empilement puis tiré par un fil à vitesse constante  $V_0$  au moyen d'une platine de déplacement contrôlé, tel que l'écoulement de grains autour de l'intrus soit considéré comme quasi-statique. La force de résistance au déplacement de l'intrus est mesurée par un capteur piézoélectrique auquel est accroché le fil. Le signal de force fluctue autour d'une valeur moyenne au cours du temps qu'on appelle force de traînée  $F$ . Pendant le déplacement de l'intrus, il est possible de vibrer l'empilement dans la direction perpendiculaire à son déplacement à une fréquence de vibration  $f_e$ .

La figure 1a présente l'ensemble des mesures pour toute la gamme de vitesse  $V_0$ , de diamètre  $d$  et de fréquence de vibration  $f_e$ . Sans vibration ( $f_e = 0$  Hz), on remarque que la force de traînée  $F$  ne dépend pas (ou très peu) de la vitesse de l'intrus. Ce résultat est cohérent avec des études précédentes [3, 4] et correspond au régime quasi-statique, très éloigné des régimes hautes vitesses où la force de traînée évolue comme le carré de la vitesse imposée [5, 6, 7]. On remarque également que  $F$  augmente lorsque le diamètre de l'intrus augmente. L'observation majeure concerne l'évolution de la force de traînée  $F$  avec la vitesse  $V_0$  sous vibration. Ainsi, lorsque  $f_e = 10$  Hz, la force de traînée est plus faible qu'en l'absence de vibration (Fig. 1a). Des études antérieures ont déjà mentionné cette observation [2, 8, 9].

Afin d'interpréter ce résultat, nous utilisons le modèle hydrodynamique développé dans [4] en le complétant. Par son mouvement, l'intrus génère des fluctuations de vitesse des grains proches de lui, correspondant à une augmentation locale de "température"  $T_0 \sim V_0^2$ . Il fluidise donc localement autour de lui le matériau granulaire en le "chauffant" [3, 4]. La viscosité inhérente  $\eta$  au matériau granulaire évoluant en  $\eta \sim 1/T_0^{1/2}$ , la force de traînée ( $F \sim \eta V_0$  à faibles nombres Reynolds) ne dépend alors plus de la vitesse  $V_0$ . Cependant, cette vision n'est valable que pour les petits nombre de Reynolds. À haut nombre de Reynolds, la force de traînée, alors dominée par les effets inertiels, évolue comme  $V_0^2$ . L'injection de vibrations dans le matériau granulaire peut être vue comme une injection de chaleur dans l'ensemble du milieu, alors caractérisé par la "température"  $T_e$ . Ainsi, dans le cas où la "température" du milieu est importante ( $T_e \gg T_0$ ), la viscosité est alors gouvernée par  $T_e$  ( $\eta \sim 1/T_e^{1/2}$ ) et la force de traînée évolue alors linéairement avec la vitesse comme dans un fluide classique. Dans la présente expérience, la température  $T_0$  générée par l'intrus qui avance dans le milieu entre en compétition avec la température  $T_e$  induite par les vibrations: on s'attend alors à deux régimes, caractérisés par  $T^* \ll 1$  et  $T^* \gg 1$ , avec  $T^* = T_0/T_e$ . La force de traînée expérimentale adimensionnée  $F^*$  présente effectivement deux comportements distincts: (Fig. 1b): un régime à haute température où la force évolue comme la vitesse de l'objet (en  $T^{*1/2}$ ) et un régime à basse température où la force ne dépend pas de la vitesse de

l'objet. Notre modèle permet de retrouver ces deux régimes dans un graphe adimensionné (Fig. 1b) où intervient le rapport d'aspect  $\Lambda = d/d_g$ .

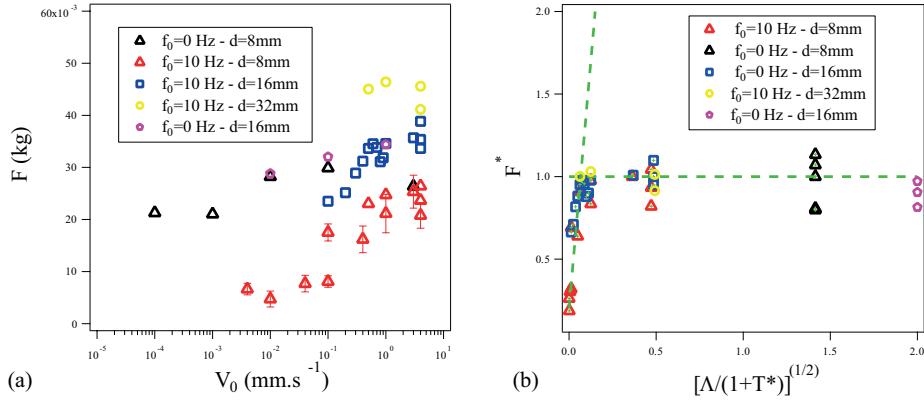


Figure 1: (a) Force de trainée  $F$  d'un objet dans un matériau granulaire en fonction de la vitesse  $V_0$  à différentes fréquences de vibration  $f_e$  et différents diamètres  $d$ . (b) Représentation adimensionnée des mêmes points et modèle (- -).

## References

- [1] C. Coulais, *Milieux granulaires vibrés proches du Jamming : des liquides figés aux solides mous*, Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie (2012).
- [2] R. Candelier and O. Dauchot, *Creep Motion of an Intruder within a Granular Glass Close to Jamming*, Phys. Rev. Lett. 103, 128001 (2014).
- [3] A. Seguin, Y. Bertho, P. Gondret and J. Crassous, *Dense Granular Flow around a Penetrating Object: Experiment and Hydrodynamic Model*, Phys. Rev. Lett. 107, 048001 (2011).
- [4] A. Seguin, Y. Bertho, F. Martinez, P. Gondret and J. Crassous, *Experimental velocity fields and forces for a cylinder penetrating into a granular medium*, Phys. Rev. E 87, 012201 (2013).
- [5] C. R. Wassgren, J. A. Cordova, R. Zenit and A. Karion, *Dilute granular flow around an immersed cylinder*, Phys. Fluids 15, 3318 (2003).
- [6] Y. Takehara, S. Fujimoto, and K. Okumura, *High-velocity drag friction in dense granular media*, Europhys. Lett. 92, 44003 (2010).

- [7] Y. Takehara, S. Fujimoto and K. Okumura, *High-Velocity Drag Friction in Granular Media near the Jamming Point*, Phys. Rev. Lett. 112, 148001 (2014).
- [8] O. Zik, J. Stavans, and Y. Rabin, *Mobility of a Sphere in Vibrated Granular Media*, Europhys. Lett. 17(4), pp. 315-319 (1992).
- [9] G. A. Caballero-Robledo and E. Clément, *Rheology of a sonofluidized granular packing*, Eur. Phys. J. E 30, 395-401 (2009).