

# Influence de vibrations mécaniques sur la friction granulaire

H. Lastakowski , J.-C. Géminard , V. Vidal

Laboratoire de Physique, Université de Lyon, Ecole Normale Supérieure de Lyon – CNRS,  
46 Allée d’Italie, 69007 Lyon, France (valerie.vidal@ens-lyon.fr)

## Résumé :

*Ce travail présente l’étude expérimentale du phénomène de stick-slip pour un milieu granulaire sec auquel on impose des vibrations mécaniques horizontales (amplitude  $A$ , pulsation  $\omega$ ). Nous avons mis en évidence une diminution de la friction moyenne lorsque l’amplitude des vibrations augmente. Pour des amplitudes de vibrations étonnamment faibles (correspondant à des accélérations de l’ordre de 1% de l’accélération gravitationnelle), on observe une disparition complète du stick-slip. Le système masse-ressort glisse alors continûment sur le lit de grains. Une étude de ce comportement à diverses fréquences de vibration fait apparaître que le paramètre pertinent décrivant la transition stick-slip / glissement continu est la vitesse des vibrations mécaniques,  $A\omega$ . Pour  $A\omega \gtrsim 100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , le stick-slip disparaît, indépendamment de tous les paramètres expérimentaux explorés (vitesse de traction, fréquence de vibration, taille et nature des grains, etc.). Nous interprétons cette très faible valeur du seuil comme la vitesse nécessaire pour franchir la barrière d’énergie qu’un grain doit vaincre pour passer sur les rugosités des grains voisins.*

## Abstract :

*This work presents the experimental study of the stick-slip phenomenon for a dry granular medium subjected to horizontal mechanical vibrations (amplitude  $A$ , frequency  $\omega$ ). We show a decrease of the average friction when the vibration amplitude increases. For vibration amplitudes surprisingly weak (corresponding to accelerations of the order of 1% the gravitational acceleration), the stick-slip vanishes. The mass-spring system then slides continuously over the granular bed. Investigating this behavior for different vibration frequencies points out that the parameter governing the transition stick-slip / continuous sliding is the velocity of the mechanical vibrations,  $A\omega$ . For  $A\omega \gtrsim 100 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the stick-slip vanishes, independently of all the experimental parameters explored in our study (traction velocity, vibration frequency, grains size, shape and composition, etc.). We interpret this very low threshold value as the velocity necessary to overcome the energy barrier for a grain to jump over its neighbours’ asperities.*

**Mots clefs : milieu granulaire, friction, vieillissement, fluidification**

## 1 Introduction

L’étude du mouvement d’un patin entraîné à la surface d’une couche de grains par l’intermédiaire d’un ressort est un moyen expérimental de sonder les propriétés rhéologiques de la matière granulaire. Pour un matériau granulaire sec, on observe à des vitesses de traction  $V$  modérées un mouvement dit de ‘stick-slip’ : le patin suit une alternance de phases d’arrêt (‘stick’) tant que la force de traction est plus petite qu’une force seuil  $F_s$  et de phases de glissement (‘slip’) dissipatives durant laquelle la force de frottement  $F_d$  est presque constante. On définit l’amplitude du stick-slip par  $\Delta F = 2(F_s - F_d)$ . Lorsqu’on augmente la vitesse de traction, le stick-slip devient irrégulier et  $\Delta F$  décroît en amplitude jusqu’à atteindre un régime de glissement continu du patin pour lequel  $F_s = F_d$  [1,2]. Des travaux théoriques et numériques ont montré que l’on pouvait retrouver cette transition en imposant des vibrations mécaniques au système. Dans ce cas, on observe non seulement une diminution de la force tangentielle avec l’augmentation de l’amplitude de vibration [3], mais aussi une transition ordre/désordre dans l’empilement de grains [4–6].

Dans un cadre plus général, cette transition induisant un glissement continu du système peut être vue comme le déclenchement d'un évènement à grande échelle dû aux vibrations. Un tel scénario peut se retrouver dans de nombreuses situations, allant du déblocage des silos au déclenchement de tremblements de terre à longue distance [7–10]. Les travaux précédents sur la friction solide ou granulaire en présence de vibrations mécaniques ont proposé l'accélération des vibrations imposées comme le paramètre gouvernant la transition entre le mouvement de stick-slip et le glissement continu [4, 6, 11], avec une accélération seuil de l'ordre de l'accélération gravitationnelle.

Ce résultat est cependant incompatible avec des mesures de terrain concernant le déclenchement de tremblements de terre à longue distance (*dynamic earthquake triggering*). Parmi les nombreux mécanismes de déclenchement de tremblements de terre, ce dernier est l'un des plus surprenants - et l'un des moins bien compris. Il est connu qu'un tremblement de terre déclenche des répliques, habituellement dans un rayon d'une centaine de kilomètres autour du plan de glissement de faille. Cependant, des secousses importantes telles que les tremblements de terre de Landers, 1992 (magnitude 7.3), Hector Mine, 1999 (magnitude 7.1) ou Denali, 2002 (magnitude 7.9) ont déclenché par le passé d'autres secousses à des distances de plusieurs centaines de kilomètres [8, 12]. À de telles distances, l'amplitude de la déformation locale due au passage de l'onde sismique est de l'ordre de  $10^{-7}$  à  $10^{-6}$ , bien plus faible que les seuils prédits par les modèles physiques. Le travail expérimental présenté ici se focalise sur la transition entre le stick-slip et le glissement continu déclenchée par des vibrations mécaniques, dans le cas de la friction granulaire.

## 2 Expérience

Le dispositif expérimental vise à étudier la dynamique d'un patin entraîné par l'intermédiaire d'une lame-ressort à la surface d'un milieu granulaire sec, en présence de vibrations mécaniques. Un patin en plexiglas (masse  $m = 30.7$  g, surface  $9 \times 6$  cm<sup>2</sup>) est posé sur un lit de grains (billes de verre sphériques Wheelabrator, diamètre  $d = (250 \pm 23)$  μm, masse volumique  $\rho = 2.31 \times 10^3$  kg m<sup>-3</sup>). Afin d'assurer un bon contact frictionnel, une monocouche de grains, identiques à ceux utilisés dans la cellule, est collée sous le patin. Ce dernier est mis en mouvement par l'intermédiaire d'une lame-ressort, une lame d'aluminium ( $5 \times 1$  cm<sup>2</sup>) dont on peut varier la raideur  $k$  en changeant son épaisseur (entre 0.25 et 0.4 mm). Le contact entre la partie basse de la lame-ressort et le patin est ponctuel, alors que sa partie haute est solidaire d'un bâti translaté à vitesse constante  $V$  grâce à un moteur-réducteur à courant continu (5 N.m, 17W, Crouzet) et une platine de translation (Schnaefler Technologies Sechnr). Un découpleur mécanique permet de transmettre la rotation du moteur, tout en évitant les vibrations mécaniques associées. La vitesse de translation  $V$  varie entre 15 et 75 μm s<sup>-1</sup>. Un capteur inductif (IPRM 12I9505/S14, Baumer) mesure la déflexion de la lame-ressort, et permet ainsi d'accéder à la force instantanée  $F$  appliquée au patin. Dans la suite, nous noterons  $F^* = F/mg$  la force adimensionnée, où  $g$  est l'accélération gravitationnelle.

Afin d'assurer la reproductibilité des expériences, nous utilisons le protocole suivant. L'expérience est enfermée dans une boîte assurant une humidité constante,  $(37 \pm 2)\%$ , et une température constante  $T \simeq 21.5^\circ\text{C}$ . Le lit granulaire ( $50 \times 15$  cm<sup>2</sup>, hauteur  $h$ ) est d'abord mélangé avec un pinceau, puis nivelé avec une palette que l'on translate à la hauteur  $h$  désirée ( $0.2 \leq h \leq 2$  cm) dans la direction du mouvement du patin. Ce dernier est posé délicatement sur la couche de grains. On impose alors une vitesse de translation  $V$  du bâti. En l'absence de vibration mécanique externe, dans les gammes de vitesses utilisées dans nos expériences, le patin a un mouvement de stick-slip classique, caractérisé par une variation en dents de scie de la force  $F^*$  en régime stationnaire [2]. Lors de la phase d'arrêt (*stick*), le patin est immobile et la force  $F^*$  augmente jusqu'à  $F_{max}^* = \mu_s$ , le coefficient de friction statique. Lors de la phase de glissement (*slip*), la force décroît et sa valeur moyenne sur cette phase vaut  $\overline{F^*} = \mu_d$ , défini comme le coefficient de friction dynamique.

Lorsque le système est en régime stationnaire, on impose des vibrations mécaniques à l'ensemble de la cellule expérimentale par l'intermédiaire d'un vibreur (Brüel & Kjær, Type 4810 + amplificateur 2706) fixé sur le bâti. Ces vibrations sont sinusoïdales, horizontales, et transverses au mouvement du patin. Trois accéléromètres (Dytran Instruments, Modèle #3035BG) placés au fond de la cellule dans le lit granulaire, sous la course du patin, permettent de mesurer in-situ les trois composantes de l'accélération. Nous vérifions ainsi que l'accélération imposée localement à la couche de grains est bien sinusoïdale, spatialement homogène sur la zone d'intérêt, horizontale et transverse au mouvement du patin. On note  $A$  son amplitude et  $f = \omega/2\pi$  sa fréquence. On définit l'accélération  $\Gamma = A\omega^2$  (dans nos expériences,  $\Gamma < g$ ).

### 3 Résultats

Lorsqu'on augmente l'amplitude des vibrations, la friction moyenne décroît continûment et s'accompagne d'une diminution de l'amplitude du stick-slip,  $\Delta F$ , jusqu'à une disparition complète de ce dernier et la transition vers un glissement continu du patin à des amplitudes de vibration bien plus basses que celles attendues. Une étude de ce comportement à différentes fréquences de vibration fait apparaître que le paramètre pertinent décrivant la transition stick-slip / glissement continu n'est pas l'accélération  $\Gamma$ , mais la vitesse des vibrations mécaniques ( $A\omega$ ) : dès lors que ( $A\omega$ ) dépasse une valeur critique  $(A\omega)_c \simeq 100 \mu\text{m/s}$ , le stick-slip disparaît, indépendamment de tous les paramètres expérimentaux explorés (vitesse de traction, raideur du ressort, taille et forme des grains, hauteur du lit granulaire). Des expériences complémentaires où le système est chargé statiquement, et un seul choc mécanique fait glisser le patin sur une distance  $\Delta x$  dépendant de la charge initiale, confirment que la vitesse de l'onde mécanique est le bon paramètre gouvernant la transition, et retrouvent une valeur seuil identique. Cette très faible valeur du seuil en vitesse de vibration, qui montre que les grains ne sont pas dans un état fluidifié, n'est pas encore bien comprise. Nous proposons de l'interpréter comme la vitesse nécessaire pour franchir la barrière d'énergie qu'un grain doit vaincre pour passer sur ses voisins. L'échelle de longueur caractéristique associée à cette barrière est de l'ordre du nanomètre, et correspondrait à la taille typique des rugosités.

### Références

- [1] S. Nasuno, A. Kudrolli, J. P. Gollub, Friction in granular layers: hysteresis and precursors, *Phys. Rev. Lett.* 79 (1997) 949-952.
- [2] S. Nasuno, A. Kudrolli, A. Bak, J. P. Gollub, Time-resolved studies of stick-slip friction in sheared granular layers, *Phys. Rev. E* 58 (1998) 2161-2171.
- [3] R. Capozza, A. Vanossi, A. Vezzani & S. Zapperi, Suppression of friction by mechanical vibrations, *Phys. Rev. Lett.* 103 (2009) 085502.
- [4] M. Pica Ciamarra, A. Coniglio, D. De Martino, M. Nicodemi, Shear- and vibration-induced order-disorder transitions in granular media, *Eur. Phys. J. E* 24 (2007) 411-415.
- [5] A. L. Sellerio, D. Mari, G. Gremaud, G. D'Anna, Glass transition associated with the jamming of vibrated granular matter, *Phys. Rev. E* 83 (2011) 021301.
- [6] M. Melhus, I. S. Aranson, Effect of vibration on solid-to-liquid transition in small granular systems under shear, *Gran. Matt.* 14 (2012) 151-156.
- [7] A. Janda, D. Maza, A. Garcimartín, E. Kolb, J. Lanuza, E. Clément, Unjamming a granular hopper by vibration, *Europhys. Lett.* 87 (2009) 24002.
- [8] P. A. Johnson, X. Jia, Nonlinear dynamics, granular media and dynamic earthquake triggering, *Nature* 437 (2005) 871-874.
- [9] M. Griffa, E. G. Daub, R. A. Guyer, P. A. Johnson, C. Marone, J. Carmeliet, Vibration-induced slip in sheared granular layers and the micromechanics of dynamic earthquake triggering, *Europhys. Lett.* 96 (2011) 14001.
- [10] M. Griffa, B. Ferdowsi, R. A. Guyer, E. G. Daub, P. A. Johnson, C. Marone, J. Carmeliet, Influence of vibration amplitude on dynamic triggering of slip in sheared granular layers. *Phys. Rev. E* 87 (2013) 012205.
- [11] F. Giacco, E. Lippiello, M. Pica Ciamarra, Solid-on-solid single-block dynamics under mechanical vibration, *Phys. Rev. E* 86 (2012) 016110.
- [12] J. Gomberg, P. A. Reasenberg, P. Bodin, R. A. Harris, Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes, *Nature* 411 (2001) 462-466.