



**HAL**  
open science

# Rhéologie des matériaux granulaires à l'interface avec une paroi

Riccardo Artoni, Antonio Pol, Patrick Richard

► **To cite this version:**

Riccardo Artoni, Antonio Pol, Patrick Richard. Rhéologie des matériaux granulaires à l'interface avec une paroi. 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280027

**HAL Id: hal-04280027**

**<https://hal.science/hal-04280027>**

Submitted on 10 Nov 2023

**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.

# Rhéologie des matériaux granulaires à l'interface avec une paroi

**R. ARTONI, A. POL, P. RICHARD**

MAST-GPEM, University Gustave Eiffel, IFSTTAR, F-44344 Bouguenais, France.

E-mail : riccardo.artoni@univ-eiffel.fr

## Résumé :

*Dans cette contribution, nous présentons nos études récentes portant sur la rhéologie des écoulements granulaires à l'interface avec une paroi, et en particulier sur l'interaction locale du milieu avec la paroi. Le but de nos recherches est d'éclaircir notre compréhension du frottement effectif et du glissement en paroi, et d'ouvrir la voie à des conditions aux limites réalistes pour les écoulements granulaires denses. Tout d'abord, nous montrons à travers des simulations numériques discrètes comment la compétition entre frottement latéral et frottement interne peut produire différents régimes de localisation dans un écoulement confiné. En général, le frottement n'est pas complètement mobilisé à la paroi, et cela d'autant plus que le taux de cisaillement est faible (zones de "fluage"). Cela induit un affaiblissement du frottement effectif à la paroi, par rapport à sa valeur à l'échelle des particules. Une loi d'échelle peut être déterminée pour l'affaiblissement du coefficient de frottement effectif à la paroi, prenant en compte les fluctuations de vitesse des grains. Cet affaiblissement a été également observé expérimentalement dans une cellule de cisaillement annulaire. Dans des expériences plus récentes, nous nous sommes concentrés sur l'effet des rotations des particules sur la mobilisation du frottement, et ce en particulier quand les rotations sont inhibées par la forme des particules. Cela induit des changements dans les lois d'échelle qui doivent être pris en compte dans le développement des conditions aux limites.*

## Abstract :

*In this contribution, we present our recent studies on the rheology of granular flows at the interface with a wall, focusing in particular on the average local interaction of the grains with the wall. The aim of our research is to clarify the link between effective friction and wall slip, and to pave the way for realistic boundary conditions for dense granular flows. First, we show through discrete numerical simulations how the competition between wall friction and internal friction can produce different localization regimes in a confined flow. In general, friction is not completely mobilized at the wall, and this all the more so as the shear rate is low ("creep" zones). This yields a weakening of the effective wall friction coefficient with respect to the particle-scale one. A scaling law can be determined for the weakening of the effective coefficient of friction at the wall, taking into account the grain velocity fluctuations. This weakening has also been observed experimentally in an annular shear cell. In more recent experiments, we have focused on the effect of particle rotations on friction mobilization, particularly when rotations are inhibited by particle shape. This induces changes in the scaling laws which must be taken into account in the development of the boundary conditions.*

## Mots clefs : rhéologie, simulation numérique discrète, écoulements granulaires, localisation du cisaillement

### 1 Introduction

Des progrès récents ont été accomplis dans la description théorique de la rhéologie des matériaux granulaires. Cependant, une grande partie des efforts s'est concentrée sur la rhéologie interne au matériau, omettant le problème des interfaces. Parmi les différents types d'interfaces, les frontières solides sont omniprésentes. Une description précise de l'interaction de la matière granulaire avec une frontière solide est cruciale pour l'application pratique des modèles rhéologiques à de nombreuses applications industrielles et agricoles (silos, trémies, malaxeurs), ainsi qu'à des phénomènes géophysiques (mobilité des avalanches ou formation de cratères suite à un impact).

L'étude de la rhéologie à l'interface avec une paroi doit passer par l'analyse de deux problématiques distinctes mais fortement liées : (i) l'interaction locale du milieu avec la paroi (glissement, frottement), et (ii) l'influence "non-locale" de cette dernière sur la rhéologie du système, notamment via les transferts de quantité de mouvement (linéaire et angulaire) et d'énergie, et via les variations de compacité dans la couche adjacente à la frontière. Dans cette contribution, nous présenterons nos études récentes portant sur le premier aspect, qui ont pour but, d'une part, d'éclaircir notre compréhension du frottement effectif et du glissement en paroi, et, d'autre part, d'ouvrir la voie à des conditions aux limites réalistes pour les écoulements granulaires denses.

### 2 Simulations numériques discrètes d'un écoulement confiné

Afin de caractériser le frottement effectif en paroi, nous avons étudié une configuration d'écoulement de la forme d'un prisme rectangulaire (de dimensions  $L_x = 20d, W = 10d, L_z \approx 45d$ , où  $d$  est le diamètre moyen des grains) où le matériau est mis en mouvement par le déplacement de la paroi inférieure, rugueuse, à vitesse  $V$ , et confiné à la fois par des parois latérales lisses et par une paroi supérieure rugueuse, sur laquelle une charge est appliquée (Fig. 1a), modélisée par une masse ajoutée  $M_w$ . Cette masse est comparée à la masse des grains  $M_g$ . Tout d'abord nos simulations [1, 2], effectuées avec la méthode de la dynamique de contact non régulière [7], ont mis en évidence la présence de différents régimes de localisation. Dans cette configuration, si la charge appliquée à la paroi supérieure et le frottement aux parois latérales sont suffisamment faibles, le cisaillement se localise près de la paroi supérieure, et la partie inférieure du système présente un écoulement en bloc ; dans le cas opposé, le cisaillement est localisé près de la paroi inférieure et la vitesse décroît de façon exponentielle avec la hauteur (Fig. 1b). Ces profils de vitesse remarquables font de cette configuration d'écoulement un bon candidat pour analyser le frottement en paroi dans des conditions locales d'écoulement variées.

Pour cette raison nous avons analysé les forces aux parois latérales, et en particulier les profils en  $z$  du coefficient de frottement effectif dans la direction de l'écoulement,  $\mu_w = \sigma_{yx}/\sigma_{yy}$ , normalisé par le coefficient de frottement particule-paroi  $\mu_{pw}$ . Pour calculer les profils de  $\mu_w/\mu_{pw}$  nous avons divisé le domaine en couches d'épaisseur  $1d$ . Pour chaque couche les contraintes en paroi sont simplement données par  $\sigma_{yx} = \frac{1}{L_x d} \sum_c F_x^c$  et  $\sigma_{yy} = \frac{1}{L_x d} \sum_c F_y^c$ . Un résultat intéressant (Fig. 1c) est que le frottement est rarement complètement mobilisé, et cela d'autant plus que le cisaillement est faible. En d'autres termes, un affaiblissement du coefficient de frottement effectif est évident, en particulier dans les zones à faible taux de cisaillement (zones de "fluage"). Ce phénomène est lié à la mobilisation partielle des

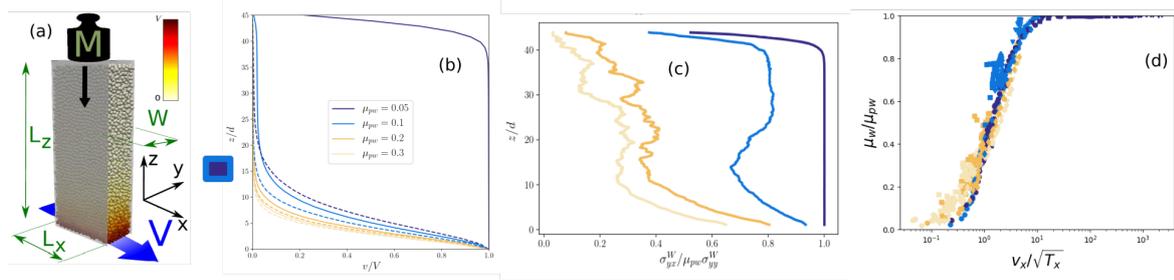


FIGURE 1 – Simulations numériques discrètes d'un écoulement confiné [1, 3] : (a) schéma de la configuration d'écoulement ; (b) effet du chargement (lignes continues  $M_w/M_g = 0.2$ , pointillés  $M_w/M_g = 2$ ) et du coefficient de frottement particule-paroi  $\mu_{pw}$  sur les profils de vitesse, pour  $Fr = V/\sqrt{gd} = 1$  ; (c) profils du coefficient de frottement effectif normalisé pour  $M_w/M_g = 0.2$  ; (d) loi d'échelle reliant coefficient de frottement effectif et un paramètre sans dimension comparant vitesse de glissement et intensité des fluctuations de vitesse, pour tous  $z$  et pour différentes valeurs de  $\mu_{pw}$  (couleurs comme en (b)),  $M_w/M_g$ ,  $V/\sqrt{gd}$  (différents symboles).

contacts dans ces zones. Puisque cette mobilisation partielle est étroitement liée aux fluctuations de vitesse des grains, nous avons testé une loi d'échelle pour le frottement effectif, basée sur la compétition entre le glissement continu et les fluctuations de vitesse. Cette loi a été vérifiée dans nos simulations numériques, lesquelles ont montré (Fig. 1d) que le frottement effectif normalisé  $\mu_w/\mu_{pw}$  est une fonction d'un paramètre sans dimension  $v_x/\sqrt{T_x}$ , où  $v_x$  est la vitesse de translation à la paroi et  $T_x = \langle v_x'^2 \rangle$  l'intensité des fluctuations dans la direction de l'écoulement.

Nous avons donc déterminé, par des simulations numériques discrètes, une loi d'échelle qui lie affaiblissement du frottement et glissement partiel, et qui peut être utilisée comme condition aux limites dans la simulation, par une approche continue, des écoulements granulaires denses. Cette loi prend en compte spécifiquement les fluctuations de vitesse, qui sont donc non seulement importantes pour la rhéologie loin des parois (comme postulé par exemple dans le cadre de la théorie cinétique des écoulements granulaires denses[4]), mais également pour la rhéologie à l'interface.

### 3 Expériences dans une cellule de cisaillement annulaire

Dans le but de conforter expérimentalement les résultats obtenus numériquement pour ce type d'écoulement confiné, des expériences ont été menées dans une cellule de cisaillement au laboratoire [3]. Il s'agit d'une cellule annulaire où le fond tourne à vitesse contrôlée. De plus, une pression est imposée sur la paroi supérieure, qui est libre de se déplacer verticalement. L'écoulement est confiné latéralement par deux cylindres coaxiaux en PMMA qui permettent aussi de visualiser le matériau en mouvement. Un schéma de principe de la cellule est montré sur la Figure 2a. Un capteur de force 6-axes a été installé sur la paroi externe de façon à mesurer les forces exercées par les grains sur cette dernière (Fig. 2b). Des expériences ont été menées avec de billes de verre ( $d = 4$  mm), en variant la vitesse de rotation (à travers du nombre de Froude  $Fr = \Omega(R + R_i)/(2\sqrt{gd})$ ), la charge imposée (via un paramètre  $\tilde{M} = M_w/M_g$  comme pour les simulations), et la hauteur de l'écoulement  $H/d$ .

Du point de vue de la cinématique, les profils de vitesse décroissent de façon exponentielle avec la hauteur, comme observé dans les simulations de la cellule rectangulaire (localisation près de la paroi inférieure). Nous n'avons pas pu observer plusieurs régimes de localisation comme pour les simulations, parce que le frottement latéral est toujours important. En ce qui concerne les forces en paroi, tout

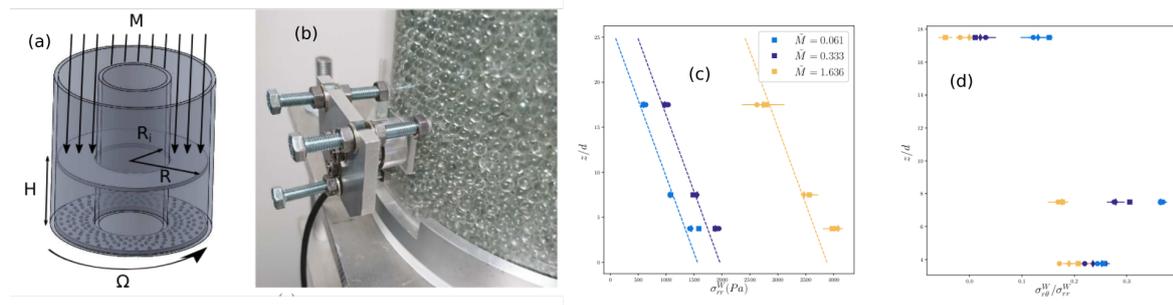


FIGURE 2 – Expériences d’écoulement confiné en cellule annulaire [3] : (a) schéma de principe de la cellule ; (b) détail de l’installation du capteur de force multi-axes ; (c-d) contraintes en paroi pour  $\tilde{H} = 25d$ , trois valeurs de chargement, et trois valeurs du nombre de Froude ( $Fr = 0.2$  (cercles),  $0.9$  (losanges),  $4.3$  (carrés)) : (c) contrainte normale  $\sigma_{rr}^W$  vs  $z$ , (d) coefficient de frottement effectif dans la direction de l’écoulement  $\sigma_{r\theta}^W / \sigma_{rr}^W$ .

d’abord la contrainte normale (Fig.2c) suit un profil hydrostatique le long de la verticale, avec une petite déviation positive près de la paroi du bas. Cette déviation peut être expliquée par l’effet du frottement latéral, qui induit une contrainte de cisaillement à la paroi, qui par simple bilan de forces peut incrémenter la contrainte normale. Le profil du coefficient de frottement effectif horizontal à la paroi (Fig.2d) est aussi intéressant, car il montre clairement un affaiblissement du frottement dans la zone de fluage, en accord avec les résultats numériques. Ce résultat a constitué une des premières évidences expérimentales de l’affaiblissement du frottement effectif à la paroi dans un écoulement granulaire confiné. Plus récemment, en collaboration avec le groupe de F. Yang de la National Taiwan University, nous avons couplé nos mesures de forces en paroi à des mesures précises des trajectoires des particules permettant d’extraire à la fois les fluctuations de vitesse et les rotations des grains. En effet, F. Yang et ses collaborateurs ont travaillé sur la relation entre vitesses de rotation des particules et affaiblissement du frottement, proposant une loi d’échelle alternative [8]. Le but de cette collaboration était donc de tester les deux lois d’échelle (l’une basée sur la température granulaire et l’autre sur les vitesses de rotation des grains) par des expériences dans notre cellule de cisaillement annulaire. Les premiers résultats [5], obtenus pour des écoulements de particules sphériques, ont montré que les deux cadres d’interprétation donnent des résultats équivalents. La frustration des vitesses de translation dans les zones de fluage, et la non-mobilisation du frottement à cause du roulement, peuvent expliquer l’affaiblissement du frottement effectif en paroi. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour quantifier séparément les effets des différents mécanismes.

## 4 Grains non sphériques et synthèse des lois d’échelle

La loi d’échelle que nous avons proposé [1] permet de prendre en compte l’effet des fluctuations de vitesse sur le frottement effectif en paroi. Au même temps, il est évident que les fluctuations de vitesse de translation ne sont pas le seul mécanisme de dégradation du frottement. Le roulement des particules est un autre mécanisme de déplacement qui ne mobilise pas le frottement. L’analyse expérimentale effectuée avec des particules de forme sphérique, décrite dans la section précédente, n’a pas permis de déterminer quel est le mécanisme prépondérant. Afin de comparer l’effet des rotations et des fluctuations de vitesse sur le comportement en paroi et donc sur les lois d’échelle, et considérant que la forme des particules impacte de manière importante la dynamique rotationnelle des grains dans nos écoulements confinés

[6], nous avons récemment lancé une campagne de simulations d'écoulements confinés de grains non-sphériques (sphérocyindres).

Dans cette présentation, nous discuterons des premiers résultats de cette campagne, qui montrent que le rapport entre vitesse de glissement et intensité des fluctuations de vitesse ne peut pas à lui seul expliquer la dégregation du frottement effectif. D'autre part, le roulement ne suffit pas non plus, et cela est évident si on pense à des grains allongées, dont la dynamique rotationnelle est très frustrée. Ces résultats poussent en effet vers la nécessité de combiner l'effet des deux mécanismes dans la loi d'échelle, afin de prédire le comportement effectif en paroi du milieu granulaire pour une variété de forme de grains. Nous discuterons donc des pistes les plus prometteuses pour la détermination de l'échelle de vitesse pertinente. Cette synthèse permettra peut-être d'identifier une loi d'échelle universelle, permettant de considérer différentes formes de particules et différentes géométries d'écoulement à la fois.

## Références

- [1] Artoni R., Richard, P. Effective wall friction in wall-bounded 3D dense granular flows, *Phys. Rev. Lett.* 115, 158001 (2015).
- [2] Artoni R., Richard P. Torsional shear flow of granular materials : shear localization and minimum energy principle. *Computational Particle Mechanics*, 5 :1 (2018) pp. 3-12.
- [3] Artoni R., Soligo A., Paul J.M. & Richard P. Shear localization and wall friction in confined dense granular flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 849 (2018) 395-418
- [4] Jenkins, J. T., Berzi, D. Dense inclined flows of inelastic spheres : tests of an extension of kinetic theory. *Granular Matter*, 12(2), (2010) 151-158.
- [5] Lin, C. C., Artoni, R., Yang, F. L., and Richard, P. Influence of granular temperature and grain rotation on the wall friction coefficient in confined shear granular flows. In *EPJ Web of Conferences* (Vol. 249, p. 03026). EDP Sciences (2021).
- [6] Pol , A., Artoni, R., Richard, P. Écoulements granulaires confinés : effet de l'anisotropie de forme des grains. *CFM 2022*.
- [7] Renouf, M., Dubois, F., and Alart, P. A parallel version of the non smooth contact dynamics algorithm applied to the simulation of granular media. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 168(1-2), 375-382 (2004).
- [8] Yang, F. L., and Huang, Y. T. New aspects for friction coefficients of finite granular avalanche down a flat narrow reservoir. *Granular Matter*, 18(4), 1-13 (2016).