



**HAL**  
open science

# Études numériques et expérimentaux du glissement à l'interface particules-paroi dans les écoulements granulaires denses

Riccardo Artoni, Andrea Santomaso

► **To cite this version:**

Riccardo Artoni, Andrea Santomaso. Études numériques et expérimentaux du glissement à l'interface particules-paroi dans les écoulements granulaires denses. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440591

**HAL Id: hal-03440591**

**<https://hal.science/hal-03440591>**

Submitted on 22 Nov 2021

**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.

# Études numériques et expérimentales du glissement à l'interface particules-paroi dans les écoulements granulaires denses

R. Artoni<sup>a</sup>, A. Santomaso<sup>b</sup>

a. L'UNAM/IFSTTAR, Route de Bouaye, 44344 Bouguenais cedex

b. Department of Industrial Engineering, University of Padova, via Marzolo 9, 35131 Padova, Italy

## Résumé :

*Le glissement à l'interface avec une paroi est un phénomène important dans les écoulements granulaires denses, qui a été très peu abordé dans le passé. En effet, l'existence d'une vitesse de glissement non nulle affecte d'une manière critique et les contraintes et la cinématique de l'écoulement. Dans cet article, nous discutons des développements récents sur le sujet, en utilisant des résultats de simulations numériques et des expériences. Premièrement, nous discutons des résultats expérimentaux portant sur des écoulements en conduite verticale. Ceux-ci montrent clairement l'effet complexe et combiné du débit, des propriétés des grains et des parois sur le glissement. Cet effet est quantifié avec un nombre sans dimension dérivé de la longueur de glissement de Navier. Deuxièmement, nous présentons une campagne des simulations numériques discrètes en 2D sur différentes configurations d'écoulement (effectuées avec le code LMGC90), avec lesquelles nous essayons d'analyser l'effet des propriétés à l'échelle du contact, des variables globales (débit, inclinaison, etc.), et de la configuration d'écoulement (conduite verticale, cisaillement simple, plan incliné) sur le glissement à la paroi. Les résultats de cette campagne ont permis d'identifier les principaux paramètres sans dimension influençant le glissement à la paroi, et de déduire des lois d'échelle décrivant l'écart au frottement de Coulomb. L'importance de la configuration d'écoulement est particulièrement discuté.*

## Abstract :

*Wall slip is an important phenomenon for the flow of granular materials in chutes and channels. The appearance of a slip velocity at the wall critically affects wall stresses and flow profiles, and particularly the total flowrate. In this work we show, through numerical simulations and experiments, that the global slip phenomenon at a wall has peculiar features which deviate significantly from simple sliding behavior. At first we present experimental data for the vertical chute flow which highlight that wall slip depends on many operating and system variables such as flow rate, material properties, wall properties. Secondly, we resume a large campaign of numerical data performed in 2D with irregular particles, and try to analyse the effect of material properties, contact parameters, operating variables, different flow configurations, on the slip phenomenon. The numerical campaign allowed to identify the main parameters affecting the wall slip behavior of a numerical model of granular flow, providing the ingredients for the creation of a framework for the description of wall slip. The framework appears to be consistent among different flow configurations.*

**Mots clefs :** glissement à la paroi, écoulements granulaires denses, lois d'échelle

## 1 Introduction

Le glissement à la paroi d'un matériau granulaire en écoulement dense est encore peu détaillé, en dépit du travail mené d'un côté sur la rhéologie des écoulements denses [3], et de l'autre côté sur les effets des parois dans des régimes d'écoulement différents [7]. Le développement de lois d'échelle est à la

fois un problème fondamental important et un défi pratique affectant notamment les prédictions des modèles rhéologiques [1, 2].

Dans cet article nous présentons des résultats expérimentaux et numériques récents sur le glissement à la paroi des matériaux granulaires, pour aider le développement de ces lois d'échelle. D'abord nous discutons des expériences d'écoulement en conduite verticale avec différents matériaux granulaires et différentes parois. Nous profitons de ces données pour discuter les caractéristiques globales du phénomène de glissement. Ensuite, nous décrivons les résultats d'une campagne de simulations numériques 2D destinées à étudier le phénomène à l'échelle du contact pour quantifier l'effet des variables internes sur la vitesse de glissement. Les simulations ayant été menées en différentes configurations d'écoulement, elles ont permis d'envisager un cadre théorique et de tester une loi d'échelle pour le glissement.

## 2 Expériences

### 2.1 Matériaux et Méthodes

Le dispositif expérimental est constitué d'une conduite verticale quasi 2D où le mouvement du matériau est induit par un plateau horizontal sur lequel reposent les grains. La vitesse du plateau est contrôlé par un moteur électrique et est comprise entre 0.05 et 2.2 cm/s. Le dispositif ainsi conçu permet d'étudier le comportement à la paroi pour une large gamme de débits. La conduite a une largeur et une épaisseur variables. Les données présentés ici correspondent aux valeurs de largeur et d'épaisseur de 10 cm et 15 mm respectivement. Des expériences préliminaires (non montrées ici) ont permis de conclure que la largeur n'influence pas le glissement ; pour ce qui concerne l'épaisseur, il a été pris le plus petit possible pour éviter le développement des profils de vitesse transversaux. Les parois plus larges sont en verre pour limiter le frottement et permettre la visualisation de l'écoulement ; les parois latérales ont été recouvertes par du papier de verre avec différentes rugosités (P40 et P120, correspondant à une taille de particules collées de 425 et 125  $\mu\text{m}$  respectivement). Des matériaux différant par taille et forme ont été testés (voir Table 1). Les valeurs (statiques) de l'angle de frottement interne et à la paroi ont été déterminées avec une cellule de cisaillement de laboratoire, le Brookfield Powder Tester.

Materiau	gamme de diamètres ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_b$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\phi$	$\phi_w^1$	$\phi_w^2$
Carbonate de calcium	600-710	1276	36.3	36.2	34.15
Carbonate de calcium	800-1000	1317	37.7	36.2	31.8
Carbonate de calcium	1000-1180	1281	39.5	35.8	33.2
Cellulose granulé	600-700	845	27.2	27.8	23.7
Fer (rond)	710-1000	4319	26.5	26.2	21.5
Acier (anguleux)	1000-1180	3834	33.8	33.8	30.6
Acier (anguleux)	850-1000	3922	33.5	33.3	31.7
TAED	600 -800	517	35.4	36.4	32.6
TAED	800-1000	523	36.2	36.8	32.3
TAED	1000-1410	473	37.3	36.6	32.7

TABLE 1 – Propriétés des matériaux utilisés.

Une camera CCD mvBlueFox a été utilisée pour l'acquisition d'images. La fréquence d'acquisition a été varié entre 10 et 25 fps en fonction de la vitesse du plateau. Au moins 300 images (512x512 pixels) ont été analysées pour chaque test, correspondant a un carré de 3x3 cm. L'analyse a été mené par des routines Matlab. Les profils de vitesse ont été calculés avec une technique de vélocimétrie par corrélation d'image (PIV). Pour chaque vitesse du plateau (entre 9 valeurs représentatifs choisis) les tests ont été répétés plusieurs fois. L'analyse a permis de calculer les profils complets de vitesse ; dans ce travail nous nous concentrons seulement sur le comportement près de la paroi.

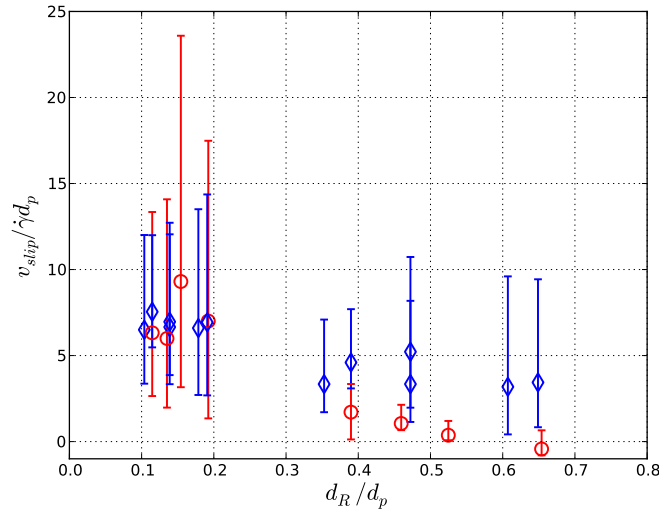


FIGURE 1 – Longueur de glissement normalisé  $\frac{v_{slip}}{\dot{\gamma}d_p}$  en fonction de la rugosité relative  $d_R/d_p$ , pour des matériaux de catégorie A ( $\circ$ ) et B ( $\diamond$ ) (voir le texte pour une explication). Les symboles sont les valeurs moyennes, alors que les barres représentent les valeurs minimales et maximales.

## 2.2 Résultats

Pour quantifier le glissement à la paroi en utilisant l’information provenant des profils de vitesse, nous avons choisi d’utiliser la “longueur de glissement”  $\lambda$ , introduite par Navier [5], qui est définie comme le rapport entre la vitesse et le taux de cisaillement à la paroi :

$$\lambda = \frac{v_{slip}}{dv/dx|_{x=W}} \quad (1)$$

Dans la suite nous utilisons plutôt un paramètre sans dimension défini comme  $\lambda/d_p$  où  $d_p$  est le diamètre moyen des particules. Ce choix est assez évident car  $d_p$  est en effet la seule échelle de longueur intrinsèque d’un matériau granulaire.

Les expérimentations ont permis de vérifier que, dans notre configuration d’écoulement, le paramètre  $\lambda/d_p$  dépend généralement de beaucoup de variables du système, et notamment du débit, du frottement interne et de la rugosité de la paroi. Une analyse qualitative des résultats a permis de diviser les matériaux en deux catégories : une catégorie A, composée par des matériaux moins frottants ( $\phi < 34^\circ$ ), et une catégorie B avec des matériaux ayant un angle de frottement interne plus grand ( $\phi > 34^\circ$ ).

Les matériaux de type A sont caractérisés par une influence plus forte de la rugosité sur la longueur de glissement normalisée. Pour la paroi la plus rugueuse,  $\lambda/d_p$  est indépendante du débit et généralement inférieure à 2 ; pour la paroi la moins rugueuse  $\lambda/d_p$  croît avec le débit (de 5 à 25 dans notre gamme de vitesse, de 0.05 à 2.2 cm/s). Les matériaux de type B montrent toujours une croissance de  $\lambda/d_p$  avec le débit, avec un effet moins important de la rugosité. Les résultats sont résumés synthétiquement sur la Figure 1, où nous montrons la valeur moyenne, minimale et maximale (pour résumer la dépendance du débit qui est monotone) de  $\lambda/d_p$ , en fonction de la rugosité relative définie comme  $d_R/d_p$  où  $d_R$  est la dimension typique de la rugosité de la paroi. La dépendance de la longueur de glissement du frottement interne (schématisée par la subdivision en deux classes de comportement) n’est pas simple à expliquer. D’un côté, ça semble naturel de penser que des matériaux qui s’écoulent plus facilement (i.e. avec un moindre  $\phi$ ) montrent aussi une plus grande sensibilité à la rugosité de la paroi. D’un autre côté, sans la connaissance des contraintes, le cadre reste trop complexe pour pouvoir effectuer des analyses plus raffinées.

- 
1. papier de verre P40
  2. papier de verre P120

### 3 Simulations numériques

#### 3.1 Méthode de simulation et paramètres

Les résultats des expériences nous permettent d’apprécier la complexité associée au glissement à la paroi, ainsi que ses caractéristiques principales. Pour pouvoir raffiner l’analyse et pouvoir déterminer des lois d’échelle pour le glissement, nous avons mené une campagne de simulations numériques en 2D, pour des écoulements sur fond lisse et frictionnel (ce qui, à la rigueur, concerne seulement une partie des expériences présentées : pour une autre partie, le fond ne peut pas être considéré comme lisse mais il est plutôt “rugueux”). Dans les simulations nous avons varié : (1) la configuration d’écoulement, (2) le frottement particule-paroi, (3) la forme des particules, (4) le diamètre des particules, (5) des autres variables de l’écoulement (inclinaison et épaisseur d’écoulement pour le plan incliné, débit et largeur de la conduite pour l’écoulement en conduite verticale). Nous nous sommes concentrés sur des simulations 2D pour pouvoir en effectuer un grand nombre et ainsi développer des approches de type “lois d’échelle”, qui seront à tester en 3D. Pour les simulations nous avons employé la méthode de dynamique de contacts implémenté dans le logiciel libre LMGC90 [4, 6]. L’étude s’est concentré sur des particules anguleuses (polygones), plus précisément des pentagones afin de maximiser l’angularité. Les particules sont légèrement polydisperses, les diamètres étant uniformément distribués entre  $\pm 10\%$  de la valeur moyenne. La loi de contact entre particules est inélastique, avec frottement de Coulomb ( $\mu_p = 0.3$ ). Les autres paramètres caractérisant les simulations sont listés dans la Table 2.

Configuration d’écoulement	Dimension	Forme des particules	Nombre des particules $N_p$	Nombre inertiel $I = \frac{\dot{\gamma} d_p}{\sqrt{p/\rho_p}}$	Coefficient de frottement particules-paroi $\mu_{pw}$
Plan incliné[2]	2D	Pentagones réguliers	5000	$2 \times 10^{-2} - 10^{-1}$	0.63-1.08
Plan incliné[2]	2D	Pentagones allongés	5000	$5 \times 10^{-3} - 1.5 \times 10^{-1}$	0.63-1.08
Conduite verticale	2D	Pentagones réguliers	4500-9000	$10^{-3} - 10^{-1}$	0.4-1.2
Cisaillement simple	2D	Pentagones réguliers	4000	$10^{-2} - 10^{-1}$	0.47-1.1

TABLE 2 – Paramètres des simulations numériques.

#### 3.2 Écoulement sur plan incliné

Le plan incliné est une configuration d’écoulement intéressante pour étudier le glissement, car elle permet de révéler simplement l’émergence des lois complexes de glissement à la paroi. On pourrait supposer - comme on fait souvent dans la littérature - qu’une loi de glissement macroscopique de Coulomb soit la description plus approprié pour l’écoulement sur une paroi lisse. Sur le plan incliné, ce modèle implique que la vitesse de glissement est nulle pour  $\tan \theta < \mu_{pw}$  (où  $\theta$  est l’inclinaison du plan), constante (mais indéfinie) pour  $\tan \theta = \mu_{pw}$ , et que le mouvement est accéléré pour  $\tan \theta > \mu_{pw}$ . En effet, les simulations révèlent un autre cadre : nous trouvons une vitesse de glissement toujours non nulle pour une large gamme des angles, pour  $\tan \theta < \mu_{pw}$ . Cela implique évidemment un débit plus élevé qu’avec une loi de glissement simple.

Les paramètres sans dimension caractérisant notre système sont : (1) le nombre inertiel  $I = \frac{\dot{\gamma} d_p}{\sqrt{p/\rho_p}}$ , (2) le coefficient de frottement microscopique, particule-paroi,  $\mu_{pw}$ , (3) le coefficient de frottement macroscopique  $\mu_w = \tau/\sigma_w$  où  $\tau$  est la contrainte tangentielle et  $\sigma_w$  est la contrainte normale à la paroi, et (4) la longueur de glissement normalisé  $\frac{v_{slip}}{\dot{\gamma} d_p}$ . Pour les simulations sur plan incliné, on trouve une loi d’échelle qui relie bien trois de ces paramètres, et qu’on peut exprimer par la forme fonctionnelle  $\frac{v_{slip}}{\dot{\gamma} d_p} = A \left( \frac{\mu_w/\mu_{pw}}{1-\mu_w/\mu_{pw}} \right)^B$ , où les paramètres d’ajustement sont  $A = 2.2$ ,  $B = 0.42$  pour les pentagones allongés et  $A = 4.23$  and  $B = 0.33$  pour les pentagones réguliers. Les données et les courbes de corrélation sont représentés sur la Figure 2.

#### 3.3 Autres configurations d’écoulement

Afin de tester la validité de la loi d’échelle, les résultats obtenus pour le plan incliné ont été comparés avec des résultats provenant des autres configurations d’écoulement : le cisaillement simple et la

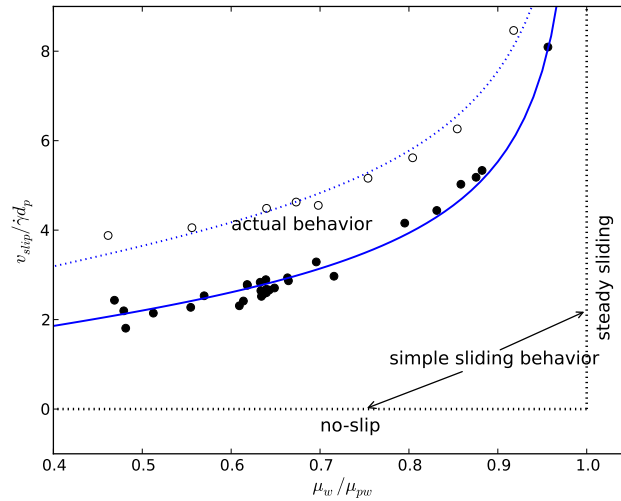


FIGURE 2 – Longueur de glissement normalisé  $\frac{v_{slip}}{\gamma d_p}$  en fonction du coefficient de frottement macroscopique normalisé  $\frac{\mu_w}{\mu_{pw}}$ , pour pentagones ( $\circ$ ) réguliers et ( $\bullet$ ) allongés. Les lignes sont les courbes de corrélation décrites dans le texte.

conduite verticale. Les résultats de cette comparaison sont montrés sur la Figure 3. Concernant les simulations d'écoulement en conduite verticale, il est important de souligner que les simulations sont stationnaires, mais non périodiques (suite à la technique utilisée pour recirculer les grains) : suite à la présence d'une surface libre, nous obtenons des profils de vitesse, contraintes, etc qui se développent selon la hauteur  $z$ . Pour cela, les variables sont moyennées globalement en temps et localement en espace. Cela implique que chaque simulation produise plusieurs "points" pour chaque variable à la paroi, contrairement aux autres configurations où l'écoulement est toujours bien développé. Pour aider la compréhension, le nuage de points correspondant à cette situation est représenté avec des barres d'erreurs sur la Figure 3; en revanche, pour les deux autres configurations, chaque point correspond bien à une simulation. Nous trouvons un résultat important : pour un forttement suffisamment élevé ( $\mu_w/\mu_{pw} < 0.75$ ), la loi d'échelle est la même pour les trois configurations d'écoulement. Si  $\mu_w/\mu_{pw} > 0.75$ , le cisaillement simple est en bon accord avec le plan incliné, mais les résultats en conduite verticale montrent des déviations importantes, associées à une large variance des valeurs de  $\frac{v_{slip}}{\gamma d_p}$ . Ces déviations pourraient être liées au fait que les profils ne sont pas bien développés dans la conduite verticale. Des simulations avec des conditions périodiques devrait être envisagées pour vérifier cette hypothèse. Il faut noter que ce n'est pas possible de comparer les résultats de ces simulations aux expériences détaillées dans la Section 2, parce que (1) il s'agit de configurations d'écoulement un peu différentes (parois lisses/parois rugueuses), et (2) dans les expériences présentées, nous n'avons pas des mesures de contraintes (qui permettraient de quantifier  $\mu_w/\mu_{pw}$ ). Le rapprochement des expériences et simulations est de même instructif parce qu'il démontre que la connaissance des contraintes (et non seulement des paramètres géométriques comme  $d_R/d_p$ ) est importante pour la compréhension du glissement à la paroi (ce qui pourrait expliquer la variation de  $\frac{v_{slip}}{\gamma d_p}$  avec le débit vue en Section 2).

### 3.4 Discussion

Compte tenu des différences observées, il est important de souligner que la loi d'échelle trouvée a la même tendance qualitative pour les trois configurations d'écoulement analysées. En particulier, nous trouvons que le comportement est consistant avec un glissement simple dans ses limites : la vitesse de glissement disparaît pour un frottement infini ( $\mu_w/\mu_{pw} \rightarrow 0$ ), et le taux de cisaillement tend vers 0 pour un frottement négligeable. Entre les deux limites (i.e.  $0 < \mu_w/\mu_{pw} < 1$ ), la vitesse de glissement et le taux de cisaillement prennent des valeurs finies, et la longueur de glissement normalisée  $\frac{v_{slip}}{\gamma d_p}$  croît généralement avec  $\mu_w/\mu_{pw}$ . Nous proposons une loi qui décrit ce comportement, et qui contient des

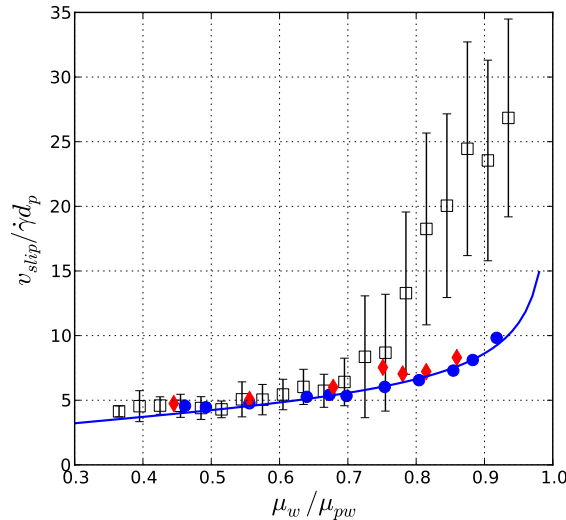


FIGURE 3 – Longueur de glissement normalisée  $\frac{v_{slip}}{\gamma d_p}$  en fonction du coefficient de frottement macroscopique normalisé  $\frac{\mu_w}{\mu_{pw}}$ , pour les pentagones réguliers, dans différentes configurations d'écoulement : (•) plan incliné (Figure 2), (□) conduite verticale, et (◊) cisaillement simple. La ligne continue est la courbe de meilleur ajustement déjà présentée sur la Figure 2.

paramètres qui peuvent traduire l'effet de la forme des particules. Pour un frottement suffisamment élevé, la loi d'échelle est la même pour différentes configurations d'écoulement. Ce résultat suggère que notre approche peut conduire à une formulation de lois d'échelle pour le glissement à la paroi des matériaux granulaires. Pour avancer sur ce point, il est nécessaire de bien comprendre l'origine des déviations trouvées pour la conduite verticale.

## 4 Conclusions et perspectives

Dans cet article, nous avons premièrement discuté les caractéristiques principales du glissement à la paroi pour des écoulements granulaires denses, profitant des résultats des expériences en conduite verticale. Le glissement a été caractérisé par un nombre sans dimension, la longueur de glissement normalisée  $\frac{v_{slip}}{\gamma d_p}$ . L'analyse a permis de découvrir un cadre assez complexe, où les tendances principales sont quand même évidentes, notamment par rapport aux effets combinés du frottement interne, de la rugosité de la paroi et du débit. Pour obtenir une image plus claire des phénomènes, nous avons mené une campagne des simulations numériques à la recherche des lois d'échelle pour la longueur de glissement. La loi trouvée est très prometteuse, aussi parce que elle est en partie indépendante de la configuration d'écoulement. Les prochains efforts seront dédiés à une campagne de simulations 3D, avec en parallèle une campagne expérimentale où la mesure des profils de vitesse et la mesure des contraintes à la paroi seront couplées.

## Références

- [1] R. Artoni, A. Santomaso, and P. Canu, *Phys. Rev. E* **79**, 031304 (2009).
- [2] R. Artoni, A. Santomaso, M. Go', and P. Canu, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 238002 (2012).
- [3] G. D. R. Midi, *Eur. Phys. J. E* **14**, 341–365 (2004).
- [4] M. Jean, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* **177**, 235 – 257 (1999).
- [5] C. Navier, *Mem. Acad. Roy. Inst. Sci.* (1823).
- [6] M. Renouf, F. Dubois, and P. Alart, *Journal of Computational and Applied Mathematics* **168**, 375 – 382 (2004).
- [7] M. W. Richman, and C. S. Chou, *J. Appl. Math. Phys. (ZAMP)* **39**, 885 (1988).