

Mesures de contraintes dans un écoulement granulaire sur plan incliné

(Septembre 2018 - Décembre 2018)

Etudiant : Julien ONILLON, ENS Rennes

Encadrants : Renaud DELANNAY, Alexandre VALANCE, Aurélien NEVEU, Institut de Physique de Rennes

Abstract—In granular flows, the interactions between the particles and the base play a determinant role on the particle velocity field. The goal of this study is, by using an experimental device consisting of an inclined plane bounded by lateral sidewalls, to characterize the granular flows as a function of the inclination angle and in particular to assess the forces exerted by the flow at the base thanks to piezoelectric sensors integrated within the plane. Experiments have been conducted with angles ranging from 14.5 to 24.6 degrees.

I. INTRODUCTION

ON appelle écoulement granulaire gravitaire le mouvement d'un ensemble de particules solides indépendantes engendré par la pesanteur. Dans ce genre de phénomènes, la dynamique est dominée par des interactions entre les grains mais aussi avec les parois, et quantifier ces forces permet de mieux caractériser ces écoulements. La prédiction du moment auquel une avalanche ou un glissement de terrain va survenir et la distance sur laquelle ils vont se propager sont des problèmes encore non résolus. L'opacité de ce genre de flux rend la mesure très difficile, et donc l'étude réelle ardue. De nombreux dispositifs ont donc été mis au point en laboratoire pour simuler ces écoulements et ainsi pouvoir dresser des modèles fiables. Comme dans la réalité, les grains sont la plupart du temps mis en mouvement par la pesanteur sur un plan incliné. La présence de parois sur les bords, permettant de guider l'écoulement, a également une influence non négligeable sur le phénomène en lui-même[7]. Ce projet, mené à l'Institut de Physique de Rennes, a pour but d'étudier le coefficient de frottement à la base d'écoulements granulaires, à l'aide de capteurs d'efforts positionnés sur un plan incliné dont on va faire varier l'inclinaison. En effet, ce coefficient est important puisque il est un indicateur important de la dynamique des écoulements, notamment de leur vitesse.

II. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL ET DONNÉES

Le canal, représenté figure 1, a une largeur de 40 mm et une longueur de 60 cm. On mesurera l'angle d'inclinaison α à partir d'un inclinomètre, en le faisant varier jusqu'à 24.6 degrés, angle limite permis par le dispositif. Avant la manipulation, le récipient est rempli de grains, son fond est bloqué. Au lancement de l'acquisition, on ouvre le fond du récipient et les grains sont libérés dans le canal par le régulateur de débit. On utilisera des grains de diamètre 1mm.

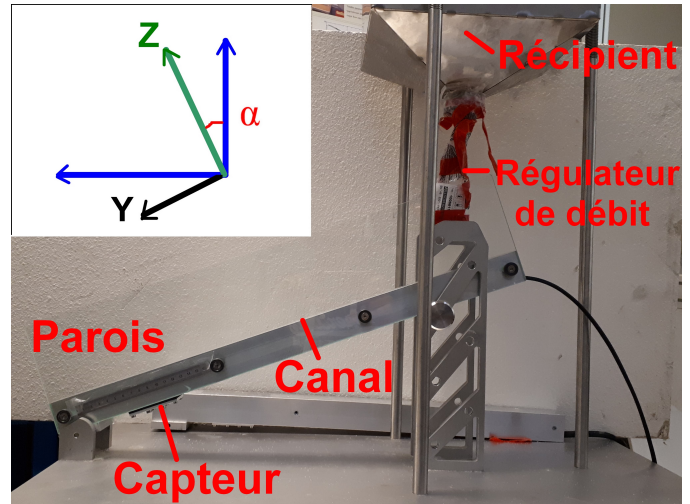


Fig. 1. Dispositif expérimental

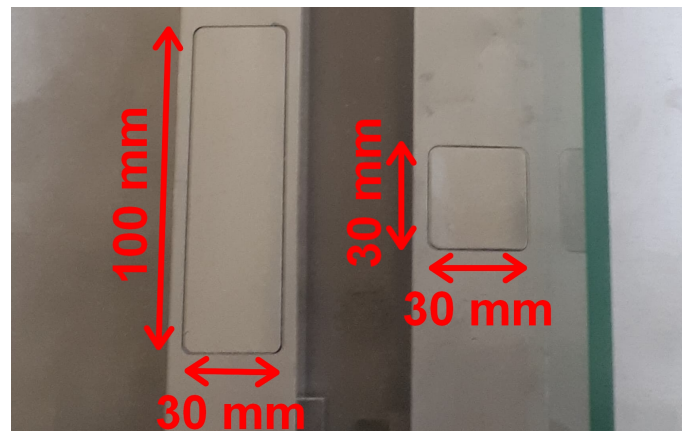


Fig. 2. Capteurs utilisés

On utilise les capteurs piézoélectriques KISTLER de type 9317C, représentés figure 2. Les caractéristiques de ces capteurs seront exposées dans la partie suivante, tout comme celles de l'amplificateur associé, la fréquence d'acquisition sera pour toutes les manipulations fixée à 1kHz.

De plus, connaître l'épaisseur de l'écoulement observé ainsi que son allure est important pour caractériser nos différents essais. Les grains possédant une vitesse relativement élevée, on a besoin d'une caméra avec une fréquence d'acquisition élevée.

On utilisera donc une caméra haute vitesse APX RS, réglée à 500 images par seconde pour nos manipulations, on pourra ainsi suivre un grain précis entre deux images.

III. RÉSULTATS

A. Etalonnage et limites des capteurs et du dispositif

Les deux capteurs sont identiques, hormis leur calibrage, et sont fixés sur des plaques de tailles différentes. Ils possèdent des calibrages précis pour chaque voie, correspondant à chaque direction de force appliquée : on considérera, dans toute l'étude qui va suivre, N_z l'effort normal au canal suivant l'axe Z, défini figure 1, T_y l'effort tangentiel dans la direction de l'écoulement suivant l'axe Y, et T_x l'effort tangentiel orthogonal à l'écoulement associé.

Les capteurs utilisés pour mesurer les efforts exercés par les écoulements se basent sur l'effet piézoélectrique, la déformation d'un matériau adapté va donc engendrer un déplacement des charges que les capteurs vont mesurer, de l'ordre du picoCoulomb, avant d'envoyer le signal dans l'amplificateur. L'amplificateur est interfacé et on accède aux tensions associées via le logiciel Labview, avec l'échelle $1V = 1N$.

L'objectif majeur étant de tester les capteurs, nous avons commencé par appliquer des masses statiques et observer si les forces renvoyées sur les voies Y et Z correspondait à la projection du poids sur les axes correspondant, soit respectivement $N_z = m * \cos(\alpha)$ et $T_y = -m * \sin(\alpha)$.

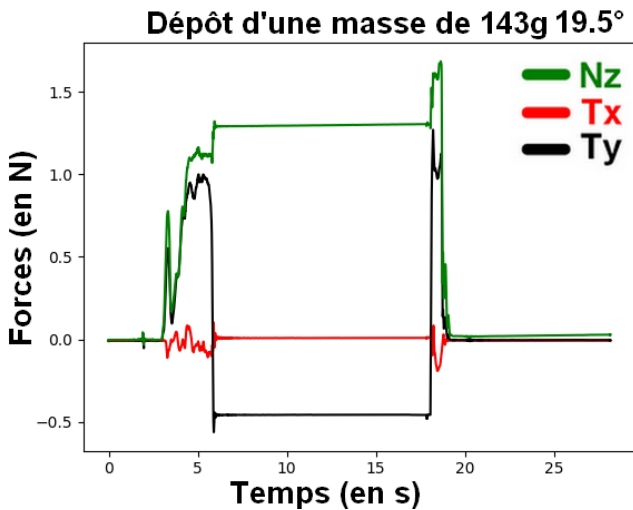


Fig. 3. Essai du capteur avec masse de 143g à 19.5 degré d'inclinaison

La figure 3 représente le dépôt d'une masse de 143g sur le petit capteur. Les valeurs des paliers sont de 1.29N pour N_z et -0.46N pour T_y , avec des valeurs théoriques de 1.34N et 0.48N. Le capteur semble légèrement sous évaluer la masse, ou les arrondis de la balance les surévaluent légèrement, mais les valeurs semblent néanmoins proches de de la réalité, avec des erreurs de 3% et 4%.

Ensuite, nous sommes passés à des essais de glissement d'une masse sur la longueur du capteur, pour observer le

comportement du capteur en dynamique. Si les essais sur le petit capteur renvoie des signaux analogue à la figure 3, avec quelques oscillations sur le palier correspondant aux à-coups du déplacement de la masse, les essais sur le grand capteur montre une pente importante au niveau du palier, représentée sur la figure 4.

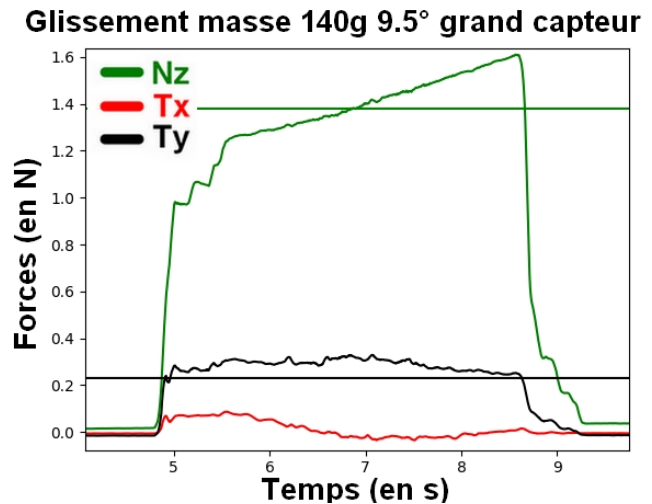


Fig. 4. Glissement d'une masse de 140g vers le haut du canal à 9.5 degré d'inclinaison pour le grand capteur

On a représenté les valeurs théoriques par des traits horizontaux. La masse déplacée étant constante au cours du temps, la valeur au niveau du palier devrait être constante. On peut remarquer que la valeur théorique est atteinte au milieu du grand capteur pour l'effort N_z , et que l'effort T_y est plus important que le théorique, ce qui peut s'expliquer par le fait que la force appliquée pour faire glisser la masse est prise en compte par le capteur et s'ajoute donc à la composante du poids.

En étudiant plus profondément le problème, il émerge que le grand capteur possède un souci d'équilibre, une masse posée sur les deux extrémités de la plaque sur laquelle il est fixé ne renvoie pas la même valeur. On obtient la valeur théorique en posant la masse sur le milieu du capteur.

De plus, en posant trois masses identiques aux deux extrémités et au centre du capteur, on constate que le palier correspond bien à la somme des trois poids. Les valeurs renvoyées aux extrémités sont donc opposées par rapport à celle renvoyée au centre, et on peut supposer qu'en régime permanent de l'écoulement, où la masse des grains est uniformément répartie sur la plaque, nous obtiendrons des valeurs de forces cohérentes.

On peut essayer d'expliquer ce résultat par une imperfection au niveau du matériau piézoélectrique du capteur, qui ne se déformerait pas exactement de la même manière selon le point d'application de la masse.

Après avoir essay les capteurs en statique et en dynamique, nous avons tenté de mesurer le comportement d'une bille de différents diamètre (quelques cm) roulant le long du canal. Les résultats sont inexploitable en détail car les vibrations

induites d'une part par les chocs de la bille contre les parois et d'autre part par les chocs sur le canal dus aux imperfections de la bille sont trop importantes. Les valeurs renvoyées par le capteur dans l'instant où la bille passe au-dessus sont donc perdues dans des oscillations très importantes.

Enfin, nous avons pu nous intéresser aux forces pendant les écoulements réels, mais les vibrations du système, déjà observées avec les billes, perturbaient la bonne compréhension des signaux. La solution retenue est d'utiliser un filtre passe-bas pour couper les fréquences trop élevées. Plusieurs essais ont donc été réalisés à différentes fréquences de coupure pour obtenir un signal le moins bruité possible sans perdre de l'information.

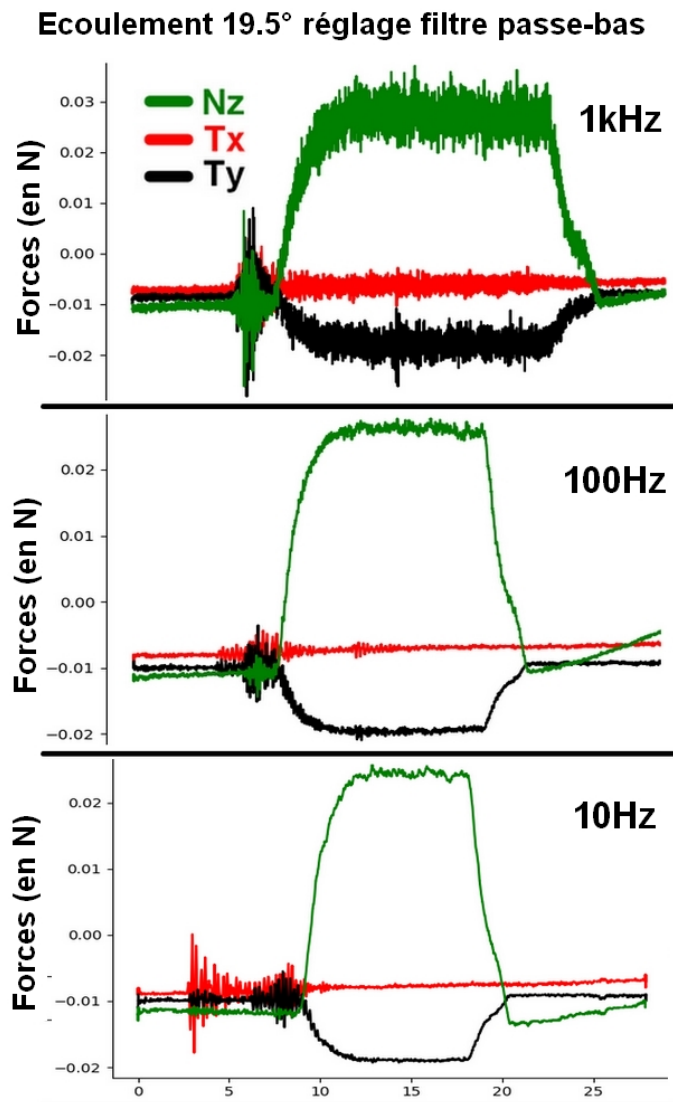


Fig. 5. Essai à 19.5 degrés sur petit capteur pour différentes fréquences de coupure du passe-bas

Les schémas de la figure 5 montre sur un même écoulement les résultats pour trois fréquences de coupures : 10Hz, 100Hz et 1kHz. La fréquence d'acquisition du signal étant de 1kHz, il serait inutile d'en choisir une supérieure. Le signal filtré à 1kHz présente de nombreuses oscillations ne permettant

pas de définir la valeur du palier avec précision. Les signaux filtrés à 100 et 10Hz sont tous deux exploitables, mais pour la suite on choisira pour fréquence de coupure 100Hz, afin de limiter la perte d'information.

Deux problèmes persistants n'ont pas été résolus au cours de ce projet. Le premier réside dans le fait que pendant l'acquisition, la valeur renvoyée par les capteurs "dérive". A effort constant, on observe une évolution non négligeable des valeurs renvoyées, particulièrement sur des longs temps d'acquisition. Elle dépend également de la température de la pièce, de l'humidité ou encore de la durée depuis l'allumage de l'amplificateur. Cette dérive variable peut donc poser problème lors de l'interprétation des résultats, bien qu'étant facilement quantifiable, on peut la traiter après la mesure. On peut observer une mesure sans aucun chargement ni écoulement sur la figure 6, où le signal dérive particulièrement selon la direction Z.

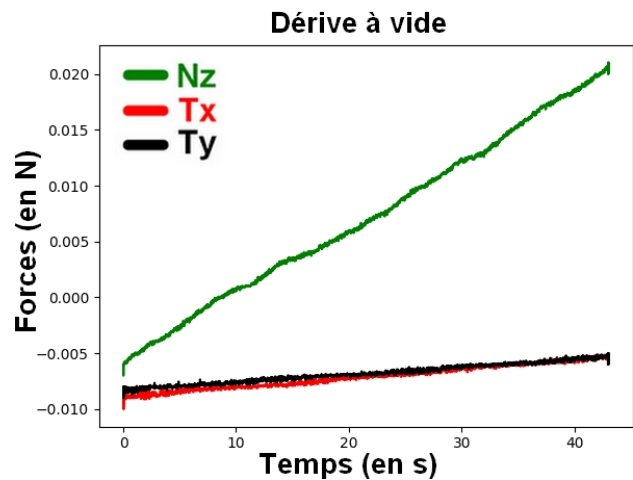


Fig. 6. Mesure à vide

Le second problème est qu'au début de chaque acquisition, les valeurs renvoyées ne sont pas exactement nulles, elles possèdent un très léger offset, probablement dû au calibrage de l'amplificateur. Ce décalage est également corrigé en traitement du signal après acquisition du résultat.

B. Structures observées

Il est important de préciser que les résultats qui suivent sont avant tout des moyens pour tester le potentiel des capteurs, ils ne se veulent pas une étude approfondie d'un phénomène précis, d'autant que la dérive de ces capteurs constitue un obstacle à la précision des mesures.

Les expériences ont été menées pour des angles variant de 14.5 à 24.6 degrés, pour une masse de grains de 2 kilogrammes dans le récipient à l'instant initial. On s'intéresse aux images obtenues par la caméra haute vitesse. On peut observer figure 7 la forme d'écoulement pour les expériences à 19.5 et 24.6 degrés. Les différences d'éclairage sont dues au réglage du shutter, qui correspond à la durée d'exposition du capteur de la caméra.

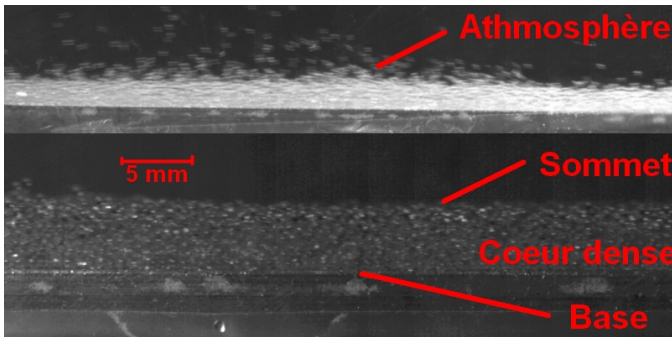


Fig. 7. Profil d'écoulements unidirectionnels à 24.6 degrés d'inclinaison, en haut, et 19.5 degrés, en bas.

Pour l'écoulement du bas, à 19.5 degrés, les grains sont présents sous une seule phase, bien que l'on puisse distinguer une fraction volumique moins importante en surface, ou sommet, de l'écoulement que dans le coeur. On mesure une épaisseur de $e = 4.5mm$

Pour l'écoulement du haut, à 24.6 degrés, on distingue une légère atmosphère au sommet de l'écoulement. Cette atmosphère, censée apparaître vers des angles supérieurs à 30 degrés, d'après Brodu et al.[1], s'explique par l'imparfaite insertion du capteur dans le canal. La surface de la plaque portant celui-ci n'étant pas au même niveau que le canal, cela créé une irrégularité et les grains s'entrechoquent, certains étant projetés en l'air et effectuant une parabole. L'épaisseur vaut ici $e = 4mm$. Elle est légèrement plus faible que pour l'écoulement précédent ce qui est logique car la pente est plus raide et le débit plus important.

Le profil de vitesse de l'écoulement est également très important pour sa caractérisation. On va donc essayer d'évaluer, à partir des images recueillies avec la caméra haute vitesse, la célérité des grains. L'importante densité des grains dans le coeur de l'écoulement rend difficile la distinction par un logiciel de traitement d'image, ImageJ, de chaque particule. Nous pouvons uniquement calculer la vitesse de surface de l'écoulement, en relevant les coordonnées image après image d'un grain de surface. Pour l'écoulement à 24.6 degrés, en moyenne, la vitesse de surface est de : $V_s = 1.1m.s^{-1}$

On peut vérifier la cohérence de cette valeur grâce aux débits massiques et volumiques de notre écoulement. En effet, on mesure directement le débit massique à partir du temps pour lequel la masse de grain passe entièrement dans le canal. On supposera le débit massique constant pendant l'écoulement[4], on a expérimentalement $D_m = 8.10^{-2}kg.s^{-1}$

Or, $D_v = C.e.L$ avec L largeur du canal, V la vitesse moyenne dans une section de l'écoulement et C la fraction volumique de l'écoulement, c'est-à-dire le rapport de la surface de grains par rapport à la surface totale, que nous prendrons égal à 0.6 pour cet angle, d'après [1].

En prenant pour hypothèse $V = V_s$, soit un profil uniforme dans la section, et une masse volumique de grains de $\rho = 2500kg.m^{-3}$ on en revient par le calcul à :

$$D_m = \rho.D_v = \rho.C.V_s.e.L = 0.26kg.s^{-1}$$

Ce modèle ne semble pas très adapté, car les débits sont reliés par un facteur deux, supérieur aux imprécisions dues à la mesure. On va donc adopter un meilleur profil de vitesse, celui de Bagnold[5], c'est à dire que l'on suppose $V(z) = \beta * z^{\frac{3}{2}}$ avec β un coefficient à déterminer[2]. En utilisant la condition limite de la vitesse en $z = e$, il vient $\beta = 4348$ puis on peut calculer par intégration $V = 0.44m.s^{-1}$. le nouveau débit est donc :

$$D_m = \rho.D_v = \rho.C.V_s.e.L = 0.1kg.s^{-1}$$

Ce résultat est plus proche de la valeur mesurée, l'écart persistant pourrait s'expliquer par une fraction volumique de l'écoulement réelle inférieure à 0.6, ou un profil de vitesse plus précis que celui de Bagnold, bien qu'il semble déjà beaucoup mieux adapté que notre première hypothèse.

C. Force et coefficients de frottement à la base de l'écoulement

Les forces renvoyées pour un écoulement à 14.5 degrés sont de la forme suivante :

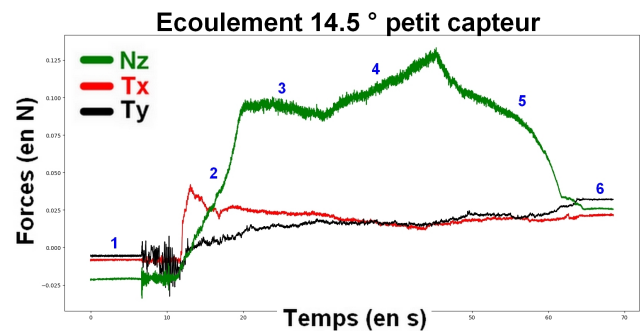


Fig. 8. Forces à la base d'un écoulement à 14.5 degrés d'inclinaison

On peut distinguer 6 phases :

- 1) Rien, puis des oscillations dues à l'arrivée de l'écoulement apparaissent car le canal entre en vibration.
- 2) Régime transitoire, arrivée des grains sur le capteur.
- 3) Amoncellement des grains en amont du capteur à cause d'un angle trop faible, l'épaisseur au niveau du capteur stagne.
- 4) Augmentation de l'épaisseur d'écoulement au niveau du capteur, ce qui augmente l'effort normal.
- 5) Récipient vide, le tas en amont diminue progressivement, tout comme les forces exercées au niveau du capteur.
- 6) Les grains ont quitté le canal.

Les forces renvoyées pour un écoulement à 19.5 degrés sont représentées figure 9. Ce résultat est plus facilement interprétable car la pente assure qu'aucun tas ne se forme en amont du capteur. Néanmoins, la dérive est importante en fin de mesure, on s'intéressera donc au début du régime permanent, aux alentours des 18s, pour le calcul du coefficient de frottement. On constate bien les échelons de forces dû aux

Écoulement 19.5 ° petit capteur

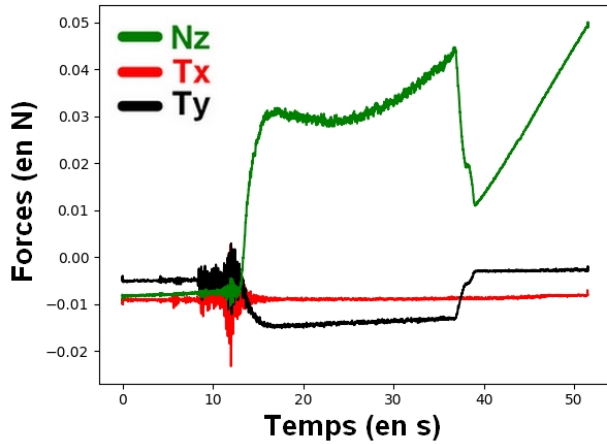


Fig. 9. Forces à la base d'un écoulement à 19.5 degré d'inclinaison

grains pour les forces normale et tangentielle dans le sens de l'écoulement. La force tangentielle et orthogonal à la vitesse des grains est logiquement constante et nulle.

Coefficient de frottement écoulement 19.5° petit capteur

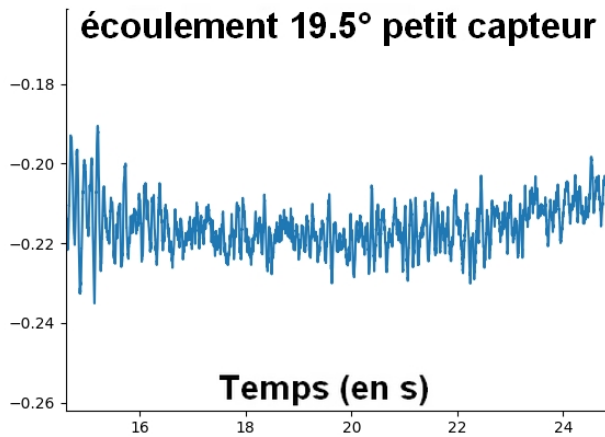


Fig. 10. Evolution du coefficient de frottement d'un écoulement à 19.5 degré d'inclinaison

On peut observer figure 10 qu'au début du régime permanent, on peut obtenir une valeur constante pour μ .
Les résultats globaux sont inscrits dans la table résultats.

On peut ainsi comparer ces résultats à la valeur théorique. On pourrait penser que, avec F le poids des grains, μ le coefficient de frottement et α l'angle d'inclinaison, on ait:

$$Ty = F * \sin(\alpha) \text{ et } Nz = F * \cos(\alpha)$$

D'où:

$$\mu = \tan(\alpha)$$

On peut donc comparer figure 11 les résultats expérimentaux à cette tangente.

TABLE I
RÉSULTATS

Pente et capteur	Force normale Nz moyenne	Force tangentielle Ty moyenne	coefficient de frottement
19.5 petit capteur	0.039	0.009	0.219
24.6 petit capteur	0.035	0.011	0.315
19.5 grand capteur	0.139	0.035	0.255
24.6 grand capteur	0.131	0.051	0.387

Evolution du coefficient de frottement

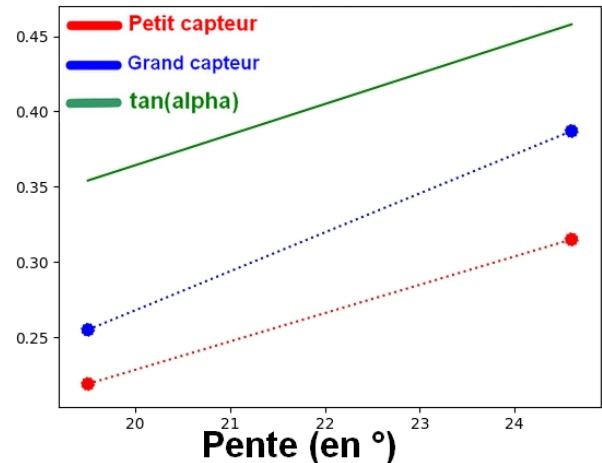


Fig. 11. Evolution du coefficient de frottement en fonction de la pente et du capteur

Les coefficients de frottement expérimentaux sont nettement inférieurs à la tangente de l'angle, on peut expliquer cette différence par le fait que l'on ait uniquement considéré l'effort du fond du canal sur l'écoulement en négligeant l'influence des parois sur les forces mesurées[6]. Richard et al.[7] quantifie l'impact des parois sur le système ainsi, avec μ_g coefficient de frottement des parois :

$$\tan(\alpha) = \mu + \mu_g \cdot \frac{e}{L}$$

Ce coefficient a pour valeur 1.31 à 19.5 degrés et 1.35 à 24.6 degrés avec le petit capteur, 0.95 à 19.5 degrés et 0.63 à 24.6 degrés avec le grand capteur. Ces valeurs sont élevées[3], et cet écart important indique que soit l'expression précédente incluant l'effet des parois n'est pas applicable dans notre étude, soit le manque de précision des mesures est trop important pour quantifier ce phénomène.

Pour en revenir à la figure 11, le coefficient de frottement ne doit pas dépendre de la nature du capteur, donc l'écart relativement important entre les deux courbes révèle des erreurs dues à un traitement du signal trop imprécis ou aux imprécisions du dispositif expérimental en lui-même. Néanmoins on constate une augmentation du coefficient de frottement avec la pente, relativement proche de l'augmentation du $\tan(\alpha)$ ce qui montre une cohérence intrinsèque de chaque capteur.

IV. CONCLUSION

Ce projet aura permis de tester les deux capteurs et de relever leurs limites. Il semble qu'un canal plus long soit nécessaire pour se placer en régime établi de façon certaine. Il serait judicieux d'implanter un programme permettant de corriger la dérive évolutive des capteurs au cours du temps. Des mesures sur une plage plus étendue d'angles et de débits vont permettre d'exploiter de manière plus complète le potentiel de ce système de mesure, qui a montré au cours de cet étude qu'il possédait la particularité de témoigner de ce qu'il se passe à la base de l'écoulement, bien que les problèmes persistants des capteurs induisent une incertitude sur les mesures rendant leur exploitation difficile.

REFERENCES

- [1] N.BRODU, R.DELANNAY, A.VALANCE and P.RICHARD, 2015, *New patterns in high-speed granular flows*, J. Fluid Mech., vol. 769, pp. 218228.
- [2] F.G.J.MALLOGGI, 2006, *Etudes expérimentales davalanches granulaires*, Université Paris-Diderot - Paris VII, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001630/document>.
- [3] N.BRODU, P.RICHARD and R.DELANNAY, 2013, *Shallow granular flows down flat frictional channels: Steady flows and longitudinal vortices*, Physical Review E 87, 022202.
- [4] L.CORNA, 2018, *Mesures des forces en base découlement granulaires et implications pour les écoulements volcaniques*, non publié.
- [5] L.E.SILBERT, D.ERTAS, G.S.GREST, T.C.HALSEY, D.LEVIN, S.J.PLIMPTON, 2001, *Granular flow down an inclined plane: Bagnold scaling and rheology*, PHYSICAL REVIEW E, VOLUME 64, 051302.
- [6] N.TABERLET, P.RICHARD, A.VALANCE, W.LOSERT, J.M.PASINI, J.T.JENKINS, R.DELANNAY, 2003, *Superstable Granular Heap in a Thin Channel*, PHYSICAL REVIEW LETTERS, VOLUME 91, NUMBER 26 4301.
- [7] P.RICHARD, A.VALANCE, J.F.MÉTAYER, P.SANCHEZ, J.CRASSOUS, M.LOUGE, R.DELANNAY, 2008, *Rheology of Confined Granular Flows: Scale Invariance, Glass Transition, and Friction Weakening*, PHYSICAL REVIEW LETTERS, PRL 101, 248002.