
Instabilités de surface lors de la traction d'un patin sur un lit granulaire

Résumé : *On présente une expérience de traction d'un patin à la surface d'un empilement granulaire. Par une mesure fine de la force appliquée au patin, on distingue trois régimes différents (stick-slip, régime inertiel, glissement continu) et on propose une méthode de classification de ces différents régimes. La topographie résultante dans le sillage du patin et l'altitude du patin au cours de son mouvement sont également mesurées et un comportement caractéristique est décrit. Aucune instabilité n'est mise en évidence dans les conditions expérimentales étudiées. Une étude numérique 2D (SSDEM) est menée en complément de ces expériences et permet de retrouver les trois régimes mentionnés. Les simulations permettent également de mettre en évidence une instabilité conduisant à des oscillations périodiques du patin et de la topographie engendrée.*

Mots clefs : *Milieux granulaires, frottements solides, instabilités de surface, simulations SSDEM*

Stage encadré par :

Nicolas TABERLET

nicolas.taberlet@ens-lyon.fr / tél. (+33) 4 72 72 85 32

Valérie VIDAL

valerie.vidal@ens-lyon.fr / tél. (+33) 4 72 72 83 75

Laboratoire de physique, ENS de Lyon (UMR CNRS 5672)

46, allée d'Italie

F-69364 LYON CEDEX 07, FRANCE

<http://www.ens-lyon.fr/PHYSIQUE>

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Avant-propos	2
1.2	Contexte scientifique	2
1.3	Motivations	3
2	Montage expérimental	4
2.1	Présentation du montage	4
2.1.1	Caractérisation des grains	5
2.1.2	Grandeurs mesurées	5
2.1.3	Sensibilité aux conditions externes	7
2.1.4	Protocole expérimental	8
3	Résultats expérimentaux	9
3.1	Point de vue mésoscopique	9
3.1.1	Dynamique locale du signal de force	9
3.1.2	Méthode de traitement des données et classification des signaux de force	9
3.2	Point de vue macroscopique : comportement des signaux sur l'intégralité de la course	11
3.2.1	Régime transitoire initial	11
3.2.2	Existence d'un régime statique	12
3.2.3	Complément aux expériences avec des simulations numériques	13
4	Simulations numériques	14
4.1	Méthodes	14
4.1.1	Calcul des forces	14
4.1.2	Protocole numérique	15
4.2	Résultats	16
4.2.1	Dynamique locale du signal de force	16
4.2.2	Comportement cyclique : oscillations des signaux d'altitude, angle et force	17
4.2.3	Topographie résultante	17
4.2.4	Discussion	19
5	Conclusion et perspectives	20
5.1	Conclusion	20
5.2	Poursuite de ce travail en thèse	20
6	Annexes	22
6.1	Courbes de calibration	22
6.2	Interface labView	24

Remerciements

Je tiens à remercier mes encadrants Nicolas TABERLET et Valérie VIDAL pour leur disponibilité et les discussions fructueuses que nous avons eues, et pour le temps qu'ils ont consacré à la relecture de ce rapport. Je remercie aussi JérémY SAUTEL avec qui j'ai partagé la salle d'expérimentation pendant quelques mois et qui a gentiment facilité mon intégration à l'équipe du laboratoire. Je voudrais également remercier l'ensemble des doctorants, stagiaires ainsi que certains permanents qui ont animé les pauses déjeuner et les pauses café rendant l'ambiance au laboratoire chaleureuse et accueillante.

D'un point de vue matériel, je remercie le département d'enseignement de l'ENS de Lyon qui a permis de gagner du temps en prêtant certains appareils, d'autre part l'aide du petit atelier d'électronique (en particulier celle de Mathurin PICOUL) a été précieuse pour la réalisation de certaines soudures et le remplacement d'un relais défectueux du contrôleur de température.

1 Introduction

1.1 Avant-propos

Ce stage a essentiellement consisté en un travail de développement expérimental et numérique précédant une thèse à venir. L'étude menée est par conséquent préliminaire et une grande partie des perspectives présentées à la fin de ce rapport seront explorées lors du travail de thèse.

1.2 Contexte scientifique

Le sujet de ce stage s'inscrit dans le cadre de l'étude des milieux granulaires soumis à un cisaillement, utile dans le contexte des études géophysiques (particulièrement en sismologie) et de certains procédés industriels. On mobilise les notions de frottement solide (lois de frottement, rugosités), de transition de blocage/déblocage et le rôle des vibrations mécaniques.

Vidal *et al.* [1] ont étudié un cas similaire à l'expérience décrite dans ce rapport pour du frottement solide (papier contre papier) avec une expérience de traction d'un patin par l'intermédiaire d'une lame métallique dont on mesure la déflexion et qui agit comme un ressort. Ils ont observé une transition entre un régime de stick-slip et de glissement continu ainsi que l'existence d'un régime inertiel, puis discutent du rôle des rugosités des surfaces solides et de leur vieillissement.

D'autres études de traction d'un patin sur des grains [2, 3] observent cette même transition tout en décrivant les réarrangements dans l'empilement granulaire (précurseurs microscopiques aux événements de glissement) et le rôle du fluage, ainsi que la dilatance introduite par Reynolds [4]. Ces études sont pertinentes dans un contexte géophysique, pour l'étude du déclenchement à distance de séismes et en particulier du seuil de déclenchement [5, 6].

Ces études du cas simplifié d'un cisaillement pur sont complétées par des expériences de traction sur un lit granulaire d'un obstacle (patin ou roue) auquel on laisse certains degrés de liberté (par exemple on laisse son altitude varier librement). La formation de rides à la surface du milieu granulaire par passage répété d'une roue à sa surface a été décrite expérimentalement et numériquement [7], avec l'existence d'une vitesse critique au-dessus de laquelle cette instabilité dite de *tôle ondulée* (*washboard instability* en anglais) est observée. Le cas d'une plaque inclinée tractée sur des grains a également été étudié dans un cadre général [8] avec un patin fixe dans le but de comprendre la formation de cette instabilité au moment du premier passage. Puis, cette même instabilité a été reproduite et décrite dans différentes configurations [9]. Cette instabilité a des applications industrielles car elle est notamment observée sur de nombreuses routes non bétonnées.

Enfin, de nombreuses études s'intéressent à l'action de vibrations mécaniques sur l'état et les propriétés d'un matériau granulaire, souvent dans le cadre plus général de l'étude de la transition de blocage (*jamming* en anglais) [10], parfois comparée à une transition vitreuse par leurs nombreuses similitudes (notamment phénoménologiques) [11] mais constituant bien une transition distincte de celle-ci [12]. Un exemple typique est le déblocage d'un entonnoir par vibrations [13], celles-ci ayant un très fort effet sur la rhéologie du milieu [14]. Un cas chargé étudié expérimentalement par Lastakowski

et al. [15] conduit à une transition de stick-slip à glissement continu lorsque les vibrations mécaniques augmentent, similaire à celle observée lors de l'augmentation de la vitesse de traction dans un cas non vibré [2]. Les vibrations mécaniques, qui induisent une transition vers le désordre [11], réduisent donc les frottements solides [16].

1.3 Motivations

La littérature se divise entre les études de frottement/dilatance qui se concentrent sur des empilements granulaires cisailés sur de petites courses et les études de l'instabilité de tôle ondulée observée après de nombreux passages d'un obstacle à la surface des grains. On cherche à unifier ces études en proposant un point de vue intermédiaire entre ces différentes approches.

L'étude que nous proposons consiste à étudier un passage unique d'un patin tracté à la surface d'un lit granulaire, et ce sur une longue course (~ 25 cm soit plusieurs fois la longueur du patin). On se place donc dans un cas intermédiaire entre les études des très petits déplacements et du comportement du signal de force à l'échelle des événements de stick-slip, et les études de l'instabilité de tôle ondulée qui s'intéressent à la topographie après des passages répétés.

Pour étudier la dynamique du patin, on mesure simultanément son altitude, la force exercée, et la topographie des grains dans le sillage du patin. Le travail est essentiellement expérimental avec le besoin de développer l'expérience (montage et interface) et le code pour les simulations numériques, qui serviront de fondation à une thèse à venir.

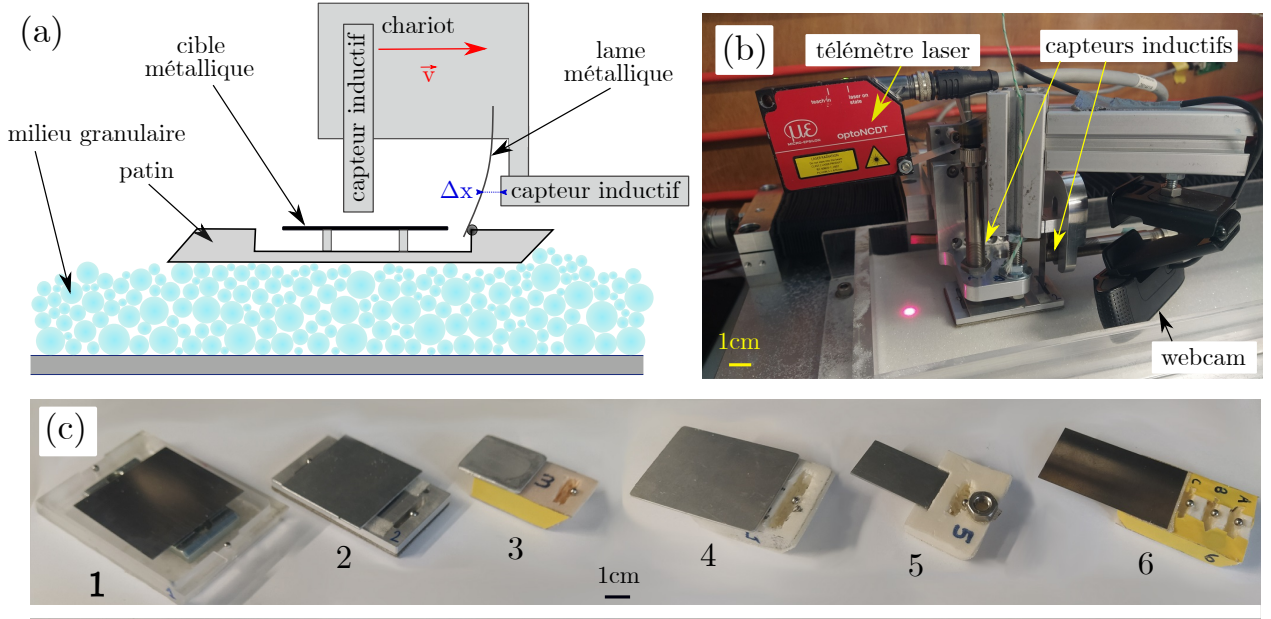


FIGURE 1 – (a) Schéma du dispositif expérimental. Un patin est tracté à la surface d'un milieu granulaire via une lame métallique dont on mesure la déflexion Δx à l'aide d'un capteur inductif (la taille des grains est exagérée). La lame est fixée à un chariot entraîné à vitesse constante v . (b) Photo du dispositif. Deux capteurs inductifs permettent de mesurer la force exercée ainsi que l'altitude de la cible métallique placée à la surface du patin. Un télémètre laser et une webcam sont également présents sur le chariot afin de mesurer la topographie des grains dans le sillage du patin et prendre des photos du patin au cours de son mouvement. (c) Différents patins utilisés, numérotés de 1 à 6.

2 Montage expérimental

2.1 Présentation du montage

Le montage expérimental est détaillé sur la Figure 1. On étudie une situation proche du système classique «masse-ressort» tracté à vitesse constante, largement utilisé pour l'étude du frottement solide. Des billes de verre (2.1.1) sont placées dans une cuve en plexiglass. On dispose un patin à leur surface, que l'on tracte par l'intermédiaire d'une lame métallique fixée à un chariot entraîné à vitesse constante par un moteur à courant continu et un réducteur. Trois ensembles motoréducteurs différents ont été utilisés, permettant d'explorer différentes vitesses de traction allant de $\sim 1 \mu\text{m/s}$ à $\sim 1 \text{mm/s}$. Les courbes de calibration des motoréducteurs sont données en annexe (6.1, Figure 15).

Différents patins ont été utilisés (Figure 1c), et numérotés de 1 à 6. On peut ainsi faire varier leur taille, leur masse (et sa distribution), leur forme (en particulier leur face avant, que l'on appellera *bord d'attaque*), et la position du point d'application de la force de traction. Une monocouche de grains (les mêmes billes de verre que celles présentes dans la cuve) a été collée sur la face inférieure de chacun de ces patins afin d'imposer un contact grain/grain et de s'affranchir d'une éventuelle dépendance aux propriétés frictionnelles du matériau utilisé pour la fabrication du corps du patin. Une cible métallique est fixée au-dessus des patins afin de permettre la mesure de leur altitude par un capteur inductif (section 2.1.2). Les caractéristiques des 6 patins sont résumées dans la table 1.

La force est transmise au patin via un contact ponctuel entre la lame et une bille métallique fixée au patin. Notons que la force est essentiellement horizontale mais il peut exister une composante verticale (vers le bas) non négligeable pour les faibles raideurs permettant de grandes déflexions.

La cuve et la platine de translation (Schnaeffer Technologies Sechnr) sont fixées sur une plaque d'acier épaisse disposant de 4 pieds réglables reposant sur des blocs de mousse (leur rôle est de réduire les vibrations, voir section 2.1.3). L'ensemble des éléments constituant le montage expérimental est placé dans une boîte dans laquelle l'humidité et la température de l'air sont contrôlés (section 2.1.3).

TABLE 1 – Caractéristiques des 6 patins utilisés lors des différentes expériences. Le patin 1 a été utilisé avec et sans lest (conduisant respectivement aux masses m et m')

Patin	Matériau	Taille ($L \times W$)	masse (g)	angle d'attaque
1	PMMA	$9.1 \times 6.0 \text{ cm}^2$	$m = 34.1 \text{ g}, m' = 63.4 \text{ g}$	$\pm 45^\circ$
2	aluminium	$7.1 \times 4.0 \text{ cm}^2$	$m = 41.2 \text{ g}$	90°
3	mousse	$3.9 \times 2.65 \text{ cm}^2$	$m = 5.85 \text{ g}$	45°
4	polystyrène	$3.5 \times 3.1 \text{ cm}^2$	$m = 16.93 \text{ g}$	45°
5	polystyrène	$2.3 \times 3.6 \text{ cm}^2$	$m = 4.94 \text{ g}$	45°
6	polystyrène	$3.8 \times 3.0 \text{ cm}^2$	$m = 8.42 \text{ g}$	45°

2.1.1 Caractérisation des grains

Les grains choisis sont des billes de verre Wheelabrator 180 – 300 μm . Ils sont ensuite photographiés au microscope (Heerburg, Wild Makroskop M420 avec objectif Leica Makro-zoom 1-5) puis les images sont analysées par un programme Matlab qui détecte les particules (en utilisant la fonction `imfindcircles`). Sur 25 images, on détecte un total de 6468 billes de verre ce qui permet de calculer la distribution statistique de leur taille. Une de ces images est représentée sur la Figure 2a avec en bleu les cercles détectés par le programme d'analyse d'images. On constate que l'échantillon est majoritairement composé de particules sphériques et de certains résidus largement non sphériques. La détection (et donc la distribution statistique calculée et représentée sur la Figure 2(b)) ne porte que sur les particules sphériques. Leur diamètre d_p est compris entre 100 μm et 300 μm . Un simple tamisage entre deux tamis de respectivement 200 μm et 250 μm permet de retirer les plus grandes particules mais un très grand nombre de résidus ($d_p < 200 \mu\text{m}$) subsiste dans l'échantillon tamisé. Il reste à déterminer une méthode pour obtenir un échantillon à la granulométrie bien contrôlée. Dans les résultats présentés ici, seuls les grains tels que fournis par Wheelabrator (non tamisés) ont été utilisés.

2.1.2 Grandeurs mesurées

Mesure de force : Un capteur inductif (Baumer, IPRM 12I9505/S14) est placé en regard de la lame métallique (Figure 1a) et mesure sa déflexion notée Δx avec une précision micrométrique. On peut alors remonter à la force appliquée au patin avec la relation approchée $F \simeq k\Delta x$ (on calibre la relation réelle ce qui permet de travailler au-delà du régime linéaire). La raideur k peut être déterminée à partir d'une mesure directe de la force exercée grâce à un capteur de force (Honeywell, FSS005WNGT). La courbe de calibration du capteur de force et celle qui relie F à Δx pour une lame d'épaisseur $e = 0.3 \text{ mm}$

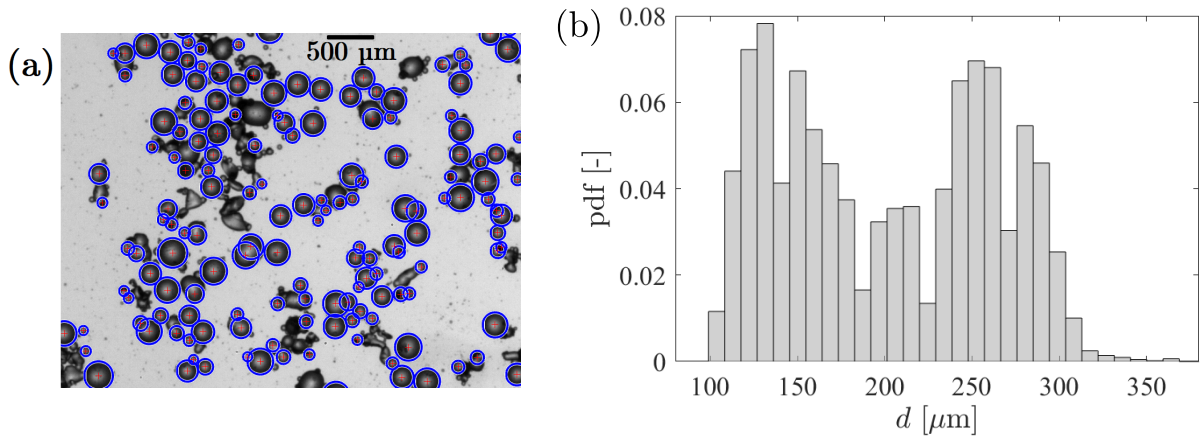


FIGURE 2 – (a) Exemple de détection de particules par un programme Matlab à partir d'une image de microscope. (b) Distribution des diamètres des particules d_p calculée sur 6468 grains détectés.

sont données en annexe (Figure 18, on obtient alors une raideur $k = 570 \text{ N/m}$). La raideur peut être variée en modifiant l'épaisseur e de la lame utilisée, avec $k \propto e^3$. On obtient une meilleure résolution du niveau de force appliquée au patin pour des faibles valeurs de k , mais on atteint alors de plus grandes déflexions conduisant à une force non horizontale. Il faut donc choisir une lame suffisamment rigide pour ne pas faire plonger le patin dans l'empilement granulaire. Dans la suite, on utilise la force adimensionnée définie par

$$F^* = \frac{F}{mg} \quad (1)$$

où m est la masse du patin utilisé et $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ l'accélération de la pesanteur terrestre.

Mesure d'altitude : Un second capteur inductif (Baumer, IPRM 12I9505/S14) est placé directement au-dessus de la cible métallique fixée sur le patin, permettant une mesure de son altitude. Dans le cas du patin 1, cette mesure est réalisée approximativement au centre de masse du patin. Pour les autres patins dont les dimensions sont différentes, cette mesure est déportée à un point situé derrière le centre de masse, ce qu'il faut prendre en compte lorsque l'on interprète les signaux d'altitude (en effet le signal mesuré peut alors varier si l'inclinaison du patin varie alors que l'altitude du centre de masse reste constante). C'est donc une mesure partielle mais instructive en complément de la mesure de topographie et des images capturées par la webcam.

Mesure de topographie : Un télémètre laser (Micro-epsilon, ILD1302-20) est également fixé au chariot et mesure la distance qui le sépare de la surface des grains, en un point situé dans le sillage du patin, (quelques centimètres derrière l'arrière du patin). Il fournit donc une mesure de la topographie engendrée par son passage. Pour obtenir une précision satisfaisante, on réduit la gamme du capteur à son minimum, passant de 20 cm à 2 cm (la gamme de ce capteur est rendue réglable par le constructeur). Le capteur fournit alors une mesure suffisamment précise pour résoudre la taille des grains. La courbe de calibration du télémètre laser est donnée en annexe (6.1, Figure 17).

Visualisation : Enfin, une webcam (Logitech, C920 HD PRO) est également fixée à un support solidaire du chariot afin de prendre régulièrement des photos du patin au cours de son mouvement. Elle permet de visualiser l'angle du patin et son évolution sur l'ensemble de sa course, et de voir le bourrelet de grains charié par le patin à l'avant. Le programme LabView prend en charge la communication avec la webcam via le package NI-IMAQdx et permet notamment de visualiser les images capturées, régler la mise au point, modifier l'intervalle entre les captures et enregistrer les images sur le disque. Un programme Python permet ensuite de générer des films des expériences qui montrent de manière synchronisée les signaux mesurés et les images de la webcam.

Electronique et interface : L'ensemble du matériel listé ci-dessus est relié à un ordinateur via une carte d'acquisition (National Instruments, NI 6035E). Un programme LabView pilote le moteur à courant continu ainsi que la webcam, affiche et enregistre les données des différents capteurs à une fréquence d'échantillonnage de 1 kHz et permet à l'expérimentateur d'interagir avec le matériel via une interface présentée en annexe (6.2, Figure 19).

Contrôle du moteur et sécurités de fin de course : Le moteur à courant continu (Crouzet) est alimenté par une alimentation double (TENMA, 72-10495). Deux relais (PhotoMos, AQZ260) permettent d'inverser le sens du courant afin de permettre le retour du chariot à sa position initiale après une expérience. Les deux sorties analogiques de la carte d'acquisition alimentent chacune un des deux relais, et le programme LabView coordonne leurs commutations en laissant un délai d'une seconde entre l'ouverture du premier relais et la fermeture du second pour éviter tout risque de court-circuit. Par ailleurs, une sécurité permet d'éviter de continuer d'alimenter le moteur alors que le chariot est en fin de course. Des capteurs inductifs (Thomson, EN2-S) placés de part et d'autre de la platine de translation indiquent que le chariot arrive en fin de course lorsque leur sortie passe à 0V. Une

première sécurité est implémentée dans le programme LabView qui détecte ce changement d'état et coupe l'alimentation du moteur en ouvrant le relais correspondant. Cependant, cette sécurité n'est pas infallible car il peut arriver que le programme se mette en pause et arrête de lire l'état des différents capteurs suite à une erreur d'écriture par exemple. Pour cette raison, une seconde sécurité physique a été implémentée, la sortie du capteur de fin de course étant directement utilisée pour piloter un relais supplémentaire monté en série du moteur. Ainsi, le moteur ne peut pas être alimenté tant que le capteur de fin de course est actif, à moins de maintenir un bouton poussoir. Cette double sécurité assure d'éviter d'endommager la platine même si l'expérience est laissée sans surveillance. Tout ce travail de contrôle du moteur et implémentation des sécurités a été réalisé au cours du stage.

2.1.3 Sensibilité aux conditions externes

Le système étudié présente une forte sensibilité aux conditions externes.

Vibrations mécaniques : D'une part, les vibrations mécaniques même à un faible niveau peuvent déclencher des évènements de glissement. Afin de rendre l'expérience indépendante des vibrations externes, provoquées par exemple par le déplacement des expérimentateurs dans la salle, le montage expérimental est placé sur une épaisse plaque d'acier reposant sur de la mousse. Malgré cette isolation mécanique, un très léger coup à l'autre bout de la table est suffisant pour provoquer un glissement, témoignant de la forte sensibilité de l'expérience aux vibrations mécaniques (un exemple extrême, provoqué par une commutation de l'électrovanne, est représenté sur la Figure 3). C'est pour cette raison qu'un moteur à courant continu est utilisé pour piloter la platine car un moteur pas à pas utilisé dans une ancienne version de l'expérience transmettait des vibrations forçant l'apparition d'un régime de glissement continu. Pour minimiser cette source de vibrations, l'axe du moteur à courant continu et l'axe de la platine sont couplés mécaniquement par un coupleur à soufflet (Huco Flex-B 536.34.2828) qui en absorbe une partie. Cette sensibilité aux vibrations mécaniques constitue un des axes d'étude prévus lors de la poursuite de ce travail en thèse (section 5.2).

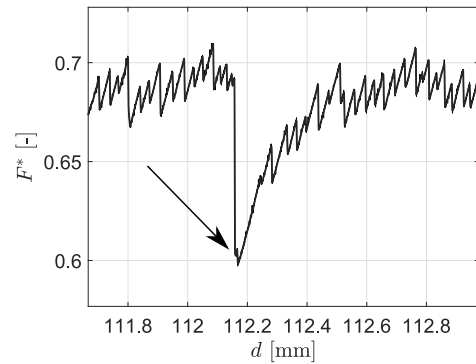


FIGURE 3 – Evènement de glissement anormalement important causé par des vibrations externes. Une commutation de l'électrovanne utilisée pour réguler l'humidité peut provoquer ce type d'évènements.

Température et humidité : D'autre part, le système est sensible aux conditions de température et d'humidité ; les variations de température provoquant de la dilatation thermique et l'humidité provoquant de la cohésion via la formation de ponts capillaires entre les grains. Les différentes expériences doivent être réalisées à la même température et au même taux d'humidité relative afin de s'affranchir d'une dépendance des résultats à la météo du jour. Pour cela, la boîte qui contient le montage expérimental est équipée d'un contrôleur de température et d'humidité (Conrad, FOX-301A). Un ruban chauffant (RS-Pro, 379-750) est placée dans la boîte et alimenté par la sortie correspondante du contrôleur, tandis qu'un ventilateur brasse l'air afin d'uniformiser sa température. Ne disposant pas de système pour refroidir l'air à l'intérieur de la boîte, la température de consigne est fixée à 35 °C afin d'être toujours supérieure à la température ambiante. Le contrôleur pilote un relais qui alimente la résistance (240 Ω), produisant une puissance de chauffage de 150 W de manière logique : $P = 150 \text{ W}$ si $T < T_{\text{consigne}}$, $P = 0 \text{ W}$ si $T > T_{\text{consigne}}$. Comme il existe un retard (inertie thermique) entre la production de chaleur et sa répercussion dans la mesure par la sonde, ce type de contrôle conduit à des oscillations importantes de température d'amplitude 3 °C et de période 15 min provoquant des cycles de dilatation thermique dont la signature est clairement mesurable dans les signaux des cap-

teurs inductifs¹. Il était donc nécessaire de supprimer ces oscillations. En installant un variateur en série du ruban chauffant, on réduit la puissance de chauffage à 60 W, et en déplaçant la sonde pour placer le thermocouple au plus proche de l'élément chauffant, on réduit largement le retard. Ainsi, la température de l'élément chauffant varie de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ autour de 35°C avec une période de 2 min, conduisant à une température de l'air constante de 30°C (mesurée au niveau du chariot). Concernant l'humidité, une autre sortie du contrôleur pilote une électrovanne reliée au réseau d'air comprimé du laboratoire qui est à 5 % d'humidité relative. Cela permet un asservissement du taux d'humidité en ouvrant l'électrovanne lorsque l'humidité mesurée par la sonde dépasse la consigne afin de provoquer une fuite d'air sec dans la boîte. Cependant les commutations de l'électrovanne provoquent des vibrations mécaniques suffisamment importantes pour déclencher des événements perturbant l'allure du signal de force (Figure 3). Puisque nous voulons travailler avec un état non cohésif dans un premier temps, le contrôle d'humidité était superflu dans le cadre de cette étude (l'ajout du paramètre supplémentaire de la cohésion pourra être envisagé ultérieurement, et il faudra alors par exemple fixer l'électrovanne sur un support isolé mécaniquement du reste de l'expérience). Pour s'affranchir de ce problème l'électrovanne a été désactivée au profit d'une fuite continue d'air sec permettant une humidité de 5% à l'intérieur de la boîte si celle-ci n'est pas ouverte pendant plusieurs heures. Des sachets de dessicant (gel de silice) ont été également ajoutés dans la boîte pour contribuer à maintenir l'air bien sec.

Un capteur d'humidité et de température (Measurement Specialties, HTM2500LF) est immergé sous la surface des grains. Il permet de vérifier que l'humidité relative et la température au sein de l'empilement sont conformes aux valeurs attendues, fixées par le système de contrôle (section 2.1.3).

2.1.4 Protocole expérimental

Avant chaque expérience, l'empilement granulaire est décompacté à la main, puis la surface est rendue plate par passage d'une pièce coulissante (Figure 4, la topographie initiale est alors nulle à une taille moyenne de grains près). Le patin est alors déposé sur la couche de grains avec délicatesse, la lame métallique placée juste en amont de la bille métallique fixée au patin et la position verticale du capteur inductif mesurant l'altitude est réglée à $\sim 1\text{ mm}$ de la cible métallique (le capteur est monté sur un support pouvant translater verticalement). Enfin, l'expérience est démarrée depuis le programme LabView² qui alimente alors le moteur CC et les mesures détaillées ci-dessous sont enregistrées tout au long de la course du patin, jusqu'à ce que le capteur de fin de course soit atteint.

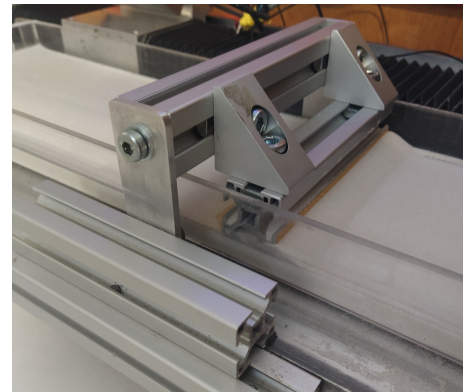


FIGURE 4 – Pièce coulissante utilisée pour préparer l'empilement de grains avant de réaliser une expérience.

1. Ces oscillations ont même été initialement interprétées comme un effet d'instabilité granulaire.
2. Ce programme a été entièrement mis au point sur la durée du stage.

3 Résultats expérimentaux

3.1 Point de vue mésoscopique

3.1.1 Dynamique locale du signal de force

Nous pouvons chercher à classer le comportement local du signal de force en fonction des 3 paramètres suivants : m la masse du patin utilisé, k la raideur de la lame métallique, et v la vitesse de traction.

- A faible vitesse de traction/faible raideur, le signal de force présente un comportement de **stick-slip** ("collé-glissé") similaire à celui rencontré en frottement solide. Le signal est alors composé de phases de croissance linéaire durant lesquelles le patin et l'empilement sont statiques (à l'exception de réarrangements locaux éventuels et du fluage de l'écoulement), et de chutes brutales du signal de force correspondant à de brusques événements de glissement comparables à des séismes dans l'empilement granulaire.
- A vitesse de traction élevée/raideur élevée, le signal de force présente un comportement de **glissement continu**. Le signal est alors comparable à une marche aléatoire et ne présente pas de périodicité.
- Pour des valeurs intermédiaires, le signal de force présente des oscillations entre deux valeurs, dont la période est proche de celle du système masse-ressort équivalent $T = 2\pi\sqrt{m/k}$. Contrairement au régime de stick-slip, le patin est toujours en mouvement même dans les phases de descente et le signal est davantage symétrique. On parle alors de **régime inertiel**.

Ces trois différents régimes sont représentés sur la Figure 5.

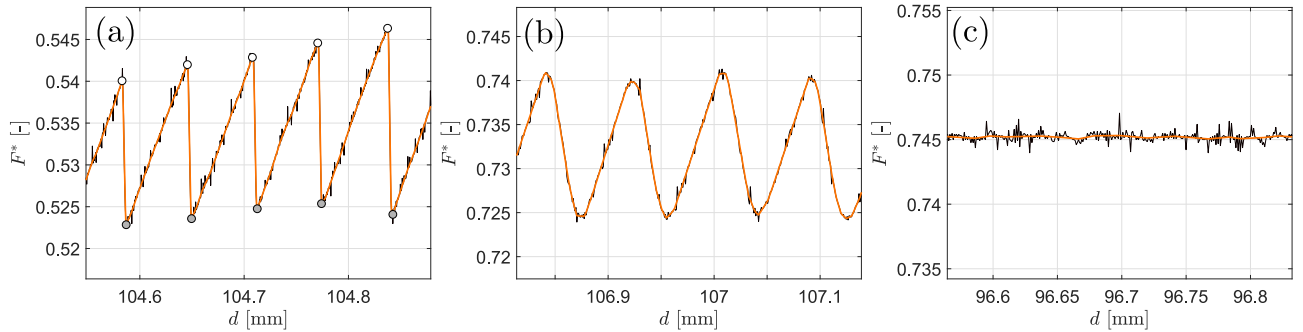


FIGURE 5 – Trois régimes observés sur le signal de force. (a) $m = 63.6$ g, $v = 90$ $\mu\text{m/s}$, $k = 1920$ N/m, (b) $m = 63.6$ g, $v = 860$ $\mu\text{m/s}$, $k = 1920$ N/m, (c) $m = 63.6$ g, $v = 860$ $\mu\text{m/s}$, $k = 10\,800$ N/m. Les points blancs et gris représentent respectivement le début et la fin des phases de glissement (présentes uniquement sur le signal (a) car dans les deux autres cas le patin est continuellement en mouvement).

3.1.2 Méthode de traitement des données et classification des signaux de force

Un total de 70 expériences de traction ont été réalisées, en faisant varier le patin utilisé, la vitesse de traction et la raideur de la lame. Les signaux de force récoltés sont ensuite été traités par un programme Matlab de filtrage non linéaire mis au point lors de travaux précédents [17]. Le signal de force lissé par cette méthode est ensuite analysé avec la fonction Matlab `findpeaks` qui permet de détecter les minima et les maxima locaux du signal de force. Sans cette opération de filtrage, on détecterait de très nombreux minima et maxima locaux correspondant au bruit du capteur (voir par exemple le signal non filtré en noir sur la Figure 5). On travaille sur une portion du signal, choisie de sorte à enregistrer un nombre suffisant de minima/maxima tout en conservant un nombre de point inférieur à 40000 pour réduire le temps de calcul à une valeur raisonnable (certains signaux sont sous échantillonnés pour satisfaire ces deux critères). On utilise ensuite les données des valeurs et des positions des minima/maxima pour classer le signal parmi un des trois régimes. Pour distinguer le stick-slip des autres régimes, on définit la grandeur q par :

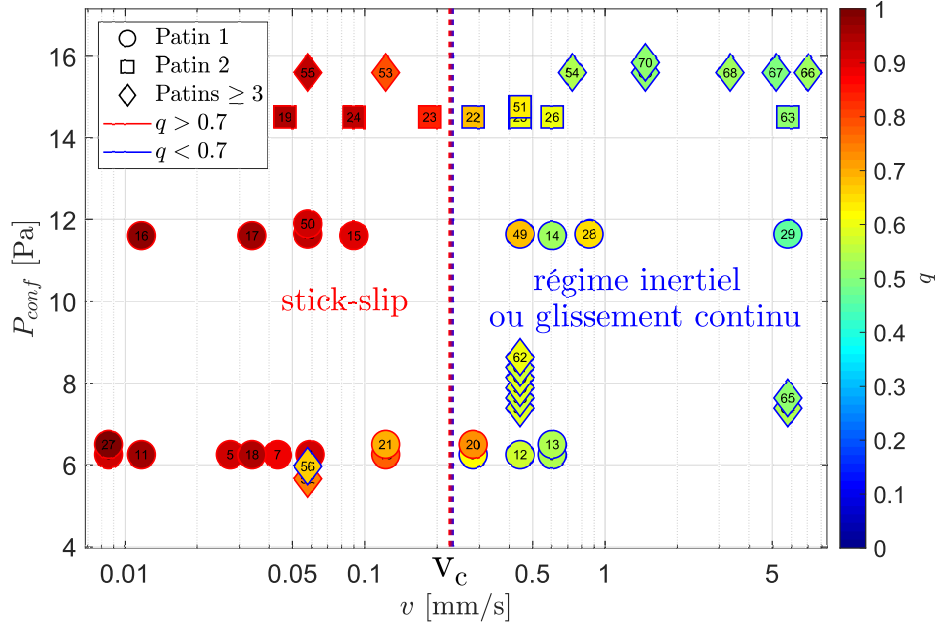


FIGURE 6 – Diagramme de phase (P_{conf}, v) du paramètre q . La forme des marqueurs représente le patin utilisé ($\circ$: patin 1, $\square$: patin 2, $\diamond$: patins 3, 4, 5 et 6). La couleur des marqueurs code la valeur de q (échelle à droite) et la couleur de leur contour représente le régime (contour rouge ($q > 0.7$) : régime de stick-slip, contour bleu ($q < 0.7$) : régime inertiel ou glissement continu). Certains points correspondant aux mêmes valeurs de P_{conf} et de v sont décalés verticalement pour être visibles. Les expériences sont repérées par un nombre entier qui est reporté sur les points correspondants.

$$q = \frac{\tau_m}{T_{tot}} \quad (2)$$

où τ_m est la somme des durées comprises entre chaque minimum et le maximum suivant, T_{tot} est la durée totale du signal traité (q est donc la probabilité de trouver le signal en phase de montée).

Dans la limite du stick-slip, les phases de montée durent bien plus longtemps que les brusques phases de descente qui les suivent. Le signal est donc en phase de montée la majorité du temps, et q doit être proche de 1. On utilise donc le critère $q > 0.7$ (le seuil est arbitraire) pour déduire que le système est en régime de stick-slip. Pour $q < 0.7$, le système est en régime inertiel ou en glissement continu. L'évolution de ce paramètre q dans l'espace des phases (P_{conf}, v) (où $P_{conf} = \frac{mg}{S} = \frac{mg}{LW}$ est la pression de confinement imposée aux grains par le poids du patin, $S = L \times W$ est la surface du patin en contact avec les grains) est donnée sur la Figure 6. Son évolution est bien monotone à quelques exceptions près (rappelons que sur ce diagramme des expériences conduites avec des patins très différents sont représentées) et le régime de stick-slip n'apparaît que pour des vitesses inférieure à une vitesse critique v_c située autour de $v_c \simeq 0.2 \text{ mm/s}$, et cette valeur semble commune aux différents patins bien que leur masse et leur taille varie.

On a donc séparé les expériences présentant un signal de stick-slip des autres. Pour les expériences avec $q < 0.7$, il s'agit de discriminer entre le régime inertiel et le régime de glissement continu. Les expériences en question semblent majoritairement proches du seuil de transition, elle peuvent donc présenter un comportement intermédiaire voire intermittent entre les deux régimes et leur discrimination n'est pas aisée (les signaux ne sont typiquement pas aussi radicalement différents que sur la Figure 5). On peut par exemple utiliser un critère sur la périodicité du signal ou sur son amplitude. Le critère retenu après plusieurs essais (on peut contrôler visuellement si la classification est cohérente) concerne la régularité du signal : on calcule l'écart-type de la distribution des durées séparant deux minima successifs, noté $\sigma(\Delta t)$. Sur la Figure 7, on représente le logarithme décimal de cette grandeur (les points

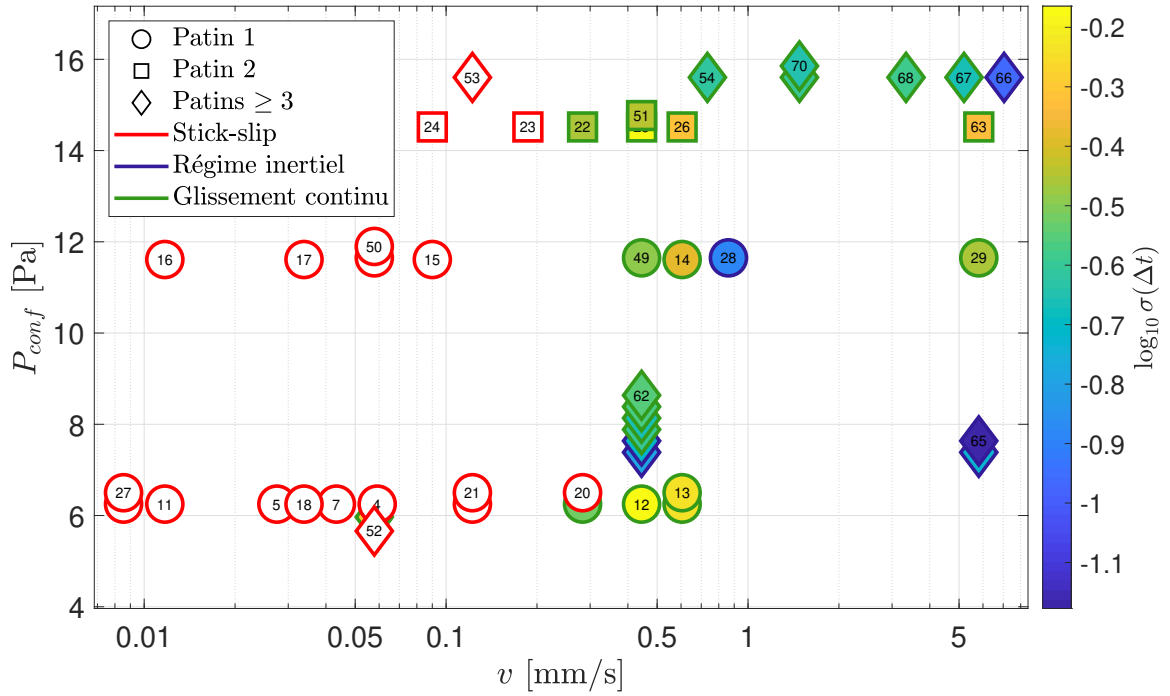


FIGURE 7 – Diagramme de phase (P_{conf}, v) du paramètre $\sigma(\Delta t)$. La forme des marqueurs représente le patin utilisé (○ : patin 1, □ : patin 2, ◇ : patins 3, 4, 5 et 6). La couleur des marqueurs (sauf ceux correspondant à un régime de stick-slip) code la valeur de $\log_{10} \sigma(\delta t)$ (échelle à droite) et la couleur de leur contour représente le régime (contour rouge ($q > 0.7$) : régime de stick-slip, contour bleu ($\log_{10} \sigma(\delta t) < -1.8$) : régime inertiel, contour vert ($\log_{10} \sigma(\delta t) > -1.8$) : glissement continu). Certains points correspondant aux mêmes valeurs de P_{conf} et de v sont décalés verticalement pour être visibles. Les expériences sont repérées par un nombre entier qui est reporté sur les points correspondants.

correspondant à un régime de stick-slip sont laissés blancs). Une grande valeur est signe d'un signal irrégulier, plus proche d'un cas de glissement continu, alors qu'un faible étalement de la distribution caractérise un signal régulier typique d'un régime inertiel. Le seuil retenu est $\sigma(\Delta t) = 10^{-1.8}$. On a alors une méthode (perfectible) qui permet de classer un signal de force parmi un des trois régimes. Les résultats sont compilés sur la Figure 7. On constate notamment que le régime adopté ne semble pas uniquement dépendre du couple de paramètres (P_{conf}, v) mais également du patin utilisé.

3.2 Point de vue macroscopique : comportement des signaux sur l'intégralité de la course

3.2.1 Régime transitoire initial

Concernant le comportement global du patin, une première phase initiale commune à de nombreuses expériences peut être décrite. Sur la Figure 8, quatre images prises par la Webcam sont représentées et associées à un point coloré reporté au niveau correspondant sur les graphes de topographie, force et altitude (il y a un décalage entre la mesure de topographie et les autres mesures car elle est mesurée quelques centimètres derrière le patin). La première photo (point rouge) correspond à l'état initial du système. On simplifie la situation en découpant ensuite le mouvement en trois phases distinctes (dans la réalité, ces phases ne sont pas exactement successives)

- ● : Pour une masse suffisante (on peut en fait penser que le paramètre important ici est la masse divisée par la largeur W du patin), le patin commence par pousser les grains de surface qui s'accumulent alors devant le patin en formant un bourrelet. La force nécessaire pour mettre

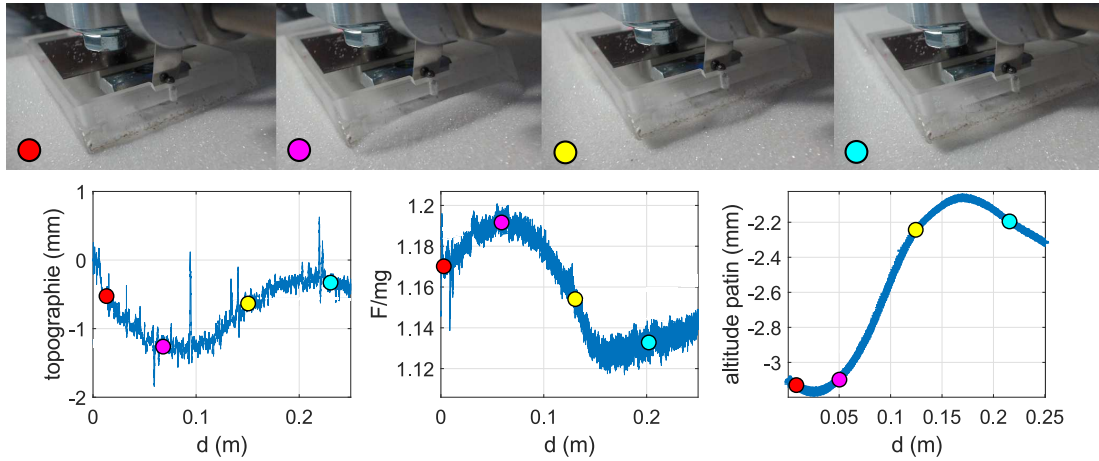


FIGURE 8 – Résultat typique d’une expérience (Patin 1, $m = 63.6\text{ g}$, $v = 58\text{ }\mu\text{m/s}$, $k = 570\text{ N/m}$). Haut : images webcam. Bas : signaux mesurés (force, topographie et altitude). Les différentes phases (accumulation de grains, montée puis glissement au-dessus de la bosse), repérées par des points colorés, sont décrites dans le texte. Le patin utilisé est le patin 1, mesurant 6 cm de large.

le patin en mouvement augmente alors progressivement (il faut alors non seulement compenser la résistance au cisaillement de l’empilement situé sous le patin et mettre en mouvement la masse de grains situés immédiatement devant le patin) tandis que l’altitude du patin reste approximativement au même niveau. Durant cette phase, la topographie mesurée après le passage du patin présente un creux car les grains initialement présents en surface ont été raclés par le patin et charriés vers l’avant.

- ● : Le patin commence ensuite à monter sur le bourrelet ainsi formé. L’avant du patin se lève alors, suivi par l’arrière. La seule mesure d’altitude ne fournit pas d’information sur l’angle du patin mais présente en conséquence une phase de montée. Sur l’image correspondante, le bourrelet commence à disparaître sous la surface du patin. La force mesurée décroît alors à un niveau inférieur, tandis que la topographie remonte après son creux initial.
- ● : Après être monté sur le bourrelet de grains qui le précède, le patin reste à altitude et force de traction relativement constantes. Le bourrelet formé précédemment se retrouve écrasé sous le poids du patin, et une partie des grains sont rejetés sur les côtés formant deux dunes linéaires de part et d’autre du patin après son passage. Lorsqu’on retire le patin à la fin de l’expérience, on constate que les grains confinés sous la surface du patin adoptent un profil très régulier proche d’un demi-cercle.

Sur cette expérience, les signaux s’arrêtent trop tôt pour voir au-delà de cette phase transitoire mais on peut se poser la question : si la platine permettait des courses plus longues, les différentes phases décrites ci-dessus se répètent-elles en cycle, provoquant des oscillations dans le signal de topographie ? Cela serait cohérent avec certaines expériences menées dans le cadre de l’étude de l’instabilité de tôle ondulée [9] et permettrait d’étudier le tout début de la formation de cette instabilité en mesurant l’état du système lors du tout premier passage de l’obstacle. L’utilisation de patins plus petits peut nous apporter quelques éléments de réponse.

3.2.2 Existence d’un régime statique

Si on considère la distance adimensionnée par la taille du patin $d^* = d/L$, l’expérience décrite ci-dessus s’arrête pour $d^* \simeq 2.5$. Avec un patin plus petit, on peut explorer une plus grande gamme de d^* (la valeur maximale de d est limitée par la platine de translation) ce qui a motivé la construction de patins supplémentaires (Figure 1c, Table 1). Les expériences menées avec ces patins plus petits permettent de donner des éléments de réponse à la question qui vient naturellement après avoir décrit cet état transitoire (section 3.2.1) : que se passe-t-il pour des courses plus longues ? Observe-t-on des

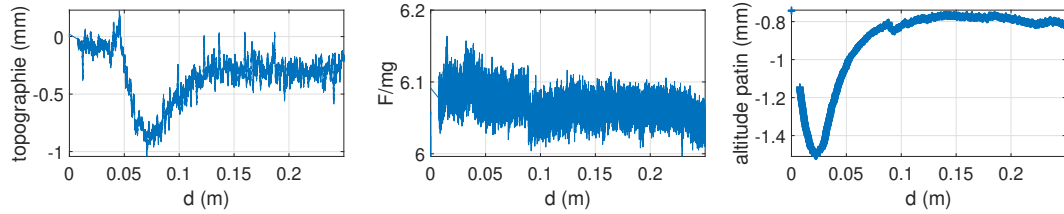


FIGURE 9 – $v = 0.44$ mm/s, $m = 8.42$ g, $k = 570$ N/m. Dans cette expérience, les signaux de topographie et d'altitude (ainsi que le niveau de force moyen) ne varient plus après une certaine distance parcourue.

oscillations dans les signaux d'altitude, topographie et force ou bien restent-ils constants ? Un exemple d'expérience avec un patin plus petit (on atteint $d^* \sim 7$ en bout de course) est représenté Figure 9. On constate que le patin reste dans la dernière des phases décrites au paragraphe précédent et que son altitude, niveau de force ainsi que la topographie engendrée restent constantes. Ce dernier état est donc stable et un équilibre est trouvé entre les grains de surface qui alimentent le bourrelet écrasé par le patin (avec cette forme caractéristique de demi-cercle) et les grains qui fuient sur les deux côtés. Cependant, il existe peut-être des conditions dans lesquelles ce régime devient instable et une topographie non plate pourrait alors apparaître. On peut notamment penser que la position du point d'application de la force de traction joue un rôle important dans la stabilité du mouvement (la distribution de la masse du patin également), davantage d'expériences sont donc requises pour conclure.

3.2.3 Complément aux expériences avec des simulations numériques

Les expériences de laboratoire menées jusqu'ici permettent de mettre en évidence les trois différents régimes à l'échelle microscopique et de décrire un comportement macroscopique typique. En complément de cette étude expérimentale, nous avons eu recours à des simulations numériques 2D, présentées dans la partie 4 ci-dessous, dans le but de comparer le comportement observé et d'ouvrir des perspectives de poursuite de ce travail numérique par la suite.

Les simulations numériques constituent un bon complément des expériences de laboratoire. En effet, il est facile d'imposer des conditions particulières au système numérique et on contrôle précisément chaque paramètre que l'on peut faire varier à souhait. On peut ainsi mener une étude statistique du comportement du système en explorant plusieurs ordres de grandeurs des paramètres pertinents. On s'affranchit de certaines limites expérimentales (contrôle la préparation de l'état initial, force non verticale pour les grandes déviations etc) et on accède à une connaissance accrue du système : on peut connaître l'ensemble des contacts, forces, positions et vitesses de chaque grain, et on connaît également complètement l'état du patin (position, orientation, forces etc).

Les simulations sont donc un outil puissant pour mettre en évidence la formation d'une topographie et le relation dynamique entre le patin et l'empilement granulaire en complément des expériences, mais présentent aussi des limites qui sont mentionnées plus bas (section 4.2.4).

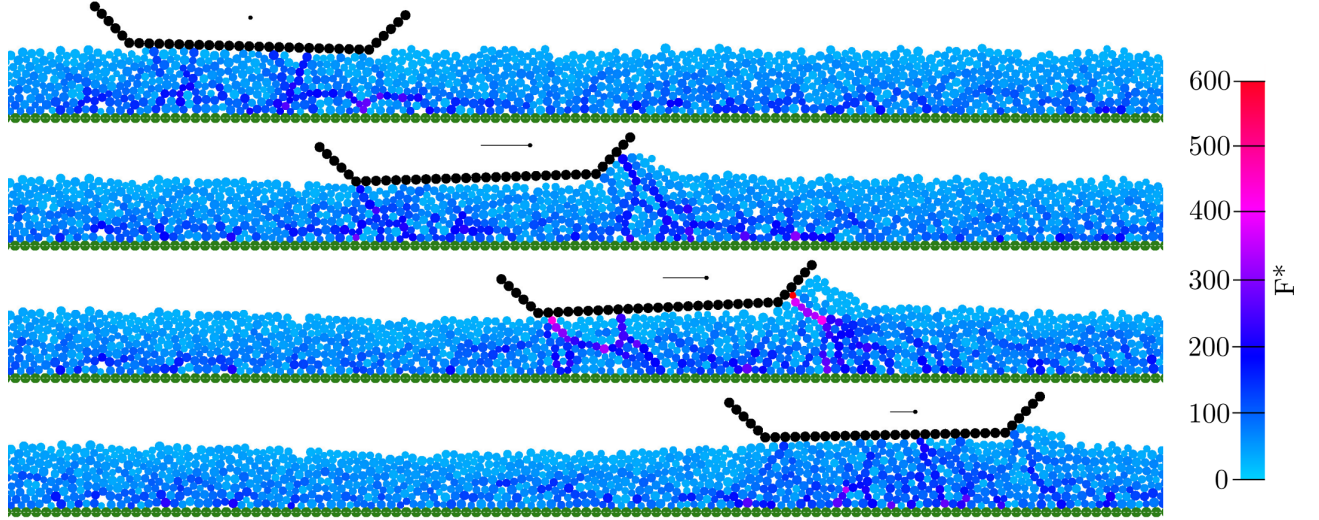


FIGURE 10 – Quatre étapes successives d’une simulation montrant la formation d’un creux dans la topographie, telle que décrite dans la section 3.2.1. La couleur des grains représente la somme des forces subies normalisée par le poids d’un grain $F^* = \frac{1}{m_{\text{grain}}g} \sum_i \|f_i\|$ (où i est un indice de sommation sur tous les grains en contact avec le grain considéré) (échelle à droite). Le point noir situé au-dessus du patin représente la position du chariot et le segment le précédant représente l’intensité de la force de traction transmise au patin.

4 Simulations numériques

4.1 Méthodes

La méthode employée pour simuler la physique de l’empilement granulaire est la méthode dite des éléments discrets (SSDEM, *Soft Sphere Discrete Elements Method*). Cette méthode repose sur la discrétisation du temps, et le calcul à chaque pas de temps de l’ensemble des forces exercées entre les grains, puis l’intégration des équations du mouvement pour obtenir le nouvel état du système. La méthode et la modélisation des actions mécaniques est similaire à celle détaillée dans la thèse à paraître de Jérémy Sautel [18]. Le système numérique étudié est un système 2D (il est également possible de travailler en 3D), une illustration des simulations numériques est présentée sur la Figure 10.

4.1.1 Calcul des forces

Pour modéliser l’ensemble des actions mécaniques entre grains, on introduit une force de répulsion élastique, une force de frottement fluide inter-grains qui modélise la dissipation viscoélastique du contact et une force tangentielle de contact qui modélise les frottement solides entre les surfaces des grains.

On donne ci-dessous les formules de calcul des forces entre deux grains i et j respectivement placés en $\vec{x}_i$ et $\vec{x}_j$, de rayons respectifs R_i et R_j .

Force normale : On définit le vecteur unitaire $\vec{n}_{i \rightarrow j} = (\vec{x}_j - \vec{x}_i) / \|\vec{x}_j - \vec{x}_i\|$, l’écrasement $\delta = R_i + R_j - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|$, le rayon réduit $R_{\text{eff}} = R_i R_j / (R_i + R_j)$. La force normale est alors calculée comme la somme des deux termes suivants :

— Force de répulsion élastique

$$\vec{F}_{\text{élast},i} = -k_n \delta \vec{n}_{i \rightarrow j} \quad (3)$$

— Force de frottement fluide

$$\vec{F}_{\text{visc},i} = -\gamma \frac{2R_{\text{eff}}}{R^*} \delta \vec{n}_{i \rightarrow j} \quad (4)$$

Force tangentielle de contact : Pour la force tangentielle, il convient de modéliser le frottement solide au contact des deux grains, en tenant compte de la vitesse de leur centre de masse et de leur vitesse de rotation propre. Le modèle adopté est le modèle de Cundall [19] qui rend compte des lois de frottement d'Amontons-Coulomb et qui permet de lever l'indétermination sur la force en cas de non-glissement. Cette méthode repose sur le calcul du déplacement tangentiel total depuis le début du contact, défini par $\xi(t) = \int_0^t \|\vec{v}_{t,i/j}(u)\| du$ où t est la durée totale du contact, $\vec{v}_{t,i/j}$ est la vitesse relative tangentielle au point de contact donnée par

$$\vec{v}_{t,i/j} = \vec{v}_i - \vec{v}_j - \delta \vec{n}_{i \rightarrow j} + \left(R_i \vec{\Omega}_i + R_j \vec{\Omega}_j \right) \wedge \vec{n}_{i \rightarrow j}$$

avec $\vec{v}_i$ et $\vec{v}_j$ les vitesses des centres des grains i et j et $\vec{\Omega}_i$ et $\vec{\Omega}_j$ leur vecteur rotation. La force de contact subie par le grain i est alors définie par

$$\vec{F}_{\text{tang},i}(t) = -\min \left(k_t \xi(t), \mu \|\vec{F}_{\text{norm},i}(t)\| \right) \frac{\vec{v}_{t,i/j}}{\|\vec{v}_{t,i/j}\|} \quad (5)$$

où $\vec{F}_{\text{norm},i} = \vec{F}_{\text{élast},i} + \vec{F}_{\text{visc},i}$ est la force normale de contact totale subie par le grain i , k_t la raideur tangentielle et μ le coefficient de frottement (on ne distingue pas le coefficient de frottement statique et dynamique). La valeur de ces deux paramètres est donnée plus bas. Ainsi définie, cette force conduit à un simple rappel élastique (de raideur k_t) jusqu'au seuil $\mu \|\vec{F}_{\text{norm},i}(t)\|$ au-delà duquel on rentre en régime de glissement.

4.1.2 Protocole numérique

Initialisation : Les grains sont initialement disposés sur les nœuds d'un quadrillage peu dense et on leur donne une faible vitesse horizontale aléatoire afin d'obtenir ensuite un empilement aléatoire. Le patin, représenté par un ensemble de grains mécaniquement liés, n'est pas introduit avant un certain pas de temps au bout duquel les grains de l'empilement sont totalement sédimentés (on peut le vérifier en suivant l'évolution de l'énergie cinétique totale). L'empilement est constitué de grains de rayons uniformément distribués entre -20% et $+20\%$ de la valeur moyenne R , afin d'éviter leur cristallisation.

Boucle temporelle : À chaque pas de temps, les opérations suivantes sont exécutées dans l'ordre

- On recherche les contacts entre grains avec la méthode des cellules liées. On assigne alors une subdivision de l'espace à chaque grain afin d'optimiser la recherche de contacts en ne les cherchant uniquement parmi les cellules voisines (voir la thèse de Jérémy Sautel [18] pour plus de détails).
- On calcule ensuite les forces exercées avec les équations (3), (4), (5) sans oublier le poids.
- On intègre ensuite (par la méthode d'Euler) les équations du mouvement pour le patin : connaissant la somme des forces subies par l'ensemble des grains constituant le patin, on applique le principe fondamental de la dynamique (PFD) et le théorème du moment cinétique (TMC) pour calculer la nouvelle position du patin repéré par les trois nombres (x, y, θ) (position selon l'axe x , position selon l'axe y , orientation de la ligne formée par la surface inférieure du patin par rapport à l'horizontale). En plus des forces subies par l'ensemble des grains formant le patin, une force supplémentaire selon x modélise l'action du chariot se déplaçant à vitesse constante V_{traction} entraînant le patin. Cette force est proportionnelle à l'élongation du ressort $(x_{\text{chariot}} - x)$ et la constante de proportionnalité K_{slider} est la raideur du ressort.
- On intègre ensuite les équations du mouvement pour l'ensemble des grains en utilisant l'algorithme de Verlet [18].
- On sauvegarde ensuite éventuellement toutes les données utiles à l'analyse : positions des grains, vitesses, forces exercées, nombre de contacts, énergie cinétique totale, etc. On génère également régulièrement des images de l'état du système.

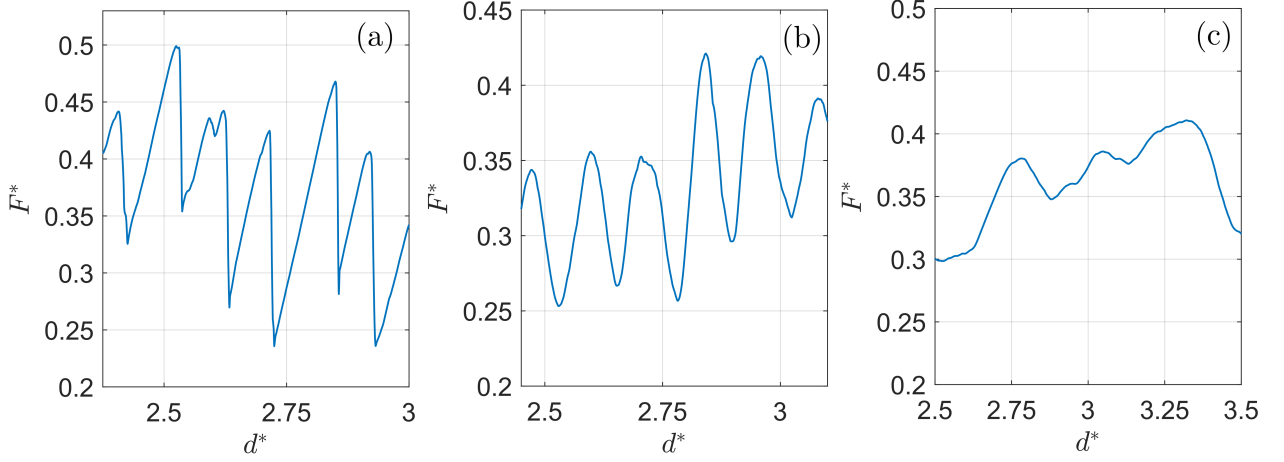


FIGURE 11 – Trois signaux de force issus de simulations, montrant les trois différents régimes.

- (a) Stick-slip : $V_{traction} = 0.002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $K_{slider} = 0.02 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $M_{slider} = 5 \times 10^{-5} \text{ kg} = 100 \times m_{1\text{grain}}$
(b) Régime inertiel : $V_{traction} = 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $K_{slider} = 0.1 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $M_{slider} = 5 \times 10^{-5} \text{ kg} = 100 \times m_{1\text{grain}}$
(c) Glissement continu : $V_{traction} = 0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $K_{slider} = 0.01 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, $M_{slider} = 1 \times 10^{-4} \text{ kg} = 200 \times m_{1\text{grain}}$

Paramètres : Les simulations ont été réalisées avec une raideur normale $k_n = 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$, une valeur largement inférieure à la valeur réelle pour du verre, mais permettant des calculs plus rapides. Cette valeur est suffisante pour garantir une profondeur de pénétration δ largement inférieure à la taille d'un grain d_p . La masse d'un grain est fixée à $m_{1\text{grain}} = 5 \times 10^{-7} \text{ kg}$. Dans notre modèle, le temps typique d'un contact est indépendant de la vitesse des grains et vaut $\delta t = 2\pi\sqrt{\frac{m_{1\text{grain}}}{k_n}} \simeq 1.4 \times 10^{-4} \text{ s}$, on choisit alors le pas de temps pour avoir au moins $\delta t = 10 \times dt$ en prenant $dt = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$. La raideur tangentielle est choisie par la relation $k_t = \frac{2}{7}k_n$ ce qui permet des simulations réalistes [19]. On introduit une faible dissipation $\gamma = 0.01 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, et on fixe le coefficient de frottement solide $\mu = 0.8$. Remarque : On donne des unités physiques aux grandeurs numériques afin de leur donner du sens, bien qu'elles soient arbitraires en n'ont pas de sens *intrinsèque*.

4.2 Résultats

Des images générées par une simulation sont compilées sur la Figure 10. Les grains en noir forment le patin, et la position du chariot est représentée par un petit point noir juste au-dessus. Une ligne noire représente l'écart entre la position du chariot et la position du patin (elle représente donc l'intensité de la force de traction subie par le patin). La couleur des autres grains (sauf ceux du fond, fixés) représente la somme des normes des forces qu'ils subissent adimensionnée par le poids d'un grain $F^* = \frac{1}{m_{1\text{grain}}g} \sum_i \|f_i\|$ (échelle à droite). Le comportement du patin sur cette simulation correspond qualitativement à la phénoménologie observée expérimentalement et décrite dans la section 3.2. On observe les mêmes phases d'accumulation de grains devant le patin, puis de montée du patin par dessus cette bosse ainsi formée (le comportement des signaux d'altitude, force et topographie sont également cohérents avec les résultats expérimentaux). Cependant, on verra dans la suite que, contrairement aux expériences, les simulations ont tendance à reproduire ce comportement cycliquement.

4.2.1 Dynamique locale du signal de force

De manière similaire aux signaux expérimentaux (3.1), on peut étudier la dynamique locale du signal de force de traction appliquée au patin. On trace sur la Figure 11 la force adimensionnée par le poids du patin $F^* = F/M_{patin}g$ en fonction de la distance parcourue, adimensionnée par la longueur du patin $d^* = d/L_{patin}$. On observe également dans les simulations les trois régimes décrits plus haut

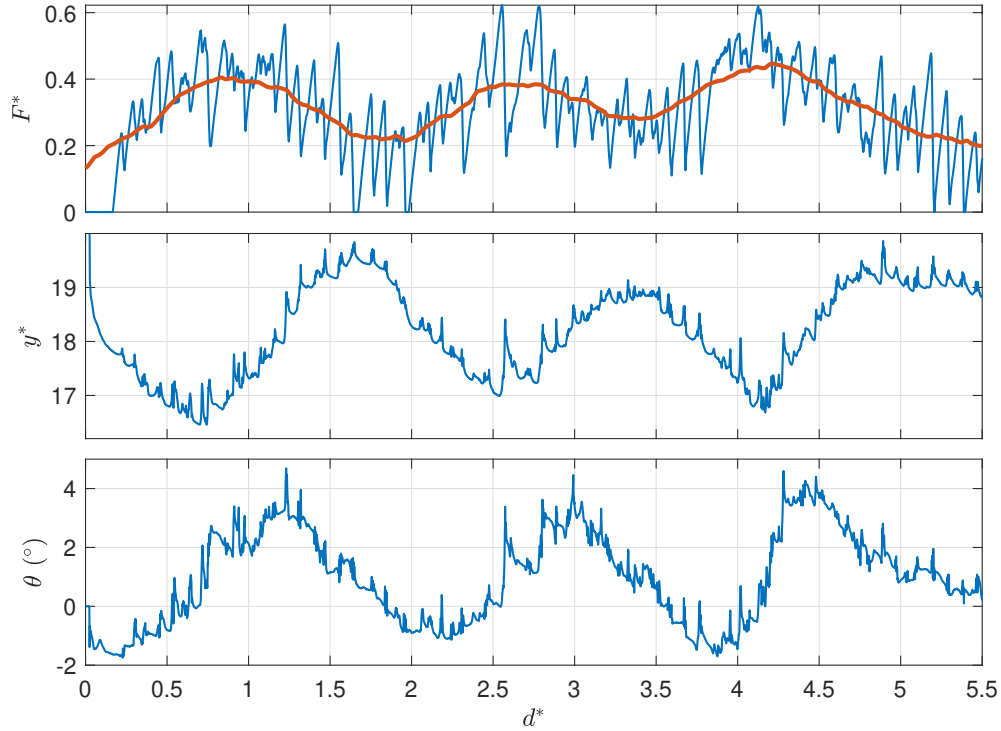


FIGURE 12 – Signaux de force normalisée ($F^* = F/M_{slider}g$) (signal brut en bleu, moyenne glissante sur 5000 points en rouge), altitude normalisée ($y^* = y/R$), et angle du patin pour une simulation réalisée avec $V_{traction} = 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $M_{slider} = 5 \times 10^{-5} \text{ kg} = 100 m_{1\text{grain}}$, $K_{slider} = 0.04 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. La topographie résultante est donnée plus bas (Figure 13).

(régime de stick-slip, régime inertiel, régime de glissement continu). Il est donc possible de construire le même diagramme de phase qu'expérimentalement (Figures 6 et 7) et cela pourra être envisagé lors de la poursuite de ce travail.

4.2.2 Comportement cyclique : oscillations des signaux d'altitude, angle et force

Contrairement aux expériences, on observe un comportement cyclique dans les simulations. Les phases d'accumulation des grains et de montée du patin sur les grains accumulés (étapes décrites dans la section 3.2.1) s'enchaînent en boucle. L'angle θ du patin par rapport à l'horizontale, son altitude y^* ainsi que la force transmise F^* présentent alors des oscillations visibles sur la Figure 12 ; c'est également le cas de la topographie comme on le verra à la section 4.2.3. Les oscillations du signal de force sont dues à l'alternance entre les phases où le patin doit pousser une masse de grains situé devant lui à la manière d'un bulldozer (la force requise est alors plus élevée) et celles où le patin *surfe* sur cette bosse et n'a pas de grains à charrier devant lui. L'altitude y^* du patin évolue en quasi opposition de phase avec la force moyenne. En effet, le patin est situé à une altitude basse lorsqu'il accumule et pousse des grains devant lui, et se situe à une altitude plus élevée lorsqu'il glisse sur la bosse ainsi formée. L'angle formé par le patin avec l'horizontale évolue quant à lui approximativement en quadrature de phase avec ces signaux. L'angle est maximal lorsque le patin est en phase de transition entre un creux et une bosse et inversement. On peut remarquer que dans cette simulation les oscillations de l'angle ne sont pas centrées sur zéro.

4.2.3 Topographie résultante

La topographie est calculée en découplant l'espace en tranches verticales de largeur $4R$ (4 fois le rayon moyen d'un grain) et en comptant le nombre de grains dans chaque tranche. L'altitude de l'empilement

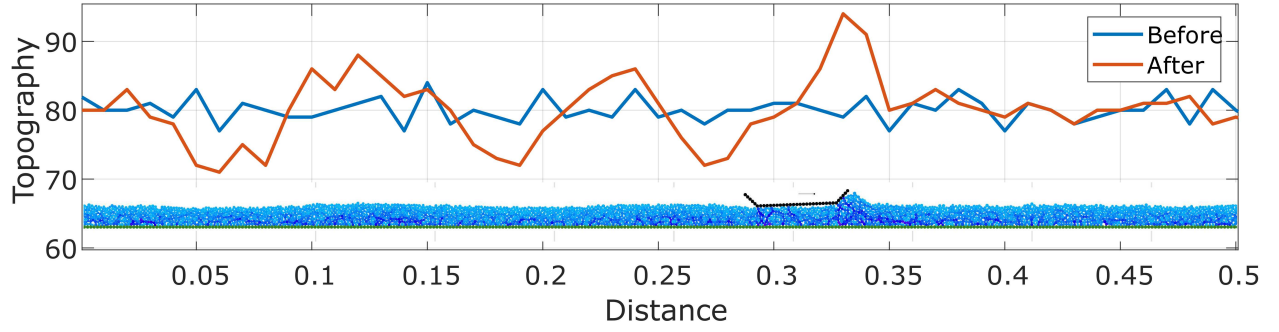


FIGURE 13 – Exemple de topographie calculée avec la méthode décrite dans le texte. Une image de la simulation est insérée dans la partie inférieure du graphe. Cette simulation a été réalisée à $V_{traction} = 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $M_{slider} = 5 \times 10^{-5} \text{ kg} = 100 m_{1\text{grain}}$, $K_{slider} = 0.04 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$

est donc exprimé en nombre de grains par tranche. Un exemple de ce calcul est présenté sur la Figure 13 où l'état du système est représenté par une image située en bas du graphe, et la topographie avant et après le passage du patin sont représentées respectivement en bleu et en rouge. On constate que la méthode de calcul permet de mesurer de manière satisfaisante l'apparition de bosses et de creux dans la topographie, et d'estimer la masse de grains accumulée en amont du patin.

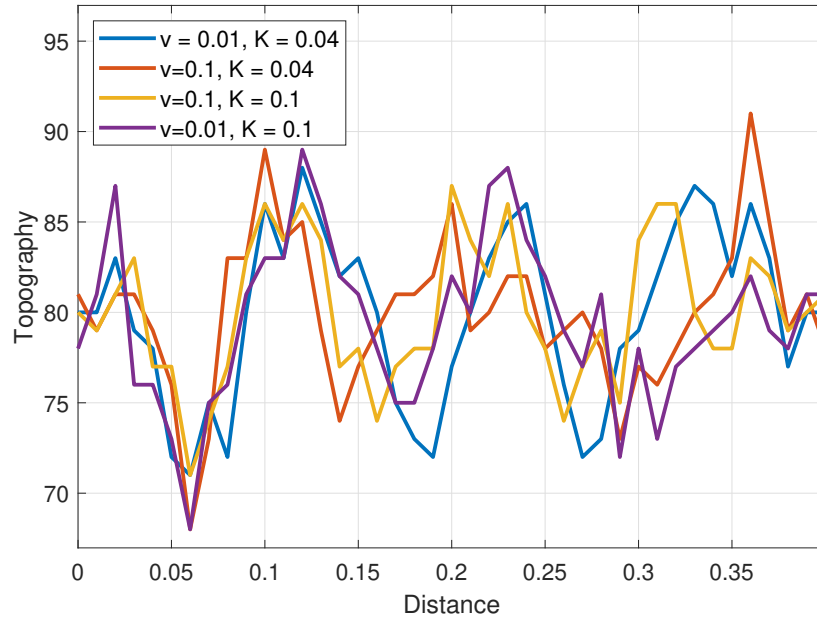


FIGURE 14 – Quatre signaux de topographie à la fin de différentes simulations (les différentes valeurs de k et v sont données dans la légende). Des oscillations similaires sont présentes dans le signal dans chacune des quatre simulations. La masse et la longueur du patin semblent avoir davantage d'influence sur la topographie.

On peut ensuite comparer la topographie générée par quatre simulations distinctes dont les paramètres k et v ont été variés. Ces différentes topographies, (Figure 14) présentent des oscillations cohérentes avec l'analyse du paragraphe précédent. L'effet décrit à la section 4.2.2 semble robuste aux variations de ces paramètres et aucune variation notable de l'amplitude ou de la longueur d'onde des oscillations constatées ne semble être associée à la variation de ces paramètres. Il faudrait cependant mener une étude statistique plus significative pour être fixé sur ce point et étudier le rôle des autres paramètres du problème.

4.2.4 Discussion

Le comportement des simulations est satisfaisant et reproduit une grande partie de la phénoménologie observée expérimentalement. Parmi les limites de la comparaison des simulations aux expériences, citons le caractère 2D des simulations qui empêche la fuite des grains dans la direction transverse au mouvement observée et décrite dans la section 3.2, la différence de taille du patin (il est bien plus petit dans la simulation), et du nombre total de grains (bien inférieur dans les simulations), le point d'application de la force de traction (systématiquement appliquée au centre de masse du patin dans les simulations, plutôt à l'avant du patin expérimentalement). Ces différences peuvent expliquer l'observation d'une instabilité conduisant à des oscillations de la topographie dans les simulations alors qu'un tel effet n'avait pas été observé expérimentalement. Ce travail numérique préliminaire fournit donc des perspectives expérimentales intéressantes, où l'on pourrait chercher à trouver les paramètres qui permettent de reproduire ce comportement.

5 Conclusion et perspectives

5.1 Conclusion

L'apport principal de ce travail de recherche a constitué en un développement expérimental et numérique important qui sera précieux lors de la poursuite de ce travail en thèse. On a montré qu'on pouvait observer les trois régimes décrits dans la littérature (stick-slip, régime inertiel, glissement continu) en proposant une méthode pour classer le signal de force parmi ces trois catégories. On a décrit le comportement du système sur l'intégralité de sa course en implémentant des mesures supplémentaires d'altitude et de topographie en complément de la mesure de force.

On a ensuite montré qu'il était possible de reproduire numériquement une partie de la phénoménologie observée expérimentalement. Le système numérique présente une instabilité visible à travers la position du patin ainsi que la topographie mesurée après son passage.

5.2 Poursuite de ce travail en thèse

Dans le cadre de la thèse, l'expérience sera amenée à évoluer et une étude numérique plus complète sera proposée. Les patins pourront être modélisés et imprimés en 3D afin de contrôler leur géométrie et de la faire varier à souhait. On pourra ainsi modifier la distribution de sa masse, le point d'application de la force, la géométrie du bord d'attaque et du bord de fuite, etc.

Concernant le comportement des grains poussés par le patin, il serait intéressant d'étudier les conditions d'apparition du bourrelet accumulé en amont du patin, et les conditions de montée du patin sur ce bourrelet. On peut aussi envisager d'étudier le profil de ce bourrelet lorsqu'il est écrasé par le patin et qu'il prend une forme régulière proche d'un demi cercle. Il reste également à déterminer la stabilité du régime stationnaire décrit, étudier son apparition en fonction de différents paramètres (vitesse, régime, distribution de la masse, position du point de contact etc).

La mesure d'altitude peut largement être améliorée ; le point de mesure n'étant pas forcément situé à la verticale du centre de masse du patin. Un simple réglage horizontal permettrait de résoudre ce problème mais on peut également envisager une amélioration supplémentaire en proposant une mesure plus complète de l'assiette et de la position du barycentre, via un gyroscope ou trois capteurs inductifs par exemple.

On se propose également de travailler avec d'autres grains. On pourrait reprendre le même échantillon mais mieux contrôler sa granulométrie par tamisage, varier le coefficient de frottement en lissant les rugosités par un bain dans de la soude, ou bien changer complètement de grains pour étudier le rôle de leur taille, leurs rugosités, leur sphéricité etc.

Enfin, dans le cadre de la thèse à venir, on s'intéressera également au rôle des vibrations mécaniques. Un pot vibrant sera alors ajouté à l'expérience (on travaillera également dans une configuration en tambour tournant vibré).

Numériquement, le travail mené est largement préliminaire ; on a constaté l'existence d'une instabilité. Est-ce un effet purement numérique ou observable avec un système réel ? Il faut rechercher les conditions expérimentales qui permettent d'observer cette instabilité, si elles existent. En particulier, déplacer le point d'application de la force à proximité du centre de masse du patin pourrait produire des résultats intéressants. Il reste à proposer une étude numérique de cette instabilité en s'intéressant notamment au rôle des paramètres m , k et v . On pourra également réaliser un travail quantitatif sur la masse de grains accumulée en amont du patin et les conditions d'accumulation, avec un éventuel lien avec l'émergence de l'instabilité. On pourra également ajouter des vibrations mécaniques, étudier l'influence du coefficient de frottement solide, faire des simulations 3D, s'intéresser au rôle du fluage, des réarrangements et des chaînes de forces présentes dans l'empilement, etc.

Références

- [1] V. Vidal, C. Oliver, H. Lastakowski, G. Varas, and J. C. Géminard, “Friction weakening by mechanical vibrations : A velocity-controlled process,” *The European Physical Journal E*, vol. 42, July 2019.
- [2] S. Nasuno, A. Kudrolli, and J. P. Gollub, “Friction in granular layers : Hysteresis and precursors,” *Physical Review Letters*, vol. 79, pp. 949–952, Aug 1997.
- [3] S. Nasuno, A. Kudrolli, A. Bak, and J. P. Gollub, “Time-resolved studies of stick-slip friction in sheared granular layers,” *Physical Review E*, vol. 58, pp. 2161–2171, 1998.
- [4] O. Reynolds, “Lvii. on the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. with experimental illustrations,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 20, no. 127, pp. 469–481, 1885.
- [5] D. P. Hill, P. A. Reasenberg, A. Michael, W. J. Arabaz, G. Beroza, D. Brumbaugh, J. N. Brune, R. Castro, S. Davis, D. dePolo, W. L. Ellsworth, J. Gomberg, S. Harmsen, L. House, S. M. Jackson, M. J. S. Johnston, L. Jones, R. Keller, S. Malone, L. Munguia, S. Nava, J. C. Pechmann, A. Sanford, R. W. Simpson, R. B. Smith, M. Stark, M. Stickney, A. Vidal, S. Walter, V. Wong, and J. Zollweg, “Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 landers, california, earthquake,” *Science*, vol. 260, no. 5114, pp. 1617–1623, 1993.
- [6] J. Gomberg, P. A. Reasenberg, P. Bodin, and R. A. Harris, “Earthquake triggering by seismic waves following the landers and hector mine earthquakes,” *Nature*, vol. 411, pp. 462–466, May 2001.
- [7] N. Taberlet, S. W. Morris, and J. N. McElwaine, “Washboard road : The dynamics of granular ripples formed by rolling wheels,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 99, p. 068003, 2007.
- [8] B. Percier, S. Manneville, J. N. McElwaine, S. W. Morris, and N. Taberlet, “Lift and drag forces on an inclined plow moving over a granular surface,” *Physical Review E*, vol. 84, Nov 2011.
- [9] B. Percier, S. Manneville, and N. Taberlet, “Modeling a washboard road : From experimental measurements to linear stability analysis,” *Physical Review E*, vol. 87, Jan. 2013.
- [10] M. van Hecke, “Jamming of soft particles : geometry, mechanics, scaling and isostaticity,” *Journal of Physics : Condensed Matter*, vol. 22, no. 3, p. 033101, 2009.
- [11] A. L. Sellerio, D. Mari, G. Gremaud, and G. D’Anna, “Glass transition associated with the jamming of vibrated granular matter,” *Phys. Rev. E*, vol. 83, p. 021301, 2011.
- [12] A. Ikeda, L. Berthier, and P. Sollich, “Disentangling glass and jamming physics in the rheology of soft materials,” *Soft Matter*, vol. 9, no. 32, pp. 7669–7683, 2013.
- [13] A. Janda, D. Maza, A. Garcimartín, E. Kolb, J. Lanuza, and E. Clément, “Unjamming a granular hopper by vibration,” *Europhysics Letters*, vol. 87, no. 2, p. 24002, 2009.
- [14] J. Dijksman, G. H. Wortel, L. T. H. van Dellen, O. Dauchot, and M. van Hecke, “Jamming, yielding, and rheology of weakly vibrated granular media,” *Physical Review Letters*, vol. 107, p. 108303, 2011.
- [15] H. Lastakowski, J.-C. Géminard, and V. Vidal, “Granular friction : Triggering large events with small vibrations,” *Scientific Reports*, vol. 5, no. 1, 2015.
- [16] R. Capozza, A. Vanossi, A. Vezzani, and S. Zapperi, “Suppression of friction by mechanical vibrations,” *Physical Review Letters*, vol. 103, no. 8, 2009.
- [17] J. Colas, N. Pustelnik, C. Oliver, P. Abry, J.-C. Géminard, and V. Vidal, “Nonlinear denoising for characterization of solid friction under low confinement pressure,” *Physical Review E*, vol. 100, Sept. 2019.
- [18] J. Sautel, *Ségrégation granulaire dans les astéroïdes lâchement agglomérés*. PhD thesis.
- [19] P. A. Cundall and O. D. Strack, “A discrete numerical model for granular assemblies,” *geotechnique*, vol. 29, no. 1, pp. 47–65, 1979.

6 Annexes

6.1 Courbes de calibration

Moteurs CC

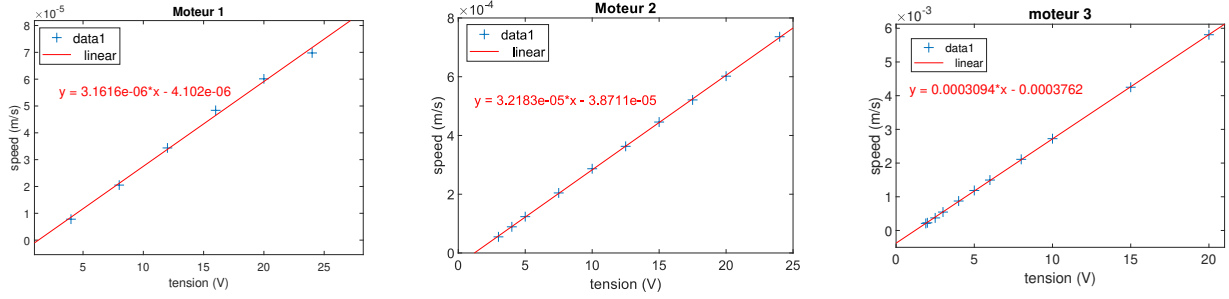


FIGURE 15 – Courbes tension-vitesse des trois moteurs à courant continu utilisés.

Capteur inductif

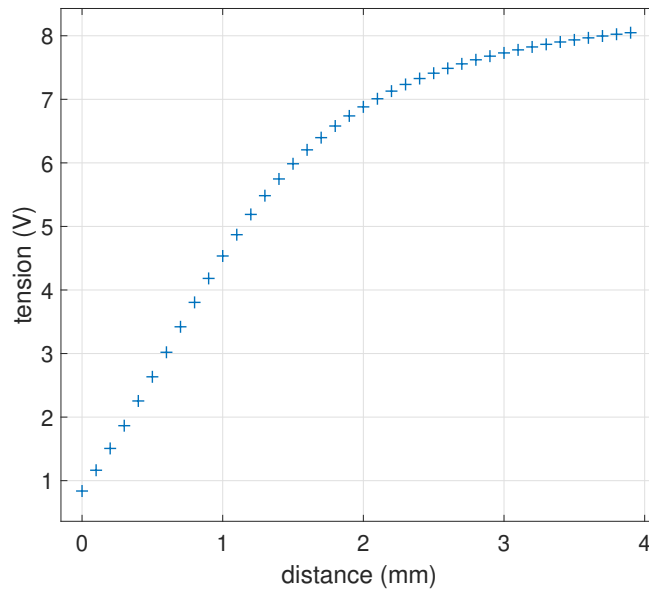


FIGURE 16 – Courbe tension-distance du capteur inductif Baumer IPRM 12I9505/S14

Télémètre laser

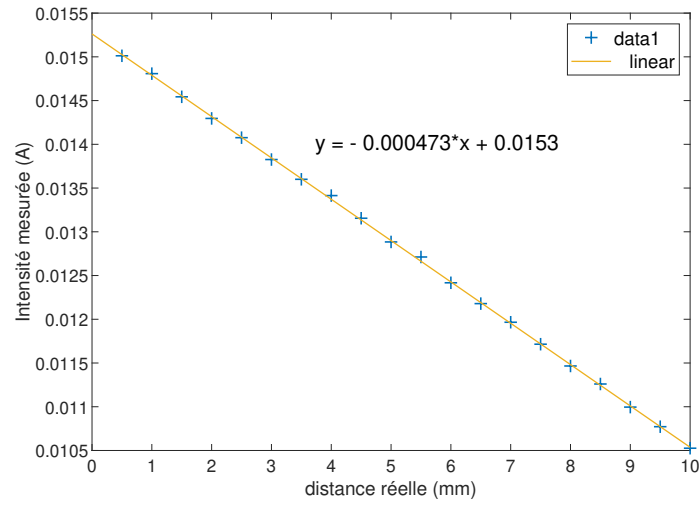


FIGURE 17 – Courbe intensité-distance du télémètre laser Micro-epsilon ILD1302-20.

Mesure de force

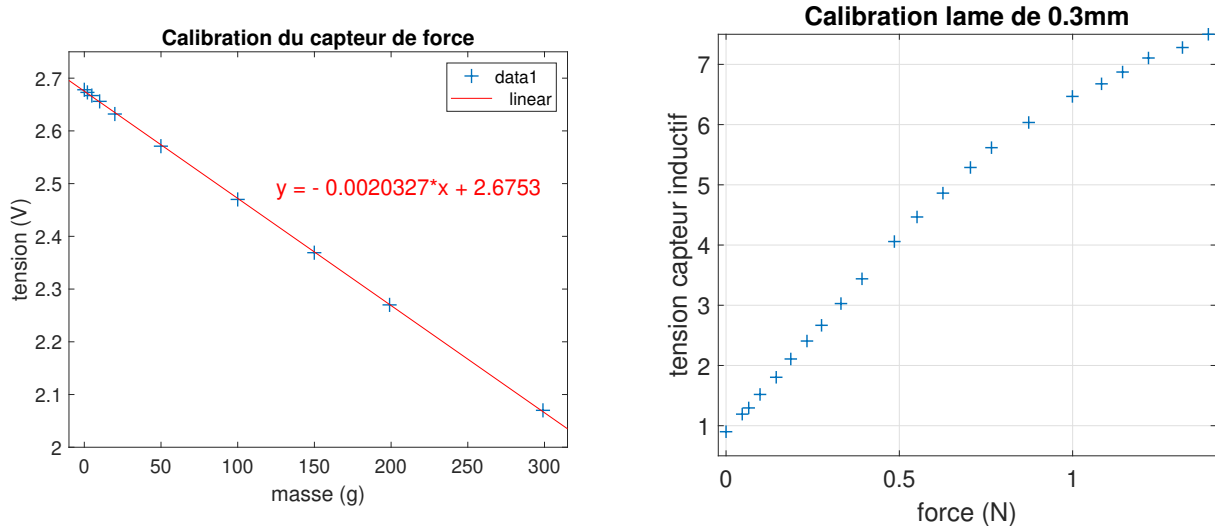


FIGURE 18 – Calibration de la mesure de force : courbe tension-masse du capteur de force (tension de sortie vs masse posée sur le capteur) et relation tension-force (tension de sortie du capteur inductif vs force mesurée par le capteur de force) pour une lame de $e = 0.3$ mm. La combinaison de cette dernière mesure avec la Figure 16 permet d'obtenir la relation force-distance pour une lame donnée et d'estimer la valeur de sa raideur k , ici $k \simeq 570 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$.

6.2 Interface labView

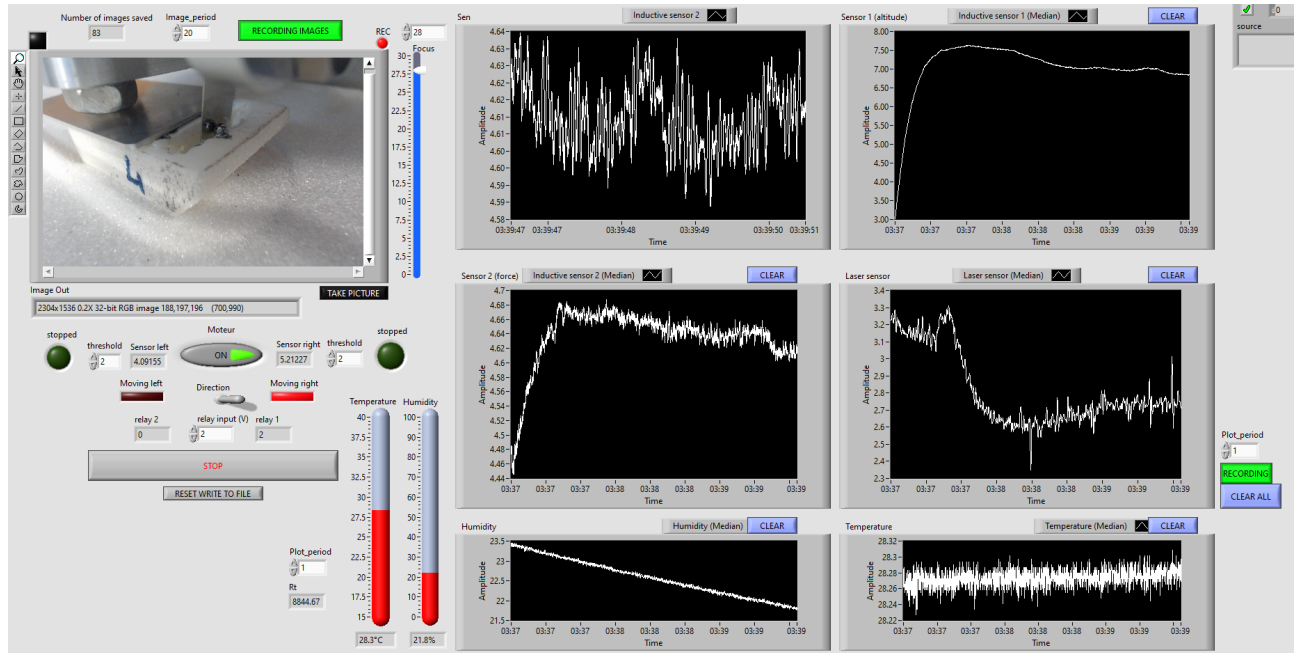


FIGURE 19 – Interface LabView mise au point pour visualiser l'état de l'expérience et centraliser l'ensemble des mesures.