Avalanches granulaires

Quelles sont-les questions scientifiques ou techniques?
Avalanche et, de manière plus générale, écoulement d'un matériau granulaire.

Par quelles expériences y répondre?
Expérience modèle d'avalanche sur un plan incliné (le matériau granulaire est constitué de billes de verre tamisées). On déterminera l'épaisseur de la couche granulaire en fonction de l'angle d'inclinaison, ainsi que la vitesse du front d'avalanche.

Quelles techniques expérimentales?
Mesure d'un profil d'épaisseur par une nappe laser, analyse d'image à partir de films.

Quels sont les résultats?
À vous de les montrer à travers des graphes clairs.

Comment les interpréter?
Ingrédients physiques, lois d'échelle, ajustement de courbes expérimentales: à vous de jouer!



Figure 1: Exemples de matériaux granulaires: dunes dans le sud marocain (cliché, B. Andreotti, PMMH), avalanche en Alaska (source: wallpaperaday.com).

Introduction

Bien qu'ils soient omni-présents dans la vie quotidienne, les milieux granulaires possèdent des propriétés qui demeurent difficiles à prédire. Nous nous intéressons ici à l'écoulement de grains sur un plan incliné. Un montage simple permet d'appréhender la complexité des matérieaux granulaires : seuil d'écoulement avec hystérésis, régimes différents (stationnaire, instationnaire, "gazeux"), instabilités du front. Nous nous limiterons au cas des écoulements denses et stationnaires au voisinage du seuil d'écoulement. Leur dynamique commence à être comprise par les spécialistes, mais nombreuses questions demeurent ouvertes.

Description de l'expérience

Un réservoir situé en amont du plan incliné est rempli de billes de verre de diamètre d de l'ordre de $500\mu m$. Son ouverture se fait par le biais d'un système de double trappes : en tournant le volant supérieur, on soulève un premier panneau en plexiglass (trappe n°1), ce qui permet d'ajuster la hauteur H de la fente d'évacuation (1 mm par tour complet). On soulève ensuite le panneau métallique (trappe n°2) pour déclencher l'avalanche. Les billes de verre s'écoulent sur un plan recouvert de velours (pour éviter leur glissement) et sont récupérées dans un bac en aval. Les

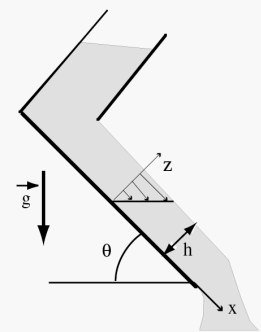


Figure 2: Schéma du montage expérimental

deux paramètres de contrôle sont donc l'ouverture H de la trappe et l'angle d'inclinaison θ du dispositif par rapport à l'horizontale (lisible sur l'inclinomètre fixé sur les montants latéraux).

Un laser fixé latéralement est solidaire du dispositif inclinable. Il est muni d'une lentille cylindrique de façon à créer une nappe laser dans la zone d'écoulement. L'intersection de cette nappe avec le fond du plan incliné donne une ligne de référence. Cette ligne dévie dès qu'il y a une surépaisseur sur le fond et la mesure de cette déviation permet de connaître l'épaisseur de la couche granulaire, aussi bien en mouvement qu'au repos.

Un caméscope également solidaire du plan incliné est fixé au-dessus de la zone d'écoulement et est relié à un ordinateur muni du logiciel *Pixelink Capture OEM* permettant l'acquisition d'un film à une cadence réglable par l'utilisateur. Une grande cadence n'est cependant réalisable qu'en diminuant la résolution des images (limitation par le débit d'informations à travers le câble firewire).

Mesures à effectuer

Avant de commencer pour de bon...

Si le sable était un liquide visqueux, l'écoulement se produirait dès la plus petite inclinaison. Quel serait alors le lien entre la vitesse d'écoulement, l'épaisseur de la couche et l'angle d'inclinaison?

Si la couche était une plaque solide, elle ne mettrait à glisser qu'au delà d'un certain angle. Comment cet angle dépendrait-il de l'épaisseur de la couche?

Réaliser quelques expériences qualitatives avec les grains. Ouvrir largement la trappe lorsque le plan et horizontal puis incliner progressivement le plan. Au delà d'un certain angle θ, une couche s'écoule en continu jusqu'à l'épuisement du réservoir. Une couche de grains reste cependant sur le plan, son épaisseur vaut h_{stop} (qui varie en fonction de θ).
Inclinons d'avantage le plan: dans un premier temps rien ne se passe. Cependant en perturbant la couche, un avalanche se déclenche et les grains dévalent jusqu'à ce qu'une nouvelle épaisseur h_{stop} soit atteinte.
Maintenant, inclinons le plan le plus doucement possible. Au delà d'un certain angle θ_{start} une avalanche se produit spontanément (cet angle dépend de l'épaisseur h de départ). Lorsque l'avalanche s'arrête, nous obtenons une nouvelle valeur de h_{stop}. Et ainsi de suite...

1. Calibration de la mesure de l'épaisseur

L'épaisseur de la couche de grains est déterminée par la déflexion d'une nappe laser d'angle d'incidence α faible. La déviation latérale de la nappe est proportionnelle à l'épaisseur h : $\Delta = h/\tan\alpha$. La mesure de α n'étant pas précise, on vérifiera cette relation de proportionnalité avec des cales d'épaisseurs connues.

2. Mesure de $\theta_{start}(h)$ et $h_{stop}(\theta)$

Déterminer les courbes des angles de démarrage en fonction de l'épaisseur et l'épaisseur d'arrêt en fonction de l'angle.
On pourra repérer la déviation de la nappe laser avec le camescope (aquisition avec le logiciel *iMovie* et analyse des images avec *ImageJ*).
Vos résultats sont-ils compatibles avec ceux présentés dans l'article de Yoël Forterre et Olivier Pouliquen "Écoulements granulaires sur plan incliné" ? Ces angles sont-ils comparables avec l'angle "de talus" mesuré sur un tas de sable?

3. Vitesse d'écoulement

À angle θ donné, comment varient la vitesse moyenne V (c'est-à-dire la vitesse du front) en fonction de l'épaisseur h de l'écoulement que l'on peut ajuster h en variant l'ouverture de la trappe? On pourra aussi vérifier s'il y a une relation simple entre l'ouverture de la trappe et la vitesse mesurée.
Essayer de mesurer la vitesse V_s des grains en surface (on peut essayer de traquer l'écoulement de surface en déposant un petit morceau de papier sur la couche en mouvement). Comment se compare-t-elle à V ?

Comment modéliser un tel écoulement? Puisqu'il ne s'agit pas d'un écoulement newtonien à cause du seuil, on pourrait imaginer une rhéologie de type fluide de Bingham. Dans le modèle de Bingham le fluide est caractérisé par un seuil de cisaillement σ_0 et une variation linéaire de la contrainte de cisaillement avec le taux de déformation au-delà. Ce modèle décrit par exemple assez bien une mousse à raser. Est-ce le cas pour un matériau granulaire?
Dans les modèles de fluides usuels, les contraintes normales n'interviennent pas. Est-ce le cas pour des grains? Que suggère la différence entre l'épaisseur h en écoulement et sa valeur h_{stop} à l'arrêt?

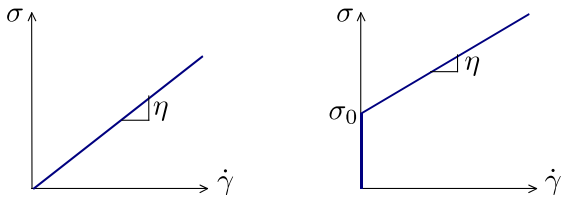


Figure 3: Lien entre la contrainte de cisaillement σ_{zx} et le taux de déformation $\dot{\gamma} = \frac{\partial V_x}{\partial z}$ pour fluide newtonien et un fluide à seuil de Bingham.

Ces écoulements granulaires sont bien complexes! Essayons quand même de trouver une relation semi-empirique.
Normaliser V et h comme proposé dans l'article. Vos résultats se superposent-ils sur une courbe maîtresse?

4. Vidange d'un silo

Les écoulements en avalanche nous ont illustré la mécanique subtile des matériaux granulaires. Une autre géométrie d'écoulement est également très importante du point de vue pratique. Il s'agit de la vidange d'un réservoir de grains (d'un silo). L'ingénieur de M&M's se demandera par exemple à cadence il peut remplir ses sachets de dragées. C'est également le principe du sablier utilisé jadis pour mesurer le temps.

Pour étudier cette vidange, nous allons utiliser un dispositif très simple composé d'un tube cylindrique d'un rayon interne de 4 cm terminé par un orifice de diamètre variable d (il suffit de changer les pastilles au bout du tube). Un bouchon permet de fermer et de libérer cette ouverture. Des

billes de granulométries différentes sont disponibles. **Veiller à toujours placer un bac en dessous du tube rempli de grains lorsque vous manipulez! Merci également de ne pas mélanger les billes de tailles différentes.**

Suivre la dynamique de la vidange à l'aide d'une caméra. La vitesse dépend-elle du temps? Dépend-elle de la taille des grains? de la taille de l'orifice? Quelle serait cette dynamique si on remplaçait les grains par de l'eau? Vous pouvez faire l'expérience au dessus d'un évier avec une bouteille en plastique percée.

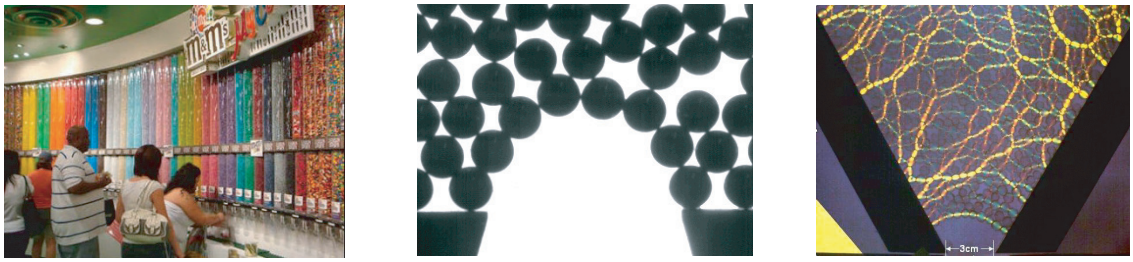


Figure 4: Mur de silos de M&M's à Las Vegas. Effet d'arche autour le l'orifice. Visualisation des chaînes de forces grâce à des grains photo-élastiques (cliché Junyao Tang, Duke University).

Un modèle de dynamique de vidange a été proposé par Beverloo en 1961. L'idée est que le volume des grains mobilisés dans la dynamique est contenue sous une arche dont la taille caractéristique est la taille de l'orifice d. La vitesse d'éjection caractéristique serait ainsi d'ordre $(gd)^{1/2}$, ce qui conduit à un débit volumique $Q \sim g^{1/2}d^{5/2}$. Une amélioration de ce modèle consiste à considérer la taille finie des grains. En effet si le trou est trop petit, l'écoulement se bloque. Une correction du modèle précédent consiste à considérer: $Q \sim g^{1/2}(d - kd_g)^{5/2}$, où d_g désigne la taille des grains et k est une constante numérique.
Ce modèle rend-il compte de vos résultats?