

LA PHYSIQUE DES MATÉRIAUX GRANULAIRES

N. VANDEWALLE

GRASP, Département de Physique,
Sart Tilman B5, Université de Liège,
B-4000 Liège, Belgique

1 Introduction

Dans la vie de tous les jours, nous rencontrons souvent des *solides divisés*. Il s'agit de matières divisées, de tailles variées, pouvant se présenter sous diverses formes : grains, granulés, poudres, billes ou gélules (cfr figure 1). Selon un rapport récent de Dupont de Nemours, 62% des produits agroalimentaires et pharmaceutiques sont commercialisés sous une forme granulaire quelconque. Outre un intérêt économique que l'on **conçoit aisément**, les matières divisées **présentent** un intérêt scientifique important. **De fait, les** matières granulaires sont **associées à des solides**, cependant, leur mouvement n'est pas sans rappeler le mouvement d'écoulement des liquides. Ainsi, la matière divisée **présente simultanément des caractéristiques** des états solides et liquides. Ce comportement hybride conduit à des phénomènes physiques parfois spectaculaires tels que la séparation d'espèces granulaires ou la formation de bouchons lors d'écoulements. Ces manifestations physiques, totalement absentes au sein des solides et des liquides, impliquent l'existence de mécanismes propres à la matière divisée, mécanismes dus principalement aux forces de contact et de frottement entre les grains. Ces phénomènes nécessitent par conséquent de nouvelles descriptions et l'élaboration de nouveaux modèles théoriques. On parlera désormais

d'état *granulaire* comme un état distinct des états liquides et solides.



FIG. 1 Diverses matières granulaires : icebergs dans des détroits, billes en écoulement, gélules dans un récipient, grains de riz, sable des déserts africains et voitures sur autoroutes.

Cet article a pour but de brosser un large aperçu de nos connaissances sur les diverses propriétés physiques des matières divisées. Les propriétés statiques seront envisagées avant d'aborder le problème des écoulements.

2 Empilements : de la simplicité à la complexité

2.1 Contacts

La statique d'empilements pose divers problèmes conceptuels. Considérons un système régulier de cylindres empilés. Un empilement ordonné de ce type est d'apparence très simple : les cylindres s'ordonnent sur un réseau hexagonal comme illustré sur la figure 2. Cependant, il révèle un désordre étonnant. En effet, on peut mettre en évidence un grand désordre des points de contact, en montrant que la répartition de ceux-ci n'est pas homogène et unique. Remarquons qu'il suffit de deux points de

sustentation en dessous du centre de gravité d'un cylindre pour obtenir son équilibre. On peut dès lors comprendre qu'il est possible de retirer plusieurs points de contact superflus sur quelques cylindres sans mettre en danger l'équilibre de l'empilement. La présence ou non de lacunes n'altère en rien l'équilibre du tas, car l'absence d'un cylindre peut être vue comme un moyen de supprimer des points de contact au sein de l'empilement. En conséquence, la distribution des points de contact à l'équilibre n'est pas unique vu le nombre de configurations possibles en accord avec l'équilibre du tas. L'homogénéité n'a plus de sens dès lors que l'on peut retirer des points de contact en divers endroits du tas. Derrière la simplicité apparente d'un empilement ordonné se cache donc une certaine complexité.

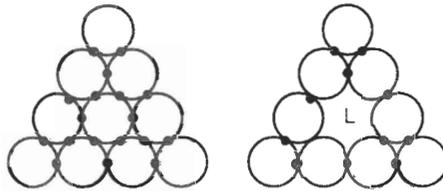


FIG. 2 - Empilement stable de cylindres. La situation idéale (à gauche) implique 6 contacts par cylindre au sein de l'empilement. La situation réelle (à droite) présente un désordre des points de contact (représentés par de petites boules grises sur le schéma). Un tel désordre permet le retrait de certains cylindres (L) sans modifier la stabilité de l'empilement.

Il est très difficile de déterminer quelles sont les forces de contact au sein d'un empilement car celles-ci dépendent de l'histoire de la formation du tas. En effet, si on dépose un cylindre en équilibre sur deux autres cylindres fixes. Les forces de frictions qui agissent aux points de contact dépendent de la manière dont le cylindre a été amené sur les deux autres, c'est-à-dire du mouvement du cylindre avant d'atteindre l'équilibre. En d'autres termes, pour déterminer les forces de friction dans un empilement granulaire, il faut connaître toute la phase dynamique qui a conduit à sa fabrication.

2.2 Voûtes granulaires

Les chemins de contraintes dans un empilement granulaire sont mis en évidence par l'expérience suivante : des cylindres en plexiglas sont disposés entre deux plaques verticales. Le plexiglas a la propriété de faire tourner le plan de polarisation de la lumière lorsqu'il est sous contrainte. Pour observer les chemins de contraintes, il suffit de disposer une source lumineuse de l'autre côté du système et une paire de

polariseurs croisés de part et d'autre de la cellule expérimentale. Cette méthode est connue sous le nom de photoélasticimétrie. Les chemins de contrainte (ou chaînes de force) sont ainsi révélés comme étant un réseau complexe et désordonné (cfr lignes claires sur la figure 3). Certains cylindres concentrent une grande partie des contraintes mécaniques alors que d'autres cylindres ne subissent pratiquement que la gravité.

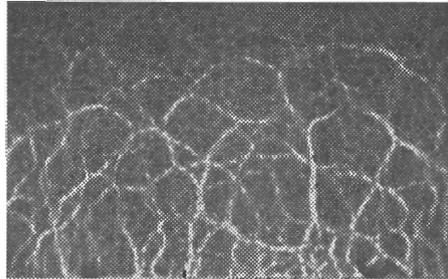


FIG. 3 Mise en évidence de chaînes de forces via une technique de photoélasticimétrie. Les chaînes de forces apparaissent en clair sur cette image.

Les contraintes mécaniques appliquées à un cylindre proviennent essentiellement du poids des cylindres supérieurs. On s'attend donc à la propagation de chaînes de forces verticales. Cependant, on observe que certaines contraintes mécaniques sont redirigées horizontalement. Cette propriété produit de véritables voûtes granulaires qui supportent le poids des grains situés au-dessus. La présence de voûtes dans un empilement granulaire a pour conséquence de libérer des granules situés en dessous de toute contrainte ou de créer des lacunes au sein du tas. L'effet de voûte est facilement observable, il suffit de verser des granules dans un récipient à l'aide d'un entonnoir. Si l'entonnoir est suffisamment étroit, des voûtes granulaires vont se former et bloquer l'écoulement.

2.3 Problème du silo

Considérons l'expérience suivante. Des granules sphériques sont versés dans un silo dont le fond est une balance. Cette dernière permet de mesurer la force (ou la pression) exercée par les grains sur le fond du silo. Au fur et à mesure que la quantité de grains augmente dans le silo, la pression augmente à la base de celui-ci. Cependant, au delà d'une hauteur de grains, la pression exercée va saturer et deviendra indépendante de la quantité de grains versés. Ce sont les voûtes présentes

dans l'empilement granulaire qui supportent de plus en plus la masse des grains et la redirigent vers les parois. Les renforts que l'on voit souvent à la base de nombreux silos sont donc inutiles car la pression n'augmente pas linéairement avec la hauteur de grains.

Bien que la formation de voûtes granulaires soit bien comprise qualitativement, aucune théorie quantitative ne permet de relier la distribution des contraintes au sein d'un empilement aux caractéristiques physiques des grains.

3 Densification des matières granulaires

3.1 Dilatance de Reynolds

Lors d'une promenade sur la plage, on peut observer le gonflement du sable humide autour de l'empreinte de ses pas. En outre, le sable semble sécher temporairement. Ce phénomène assez surprenant peut également être étudié à l'aide de sable, d'eau, d'un tube et d'un ballon de baudruche. Prenons un tube en verre planté dans le ballon de baudruche qui est bien rempli de sable et d'eau. Le bout du tube en verre peut être fermé avec une petite pièce de tissu afin de permettre l'échange d'eau entre le ballon et le tube en verre mais d'interdire tout échange de sable. Le ballon doit être attaché correctement autour du tube de sorte qu'aucune goutte d'eau ne puisse s'en échapper. De plus, l'eau doit remplir complètement le ballon et la moitié du tube. Le dispositif est prêt. Quand on presse sur le ballon... l'eau descend dans le tube en verre (cfr figure 4)! Cela signifie qu'une déformation imposée au sable (pression sur le ballon, pression du pied sur le sable de plage) conduit à une augmentation de l'espace entre les grains. En d'autres termes, le sable gonfle lorsqu'on le comprime. Ce gonflement permet à l'eau qui se trouve au-dessus du sable de l'envahir.

Pour compacter une matière granulaire, il faut donc que les grains se séparent pour mieux se réarranger. C'est le phénomène de *dilatance*, qui a été décrit pour la première fois en 1885 par Reynolds. Cette dilatance est essentielle notamment lors de la mise en écoulement de la matière granulaire. Les propriétés élastiques d'une matière granulaire sont donc fort différentes des propriétés usuelles des solides. En effet, le volume de ces derniers diminue lors de l'application d'une pression. Actuellement, il n'existe aucune théorie capable de modéliser/quantifier la *dilatance de Reynolds*.

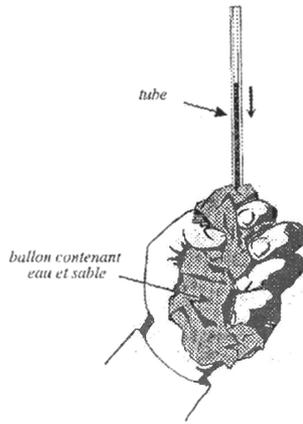


FIG. 4 - Dilatance de Reynolds. Une pression exercée sur un ballon de baudruche contenant du sable et de l'eau conduit à une aspiration du liquide au sein de la matière granulaire : le sable gonfle!

3.2 Compaction

Pour transporter et stocker des matières granulaires, les industries ont tout intérêt à densifier la matière pour réduire leurs coûts. L'étude de la compaction des solides divisés est donc d'un grand intérêt. Un moyen simple pour densifier des matières granulaires est de soumettre un empilement à des vibrations. L'agitation des grains va permettre aux grains de trouver des configurations optimales pour minimiser leur énergie potentielle, c'est-à-dire des configurations qui maximisent la densité du produit.

Une expérience simple consiste à remplir un tube de granules. Après quelques secousses, le niveau de l'empilement a fortement diminué et semble ne plus bouger. On s'attend donc à obtenir un phénomène de densification très rapide avec une saturation exponentielle de la densité. Cependant, une analyse fine de cette expérience révèle un comportement bien différent : après 10 000 secousses on observe encore une faible variation de la densité. Pour les physiciens, cette densification lente reste mystérieuse. On devine cependant le rôle essentiel joué par les voûtes granulaires tout au long du processus de densification. Ces voûtes se déplacent, s'organisent et résistent à la compaction!

Encore une fois, il est impossible de prédire la dynamique de compaction des matières granulaires à l'aide de lois classiques de sédimentation ou de percolation.

4 Écoulements granulaires

4.1 Clepsydras et sabliers

La clepsydre est une horloge à eau déjà connue des Égyptiens, des Amérindiens, des Chinois et des Grecs. Un vase percé d'un trou laisse couler de l'eau. Des graduations permettent de mesurer des intervalles de temps. Cependant, dans une clepsydre, le débit d'eau n'est pas constant. On peut en effet montrer, à partir de la loi de Bernoulli que la vitesse d'écoulement v par le trou percé au bas d'un réservoir rempli jusqu'à une hauteur h vaut $v = \sqrt{2gh}$. Le débit de l'eau est donc plus grand quand la dénivellation est grande. Pour cette raison, si l'on désire utiliser des graduations temporelles équidistantes, la clepsydre devra avoir une forme évasée, plus large en haut. La calibration des clepsydres est donc peu aisée.

Les premiers sabliers datent du XIII^{ème} siècle. Contrairement aux clepsydres, le débit d'un sablier reste constant au cours de l'écoulement (cfr figure 5). C'est encore un effet de la présence de voûtes granulaires car la pression au bas d'un récipient rempli de grains est indépendante de sa hauteur. Les sabliers ont très vite remplacé les clepsydres car ils ont permis de meilleures mesures du temps.

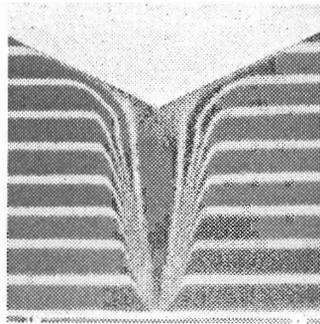


FIG. 5 Écoulement granulaire dans un silo/sablier mis en évidence par des couches de grains colorés. Seule la partie centrale du silo participe à l'écoulement.

4.2 Écoulements de surface

Si l'on compare des écoulements granulaires et fluides, on constate une différence essentielle : un écoulement granulaire se produit uniquement en surface, alors qu'un écoulement fluide produit un mouvement de l'ensemble de la matière fluide. Le

long d'une surface libre, la couche de grains roulants est peu épaisse : jusqu'à 20 diamètres de grains. Le reste de granulat est au repos. L'énergie cinétique des grains est donc rapidement dissipée au sein des couches successives de grains. Cette dissipation d'énergie provient des nombreuses collisions inélastiques entre grains. Elle conduit à une décroissance linéaire de la vitesse des grains avec la profondeur, alors que les fluides usuels présentent un profil de vitesse courbé (écoulement de Poiseuille). En outre, la mise en mouvement implique un gonflement de la couche roulante. Les grains doivent en effet s'écarter les uns des autres pour bouger. La densité est donc variable dans la couche roulante. La figure 6 présente les profils de vitesses observés dans divers écoulements : déplacements solides, écoulements granulaires et écoulements de liquides visqueux.

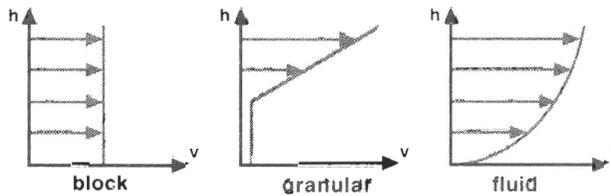


FIG. 6 Profils de vitesses. Trois écoulements sont illustrés : déplacements solides, écoulements granulaires et écoulements de liquides visqueux.

Alors que les écoulements fluides sont décrits à l'aide de nombreuses lois théoriques faisant intervenir la densité et la viscosité de cette matière, il n'existe aucun modèle physique qui reproduise théoriquement le profil de vitesse d'une couche roulante de grains dont les caractéristiques physiques sont connues. Cette question est un véritable challenge pour la physique contemporaine.

5 Ségrégations de phase

Considérons deux granulats qui ont des granulométries et des compositions chimiques légèrement différentes. Contre toute attente, il sera difficile, voire impossible, de réaliser un mélange homogène de ce produit. En effet, si l'on dépose le produit dans un récipient en vibration, les deux espèces granulaires vont se séparer selon la verticale, les plus grosses particules se distribuant préférentiellement sur le sommet

de l'empilement. Si l'on décide par contre de mélanger ce produit dans un tambour en rotation, les espèces granulaires vont à nouveau se séparer avec les petits grains au centre du tambour et les gros grains préférentiellement le long des parois. Si on décide de mélanger ce produit sur un tapis vibrant (comme ceux utilisés dans certaines exploitations minières), les espèces vont se séparer en bandes perpendiculaires au tapis. On imagine aisément les implications de ces problèmes de ségrégation dans l'industrie.

5.1 Stratification

Partons d'une expérience assez simple à réaliser. Mélangons deux sortes de sable différant par la taille des grains qui les composent. Il est nécessaire de pouvoir distinguer visuellement les deux sortes de sable qui doivent donc être colorées différemment. Versons alors le mélange à l'aide d'un entonnoir dans une cellule de Hele-Shaw. Il s'agit d'un montage composé de deux plaques de verre disposées parallèlement et faiblement écartées (quelques millimètres). Suivant le mélange utilisé, l'écartement des parois et le débit de l'entonnoir, on observe différents motifs qui apparaissent spontanément lors de la formation du tas. Les deux espèces de sable se démélangent, on parle de *démixtion*. Plus précisément, on distingue la ségrégation et la stratification qui sont visibles sur la figure 7. La première correspond à une démixtion globale le long de la pente. Elle est très fréquente. La seconde, plus sensible aux conditions expérimentales, consiste en l'apparition de couches successives, alternativement d'une sorte puis de l'autre.

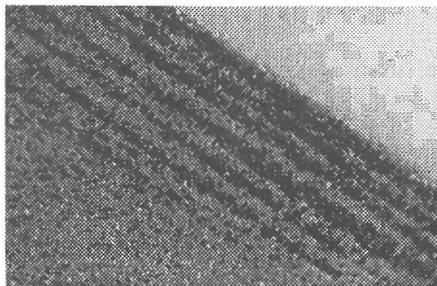


FIG. 7 - Ecoulement granulaire dans une cellule de Hele-Shaw conduisant à une stratification d'espèces différentes.

La démixtion qui a lieu dans la couche roulante provient de la percolation des petites grains qui passent au travers des espaces laissés par les gros grains. C'est donc

la variation de la densité le long de la couche roulante (dilatance) qui est responsable de ce phénomène étonnant de ségrégation.

5.2 Les noix du Brésil

Un processus de percolation similaire explique un autre phénomène de ségrégation : le problème des noix du Brésil. Une fois récoltées, les noix de coco brésiliennes sont transportées en camion sur de longues distances. A l'arrivée du camion c'est-à-dire après de nombreuses secousses, on constate que les grosses noix se trouvent au sommet du tas et elles recouvrent les petites noix. On peut facilement réaliser cette expérience avec un récipient qui contient du sable et des billes de verre. Les billes remontent rapidement lorsque le récipient est soumis à de nombreuses vibrations (cfr figure 8).

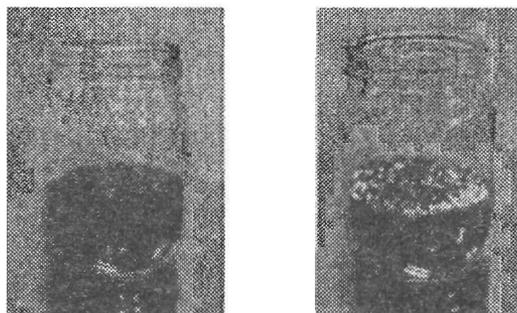


FIG. 8 - Effet noix du Brésil. (gauche) Un récipient qui contient un mélange de sable noir et de billes blanches en verre. (droite) Après de nombreuses secousses, les billes se retrouvent en surface.

5.3 Le cylindre en rotation

Pour mélanger diverses espèces granulaires, on utilise souvent un tambour en rotation. On constate cependant qu'après un temps assez court une démixtion apparaît. Chaque espèce granulaire se concentre sur des zones le long de l'axe de rotation. Cette ségrégation de phase est actuellement très mal comprise.

On peut dès lors se poser les questions suivantes. Faut-il revoir la notion de mélange idéal pour ces matières? Comment obtenir un haut degré d'homogénéité?

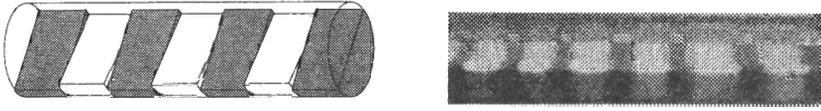


FIG. 9 -- Démixtion de deux espèces granulaires dans un cylindre en rotation. (à gauche) Vue schématique. (à droite) Photo de l'expérience en cours.

6 Remarque finale

La science des matières granulaires est fort jeune. Les expériences et les observations de phénomènes spectaculaires abondent. Malheureusement, une théorie quantitative même élémentaire fait cruellement défaut. En effet, on observe une grande diversité de phénomènes et leurs causes sont diverses. Il est donc difficile d'unifier les comportements granulaires en un modèle unique.

La recherche d'une théorie quantitative représente actuellement le Graal des physiciens mais elle nécessite le développement de nouvelles approches théoriques tenant compte des nombreux paramètres qui caractérisent les grains constitutifs.