

Exposition

interactive

Jeux de grains

Espace des Sciences
Centre Colombia
1^{er} étage • Rennes

Du 5 mars au
31 juillet 2004



EXPOSITION COPRODUITE PAR CENTRE-SCIENCES, OCSTI-AGORA DES SCIENCES ET LE PROGRAMME EXPLORA (COMICYT- SANTIAGO DU CHILI)
SOUS LE HAUT PATRONAGE DE PIERRE-GILLES DE GENNES, PROFESSEUR AU COLLÈGE DE FRANCE ET D'ETIENNE GUYON, PROFESSEUR À L'ESPO PARIS.

Préface

Ce guide pédagogique a été conçu pour que les personnes désireuses d'en connaître davantage sur les milieux granulaires puissent préparer et exploiter la visite de l'exposition « jeux de grains ».

Ce document traite de l'organisation de l'exposition qui s'articule autour de modules thématiques. La nature des grains, leurs empilements, les tassements des grains, les contacts entre eux, les effets de voûte, les sabliers, les avalanches, les mélanges de grains et l'état particulier du milieu granulaire sont développés en complément des axes de réflexion abordés dans l'exposition.

Nous espérons que ce document permettra une meilleure utilisation du temps que vous passerez dans cette exposition.

Bonne lecture et à bientôt.

Sommaire

	Page
Introduction générale	4
Présentation de l'exposition	5
Introduction	5
Table 1: Du sable aux grains	6
Table 2 : Du bon empilement	7
Des empilements bien réguliers ?	8
Régulier ou irrégulier ?	9
L'ordre dans les pyramides	10
Table 3 : Tasser, un art difficile !	11
Secouer ou tasser ?!	12
Secouez-le ! Secouez-la !	13
1 + 1 = ???	14
Table 4 : Contacts : de proche en proche	15
Où sont les contacts ?	16
Où sont les forces ?	17
Clic-clac, le courant passe !!!	18
Table 5 : Des effets de voûte	19
Pourquoi ça coince ?	20
Magiques, les pois chiches ?	21
Collé ! Collé !	22
Table 6 : Le secret des sabliers	23
Rien ne sert de courir...	24
Ils font des bulles...	25
Le niveau baisse ?	26
Table 7 : Attention, avalanches !!!	27
L'angle d'avalanche	28
Tac-à-tac-à-tac !!!	29
Attention avalanches !	30
Table 8 : Des grains bien mélangés ?	31
Ca se mélange mal !!!	32
Tapez dessous ou secouez !	33
Les doigts d'avalanches	34
Table 9 : Les grains, un nouvel état de la matière ?	35
Comme un liquide !!!	36
Un lit fluidisé	37
Une fabrique de dunes	38
Espace « graines d'éveil »	39
Glossaire	40

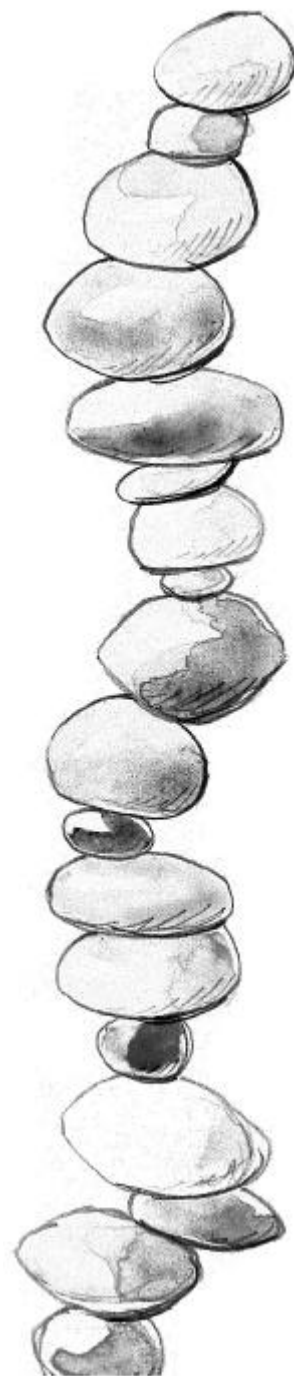
Introduction générale

Grains de riz, petits pois, sable, granulés, sel, poivre, perles, lentilles, balles de ping-pong, ballons, maïs, billes, comprimés, graviers, céréales, poudre...

Tous ces exemples ont un point commun : ils appartiennent à une même et grande famille qui est celle des milieux granulaires.

Éléments du quotidien, nous savons très peu de choses de ces grains qui nous entourent. Ils ont pourtant d'étonnantes propriétés que nous vous proposons de découvrir à travers l'exposition « Jeux de grains ».

Sous forme de tas, d'avalanches ou de constructions, venez observer de plus près la manière dont ils se comportent et réagissent à leur environnement.



Présentation de l'exposition

Vous retrouverez tous les textes grisés dans l'exposition.

Introduction

Dans les milieux granulaires, l'élément de base est le grain. Mais, selon le contexte, les grains peuvent avoir des comportements caractéristiques des trois états de la matière : liquide, solide et gazeux.

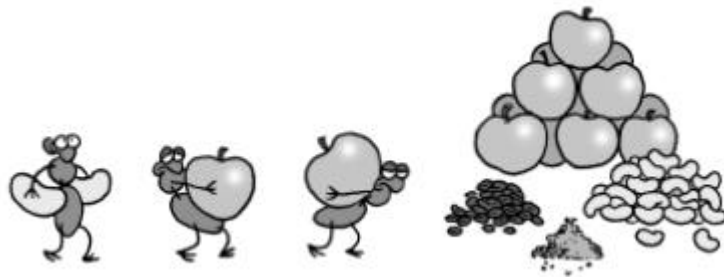
Au repos, chaque grain a sa propre forme. Ils sont en contact les uns avec les autres et ils sont immobiles. Les grains se comportent ici comme les particules élémentaires des solides.

Quand les grains s'écoulent, ils prennent la forme du récipient qui les contient. Les grains sont toujours en contact, mais peuvent glisser les uns sur les autres. Cela s'apparente à l'état liquide.

Dans les vents de sable, les grains sont en perpétuel mouvement. Cela imite l'état gazeux.

Table-1-

Du sable aux grains



Jeux de grains

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Haricot ? Poivre ? riz ? café ?

Plongez la main dans un sac en toile de jute et devinez de quel grain il s'agit.

Que retenir ?

Dans notre vie quotidienne, nous rencontrons une multitude de matières à l'état granulaire.

Cela va de l'industrie des granulats pour la fabrication de poudre, graviers, bétons... à l'industrie agro-alimentaire qui produit, stocke, conditionne et distribue une grande diversité de graines ou de produit sous forme granulaire.

Cette manipulation de grains oblige les industriels à concevoir des machines capables de travailler et manipuler ces grains.

Tas de sable

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Mettez du sable dans le pot.

Prenez une forme et placez la sur le sable.

Maintenez la forme par la tige et retournez le pot.

Laissez le sable s'écouler et observez le tas de sable.

Essayez les diverses formes.

Que retenir ?

Les tas de sable obtenus prennent des structures qui révèlent la forme placée sous chaque tas.

Les angles des pentes de sable sont généralement constant

Table -2-

Du bon empilement

Comment empiler des fruits sur un étal ?

Il existe de nombreux empilements possibles dans un tas de sable. Le plus souvent désordonnés, ils peuvent être aussi très ordonnés, c'est-à-dire beaucoup plus compacts et rigides. On parle alors d'empilements réguliers.

Texte panneau du module :

*« Remplis ton panier d'oranges,
tu crois qu'il est plein ?
En réalité, il est plein de vide.
Tu peux encore y mettre des noix et des pois chiches. » Proverbe arabe.*

Observez un sablier. Le sable s'y comporte tout à la fois comme un liquide ou un solide. Ces états de la matière correspondent à des empilements désordonnés des grains.

Les matériaux granulaires, des grains de sable aux roches volcaniques, des céréales aux médicaments, font aujourd'hui l'objet de recherches aux applications nombreuses : dans l'agroalimentaire, la pharmacie, les cosmétiques, les bétons...mais aussi les glissements de terrain, les avalanches, les déserts ou même...les anneaux de Saturne.

En aparté :

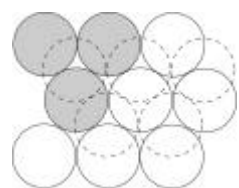
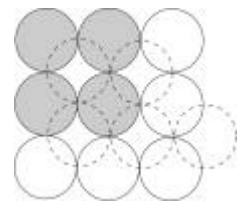
Le maraîcher et ses fruits

Pour construire une pyramide de fruits, le maraîcher commence par disposer une première couche de fruits en contact entre eux en formant un carré.

Cette mono couche de fruits peut se prolonger aussi loin que l'on veut.

La deuxième couche correspond à placer les fruits dans les creux laissés par la première couche. En continuant ainsi, couche après couche, et en diminuant régulièrement le nombre de fruits par couche, il se forme une pyramide, structure ordonnée.

Un autre empilement possible et plus compact est de partir d'une base triangulaire. Les autres couches de fruits sont placées dans les creux des couches inférieures :



Des empilements bien réguliers ?

Spontanément, quand on verse des grains dans un récipient, ils s'empilent n'importe comment. On parle d'empilement désordonné ou irrégulier.

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Versez les billes dans la pyramide vide.

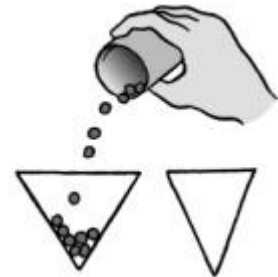
L'empilement est-il régulier ? Recommencez avec l'autre.

Que retenir ?

L'empilement est régulier dans la pyramide où l'angle au sommet de chaque paroi vaut 60° .

On peut calculer la compacité de l'empilement : c'est le pourcentage de volume occupé par les billes par rapport au volume total de la pyramide. Pour des billes de tailles identiques, elle est de 74 % environ, comme dans un tas d'oranges bien empilées. C'est la plus grande valeur que l'on peut obtenir dans les empilements de sphères de même taille.

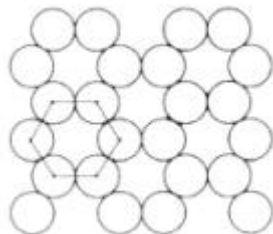
Pour l'autre pyramide, les angles des parois sont de 50° et provoquent un empilement irrégulier. La compacité peut descendre jusqu'à 60 % comme dans les sacs de billes mal rangées ou dans un tas d'oranges en vrac.



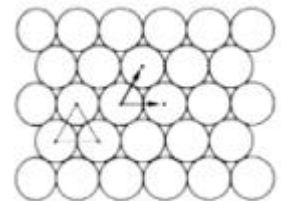
Sur une idée de Stéphane Bourlès (Université de Rennes) et Patrice Jenffer (ESPCI-Paris)

☞ Dans les empilements réguliers (type cristal), des motifs géométriques élémentaires se répètent. Par exemple, il existe :

L'Arrangement hexagonal :

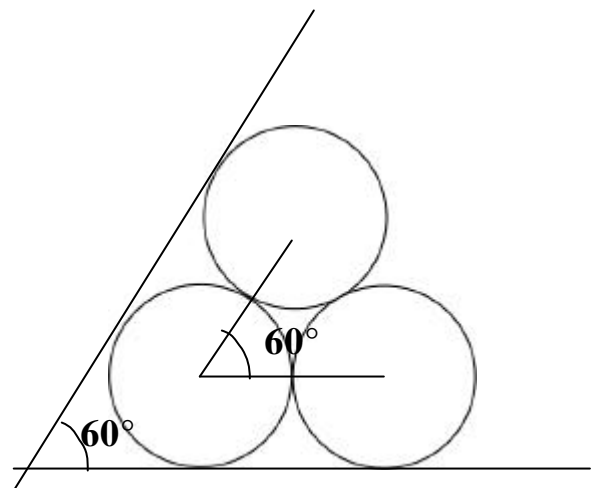


L'Arrangement triangulaire :



Dans ce type de réseau, un angle de 60° est à l'origine de la construction régulière.

Ceci explique que la pyramide ayant pour base un angle de 60° permet un arrangement régulier.



Régulier ou irrégulier ?

Le milieu granulaire peut se comporter comme un solide : au repos, les grains sont en contact permanent les uns avec les autres : ils forment un empilement plus ou moins compact.

Les grains peuvent également se comporter comme un liquide : ils ont alors des contacts intermittents entre eux, et l'ensemble est en mouvement, les grains s'écoulent.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Prenez une des plaques. Tournez-la doucement sur le côté.

Observez l'empilement des billes.

Quand est-il ordonné ? Quand est-il désordonné ?

Que retenir ?

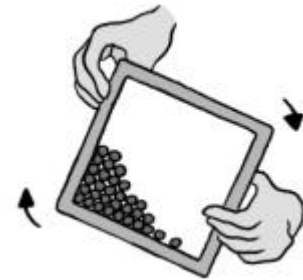
En inclinant légèrement la plaque contenant les petites billes, on peut obtenir un empilement régulier.

Curiosité : En la secouant un peu, les billes s'agitent comme dans un liquide.

En secouant plus fort, on a un mouvement désordonné des billes qui sont séparées sauf lorsqu'elles se choquent : on a l'image d'un gaz.

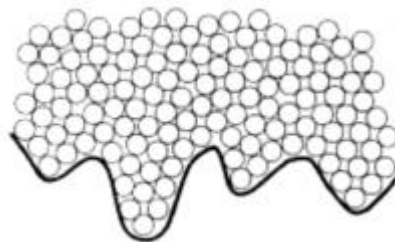
Avec les grosses billes, on obtient un empilement régulier hexagonal comme le font les alvéoles des nids d'abeilles ou un empilement irrégulier avec des lignes de fractures, de cisaillements, comme le montrent les défauts de certains matériaux solides.

Sur une idée de Daniel Bideau et Stéphane Burlès (Université de Rennes)

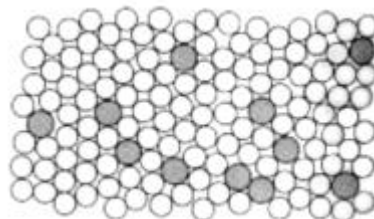


☞ On obtient des empilements irréguliers, par exemple, quand :

- Les grains sont disposés sur un bord irrégulier :



- On ajoute des grains de plus gros diamètres :



L'ordre dans les pyramides

La compacité varie selon l'angle de la pyramide formée par l'empilement. Mais aussi selon la forme de sa base.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

En partant de l'une des bases, réalisez une pyramide régulière. Recommencez avec l'autre base.

Quand l'empilement est-il le plus compact ?

Que retenir ?

L'empilement de gauche est un empilement de type cubique simple, où chaque bille est le sommet d'un cube. La densité d'empilement est de 52 %.

Celui de droite constitue l'empilement des tas d'oranges et de nombreux systèmes cristallins. On le trouve dans l'aluminium, le cuivre, le fer ou le nickel. C'est l'empilement le plus compact (74 %). Chaque bille, à l'intérieur de l'empilement, est en contact avec 12 autres billes qui sont placées aux sommets d'un cube et aux centres de ses faces (Cubique à Faces Centrées).

Celui du milieu est moins compact (68 %). On le trouve dans le chrome, la ferrite. Chaque bille est en contact avec 8 autres, qui sont aux sommets d'un cube (Cubique Centré).

Ces deux types d'empilement caractérisent plusieurs propriétés des cristaux macroscopiques.

Sur une idée du Crmd-Cnrs d'Orléans



Empilement régulier d'oranges



Empilement irrégulier d'oranges

Table -3-

Tasser, un art difficile !

Pourquoi le café moulu sous vide est-il si dur ?

Pour tasser le sable ou le compacter, notre première intuition est d'appuyer et d'exercer une contrainte de surface. Cela ne sert à rien.

Si on veut le tasser, il faut que les grains s'arrangent de manière à rendre l'ensemble plus compact, c'est-à-dire que le volume des espaces vides compris entre les grains soit diminué.

Texte panneau du module :

« Prenez une bonne mesure, bien secouée, bien tassée, car de la façon dont vous donnerez, de la même façon, il vous sera rendu . » Evangile selon saint Luc.

Minerais (charbons, bauxite...), matériaux de construction (sables, graviers, ciments...), industrie chimique (médicaments, lessives...), agroalimentaire (céréales, fruits et légumes, confiserie...), chaque année, l'industrie broie et transforme des milliards de tonnes de matériaux en grains.

Après les liquides, le matériau granulaire est le plus utilisé par l'homme. Extraction, broyage, concassage, triage, stockage des grains précèdent l'utilisation finale de beaucoup de ces matériaux.

En aparté :

Dur comme un roc

Le béton est un mélange de graviers et/ou de sable et de ciment. Pour obtenir un béton plus solide, l'idéal serait de minimiser les petits espaces vides qui subsistent entre les graviers et les sables et dans lesquels vient se nicher le ciment. Pour boucher ces espaces, il faut mélanger des graviers de tailles différentes, par exemple ajouter des toutes petites particules de silice (inférieure au micron) plus résistantes que le ciment.

Les industriels ont obtenu de très bons résultats en terme de solidité, au point qu'il serait possible de construire des gratte-ciels de plus d'un kilomètre de haut. De par le coût de ces nouveaux bétons, on les réserve pour la réalisation des grands ponts et des viaducs.

Secouer ou tasser ? !

Des petites vibrations verticales permettent de mieux **compacter** un tas de sable.

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Placez le tube à la verticale et frappez le doucement sur le côté avec un doigt. Jusqu'où descend le sable ?

Essayer d'obtenir le même résultat en tapant doucement et verticalement le tube sur le tapis.

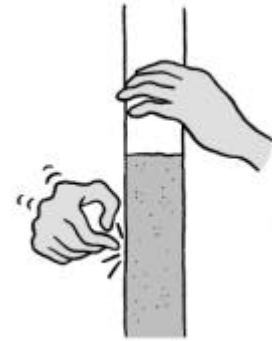
Que retenir ?

Tapoter le tube sur son côté provoque des vibrations qui permettent aux grains de sable de mieux occuper les espaces libres. Les contacts entre les grains se multiplient. Le sable est de plus en plus compact. C'est la compaction verticale par vibrations. Les grains s'arrangent et occupent un minimum d'espace.

Ceci est bien plus efficace que d'appuyer sur le sable par compression en tapant le tube sur le tapis.

Des grains, versés au hasard dans un récipient, occupent un volume qui peut varier de 10 à 15 % suivant le mode de remplissage. Les procédés industriels utilisant des empilements de grains sont en général très attentifs à un bon remplissage.

Sur une idée d'Olivier Pouliquen (Polytech'Marseille)



La technique du château de sable :

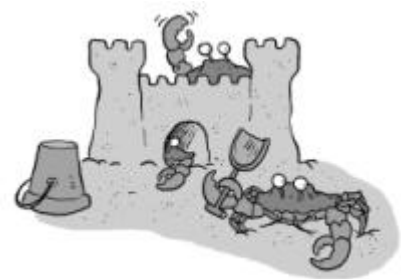
Pour construire un château de sable, on commence par remplir le seau de sable humide. Il est alors indispensable de « tapoter » l'ensemble pour compacter le sable au maximum. Une fois le seau retourné, il suffit de le désolidariser de son contenu en tapant une fois de plus dessus.

Pourquoi doit-on humidifier ni trop, ni trop peu le sable pour que le château tienne ?

C'est exactement comme quand vous sortez de l'eau et que vous vous roulez dans le sable. Vous êtes couvert de sable, collant et abrasif. Les grains collent à votre peau, l'eau y est bien sûr pour quelque chose.

Ce sont les « forces capillaires » qui font que l'eau se place entre les grains de sable, créant des ponts entre eux.

Les grains de sable humides vont donc s'accrocher mutuellement et donner un aspect solide au sable.



Secouez-le ! Secouez-la !

De grandes vibrations horizontales permettent de mieux compacter un tas de sable.

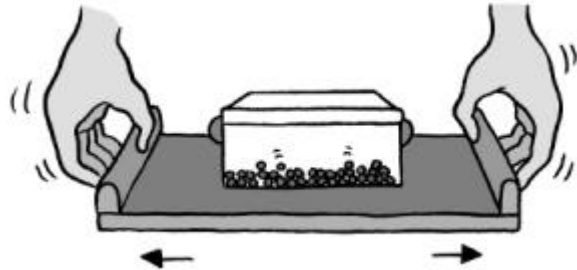
Texte de la manipulation:

Que faire ?

Secouez la cuve de gauche à droite dans un mouvement de moins en moins ample jusqu'à l'arrêt.

Inclinez doucement la cuve : les billes s'écoulent par nappes.

L'empilement est devenu plus régulier.



Que retenir ?

Un matériau granulaire peut devenir très compact lorsqu'on le secoue horizontalement. En secouant la cuve de droite à gauche, les couches supérieures de billes se déplacent un peu comme un liquide : ce mouvement permet aux billes de se réorganiser par nappes.

Les espaces entre les billes diminuent et l'arrangement final peut aller jusqu'à un empilement très régulier.

Sur une idée d'Olivier Pouliquen (Polytech'Marseille)



Empilement régulier d'oranges

Manipulation 3-3

$$1 + 1 = ???$$

Les espaces vides laissés entre des grains de même taille, peuvent être occupés par des grains de taille inférieure. Le tas est alors plus dense et peut atteindre une compacité maximale.

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Deux tailles de grains. Deux mêmes volumes de grains.

Que se passe-t-il si on les mélange ?

Quel va être le nouveau volume ?

Que retenir ?

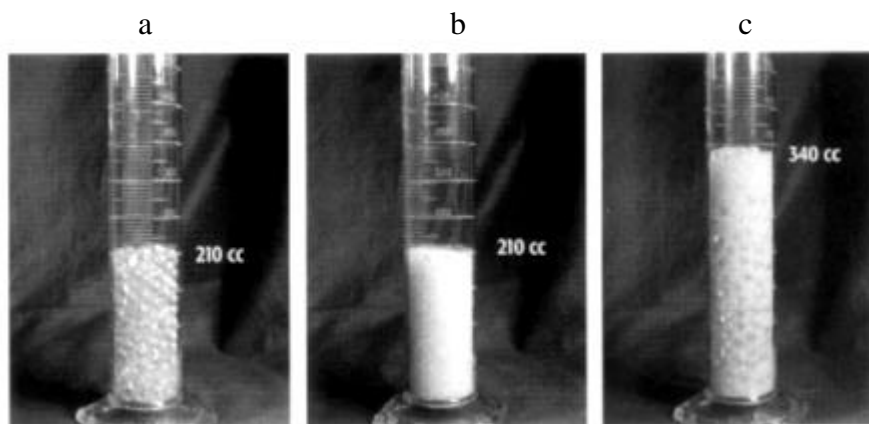
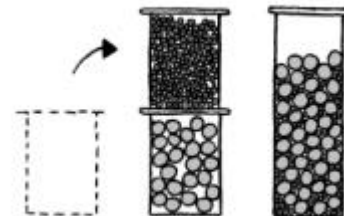
En mélangeant des grains de tailles différentes, on obtient un volume plus petit que la somme des deux précédents. Le matériau devient alors plus compact que ceux utilisés initialement. Cela fonctionne si les tailles des grains sont très différentes : les petits grains peuvent occuper les vides laissés entre les gros grains.

En utilisant des grains de plus en plus petits, pourrait-on remplir tous les vides ?

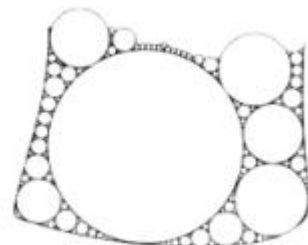
Cette propriété est utilisée depuis quelques années pour fabriquer le béton à hautes performances qui mélange différentes tailles de grains, des cailloux grossiers aux fines poudres de fumées de silice.

Cette propriété est utilisée depuis quelques années pour fabriquer le béton à hautes performances qui mélange différentes tailles de grains, des cailloux grossiers aux fines poudres de fumées de silice.

Sur une idée d'Étienne Guyon (ESPCI-Paris)



Lorsque l'on verse un volume (b) de billes de petit diamètre dans un même volume (a) de billes de plus gros diamètre, le volume total (c) est inférieur à la somme de a+b. Il y a compaction.



Remplissage « apollonien » donnant un tas le plus compact possible

Table -4-

Contacts : de proche en proche

Comment tracer une ligne ???

Dans un même tas, des points de contact existent entre les grains et des forces de pression se distribuent le long de ces points.

Texte panneau du module :

*« Un corps est liquide lorsqu'il se divise en plusieurs parties qui se meuvent séparément. »
René Descartes, Principes de la philosophie*

Les milieux granulaires ne se comportent ni en solide, ni en liquide. La répartition des contacts entre les grains et les forces qui s'y exercent est l'une des caractéristiques de l'état granulaire.

Grâce à l'utilisation de films polarisés, la technique de photoélasticité permet de visualiser les forces entre les disques : l'éclairage du matériau y fait apparaître les **lignes de force** qui relient les grains dans différentes directions. Tous les grains ne sont pas soumis aux mêmes efforts.

En aparté :

Des ponts aériens

Dans la construction des ponts, la structure est allégée et même ajourée. En effet, dans les milieux granulaires, tous les grains ne sont pas soumis aux mêmes efforts. Il en existe même qui ne subissent aucune contrainte. Ils sont en quelque sorte «inutiles» pour la cohérence ou la solidité du système. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir une structure pleine de haut en bas, on peut supprimer ces grains inutiles et ainsi aérer des constructions.



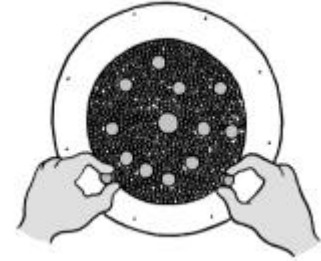
Pont neuf Albi

Où sont les contacts ?

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Appuyez sur le bouton pour allumer la lampe. Pressez sur les grains à l'intérieur du disque en tournant les deux boutons. Grâce au film polarisé, des lignes lumineuses apparaissent. Par quoi sont-elles provoquées ?



Que retenir ?

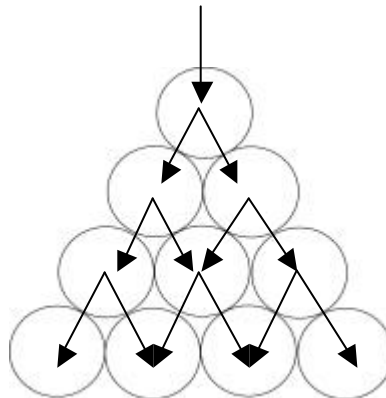
Quand vous appuyez sur un matériau granulaire, vous augmentez les contacts et les forces exercées sur les grains. Les films polarisés font apparaître en clair les lignes de forces auxquelles sont soumis les grains.

Ces lignes sont aussi aléatoires que la distribution des grains dans le disque. Elles montrent comment se répartissent les contraintes entre les grains du matériau. Beaucoup de grains ne subissent pas ces forces. Seuls quelques grains reçoivent cette force de pression et la transmettent à certains de leurs voisins.

Si l'on augmente la charge, on augmente le nombre de grains sollicités, mais la distribution des lignes de contraintes ne devient jamais uniforme.

Sur une idée de Francisco Melo (Université de Santiago du Chili)

Lorsqu'une force s'exerce sur une bille, elle se propage à l'ensemble des autres en suivant des lignes de contact :



La forme des lignes de contact, et donc des lignes de forces, dépend de la répartition des contacts entre les grains.

Où sont les forces ?

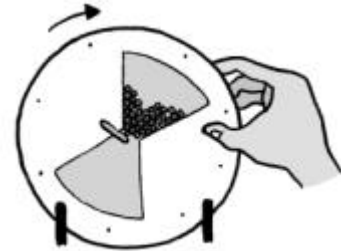
Les forces réparties dans un tas de sable en mouvement freinent la chute des grains.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Appuyez sur le bouton pour allumer la lampe. Tournez le disque et ouvrez progressivement le clapet pour que les grains s'écoulent.

Grâce aux films polarisés, vous pouvez observer les lignes de forces existant entre les grains en contact. Comment évoluent ces forces lors de l'écoulement ?



Que retenir ?

Dans un matériau granulaire au repos, ce sont les forces exercées sur le matériau qui créent les lignes de blocage et les arcs lumineux.

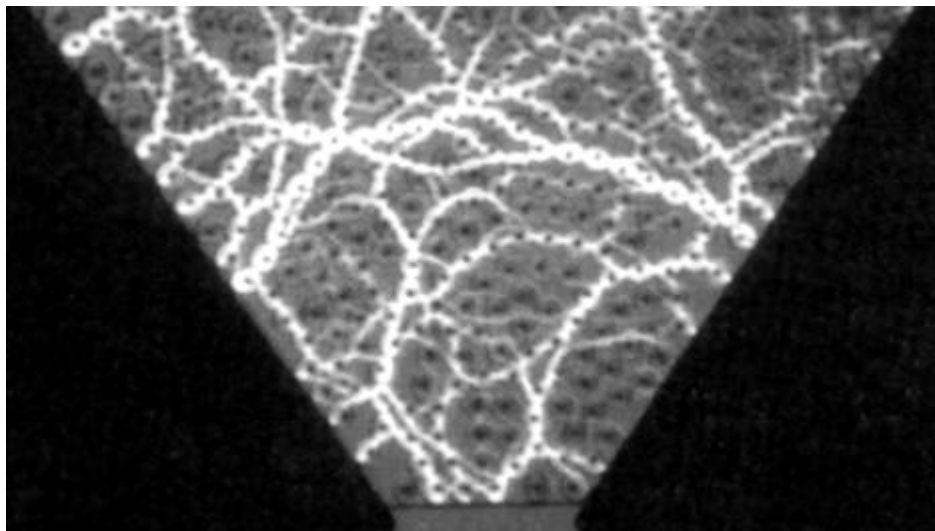
Dans un matériau granulaire en mouvement, comme ici, les lignes de force apparaissent et disparaissent. Elles agissent pour soutenir et répartir la masse du tas de grains.

L'apparition permanente d'arcs montre les forces qui freinent la chute des grains.

L'écoulement des grains est indépendant du poids de grains dans la colonne.

C'est le secret des sabliers.

Sur une idée de Francisco Melo (Université de Santiago du Chili)



Répartition des contraintes au sein d'un tas de disques

Quand les grains sont en mouvement, les contacts entre eux changent en permanence et donc les lignes de force aussi.

Clic-clac, le courant passe !!!

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Un petit coup d'allume-gaz devant la plaque de billes et les lampes s'allument.

Un petit choc sur le côté et les lampes s'éteignent !

Que retenir ?

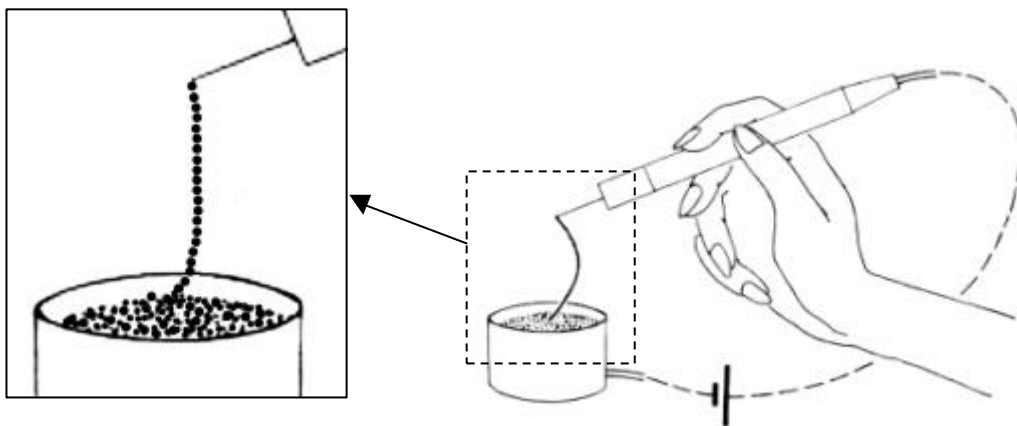
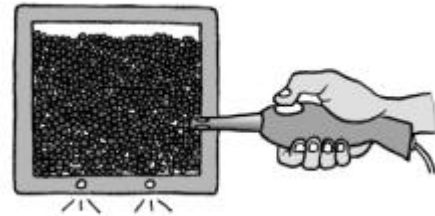
Les billes d'acier agissent a priori comme un conducteur d'électricité.

Dans ce circuit fermé, les plaques A et B sont reliées par au moins un «chemin» de billes d'acier qui se touchent toutes. Le courant devrait passer.

Mais, à cause des impuretés sur les billes, le courant ne passe pas : les diodes restent éteintes. L'allume-gaz provoque une onde électromagnétique dans les billes qui suffit à déclencher la propagation du courant entre les billes : les diodes s'allument.

Lorsqu'on tape sur le cadre, on change légèrement les contacts entre les grains et de nouveau le courant ne passe plus. Ce phénomène découvert par Branly en 1890 est à l'origine de la Télégraphie Sans Fil, mais il n'est pas encore bien compris aujourd'hui.

Sur une idée de Roland Faure (Polytech'Marseille)



Lorsque l'on applique une tension suffisamment haute à travers les grains, il est possible de tirer un chapelet continu de grains conducteurs par une électrode plongée dans un récipient contenant un ensemble de grains. Il se forme une structure continue, soudée et fragile.

Table -5-

Des effets de voûte

Pourquoi les ponts ont-ils souvent la forme d'une arche ?

Les voûtes jouent un rôle essentiel dans la pérennité des édifices construits par l'homme, mais aussi dans la stabilité et l'équilibre de tous les milieux granulaires.

Texte panneau du module :

« Que savons-nous si des créations de monde ne sont point déterminées par des chutes de grains de sable ? » Victor Hugo, les misérables

Dans une arche de pierres ou de grains, les forces se distribuent vers le bas et surtout vers les côtés. C'est le classique **effet de voûte** que les architectes utilisent, depuis très longtemps, dans les ponts et les cathédrales : des blocs de pierres sont maintenus solidaires en pression grâce à la charge qu'ils supportent, sans aucun type de mortier ou de liaison entre eux.

Dans de nombreuses architectures en ruine, comme l'aqueduc inachevé de Maintenon, les arches ont échappé à l'usure des siècles dans un équilibre parfait, sans destruction, malgré leur structure très mince.



Aqueduc de Maintenon



Pont du Gard

Pourquoi ça coince?

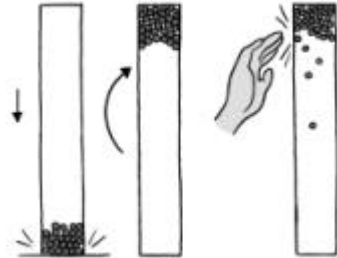
L'écoulement de milieux granulaires à travers un orifice est parfois bloqué. Cela dépend-il des grains, de la taille de l'orifice ou de la texture de la paroi du contenant ?

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Placez le tube à la verticale et tapez-le doucement sur la table.

Puis retournez-le. Que se passe-t-il ? Pourquoi ? Donnez un petit coup sur le tube et tout s'écoule !



Que retenir ?

Dans les contacts entre les grains, les forces se propagent de façon très irrégulière. Certains grains frottent les uns contre les autres et peuvent se coincer en s'appuyant sur les parois du tube formant ainsi une «arche» capable de supporter un grand poids.

Les grains du dessus, pourtant pas bloqués, sont alors soutenus par cette «arche» de grains.

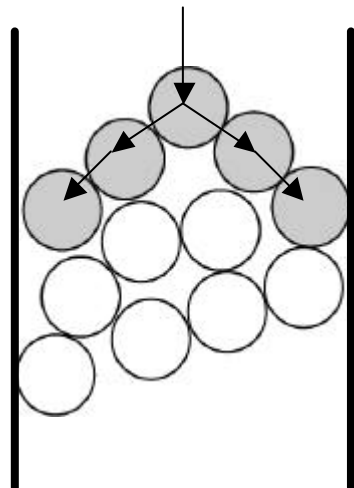
Dans l'industrie, ces effets de blocage dans les silos ou les trémies peuvent aller jusqu'aux phénomènes de colmatage des grains ou des graviers et conduire à de graves conséquences économiques voire des accidents.

Pour éviter ces effets de voûte, on utilise différents systèmes, de la vis d'Archimède au coup de marteau sur le silo.

Sur une idée de Patrice Jenffer (ESPCI-Paris)

Si on verse des billes dans un tube, il peut arriver que ça coince : une bille tombe sur d'autres, s'enfonce légèrement et exerce une force qui se propage vers le bas et les côtés. La chaîne des billes apparaissant en grisé s'appuie alors sur les parois et bloque l'ensemble.

La propagation d'une force n'est pas homogène car les contacts entre les billes ne sont pas tous identiques. On peut alors observer des effets de voûte à l'intérieur de la structure. Les grains situés sous la voûte ne subissent pas la force. Tous les grains ne sont donc pas soumis aux mêmes pressions.



Magiques, les pois chiches ?

A partir d'un certain seuil, le poids mesuré dans une colonne remplie d'un milieu granulaire n'augmente plus, même si l'on rajoute des grains. C'est le phénomène de **saturation de poids**.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Posez un pot vide sur la balance, placez le tube au-dessus et appuyez sur ON.

Versez doucement les grains dans le tube. Observez la balance au fur et à mesure du remplissage. Que remarquez-vous ?

Retirez le tube. Quel est maintenant le poids des grains ?

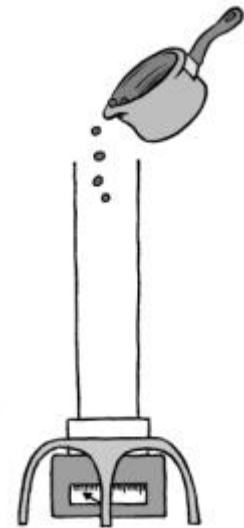
Que retenir ?

Lorsqu'on empile des matériaux granulaires dans un récipient, il se forme des voûtes le long desquelles se transmettent les forces, en particulier le poids.

Ces voûtes s'appuient sur les parois latérales et les forces sont réparties le long des arches de grains.

Au fur et à mesure que l'on ajoute des grains, leur poids ne s'exerce plus verticalement sur la balance mais latéralement sur les parois comme dans un silo.

Remarque : Si l'on fait la même expérience avec de l'eau, le poids de la colonne d'eau se retrouve totalement sur la base du tube.



Sur une idée d'Olivier Dauchot et François Daviaud (CEA Saclay)

Le poids des grains est une force verticale qui, par effet de voûte, se dissipe partiellement dans les parois du tube. Ces parois ne reposant pas sur le plateau de la balance, les forces ne sont pas transmises et ne sont donc pas mesurées. Si les parois du tube reposaient sur le plateau de la balance, le poids des grains continuerait à augmenter proportionnellement à la hauteur de grains versée.

Le silo à grains :

Si le remplissage se fait avec un entonnoir, on remarque que le poids augmente au début comme le veut la quantité de sable, mais lorsque la hauteur atteint environ le diamètre du silo, le poids mesuré n'augmente pas comme il le faudrait. En effet, les micro voûtes reportent les forces et les pressions vers les parois du silo qui supportent ainsi une bonne partie du poids des grains.

Lorsque l'on remplit le silo par couches successives horizontales, ce phénomène est considérablement réduit.

Collé ! Collé !

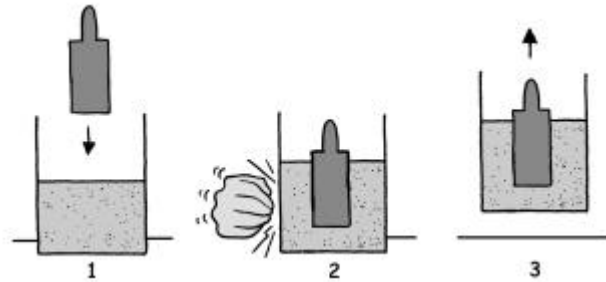
Un **effet de voûte** peut être très puissant...Mais la moindre perturbation le fragilise instantanément. Les voûtes résistent très bien à la compression, mais cèdent facilement sous l'effet de quelques ébranlements et vibrations horizontales.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Placez le grand bâton dans un pot. Versez du sable dans le pot. Frappez longuement à petits coups répétés les parois du pot pour tasser les grains avec le 2e bâton.

Soulevez doucement le bâton, il colle !!!



Que retenir ?

Comment un bâton peut-il soulever le récipient rempli de sable ? Ce n'est pas de la magie, c'est un tour de... forces.

Quand on tasse les grains autour du bâton, on augmente le nombre de contacts entre les grains. On crée des arches qui concentrent leur force entre les parois du récipient et le bâton. Quand vous levez le bâton, celui-ci semble être "collé" aux grains. En fait il est bloqué par les frottements.

Mais cet équilibre de forces est très précaire : il suffit que quelques grains changent de place pour que les autres grains s'écartent et que le bâton ne soit plus «collé». Une simple pichenette sur le vase et le bâton glisse.

Sur une idée de Jacques Duran (ESPCI, Paris)

Comment planter un parasol dans le sable ?

Taper dessus est peu efficace.

Il est préférable de commencer à le poser puis le faire tourner autour de sa pointe. Grâce à ce mouvement de rotation, les grains de sable se réorganisent et se tassent autour du pied. Il se forme alors une structure compacte et le parasol est bloqué par les frottements et les forces qui s'exercent dessus.

Plus que des phénomènes de voûtes, il s'agirait ici du principe du forage : on crée une distance entre le bâton et le sable.

Table -6-

Le secret des sabliers

Pourquoi le sablier est-il un bon chronomètre ?

Texte panneau du module :

*« Par le sommet ouvert de son cône inversé
Il laisse s'écouler le sable minutieux,
Or graduel, qui remplit en tombant
Le concave cristal qui est son univers. » Jorge Luis Borges, le sablier, l'horloge le sable*

Lorsque des grains, des graviers...s'écoulent dans un récipient, ils subissent de très nombreuses interactions.

Ils sont mis en mouvement les uns par rapport aux autres : ils glissent, ils roulent les uns sur les autres, ils glissent sans rouler, ils roulent sans glisser...ils se choquent, ils se frottent les uns aux autres dans le plus grand désordre apparent.

Et pourtant, dans un sablier, le débit du sable reste constant pratiquement jusqu'à la fin de l'écoulement.

C'est le secret des sabliers !



Sablier

Rien ne sert de courir...

L'avantage des sabliers sur les clepsydes *, dans la mesure du temps, est que l'écoulement du sable est régulier alors que celui de l'eau ne l'est pas. Cette différence fondamentale de comportement prouve que le sable ne coule pas comme un liquide ordinaire.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Du sable dans un tube, un même volume d'eau dans l'autre. Retournez le tout. Lequel s'écoule le plus vite et régulièrement ? Quel est le meilleur matériau pour mesurer le temps, l'eau ou le sable ?

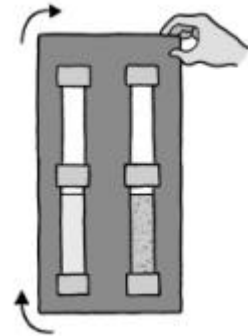
Que retenir ?

L'histoire n'enregistre pas avec certitude la date lointaine où clepsydes et sabliers ont été inventés.

Dans le tube qui contient l'eau, le débit diminue au fur et à mesure que le tube se vide : la pression de l'eau, qui dépend de la hauteur d'eau, diminue.

Dans le tube qui contient le sable, le débit reste régulier jusqu'à la fin. L'explication tient à l'effet de voûte : la colonne de sable s'appuie par friction sur les parois et son poids est porté par les parois du tube ; seules quelques couches au-dessus de l'orifice appuient verticalement sur les grains près de l'orifice.

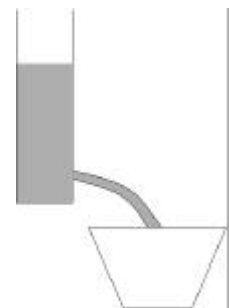
Sur une idée de Patrice Jenffer (ESPCI-Paris)



Le principe des **clepsydes**, horloges à eau, est extrêmement simple:

Une clepsyde est un récipient contenant de l'eau qui s'écoule par un trou. A l'intérieur, des graduations permettent de mesurer le temps. Si le récipient est cylindrique, le débit ralentit au cours de l'écoulement. Celui-ci est d'autant plus rapide que la colonne d'eau est haute.

Dans tous les cas, le récipient étant ouvert, l'eau est en contact avec l'air ambiant.



Le principe de fonctionnement des **sabliers** est très proche de celui de la clepsyde :

Un sablier est constitué de deux ampoules scellées, reliées par un petit canal présentant un étranglement, par lequel doivent passer des petits grains de sable fin, contenus dans le vase supérieur pour atteindre le vase inférieur.

Ils étaient utilisés, à l'origine, pour mesurer la durée d'un tournoi, d'un sermon, d'une leçon, du travail dans un atelier.

* voir glossaire

Ils font des bulles...

L'air contenu dans les chambres inférieure et supérieure d'un sablier joue un rôle dans son bon fonctionnement.

Texte de la manipulation :

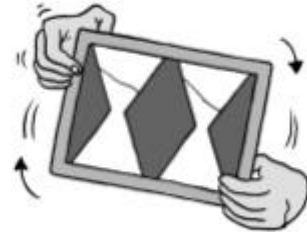
Que faire ?

D'un côté du sable et de l'autre de l'eau.
Retournez l'ensemble et observez les deux écoulements.

Que retenir ?

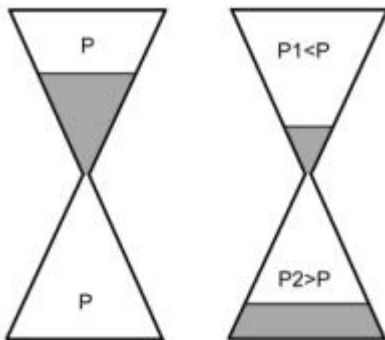
Dans le sable comme dans l'eau, on voit des bulles d'air remonter. Cela se produit dans les sabliers mal conçus où la taille de l'orifice est grande et l'on obtient des blocages et des écoulements intermittents. Le sable, en s'écoulant vers le bas, cause une surpression de l'air qui remonte et s'oppose à l'écoulement. Ceci persiste tant que l'air n'est pas passé à travers les grains dans le compartiment supérieur où la pression est plus faible.

Il en est de même avec une clepsydre (ou horloge à eau) où l'eau qui descend peut être bloquée par l'air qui vient du bas.



Sur une idée du Forum des sciences-CCSTI Nord Pas de Calais

L'écoulement de l'eau dans un récipient clos et avec un goulot dépend de différents paramètres :



Au départ, il existe une pression (P) égale dans la partie supérieure et inférieure du récipient.

Pendant l'écoulement, le volume d'air dans la partie supérieure augmente, la pression diminue. Inversement, dans la partie inférieure du récipient, le volume d'air diminue et la pression augmente.

Il arrive un moment où l'écoulement s'arrête.

Pour que l'eau puisse continuer à s'écouler, il faut que les deux pressions se rééquilibrent donc que l'air circule entre le bas et le haut. Des bulles d'air apparaissent donc quand le rééquilibrage des pressions peut se faire.

On rencontre ce phénomène dans les fontaines à eau ou quand on se sert du lait en brique. Il faut une entrée d'air pour rééquilibrer les pressions et donc obtenir un débit régulier.

Le niveau baisse ?

Le sable mouillé se comporte exactement à l'inverse d'une éponge. Quand on le presse, l'eau s'arrête de couler.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

A quel niveau est l'eau dans le tube ?

Appuyez avec vos deux mains sur le sac contenant le sable.

Observez le niveau de l'eau.

Que retenir ?

Les matériaux granulaires sont à l'origine de phénomènes qui défient notre intuition naturelle.

Le sable à l'intérieur de la poche est bien tassé : les espaces vides entre les grains sont réduits au minimum. En appuyant sur la poche de sable, on force les grains à bouger les uns par rapport aux autres.

Ils sont donc obligés de s'écarter, produisant de plus grands espaces vides entre eux. Le volume de la poche augmente et l'eau vient remplir l'espace libéré entre les grains : le niveau d'eau dans le tube baisse.

C'est l'effet de dilatance.

Courrez sur le sable mouillé à marée basse, vous constaterez que le sable autour du pied s'assèche. Étonnant ?

C'est le même phénomène que dans notre expérience. Le sable au repos est compact, bien tassé. En posant le pied, on oblige les grains en surface qui étaient bien rangés à se déplacer et à s'écarter. La porosité augmente et crée un mouvement de succion d'eau autour du pied.

Sur une idée de Reynolds (1885)



Contrairement à ce que l'on pourrait penser, quand on appuie

sur du sable déjà bien compact, les grains s'écartent et laissent plus d'espace entre eux : le volume du tas de sable tend à augmenter !

C'est le phénomène de **dilatance**.

L'eau peut alors s'infiltrer dans les espaces libres.



Traces de pas sur du sable humide

C'est le physicien anglais Reynolds qui a mis en évidence ce phénomène, qui participe à la dynamique de tous les matériaux granulaires. On constate par exemple, que dans les avalanches de grains secs (attention... rien à voir avec les glissements de terrains, qui se rapprochent plutôt des coulées de boue), le mouvement est toujours superficiel. Il s'effectue en surface, là où la couche est moins dense car les grains y sont moins tassés.

Table -7-

Attention, avalanches !!!

Comment se déclenchent les avalanches ?

Chacun a pu observer des avalanches, naturelles ou provoquées, en inclinant une boîte contenant un matériau granulaire quelconque (sel, sucre, sable, riz). On sait ainsi que l'inclinaison d'un ensemble de grains au-delà d'un certain angle provoque un écoulement.

Texte panneau du module :

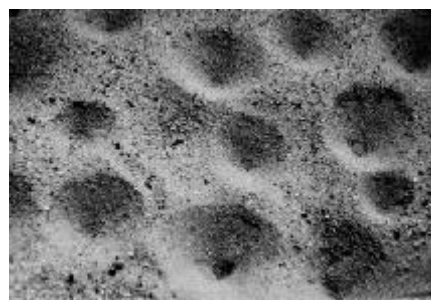
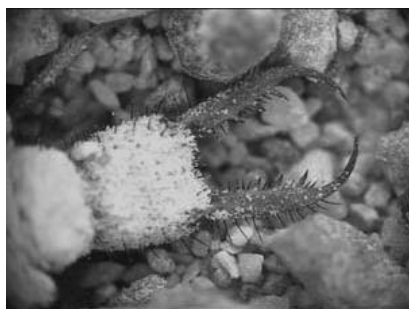
« Formés au contraire d'éléments ronds et lisses, les corps de nature liquide ou fluide, telle la graine de pavot, s'avalent aussi facilement que l'eau, car leurs atomes ne peuvent rester soudés ; le plus léger choc, et ils s'échappent, glissent... » Lucrèce, De natura rerum

Le sable qui s'écoule dans un sablier forme un cône dont l'angle reste à peu près constant pendant l'écoulement. Cet angle dépend de la nature des grains : la pente est plus grande si les grains sont rugueux, de forme irrégulière ou si le milieu est légèrement humide.

La question que se pose le physicien est celle du comportement critique du matériau au voisinage de cet angle. La connaissance de ces paramètres permettra-t-elle de mieux prévoir les avalanches de neige en montagne ?

En aparté :

Le fourmilion et les avalanches



La larve de ce petit insecte perfide et redoutablement intelligent fabrique un entonnoir de sable fin et sec pour capturer ses proies.

En haut du cratère, le sable est sec. En bas du cône, l'animal se cache en s'enroband de sable fin. Les parois de l'entonnoir présentant une pente particulièrement fragile, si un insecte s'aventure sur cette surface instable, il sera entraîné dans le fond de l'entonnoir. Si la proie arrive à se maintenir en haut, le fourmilion le déstabilise en projetant quelques graviers supplémentaires qui déclenchent une avalanche et la chute de son repas.

L'angle d'avalanche

Le déclenchement d'une avalanche est, entre autres, lié à l'angle que fait la pente du tas de grains avec l'horizontale.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

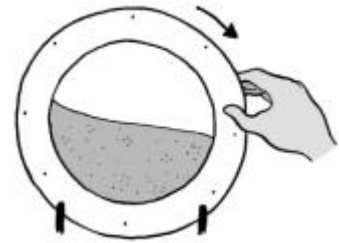
Tournez lentement le disque jusqu'à déclencher une avalanche.

Que retenir ?

Il existe deux angles limites d'avalanche, comme on peut le constater en inclinant progressivement le disque. Le tas reste fixe jusqu'à ce qu'une avalanche se déclenche. Elle ramène alors l'angle à une valeur inférieure de quelques degrés à l'angle de départ.

Si l'angle du tas est compris entre les deux valeurs extrêmes – l'état critique - il suffit d'une petite perturbation (le passage d'un skieur sur une pente neigeuse) pour déclencher l'avalanche.

Sur une idée d'Olivier Dauchot et François Daviaud (CEA Saclay)



L'angle de mouvement est l'angle maximal d'inclinaison du milieu granulaire juste avant l'avalanche. **L'angle de repos** plus petit que le précédent d'environ 2° est l'angle formé par le milieu granulaire et la surface horizontale juste après une ou plusieurs avalanches. Entre les deux angles, s'il y a un écoulement, il ne s'amplifie ni ne s'amenuise au cours de l'avalanche.

Avec du sable fin et sec, il ne semble pas possible de faire autre chose que des tas informes. Pourtant il suffit d'opérer avec une plaque plane, horizontale et de la surélever.

En effet, si on verse du sable sur cette plaque, il s'y accumule d'abord, puis se met à "couler" le long de ses bords, et le tas finit par prendre une forme qui ne change plus quand on rajoute du sable. Cette forme ne dépend que du contour de la plaque. Ainsi, avec une plaque dont le contour est un carré ou un cercle, on devine aisément la forme du tas obtenu: une pyramide à base carrée dans le premier cas et un cône de révolution dans le deuxième.

Les lignes de pente du tas sont des droites s'appuyant sur le bord de la plaque et faisant avec celle-ci un angle fixe appelé par les physiciens angle limite ou angle de repos. Cet angle, compris entre 30 et 35 degrés, ne dépend que des propriétés physiques du sable utilisé.

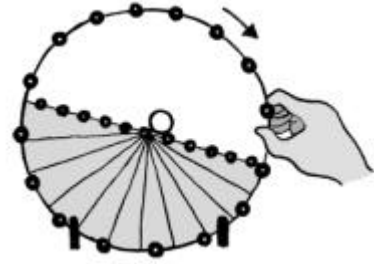


Tac-à-tac-à-tac !!!

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Tournez lentement le disque. Quand la balle part-elle ?
Recommencez l'expérience et essayez de faire partir la balle avant cet angle critique en la poussant légèrement avec votre doigt.



Que retenir ?

Les processus d'avalanche sont en général complexes.

Une première étape est de comprendre les mécanismes qui déterminent l'angle de démarrage d'une avalanche.

Comme la balle dans l'expérience, les grains dans les matériaux granulaires peuvent être dans trois états :

Stable : bien que dérangés par une perturbation, ils ne perdent pas leur état d'équilibre. Même poussée, la balle s'arrête (angle dans le vert).

Métastable : des grains perdent leur état d'équilibre si la perturbation est assez grande : la balle, une fois poussée, dévale la pente (angle dans le vert/rouge).

Instable : des grains perdent leur équilibre à la moindre perturbation (angle dans le rouge).

Sur une idée d'Adrian Dear (Espci – Paris)

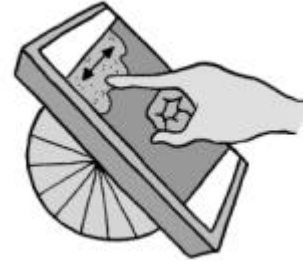
La valeur de l'angle d'avalanche dépend de la nature des grains : la pente est plus grande si les grains sont rugueux, s'ils sont de forme irrégulière ou si le milieu est légèrement humide.

Attention avalanches !

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Basculez doucement le plateau afin de recouvrir la surface de sable. Puis augmentez l'angle très lentement. Déclenchez alors une avalanche en passant doucement un doigt sur le sable. Si l'avalanche ne se déclenche pas, augmentez encore un peu l'angle, et recommencez.



Que retenir ?

Les avalanches se déclenchent sur des pentes qui sont autour de l'angle limite de stabilité.

Quand l'angle est trop faible, les grains dérangés (ceux que vous avez poussés avec votre doigt) perdent de leur vitesse à travers les collisions successives et n'entraînent pas suffisamment de voisins pour déclencher une avalanche.

Si l'angle est important, la vitesse de chute des grains augmente et peut amplifier l'énergie de l'avalanche.

Suivant l'angle, on peut observer des avalanches qui se propagent uniquement vers le bas ou à la fois vers le bas et le haut.

A vous d'essayer...

Sur une idée d'Adrian Dear (Espci – Paris)

Les avalanches de neige constituent un phénomène particulier des milieux granulaires puisqu'il s'agit d'un milieu humide.



Avalanche de neige

Table -8-

Des grains bien mélangés ?

Pourquoi les petites miettes sont-elles toujours au fond du paquet de céréales ?

En mélangeant des grains de tailles différentes, on observe un phénomène de ségrégation : les grosses particules remontent tandis que les petites se faufilent sous les grosses.

Texte panneau du module :

« Pour bien réussir un cake et éviter que les raisins ne tombent au fond pendant la cuisson, il suffit de les rouler dans la farine avant de les mélanger à la pâte. » Tante Sophie.

Si on les remue, tous les liquides se mélangent sans problème. Par contre les matériaux granulaires, différents par leur taille, la forme ou la masse de leurs grains ont une forte tendance à se regrouper par famille de grains. C'est le phénomène de ségrégation.

Pour obtenir des mélanges « homogènes » dans les produits élaborés à partir de matériaux granulaires, les industriels doivent mettre en œuvre des dispositifs mélangeurs sophistiqués qui répartissent uniformément gros grains et petits grains.

De la même manière, le pâtissier possède une astuce pour confectionner des cakes aux raisins secs bien répartis...

En aparté :

Du tire-bouchon au yaourt

Il est difficile de mélanger convenablement des sables ou des poudres lorsque les tailles des grains sont différentes. Les grains ont tendance à se regrouper entre grains de même nature et de même dimension. C'est pourquoi, inconsciemment, quand on mélange du sucre au yaourt, notre mouvement est tel qu'il conduit au meilleur mélange possible.

Ce double geste en spirale a été repris par les industriels pour homogénéiser leurs composés: les mélangeurs ont une rotation d'ensemble et utilisent en plus des vis d'Archimède.

Le principe de la vis d'Archimède, appelée aussi vis sans fin, est utilisée en mécanique dans la construction de machines utilisées pour faire monter le grain dans les silos, dans la fabrication des vis, des forets et, plus prosaïquement, des tire-bouchons.

Ça se mélange mal !!!

En appliquant un simple mouvement de rotation, un milieu composé de grains de deux tailles différentes ne se mélange pas.

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Deux types de grains qui diffèrent par leur taille.
Tournez lentement et régulièrement le disque.
Comment se répartissent les deux types de grains ?

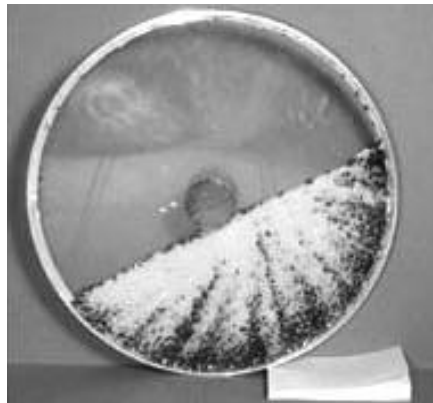
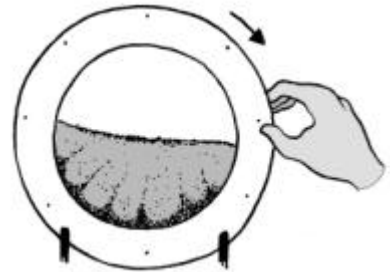
Que retenir ?

Suivant les différences de taille, de forme, de masse, suivant la vitesse de rotation du disque, les grains se séparent par strates alternées de grains identiques, où les plus petits se regroupent au centre du disque.

Lorsque l'on tourne le disque, la partie supérieure du sable coule comme un liquide alors que la partie inférieure reste à peu près solidaire comme dans un solide. La séparation des grains se produit en surface pendant l'écoulement.

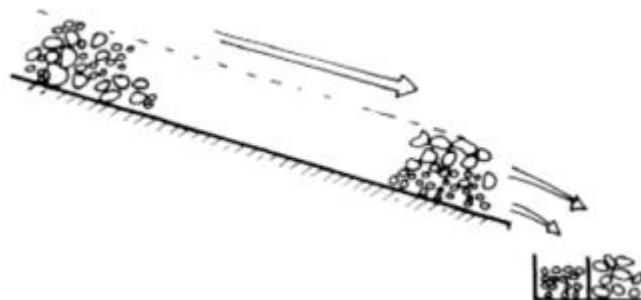
Ce phénomène est caractéristique des matériaux granulaires. Il oblige les industries qui les utilisent à mettre en œuvre des mélangeurs sophistiqués qui permettent d'obtenir des mélanges "homogènes".

Sur une idée de François Daviaud (Cea – Saclay)



Avalanche de grains de tailles différentes

Les gros grains surnagent et parcourent une distance plus longue en bout de chute.



Tapez dessous ou secouez !

Au repos, les gros grains se retrouvent toujours à la surface et les petits sont en profondeur.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Retournez un récipient pour mélanger les grains.
Tapez régulièrement sous le récipient ou secouez-le de bas en haut. Les gros grains vont réapparaître !

Que retenir ?

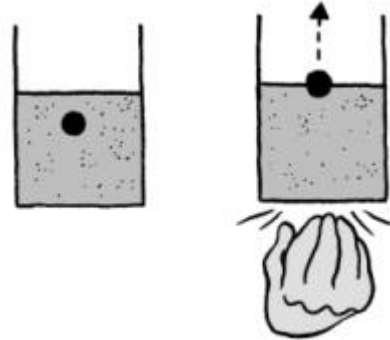
Si on secoue un mélange de “grains” de tailles suffisamment différentes, on constate que les gros grains remontent en surface. C’est ainsi que, dans un paquet de céréales, les petits débris restent au fond.

Différents mécanismes sont à l’origine de ce phénomène :

?? Si la différence de taille entre les grains est importante, les petits pourront se faufiler dans les espaces vides laissés par les gros... et les soulever progressivement. C’est ce qui se passe dans un champ lorsque le lessivage par l’eau de pluie fait remonter les grosses pierres.

?? l’agitation du récipient provoque un mouvement de convection de l’ensemble des grains qui les fait tous remonter.

Sur une idée de Patrice Jenffer (ESPCI-Paris)



Quel jardinier n’a pas été agacé par ces cailloux qui réapparaissent sans cesse à la surface de la terre ?

De même les coquillages finissent toujours par remonter à la surface du sable.

Les grains de sable ou les particules de terre, en se faufilant, passent sous les cailloux (ou les coquillages) et les soulèvent.



Bord de plage



Champ de cailloux en Algérie

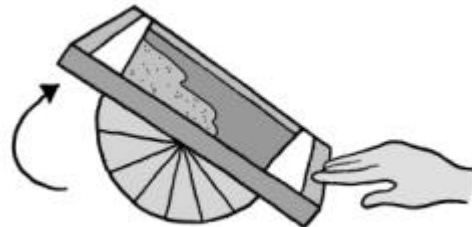
Les doigts d'avalanches

Même pendant une avalanche, les grains de tailles différentes tentent de se séparer. Les gros grains roulent facilement sur les petits.

Texte de la manipulation :

Que faire ?

Deux types de grains qui diffèrent par leur taille.
Mélangez-les d'un côté du plateau.
Basculez doucement le plateau.
Comment les grains de sable s'écoulent-ils ?



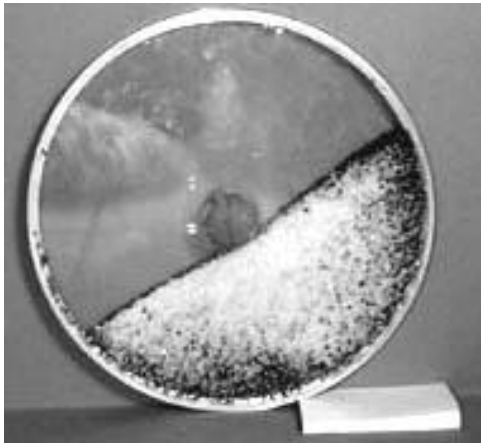
Que retenir ?

Un pierrier en montagne montre souvent une répartition graduelle des gros blocs rocheux (en bas de l'éboulis) puis des pierres et des petits cailloux (au sommet). On observe ici le même phénomène.

Au cours de l'avalanche, les gros grains remontent en surface où ils sont moins freinés. Ils avancent alors plus vite, viennent s'accumuler au front de l'éboulis et peuvent bloquer l'écoulement par endroit, ce qui forme les doigts d'avalanche.

Dans l'industrie, pour éviter ce phénomène de ségrégation, on utilise des mélangeurs plus ou moins complexes en fonction de la quantité et du coût des matériaux. Ces problèmes concernent aussi bien les industries alimentaires, les cimentiers que les mélanges de poudres dans les propulseurs de lanceurs de satellites.

Sur une idée d'Olivier Pouliquen (Polytech'Marseille)



Résultat obtenu après rotation rapide, autour de son axe, d'un cylindre contenant un mélange de petits grains sphériques blancs et de gros grains de verre pilé noir.



Résultat obtenu à partir du mélange de gauche, après quelques tours en rotation lente

On observe une stratification en bandes alternées noires et blanches. Il s'agit d'une auto-organisation spectaculaire du milieu granulaire due à la différence des deux angles d'avalanches des grains blancs et noirs.

Table -9-

Les grains, un nouvel état de la matière ?

Pourquoi le sable fait-il des vagues ?

Texte panneau du module :

« *Quand vous traitez de l'écoulement de l'eau, n'oubliez pas d'évoquer l'expérience puis la raison* ». *Léonard de Vinci*

Sous l'effet des phénomènes extérieurs, vents, vibrations, écoulements..., les matériaux granulaires subissent sans cesse des mouvements internes et de surface qui réorganisent la forme qu'ils prennent et fait varier leur état physique.

Ainsi, ils peuvent se comporter comme un solide comme la majorité du sable formant une dune, comme un liquide, quand un pan de la dune s'effondre, ou encore comme un gaz quand le vent souffle et entraîne les grains de sable.



Dunes de sable



Barkane (photographie réalisée en Mauritanie)

Dune barkhane en forme de croissant

Comme un liquide !!!

Texte de la manipulation :

Que faire ?

A l'aide du pinceau, étalez le sable de façon homogène dans le récipient placé sur le haut-parleur.

Appuyez sur le bouton pour mettre en marche le haut-parleur.

Comment se comporte le sable ?

Que retenir ?

Le sable subit des vibrations verticales qui permettent aux grains de bouger les uns par rapport aux autres. L'ensemble des grains se comporte alors un peu comme un liquide et des mouvements collectifs apparaissent.

En fonction de l'amplitude et de la fréquence des vibrations, il est possible de séparer les grains selon leur nature.

Ce phénomène est difficile à expliquer. Il est en relation avec l'auto organisation des grains en fonction des vibrations.

On peut dans une certaine mesure faire l'analogie entre le sable vibré et un liquide qui forme lui aussi des vagues à sa surface.



Sur une idée de Francisco Mélo (Université de Santiago du Chili)

Les sables mouvants :

Au bord de la plage ou d'un marais, il arrive que nos pieds s'enfoncent brusquement, alors que la surface du sol paraissait solide. C'est le phénomène des sables mouvants.

Quand le sable est suffisamment imbibé d'eau, chaque grain de sable est entouré d'une pellicule liquide qui retient le grain voisin (phénomène de capillarité).

Quand on ne remue pas le milieu, les grains sont ordonnés dans un réseau régulier. Sous l'effet de la pression, qui crée un état dynamique, il y a rupture des liaisons capillaires entre l'eau et les grains ; ceux-ci se regroupent et le liquide surgit d'un coup, d'où l'impression de liquéfaction.

La résistance du sol est modifiée, le poids et le mouvement de la personne peuvent entraîner l'enlèvement.

Un lit fluidisé

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Appuyez sur le bouton pour amener un flux d'air sous le sable.

Observez les structures qui se forment.

Que retenir ?

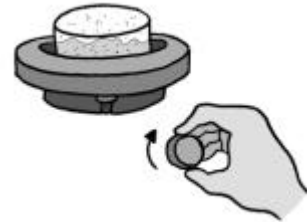
On peut maintenir les grains en suspension en les plaçant dans un jet d'air vertical.

L'air, soufflé dans le tube, provoque un "effet d'ébullition" du sable en s'échappant à travers les grains. Les grains ainsi en suspension se comportent comme une sorte de liquide et plus du tout comme un solide : on ne peut plus faire un tas.

Les lits fluidisés jouent un rôle considérable dans les procédés industriels car ils permettent d'assurer un contact permanent et renouvelé entre une phase solide divisée, donc présentant une grande surface, et un fluide.

Dans les centrales thermiques, on utilise ce principe pour brûler les poussières de charbon. De même, le craquage du pétrole permet d'obtenir des huiles légères à partir de pétrole brut. La fluidisation fait appel à des réacteurs de plusieurs mètres de diamètre.

Sur une idée d'Olivier Pouliquen (Polytech'Marseille) et de Francisco Mélo (Université de Santiago du Chili)



Lors d'une réaction chimique, deux substances sont en contact. Par exemple, pour brûler du charbon, il faut le mettre en contact avec de l'air. Si le charbon est à l'état de poussières ou sous forme de grains, la surface de contact est plus grande que si le charbon est en bloc : la combustion est donc plus efficace.

Dans l'industrie chimique, les catalyseurs utilisés pour accélérer les réactions sont le plus souvent en poudre. Ils sont alors plus efficaces que s'ils étaient compacts.

Une fabrique de dunes

Le transport des grains par le vent obéit à certaines lois physiques pas encore toutes élucidées...

Texte de la manipulation:

Que faire ?

Utilisez la spatule pour aplanir le sable.
Faites tourner le récipient d'un côté et de l'autre dans un mouvement saccadé et régulier jusqu'à voir apparaître des petites dunes.



Que retenir ?

Il ne semble pas possible de produire des dunes de petite taille en soufflerie. Par contre, en plaçant un lit de sable sous l'eau, on peut obtenir des rides régulières comme celles que l'on peut observer sous la mer (grâce au mouvement des vagues) ou celles qui décorent les plages de sable et les dunes de sable (grâce au transport éolien).

Combinées à la palette de couleur des sables que l'on observe sur la surface des dunes, elles donnent cette incomparable esthétique du désert qui a fasciné Théodore Monod.

Sur une idée de Marc Fermigier et Patrice Jenffer (ESPCI Paris)

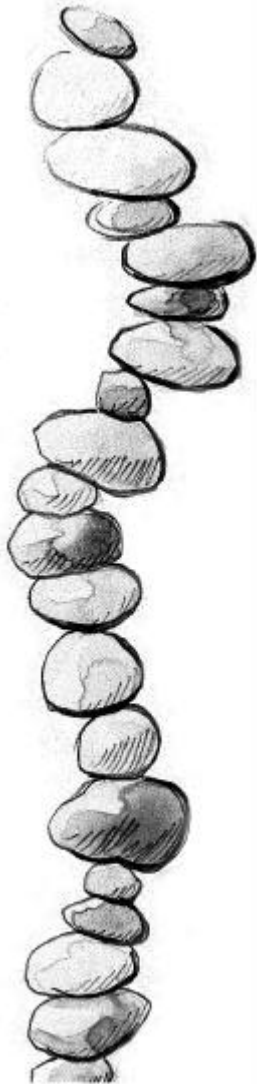
Dans les déserts de sable, le vent rasant laisse derrière lui des paysages étranges, comme des dunes barkhanes en forme de croissant, ou des immensités de rides régulièrement espacées, analogues aux surfaces striées des bordures de plages. Ces divers paysages résultent de l'interaction entre un fluide (le vent ou l'eau) et la matière en grains.

Les dunes sous-marines ressemblent aux dunes éoliennes mais sont beaucoup plus petites (en raison notamment de la plus grande densité de l'eau par rapport à l'air).



Rides de vagues sur la plage

Espace « graines d'éveil »



A l'intérieur d'un espace réservé à la découverte sensorielle des milieux granulaires et aux jeux utilisant des grains, les enfants peuvent s'amuser et réfléchir autour de différentes activités :

☞ Une malle est dédiée aux instruments de musique à grains : Maracas transparents, chékéré, bâton de pluie, sifflets, grelots, caisse claire transparente..., sont des jeux musicaux dont la sonorité dépend des grains utilisés.

☞ Une seconde malle aborde les jeux de construction : Jeu de construction à partir d'un empilement pyramidal de balles en mousse de diamètre préhensible par les enfants, jeu de construction avec des pièces cubiques ou rectangulaires pour comprendre l'existence d'une instabilité et d'une fragilité dans les empilements.

☞ Quatre niches intégrées dans le mobilier invitent les enfants à découvrir à l'aveugle différents types de grains de tailles, textures et poids variables.

☞ Une voûte à construire à partir de blocs permet aux enfants de pouvoir marcher ensuite sur leur propre assemblage et mettre en évidence la solidité que peuvent avoir certaines constructions.

Glossaire

Béton : Matériau de construction reconstituant artificiellement la roche, composé de granulats, de sable, de ciment, d'eau et éventuellement d'adjuvants pour en modifier les propriétés. C'est le matériau de construction le plus utilisé au monde, que ce soit en bâtiment ou en travaux publics

Catalyseur : Substance chimique qui accélère les réactions chimiques.

Classification des grains :

Diamètre des grains	Désignation
> 4 mm	Gravier
< 4 mm	Sable
< 0.250 mm	Sable fin
Forme	
	Ronde, aplatie, basaltique, concassée ou entière
Masse volumique	
> 3 kg/dm ³	Granulats lourds (baryte, minerai de fer, granulats d'acier)
2.6 – 2.7 kg/dm ³	Calcaire, quartz, granite, dolomite, grès...
< 2 kg/dm ³	Granulats légers (argile expansée, polystyrène)

Clepsydre : Un vase comportant un orifice d'écoulement est rempli d'eau, et le temps écoulé est déduit de la quantité d'eau recueillie. Mais certains paramètres interfèrent sur la fiabilité du système: la vitesse d'écoulement du liquide, et donc le débit, dépend de la pression au niveau de l'orifice, laquelle est fonction de la hauteur de liquide au-dessus de l'orifice, de la section de l'orifice, de la viscosité du liquide, ainsi que de la longueur du tube d'écoulement.

Aussi, les modèles les plus anciens ne pouvaient-ils donner que des résultats très approximatifs. En effet, dans un tel dispositif, le débit du liquide décroît à mesure que le récipient se vide. Les repères tracés sur le vase doivent donc être de plus en plus resserrés, du haut vers le bas, pour indiquer des intervalles de temps égaux.

Un perfectionnement important fut apporté lorsqu'on eut l'idée d'assurer un débit constant. Pour cela, il suffisait d'alimenter en permanence un premier récipient de telle sorte que l'apport en eau compense au moins l'écoulement de l'orifice. La mesure du temps se faisait alors sur un second récipient, gradué.

Compacité : Pourcentage du volume d'un tas occupé par ses grains. C'est l'inverse de la porosité.

Craquage du pétrole : Procédé de transformation des constituants les plus lourds du pétrole pour en obtenir des plus légers comme l'essence, le propane...

Dilatance : Possibilité pour un ensemble de grains compact de voir son volume augmenter lorsque les grains se déplacent.

Effet de voûte : Dans un empilement de grains, le poids des couches supérieures ne se répartit pas uniformément sur les couches inférieures. Les grains les plus sollicités se répartissent suivant des « arches » aléatoires qui renvoient la charge latéralement. Les voûtes ainsi formées peuvent perturber l'écoulement des grains.

Empilement ordonné : Empilement de grains rangés suivant un motif géométrique qui se reproduit régulièrement.

Etat vitreux : Etat intermédiaire dans lequel les molécules sont aussi fortement liées que dans le solide, mais sont disposées de manière un peu plus désordonnée. Les solides vitreux correspondent généralement aux verres. Ils possèdent les propriétés mécaniques des solides, mais ne fondent pas à une température constante bien précise. Les verres se ramollissent progressivement lorsqu'ils sont chauffés jusqu'à devenir liquides.

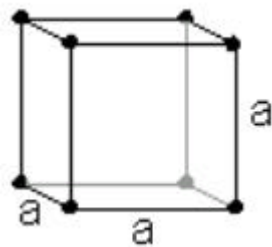
Film polarisé : Film transparent qui laisse passer la lumière en privilégiant une direction (horizontale, verticale...).

Onde électromagnétique : Onde constituée par la propagation d'un champ électrique et d'un rayonnement magnétique (ex : la lumière, les ondes radio...)

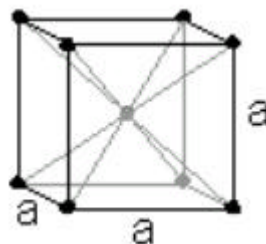
Porosité : Pourcentage du volume d'un tas non occupé par ses grains. C'est l'inverse de la compacité.

Structures ordonnées :

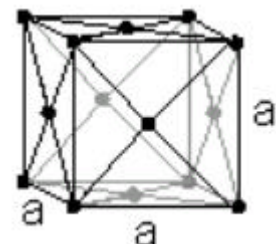
Structure cubique simple : les grains sont localisés à chaque sommet d'un cube.



Structure cubique centrée : les grains sont localisés à chaque sommet d'un cube et un grain est placé au centre.

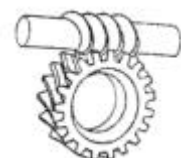


Structure cubique à faces centrées : les grains sont localisés à chaque sommet d'un cube et un grain est placé au centre de chaque face.



Vis d'Archimède : Vis sans fin inventée par Archimède pour faire monter l'eau nécessaire à l'irrigation.

De nos jours, la vis sans fin est utilisée pour entraîner une roue dentée.



Le présent document a été réalisé

en collaboration avec **Laurence Le Calvez** (professeur relais),
et l'équipe « **granulaires / mousses** » du groupe matière condensée
et matériaux (UMR-CNRS 6626)

par l'équipe des médiateurs scientifiques de l'Espace des sciences :

Michel Bouchet

[\(michel.bouget@espace-sciences.org\)](mailto:michel.bouget@espace-sciences.org)

Christelle Gony

[\(christelle.gony@espace-sciences.org\)](mailto:christelle.gony@espace-sciences.org)

Cécile Houget

[\(cecile.houget@espace-sciences.org\)](mailto:cecile.houget@espace-sciences.org)

Christelle Massol

[\(christelle.massol@espace-sciences.org\)](mailto:christelle.massol@espace-sciences.org)

Sandrine Tomezak

[\(sandrine.tomezak@espace-sciences.org\)](mailto:sandrine.tomezak@espace-sciences.org)

Jocelyne Vautier

[\(jocelyne.vautier@espace-sciences.org\)](mailto:jocelyne.vautier@espace-sciences.org)

Les dessins sont de **William Augel**



Service des expositions et des animations

6 place des Colombes

35000 Rennes

Tél : 02 99 35 28 26

02 99 35 28 27

Fax : 02 99 35 28 21

Découvrez l'ensemble des activités de l'Espace des sciences sur :

www.espace-sciences.org