



# La physique du tas de sable

### UN ÉTAT PARTICULIER DE LA MATIÈRE



Dès le VII<sup>e</sup> siècle, les Chinois désireux de mélanger des grains de poudre noirs se trouvent confrontés aux propriétés étonnantes des matériaux granulaires. Ces grains n'aiment pas se mélanger et cela vaudra bien des déboires aux artificiers. Car ce n'est que vers 1450 que les frères Bureau, grands maîtres de l'artillerie de Charles VI, comprennent pourquoi les bombardiers ont la fâcheuse tendance à exploser entre leurs mains. Le problème vient de la pauvreté des mélanges de poudres composés de salpêtre, de soufre et de charbon de bois. Après avoir subi les cahots du transport, les mélanges initialement bien préparés se retrouvent en blocs distincts. Mais, cette tendance à la

« démixtion » n'a pas que de mauvais côtés. Depuis des siècles, les paysannes des bords du Gange l'exploitent pour trier les produits de la récolte. Placées dans des paniers à fonds plats inclinés, les différentes sortes de grains se séparent spontanément sous l'effet de légères tapes. Les premières études sur la matière granulaire apparaissent à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle.



**Charles Auguste Coulomb**, physicien français plus connu pour ses travaux en électrostatique, est alors

ingénieur militaire. Il s'intéresse aux talus érigés pour protéger les batteries d'artillerie et constate que, pour un matériau granulaire donné, la pente du talus ne dépasse jamais une certaine inclinaison. Il est le premier à décrire les différents angles d'avalanche du sable. La dilatance, une autre propriété importante des matériaux granulaires, est mise en évidence par Osborne Reynolds, un physicien anglais, en 1885. Elle rend indispensable la création de vides entre les grains avant toute tentative de déformation d'un bloc de sable. Un an plus tôt, l'Anglais Roberts s'intéresse au problème de l'écoulement des grains dans les silos. Il note que la pression à la

base d'un réservoir cesse d'augmenter quand la hauteur des grains dépasse le double de son diamètre (un phénomène, aussi surprenant que caractéristique des milieux granulaires). Dans un article publié en 1895, l'ingénieur allemand Janssen propose une explication. Pour lui, la gravité qui devrait entraîner les grains vers le bas et presser sur la balance se répartit horizontalement et appuie sur les



parois. Dix ans plus tard, l'Anglais **Lord Rayleigh** compare le phénomène à ce qui se passe lorsqu'un cheval est attaché par une corde à

un cylindre en bois. Pas besoin de nœud, de simples tours de corde autour du cylindre suffisent à retenir l'animal. Toutefois cela ne fonctionne qu'à partir d'un certain nombre de tours, tout comme l'effet de saturation dans le silo n'apparaît qu'à partir d'une certaine hauteur de grains.

### DES GRAINS DE TOUTES TAILLES

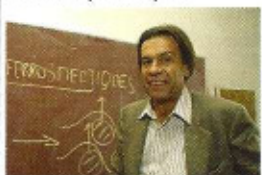
La matière granulaire englobe des objets dont les dimensions couvrent environ 13 ordres de grandeur. Et la physique qui régit l'évolution de ces systèmes dépend beaucoup de la taille et de l'environnement des grains. Les plus petits sont les particules qui constituent les fumées. Leur taille est comprise entre 100 nanomètres et 1 micromètre. Elles sont sensibles à la température ambiante et animées d'un mouvement erratique, le mouvement brownien. Viennent ensuite des particules dont la taille est comprise entre 5 et 100 micromètres. Elles forment ce que l'on appelle des poudres fines et sont très sensibles aux gaz environnants. C'est principalement le domaine de l'industrie chimique ou pharmaceutique. Puis, on passe à des grains dont les tailles sont comprises entre quelques centaines de micromètres et 3 millimètres. Leur comportement ne dépend plus de l'air ambiant mais des interactions de contact ou avec d'éventuels liquides environnants. On parle de milieux granulaires. Enfin, il existe dans la nature bien des granules dont la taille dépasse les quelques millimètres, et parfois même largement si on pense aux rochers, aux icebergs ou encore aux particules qui composent les anneaux planétaires.

### UNE PHYSIQUE TRÈS COMPLEXE

La matière granulaire ne se comporte ni comme un solide, ni comme un liquide, ni comme un gaz. On l'appelle parfois matière molle car elle subit des modifications importantes en réponse à de très faibles perturbations extérieures. De quoi rendre la tâche des scientifiques qui l'étudient bien compliquée. Et le fait que le système « tas de sable » soit terriblement dissipatif n'arrange rien. Les chercheurs sont incapables de dire ce que devient l'énergie initialement fournie à la suite des chocs et des frottements constants entre grains. Même les modélisations informatiques sont impuissantes. C'est la grande difficulté de la physique « à N-corps ». Les comportements collectifs des grains sont très différents de leurs comportements individuels. Ainsi la vision locale ne permet pas d'avoir une bonne image de l'ensemble. Une bille lancée sur un sol dur présente un comportement élastique alors qu'un sac de billes ne rebondit quasiment pas. L'impulsion initiale provoquée par la chute se propage de bille en bille en suivant un chemin aléatoire. L'impulsion initiale est progressivement atténuée. Ce qu'il en reste n'est pas suffisant pour faire rebondir l'amas de billes.

Une autre complication est possible : un ensemble de grains possède une infinité d'états d'équilibre. Et, comme le système est très dissipatif, il est aussi doué d'« hystérésis » c'est-à-dire que les milieux granulaires passent d'une position d'équilibre à une autre sans espoir de retour. Depuis plusieurs siècles, de grands physiciens se penchent sur toutes ces questions. Michael Faraday, Lord Rayleigh, Osborne Reynolds et plus

récentement **Pierre Gilles de Gennes** ont apporté leur pierre à l'édifice. Mais, il reste encore beaucoup à découvrir.



récentement **Pierre Gilles de Gennes** ont apporté leur pierre à l'édifice. Mais, il reste encore beaucoup à découvrir.

### OBSERVATIONS ET MODÉLISATIONS

Pour étudier les milieux granulaires, les scientifiques disposent de divers outils. En premier lieu, ils mènent des observations dans la nature et

effectuent de multiples expériences en laboratoire. Et, pour visualiser les phénomènes, ils n'hésitent pas parfois à employer des méthodes d'imagerie modernes. Arrive ensuite le temps de la modélisation. Ainsi, les avalanches peuvent aujourd'hui être simulées sur ordinateur grâce à des « automates cellulaires ». Leur objectif est de calculer les tailles et fréquences des avalanches en fonction du temps. Pour cela, on définit un système constitué d'un empilement de petits carrés placés en colonnes de hauteurs décroissantes. Puis, on fixe quelques règles. Par exemple, la différence de hauteur de deux colonnes adjacentes ne peut pas dépasser deux unités. Aini on peut simuler l'existence d'un angle d'avalanche critique. On laisse ensuite tomber au hasard un carré supplémentaire sur cet empilement et on observe l'évolution du système. Pour établir la taille et la fréquence des avalanches, on enregistre le nombre de petits carrés qui ont dévalé jusqu'au bord.

### LE TAS DE SABLE

Dans la nature, un empilement de grains se réorganise continuellement. L'humidité, les variations de température, les chocs ou les vibrations sont susceptibles de le faire évoluer lentement. Ainsi les grains ont naturellement tendance à



se resserrer. Mais, avec le temps, le tassement du sable se fait de plus en plus difficile. Au début, il y a entre les grains beaucoup d'espaces

vides à remplir. Il suffit d'en déplacer un ou deux pour tasser l'empilement. Puis les espaces vides se font plus rares et le tassement plus difficile. Il faut déplacer de plus en plus de grains pour libérer de la place. De telle sorte que le tas qui minimise les espaces libres n'est jamais atteint à partir d'un empilement désordonné. Pire, quoi qu'on fasse, on obtient toujours une même valeur limite. C'est l'empilement désordonné compact. Une observation pour laquelle les physiciens n'ont encore aucune explication.

### LES BALLASTS

La matière en grains est friable et labile dans certaines circonstances

mais peut aussi se révéler particulièrement solide et résistante. Ainsi, les rails des chemins de fer

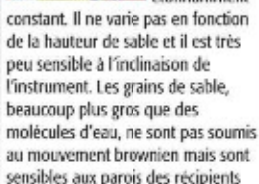


reposent sur du **ballast**, un lit compact de pierres dures, concassées et aux formes anguleuses dont les dimensions sont de l'ordre des quelques centimètres. Si l'érosion et la projection des graviers posent aujourd'hui quelques problèmes, on n'a pas encore trouvé mieux que les ballasts pour soutenir les rails. Un sol de terre ordinaire présente en effet une grande propension à absorber l'eau et à la retenir. C'est un grave défaut pour le soubassement d'une voie ferrée. Les graviers forment un milieu poreux qui permet à l'eau de mieux s'évaporer et s'écouler.

Et puis, un empilement de grains a une forte tendance à rediriger vers l'horizontale les forces verticales qui lui sont appliquées en un point. Ainsi le poids du train est redistribué sur le sol et non localisé sur les deux rails. D'autre part, le ballast de gravier est auto-adaptatif. Il devient de plus en plus dur lorsque la charge augmente. Plus on presse les graviers, plus les zones de contacts deviennent importantes et plus ils résistent à la déformation. Ainsi, soumis à une charge légère, les graviers sont très peu comprimés et l'empilement plutôt souple. Lorsque passe une lourde charge, les graviers se compriment et les contacts se multiplient. Le ballast est alors plus dur. Une propriété intéressante pour le confort des passagers et l'usure des trains.

### LA QUESTION DE L'ÉCOULEMENT

Observer l'écoulement du sable dans un **sablier** apporte une nouvelle preuve de la différence entre liquides et matière granulaire. Le débit d'un sablier est en effet étonnamment constant. Il ne varie pas en fonction de la hauteur de sable et il est très peu sensible à l'inclinaison de l'instrument. Les grains de sable, beaucoup plus gros que des molécules d'eau, ne sont pas soumis au mouvement brownien mais sont sensibles aux parois des récipients



### Grain de sable

105 m de haut, 2 700 m de long et 500 m de large

Dimension de la dune du Pilat, la plus grande dune d'Europe.

100 Hertz et 110 décibels

Fréquence et puissance du chant des dunes.

26 375,9 mètres

Longueur de la plus longue sculpture de sable construite par 10 000 volontaires en Caroline du Sud le 31 mai 1991.

500 mètres

Hauteur atteinte par les plus grandes dunes du monde en Mongolie.

30°

Angle d'avalanche pour des grains bien ronds.

40°

Angle d'avalanche pour des grains aux formes plus anguleuses.

XII<sup>e</sup> siècle

avant J.-C. Première mention du sablier dans une pièce de Bâton. Mais il n'est employé qu'à partir du XII<sup>e</sup> siècle pour mesurer le temps.

La France



1<sup>er</sup> rang

qui les contiennent. Ils ont tendance à former des voûtes qui peuvent parfois se ramifier en de complexes toiles d'araignées. Elles sont fragiles et apparaissent et s'effondrent à volonté selon les circonstances. Ainsi, l'écoulement d'un sablier est en fait intermittent. Si la force de frottement avec les parois est suffisante, elle empêche même les grains de glisser et bloque l'écoulement. Un problème délicat qui se pose dans les silos à grains. La gravitation qui devrait entraîner les grains vers le bas les pousse en fait vers les parois. C'est l'effet de voûte. Pourtant, les blocages ne se produisent pas plus facilement quand le sable est bien tassé. L'écoulement dépend de la manière dont il a été tassé. Ainsi, de brefs coups donnés sous une colonne de grains produisent une accélération dirigée vers le haut. Les forces de frottement mises en action s'opposent au mouvement et sont donc dirigées vers le bas du tube, favorisant l'écoulement tout comme des coups donnés sur le côté. En revanche, tasser en portant des coups sur le dessus pousse au blocage.

### POUDRES FINES ET DUNES

Le **souffle** nécessaire pour soulever un grain varie avec le carré de sa taille.

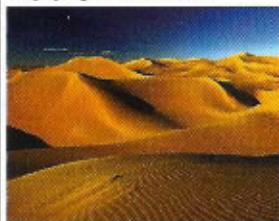


Ainsi, lorsque l'on étudie des poudres fines, on ne peut plus négliger l'influence de l'air environnant. Et on observe des phénomènes inédits. Des coups réguliers donnés sous une couche relativement épaisse de poudre fine font apparaître une structure formée de monts et de vallées. À chaque choc, un geyser de poudre est éjecté au sommet des parties les plus hautes. Après un certain nombre de chocs, le relief ne varie plus. La surface ridée est plus stable que ne l'était la surface plane. La formation de ces reliefs est due à l'interaction entre les grains et l'air qui s'engouffre dans le vide laissé par la poudre lorsqu'elle s'élève sous l'effet d'un choc. L'air entraîne ainsi les particules situées à la base du monticule. En retombant, la couche comprime l'air qui emporte vers le haut les particules situées à l'intérieur du cône. C'est l'effet volcan. Si la **surface ridée** est plus stable qu'une



surface plane, c'est que sur le flanc d'une colline, un grain de sable supporte en plus de son poids, celui des grains au-dessus de lui. Les comportements de la matière granulaire s'éloignent de ceux des liquides mais si la couche poudreuse de départ est suffisamment fine, les petits

coups portés vont conduire à la formation de petits tas coniques, semblables à des gouttelettes. Pour l'eau qui n'aime pas le contact de l'air, la sphère est la figure qui présente la surface minimale pour le volume maximal. Dans le cas des couches de sable, c'est l'aspiration des particules sous le petit volcan qui à chaque choc tend à recréer la forme conique. Ainsi le vent peut aisément façonner des **payages** sablonneux. Et



l'apparition ou la métamorphose d'une dune peuvent avoir lieu en l'espace de quelques jours seulement. Sur la pente qui fait face au vent, des grains de sable sont arrachés à la base et conduits jusqu'à la crête. Ils s'entassent, à l'abri du vent, juste derrière le sommet, jusqu'à ce que la masse accumulée provoque une petite avalanche. Le sable progresse ainsi vers le versant abrité et la dune avance lentement, dans le sens du vent. A tel point que certains chercheurs pensent que les plus grandes d'entre elles gardent la trace des régimes de vent au fil des années. Le vent peut aussi avoir un effet plus surprenant sur les dunes. Dans leurs récits de voyages, Marco Polo et Charles Darwin décrivent d'étranges phénomènes. Pendant quelques minutes, ils ont entendu des sons sourds, intenses et puissants. Une musique qui provient en fait des dunes de sable et plus précisément des avalanches qui se déclenchent sur leurs faces abritées. C'est le bruit des grains de sables qui roulent les uns sur les autres. Les avalanches mobilisent un grand nombre de grains qui, s'ils se déplacent de manière synchrone émettent une puissante onde sonore. On parle de chant des dunes. Mais toutes les dunes ne chantent pas. Cela tient à la nature du sable. Il faut que les grains soient recouverts de vernis, glacés comme une céramique.

### LES AVALANCHES

Le phénomène des avalanches est aussi répandu que dangereux. Le plus grand risque provient sans doute du fait que de faibles perturbations – le son d'une voix ou le décolllement d'une pierre – suffisent à déclencher des avalanches. C'est l'une des caractéristiques des milieux granulaires. Pour améliorer leur connaissance du phénomène, les physiciens observent un insecte des plus ingénieux, le **fourmilion**. Pour



piéger ses proies, l'animal creuse une sorte d'entonnoir. L'inclinaison de ses parois est choisie de façon à ce que, si

un insecte s'aventure sur cette surface instable, elle se dérobe sous ses pattes entraînant l'insecte au fond du trou. Les parois de l'**entonnoir** sont inclinées



suivant une pente particulièrement fragile, un peu comme un terrain proche de subir une avalanche. Les scientifiques ont ainsi pu vérifier que l'angle que fait une paroi granulaire avec l'horizontale ne peut pas dépasser une certaine valeur appelée angle maximum d'avalanche. Une fois que l'avalanche a eu lieu, la paroi forme un nouvel angle avec l'horizontale, l'angle de repos. Dans le cas d'un cratère fermé, l'avalanche est plus difficile à déclencher. Les grains peuvent s'accumuler sur la partie inférieure provoquant une onde remontante qui diminue l'angle du tas de sable avec l'horizontale. D'autre part, l'angle d'avalanche d'un matériau formé en cratère est différent de celui d'un cône du même matériau. Il est aussi plus grand pour des grains de formes anguleuses que pour des grains de formes sphériques. Au cours d'une avalanche, l'empilement de matériaux granulaires va évoluer de telle manière qu'il se retrouve spontanément dans un nouvel état critique. L'angle reste toujours proche de l'angle d'avalanche. Le système « s'auto-organise » vers un état critique. Une propriété ennuyeuse pour les montagnards mais avantageuse pour le fourmilion. Son piège se retend automatiquement après avoir fonctionné. Il est régénéré dès qu'un insecte s'est fait entraîné par l'avalanche précédente au fond du trou.

### LES MÉLANGES

Mélanger des matériaux granulaires réserve bien des surprises. La première concerne le volume obtenu qui ne correspond pas à la somme des volumes des matériaux mélangés. Brasser de gros grains avec des petits tend à faire disparaître les vides interstitiels et donc à diminuer le volume total de près de 20%. Le béton est un exemple de matériau qui a pu bénéficier de ces propriétés. Le gravier étant bien plus résistant que le ciment qui ne sert qu'à coller l'ensemble, l'idéal serait de minimiser la quantité de ciment à employer. Ainsi on réalise aujourd'hui des bétons très solides en mélangeant des graviers de tailles différentes. On va même jusqu'à utiliser de la fumée de silice composée de particules de taille bien inférieure au micron. Autre question posée par les mélanges, celle de la préparation d'explosifs. Les matériaux granulaires n'aiment pas se mélanger et cela pose des problèmes délicats, notamment dans le domaine de l'aérospatial. Ainsi, les fusées sont propulsées par des mélanges complexes de particules solides dont la combustion produit la poussée nécessaire à arracher la fusée du sol. Or, il est très difficile de produire des mélanges réellement

parfaits et cela coûte très cher. Le problème se pose aussi dans l'industrie pharmaceutique ou agroalimentaire, dans la chimie, les matériaux de construction... Il est difficile de réaliser des mélanges intimes dans lesquels chaque particule serait entourée de particules d'un autre type. L'agitation d'un mélange de grains fins et de billes plus grosses montre que ces dernières ont tendance à se retrouver à la surface. Des grains de tailles ou de formes différentes préfèrent se disposer en couches alternées plutôt que de se mélanger. Les physiciens ont baptisé le phénomène « ségrégation granulaire » et sont incapables d'en fournir une réelle explication. Concernant le phénomène de ségrégation par vibration, ils proposent toutefois un début de réponse. L'agitation crée un vide sous chaque grosse bille, vide dans lequel s'engouffrent rapidement les plus petites. Les grosses billes finissent ainsi par remonter. Mais, elles pourraient aussi être entraînées par un mouvement de convection d'ensemble. Une fois en haut, elles devraient redescendre, mais leur taille les empêche de pouvoir se frayer un chemin. La ségrégation par avalanche, de son côté, ne conduit à la stratification que si les composants coulent suffisamment lentement pour que des avalanches distinctes se produisent. Au départ, le mélange est en fait dans une situation d'instabilité. Il préfère être en bandes alternées que mélangé. Au cours de son évolution, le système s'auto-organise.

### LE SABLE ET L'EAU

Sur la plage mouillée, le pied creuse une **empreinte** autour de laquelle se



forme une zone qui s'assèche très rapidement. Le sable mouillé se comporte à l'inverse d'une éponge : quand on le presse, l'eau s'arrête de couler ! Car, contrairement à la majorité des objets qui nous entourent et selon le principe de « dilataance » d'Osborne Reynolds, le volume occupé par le sable augmente lorsqu'il est déformé. Le sable est composé de particules solides mais aussi d'espaces lacunaires. C'est le volume des interstices qui va varier. Un édifice bien ordonné occupe un espace minimum parce que le volume des interstices est réduit. Les gravats d'un édifice détruit occupent plus de place que l'édifice construit. En pressant du sable imbibé d'eau, on augmente donc le volume des espaces interstitiels. Ceux-ci absorbent toute l'eau de surface l'entraînant vers l'intérieur. Le sable s'assèche et retient l'eau. Quand on relâche la pression, l'eau est libérée.

### LES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Si les scientifiques étudient la physique du « tas de sable », c'est que derrière

ces phénomènes se cachent des enjeux de taille. Et en premier lieu, des enjeux environnementaux car une grande majorité de notre planète est constituée de matière granulaire. Avalanches, **éboulements**, tremblements de terre.



Mieux comprendre le comportement des granulaires permettrait d'éviter bien des catastrophes. Moins spectaculaire mais tout aussi fâcheux, les dunes sont sensibles aux caprices du vent et peuvent menacer d'ensablement routes et habitations.

### DU TAS DE SABLE À L'INDUSTRIE

Pratiquement tous les secteurs de la production industrielle sont concernés par les problèmes posés par la matière granulaire. Le génie civil pour les matériaux de construction, l'industrie des **poudres** et des céramiques,



l'ingénierie militaire, l'agro-alimentaire, l'aéronautique... Les trois quarts des objets manufacturés ont été au moins une fois à un stade de leur fabrication sous la forme de poudre ou de grains. Longtemps considérée comme une matière à faible valeur ajoutée, la matière granulaire a aujourd'hui évolué vers les produits high-tech. De quoi motiver et financer des travaux de recherche visant à améliorer les procédés et réaliser d'importantes économies. Concernant les mélanges, les industriels se fondent sur ce que nous faisons lorsque nous mélangeons



du sucre dans un yaourt. Plutôt qu'une cuillère, ils plongent deux **vis d'Archimède** dans le récipient contenant les ingrédients. Elles induisent un mouvement de convection en même temps que le récipient tourne sur lui-même pour donner un mouvement de rotation d'ensemble. Autre solution, utiliser un tube incliné dans lequel la matière va s'écouler. En heurtant le fond, les grains rebondissent vers le haut. Il en résulte une convection localisée qui va progressivement remonter le long du tube. Dans l'industrie pharmaceutique, les pilules dont la durée de vie est limitée à cause de la digestion pourraient bientôt être remplacées par des poudres adhérentes et très fines pulvérisées dans les fosses nasales. Celles-ci se distilleront très lentement améliorant l'efficacité des médicaments.