

La physique du tas de sable

14/02/08

Quoi de plus banal qu'un tas de sable ? Son écoulement dans un sablier n'émerveille plus grand monde. Pourtant, des chercheurs se passionnent pour la physique complexe qui sous-tend le tas de sable et autres empilements de grains ou de poudres. Le physicien **Geoffroy Lumay** leur a consacré son doctorat sous la direction de Nicolas Vandewalle.

La physique des matériaux granulaires, mieux connue sous le nom de «physique du tas de sable», vise la caractérisation des poudres, des grains, des billes, etc. Le laboratoire **GRASP** (Group for Research and Applications in Statistical Physics) de l'Université de Liège y consacre une partie de ses recherches. Il s'est focalisé sur une question finalement très ancienne puisqu'elle concerne la vie de tous les jours : quel volume va occuper un empilement de grains ? Pour celui qui est concerné par l'emballage de produits, cette question est essentielle. En effet, combien de pommes tiendront dans telle caisse ? Quelle quantité de farine pourra être contenue dans tel récipient ? Comment optimiser le volume d'un empilement ? C'est cette même physique qui est aussi à l'origine du verre gradué utilisé en cuisine.

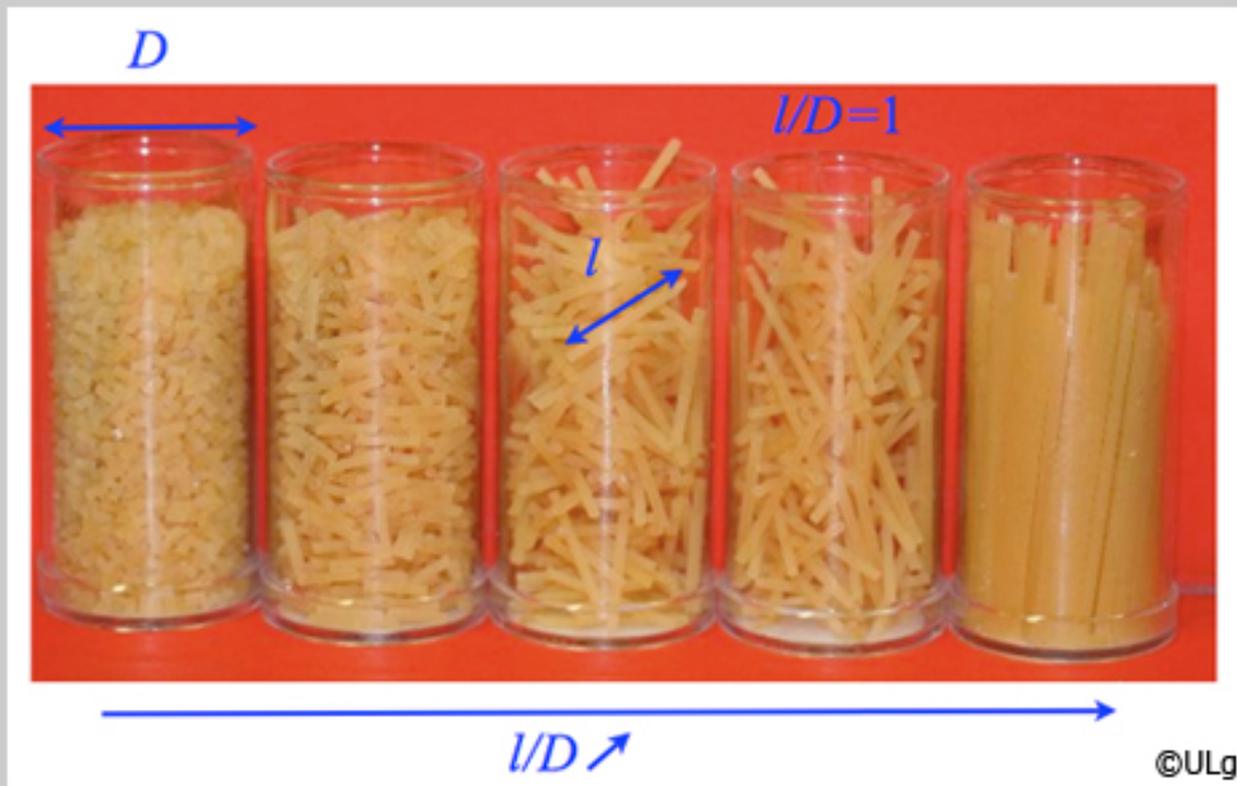


La physique du tas de sable cherche des réponses quantitatives à toutes ces questions qui sont anodines au premier abord, tant nous semblons bien connaître les pommes et la farine. Mais toute la complexité de ces situations quotidiennes se révèle lorsqu'on tente de les mettre en équations. D'ailleurs, les études qui leur sont consacrées sont nombreuses à débiter par une simplification de la réalité en supposant, par exemple, la sphéricité des grains ou le caractère ordonné de leur empilement. Sans ses hypothèses, c'est un casse-tête... sur lequel certains physiciens aiment pourtant se pencher.

Le volume du sac de billes

Les choses sont souvent moins simples qu'elles ne paraissent. Ainsi, par exemple, aussi étonnant que cela puisse paraître, *«les scientifiques viennent seulement de démontrer mathématiquement quelle est la densité maximale que peut avoir un empilement de sphères, explique Geoffroy Lumay du GRASP. Elle est de 0,74, alors qu'elle est proche de 0,60 pour un banal tas de billes formé sans soin.»* Pour être précis, il ne faudrait pas parler de densité, mais de fraction volumique, définie comme le rapport entre le volume occupé par les grains et le volume total de l'empilement. Ainsi, des grains sphériques remplissent au maximum 74% du volume total, le reste étant occupé par le vide qui les entoure. Le volume occupé par un empilement dépend fortement de l'histoire de sa formation, autrement dit des contraintes que l'empilement a subi : des billes n'occuperont pas le même volume suivant qu'elles ont été versées doucement ou énergiquement dans leur sachet.

Dans ses recherches, Geoffroy Lumay s'est penché sur des situations plus naturelles que les empilements symétriques de belles sphères : *«Dans notre laboratoire dirigé par le professeur Nicolas Vandewalle, nous avons étudié l'influence de la forme des grains sur leur densité, décrit-il. En particulier, nous avons fait des empilements de bouts de spaghettis, tous coupés à la même longueur, et nous avons observé l'influence de cette longueur sur le volume occupé. On pourrait croire que des grains plus longs vont avoir plus de difficultés à s'arranger et donc occuper un volume plus grand. Mais ce n'est pas forcément le cas : le paramètre déterminant est le rapport entre la longueur des grains et la taille du récipient qui les contient.»* Ainsi, un volume de spaghettis est optimisé lorsque ceux-ci sont emballés dans des sachets dont le diamètre est largement inférieur à leur longueur, favorisant leur alignement.



La longueur des grains (l) et la taille du récipient (D) influencent la fraction volumique d'un empilement. Lorsque les grains sont relativement petits par rapport à la taille du récipient qui les contient, on se rapproche du cas idéal de l'empilement compact de grains sphériques. En prenant des grains plus grands, on s'en éloigne et le volume de l'empilement augmente, à cause de la présence de nombreux vides. Si on continue à prendre des grains de plus en plus longs, ils vont devoir s'orienter pour rentrer dans le récipient et le volume sera à nouveau plus petit.

Sucre fin et sucre impalpable

L'équipe du GRASP a tenté de quantifier cette influence de la taille des grains, en particulier lorsqu'ils sont très petits (inférieurs à 50 micromètres). Le matériau est alors plus cohésif et ses propriétés changent radicalement. Les forces de cohésion sont dues principalement à l'humidité qui crée des ponts capillaires entre les grains ou aux charges électrostatiques induites par exemple lorsqu'un empilement de grains est secoué. Elles sont présentes dans tout matériau. Mais pour des grains de petite taille, elles deviennent plus influentes que la simple gravité qui les poussent vers le bas. On assiste alors à la formation d'agglomérats qui vont modifier les caractéristiques de l'empilement et notamment ses propriétés d'écoulement. L'exemple du sucre est éclairant : le sucre fin, dont la taille des grains est de l'ordre du millimètre, s'écoule assez bien lorsqu'on en verse une cuillerée. Le sucre impalpable, dont la taille des grains est de l'ordre de 50 micromètres, s'écoule beaucoup moins bien, par petits tas. Le sucre impalpable est cohésif, pas le sucre fin.



La cohésion peut avoir des origines diverses, comme l'humidité ou les charges électrostatiques. Lorsque les forces de cohésion sont inférieures au poids d'un grain, des grumeaux se forment. La poudre est alors dite cohésive. Par exemple, le sucre fin (gauche), dont la taille des grains est de l'ordre du millimètre, n'est pas cohésif, tandis que le sucre impalpable (droite), dont la taille des grains est de l'ordre de 50 micromètres, l'est.

Les nanotubes forment un matériau cohésif très particulier dont les propriétés sont principalement dictées par leur forme : les nanotubes sont des grains mille fois plus longs que larges. (Lire [Nanotubes en gros](#))

L'étude quantitative de la cohésion en physique du tas de sable est assez récente, même si la question est posée depuis très longtemps dans les domaines appliqués. Elle est rendue complexe par la difficulté à mesurer et à contrôler la cohésion entre les grains d'un empilement : la cohésion d'une poudre peut être réduite en l'asséchant par exemple, mais ce ne sera pas quantitatif. Pour quantifier, il faut ruser. Et aujourd'hui encore, ce n'est possible qu'avec certains types de grains. «*Nous avons eu l'idée de recourir à des grains métalliques placés dans un champ magnétique, explique Geoffroy Lumay. De la sorte, les grains sont transformés en petits aimants qui interagissent entre eux. La cohésion du matériau, induite par le champ magnétique, est ainsi réglable et quantifiable à souhait, simplement en tournant un bouton... même si dans la pratique, l'analyse rigoureuse n'est pas si simple : chaque petit aimant produit son propre champ magnétique qui va interagir avec celui des autres grains et celui initial d'une manière très compliquée. Mais le principe est celui-là.*»



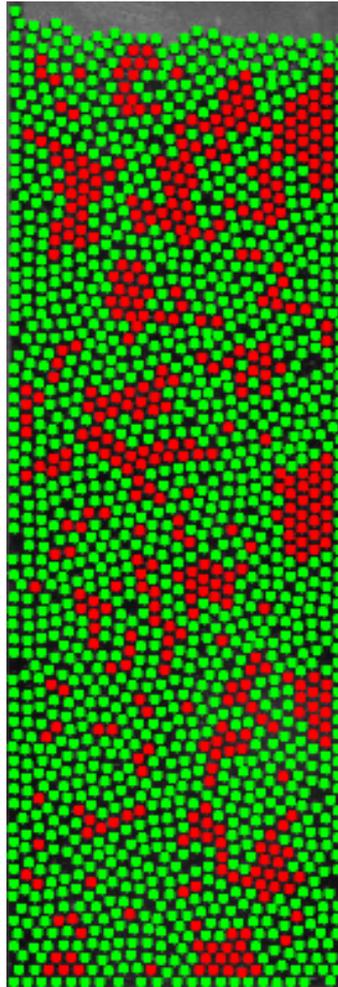
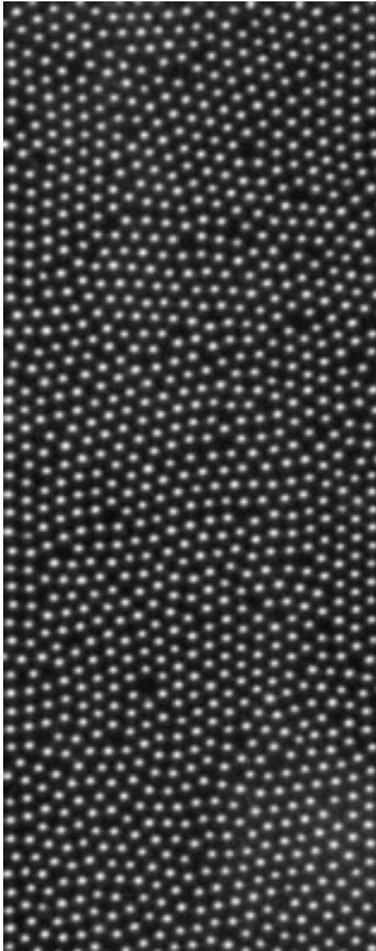
Le recours à cette technique a conduit à la mise en évidence de l'influence de la cohésion sur les propriétés d'un empilement. Quelle est cette influence ? *«Plus le champ magnétique et donc la cohésion sont importants, plus la dynamique de compaction de la poudre sera lente et donc plus elle occupera un volume important, reprend Lumay. En diminuant lentement le champ magnétique et donc la cohésion, la gravité reprend progressivement le dessus et les grains vont avoir tendance à retomber, réduisant leur volume. Finalement, la fraction volumique occupée par la poudre lorsque le champ magnétique arrive à zéro est plus faible que si l'empilement avait été construit sans le détour par un champ magnétique. Notre technique permet ainsi d'obtenir des empilements avec des fractions volumiques étonnamment faibles et inaccessibles dans l'air sans notre artifice.»*

Lire : Lumay G., Vandewalle N., [Tunable random packings](#), New J. of Phys. 9, 406, 2007.

Comment la poudre va-t-elle s'écouler ?

Une fois l'influence de la cohésion sur la compaction comprise, le chemin inverse s'ouvre aux chercheurs : il devient possible de développer un dispositif capable, à partir de mesures de compaction, de déduire les forces de cohésion en jeu et, par-là, les propriétés d'écoulement d'une poudre. Celles-ci intéressent particulièrement les industriels qui utilisent des poudres : vont-elles bien s'écouler ou tomber en grumeaux ? *«Nos travaux sur la caractérisation des poudres sont à la base d'un projet First Spin-off, dévoile Geoffroy Lumay. Nous avons développé un appareil pour déterminer si une poudre est cohésive ou non et ainsi caractériser ses propriétés d'écoulement. Cet appareil suscite un vif intérêt auprès des industries pharmaceutiques puisque les processus*

de fabrication d'un médicament concernent majoritairement la manipulation de poudres. Or, ces processus requièrent une extrême exigence pour éviter qu'un médicament ne contienne trop ou trop peu de principe actif.» Les industries sont très demandeuses de techniques de caractérisation des poudres. Voilà qui laisse augurer un bel avenir à la «physique du tas de sable»...



Compaction d'un empilement bidimensionnel de sphères soumis à une série de secousses. Cette animation a été obtenue à partir d'images expérimentales analysées à l'aide d'une technique de traitement d'images développée au GRASP. Les grains qui ont six voisins, c'est à dire les grains idéalement ordonnés, sont colorés en rouge. Les grains qui ont moins que six voisins sont colorés en vert. On observe clairement que le processus de compaction est lié à un phénomène de croissance cristalline.

Source : Phys. Rev. Lett. 95, 028002 (2005)