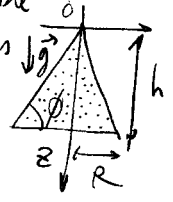




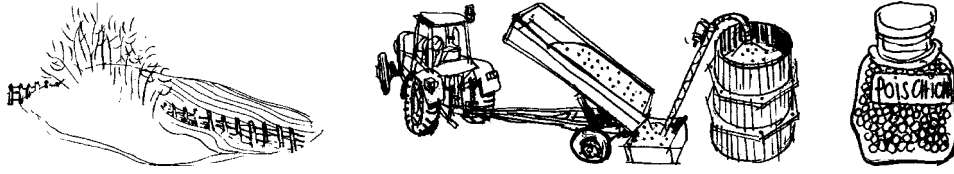
- LA PHYSIQUE  
DES  
TAS DE SABLE -

Philippe CLAUDIN

- $\rho_0$  densité du sable
- $h$  hauteur du tas
- $v$  vitesse du vent
- $t$  température de l'eau
- $A$  âge du maître ragueur



$$m = \frac{1}{3} \pi R^2 h \rho_0$$
$$R = \frac{h}{\tan \phi}$$



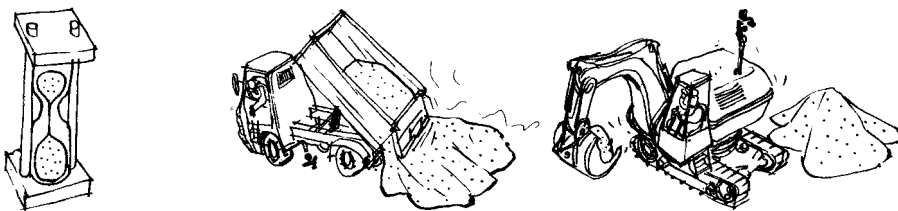
Quelle différence y a-t-il entre un tas de cailloux et un tas de sel, entre des grains de blé et des grains de quartz, ou bien entre des boules de pétanque et des billes de verre? Pour le physicien, la réponse est très simple, il n'y en a pas, ou si peu... Les graviers, les grains, les graines, les cailloux, les sables, les billes, les boules et les poudres font tous partie d'une grande famille, celle des *matériaux granulaires*. Cette famille regroupe tous les corps formés de petits grains indépendants. Elle est si vaste qu'elle englobe la plupart des matières premières utilisées dans le bâtiment, mais aussi dans l'agroalimentaire et les industries chimiques. En fait, les granulaires représentent la deuxième classe de matériaux la plus utilisée par l'homme après l'eau!

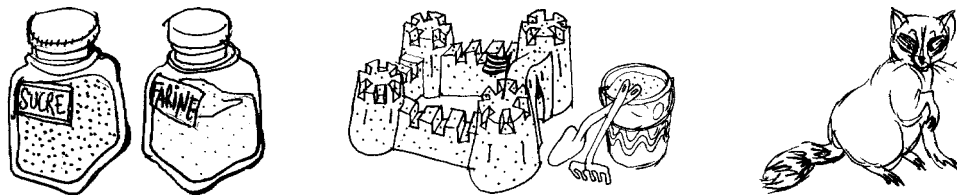
Si vaste que soit l'ensemble des milieux granulaires, il regroupe des matériaux aux propriétés physiques et mécaniques remarquablement semblables. C'est particulièrement vrai pour les granulaires dits *secs*, c'est-à-dire tels que les interactions entre les grains et le milieu qui les entoure sont négligeables. Si on mélange du sable avec de l'eau par exemple, on a toujours un milieu granulaire mais il n'est évidemment plus sec, ce qui change beaucoup ses caractéristiques.

Les propriétés physiques des granulaires secs sont assez étonnantes : elles sont, en quelque sorte, à mi-chemin entre celles des fluides et celles des solides. On peut très facilement réaliser chez soi quelques petites expériences qui illustrent bien ces phénomènes. Le meilleur endroit pour cela est certainement la cuisine, pièce qui regorge de matériaux granulaires : sucre, couscous, riz, haricots secs ou noix feront l'affaire ! Le seul véritable « danger » de ces manipulations, c'est de tout renverser par terre...

Si on met du riz dans un récipient quelconque (un saladier par exemple), il épouse les formes, exactement comme de l'eau. Si l'on retourne énergiquement ce récipient sur la table, le riz se déverse d'un coup, là encore comme un fluide. Mais si on le fait plus doucement, c'est par avalanches successives qu'il s'écoule du saladier. Sur la table, le riz forme un tas stable, il ne s'écoule plus. Si l'on verse plutôt ce riz dans un autre récipient par l'intermédiaire d'un entonnoir, il peut s'y écouler tranquillement là encore comme de l'eau, mais il peut aussi se bloquer dans l'étranglement en formant une voûte.

Un autre phénomène que l'on peut très facilement observer est celui que l'on appelle la ségrégation, c'est-à-dire la séparation de grains de natures différentes, par exemple des gros et des petits. Mettez des noix au fond d'un saladier. Recouvrez-les





de haricots secs et secouez, les noix remontent à la surface et ne redescendent plus ! Cet effet amusant devient plutôt gênant quand, dans l'industrie, on veut bien mélanger deux poudres assez dissemblables, lors de la préparation d'une réaction chimique par exemple.

Ces expériences très simples ont ceci d'extraordinaire qu'elles dépendent très peu de la nature précise des grains utilisés. Seul importe le caractère granulaire des matériaux. Le riz peut être remplacé par des pois-chiches ou bien du sucre, les observations resteront qualitativement les mêmes.

Donner des explications claires à ces phénomènes tels que la formation d'avalanches, de dunes ou de voûtes, ou bien encore la ségrégation, les décrire avec précision, ou simplement les maîtriser correctement n'est cependant pas une mince affaire ! Les chercheurs s'y attèlent depuis plus d'un siècle, mais les progrès dans ce domaine sont lents car ces matériaux rebelles ne se laissent pas enfermer dans des schémas trop simples. L'étude des granulaires relève donc bien de la physique moderne et le nombre des questions encore sans réponse est véritablement immense ! L'intérêt des scientifiques est d'autant plus grand que les enjeux derrière les applications de ces études sont potentiellement considérables tant ces matériaux sont présents à tous les niveaux de l'activité humaine.

Cette douzaine de pages présente, aussi simplement que possible, l'essentiel de mon travail de thèse qui a porté sur une propriété bien particulière des matériaux granulaires, *l'effet de voûte*. Cet effet est essentiel à la compréhension de la physique des tas de sable.



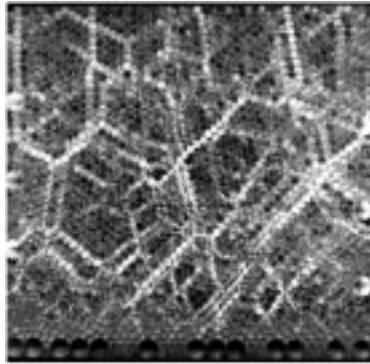


En retournant ce gros tube en verre à moitié rempli de morceaux de sucre irréguliers, seuls quelques-uns de ces derniers sont tombés jusqu'en bas. Les autres sont restés coincés à cause de quatre ou cinq morceaux qui ont décidé qu'ils allaient bloquer tous les autres ! Ce n'est pas par pur esprit de contradiction ou parce qu'il ont eu peur de se faire mal en tombant. C'est simplement qu'en s'appuyant les uns sur les autres, ainsi qu'aux parois du tube, ils se sont retrouvés par hasard dans une configuration stable et n'ont plus eu de raison de bouger. Ils forment ainsi une voûte naturelle.

Ce phénomène est caractéristique des matériaux granulaires et cette situation de blocage est particulièrement fréquente lors d'écoulements denses dans les tubes, silos ou trémies. Si cet effet de voûte est bien visible dans ces situations dynamiques, il se manifeste également, mais de façon plus discrète et plus subtile, dans les systèmes à l'équilibre statique. Si l'on observe la manière dont les forces se propagent dans un tas de sable, on remarque en effet que la répartition de ces forces est très inhomogène : sur les épaules de certains grains repose l'essentiel du poids du tas, alors que d'autres ne sont pratiquement pas sous contrainte ! En d'autres termes, les premiers forment des « lignes privilégiées » dans la propagation des contraintes, des « chemins de force ». La photo du haut de la page suivante montre cette répartition inhomogène des forces dans un empilement bidimensionnel : les grains sont d'autant plus clairs qu'ils sont sous contrainte élevée. Cette photo a été réalisée par l'équipe de Rennes, en utilisant les propriétés photoélastiques de certains matériaux comme le plexiglas.

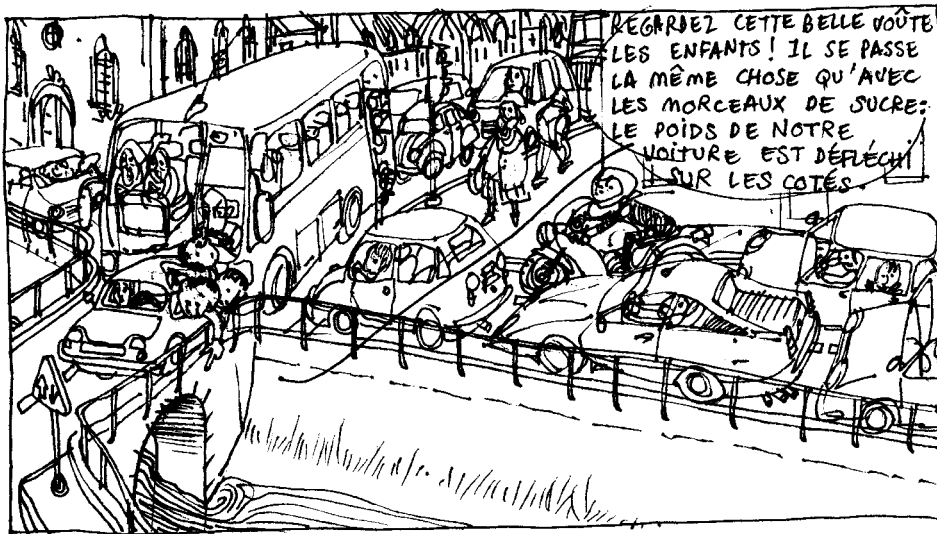
Bien sûr, ces chemins ne sont pas, à l'instar de cette arche en morceaux de sucres, des voûtes au sens architectural du terme. En particulier, ils ne sont pas aussi robustes que celles-ci, et un grain situé sous un tel chemin ne sera certainement pas à l'abri de toute force venant d'au-dessus. Cependant, vraies voûtes et chemins de force partagent cette

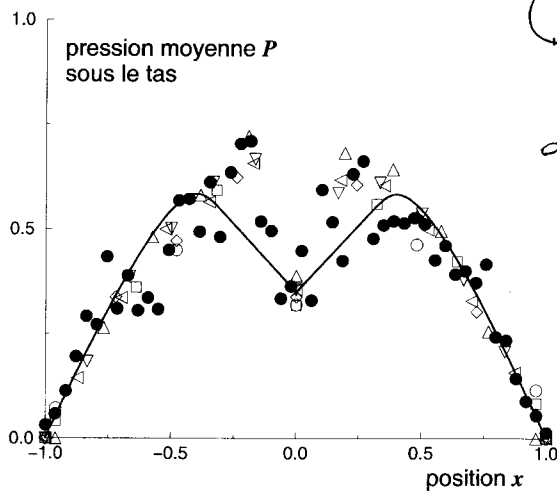
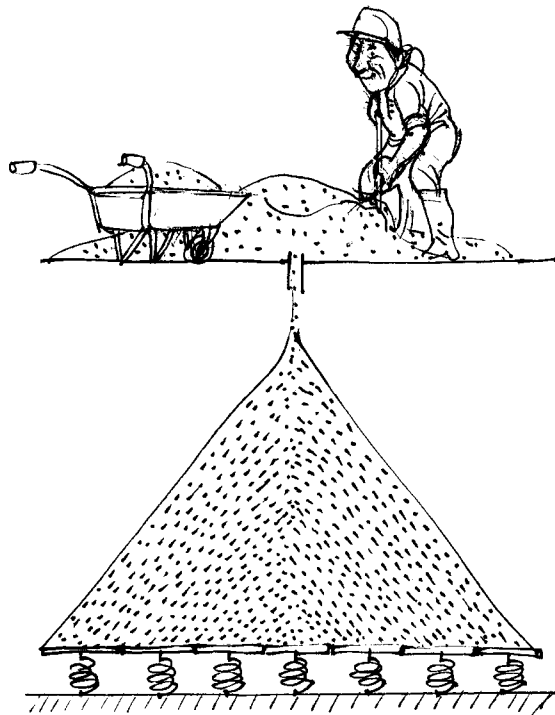
propriété de déflexion des contraintes, et sont tous deux la signature de la structure interne du système granulaire considéré. Une vraie voûte n'est finalement qu'un chemin de force très marqué. En particulier on imagine bien que, juste avant de s'ancrer solidement aux parois du tube de verre, la voûte en morceaux de sucre pré-existait sous forme d'une ligne de force. La limite entre l'un et l'autre concept est donc assez floue, et dans toute la suite de ce texte, on ne parlera plus de voûte qu'au sens large, c'est-à-dire chemins de force compris.



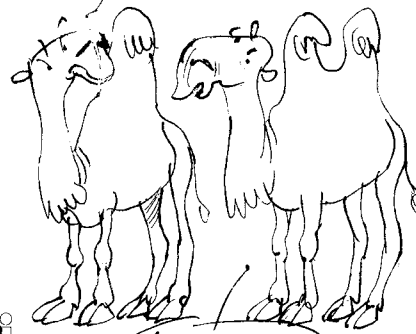
Une des grandes difficultés de la modélisation de la matière granulaire réside dans la description de ces voûtes, de leur formation et de leur évolution. On a dit en particulier que les voûtes présentes au cœur d'un système granulaire reflètent sa structure interne. Or, celle-ci va dépendre très fortement de « l'histoire » de ce système, c'est-à-dire de la manière dont on l'a construit, contraint et perturbé. Bref, un système granulaire conserve en son sein la mémoire de son passé. Par exemple, il serait particulièrement ardu de décrire la structure interne, disons, d'un grand sac que l'on aurait rempli avec une fine pluie de grains de sable, puis avec des grosses pelletées de graviers, et que l'on aurait enfin tassé uniquement par endroits ! Le scientifique, pour bien comprendre les mécanismes et la physique qui se cachent derrière ces phénomènes, doit, dans un premier temps, limiter son ambition à la description des systèmes les plus simples possibles. Par exemple un tas de sable ou un silo à grains.

Dans les pages suivantes, on précisera en effet le rôle des effets de voûte lors de la construction d'un tas de sable, du remplissage d'un silo, et lorsqu'on perturbe ce silo, par exemple en tapant sur les parois ou en faisant varier la température ambiante. On verra que dans ces trois situations très simples, les effets sont assez inattendus et défient l'intuition qu'on peut en avoir.





POURTANT C'EST MOI QUI ME  
BALADE DANS LE SAHARA!...  
TOI TU HABITES L'ASIE!



HÉ, Y'A DES TAS  
DE SABLE AUSSI  
EN ASIE!

Que peut-on imaginer de plus simple, de plus innocent, qu'un humble tas de sable? À vrai dire, comparé à d'autres systèmes granulaires comme les silos, les dunes ou les sols, il semble que le cas d'un tas de sable soit la situation la plus facile à comprendre et à décrire. Pourtant, et c'est ça qui est extraordinaire, quand on cherche à modéliser par exemple la manière dont le poids des grains de sable se propage dans le tas, ou bien la manière dont s'écoulent les petites avalanches de sable à la surface du tas, on rencontre déjà toutes les difficultés inhérentes à la physique de la matière granulaire.

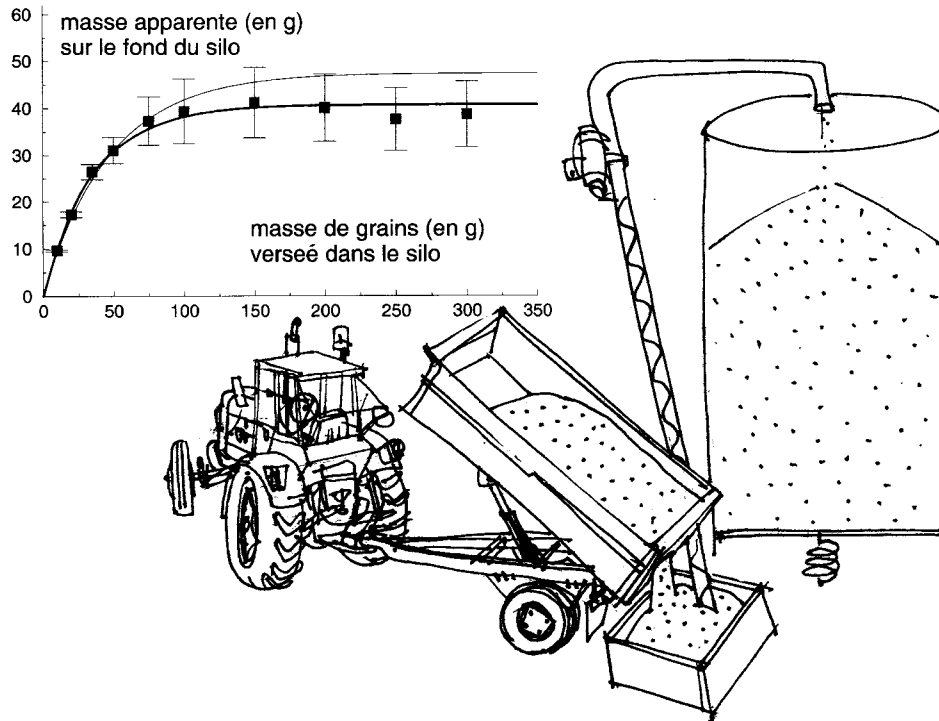
L'expérience schématisée sur la page de gauche est à ce titre très éclairante. Elle peut sembler toute bête : on construit simplement un tas de sable avec un entonnoir. Sur la base du tas, on a préalablement posé des petits capteurs de pression, c'est-à-dire des espèces de petites balances qu'on a représentées sur le schéma par des petits plateaux montés sur ressorts. Ces capteurs vont mesurer le poids en différents points sous le tas. En suivant ce protocole plusieurs fois de suite, on peut alors tracer la courbe de pression moyenne  $P$  en fonction de la position sous le tas  $x$ .

Ce que l'on observe alors est vraiment surprenant ! Au centre, c'est-à-dire sous la plus grande hauteur de sable, la pression n'est pas du tout maximale. Les valeurs les plus élevées sont au contraire rejetées de part et d'autre du centre du tas, ce qui donne à la courbe une allure de dos de chameau. Intuitivement, on aurait plutôt prédit un profil de pression en forme de dos de dromadaire, c'est-à-dire une courbe en cloche avec un maximum au centre. Mais c'était sans compter sur l'effet de voûte !

Ce « trou de pression » au centre du tas de sable est la signature de la manière dont se propagent les forces à l'intérieur du tas. En fait, celles-ci ne se propagent pas verticalement. Elles suivent au contraire les voûtes présentes au sein du tas qui défléchissent le poids des grains de sable vers l'extérieur du tas. Le centre du tas se trouve ainsi « protégé » et la pression y est moins forte. Si ces voûtes marquent une préférence vers l'extérieur du tas c'est à cause de la manière dont celui-ci a été construit. Les grains en sortant du bas de l'entonnoir tombent sur le sommet puis roulent sur la pente, avant de s'arrêter quelque part. On comprend bien qu'ils créent ainsi au sein du tas une structure qui favorise davantage la transmission des forces dans la direction de leur ancien déplacement (*i.e.* vers l'extérieur) que dans le sens inverse. En construisant au contraire un tas de sable par couches horizontales successives, par exemple au moyen d'une fine « pluie de sable » la plus homogène possible à travers un diaphragme dont on rétrécirait doucement l'ouverture, on obtient un profil de pression sans minimum au centre, mais avec au contraire un plateau.

Plusieurs expériences mettant en évidence ce trou de pression ont été réalisées indépendamment, et avec des techniques de mesure différentes, par Šmíd et Novosad en 1981 avec des tas de 20 à 60 cm de haut (ce sont les symboles « vides » sur la courbe de pression), et par Huntley *et al.* en 1997 avec des tas de 6 cm (ce sont les symboles « pleins »). La ligne pleine est la courbe que donnent nos modèles. Si les mesures issues de tas de différentes hauteurs se regroupent sur la même courbe, c'est que les données expérimentales ( $x$  et  $P$ ) ont été adimensionnées par la hauteur du tas considéré.

L'étude cet humble petit tas de sable pouvait sembler aussi inintéressante qu'inutile. En fait, celui-ci se révèle être un redoutable test pour toutes les théories qui prétendent décrire la manière dont les forces se propagent à l'intérieur des milieux granulaires.



Il suffit de se promener sur les petites routes de campagne pour voir les silos que l'on utilise dans les coopératives agricoles pour le stockage des grains. Or pour le physicien, un silo reste un objet relativement simple, même si la présence de parois complique un peu les choses par rapport au cas du tas de sable. On est donc dans la situation idéale où l'on peut faire des calculs et des prédictions, et les appliquer à des situations pratiques. Les premières théories concernant les silos ne datent d'ailleurs pas d'hier puisque l'on doit à Janssen un modèle proposé à la fin du siècle dernier (1895).

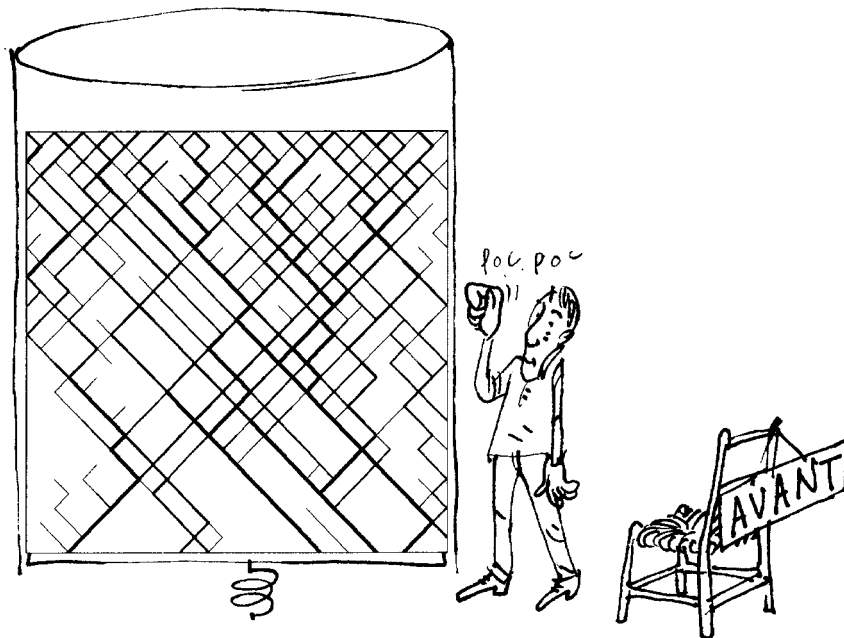
En quoi consiste l'expérience qui permet de mettre en évidence les effets de voûte dans les silos? Elle est schématisée sur le dessin en haut de cette page. Sur ce dessin, vu la taille de l'opérateur, on peut penser que le silo utilisé pour l'expérience fait au moins 2 m de haut. En fait, exactement comme dans le cas des expériences menées sur le tas de sable, la taille du système granulaire importe peu. À la campagne, les silos à grains peuvent être immenses (plus de 10 m de haut et autant de large!). Dans les laboratoires, des expériences ont été réalisées sur des silos parfois assez grands (1 à 2 m de haut), mais les points expérimentaux tracés sur le graphe à droite du schéma sont issus de mesures effectuées sur un tube d'environ 20 cm de haut et 4 cm de large. Le tube est solidement relié à la table de « manip' » tandis que le fond est mobile et relié à une balance. On mesure deux quantités dans cette expérience : la masse des grains que l'on verse dans le tube et la masse qui pèse sur le fond. Les mesures présentées ici ont été faites par Vanel et Clément en 1998 avec (entre autres) des grains de quartz. Elle sont représentées sur le graphe par des carrés noirs. La ligne fine est un ajustement du modèle de Janssen sur ces données, et la ligne épaisse est un ajustement du nôtre.



Que se passe-t-il quand on remplit peu à peu le silo? Si on faisait l'expérience avec un fluide, il ne se passerait rien d'extraordinaire: on pèserait sur le fond exactement ce qu'on a versé dans le tube. Avec des grains ce n'est pas le cas! En fait, comme l'indique la courbe à côté du schéma, c'est effectivement le cas quand on verse très peu de grains dans le tube, mais très vite la masse des grains qui pèsent sur le fond croît nettement moins vite que la masse des grains versés, et finalement « sature » dès que la hauteur des grains versés devient comparable au diamètre du tube. Autrement dit, on ne mesure sur le fond du silo qu'une fraction de la masse des grains contenus dans le tube, une *masse apparente*.

Bien sûr, il n'y a aucune magie là-dessous! La différence entre la masse versée et la masse apparente n'a pas disparu, ce n'est qu'un coup de l'effet de voûte! À cause de ces voûtes en effet, le poids des grains ne se propage pas verticalement. Il est au contraire dévié vers les parois du silo qui, par friction, en supportent une partie. Ainsi seuls les grains dont le poids n'a pas été écranté par les murs du silo contribuent à la masse apparente. Il s'agit naturellement des grains tout près du fond, dont la distance à celui-ci est *grosso modo* inférieure au diamètre du silo. La friction des murs joue ici un rôle essentiel qui amplifie les effets de voûte: plus celle-ci est forte et plus cet effet d'écrantage est rapide. Ainsi, toute surcharge sur le haut d'un silo, disons, trois ou quatre fois plus haut que large, est entièrement supportée par les parois. C'est dire si celles-ci doivent être solides! Comme vous aller le découvrir sur les deux pages suivantes, elles doivent même être encore plus solides qu'on ne pourrait le penser dès à présent...

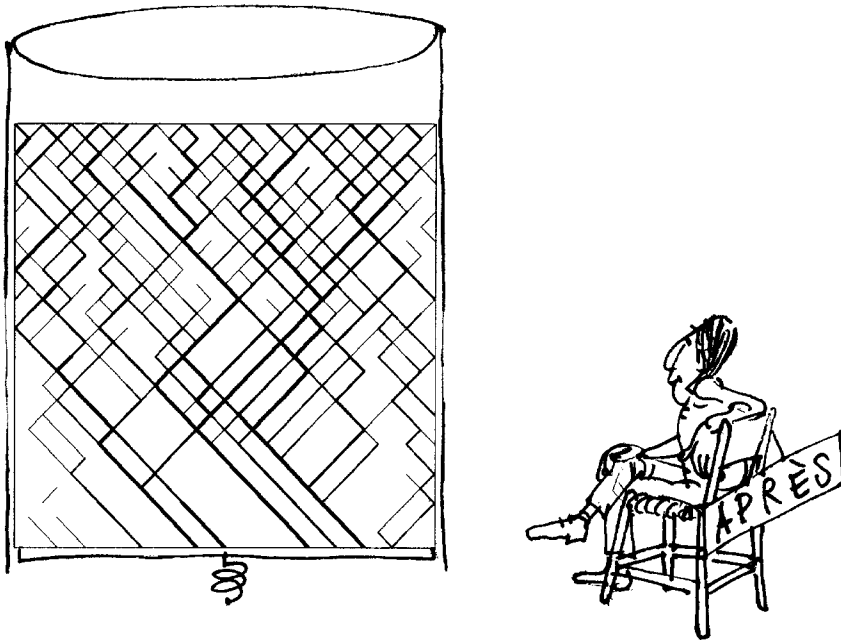




Les deux figures de cette double page donnent une image de la structure interne des voûtes dans les silos, telle qu'on la représente de manière simplifiée dans nos modèles. Celle de gauche est étiquetée « avant » et celle de droite « après ». Si on les compare attentivement, on peut noter que telle voûte a disparu tandis que telle autre est apparue et qu'une grande partie de la structure est restée inchangée. Que s'est-t-il passé entre « avant » et « après » ?

À vrai dire, sans doute pas grand chose ! Une petite variation de température de quelques degrés, ou bien une petite vibration ? En fait, la matière granulaire est très sensible aux petites perturbations extérieures, par exemple thermiques ou mécaniques. En effet, le chemin précis qu'emprunte une voûte dépend fortement des grains sur lesquels celle-ci s'appuie. Qu'un tel grain vienne à glisser légèrement, ou bien simplement à changer un contact avec l'un de ses voisins, et c'est toute le réseau des voûtes sous ce grain qui peut être amené à se réarranger. On imagine donc bien qu'une petite tape sur les parois, ou bien qu'un léger chauffage qui fera gonfler les grains de très peu de chose (environ  $1 \mu\text{m}$  par degré), puisse suffire à changer au moins partiellement la structure interne du silo.

Ce réarrangement interne est en général complètement invisible de l'extérieur : le léger glissement de tel grain est passé inaperçu, et le reste du système est resté strictement immobile. Pourtant, ces changements apparaissent clairement sur les mesures de masse apparente au bas du silo. Qu'une grosse voûte qui s'appuyait sur le fond du silo avant la perturbation vienne à être déviée sur la paroi, et la masse apparente diminuera brutalement. Celle-ci au contraire augmentera si une voûte initialement écartée par la paroi vient reposer directement sur le fond du silo. Notre modèle montre que les petites et les grandes variations de la masse apparente sont aussi probables. De petites causes peuvent ainsi engendrer assez facilement de grands effets. En particulier, il se peut très bien qu'au hasard des perturbations,



plusieurs grosses voûtes fusionnent près de la paroi du silo, imposant à celle-ci une pression localement énorme. Inversement, ces voûtes vont écranter totalement ou partiellement certaines parties du silo où les pressions seront très faibles. Les murs d'un silo doivent donc être suffisamment solides pour résister à des forces très inégales et réparties de manière très inhomogène. En fait, les risques d'accident dans les silos à grains sont surtout d'ordre chimique : il y a partout des petites poussières issues de grains broyés ou concassés. Celles-ci peuvent s'oxyder brutalement, ce qui fait tout bonnement exploser le silo ! Mais les risques mécaniques décrits ci-dessus ne sont pas pour autant négligeables, surtout par exemple lors de la vidange d'un silo.

À cause de cette structure en voûte, les grandes fluctuations de forces sont une propriété intrinsèque aux granulaires. Autrement dit, les mesures de pression vont toujours être entachées d'un grande incertitude, mais on ne peut rien y faire ! Si on remplit deux fois le même silo avec exactement la même quantité de grain, on peut mesurer sur le fond deux masses apparentes très différentes, simplement parce que la structure des voûtes dans le silo est très différente d'une fois sur l'autre.

Ce caractère perpétuellement « réarrangeant » des systèmes granulaires nous a amené à les qualifier de *fragiles*. Ce terme prend tout son sens à la lumière de l'expérience suivante. Essayez de pousser des grains contenus dans un tube à l'aide d'un piston. Parfois, « ça bloque » car les voûtes internes sont dans une configuration où elles peuvent résister à la pression du piston, et parfois au contraire elle ne le peuvent pas et « ça glisse ». On passe irrégulièrement d'une situation à l'autre au gré des perturbations extérieures (en tapant sur le tube par exemple). Un système granulaire est donc fragile dans le sens où il se réarrange dès qu'on lui impose une contrainte extérieure incompatible avec sa structure interne. La nouvelle structure n'est pas plus stable que l'ancienne et peut se réarranger à son tour, et ainsi de suite...

Ici s'arrête cette petite promenade entre les tas de sable et les silos à grains. Il y aurait bien entendu beaucoup d'autres choses à dire. Il en reste encore bien davantage à faire et à découvrir! Les tas, les silos, mais aussi les dunes, les avalanches, les grains que l'on secoue ou que l'on tasse sont bien loin d'avoir livré tous leurs secrets.

Finalement, la seule chose à retenir de ces douze pages, c'est qu'au sein des matériaux granulaires, les forces se propagent le long de chemins bien définis, des *voûtes*. Celles-ci leur confèrent des propriétés plutôt inattendues, ou en tous les cas très différentes de celles des matériaux auxquels on est davantage habitué, comme les solides ou les fluides où les forces se transmettent de manière homogène.

Maintenant je suis sûr que ces effets de voûtes n'ont plus de secrets pour vous, alors la prochaine fois que vous croisez votre copain qui est justement féru de physique, n'oubliez pas de lui poser une petite colle sur la distribution de pression sous un tas de sable ou bien au bas d'un silo...

### Illustrations.

Les nombreux dessins et illustrations de ces douze pages ont été réalisés par Pierre-Yves Claudin.

### Remerciements.

Il va sans dire que le travail que j'ai présenté ici en mon nom est en fait celui de toute une équipe que je tiens à remercier chaleureusement : Jean-Philippe Bouchaud, Mike Cates et Joachim Wittmer.

Je voudrais également à rendre hommage à « La Hulotte », *le journal le plus lu dans les terriers* [58], qui a été pour moi, en matière de vulgarisation scientifique, un véritable modèle et une source inépuisable d'inspiration.

