

Epreuve d'A.D.S

TITRE.- La physique du tas de sable

Le dossier ci-joint comporte un article extrait de la Revue du Palais de la Découverte - Vol 23 - n°224.

Travail suggéré au candidat :

Vous exposerez la physique du tas de sable en insistant sur les difficultés rencontrées lors de la modélisation et sur les différences notables avec les milieux continus.

Nota bene

Il est rappelé que, lors de cette épreuve, le jury évalue l'ouverture d'esprit, l'initiative personnelle, l'esprit critique, l'aptitude à collecter l'information et à l'analyser, la synthétiser, la communiquer...

Il est souhaitable que le candidat s'approprie le sujet et construise un exposé, ne suivant peut-être pas le plan proposé, mais mettant en évidence une thématique intéressante.

Il est donc possible pour le candidat, à partir des informations contenues dans le dossier et en s'aidant de sa propre culture, de montrer qu'il peut avoir des idées personnelles sur le sujet qu'il vient de découvrir.

Le jury appréciera une synthèse qui dégage les points importants plutôt qu'un résumé méthodique.

La physique du tas de sable

par Jacques Duran, Directeur de recherche au CNRS
Revue du Palais de la Découverte - janvier 1995

Armés d'une pelle et d'un râteau, nous avons tous, un jour ou l'autre, construit des châteaux de sable. Nous avons remarqué que le sable sec qui se rassemble volontiers en petites dunes sur la plage est impropre à la construction de murailles mais qu'il tient bien mieux lorsqu'il est mouillé.

Philosophant sur le temps qui passe nous avons observé comment une poignée de sable fin file régulièrement entre nos doigts serrés. Nous avons tous regardé, sans vraiment le voir, le flux régulier qui s'écoule du sablier pendant les trois minutes nécessaires à la cuisson des œufs.

Les dunes de sables dans le désert forment des systèmes d'ondes fascinants. Les remblais caillouteux des voies de chemin de fer (généalement inventés par nos arrière-grands-parents) utilisent la propriété d'hyper élasticité qui est une caractéristique irremplaçable de la physique du tas de sable.

La fourmi-lion est un insecte assez familier dans nos contrées dont la larve creuse un piège en forme d'entonnoir dans un sol sablonneux. Une proie qui s'aventure sur cette déclivité déclenche inmanquablement une avalanche qui l'entraîne dans le fond du trou où la fourmi-lion la dévore à loisir.

Les vieilles paysannes indiennes trient, depuis des siècles, les pois chiches en utilisant la ségrégation spontanée par taille des granulaires en agitant une corbeille de forme appropriée contenant le produit de la récolte, sans que l'on sache encore très bien ni pourquoi ni comment ça marche...

On pourrait recenser mille exemples analogues dans lesquels l'observation directe, l'expérimentation quotidienne et l'astuce de nos ancêtres ont permis de tirer des enseignements et des méthodes pratiques sans qu'ils aient eu les moyens d'en discerner ni la généralité ni le caractère fondamental.

Ainsi est-il tout à fait paradoxal que les propriétés des matériaux granulaires secs qui sont omniprésents dans notre vie quotidienne soient encore, pour beaucoup, incomprises. D'ailleurs, bien peu d'entre nous réalisent clairement que la compréhension de leurs comportements constitue un des enjeux économiques et humains essentiels du monde dans lequel nous vivons. Cet enjeu se chiffre en térafrancs à l'échelle mondiale. Il concerne le traitement de minerais, l'agro-alimentaire (les silos à grains, par exemple), la pharmacologie, le génie chimique en phase solide (synthèse des polymères, des matières plastiques), la construction (les bétons), etc... La physique du tas de sable concerne aussi les déserts de la planète et rejoint les préoccupations de ceux qui étudient la désertification (Sahel par exemple)...

Il convient de bien distinguer l'étude des matériaux granulaires secs dont il est question dans ces colonnes, de celle des matériaux granulaires mouillés qui englobent les pâtes, boues et autres agrégats dont l'intérêt industriel et fondamental est tout aussi important. Dans les granulaires secs les particules interagissent entre elles par des chocs et des interactions de friction. L'interaction avec l'environnement gazeux ou liquide est négligeable au contraire de ce qui se passe dans le cas des milieux poreux ou granulaires humides.

Il faut bien reconnaître aussi que la nature ne nous a pas facilité le travail. En effet, le comportement des matériaux granulaires se révèle très souvent contraire à notre intuition qui est généralement issue de notre connaissance pratique et acquise des propriétés des liquides. Il serait d'ailleurs certainement hasardeux de tenter de dresser un inventaire exhaustif des différences de comportement que l'on peut observer entre un matériau granulaire tels que le sable et les liquides courants. Néanmoins, un certain nombre d'évidences sautent aux yeux, dès que l'on se donne la peine d'observer.

Le tableau ci-dessous rassemble un certain nombre de ces différences « macroscopiques » que l'on peut aisément vérifier :

Propriétés	Liquides classiques	Granulaires secs
Écoulement à partir d'un récipient rempli pourvu d'un orifice dans sa partie inférieure.	Écoulement régulier ou turbulent, s'amenuisant progressivement au fur et à mesure que la hauteur de liquide diminue.	Écoulement parfaitement régulier, dont le débit est indépendant de la hauteur (sablier) ou se bloquant par intermittence (effets de voûtes).

Surface au repos	Horizontale.	Eventuellement inclinée jusqu'à un angle maximum caractéristique du matériau appelé « angle critique ».
Miscibilité.	Miscibilité possible.	Presque toujours non miscibles.

Ainsi un observateur averti, toujours par référence à ses souvenirs d'hydrostatique et d'hydrodynamique, est-il en droit de se poser mille questions parmi lesquelles :

- existe-t-il dans un matériau granulaire l'analogie d'une pression hydrostatique qui ne dépend (linéairement) que de la hauteur de matériau au-dessous de laquelle on place la sonde de mesure ?
- ou encore : quid du principe d'Archimède ? L'antienne « tout corps plongé dans un liquide reçoit de la part... » est-elle vérifiée dans un milieu granulaire ?
- et aussi : peut-on parler d'une « viscosité » dans le cas des granulaires comme on le fait dans le cas des liquides ? Rien n'est moins sûr...

Poser ainsi, séquentiellement, les problèmes est naturellement réducteur par rapport à l'ambition des chercheurs qui travaillent dans ce domaine avec un certain optimisme.

En effet, le but ultime, sinon avoué, de la recherche qui est activement menée dans ce domaine et qui fait suite à un grand nombre de travaux poursuivis, depuis le XVIII^e siècle, par de grands physiciens (Coulomb, Ampère, Reynolds par exemple) et par une multitude d'ingénieurs concernés, n'est rien moins que d'essayer de mettre sur pied les équations constitutives des milieux granulaires. Il s'agit donc de bâtir les lois de la physique qui régissent la statique comme la dynamique des matériaux granulaires, du type de celles qui sont universellement connues, dans le cas des liquides, sous le nom d'équations de Navier-Stokes. Il est clair que nous n'en sommes pas encore là et que le paysage qui s'offre au physicien des granulaires est encore loin de présenter la belle unité que lui offre la contemplation de l'hydrodynamique classique.

Pourtant, peu à peu les progrès apparaissent. Des fils conducteurs significatifs ont été tirés de la pelote de problèmes apparemment déconnectés. La contribution des progrès récents en physique statistique y est pour beaucoup, de même que l'apport important, sinon décisif, des techniques modernes de simulation sur ordinateur qui peuvent désormais traiter des cas complexes de configurations de systèmes à n-corps.

D'autre part, plusieurs groupes de physiciens expérimentateurs se sont intéressés à des matériaux simples et parfaitement contrôlés (tels que des empilements de billes sphériques entassées en deux ou trois dimensions) qui modélisent aussi simplement que possible une réalité qui nous apparaît souvent de manière trop complexe pour se prêter à l'expérimentation voire à la simple observation. Ainsi et par exemple, on sait bien qu'un empilement tridimensionnel de matériau granulaire est opaque et donc rebelle à toute analyse détaillée au sein de l'empilement.

Tout d'abord et de manière incontournable pour celui qui est curieux de la physique du tas de sable, il est indispensable d'évoquer le problème, semble-t-il très générique, que pose la statistique des avalanches. De même, l'étude des modes très spécifiques de fragmentation d'un empilement de granulaires en mouvement ou en chute guidée pose aussi des questions intéressantes tout comme les mécanismes de la ségrégation de taille des granulaires.

Les avalanches : système critique auto-organisé ?

Pour la plupart d'entre nous, le processus d'avalanche évoque un phénomène aux conséquences le plus souvent catastrophiques. Cependant le mécanisme même des avalanches présente des caractéristiques fondamentales qui en font un objet particulièrement intéressant, tout à fait dans l'esprit de ce que certains ont appelé « la nouvelle physique ».

Tout d'abord, et c'est bien connu, le déclenchement des avalanches de neige, de sable ou d'autres milieux granulaires est extrêmement sensible à de faibles perturbations : on sait bien qu'une avalanche en montagne peut être provoquée par le simple son de la voix des randonneurs ou par le décollement d'une pierre qui descend le long d'une pente caillouteuse et finit par entraîner, au cours de sa chute, des masses considérables de rochers. C'est un exemple typique de l'adage « aux petites causes, les grands effets » ce qui, traduit en langage scientifique, est la caractéristique d'un système placé dans un état critique.

Il faut bien dire que cette propriété, à elle seule, ne suffirait sans doute pas à justifier l'intérêt considérable que présente actuellement l'étude des avalanches. En effet, nous sommes environnés, dans notre vie quotidienne, de systèmes placés dans un

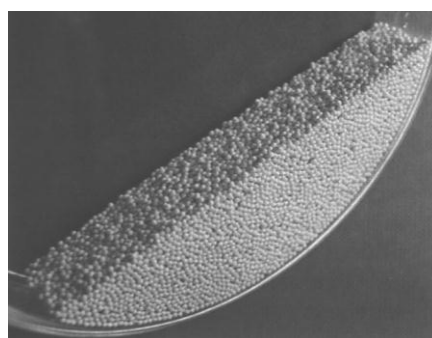
état critique. Ainsi, les changements de phase (solidification, ébullition, etc.) en sont des exemples devenus banals. La physique des états critiques du premier et du second ordre est désormais assez bien connue. Des progrès récents ont d'ailleurs mis en évidence un fait remarquable qui peut être décrit simplement en disant qu'au voisinage du seuil (ou point de basculement d'un état dans l'autre) l'ensemble des comportements du système peut être décrit par des lois d'échelle (ou de puissance) caractérisées par des exposants universels.

Cependant, il faut bien réaliser que les systèmes critiques (changements de phase, par exemple) auxquels nous sommes confrontés quotidiennement sont très généralement provoqués par un petit changement d'un ou de plusieurs paramètres de contrôle. Ainsi dans le cas d'une solidification, c'est un contrôle fin de la température à partir d'un point situé juste au-dessus du point de solidification qui provoquera la transition liquide-solide. On chercherait vainement l'existence d'un paramètre de contrôle, jouant un rôle analogue, dans un système avalancheux. Ainsi, et lorsqu'une avalanche est déclenchée, on observe (en première approximation) que l'empilement de granulaire va évoluer de telle manière qu'il se retrouve de lui-même et spontanément, à la fin de l'avalanche, encore dans un état critique.

En d'autres termes, le piège de la fourmi-lion est particulièrement efficace parce qu'il se retend toujours après avoir fonctionné. Il est toujours régénéré dès qu'un insecte s'est fait entraîner par l'avalanche précédente au fond du trou. Cette propriété qui peut être aisément observée expérimentalement à l'aide du petit montage représenté ci-dessous, constitue la grande originalité des systèmes d'avalanches dont on dit qu'ils sont « critiques auto-organisés » (SOC, self organized criticality en anglais). L'auto-organisation est d'ailleurs un des mots clefs de la recherche actuelle en physico-chimie.

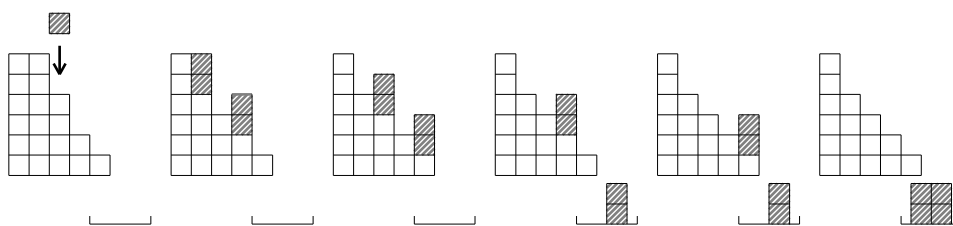


Angle critique du tas de sable observé sur un remblai d'autoroute en construction



Billes d'oxyde d'aluminium dans un cylindre de verre permettant de déclencher et d'observer des avalanches

De manière à comprendre, au moins intuitivement, la démarche qui a conduit il y a cinq ans Per Bak, Tang et Wiensfeld à proposer un modèle dont on a pu penser qu'il pouvait être appliqué et généralisé à de nombreuses situations naturelles aussi variées que la fragmentation des roches, la création naturelle des reliefs, l'évolution des climats, etc..., considérons, ci-dessous, le schéma simplifié d'un automate cellulaire censé représenter l'archétype d'un système SOC :



Le système est constitué d'un empilement de petits carrés placés en colonnes de hauteur décroissante en allant de la gauche vers la droite. La règle du jeu est toute simple et s'appuie sur l'observation des avalanches.

On laisse tomber au hasard un carré supplémentaire sur cet « empilement » et on applique les deux règles suivantes :

- règle 1 : les différences des hauteurs de deux colonnes adjacentes ne peuvent en aucun cas dépasser deux unités (pour simuler l'existence d'un angle critique qu'il est impossible de dépasser sans faire évoluer le système en provoquant une avalanche) ;
- règle 2 : si la différence des hauteurs de deux colonnes adjacentes dépasse deux unités, la colonne la plus haute s'écroule sur la plus basse en entraînant deux carrés vers le bas (et non pas un, pour simuler l'effet d'entraînement, ou effet domino, d'une avalanche).

Notre modèle unidimensionnel et parfaitement rustique d'avalanche étant ainsi constitué, qu'allons-nous mesurer ? Pour répondre à cette question, il faut remarquer, et une expérience le montre bien, que les avalanches générées dans une situation réelle présentent des tailles très variées de l'une à l'autre. Certaines grosses avalanches, d'ailleurs plutôt rares, entraînent vers le bas une grande quantité de matière, tandis que d'autres, plus petites et beaucoup plus fréquentes, ne font dévaler que quelques granules vers le bas.

Ainsi, pour mesurer la taille de ces avalanches et en établir la statistique, allons-nous enregistrer le nombre de petits carrés qui sortent sur le côté droit. Ceci est représenté par le plateau d'une balance qui recueille les petits carrés qui ont dévalé jusqu'au bord de l'empilement. Cette expérience est d'ailleurs réalisable expérimentalement en pesant tout simplement, à chaque avalanche, la quantité de matière qui est expulsée du tas. Ainsi peut-on réaliser dans une expérience réelle d'une part, et sur ordinateur d'autre part, une statistique qui représente la loi de distribution $D(s)$. On obtient ainsi le nombre D d'avalanches de taille s et ceci pour un grand nombre d'avalanches successives. Alors, en procédant ainsi, que donne le calcul de l'automate cellulaire et que donnent les expériences réelles ?

L'automate cellulaire décrit ci-dessus, que l'on peut aisément généraliser en deux ou trois dimensions, conduit à un résultat très évocateur pour les physiciens. Il apparaît que la fonction $D(s)$ représentée en coordonnées logarithmiques, est pratiquement une droite, même sur plusieurs décades de s , c'est à dire sur un grand échantillonnage de tailles d'avalanches, des plus petites aux plus grandes. Il s'agit là d'un résultat tout à fait remarquable qui mérite quelques explications car il est à l'origine d'un certain nombre de spéculations qui débordent le problème des avalanches et peut concerner, disent quelques-uns, jusqu'à la structure de l'Univers ! En d'autres termes, on peut écrire que la loi de distribution des avalanches, du moins telle que le prévoit notre automate cellulaire, suit une loi d'échelle (ou de puissance) de la forme $D(s) \propto s^{-\tau}$ où $\tau \cong 1$ pour des avalanches en deux dimensions.

Une autre manière de procéder aurait été de mesurer le temps T pris par chaque avalanche. On trouverait alors une autre loi de puissance : $D(T) \propto T^{-\alpha}$ dans laquelle $\alpha \cong 0,43$ en deux dimensions et $\alpha \cong 0,92$ en trois dimensions.

Si maintenant on travaillait dans l'espace inverse du temps qui est celui des fréquences f , on trouverait que l'exposant de la loi de distribution en fréquences est $\alpha - 1$ qui vaut donc respectivement $-1,57$ et $-1,08$ en deux et trois dimensions. Or, il se trouve que ce dernier résultat qui montre que la distribution des fréquences des avalanches est pratiquement en $1/f$ est un résultat très fréquemment rencontré dans des domaines de la physique aussi variés que la géophysique (tremblements de terre), astronomie (constellations), électronique (bruit des résistances), structure des fragmentations des roches, etc... De là à penser que le petit automate cellulaire décrit ci-dessus et qui est assez représentatif des systèmes critiques auto-organisés, recouvre en fait une description plus générale telle que celle de l'auto-organisation de l'univers, il n'y avait qu'un pas que certains ont franchi allégrement. Il faut bien le reconnaître, et en l'absence de preuves plus formelles, tout ceci, bien qu'assez séduisant, est encore spéculatif...

Tels sont les résultats de notre simulation par automate cellulaire. Mais que donnent les expériences réelles, effectuées avec un vrai matériau granulaire tel que du sable ou de petites billes ? Il faut bien reconnaître qu'en dépit des efforts remarquables consacrés à la solution de ce problème, les résultats obtenus sont pour le moins divergents. L'état de la question est le suivant : il semble bien (soyons prudents !) que les avalanches qui se produisent dans un tas de sable réel de grandes dimensions (typiquement contenant plusieurs centaines, ou plus, d'éléments) ne suivent pas les lois d'échelles décrites par la simulation sur ordinateur.

Cette petite histoire d'avalanches recèle, comme souvent, deux morales qu'il convient de méditer : d'une part, il est instructif de constater que l'observation, avec un œil critique et curieux, d'un objet aussi banal qu'un tas de sable puisse nous conduire à des constatations de portée aussi générale que celles qui viennent d'être évoquées. L'esprit d'observation est sans conteste la qualité première du chercheur. D'autre part, et c'est la seconde remarque que l'on peut faire à la suite de ce court exposé, et même si l'adéquation du modèle des systèmes critiques auto-organisés aux avalanches de sable reste encore à confirmer, le concept mérite d'être retenu parce qu'il apporte peut-être un début d'explication à la constellation des résultats expérimentaux qui sont publiés quotidiennement et qui montrent qu'un grand nombre de phénomènes sont régis par des lois de puissance qui semblent universelles. Alors, de là à penser que la nature présente une tendance marquée à s'auto-organiser de manière à se trouver constamment dans une succession d'états critiques, il n'y a qu'un pas...

Comment se fluidise un tas de sable ?

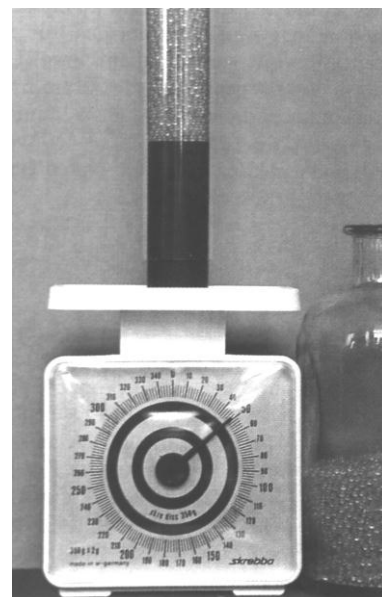
On sait bien qu'un tas de sable au repos et en dehors d'une situation critique telle que celle qui vient d'être évoquée, présente un aspect relativement insensible aux sollicitations extérieures. Ainsi, on peut l'incliner jusqu'à atteindre l'angle critique, l'agiter modérément dans un récipient sans qu'il soit l'objet d'aucun réarrangement. Dans cette situation, le sable, tout comme un paquet de café emballé sous vide, nous apparaît plutôt comme un corps solide. Si, par contre, le sable est suffisamment agité ou incliné, on observe que son volume augmente et que des mouvements divers apparaissent dans son sein et à sa surface. C'est en partant de cette observation simple que Reynolds proposa l'idée désormais admise qu'un milieu granulaire, pour se déformer, devait, au préalable, se dilater. Ce principe baptisé « principe de dilatance » est en fait la traduction d'une des propriétés fondamentales du tas de sable et de sa dynamique.

En marchant au bord d'une plage sur du sable fin mouillé, nous pouvons observer un fait expérimental a priori curieux : le sable s'assèche autour de l'empreinte de notre pied. En réalité, il s'agit d'une manifestation du principe de dilatance qui

impose que le sable que notre pied a déformé a dû se dilater et donc a absorbé dans sa masse l'eau qui stagnait à la surface.

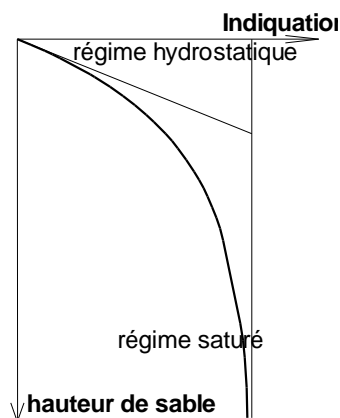
Qu'en est-il de la statique du matériau granulaire, c'est-à-dire à l'équilibre des forces qui agissent au sein et aux parois d'un tube contenant du sable ? Cela peut être visualisé par une expérience très simple (que l'on peut réaliser chez soi !) telle que celle qui est représentée dans la figure ci-contre :

le plateau d'une petite balance (pèse-lettre ou autre) supporte un tube (faisant office de piston), fermé aux deux extrémités et coulissant à l'intérieur d'un tube de plus grand diamètre qui est maintenu en position verticale. Ce tube extérieur est fixé rigidement par un support indépendant de la balance. L'expérience est élémentaire. Elle consiste à verser progressivement du sable (ou un autre matériau granulaire sec) dans la partie haute du plus grand tube en notant les indications données par la balance.



Avant d'essayer de prévoir le résultat de cette expérience, on peut remarquer, et c'est un résultat devenu intuitif, que si on remplissait ainsi un tel dispositif avec un liquide tel que l'eau, on observerait que l'indication de la balance croît de manière strictement proportionnelle à la hauteur du liquide contenu dans le grand tube. C'est l'application d'une loi bien connue de l'hydrostatique. Il n'en va pas de la même manière lorsque l'on remplit

ce tube avec un matériau granulaire tel que du sable ou autre granulaire.



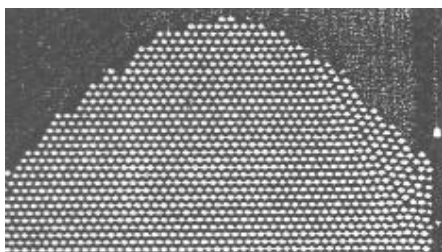
Comme le montre la courbe ci-contre (indication de la balance - hauteur de sable), cette indication augmente de manière régulière et linéaire au début du remplissage (comme dans le cas de l'eau). Puis, si l'on poursuit le remplissage du tube, on observe que dès que la hauteur de sable est à peu près supérieure à deux fois le diamètre du tube, l'indication de la balance se sature peu à peu à une valeur constante. Ainsi, de manière évidente, le plateau de la balance devient insensible à ce que l'on peut rajouter en haut. Il est d'ailleurs très spectaculaire de placer un poids, même lourd, sur le sommet du sable et d'observer que la balance n'indique aucun changement.

Cette expérience, dérivée des idées de Janssen (1895), met en évidence un fait très remarquable : un matériau granulaire de hauteur suffisante, placé dans un tube, ne transmet pas verticalement la pression.

Ainsi et c'est la première question qui vient à l'esprit, si les forces liées aux poids des grains qui sont situés dans la partie supérieure de l'empilement ne sont pas transmises jusqu'au fond du tube, où sont-elles passées ? La réponse est assez naturelle ces forces ont été redirigées vers les parois. Ceci est rendu possible par le biais de la constitution de chaînes de contact transversales qui, à la manière des voûtes de nos cathédrales, redirigent le poids de la charpente vers les colonnes du transept. Ceci constitue une deuxième propriété fondamentale et spécifique des granulaires qui résulte de leur structure imbriquée : une force verticale exercée sur un empilement est redirigée vers les parois du récipient sur lesquelles le granulaire s'appuie et interagit via une interaction de friction granulaire-paroi. De manière plus triviale, on peut dire que plus on appuie verticalement, plus cela appuie sur les parois, plus ça frotte et moins ça bouge ! En gros, le système est autobloquant si on le comprime. Il est aisé de mettre tout ceci en équations. L'intégration d'une équation différentielle élémentaire (ici en deux dimensions, mais qu'il est aisé d'extrapoler à trois dimensions), permet de trouver que la force exercée sur le plateau de la balance d'un tel empilement dépend du rapport de forme de l'empilement $S_0 = hg/L$ (hauteur/largeur) de manière très simple suivant une loi du type $1 - \exp(-S_0 K_f)$, dans laquelle K_f est un paramètre sans dimension qui mesure l'augmentation du frottement aux parois par la redirection d'une force verticale en force horizontale. On voit qu'une telle expression décrit bien les phénomènes observés dans notre expérience élémentaire. On retrouve bien le régime linéaire (quasi-hydrostatique) quand la hauteur de l'empilement est faible car l'exponentielle devient évanescence de même que le régime de saturation obtenu pour un facteur de forme suffisamment grand, comme nous l'avons vu dans l'expérience précédente. Il est intéressant d'observer que cette loi définit ce que l'on peut appeler une « portée de voûtes » qui serait donc égale à $L/2K_f$. On voit bien que l'efficacité des voûtes est plus grande dans un matériau très frottant que dans un matériau constitué de billes glissantes, ce qui est bien naturel car les voûtes ont besoin de frottement pour s'appuyer sur les parois latérales.

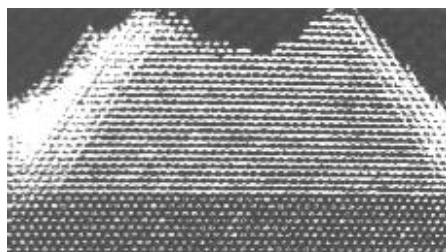
Le grand intérêt de cette présentation, un peu rustique, réside dans le fait qu'elle est aisément transposable à l'étude des problèmes de dynamique. Si on se pose la question de savoir comment un tel empilement va répondre à une sollicitation verticale

telle qu'un lancer vers le haut (par vibrations verticales du support) ou, plus simplement encore, comment l'empilement va-t-il se comporter en chute libre ou guidée, la réponse vient très simplement en substituant, dans les équations précédentes, l'accélération de la gravité g par l'accélération corrigée des forces de friction $g - (F/m)$, où F représente la force de friction aux parois, et m la masse de la tranche de granulaire considérée. Cela est bien naturel dans la mesure où une force de friction (dans le sens de Coulomb) s'oppose au mouvement et nécessite, pour démarrer, une accélération plus importante qu'un objet libre. Cette approche du type « milieu continu » permet de résoudre un grand nombre de problèmes... à condition de ne pas y regarder de trop près. Elle donne une vision correcte du comportement moyen de notre milieu granulaire mais elle ignore délibérément le détail de la dynamique du système et, en particulier, elle oublie de prendre en compte la durée de vie des voûtes qui, au cours du processus, se construisent et se détruisent sans cesse.



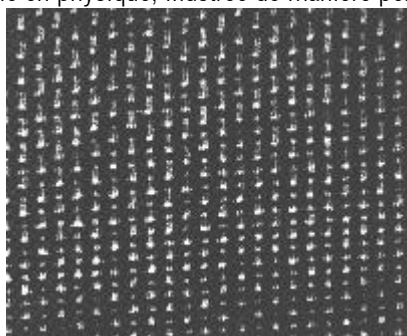
Observation directe du mode de fluidisation d'un empilement bidirectionnel de petites billes de 1,5 mm de diamètre en aluminium oxydé.

La fréquence de vibration verticale est de 15 Hz, l'amplitude ajustée pour provoquer une accélération maximale de 1,5 g.

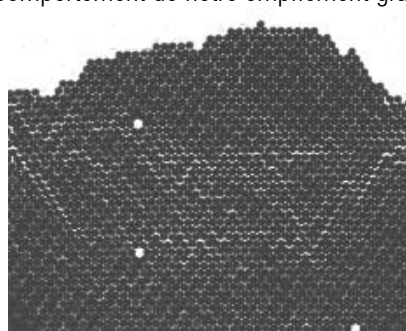


Le processus de traitement de l'image (analogue à une photographie en pose) permet d'observer et de mesurer la hauteur de la zone supérieure qui se dilate suffisamment pour devenir mobile (dilatance de Reynolds). Cette photographie met aussi en évidence, sur les côtés, la convection responsable de la mise en tas.

Cette expérience permet de mettre en évidence cette différence de perception des événements selon que nous les considérons sur de grandes échelles de temps (effets de moyenne) ou, au contraire, pendant des temps très courts. Il s'agit là d'une notion tout à fait générale en physique, illustrée de manière percutante dans l'analyse du comportement de notre empilement granulaire.



Elongations croissantes vers le haut de l'empilement. C'est une vision aux grands temps, moyennée sur un grand nombre de périodes de vibrations.



Processus de fragmentation de l'empilement. C'est une vision aux temps courts obtenue par une photographie stroboscopée (1/1000 seconde).

Ainsi, les deux figures ci-dessus qui représentent en réalité deux observations différentes du même phénomène, l'une aux temps longs, l'autre aux temps courts, permettent-elles de conclure que la distribution croissante des elongations vers le haut de la cellule est en réalité le résultat d'une statistique complexe et encore inconnue de la sommation des fragmentations observées lors d'une chute guidée. Le mode de fluidisation progressive de l'empilement tel qu'il est observé aux temps longs a fait l'objet d'une analyse détaillée qui a montré que ce phénomène obéissait aux équations simples du modèle de milieu continu qui est brièvement décrit ci-dessus. Il faut bien dire que cette combinaison complexe d'événements apparemment erratiques en une loi de dilatation macroscopique régulière reste encore un mystère pour les chercheurs du tas de sable. Il est probable que l'étude de la statistique de la formation et destruction des voûtes apportera une réponse à cette question qui dépasse, une fois de plus, le domaine de l'étude des granulaires.

L'étude du mode de fragmentation d'un matériau granulaire en chute guidée à l'intérieur d'un tube cylindrique est aussi une des questions clefs de la physique de ces matériaux. Le problème peut être posé simplement de la manière suivante : considérons un tube cylindrique vertical dont la partie supérieure est remplie de sable (ou d'un autre matériau granulaire sec). Au début de l'expérience, le sable est maintenu par un petit volet qui est brutalement retiré. Le petit cylindre de sable tombe alors en chute guidée le long du tube. On peut se poser les questions suivantes comment va se comporter le sable au cours de sa chute ? Va-t-il

rester compact ou, au contraire, va-t-il se séparer en petits blocs ? De quelle taille seront ces blocs ? Comment vont-ils évoluer au cours de la chute?

Pour répondre à ces questions, il convient d'abord de remarquer que les lois de la chute étant ce qu'elles sont (vitesses de chute indépendantes de la masse), et en l'absence d'interaction avec l'air ambiant, il n'y a aucune raison que le tas se désolidarise s'il n'y a pas de parois ou de frottements aux parois, ce qui revient au même. Si, par contre, nous prenons en compte ces interactions aux parois, par exemple à l'aide du petit modèle que nous avons détaillé plus haut, il est clair que le tas peut, au cours de sa chute, se séparer en blocs distincts.

D'ailleurs, il est aisé de démontrer, toujours en utilisant les arguments exposés ci-dessus, que la fracture d'un tas, si elle se produit, ne peut se faire que dans la moitié la plus basse de ce bloc. Cela conduit à une modélisation de la fragmentation dont on peut observer les résultats dans la figure ci-contre :



L'axe des temps est horizontal et va de gauche à droite.

On voit le bloc se déliter au cours de sa chute en morceaux de plus en plus petits et on observe que les fractures semblent remonter le long du bloc (onde de fracture ou densité rétrograde).

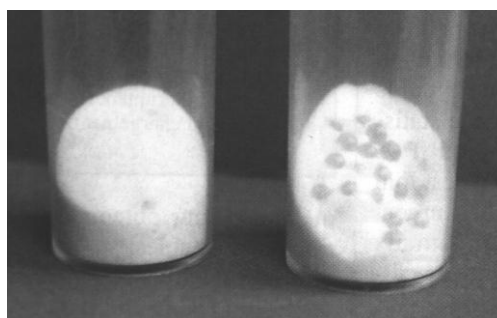
L'analyse complète de cette expérience, très simple, qui montre que la chute s'effectue par blocs successifs, est encore à élucider...

Le résultat de ce modèle, particulièrement simple, conduit, une fois de plus, à une loi d'échelle pour la distribution des tailles des tas à un instant donné. Ainsi trouvons-nous de nouveau une distribution de la forme $D(s) \propto s^{-\tau}$. Il s'agit là d'un résultat particulièrement simple et indicatif, obtenu, il faut le dire, à partir d'arguments probablement réducteurs par rapport à la physique réelle du problème. Néanmoins, et c'est ce qu'il faut retenir de ce petit exemple, on voit bien là qu'il n'est pas nécessaire d'introduire des notions et des équations compliquées pour obtenir des lois d'échelles. Par ailleurs, il existe au moins un autre modèle qui permet d'expliquer le fait expérimental connu que la chute guidée d'un matériau granulaire conduit à la formation de petits blocs séparés et à l'existence d'ondes de fracture ou de densité qui semblent remonter dans l'empilement au cours de sa chute. Ce modèle est dérivé d'un calcul de statistique de la circulation des voitures sur une route. Connue sous le nom de modèle du trafic jam (embouteillage, en anglais), il repose sur l'analogie assez réaliste qu'une voiture qui freine sur une route encombrée (comme un petit bouchon de sable qui ralentit sa chute à cause des frottements aux parois) provoque une onde de ralentissements qui remonte vers l'amont. Il est remarquable que ce dernier type de modèle conduise de nouveau à une statistique en loi de puissance. Quoiqu'il en soit, la recherche dans ce domaine est loin d'être achevée. En particulier, il est urgent de fournir des résultats expérimentaux complémentaires. Ceux-ci devraient permettre de discriminer entre les différents modèles qui ont été proposés pour expliquer les observations assez rudimentaires dont nous disposons aujourd'hui.

La ségrégation des matériaux granuleux

Notre observation quotidienne nous l'a enseigné : pour mélanger deux liquides entre eux, dissoudre du sucre dans le café, lier une sauce à la cuisine, il faut agiter. En réalité, et cela se démontre, l'agitation est indispensable à la réalisation efficace de réactions chimiques en phase liquide. Qu'en est-il pour les phases solides ? Que se passe-t-il lorsque nous cherchons à mélanger, par agitations, rotations ou autres, des mélanges de granulaires solides présentant des différences de taille, de forme, d'états de surfaces ou autres ? La réponse est encore une fois contraire à notre intuition, c'est même tout le contraire de ce qui se passe dans un liquide : plus on agite, plus les matériaux granulaires différents se séparent en phases distinctes. On dit qu'ils se ségrègent (ou se ségréguent).

Il est devenu traditionnel d'appeler le problème de la ségrégation par taille « problème des noix du Brésil » parce qu'on fait référence à la cueillette de ces gros fruits qui, mélangés avec d'autres fruits plus petits dans les camions, se retrouvent, à la fin du voyage et par la vertu des cahots des sentiers qu'empruntent les transporteurs, sur le sommet du chargement...



A gauche, avant agitation.

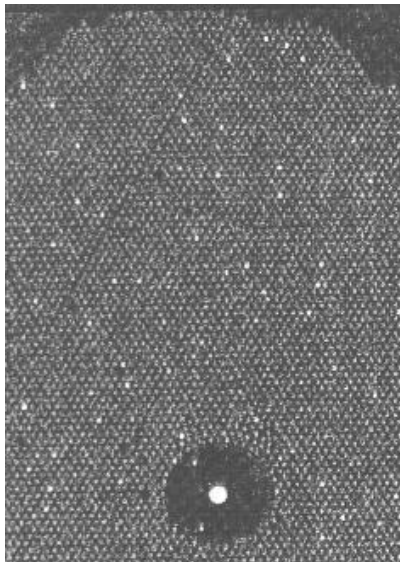
A droite après agitation.

Les billes de verre sont remontées à la surface.

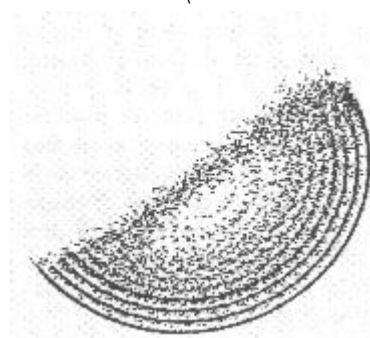
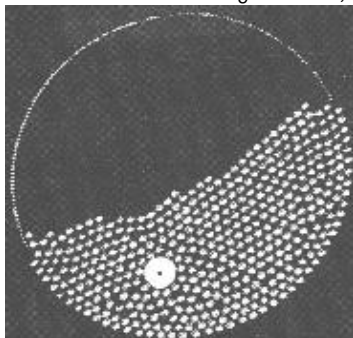
Effet d'une agitation modérée sur un mélange sable fin, billes de verre.

Ce résultat un peu surprenant a des conséquences généralement gênantes dans l'industrie. Ainsi, l'industrie des polymères, qui réalise fréquemment des synthèses à partir de substances disponibles en phase solide que l'on aimerait bien mélanger pour obtenir des taux de réactions convenables, se voit-elle contrainte d'utiliser des appareillages très complexes (appelés mélangeurs dynamiques) et très coûteux. Ne pouvant faire mieux, ces dispositifs se contentent généralement de superposer, à la manière de mille-feuilles, des couches des matériaux solides que l'on désire mélanger et qui se ségrégeraient s'ils étaient agités. On en est même réduit à inclure les matériaux solides à mélanger dans des pâtes auxquelles on fait subir un traitement assez barbare appelé « transformation du boulanger » (parce qu'elle ressemble au geste du boulanger pétrissant la pâte à pain), qui permet de réaliser une mixture convenable. Bien entendu, tout cela coûte très cher et limite considérablement les capacités de production. C'est pourquoi et outre son intérêt fondamental, la question qui est posée aux chercheurs est assez cruciale pourquoi et comment les matériaux granulaires se ségrégent-ils lorsqu'ils sont soumis à des sollicitations d'agitation, de cisaillement ou, tout simplement d'écoulement ?

De nouveau, des progrès significatifs ont été obtenus par la modélisation expérimentale qui réduit de manière décisive le nombre des paramètres du système tout en conservant, autant que possible, les événements significatifs des phénomènes. Ainsi considérons un empilement d'une seule couche de billes identiques auquel est mélangé un palet cylindrique (appelé l'intrus) dont on suit le mouvement, lorsqu'on soumet le milieu à une agitation verticale ou à un cisaillement. Un traitement d'image, élaboré, permet de suivre la progression de l'intrus et de quelques billes marqueuses (plus brillantes que le reste de l'empilement). Tout d'abord, on observe que la ségrégation de taille (à laquelle nous nous limiterons ici) se produit que l'on soumette le milieu à une agitation verticale ou à un cisaillement.



Expérience permettant l'étude de la ségrégation par agitation verticale : on observe que la ségrégation est obtenue soit par des mouvements globaux de convection du granulaire, soit par des effets de voûtes (traces horizontales en partie basse).



Expérience permettant l'étude de la ségrégation par cisaillement : la partie claire permet de mesurer le taux de présence de l'intrus dans l'ensemble du granulaire afin de le modéliser théoriquement.

Ces expériences permettent par observation directe de se faire une idée et de tenter de modéliser quantitativement les mécanismes responsables de la ségrégation par taille, comme on peut imaginer le faire à partir de clichés tels que ceux qui sont reproduits. L'analyse détaillée des résultats obtenus déborderait largement du cadre de cet article. On se contentera simplement de noter qu'elle montre que la ségrégation par effets de voûtes permet de réaliser un tri efficace des matériaux agités. Autrement dit, plus les intrus sont gros, plus ils remontent vite à la surface de l'empilement. Par contre, la convection d'ensemble de la

cellule, qui est obtenue pour des accélérations importantes, tend à brouiller l'effet de taille en remontant tous les intrus à la vitesse du flux ascendant.

La ségrégation par cisaillement est un processus extrêmement efficace qui sélectionne très rapidement les objets selon leur taille. Il suffit par exemple de trois tours du disque pour faire émerger un intrus à la surface de l'empilement. D'autre part, et c'est là un résultat remarquable, on observe que lors de la rotation, toutes les particules de tailles identiques explorent l'ensemble des positions possibles dans le disque avec une probabilité identique. Par contre, un intrus plus gros que les autres particules aura tendance à naviguer sur la surface et sur le pourtour de l'empilement, tandis qu'un intrus plus petit préférera évoluer dans la région centrale de la nappe de granulaire. Bien entendu, tout ceci fait l'objet de modélisations théoriques qui permettent d'approcher du but fixé. Il est malheureusement impossible de les évoquer ici avec suffisamment de détails pour qu'elles restent compréhensibles.

Conclusions

Comme on l'a sans doute deviné, la physique du tas de sable a remporté quelques succès marquants au cours de cette décade. Après bien des années passées en expérimentations diverses qui ont permis de défricher un domaine de recherche difficile, elle a bénéficié tout récemment des percées remarquables accomplies par la physique statistique et les méthodes de simulation sur ordinateur. L'apport de l'étude de systèmes modèles simplifiés est considérable. Ceux-ci ont permis de discerner, parmi les nombreux paramètres possibles des systèmes granulaires, ceux qui gèrent de manière décisive leur comportement aussi bien en statique qu'en dynamique. Cependant il reste encore un travail important et de nombreux progrès à réaliser avant que nous soyons en mesure de globaliser notre vision du tas de sable et capables de hisser, si cela est possible, la physique du tas de sable à la hauteur d'une science achevée telle que la physique des liquides ordinaires (dits newtoniens).

Si l'intérêt pratique et industriel que représente l'apport de cette recherche ne peut être mis en doute, il apparaît, au fil des travaux publiés quotidiennement, que la physique du tas de sable soulève un certain nombre des grandes questions qui se posent de nos jours au physicien : systèmes critiques auto-organisés, problèmes de fragmentation inhabituels, passage des statistiques aux temps courts vers les comportements moyens, dynamiques en $\text{Log}(t)$, criticalité et lois d'échelles...

Enfin et ce n'est pas son moindre intérêt, la physique du tas de sable reste une science de l'observation par excellence. A la différence de domaines plus élaborés, cette science ne requiert sans doute pas (encore) l'usage d'un lourd bagage bibliographique, mathématique ou instrumental. La plupart du temps et pour l'instant, c'est encore de la physique légère. Elle demande de l'observation, de l'intuition, de l'expérimentation. On pourrait presque dire qu'on peut encore découvrir quelque chose d'important « avec ses mains ». Et, il faut bien se l'avouer, pour un chercheur qui comme moi a passé une grande partie de sa vie à décrire le comportement d'atomes qu'il n'a jamais vu, comme il est satisfaisant de parvenir à comprendre le comportement d'un objet qu'il peut, enfin, observer de ses propres yeux.

J.D.

Jacques Duran est ingénieur physicien de l'École Supérieure de Physique et Chimie de Paris, directeur du Laboratoire d'Acoustique et d'Optique de la Matière Condensée de l'Université Pierre et Marie Curie (URA 800 du CNRS) depuis 1981.