

L'étonnante matière en grains

par **Jacques DURAN**
Directeur de recherche
au CNRS de Paris

Le comportement de la matière en grains est, le plus souvent, surprenant et contraire à notre intuition. Des efforts théoriques et expérimentaux récents ont permis d'éclairer sous un jour nouveau quelques-uns des phénomènes propres aux matériaux granulaires, qui sont récemment apparus d'une importance capitale pour de nombreuses industries high-tech et qui intéressent directement la recherche spatiale. Cependant, après dix ans de recherche internationale active, bien des problèmes restent encore dans l'enfance. Il n'existe toujours pas de théorie globale du comportement de la matière en grains, à l'image des équations fondamentales de l'hydrodynamique. Ce court article énumère quelques-unes de caractéristiques surprenantes qui ne sont encore que partiellement élucidées.

1

Petite histoire contemporaine de la physique des grains

La physique des grains [1-3] a bénéficié des efforts de grands précurseurs, tels que Reynolds, Lord Rayleigh, Faraday, Rankine, Coulomb et bien d'autres encore qui ont abordé quelques facettes de cette physique surprenante et multiforme qui semble encore défier l'intuition des chercheurs et des industriels. Délaissée depuis le début de l'ère industrielle, cette branche de la physique ne reçut, ni encouragements, ni subsides. Cependant, l'émergence récente de nouvelles technologies high-tech (céramiques, aimants de TGV, pharmacologie, polymères, etc. jusqu'à l'exploration spatiale) a suscité un engouement intéressé de la part de nos décideurs.

Pourtant, ce n'est pas un intérêt économique qui a catalysé la reprise des recherches dans ce domaine, il y a un peu moins de vingt ans, mais bien une préoccupation tout à fait fondamentale, extrêmement ambitieuse. Elle a fait couler beaucoup d'encre et provoqué, depuis, bien des polémiques dans notre microcosme scientifique.

En réalité, tout est parti d'un algorithme élémentaire imaginé par Per BAK, Chao TANG et Kurt WIESENFELD (BTW) en 1987. Cet automate cellulaire est d'une telle simplicité que n'importe quel étudiant est capable de le programmer sur son microordinateur. En réalité, ce modèle a été imaginé pour illustrer un comportement qui paraissait universel et que les auteurs ont appelé SOC, (Self-organized criticality), c'est-à-dire « criticité auto organisée ». Sans rentrer dans les détails, précisons que nos trois chercheurs cherchaient un automate, aussi simple que possible, dont l'évolution quelconque ramènerait toujours ce dernier dans un état critique.

Il se trouve que cet automate cellulaire (schématisé ci-contre, cf. figure 1), constitué d'une sorte de pyramide sur laquelle on laisse tomber de petits carrés virtuels qui dévalent la pente de l'édifice, mime approximativement un processus d'avalanche de sable ou de rochers. On y retrouve l'inclinaison maximum qui provoque l'avalanche et l'effet d'entraînement bien connu qui fait qu'un seul grain peut en faire dévaler beaucoup d'autres. Tout cela de manière très (trop) élémentaire, il est vrai, comme nous le verrons. Pourtant et selon les auteurs, cet automate cellulaire portait en germe les propriétés caracté-

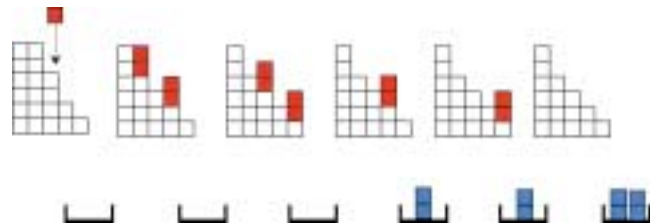


Figure 1 : Version élémentaire de l'automate cellulaire imaginé par BTW. Son fonctionnement est basé sur deux règles élémentaires. On lâche, au hasard, un petit carré (rouge) sur un point quelconque de la pyramide. La différence de hauteur entre deux piles adjacentes ne peut dépasser deux. Si c'est le cas, la pile s'écroule vers le bas en entraînant non pas une, mais deux particules qui vont dévaler sur la colonne adjacente qui peut, à son tour, s'écrouler. Et ainsi de suite jusqu'à la sortie (en bleu). C'est l'effet d'entraînement genre « domino » bien connu des avalanches réelles.

ristiques d'une quantité de phénomènes qui vont des instabilités météorologiques au scintillement des étoiles et, pourquoi pas, disaient-ils, à la création même de l'Univers. Comment cela ? Et bien, il suffisait, pour le constater, d'effectuer quelques statistiques simples sur le nombre des carrés qui parvenaient à dévaler toute la pente. On a trouvé ainsi que ces statistiques, un peu à la manière des tremblements de terre, suivaient des lois de puissances dont les exposants sont caractéristiques de phénomènes critiques plus ou moins universels. Il n'en fallait pas plus pour faire rêver beaucoup de chercheurs (surtout en France et aux États-Unis). Ces derniers se sont évertués, dès les années 1990, à vérifier si la statistique réelle des avalanches de sable ou d'autres grains suivait la statistique en lois de puissances prévue par ce simple automate.

Disons-le tout de suite : les résultats de ces expériences furent négatifs, à quelques exceptions (critiquables) près. Les avalanches réelles de sable ou d'autres grains ne suivent absolument pas un modèle de lois de puissances. Au lieu d'observer beaucoup de petites avalanches et, plus rarement, quelques-unes plus imposantes (comme les tremblements de terre), l'expérience montre que la loi de distribution de la taille des avalanches est piteusement beaucoup plus étroite que le prévoit ce modèle exagérément simplifié. Ce fut une assez vive déception, mais comme c'est assez souvent le cas, ce fut aussi le point de départ d'une grande et belle aventure qui entraîna un grand nombre de chercheurs et notamment les plus jeunes



L'étonnante matière en grains

d'entre eux, vers la passionnante et difficile physique du « tas de sable ». C'est ainsi que renaquit la recherche sur la physique des granulaires, il y a une quinzaine d'années, après bien des décennies d'abandon.

Cette recherche a été dès le début comme elle l'est encore, un exemple parfait de l'émergence d'un nouveau sujet qui a, peu à peu, réuni par accréation, un certain nombre d'équipes de chercheurs. Ces derniers, pour les plus seniors d'entre eux, avaient déjà acquis une notoriété importante dans d'autres domaines d'activité et y ont apporté des compétences diverses. Ce fut aussi un exemple idéal de collaboration internationale même si elle s'est colorée, ici ou là, d'une compétition parfois acharnée (par exemple, France / Allemagne contre USA / Royaume-Uni) mais toujours de bon aloi.

Ce court article se limite à donner un bref aperçu de quelques-uns des comportements inhabituels qui ont déjà été observés et étudiés et pour la compréhension fondamentale desquels, il reste encore beaucoup à faire. Mais il y en a encore beaucoup d'autres, que je ne pourrai citer.

Écoulements et avalanches

Puisque nous venons d'évoquer un des tout premiers modèles d'avalanche, poursuivons notre propos de manière à éclairer le lecteur sur les (nombreuses) voies qui ont été ouvertes dans ce domaine. En effet, le processus d'avalanche reste assez aisément observable du point de vue expérimental et constitue donc un test intéressant pour vérifier les théories. Voici, à titre d'exemple, quelques idées qui ont été avancées et qui présentent, chacune, leurs avantages et leurs inconvénients.

Pierre-Gilles DE GENNES et ses collaborateurs du Collège de France ont tiré largement parti d'un modèle analytique, mais très phénoménologique initialement proposé par Jean-Philippe BOUCHAUD du CEA (Commissariat à l'énergie atomique). L'idée de base est assez simple. On considère qu'une avalanche mobilise la nappe superficielle du matériau granulaire suffisamment incliné, c'est-à-dire au-delà d'un certain angle que l'on appelle l'angle d'avalanche θ_m (m pour mouvement). Lorsque l'avalanche s'est produite, l'inclinaison de la nappe avalancheuse a diminué et atteint la valeur θ_r (r pour repos). On a donc $\theta_m - \theta_r$ positif et de l'ordre de 2° . J.-P. BOUCHAUD a introduit un opérateur approprié à la phénoménologie des avalanches. Partant d'un grain qui dévale la pente, il observe que ce grain peut en déloger un autre. Il introduit alors un opérateur de création. Un grain peut aussi s'arrêter dans sa course et se bloquer dans un interstice. Dans ce dernier cas, il s'agit d'un opérateur d'annihilation. Lorsque le nombre de grains délogés est égal à celui de ceux qui se sont arrêtés, la nappe avalancheuse reste constante. Cela se produit pour un angle particulier, situé entre θ_m et θ_r , que l'on appelle l'angle neutre θ_n . Notez, au passage que le modèle d'automate cellulaire de BTW ignore tout de ces subtilités, pourtant bien réelles et c'est sans doute pour cette raison qu'il ne peut refléter la réalité de la statistique des avalanches.

Utilisant ces deux opérateurs de création et d'annihilation, et cet angle neutre, il est assez aisé d'écrire une équation différentielle traduisant l'évolution de la masse des grains en mouvement à laquelle on adjoint une simple équation de conservation du nombre total des grains. La résolution de ces équations couplées (un peu modifiées) a été poussée à l'extrême par l'équipe du Collège de France qui a pu prédire un grand

nombre de comportements de systèmes avalancheux dans de nombreuses configurations, par exemple lorsque l'avalanche est arrêtée par un fond horizontal ou lors de l'écoulement d'un silo. Toutes les vérifications expérimentales n'ont pas encore été conduites, car certaines demeurent assez délicates. Cependant, on peut penser que ce modèle phénoménologique reflète une bonne partie de la réalité objective.

D'autres chercheurs ont utilisé les équations fondamentales de la mécanique des sols implémentées, entre autres, d'une propriété, initialement suggérée par Coulomb et que l'on appelle « le critère de rupture de Coulomb ». Quelques succès ont été obtenus récemment avec cette méthode, mais là encore, la dynamique temporelle de l'avalanche reste problématique. Il y eut aussi de nombreuses simulations numériques avec diverses méthodes dont je dirai quelques mots dans la suite de cet article.

Les forces dans les empilements

Obtenir un état complet des forces qui agissent entre les grains d'un empilement quelconque se révèle être un problème d'une redoutable complexité. Pour des raisons fondamentales que j'expliquerai plus loin et de manière paradoxale, on peut dire brièvement qu'établir la statique d'un tas de grains est une opération bien plus difficile que d'étudier sa dynamique, c'est-à-dire de prévoir les mouvements de grains lorsque ceux-ci sont animés d'une vitesse relative.

D'ailleurs, à ce sujet, l'expérimentation nous en a appris beaucoup plus que nous aurions pu l'imaginer *a priori*. Les paradoxes ne manquent pas lorsque l'on étudie la répartition des forces dans un empilement de grains. J'en donne ici, un seul exemple, mais nous en connaissons tous beaucoup d'autres.

Il s'agit de ce que nous appelons « le trou de pression » sous un empilement (the dip en anglais). L'histoire nous apprend que les premiers observateurs (Smid et Novosad) de l'effet curieux dont je vais parler ont rapporté qu'il existait un trou de pression (ou de forces) au centre et à la partie inférieure d'un empilement conique. Ces pionniers utilisaient un appareillage

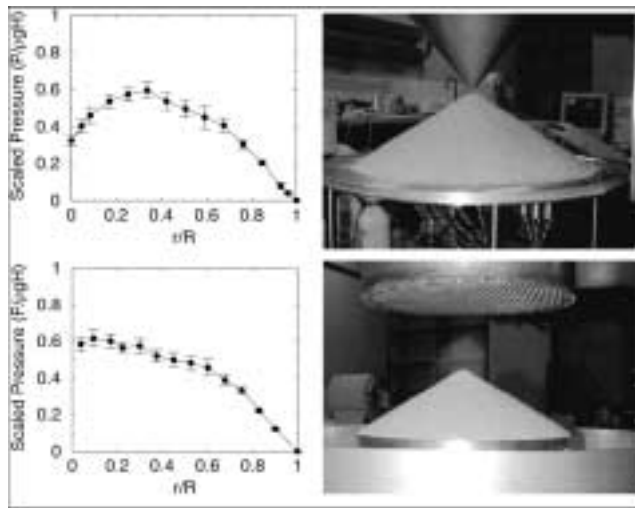


Figure 2 : L'empilement conique du haut de la figure a été obtenu en déversant le sable à partir d'un entonnoir conique. L'empilement se fait donc couche après couche, par une suite d'avalanches. L'empilement du bas, apparemment cylindrique est obtenu en déversant le sable en pluie à partir d'une trémie cylindrique. Seul, l'empilement du haut présente le fameux trou de pression.



très rustique et la mesure des forces sous un empilement est loin d'être aisée. Le résultat d'une expérience franco-américaine récente, nettement plus sophistiquée, est rapporté ci-contre (cf. figure 2).

Ce phénomène curieux, ainsi illustré, a provoqué de nombreuses discussions dans le microcosme international des adeptes de la psammostatique (la statique du tas de sable, *psammos* en grec) car il constitue un test très discriminant pour les modèles théoriques qui sont actuellement discutés et qui visent à décrire la statique du tas de sable. Une expérience très récente (toujours franco-américaine) montre d'ailleurs que c'est le cisaillement latéral provoqué par les avalanches successives (de l'expérience du haut de la figure 3) qui créent, peu à peu, le fameux trou de pression observé sous l'empilement. Pour se faire une idée de ce processus, on peut imaginer que l'on empile des cartes à jouer en forme de toiture. Les chaînes de forces provoquées par les avalanches périphériques forment un écran, en quelque sorte, pour la propagation des forces verticales qui surplombent le trou de pression. Quoi qu'il en soit, ces expériences montrent à l'évidence que les empilements ont beaucoup de mémoire. Ils se souviennent parfaitement de la manière dont ils ont été fabriqués, même si cela n'est aucunement visible de l'extérieur.

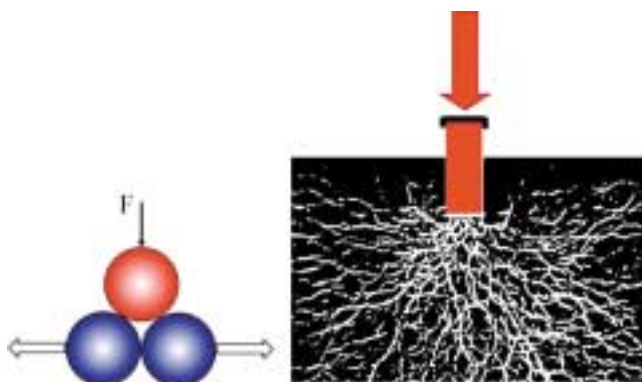


Figure 3 : Le schéma de gauche montre le mécanisme de base qui gère la propagation des contraintes dans un empilement granulaire. Une force appliquée sur la boule rouge tend à écarter les deux boules bleues sur lesquelles elle repose. On assiste ainsi à un déploiement en éventail des forces appliquées.

De manière fondamentale, tous les modèles théoriques ou simulés, connus actuellement, impliquent, de manière plus ou moins transparente, le résultat d'une simple constatation qui est illustrée sur la partie gauche de la figure précédente (cf. figure 3).

La partie droite de cette figure est due à une très belle expérience de photoélasticité de Dantu (aux Ponts et Chaussées) qui, dans les années 1950, utilisa des tubes de verre empilés perpendiculairement au plan de la figure et sur lesquels, il exerça, localement une force symbolisée par le piston rouge. On voit très bien sur cette photographie la manière dont se distribuent les forces au sein du matériau granulaire. C'est très loin de l'image que l'on obtiendrait avec un milieu continu comme un bloc de verre, par exemple.

Autant le dire tout de suite, les discussions (pour ne pas dire les polémiques) vont bon train sur ce sujet entre les tenants de la mécanique des sols (plus ancienne) et les adeptes de la physique des grains (plus récente). Personne ne semble encore détenir la vérité absolue sur ce sujet délicat et important et qui remet en cause bien des idées reçues.

Mélanges et ségrégation

C'est un fait : les matières en grain de taille, de forme, d'états de surfaces, etc. différentes, refusent de se mélanger ! Au contraire, si on les agite, elles se séparent ou se ségrègent comme nous le disons. C'est un fait extrêmement nuisible pour un grand nombre d'applications pratiques, même les plus high-tech comme, par exemple, les carburants des fusées Ariane. Ce n'est d'ailleurs pas nouveau, puisque les frères BUREAU, maîtres de l'artillerie de Charles VII, à la fin de la guerre de Cent Ans avaient déjà identifié ce problème : la poudre à canon, soigneusement préparée et mélangée (à la main) se retrouvait sur les champs de bataille, après un long parcours en chariot cahotant, gravement dissociée entre ses trois éléments constitutifs. D'où des résultats – disons – aléatoires... et périlleux pour les artilleurs !

Une expérience très simple, réalisée avec des moyens élémentaires permet d'observer ce que nous appelons la ségrégation par avalanche et qui conduit, en l'occurrence, à une belle stratification telle que celle que l'on peut l'observer sur la partie droite de la figure 4.



Figure 4 : Un cylindre plat (1,5 cm d'épaisseur) est à moitié rempli d'un mélange de petits grains de deux sortes différentes. Les uns (blancs) sont en verre, petits et sphériques. Les autres (noirs) sont de plus gros morceaux de verre noir pilé. Lorsque l'on fait tourner rapidement le cylindre autour de son axe (perpendiculaire au plan de la figure), les gros grains noirs se séparent des petits blancs et se réfugient sur le pourtour du cylindre. Ce n'est pas un effet inertiel, car les grains ont tous la même densité. Si au contraire, on fait tourner le cylindre lentement en laissant à chaque avalanche le temps de se produire, on observe, après quelques tours, une belle stratification en bandes blanches et noires alternées.

Une explication plausible de ce phénomène de stratification fut récemment proposée par l'équipe du Collège de France. Cependant, le phénomène est plus complexe qu'il n'y paraît. Ainsi, en 3D, observe-t-on aussi une succession de bandes blanches et noires, mais cette fois-ci, le long de l'axe du cylindre. Beaucoup de mes collègues se sont penchés sur ces phénomènes de ségrégation granulaire, dans différentes configurations. Certains ont même été jusqu'à utiliser la NMRI (Résonance magnétique nucléaire en imagerie) en usage dans les hôpitaux, pour scanner le matériau et observer ce qui se passait à l'intérieur pour essayer de comprendre. Quoi qu'il en soit, j'espère ne vexer personne en déclarant que nous sommes très loin d'avoir une vision claire de ce phénomène. Il faudra pourtant bien y parvenir !

On peut, cependant, raisonner de manière un peu plus fondamentale en constatant qu'à la différence des liquides qui acceptent souvent de se mélanger sans difficulté, il n'existe pas de mouvement brownien capable d'agiter et de mélanger d'aussi lourdes particules que celles des milieux granulaires réels. En l'absence de la « petite cuillère » brownienne, les matériaux granulaires ne présentent aucune tendance au mélange spontané. Bien au contraire, lorsqu'ils sont agités, secoués, vibrés,



L'étonnante matière en grains

etc., ils ont tendance à se regrouper en membres de la même famille (d'où le terme imagé de ségrégation donné par les physiciens). Pis encore, s'il n'y a qu'une seule particule qui soit plus grosse que toutes les autres, on observe que cette dernière cherche à s'évader de ce milieu qui semble lui paraître hostile.

On ne peut pas dire que les théories de toute nature ainsi que des simulations numériques nombreuses ont fait défaut dans ce domaine. Si la plupart d'entre elles permettent de justifier, ponctuellement, telle ou telle expérience, aucune d'entre elles n'est, à ce jour, capable de prendre en compte l'ensemble de la phénoménologie de la ségrégation granulaire.

4

Notons, en conclusion de ce bref aperçu, que les industriels qui doivent réaliser des mélanges de particules de nature différentes rencontrent bien des difficultés. Qu'il s'agisse de carburants complexes ou de grains de polymères solides, ils doivent faire appel à des mélangeurs sophistiqués et très coûteux. Certains se contentent de réaliser des sortes de gâteaux mille-feuilles sophistiqués dans lesquels les particules de natures différentes sont incluses dans des tranches alternées. Tout cela coûte évidemment très cher et ne peut être mis en œuvre que pour des produits à haute valeur ajoutée comme les carburants et poudres de boosters de fusées spatiales, par exemple.

Instabilités granulaires

De manière très simplifiée, en physique ou en mécanique, une instabilité résulte de l'« hésitation » du système entre plusieurs évolutions possibles. Le système choisit alors... de ne pas choisir et il affecte un comportement dans lequel apparaissent les différentes solutions qui lui sont accessibles.

Ces instabilités sont, en général, révélatrices de profondes non-linéarités dans les équations qui gèrent les phénomènes observés. Ainsi, comme les interactions basiques des matériaux granulaires sont, elles-mêmes, intrinsèquement non linéaires (chocs et frottements), on peut s'attendre au pire en matière d'instabilités, dans cette classe de matériaux. On pourrait d'ailleurs en citer toute une collection, même en partant d'une simple bille lâchée au-dessus d'une plaque vibrante qui conduit à un processus chaotique exemplaire.

En matière de grains vibrés, on peut citer CHLADNI qui était surtout un grand acousticien, mais qui a été le premier à observer de la matière granulaire sous vibration. CHLADNI était un acousticien, physicien et musicien allemand du XVIII^e siècle. Il remarqua que les petits débris des crins (de chevaux) de son archet qui tombaient sur la table de son violon, avaient tendance à se regrouper en petits tas constituant des figures caractéristiques des vibrations du violon. Substituant du sable aux légers morceaux de crin de l'archet, il constata que les grains de sable se rassemblaient aussi en petits tas, mais présentaient alors des figures strictement complémentaires des précédentes. Sans en comprendre la signification profonde, CHLADNI avait mis le doigt sur une distinction fondamentale de la matière granulaire. Ainsi, les grains de sable, directement soumis aux vibrations mécaniques de la table du violon, se rassemblaient aux nœuds de déplacement, où l'agitation est moindre. Les crins de cheval étaient, pour leur part, soumis aux vibrations acoustiques de l'air qui existait au-dessus de la table du violon. Ainsi « préféreraient-ils » se réfugier aux ventres de vibration de la table qui, comme on le sait, correspondent à un minimum d'agitation acoustique. Il faut donc distinguer la physique des gros grains (« secs », comme nous l'avons dit) de celle des petits grains

légers qui sont en interaction avec le fluide ambiant et qui sont donc dits « mouillés ».

Gros grains : instabilités sous vibrations

Une expérience typique mime celle de Michael FARADAY qui étudiait les figures dessinées à la surface d'un liquide placé dans un récipient supporté par une table vibrante. Si l'hydrodynamique parvient à expliquer la totalité de ces images, il n'en est évidemment pas de même si on substitue au liquide un milieu granulaire constitué de grains solides de taille typiquement supérieure à 100 microns. L'équipe d'Harry SWINNEY (Austin, Texas), entre autres, s'est fait une spécialité de l'étude de ces étranges « patterns » que l'on observe dans ces conditions. On observe ainsi, selon les conditions de vibration, une série de structures de surfaces qui vont des carrés aux hexagones, aux spirales et autres rayures, sans parler d'ondes solitaires (solitons) que l'on appelle « oscillons », avec une route vers le chaos qui ne ressemble absolument pas à ce que l'on peut observer dans les liquides. Cette phénoménologie reste encore difficile à analyser en détail bien que de nombreuses équipes de théoriciens et de simulateurs se soient penchées sur ce problème. Une collaboration fructueuse franco-allemande a permis de débrouiller quelque peu le problème en deux dimensions. L'image ci-dessous provient du travail de Stefan LUDING à Stuttgart qui est un des meilleurs spécialistes de la simulation des milieux granulaires.

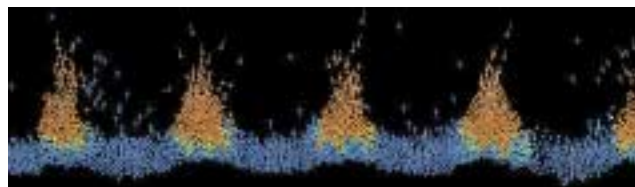


Figure 5 : Instabilité d'une couche épaisse 2D de grains métalliques sur une table vibrante. Il s'agit d'une simulation numérique, mais qui représente parfaitement la figure réelle. Les couleurs symbolisent la vitesse croissante des particules en allant du bleu au rouge.

Poudres fines : microvolcans et gouttelettes

Si, cette fois, on utilise des particules dont la taille est typiquement inférieure à 100 microns, on observe alors toute une série de phénomènes nouveaux dus à l'interaction des particules avec l'air environnant. J'en ai choisi un exemple assez spectaculaire, mais il en existe un grand nombre d'autres. C'est d'ailleurs de cette physique des milieux granulaires « mouillés » et non plus secs, que relève la formation des dunes dans les déserts, les ondulations périodiques que l'on observe sous les premières vagues en bord de mer ou dans les déserts de sable. Du point de vue chronologique, l'étude des granulaires « mouillés » a succédé à l'étude des granulaires « secs ». Bien nous en a pris, d'ailleurs, car il était indispensable de connaître les propriétés fondamentales de la matière en gros grains pour tenter de comprendre ce qui se passait lorsqu'un fluide venait participer à cette nouvelle physique. L'exemple suivant [4-5] est une parfaite illustration de cette démarche, puisque les effets de l'air ambiant sur les particules se combinent harmonieusement avec les effets d'avalanche précédemment étudiés.

Il existe des explications détaillées de ces expériences, encore incomplètes, comme toujours, tant que nous ne disposerons pas d'une vision générale et unifiée de la physique du tas



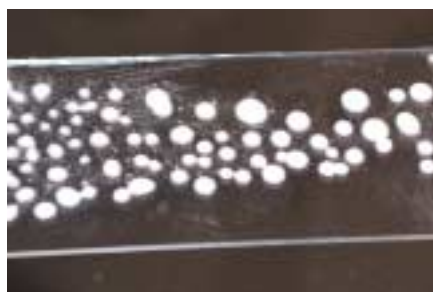


Figure 6 : La figure de gauche est obtenue en exerçant, en deux endroits (sous les apex des deux montagnes), des chocs répétés et bien constants en amplitude sous une boîte métallique horizontale contenant une couche épaisse et uniforme de très petits grains de silice. Celle du milieu représente une lame de microscope sur laquelle on avait déposé une couche mince et uniforme de poudre de silice. En exerçant une série de chocs répétés et d'amplitude constante sur le bord de cette lame, on obtient cette figure d'instabilité en forme de petits cônes disjoints. L'image de droite est obtenue en prenant, de profil, des photos instantanées des petits volcans en activité, responsables de la formation des figures précédentes. On aperçoit nettement les sommets des cratères qui vomissent des jets de poudres après chaque choc. La taille de ces microvolcans est typiquement de l'ordre de 5 mm. Le diamètre des grains utilisés est d'environ 40 microns.

de sable. Cependant dans le cas présent, il est remarquable que les équations qui gèrent ces phénomènes de petits grains possèdent la même structure que les équations de mouillage par les liquides. On y retrouve même l'équivalent des forces capillaires et de la pression de Laplace. Il est remarquable aussi, du point de vue de la géologie que l'on observe ainsi directement avec quelques grains de poudre, la formation spontanée de chaînes volcaniques miniatures. Tout cela fait rêver quelques chercheurs d'autres disciplines connexes.

Paysages et musique dans les déserts de sable

En matière de rêve éveillé, les déserts et surtout leurs magnifiques reliefs de toutes tailles et de toutes sortes, exercent une fascination sans pareille sur les esprits curieux. Le livre de BAGNOLD [6], écrit dans les années quarante, est en quelque sorte la Bible de ces chercheurs passionnés de désert. Il y décrit et analyse ses observations sur le terrain avec une grande clarté et une intuition par rapport à ce que nous savons maintenant,

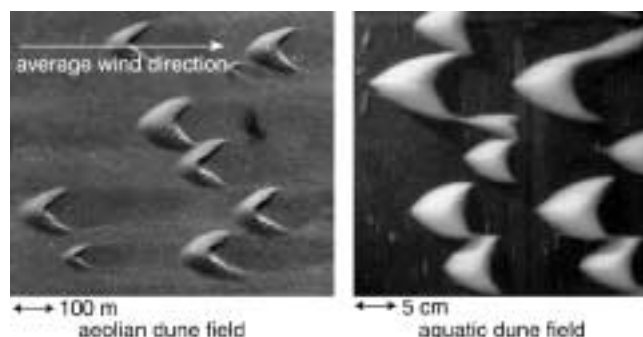


Figure 7 : À gauche une vue aérienne d'un paysage de barkhanes de sable. À droite, une expérience effectuée avec du sable dans de l'eau qui est agitée de manière à simuler l'effet de cisaillement du vent. On observe ainsi un mini-paysage de barkhanes ce qui est très instructif, car les processus de déplacement des grains de sable sont très différents dans les deux cas. On voit aussi l'effet de la viscosité de l'eau par rapport à l'air qui réduit l'échelle des paysages (DOUADY et al.)

tout à fait étonnante. Nous allons citer deux exemples de travaux qui sont actuellement poursuivis dans ce domaine.

Ce que nous savons maintenant est dû essentiellement à des observations sur le terrain qui ont été menées, en particulier, dans les déserts de Mauritanie. Les dunes ou barkhanes (*croissant* en arabe) dont la forme particulière, illustrée figure 8, a suscité un grand nombre de modèles et de simulations. Il s'agit d'ailleurs bien d'un problème de granulaires « mouillés », bien que les particules de sables soient assez grosses (100 microns et parfaitement sphériques), car les vents du désert soufflent avec une violence extrême. Les paysages de barkhanes sont en quelque sorte les cousins des paysages de la figure 6, à la différence près que cette fois-ci le vent exerce un effort de cisaillement, parallèlement à la surface du sable. Dans la figure 6, le souffle de l'air provenait du dessous des couches granulaires. Sous l'action de ces vents dominants, rasant le désert on observe ainsi la formation de véritables « troupeaux » de dunes qui progressent d'ailleurs lentement en remontant vers le vent. La vitesse de progression (typiquement quelques dizaines de mètres par an) dépend d'ailleurs de la taille de chaque barkhane.

Grâce aux effprévue au début de notre aventure. Il s'agit de l'exploration spatiale. La NASA (National aeronautics ans space administration) organise fréquemment des « panels » d'examen de projets auxquels elle invite fréquemment des chercheurs de notre pays. Le but de ces travaux financés par la grande agence spatiale américaine est d'essayer de prévoir les conséquences de l'impact d'une sonde atterrissant dans un désert martien ou autre. La gravité y étant très faible, on peut s'attendre à ce que le moindre impact soulève un important nuage de fines particules (que l'on appelle régolites) qui peuvent avoir de graves conséquences sur la suite du programme (cf. l'échec de Beagle 2 atterrissant sur Mars ?). Un colloque international sur ces sujets a d'ailleurs été organisé en février 2005 avec le concours de la NASA.

À ces préoccupations sont venues s'adjoindre celles qui concernent l'analyse détaillée des paysages des astres de notre



Figure 8 : Un troupeau de barkhanes martiennes.

système solaire qui sont pour beaucoup d'entre eux recouverts de régolites. Il s'agit notamment de comprendre les phénomènes d'érosion due à des liquides ou au vent cisailant. Les enjeux sont considérables et la physique des sables est devenue cruciale pour l'exploration spatiale. C'est ainsi, par exemple, que des structures en forme de barkhanes ont été photographiées sur le sol de Mars [7]. J'en donne un exemple sur la photo ci-dessus.

Une autre curiosité qui a déjà été observée depuis très longtemps dans les déserts (puisque Marco POLO y faisait déjà référence) concerne le « Chant des dunes ». Pierre ROGNON qui est un grand spécialiste des déserts, raconte à ce sujet les étranges coutumes de peuplades sahariennes qui se rassemblent autour d'une dune qu'ils se mettent à frapper en cadence avec des gourdins. S'élève alors une puissante tonalité qui se propage à des kilomètres de distance et qui intrigue encore les chercheurs.

Ces sons sont de diverses natures selon les dunes et la manière dont ils sont produits. Cela va des croassements de grenouille à des sons très purs comme ceux provoqués par une corde de contrebasse (on peut les écouter en surfant sur le site [8]). Le spectre de ces émissions sonores, incroyablement puissantes, est par ailleurs assez nettement marqué. Il ne s'agit aucunement d'un bruit, mais d'une structure musicale parfaitement définie.

Les derniers travaux (DOUADY et al.) montrent qu'il s'agit bien d'un effet lié à l'auto organisation et à l'auto synchronisation, produite par les vibrations de l'air qui environne les particules de sables qui sont mises en vibration. Ce serait donc bien un effet coopératif (ou, si l'on veut, de résonance) qui expliquerait la puissance de ce phénomène. Tout cela reste très étonnant et n'est pas encore totalement élucidé.

In fine, cet article est bien trop court pour que l'on puisse rappeler les multiples développements qu'a connus la physique du sable ces dernières années, non plus que les innombrables développements que l'on peut entrevoir et qui sont en gestation (boues, érosion orographique, pigments, etc.). Relèvent encore de cette physique l'étude des flux granulaires en conduite qui présentent de singulières similarités avec les embouteillages des voitures sur les autoroutes d'où le nom de « traffic jam » donné à cette activité, le « splash granulaire » où on étudie l'impact

d'une particule sur une surface de grains, les études concernant les petits grains chargés, les grains nanométriques et bien d'autres encore. Tout cela relève de la physique des matériaux granulaires.

Conclusion : pourquoi cette physique est-elle si difficile ?

C'est en effet une question qui vient immédiatement à l'esprit. Comment se fait-il qu'après tant d'efforts, répartis sur plus de deux siècles, personne ne soit encore parvenu à établir quelques équations maîtresses à l'image de ce qui a été fait pour l'hydrostatique ou l'hydrodynamique ? Comment se fait-il que l'on évoque toujours des théories phénoménologiques et non point de théories générales ou analytiques ? Cela tient, sans doute, à la très grande difficulté qu'il y a à gérer proprement les deux interactions fondamentales de la physique des grains que sont les forces de contact solide-solide qui résultent des chocs et des frottements. Les chocs sont par nature, profondément non linéaires. Il suffit, pour le comprendre, de réfléchir au problème posé par le simple rapprochement de deux sphères, déjà bien compliqué, et de réaliser que les grains réels ne sont presque jamais sphériques ! D'autre part, les équations de Coulomb nous apprennent que les forces de frottement statique sont, par nature, indéterminées. Si elles sont déterminées, c'est par l'histoire de la mise en contact. Le problème de la dynamique est plus aisé à résoudre puisque, cette fois-ci, les forces sont monovaluées. C'est pour cette raison que j'indiquais plus haut que la statique des granulaires est plus difficile que la dynamique.

Un autre facteur décisif pour mettre en échec une théorie détaillée de ces phénomènes provient du caractère hautement dissipatif des forces de contact (chocs et frottements). En gros, si on peut déterminer l'énergie qu'il faut introduire dans un système granulaire pour le faire évoluer, on ignore tout de la manière dont cette énergie est dissipée. Dès lors, point de bilan énergétique possible et une théorie analytique s'avère presque impossible. Pourtant, nos spécialistes de la simulation numérique ont réussi à mettre au point plusieurs méthodes qui donnent, selon les cas, satisfaction. L'une d'entre elles ressort des méthodes très bien testées de la dynamique moléculaire qui préside aux réactions chimiques. Dans le cas des granulaires, il « suffit » d'introduire les bonnes forces de contact. Certains y sont parvenus.

D'autres méthodes rencontrent des succès. Elles sont basées sur des considérations de mécanique des chocs et des frottements et gèrent la dynamique (et quelquefois la statique) de manière séquentielle. Mais pour voir la difficulté que l'on rencontre à traiter ces problèmes à N-corps, imaginez que vous lanciez, les unes contre les autres, une dizaine de boules de billard. Les boules vont se heurter et rebondir pour se heurter de nouveau. Imaginez qu'une seule erreur, dans la prévision des durées de chocs ou dans la séquence des chocs successifs, conduira à une prévision totalement erronée, pour la suite des événements.

En conclusion, on peut, sans conteste, prévoir que la physique des grains qui est de plus en plus demandée par les applications de toute sorte, a de beaux jours devant elle. Nous ne sommes pas prêts de trouver une solution générale à ces problèmes passionnants !



Bibliographie et netographie

- [1] GUYON E. et TROADEC J.-P. *Le sac de billes*. Edition Odile Jacob, 1994.
- [2] DURAN J. *Sables, poudres et grains*. Eyrolles Sciences, 1999.
- [3] RISTOW G. *Pattern formation in granular materials*. Springer Verlag Telos, 1999.
- [4] DURAN J. *Sables émouvants*. Belin, 2003 et *Pour La Science*, septembre 2002, p. 86.
- [5] On trouvera des images et des films vidéo sur le site : <http://www.espci.fr/usr/jduran>
- [6] BAGNOLD R.A. *The physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London : Chapman and Hall, 1941.
- [7] http://jcboulay.free.fr/astro/sommaire/image_jour/mars_globe/page_dunes.htm
- [8] Chant des dunes : http://www-personal.engin.umich.edu/~7Enori/booming_sand.html



Jacques DURAN travaille sur les milieux granulaires depuis une douzaine d'années avec l'équipe de Jussieu. Il a longtemps enseigné cette discipline au sein du DEA de Physique des liquides de Paris. Ancien directeur de recherche au CNRS, il est aussi directeur des études honoraire de l'ESPCI.

