

Le 7 juin 1692, un puissant tremblement de terre frappa la ville de Port-Royal, en Jamaïque. L'une des secousses liquéfia pendant un instant le sable sur lequel les bâtiments étaient construits, et une bonne partie de la cité fut détruite et ensevelie; on a même pu identifier l'heure précise de ce phénomène soudain par une montre retrouvée noyée dans les sédiments! Dans cette zone qui est soumise à de nombreux événements sismiques, le même phénomène se reproduira deux siècles plus tard, en 1907 (voir la photographie page 63).

On comprend mieux aujourd'hui les mécanismes physiques responsables de la liquéfaction ou de la déstabilisation d'un milieu granulaire. Il s'est révélé nécessaire de tenir compte non seulement des grains de sable, des frottements entre eux ou de leurs collisions, mais aussi du fluide dans lequel ils baignent, qu'il s'agisse d'air dans le cas des dunes ou d'eau dans le cas de la ville de Port-Royal.

Une manifestation spectaculaire du rôle du fluide, déjà décrite par Marco Polo mais qui n'a été comprise que dans les années 2000, est celle des dunes chantantes: la couche de grains qui s'écoule fait vibrer l'air, ce qui produit un son grave proche d'un bourdonnement. C'est aussi le vent qui met en mouvement les grains de sable, dont résultent le déplacement des dunes et leurs formes variées, que ce soit dans les déserts ou sur d'autres planètes telles que Mars. Et cela ne concerne pas que les dunes de sable, puisqu'on a même récemment observé sur Pluton des dunes constituées de grains de méthane solide...

Les milieux granulaires, omniprésents dans la nature et dans l'industrie, se comportent de façon particulière, et les scientifiques s'y intéressent depuis longtemps. Les décennies passées ont connu, notamment en France, un effort important pour comprendre de façon unifiée les propriétés statiques et dynamiques de la matière sous forme de grains.

Pour ce faire, les chercheurs se sont appuyés sur un modèle simple, dit du sac de billes, où l'on considère des empilements de sphères non déformables et de même diamètre. On avait ainsi relativement bien décrit les propriétés des milieux granulaires secs. Mais cela n'avait pas encore été le cas pour des grains immergés dans un liquide ou interagissant avec l'air qui les entoure. Or cette situation est fréquente: transport pneumatique de la farine dans les moulins, vents de sable dans le désert, béton frais dans les coffrages, grains charriés par les cours d'eau...

Dans ce contexte, une question générale se pose aux physiciens: peut-on caractériser un écoulement de grains par un paramètre qui jouerait un rôle équivalent à la viscosité d'un

miel s'écoulant sur une surface inclinée? Si oui, peut-on exprimer ce paramètre, qui quantifie la résistance à l'écoulement, à partir des grandeurs physiques liées aux grains (leurs géométries et leurs masses) et au fluide présent entre les grains (sa densité et sa viscosité) pour rendre compte de l'effet global? Les recherches récentes ont montré que l'on peut répondre positivement à ces questions.

DES VOÛTES DANS LE SABLIER

Les chercheurs ont commencé par étudier les écoulements granulaires stationnaires (on dit aussi «permanents»), c'est-à-dire les écoulements dont les caractéristiques ne varient pas au cours du temps, au moins sur une certaine durée. Le sablier en fournit un exemple.

Observons un sablier que l'on vient de retourner. Bien que l'écoulement des grains évoque celui d'un liquide, ce n'est pas le cas: en témoigne le cône de sable qui se forme dans le compartiment inférieur du sablier, au lieu de la couche horizontale d'eau au fond d'une horloge à eau, ou clepsydre.

De plus, le débit de l'eau dans une clepsydre ralentit lorsque le niveau de liquide dans le récipient supérieur diminue, alors que dans un sablier, le débit de sable reste constant jusqu'au bout. Ce paradoxe s'explique, depuis les travaux en 1958 de Pierre Dantu, ingénieur des Ponts et Chaussées, par un effet de voûte. Au cours de l'écoulement, les grains sous pression dans le compartiment du haut, en raison du poids des couches supérieures, frottent les uns contre les autres en formant un ensemble d'arches continues de grains s'étendant jusqu'aux parois latérales (voir la photographie page 60); elles se font et se défont au fur et à mesure de la vidange. C'est aussi ce qui se passe pour l'écoulement de grains dans des silos profonds et insuffisamment larges: en cas de blocage, on doit alors taper sur les parois externes pour que les grains s'écoulent! Ces voûtes supportent les grains au-dessus d'elles; par conséquent, le poids des couches supérieures ne s'exerce pas au-dessous

Parce que le sablier contient de l'air, son écoulement est en fait intermittent



« TEMPS IMPARTI-ÉCLIPSES »

Ce sablier monumental de l'artiste Jean-Bernard Métais fait s'écouler le sable par un ensemble d'ouvertures programmées. Présenté pour l'an 2000 au jardin des Plantes, à Paris, il est installé de façon permanente au Mans. Comme dans tout sablier, le sable s'y écoule comme un liquide, mais, contrairement à l'eau dans une clepsydre, son débit est constant. Autre différence avec un liquide : le matériau granulaire s'accumule en formant un cône.

et ne contribue pas à pousser les grains se trouvant près de l'orifice. Ainsi, globalement, la pression à ce niveau ne varie pas avec la hauteur de la colonne de sable, d'où le débit constant.

Une loi classique, dite de Hagen-Beverloo, découverte par l'Allemand Gotthilf Hagen en 1852 et précisée en 1961 par le Hollandais Wim Beverloo et ses collègues, rend compte de la façon dont le débit moyen du sablier (ou d'un silo) dépend de la taille de l'orifice reliant les deux compartiments, débit qui finit toujours par s'annuler pour des tailles d'orifice inférieures à six diamètres de grains.

En fait, ces écoulements sont irréguliers. Au-dessous d'une voûte, les grains se séparent et coulent comme un fluide, en se heurtant au cours de leur chute libre. Mais au-dessus, les grains restent bloqués tant que la voûte se maintient. L'écoulement est donc intermittent.

Une situation redoutée se produit lorsqu'une brèche s'ouvre accidentellement dans une structure où des grains sont confinés. Dans les réacteurs nucléaires, par exemple, le combustible nucléaire se présente sous la forme de grains stockés sous pression dans des gaines métalliques. Il est important d'évaluer la quantité de matière radioactive éjectée si la gaine se rompt. Des problèmes similaires se posent dans des applications où un fluide transporte des grains, comme dans un inhalateur de poudres médicamenteuses : dans ce cas, au contraire, on cherche à faciliter l'écoulement de la suspension de grains et à éviter les blocages.

Dans ces écoulements, quelle est l'influence du fluide (par exemple l'air dans le cas du sablier) où les grains sont immergés ? D'un côté, par sa viscosité, le fluide freine l'écoulement des grains. D'un autre côté, il a un effet lubrificateur qui rend plus difficile la formation d'arches. Ces dernières années, nos équipes du CNRS et de l'Inra à Montpellier ont effectué des simulations numériques afin d'évaluer ces contributions relatives. Ces études rendent compte d'expériences que l'équipe de Daniel Bideau, à l'université de Rennes, avait réalisées en 1995 pour déterminer l'effet de l'air sur l'écoulement dans le sablier.

FLUX D'AIR DANS LE SABLIER

Ces simulations et ces expériences ont montré qu'il se produit le scénario suivant. Dans le compartiment inférieur du sablier, la chute de grains augmente la pression de l'air par rapport à celle du compartiment supérieur ; cette surpression a alors pour effet de bloquer l'écoulement, jusqu'à ce que, sous l'effet du flux de l'air à travers les espaces entre grains, les deux pressions s'égalisent de nouveau. L'écoulement reprend alors, et ainsi de suite. Autrement dit, le sablier fait en quelque sorte tic-tac... comme une pendule ! La succession de phases d'écoulement est semblable aux glouglous d'une bouteille que l'on vide. La durée moyenne entre deux blocages successifs dépend de la viscosité de la suspension et de la taille de l'orifice.

Penchons-nous de plus près sur ce paramètre de viscosité. Une suspension de grains ➤