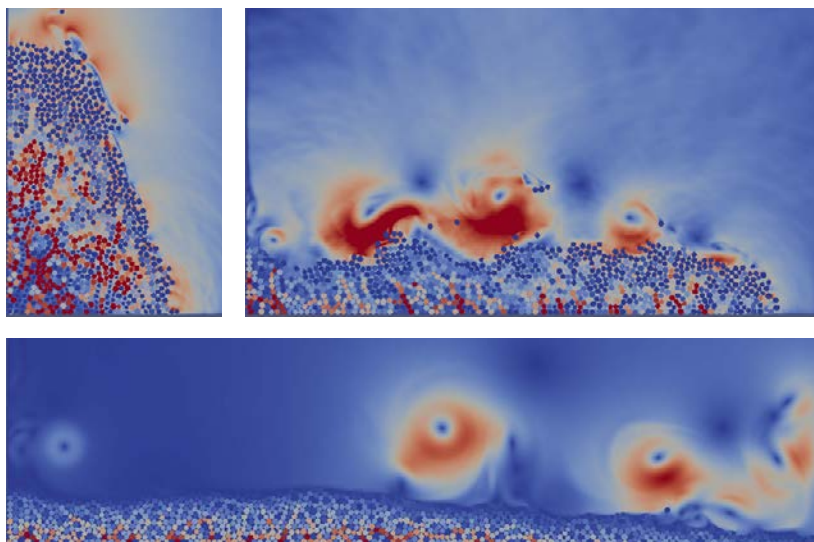
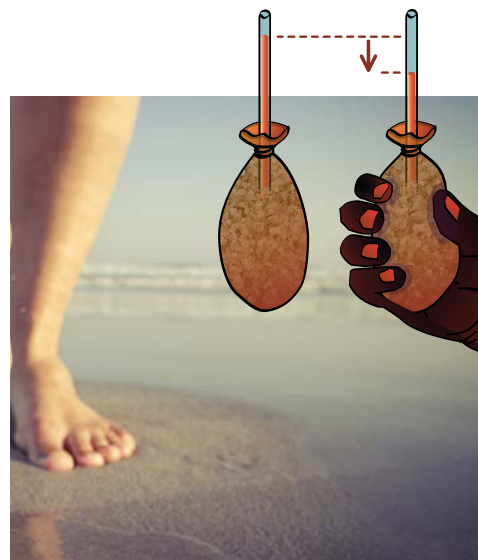




Ces images d'une simulation numérique réalisée en 2012 par des chercheurs de l'université de Montpellier montrent trois instants d'une avalanche de grains sous l'eau. Dans le fluide, la vitesse est croissante du bleu au rouge; la pression subie par les grains est également représentée du bleu au rouge. On voit notamment qu'en raison de la présence du liquide, le talus s'étale sur de longues distances.



Le sable mouillé et tassé gonfle et s'assèche dès que l'on marche dessus: c'est le phénomène de dilatance, que l'on peut mettre en évidence en remplissant de sable et d'eau un ballon de baudruche surmonté d'un tube de verre. Si le sable est bien tassé initialement, une pression sur le ballon provoque un desserrement de la structure des grains: de l'eau s'engouffre dans le ballon et le niveau d'eau baisse, contrairement à ce que l'on attendrait *a priori*.

- > Une expérience à la portée de chacun illustre le caractère transitoire du comportement d'un milieu granulaire imbibé d'eau. En marchant à marée basse sur une plage, vous pouvez mettre en évidence le rôle de l'eau présente dans le sable, que le va-et-vient des vagues l'ait tassé. Lorsque vous posez un pied sur ce sable humide, il se forme dans un premier temps une zone sèche autour, tandis que le dessous de votre pied se mouille (*voir la photographie ci-dessus, à droite*).

## QUAND LA PRESSION DU PIED DILATE LE SABLE

C'est peut-être une telle observation qui a conduit en 1885 le scientifique irlandais Osborne Reynolds au concept de «dilatance», qu'une expérience simple permet de comprendre (*voir le dessin ci-dessus, à droite*). Remplissez un ballon gonflable de sable mouillé sans le tasser; attachez-y rigidement un tube de verre verticalement pour avoir un niveau de l'eau en excès. Pressez le ballon: le sable se tasse et de l'eau est poussée dans le tube, dont le niveau d'eau s'élève.

Si, au contraire, vous avez initialement bien tassé le sable mouillé, le niveau d'eau commence par baisser lorsque vous pressez le ballon. Pourquoi? Le sable ayant été tassé, sa compacité avait atteint sa valeur maximale; la déformation du sable n'a donc pu que réduire sa compacité, et l'eau est venue remplir les volumes libres qui se sont ainsi créés.

Cet effet de dilatance peut conduire à des phénomènes d'écoulement transitoire dans lesquels le matériau granulaire change de viscosité. C'est ce qui s'est produit en 1692 pour

le sable sur lequel la ville de Port-Royal était construite et qui a conduit à une catastrophe.

Un tel phénomène de liquéfaction se manifeste lors du passage d'une onde sismique à travers des sols fins, peu compacts et saturés d'eau. Pendant la brève durée de la secousse, les forces de contact entre les grains sont rompues et ceux-ci, libérés, sont mis en suspension. La charge des bâtiments sur le sol n'est alors plus supportée par les voûtes formées grâce aux chaînes de forces de contact. Cette charge se transmet alors à la suspension qui, comme une éponge, se densifie progressivement en expulsant de l'eau jusqu'à retrouver de nouvelles chaînes de forces qui soutiendront l'édifice. Au cours de ce phénomène transitoire qui dépend de la perméabilité du sol, le sol a perdu sa portance: des constructions massives peuvent s'enliser brutalement, parfois de plusieurs mètres, comme de lourdes pierres jetées dans la boue.

**Par effet de dilatance, un sol peut changer de viscosité et ne plus supporter sa charge**



La Giddy House est une ancienne artilerie, construite en 1888 à Port-Royal, en Jamaïque. La portance du sol liquéfié lors du séisme de 1907 n'a pas été suffisante pour soutenir le poids du bâtiment.

Un phénomène similaire se produit au démarrage d'une avalanche de sol à la suite de pluies soutenues. Le temps qu'il faut à l'avalanche pour démarrer dépend fortement de la compacité du milieu granulaire. Si l'empilement est lâche, le glissement se fait instantanément et mobilise l'ensemble du massif. Pour un milieu compact, au contraire, rien ne se passe dans un premier temps. Puis le sol s'effondre lentement. En effet, il faut que suffisamment d'eau entre dans les pores pour que les grains s'écartent et aient assez de latitude pour s'écouler. Comme dans la liquéfaction, la vitesse à laquelle s'effectue cette dilatance des grains dépend de la perméabilité du sol. Une avalanche de sol compact et fin, peu perméable, mettra plus de temps à se déclencher que si le sol est composé d'un sable grossier et plus perméable.

## DE LONGUES COULÉES SOUS-MARINES

Les mécanismes à l'origine de ce phénomène ont été étudiés ces dernières années à l'échelle du grain, expérimentalement par l'équipe d'Olivier Pouliquen à l'université d'Aix-Marseille et numériquement à Montpellier. Ces travaux ont montré que, soumis à un cisaillement, l'assemblage de grains se déforme peu à peu, par petits mouvements, à mesure que la pression dans les pores s'équilibre. Cette phase, dont la durée augmente avec la viscosité du fluide et diminue avec la taille des grains, est appelée fluage et précède le déclenchement de l'avalanche.

Que se passe-t-il une fois l'avalanche déclenchée? Du fait de sa viscosité, le fluide va-t-il ralentir l'avalanche ou, au contraire, contribuer à ce qu'elle se propage plus loin par un effet de

lubrification entre grains? C'est une question cruciale pour la prévention des risques. Des avalanches sous-marines ou côtières peuvent mobiliser des masses considérables de débris, se propager sur des pentes faibles à plus d'une centaine de kilomètres. Elles endommagent les câbles sous-marins et peuvent sectionner des forages au large. Il y a 8000 ans, le glissement de terrain de Storegga, à la bordure continentale de la Norvège, a mis en mouvement des milliers de kilomètres cubes de sédiments. En engendrant un tsunami dont la vague a dépassé par endroits la dizaine de mètres, il a dévasté les côtes norvégiennes et a atteint l'Écosse!

Les interactions des grains avec le fluide jouent un rôle majeur dans la propagation de l'avalanche. Lors de la mise en mouvement des sédiments au niveau des pentes continentales, les grains gagnent en inertie et entraînent l'eau dont ils sont entourés. Il s'agit alors d'une suspension s'écoulant sur le fond marin. Contrairement aux avalanches dans l'air, les grains restent longtemps sans contacts entre eux, sous l'effet lubrificateur de l'eau de mer; l'avalanche sous-marine peut ainsi se propager sur une très grande distance (voir la figure page précédente, à gauche). Mais l'effet dépend aussi de l'énergie initiale communiquée aux grains; c'est pourquoi la géométrie initiale des massifs joue un rôle important dans l'éventuelle prévision de la distance d'arrêt.

Les travaux dont nous avons fait état ici ont permis de dégager certains paramètres qui contrôlent l'équilibre des grains et leur comportement dynamique dans des situations où les interactions entre grains et celles avec le fluide sont importantes – des situations que l'on rencontre fréquemment en sciences de la Terre et en ingénierie. Dans ce champ de recherche, les simulations numériques ont l'intérêt de donner accès à un ensemble de paramètres que l'on peut faire varier librement, mais aussi de voir l'organisation détaillée en volume des grains et de mesurer les forces, aspects très difficiles à étudier dans les expériences.

Les simulations numériques se révéleront sans doute aussi fécondes dans les recherches portant sur le cas où les grains sont immergés non pas dans une phase fluide unique, mais dans un mélange diphasique constitué par exemple d'air et d'eau. Une telle situation est courante en sciences des sols ou dans les procédés agroalimentaires (fabrication du cous-cous, par exemple), et cela appelle des études nouvelles: lorsqu'un milieu granulaire n'est que partiellement saturé d'eau, les effets de capillarité produisent une adhésion entre les grains, comme dans les pâtes ou la boue. Ainsi pourra-t-on mieux comprendre comment l'eau mouille et colle les grains, que ce soient ceux d'une préparation agroalimentaire, d'un milieu géologique ou... d'un château de sable. ■

## BIBLIOGRAPHIE

É. Guyon, J.-Y. Delenne et F. Radjai, **Matière en grains**, Odile Jacob, 2017.

F. Radjai et al. (dir.), **Powders and grains 2017**, 8<sup>e</sup> conférence internationale sur la micromécanique des milieux granulaires (3-7 juillet 2017, Montpellier), *EPJ Web of Conferences*, vol. 140, 2017 (accès libre sur [www.epj-conferences.com](http://www.epj-conferences.com)).

L. Amarsid et al., **Visco-inertial regime of immersed granular flows**, *Physical Review E*, vol. 96, article 012901, 2017.

B. Andreotti et al., **Les Milieux granulaires**, EDP Sciences, 2011.

P. Mutabaruka et al., **Transient dynamics of a 2D granular pile**, *European Physical Journal E*, vol. 38, article 47, 2015.

GdR MiDi, **On dense granular flows**, *European Physical Journal E*, vol. 14(4), pp. 341-365, 2004.