

Natalie Uomini et moi avons aussi effectué un travail de terrain sur les corbeaux de Nouvelle-Calédonie (*Corvus moneduloides*), dont les remarquables facultés cognitives se traduisent par une utilisation sophistiquée d'outils. Ces corbeaux aussi exploitent à répétition les mêmes lieux. Pourvu que des matériaux durables s'y trouvent, toutes les conditions nécessaires à la formation de sites archéologiques pouvant nous aider à restituer les comportements du passé sont rassemblées.

Curieusement, l'essor récent de l'archéologie des primates coïncide avec la sortie d'une série sur le thème de *La Planète des singes*. Nos cousins grands singes y développent des techniques rudimentaires qui, néanmoins, surpassent rapidement celles que l'on connaît chez les animaux sauvages dans le monde réel. Une lance composée d'une pointe fixée sur une hampe suppose par exemple un bond cognitif considérable que les grands singes d'aujourd'hui n'ont manifestement pas fait. Dans la série, le contrôle du feu et le port de bijoux comptent aussi parmi les attributs des singes...

Si, sur notre planète, de tels attributs ne se rencontrent que chez les humains,

représenter à l'écran des singes épris de technique n'est pas complètement farfelu. Cela paraît même crédible. Les chimpanzés occidentaux fabriquent des lances simples d'un seul tenant pour attaquer de plus petits primates, comme le font les sapajous à l'encontre des lézards. William McGrew, de l'université de St Andrews, en Écosse, l'observateur le plus averti en matière d'utilisation d'outils par les chimpanzés et l'un des premiers défenseurs de l'archéologie des primates, a déjà signalé un chimpanzé d'Afrique de l'Est portant un « collier » en peau de singe nouée. Que se passe-t-il chez les singes quand les chercheurs ne les observent pas ?

L'archéologie humaine est une source fiable de connaissances sur notre évolution et notre diversité. En récompense de l'effort de milliers de chercheurs depuis plus d'un siècle, nous disposons aujourd'hui de données s'étendant sur plus de 3 millions d'années, qui servent de base à nos scénarios évolutifs. S'agissant de l'archéologie des autres animaux, nous ne sommes en revanche qu'au tout début. Qui sait ce que nous découvrirons, si nous gardons l'esprit ouvert ? ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Haslam et al., **Archaeological excavation of wild macaque stone tools**, *Journal of Human Evolution*, vol. 96, pp. 134-138, 2016.

M. Haslam et al., **Pre-Columbian monkey tools**, *Current Biology*, vol. 26(13), pp. R521-R522, 2016.

T. Proffitt et al., **Wild monkeys flake stone tools**, *Nature*, vol. 539, pp. 85-88, 2016.

K. Wong, **Les premiers tailleurs de pierre n'étaient pas des humains**, *Pour la Science*, n° 478, pp. 28-38, août 2017.

LES RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

{ Partagez les savoirs }

Dans le cadre de l'exposition *Océan, une plongée insolite*

CONFÉRENCES

L'Océan, protagoniste du monde de demain ?

En partenariat avec l'Université permanente de Paris

Lundi 13 mai – 14h30

Le Rôle de l'Océan dans les changements du climat passé
Bruno Turcq, spécialiste des paléoclimats tropicaux, LOCEAN

Jeudi 16 mai – 14h30

L'Océan pharmacien
Marie-Lise Bourguet-Kondracki, biologiste moléculaire, Muséum

Lundi 20 mai – 14h30

Le milieu marin profond : une exploration à peine entamée !
Sarah Samadi, responsable de l'équipe Exploration Espèces et Évolution, Muséum

Grand Amphithéâtre du Muséum
57 rue Cuvier, Paris 5^e

Dans la cadre du *Printemps du Muséum*

RENCONTRE

Lundi 13 mai 2019 – 19h

Faune, une approche naturaliste

Avec : Alice Savoie, créatrice de caractères typographiques

Introduction de : Stéphane Schmitt, historien, CNRS

TABLE-RONDE

Lundi 27 mai – 19h

Humain, nature et technologies

Animée par Marie-Odile Monchicourt, journaliste

Avec : Julian Alvarez, responsable Recherche au Play Research Lab de la Serre Numérique

Ana Cristina Torres et Minh-Xuan Truong, écologues, équipe TEEN (Transition écologique et expériences de nature), Muséum

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

POUR LA SCIENCE



Comment s'écoulent des grains mêlés à un fluide

Le sable mouillé ne se comporte pas comme le sable sec. Mais aller au-delà de la simple constatation s'est révélé difficile, et l'écoulement d'une suspension de grains dans un liquide obéit à des lois que les physiciens n'ont caractérisées que récemment.

L'ESSENTIEL

> Dans la nature et dans l'industrie, la matière se présente souvent sous forme granulaire et exhibe alors des comportements particuliers.

> Les chercheurs avaient relativement bien compris le comportement d'un ensemble de grains secs, qui n'interagissent pas avec le fluide dans lequel ils baignent.

> Plus récemment, les physiciens ont cherché à comprendre l'influence d'un fluide, qu'il s'agisse d'un gaz comme l'air ou d'un liquide comme l'eau.

> Des expériences et simulations numériques d'écoulements de grains mouillés ont permis de généraliser les modèles utilisés pour les grains secs.

LES AUTEURS



JEAN-YVES DELENNE
directeur de recherche de l'Inra au IATE, université de Montpellier



ÉTIENNE GUYON
physicien à l'ESPCI Paris, ancien directeur de l'École normale supérieure



FARHANG RADJAÏ
directeur de recherche du CNRS au LMGC, université de Montpellier



Des coulées sur le flanc d'une dune de sable. La présence de l'air intervient dans la formation des rides, l'écoulement des couches en surface et la forme de la dune.

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 ➤

> dans un fluide présente une viscosité effective qui est supérieure à celle du fluide pur. Pour de faibles teneurs en grains, la viscosité effective augmente proportionnellement à la concentration (une loi décrite pour la première fois par Albert Einstein lorsqu'il s'est intéressé au mouvement brownien de particules de taille microscopique). Mais pour des concentrations élevées, typiquement supérieures à 50% en volume pour des grains de même taille, les grains se gênent en se frottant et en entrant en collision, ce qui finit par les immobiliser.

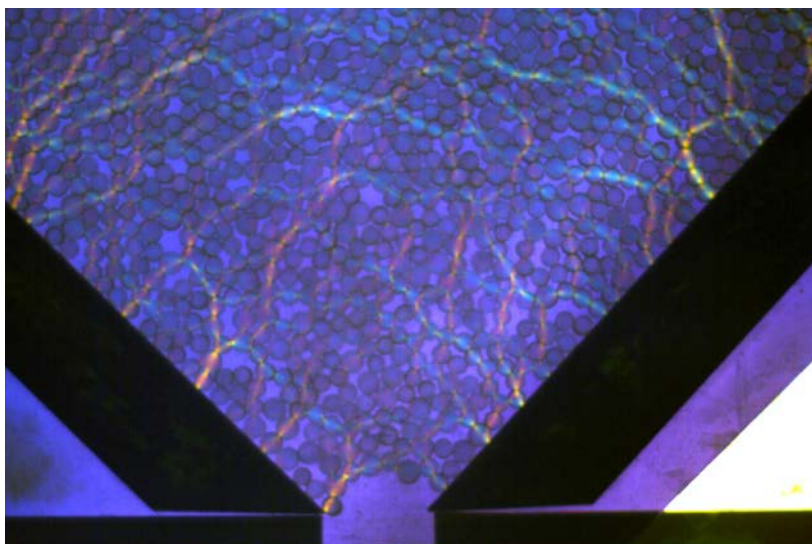
Dans l'exemple du sablier, lorsqu'une suspension très concentrée se bloque et que la vitesse de l'écoulement s'annule, tout se passe comme si la suspension était un liquide infiniment visqueux. Si, en revanche, les parois du sablier s'écartaient un peu en laissant le volume de l'ensemble s'ajuster, la compacité prendrait une valeur telle que l'écoulement se poursuivrait. D'après nos simulations, cette compacité critique est de 58% pour un fluide contenant des grains sphériques de même taille; ainsi, la viscosité de la suspension reste finie.

Il est possible de séparer les effets dus à la présence du fluide de ceux dus à l'encombrement des grains et à leurs collisions. Vers 2011, l'équipe d'Olivier Pouliquen à l'université d'Aix-Marseille a réalisé des expériences en ce sens, où l'on applique un cisaillement à une suspension granulaire (voir la figure page suivante, à gauche).

MESURER L'EFFET D'UN CISAILLEMENT

Dans ces expériences, le milieu granulaire est confiné entre deux plaques planes horizontales, dont la supérieure exerce une pression P . On applique un cisaillement à l'ensemble en faisant glisser la plaque supérieure à une certaine vitesse; le taux de cisaillement est défini par le quotient de cette vitesse par l'écart entre les plaques. De plus, on utilise une plaque supérieure poreuse, ce qui permet au liquide de la suspension de circuler librement. Ce dispositif permet d'évaluer la résistance au déplacement en fonction de la pression P exercée sur les grains; il rend compte de l'effet de viscosité d'une suspension concentrée comme on pourrait le faire pour un liquide en déplaçant deux doigts mouillés l'un par rapport à l'autre.

Ces expériences ont montré que, contrairement à celle des fluides simples tels que l'eau et l'air, la viscosité effective de la suspension diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. On constate aussi qu'elle baisse lorsque la pression de confinement diminue (voir la figure page suivante, à droite). Comme le matériau granulaire peut adapter son volume, ces effets s'expliquent par le fait que dans les deux cas (augmentation du taux de cisaillement et diminution de la pression) la concentration des grains diminue, ce qui



Dans ce modèle à deux dimensions d'un sablier, les grains sont remplacés par des disques photoélastiques d'axes parallèles. En lumière polarisée, ces « grains » soumis à des efforts mécaniques apparaissent en clair, ce qui permet d'identifier un réseau de voûtes. Une telle voûte, constituée par une chaîne de forces, bloque ici l'écoulement à travers l'orifice du sablier.

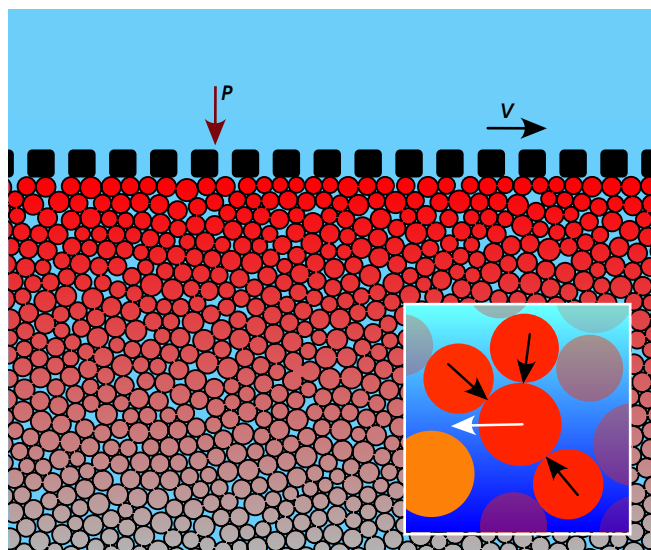
réduit les encombrements entre les particules. En effet, les forces de viscosité exercées sur les grains tendent à les séparer et s'opposent à la pression de confinement, qui les rapproche. Le rapport entre le produit de la viscosité du fluide pur par le taux de cisaillement, d'une part, et la pression, d'autre part, mesure donc leur importance relative. Lorsque ce nombre, nommé « nombre visqueux », augmente, la viscosité effective augmente, par l'effet croissant des encombrements entre grains.

Cette façon dont la viscosité d'une suspension varie en fonction du nombre visqueux permet d'expliquer l'effet de la taille des grains sur la viscosité. Dans un écoulement libre de grains sur un plan incliné, la pression sur les grains est due au poids des couches supérieures et est donnée par le rapport du poids des grains (qui est proportionnel à r^3 , où r est le rayon des grains) divisé par leur section (proportionnelle à r^2). Par conséquent, le nombre visqueux varie comme l'inverse du rayon des grains: il est d'autant plus petit que les grains sont gros. Ainsi, pour une vitesse d'écoulement donnée, plus les grains sont gros, plus la viscosité

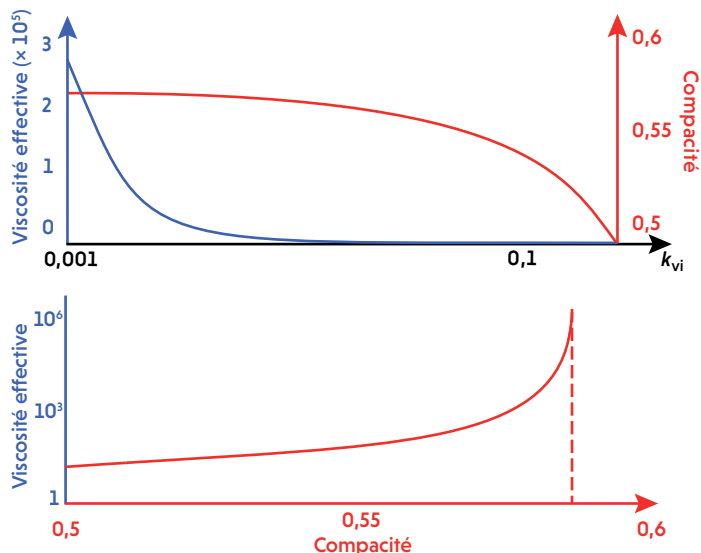


Plus les grains sont gros, plus la viscosité effective de la suspension est faible





Principe de l'étude expérimentale du cisaillement d'un milieu granulaire immergé dans un liquide. Le milieu est confiné entre deux plaques, la supérieure étant poreuse pour que le liquide soit libre de circuler. On déplace à une vitesse V la paroi supérieure, qui exerce une pression P sur la suspension. Ici, le niveau de couleur rouge est proportionnel à la vitesse des grains. À l'échelle microscopique (cartouche), chaque grain subit des forces de contact (flèches noires) de la part des grains qui le touchent, ainsi qu'une force résultante exercée par le fluide (flèche blanche).



Ces courbes, obtenues par simulations numériques, montrent comment la viscosité effective d'une suspension de grains, rapportée à celle du fluide pur, et sa compacité varient avec le nombre visco-inertiel k_{vi} (des valeurs élevées de k_{vi} correspondent à des écoulements rapides) pour des fortes densités de grains. La viscosité effective augmente rapidement lorsque k_{vi} diminue et tend vers zéro, alors que la compacité atteint une valeur limite (58 % pour des grains sphériques de même taille). En combinant les deux effets, on voit que la viscosité effective relative à celle du fluide augmente avec la compacité.

effective de la suspension est faible. C'est pourquoi il est plus facile de rincer un plat qui a contenu des gros grains (par exemple du riz ou des lentilles) plutôt que des petits grains (par exemple de la farine)...

Des simulations numériques, réalisées il y a environ deux ans par nos équipes à Montpellier en collaboration avec l'IRSN (Institut de radio-protection et de sûreté nucléaire), montrent que lorsque la vitesse d'écoulement de la suspension est suffisamment élevée, sa viscosité effective ne dépend plus uniquement du nombre visqueux. L'agitation accrue des grains conduit à une augmentation du nombre de collisions, donc à une diminution de la compacité. Dans le même temps, la viscosité effective de la suspension diminue.

L'effet des collisions des grains sur une surface se traduit par une pression (dont on montre qu'elle est proportionnelle au rapport entre l'énergie cinétique des grains et leur volume). Ce phénomène est assez comparable à l'effet des molécules dans un gaz dont les chocs erratiques, dus à l'agitation thermique, sont à l'origine de la pression. Mais dans le cas des grains, pour lesquels ce mouvement spontané est négligeable, c'est l'écoulement des grains qui est à l'origine des collisions et, partant, de l'effet de pression.

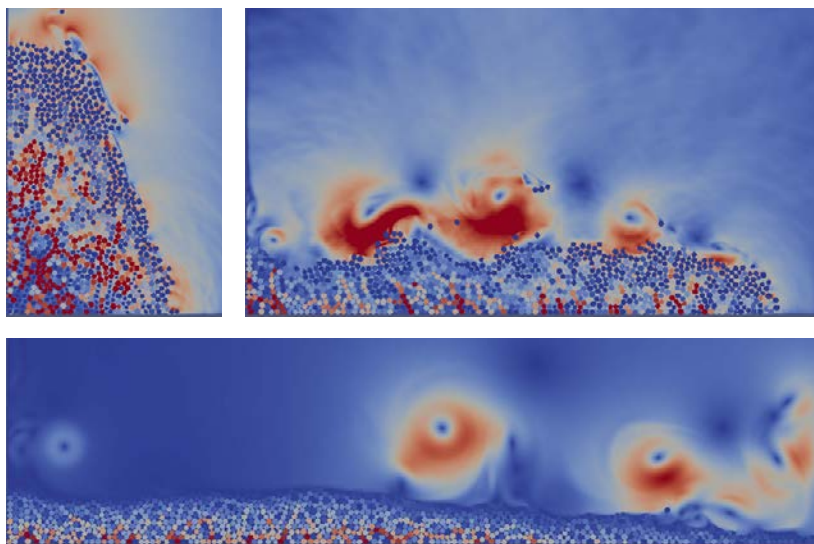
On peut décrire les écoulements rapides de grains secs à l'aide d'une autre quantité sans dimension, le « nombre inertiel », introduit en 2004 dans un article publié par GdR

MiDi, un groupement de recherche du CNRS sur les « milieux divisés ». Traduisant le rapport entre la pression due aux collisions des grains et la pression de confinement, ce nombre est petit lorsque cette pression est élevée et grand pour des écoulements rapides. Il caractérise l'écoulement dans des situations expérimentales variées.

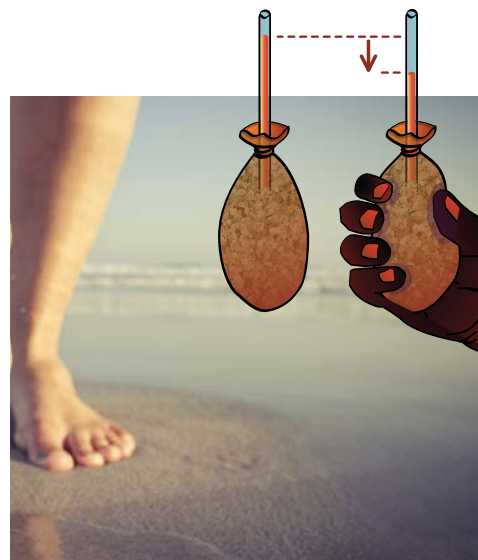
Et dans le cas où les grains ne sont pas secs, mais baignent dans un liquide ? Nos simulations numériques, qui combinent la dynamique des fluides avec celle des grains, ont montré que les paramètres mesurables de la suspension (concentration en grains et viscosité effective) dépendent d'un seul nombre rassemblant les effets de la viscosité et ceux des collisions : le « nombre visco-inertiel », que l'on notera ici k_{vi} et qui remplace à la fois le nombre visqueux et le nombre inertiel (voir les graphiques ci-dessus).

Cette loi des suspensions rend compte, dans un cadre unifié, des effets de la vitesse d'écoulement des grains, de la viscosité du fluide et de la pression de confinement. Elle s'applique à de nombreuses situations concrètes d'écoulements des grains en présence d'un fluide, et ce même lorsque ces écoulements ne sont pas permanents.

Jusqu'ici, nous avons fait comme si les écoulements de grains étaient permanents. C'est insuffisant car, par exemple, il est essentiel de pouvoir anticiper le déclenchement d'un glissement de terrain sur un sol incliné après de fortes pluies.



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^e 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).

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.



L'ESSENTIEL

> Les scientifiques savent depuis longtemps que les microbes ont joué un rôle capital dans le développement de la vie sur Terre. L'idée communément admise était que les communautés microbiennes fonctionnent sur la base d'une compétition pour les ressources.

> Mais une profusion de nouvelles données sur les microbes qui peuplent

les fonds marins et les eaux souterraines dans le monde entier a révélé que de nombreuses espèces collaborent avec d'autres.

> Ces découvertes suggèrent que la coopération entre microorganismes serait le mode de fonctionnement standard de la vie microbienne et la force motrice de la biosphère.

LES AUTEURS



JEFFREY MARLOW
postdoctorant au
département de biologie
évolutive et organismique
de l'université Harvard,
aux États-Unis



ROGIER BRAAKMAN
chercheur
au département
d'ingénierie civile
et environnementale
du MIT, aux États-Unis

L'esprit d'équipe des microbes

La loi du plus fort ne prime peut-être pas chez les microorganismes. Au contraire, la coopération entre espèces serait fréquente. Au point d'influer sur le climat.

Huit cents mètres sous la surface de l'océan, au large de la côte de l'Oregon, les phares du submersible *Alvin* illuminent une oasis de vie colorée. Des tapis moelleux de microbes blancs, jaunes et orange recouvrent le fond marin parsemé de champs de palourdes et de moules. Des poissons aux yeux globuleux – des sébastes à bouche jaune – observent le sous-marin avec méfiance, tandis que des panaches de bulles s'élèvent de monticules composés de roches à dominante calcaire. L'auréole lumineuse attire les visiteurs comme un leurre et révèle graduellement le décor semblant tout droit sorti d'un autre monde.

Quelques heures plus tôt, lors de cette expédition de 2010, l'un de nous (Jeffrey Marlow) s'était glissé dans la grande sphère en titane qui constitue l'habitacle de l'*Alvin*, en compagnie de deux autres explorateurs. Nous avons collé nos

visages aux fenêtres circulaires en même temps que nous descendions dans un kaléidoscope de teintes bleutées. Notre destination était Hydrate Ridge, une zone rocheuse où de vastes quantités de méthane suintent de la croûte terrestre. La découverte de sites semblables à Hydrate Ridge a explosé ces dernières années (une seule expédition dans l'est du Pacifique, en 2016, en a exhumé 450) et les scientifiques s'efforcent aujourd'hui de comprendre leur impact sur l'environnement. Le méthane est, après tout, un puissant gaz à effet de serre: bien qu'il ne compose que 0,00018% de l'atmosphère, il représente 20% de son potentiel de réchauffement. Selon des estimations, 10% du méthane qui se retrouve dans l'atmosphère chaque année remonte du fond des océans. Une libération totale du méthane du plancher océanique mènerait à une apocalypse climatique, mais quelque chose empêche le gaz d'atteindre la surface: les microbes qui s'en nourrissent dans les roches. >