

permis de nouvelle reconstitution. Le premier squelette partiel, découvert à Hsanda Gol en Mongolie, a d'abord été attribué à *Baluchitherium grangeri* par les paléontologues américains Walter Granger et William Gregory en 1936, avant d'être rebaptisé *Indricotherium transouralicum*. Ces auteurs ont opéré une reconstitution graphique, d'après les quelques éléments associés d'un même individu et en extrapolant les dimensions des restes manquants. Cette reconstitution, souvent reproduite dans les manuels, est malheureusement erronée : le cou est trop court, les membres trop raides et les proportions du membre antérieur fortement mésestimées.

En revanche, un squelette d'*Indricotherium transouralicum* provenant de Chelkar Tennis, au Kazakhstan, complet à 40 pour cent, a été mieux traité : ce que nous avons pu observer au Pakistan est en effet bien plus proche de la reconstitution qu'en a proposée Vera Gromova en 1959. Le squelette complet est d'ailleurs exposé dans la galerie de paléontologie du Musée de l'Académie des sciences de Moscou. Enfin, le magnifique tableau de Zdenek Burian, exposé au Muséum de Prague depuis 1957, montre un groupe de baluchithères en train de manger le faite d'un arbre. L'allure générale est respectée, mais le membre antérieur est toutefois trop gracile.

Comme les restes crâniens, dentaires et du squelette appendiculaire étaient complètement désarticulés dans le gisement de Lundo Chur, nous avons décidé de récolter des spécimens afin de reconstituer un squelette composite de *Paraceratherium*. Puis nous sommes retournés à Dera Bugti, chargés d'une tonne d'ossements environ. Là, le squelette a été reconstitué, à même le sol, sur une bâche. Nous savons désormais que ces rhinocéros géants avaient en moyenne cinq mètres au garrot (5,5 mètres au musée), pour environ huit mètres de long. L'allure générale était plutôt celle d'un okapi très massif, avec une tête de cheval et une lèvre supérieure probablement préhensile (pour attraper les feuilles d'arbres composant leur régime alimentaire). Le dos est en pente, le membre antérieur beaucoup plus long et puissant que le membre postérieur. Quelques spécimens récoltés l'an dernier appartenaient manifestement à des individus plus grands encore, atteignant probablement jusqu'à six mètres au garrot

et neuf mètres de long. Un adulte moyen devait peser environ 15 à 20 tonnes.

La denture suit à la fois le schéma des tapirs et des rhinocéros : la denture antérieure (incisives et canines) est complètement développée, comme chez les tapirs, tandis que les molaires et les prémolaires ont des couronnes peu spécialisées, de type rhinocéros. On peut penser que leur régime alimentaire se composait de feuilles, de jeunes pousses et de branchages au faite des arbres.

Les restes mis au jour au cours de notre expédition correspondent à plus d'une vingtaine d'individus, allant du nouveau-né au vieillard. L'énorme variation de taille perceptible sur les restes de ce gisement avait le plus souvent été interprétée comme la preuve de la présence de plusieurs espèces de baluchithères associées (notamment Forster-Cooper, avec quatre espèces décrites successivement dans le seul gisement de Chur Lando : *Paraceratherium bugtiense*, *Thaumastotherium osborni*, *Baluchitherium osborni*, *Paraceratherium churlandensis*). Il nous semble beaucoup plus probable que ces différences soient en réalité l'expression de la variabilité individuelle. D'autre part, le dimorphisme sexuel, fondé notamment sur la taille comme chez la plupart des grands mammifères herbivores fossiles et actuels, contribue certainement à cette variabilité.

Des prédateurs à la mesure de leurs victimes

De nombreux os d'herbivores portent des empreintes coniques à leur sur-

face. Celles-ci correspondent aux traces laissées par des dents de crocodiles. Même les baluchithères, qu'on imagine invulnérables en raison de leur corpulence, n'ont pas été épargnés. Il faut dire que ces mammifères géants avaient des prédateurs géants : des crocodiles d'une quinzaine de mètres de long, deux fois comme ceux du Nil ! D'autres os ont manifestement séjourné dans des estomacs. Leur aspect poli, corrodé, est caractéristique de l'attaque acide des sucs gastriques.

Si l'on sait ce que mangeaient les crocodiles, qu'en est-il des herbivores ? Un moyen simple existe, qui consiste à récolter les excréments fossiles, les coprolithes. Un traitement chimique permet de dissoudre le phosphate de calcium des coprolithes et de ne conserver que les spores et les pollens. Ceux-ci indiquent les mets préférés des herbivores, ainsi que les essences de la région. Même les coprolithes des carnivores contiennent, en plus faible concentration, des spores et des pollens issus de leur environnement, et aussi de l'estomac de leurs victimes... Les coprolithes ne sont pas toujours attribuables à un groupe animal précis, mais dans le cas des baluchithères, c'est différent : le critère de taille est de poids ! Les plus grands mammifères terrestres ayant jamais vécu ont également produit les plus gros coprolithes.

L'extinction de ces géants paraît intimement liée aux changements environnementaux intervenus à la fin de l'Oligocène et auxquels ils n'ont pu s'adapter assez vite. Nul besoin d'une pluie d'astéroïdes quand la nourriture vient à manquer !

Jean-Loup WELCOMME est correspondant du Muséum national d'histoire naturelle à Paris. Pierre-Olivier ANTOINE est étudiant au Muséum national d'histoire naturelle à Paris. Laurent MARIVAUX est étudiant à l'Institut des sciences de l'évolution de l'Université de Montpellier

C. FORSTER-COOPER, *Paraceratherium bugtiense*, a new genus of *Rhinocerotidae* from the Bugti Hills of Baluchistan. Preliminary notice, in *Annual Magazine of Natural History*, vol. 8, pp. 711-716, 1911.

W. GRANGER et W. GREGORY, *Further Notes on the Gigantic Extinct Rhinoceros, Baluchitherium...*, in *Bulletin of the American Museum of Natural History*, vol. 72, pp. 1-71, 1936.

V. GROMOVA, *Rhinocéros gigantesques*, Travaux de l'Institut paléontologique de l'Académie des sciences de l'URSS, vol. 71, pp. 1-164, 1959 (en russe).

S. MATHESON, *The Tigers of Baluchistan*, 2^e édition, Oxford University Press (Karachi), 213 pages, 1997.

J.-L. WELCOMME et al., *Nouvelles découvertes de Vertébrés miocènes dans le synclinal de Dera Bugti (Balouchistan, Pakistan)*, in *CRAS, Sciences de la Terre et des planètes*, vol. 325, pp. 531-536, 1997.

J.-L. WELCOMME et L. GINSBURG, *Mise en évidence de l'Oligocène sur le territoire des Bugti (Balouchistan, Pakistan)*, *CRAS, Sciences de la Terre et des Planètes*, vol. 325, pp. 999-1004, 1997.

Des solides coulants

PHILIPPE COUSSOT • HENRI VAN DAMME • CHRISTOPHE ANCEY

Dans l'écoulement des pâtes granulaires, comme le béton frais, la viscosité peut varier brusquement. La répartition du liquide et l'évolution des contacts entre les grains expliquent ce comportement étrange.

Les sables mouvants de la Loire ne rendent pas leur proie...

Balzac

Les sables mouvants, ceux de la Loire ou de la baie du Mont-Saint-Michel, sont un mélange de sable et d'eau qui engloutissent lentement les objets déposés à leur surface. De tels mélanges ne se comportent ni comme du sable, ni comme de l'eau, mais comme des pâtes qui s'écoulent différemment des liquides. Longtemps, l'étude des pâtes a été négligée ; pourtant, les pâtes sont omniprésentes dans la nature et dans l'industrie : mousse à raser, béton frais, pâte à modeler, mayonnaise ou coulées de cendres sur les flancs des volcans.

Si les caractéristiques des écoulements de pâtes diffèrent selon le matériau, leurs propriétés mécaniques résultent de leur constitution commune : le mélange d'un liquide et de très nombreux grains mous ou durs. Ces grains peuvent être des particules solides (suspension), des bulles (mousse) ou des gouttelettes (émulsion). Lorsque le nombre des grains est faible, le comportement est analogue à celui d'un liquide. En revanche, nous verrons qu'à mesure que le nombre de grains augmente, le comportement se modifie et devient inhabituel : les grains se gênent mutuellement au cours des déformations imposées au mélange.

Les écoulements de pâtes granulaires peuvent être dévastateurs, telles les coulées de boues, charriant blocs de rochers, graviers et particules argileuses. Les laves volcaniques, où se forment un grand nombre de cristaux lors des changements de température ou de pression, ont des comportements similaires. Les coulées de

cendres volcaniques (lahars) sur le flanc des volcans s'écoulent parfois sur de grandes distances (voir la figure 1).

Tous les écoulements de pâtes granulaires ne sont pas catastrophiques. Ces matériaux sont très utiles dans l'industrie quand il s'agit de mélanger, de mettre en forme un produit ou d'obtenir des écoulements particuliers. La maîtrise des effets mécaniques de l'entassement des grains est alors un enjeu crucial. Comment faire pour que la mousse à raser reste fixée sur le visage de l'utilisateur ? Comment obtenir un béton qui reste liquide lors de l'injection, mais suffisamment résistant après sa prise ? Comment faire pour qu'un bonhomme en pâte à modeler ne s'effondre pas sur lui-même et qu'il ne se casse pas non plus lorsque l'on cherche à le remodeler ? Quelle doit être la viscosité de la mayonnaise pour qu'elle sorte facilement du tube, mais reste figée dans l'assiette ?

La connaissance du comportement de ces matériaux est ainsi doublement importante : pour la prévention des risques naturels et pour l'optimisation des processus industriels. Longtemps négligée, l'étude des pâtes granulaires gagne du terrain depuis que les physiciens ont compris que leur compréhension était au confluent de plusieurs disciplines : mécanique des sols, mécanique des fluides complexes et physique des milieux hétérogènes.

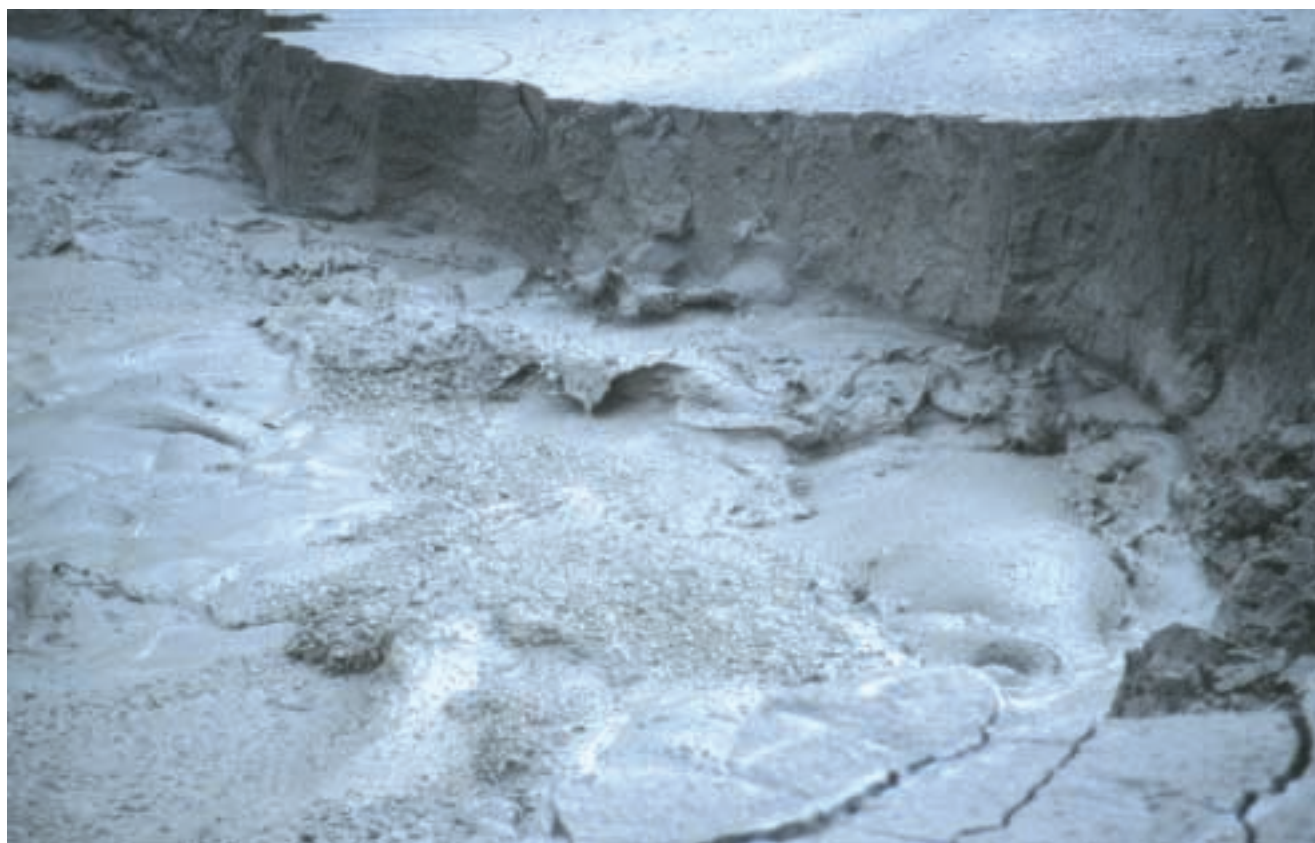
Après avoir examiné comment varie la viscosité d'une pâte en fonction du nombre de grains qu'elle contient, nous verrons que, pour décrire des pâtes très concentrées, il faut tenir compte des contacts entre les grains et du mouvement du fluide interstitiel ; plus précisément, de la configuration des particules, de la

manière dont se transmettent les forces au sein du milieu granulaire, des effets de la migration du liquide entre les grains et de l'éventuelle fracturation de la pâte. Grâce à ces progrès, les physiciens prédisent l'écoulement de ces matériaux dont les brusques variations de viscosité étaient incomprises.

Dans tout ce qui suit, on considérera que les grains dans le liquide sont relativement gros (plus de quelques micromètres), de sorte que ces grains ne sont pas tributaires de l'agitation thermique des molécules du liquide. Cela signifie aussi que deux particules qui s'approchent ne tendent ni à s'agréger en raison des forces attractives à courte distance, dites de Van der Waals, qui agissent sur des petites particules, ni à se repousser sous l'effet des forces électrostatiques qui résultent de la diffusion d'ions initialement adsorbés à la surface des particules. Nous traiterons uniquement des pâtes granulaires où le phénomène essentiel est un encombrement lié à la taille réelle des particules.

Visqueux jusqu'au blocage

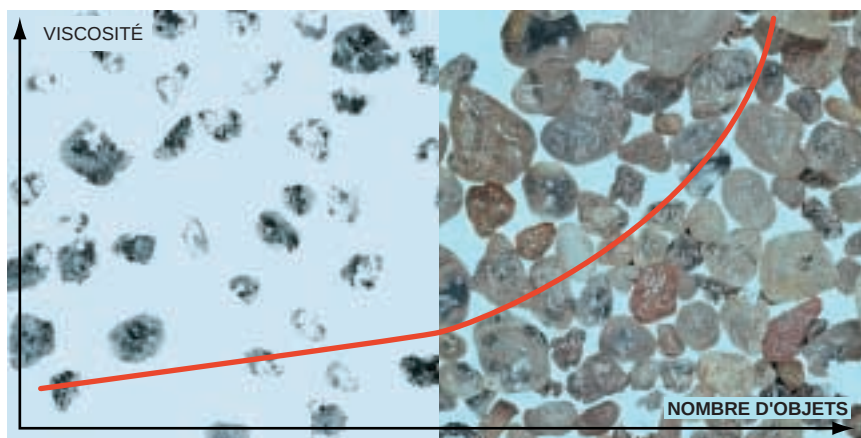
Plus un liquide est visqueux, plus il s'écoule lentement. Ainsi, le miel est plus visqueux que l'huile, elle-même plus visqueuse que l'eau. Peut-on définir une viscosité pour nos pâtes ? Si le volume des grains placés dans le liquide est bien inférieur à celui du liquide, sa viscosité moyenne n'est guère différente de celle du liquide seul. En 1905, Albert Einstein a montré que la différence relative de viscosité du mélange par rapport à celle du liquide vaut 2,5 fois la concentration volumique des grains, c'est-à-dire le rapport du volume occupé par les grains et du volume total du mélange.



Frédéric Lécuyer/Pyros

1. LES COULÉES DE CENDRES (LAHARS) résultent de mécanismes de liquéfaction. Lorsque les cendres qui couvrent les flancs d'un volcan sont mouillées par les pluies, le mélange cendres et eau s'écoule dans la vallée, parfois sur des pentes très faibles. Ainsi,

des surfaces de plusieurs centaines de kilomètres carrés peuvent être ensevelies sous ces coulées. Ici, au Pinatubo (Philippines), les alentours du volcan subissent plusieurs coulées par an depuis l'éruption de 1991.



2. LORSQUE L'ON PLACE DES GRAINS, comme des grains de sable, dans un liquide, chacun de ces grains rencontre rarement ses voisins (à gauche). La viscosité du mélange est alors proche de celle du liquide et elle augmente lentement avec le nombre de grains. À partir d'une certaine concentration en grains, le liquide ne peut plus lubrifier les mouvements relatifs. Les grains se gênent lors des déformations (à droite). De surcroît, il se forme un réseau de particules en contact à travers tout le mélange. Dans ces conditions, le mélange ne se comporte plus comme un liquide simple, il possède les propriétés d'une pâte granulaire : notamment sa viscosité augmente très vite avec la concentration en grains.

Ajoutons des grains dans le mélange. Lorsque la concentration volumique dépasse quelques pourcent, la loi d'Einstein n'est plus valable, et la viscosité augmente de plus en plus rapidement. Cela peut être compris intuitivement : pour un volume donné, plus le matériau contient de grains, moins il contient de liquide, de sorte que la facilité des mouvements relatifs des grains diminue. Les forces nécessaires au déclenchement d'un mouvement donné sont alors supérieures : le mélange est d'autant plus visqueux que sa concentration en grains est grande.

À l'extrême, lorsque l'entassement des grains est maximal, les grains ne peuvent plus glisser les uns sur les autres, et la viscosité du mélange devrait tendre vers l'infini ; autrement dit, la pâte ne devrait pas couler. Cette hypothèse est mal vérifiée et ne donne pas la bonne viscosité pour les concentrations proches de la concentration maximale d'entassement (voir la figure 2).

Lorsque l'entassement est maximal, des phénomènes contraires à l'intuition apparaissent. Sur une plage humide, la pression des pas fait disparaître l'eau : le sable se dessèche sous le pied. C'est la manifestation d'une propriété des pâtes concentrées : la «dilatance», mise en évidence en 1885 par le physicien anglais Osborne Reynolds. Remplissant un ballon de baudruche d'un mélange de grains et d'eau, il déforme le ballon. Alors que l'on s'attendrait à ce

que la pression exercée sur cette pâte granulaire fasse sortir le liquide, le niveau d'eau dans le tuyau relié au ballon diminue. En fait, la déformation fait bouger des particules nichées dans des interstices formés par d'autres particules. En sortant de ces niches, ces particules s'écartent, au moins momentanément. La multiplication de ce phénomène au sein du mélange entraîne sa dilatation : l'enveloppe du volume occupé par les particules augmente. Le volume laissé libre pour le liquide augmente donc aussi, d'où la baisse du niveau de liquide dans le tuyau. L'eau sur du sable mouillé se comporte ainsi : elle s'enfonce dans le sol, dans les interstices laissés libres par la dilatation du sable qui résulte de la pression exercée par le pied du promeneur.

En mécanique des fluides, l'effet de dilatance n'était pas pris en compte : à tort, car, à partir d'une certaine vitesse d'écoulement, la viscosité augmente parfois brusquement (d'un facteur pouvant aller jusqu'à dix). Dans les années 1990, des expériences de diffusion et de diffusion sur des suspensions modèles, constituées de billes identiques, ont montré que, lors de ces sauts de viscosité, il se produisait des transitions ordre-désordre apparentées à une dilatance frustrée. Dans ces expériences, les suspensions concentrées sont entraînées entre deux plateaux mobiles. Lorsque l'on met ces plateaux en rotation, les contraintes dans la suspension engendrent, comme dans le sable mouillé, une dila-

tation. Cependant, le maintien constant du volume empêche la dilatation. Cette dilatance frustrée engendrerait les transitions ordre-désordre des configurations de particules.

Depuis le début des années 1990, les physiciens, notamment Luc Petit et Philippe Gondret, à l'École normale supérieure de Lyon, ont confirmé l'existence de ces modifications d'organisation des particules. Ainsi, la viscosité d'une suspension de billes identiques est inférieure si les particules sont alignées dans des plans qui glissent les uns sur les autres : les plans de glissement «lubrifient» l'écoulement. Ces expériences sur des écoulements modèles, où les particules sont toutes identiques, montrent que ce sont les évolutions de la configuration spatiale des particules qui engendrent les variations du comportement des pâtes. Il doit en être de même pour les pâtes naturelles, aux grains de tailles différentes.

En se fondant sur ces observations, les hydrodynamiciens pouvaient encore considérer les pâtes ou les suspensions comme des liquides classiques. À faible vitesse, la viscosité était proportionnelle à la concentration, de même qu'à grande vitesse, mais avec un coefficient différent. Dans ces deux régimes, correspondant à deux configurations spatiales, la proportionnalité subsiste. Les hydrodynamiciens extrapolaient ce comportement newtonien à toutes les pâtes granulaires, même les pâtes concentrées. Or, dans ces dernières, la prise en compte des interactions entre grains modifie cette vision.

Contact des grains et distribution des forces

Depuis longtemps, les mécaniciens des sols avaient observé que la force nécessaire pour déformer un sol granulaire humide est à peu près proportionnelle à la pression appliquée. Ce résultat exprime la loi de Coulomb : lorsqu'un bloc solide glisse sur un plan incliné, le frottement – la résistance au mouvement – est proportionnel au poids du bloc. Extrapolons ce résultat à une pâte granulaire que l'on déforme. La force normale entre deux grains en contact est en moyenne égale au poids de matériau situé au-dessus d'eux. En essayant de déduire une loi de comportement macroscopique à partir de cette hypothèse et

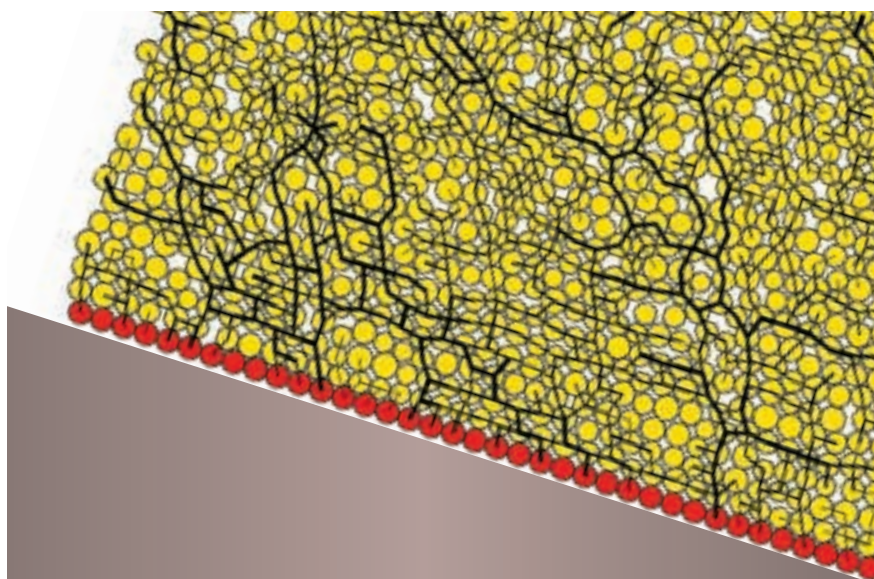
en supposant que tous les grains sont en contact, les physiciens n'arrivaient pas à déduire la proportionnalité observée expérimentalement. La distribution des forces au sein du mélange devait être plus complexe.

Dans les années 1950, le physicien français Pierre Dantu a étudié la distribution des forces au sein d'un ensemble de disques. Lors de déformations de ce milieu test, les disques étaient plus déformés dans des directions particulières : la transmission des forces se faisait selon des chemins préférentiels.

Plus récemment, des simulations numériques ont permis de quantifier le phénomène. Ainsi, à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles, Farhang Radjai a montré que des chaînons de force transmettent la plus grande partie des efforts à travers le mélange et, à côté de ces chaînons principaux, des branches secondaires de contact, mieux réparties dans le mélange, transmettent des forces nettement inférieures. Autrement dit, les branches secondaires sont constituées de particules assez mobiles (qui dissipent donc de l'énergie) et qui sont soumises à peu de contraintes. À l'inverse, les branches de contraintes principales sont composées de particules en contact prolongé et encaissent de ce fait des forces importantes. En poussant l'analogie, la pâte granulaire qui se déforme pourrait être comparée à un liquide dense placé dans un réseau solide : la pression hydrostatique est alors transmise par la «fraction liquide», tandis que les contraintes de cisaillement résultent de forces transmises par le «réseau solide» de particules en contact.

Par une technique analogue, François Chevoir et Michaël Prochnow, du Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil de Champs-sur-Marne, ont montré que ce «réseau» de forces apparaît aussi au sein d'écoulements granulaires secs sur un plan incliné. Toutefois, dans ces écoulements, les forces sont mieux réparties (voir la figure 3).

D'autres expériences sur des mousses, matériaux dont les objets ne sont pas des grains mais des bulles, ont donné des résultats analogues. À l'Université de Californie, Anthony Gopal et Douglas Durian ont éclairé des mousses. En analysant la lumière transmise, ils ont montré que, lorsque la déformation des mousses est faible,



3. SIMULATION D'UN ÉCOULEMENT DE DISQUES sur un plan incliné. L'intensité des forces entre les disques est représentée par des traits d'épaisseur proportionnelle au logarithme de l'intensité. La répartition des forces forme un chemin très hétérogène. Les forces se répartissent sur une large gamme d'intensité, mais certains chemins «encaissent» l'essentiel des efforts.

quelques bulles seulement sont déformées de manière irréversible, les autres ne sont soumises qu'à des déformations élastiques réversibles. En extrapolant ce résultat à des écoulements, où les déformations sont importantes, on estime que seules quelques bulles encaissent l'essentiel des efforts transmis au sein du réseau de bulles en contact.

Ainsi, au sein des suspensions granulaires concentrées, d'autres effets que l'écoulement purement hydrodynamique sont importants, notamment l'apparition de réseaux de grains. Ces réseaux agissent sur le comportement des pâtes, en particulier lorsqu'ils s'étendent d'un bout à l'autre de l'écoulement. Dans ce cas, le réseau de contact peut imposer son comportement à la pâte granulaire, d'où des blocages de l'écoulement.

Toutefois, les contacts ne sont pas toujours directs. Notamment, le liquide peut être en mouvement relatif par rapport aux grains, ce qui modifie leurs interactions.

Du liquide qui allège

Dans une suspension, les particules subissent la poussée d'Archimède, de sorte que la force qu'elles exercent lorsqu'elles glissent les unes sur les autres, liée à leur poids, est diminuée. Le liquide interstitiel abaisse donc la résistance à la déformation d'un milieu granulaire saturé en liquide

(qui ne comporte pas de bulles d'air). Par exemple, un terrain en pente qui s'humidifie progressivement peut se mettre en mouvement sans modification préalable de l'arrangement des particules. En s'humidifiant, les grains qui constituent ce sol deviennent «moins lourds», alors que la force d'entraînement, qui correspond à la composante du poids du mélange le long de la pente, ne varie pas. Les glissements sous-marins, l'équivalent sous les mers ou les océans des glissements de terrain, s'écoulent ainsi sur des pentes bien plus faibles que sur terre.

L'effet que nous venons de décrire est un effet statique, mais lorsque le liquide interstitiel est animé d'un mouvement différent de celui du réseau de particules, le résultat peut être plus dramatique encore. Imaginons qu'un réseau de grains en contact bloque la pâte. Le liquide va alors s'écouler dans l'espace laissé libre par les grains, assimilable à un réseau de conduites enchevêtrées. Comme l'écoulement d'un liquide à travers un tuyau est freiné par les frottements visqueux, l'écoulement nécessite l'application d'une différence de pression entre les extrémités. Ainsi, dans le réseau où circule le liquide, la pression augmente vers l'amont. C'est la loi de Darcy, établie au XIX^e siècle par cet ingénieur chargé de l'alimentation en eau de la ville de Dijon. Cette variation de pression au sein du

liquide engendre une contrainte supplémentaire sur les particules.

Si, pour des raisons géométriques, le flux d'eau est au moins en partie orienté du bas vers le haut, cette variation de pression peut même engendrer une force qui s'oppose à la force d'ap-

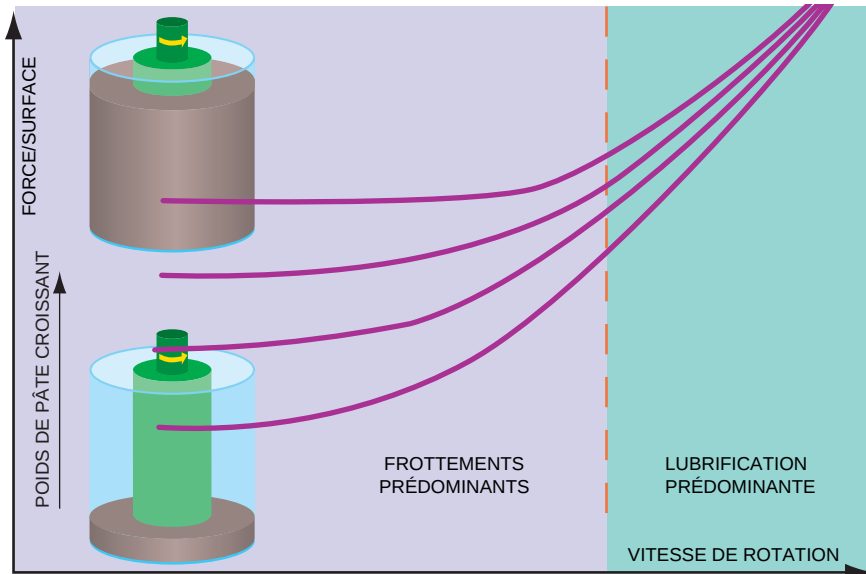
pui mutuelle liée au poids des particules. Dans ce cas, le glissement entre deux particules se fait sans effort : le mélange perd toute résistance à la déformation. Ce phénomène est l'une des causes des sables mouvants. La destruction des barrages en remblai

résulte des mêmes mécanismes. En circulant à travers le pied du barrage, l'eau «liquéfie» la masse granulaire qui s'érode à l'aval du remblai, ce qui peut détruire l'ouvrage.

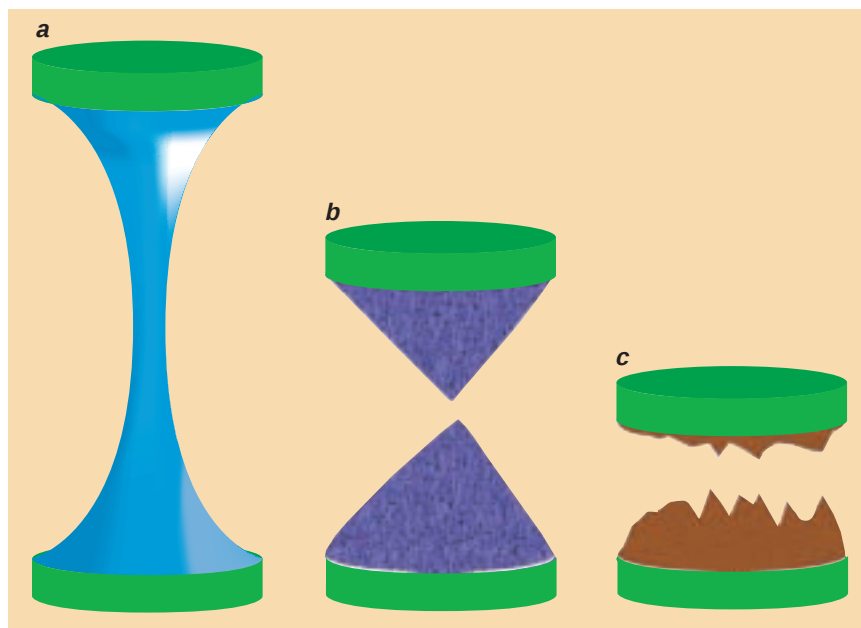
Ce mouvement du liquide par rapport aux grains amène des comportements contraires à l'intuition. La pose de carrelage à l'aide de mortier en est un exemple. On pose une certaine quantité de mortier au centre de la surface où l'on va placer le carreau, puis, en appuyant sur le carreau, on étale la couche de mortier. Contre toute attente, il est nettement plus facile d'écraser le mortier rapidement que lentement. L'explication est simple : l'écoulement de l'eau à travers la matrice granulaire et l'écoulement d'ensemble de la pâte sont en concurrence. Lorsque la pression est faible, le passage de l'eau à travers le squelette granulaire, plus aisé et plus rapide que l'étalement de la pâte, se fait d'abord. Le mortier exsude son eau et, très rapidement, c'est une couche de grains presque secs que l'on doit écraser, avec toutes les difficultés que l'on sait ! En revanche, en appliquant un effort initial violent, l'écoulement de la pâte dans son ensemble (eau et grains) est plus facile et plus rapide : on écrase la couche de mortier jusqu'à ce qu'elle recouvre complètement la surface voulue. Ces phénomènes se manifestent également, avec des conséquences plus graves, dans la mise en forme de pâtes de céramique ou de ciment par extrusion. On force la pâte à traverser une filière (cylindre creux) dont la section lui donne la forme souhaitée. Si la vitesse d'extrusion est mal adaptée et que l'exsudation commence, l'écoulement se bloque et la filière explose.

La lubrification disperse

Ainsi, selon sa vitesse, le liquide interstitiel peut déclencher l'écoulement ou, au contraire, le ralentir, voire le bloquer, mais des effets plus subtils apparaissent lorsque la pâte granulaire s'écoule. Lors de l'écoulement, les grains ont parfois tendance à s'écarter. Ce phénomène résulte de la lubrification par une fine couche de liquide. La distribution de pression au sein du liquide cisailé entre deux corps qui glissent l'un contre l'autre est alors telle que le liquide tend à les écarter. La force à appliquer pour rapprocher l'un de l'autre deux grains plats au sein d'un liquide augmente



4. MESURE DE LA LOI DE COMPORTEMENT d'une pâte granulaire. Une pâte granulaire est placée entre deux cylindres mobiles. À faible vitesse, la pâte granulaire se comporte à peu près comme un tas de sable : la force par unité de surface à appliquer pour déclencher la rotation est proportionnelle au poids de matériau (à la hauteur de pâte). En revanche, à grande vitesse, le comportement de la pâte est analogue à celui d'un liquide simple : la force nécessaire pour la mise en rotation est seulement proportionnelle à la vitesse d'écoulement. À grande vitesse, les particules n'ont pas le temps de recréer le réseau de contacts directs à l'origine de la résistance de la pâte aux faibles vitesses.

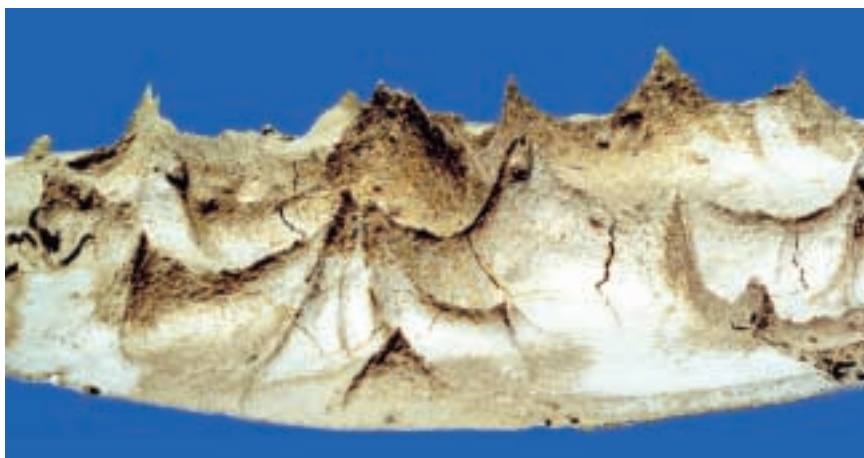


5. LORSQUE L'ON ÉTIRE UNE PÂTE FINE CONCENTRÉE, celle-ci a tendance à se fracturer (c), alors qu'un liquide simple s'allonge indéfiniment si son poids ne joue aucun rôle (a). Une pâte constituée de gros grains ou peu concentrée a un comportement intermédiaire : elle se déforme d'abord continûment, puis elle se sépare rapidement en deux mottes (b). Ce phénomène se produit lors de la préparation d'une pâte à tarte : si l'on ajoute un peu de farine, on obtient un mélange trop liquide qui s'étale ou s'étire facilement sans se fracturer ; avec trop de farine, la pâte se fracture rapidement dès qu'on la manipule.

quand leur distance diminue (expérience facile à réaliser dans son bain). Pour deux grains parfaitement lisses, cette force est proportionnelle à la vitesse de rapprochement et à l'inverse de la distance qui les sépare.

Cette dispersion des particules due à la lubrification intervient, par exemple, lors de la remise en suspension de particules, lorsqu'un liquide en écoulement entraîne des particules entassées au fond d'un récipient ou qu'un torrent entraîne des particules de son lit. Dans ce cas, la concentration des particules au sein du liquide est très hétérogène. Dans un mélange concentré, la concentration ne peut pas varier sensiblement, et cette hétérogénéité frustrée engendre des conséquences semblables à celles d'un changement de configuration.

L'un de nous (C. Ancey) a récemment mis en évidence une transition de comportement d'une pâte granulaire qui résulte de cet effet. Entre deux cylindres coaxiaux, il a placé un mélange concentré de liquide et de billes de verre, puis il a mis les cylindres en rotation. Le mélange était



Henri Van Damme

6. FRACTURE D'UNE PÂTE GRANULAIRE par arrachement.

ainsi cisailé entre les cylindres. Aux faibles vitesses de rotation, le couple qu'il faut appliquer au cylindre intérieur par unité de surface de mélange pour mettre l'ensemble en rotation est proportionnel à la hauteur de la pâte (voir la figure 4). Cela indique que l'énergie fournie par l'expérimentateur pour faire tourner le cylindre en contact avec la pâte sert essentiellement à compenser les frottements des particules les unes sur les autres.

La résistance au frottement de deux particules augmente en effet avec la force qui tend à les maintenir en contact, elle-même proportionnelle à la hauteur de mélange situé au-dessus de ces particules. Aux faibles vitesses, la force à exercer est proportionnelle à la hauteur de la pâte, et cette pâte se comporte un peu comme un sol granulaire pour lequel la résistance au cisaillement est proportionnelle à la pression exercée.





Jean-François Rigot

7. DANS CERTAINS BÉTONS, un réseau de contacts directs entre grains de sable et de cailloux leur confère les propriétés d'une pâte granulaire.

À des vitesses supérieures, la pâte réagit autrement : le couple des forces par unité de surface de mélange nécessaire à la mise en rotation de l'ensemble ne dépend pas de la hauteur de pâte. De surcroît, ce couple est proportionnel à la vitesse. Cela correspond au comportement d'un fluide classique (newtonien) pour lequel les efforts à fournir sont proportionnels à la vitesse d'écoulement. Dans ce cas, les particules sont maintenues à distance (aussi faible soit-elle) les unes des autres par de fines couches de liquide. Le liquide interstitiel impose son comportement à l'ensemble de la pâte, puisque c'est lui qui est sollicité lors des mouvements relatifs des particules. Cette transition de comportement peut paraître anodine, voire simpliste ; pourtant elle établit un pont crucial entre la mécanique des sols, où les grains imposent leur comportement, et la mécanique des fluides, où le liquide dicte sa loi.

Suspensions concentrées

Au sein des pâtes à grains fins, le liquide ne peut plus migrer facilement, car le réseau de conduites formées par les vides laissés par les grains est trop étroit : quelques micromètres de diamètre tout au plus. Or, la différence de pression à appliquer pour déclencher un écoulement dans une conduite est inversement proportionnelle au rayon de la conduite à la puissance quatrième. Dans les conditions ordinaires de déformation du mélange, où les pressions sont peu élevées, la circulation du liquide à travers ce réseau est lente.

Ces matériaux à grains fins ont alors un comportement particulier. Dans un

premier temps, ils se comportent comme des fluides à seuil, c'est-à-dire que, lorsqu'on les étale sur un plan inclinable, l'écoulement ne se déclenche qu'au-dessus d'un seuil d'inclinaison. Le réseau de particules solides ou enchevêtrées rigidifie l'ensemble. En revanche, après un temps de repos, ces pâtes sédimentent, de sorte que l'on voit apparaître une couche de liquide à leur surface : la matière solide s'est tassée. Ainsi, la structure, que l'on croyait rigide, peut s'effondrer sur elle-même.

Ces pâtes à grains fins peuvent aussi se fracturer facilement. Imaginons l'expérience simple suivante : on écrase d'abord une couche de pâte (sans exsudation) entre deux plateaux, puis on écarte les plateaux progressivement (voir la figure 5). C'est par exemple ce que nous faisons lorsque nous ne sommes pas satisfaits de l'emplacement du carreau de faïence qui vient d'être posé et que nous le retirons. Avec un liquide ordinaire, ce geste engendre l'écoulement de la couche liquide vers le centre des plaques et il se forme un filet fluide qui s'étire de manière continue et finit par se rompre (comme une goutte d'huile étirée entre le pouce et l'index). Dans le cas d'une pâte granulaire suffisamment concentrée et fine, l'évolution est brusque : après le début de l'écoulement, la couche se fracture sur toute sa surface ; les deux surfaces de fracturation ressemblent alors à des massifs montagneux (voir la figure 6). Pourtant tout enfant sait qu'il est possible d'étirer continûment un cylindre de pâte à modeler sans le fracturer. Il suffit d'écraser en même temps latéralement le cylindre, de même qu'un cuisinier étale une pâte à tarte progressivement avec un rouleau. Cette technique a cependant l'inconvénient de consommer beaucoup d'énergie.

Comment expliquer cette différence de comportement ? Lors d'un étirement, les particules solides se gênent mutuellement, car la place est restreinte, et les modifications de configuration sont difficiles compte tenu de la migration trop lente du liquide. L'écartement des plaques engendre une dépression dans la couche, d'autant plus importante que l'épaisseur de la couche est faible et que la vitesse d'écartement des plaques est élevée. Cette dépression peut devenir si grande qu'elle déclenche un phénomène de cavitation au sein du liquide (lorsque l'on tire sur un liquide, on écarte les

molécules au point de le transformer en gaz, c'est la cavitation). Il se forme alors des bulles de vapeur ou d'air. Cette cavitation démarre en de nombreux endroits. La coalescence de ces cavités à l'intérieur du matériau brise la pâte en deux fragments.

En revanche, si l'on fournit suffisamment d'énergie afin que les particules puissent se réarranger continuellement à mesure de l'étirement, la fracturation ne se produit pas. À l'inverse, quand on cherche à former une seule boule avec deux morceaux de pâtes à modeler, on ne perçoit plus aucune trace de la séparation initiale en deux morceaux, à condition de bien malaxer la pâte. Pourtant, si l'on colle l'un contre l'autre les deux morceaux sans malaxage, cette trace subsiste longtemps. Le malaxage de la pâte aide la migration du liquide, ce qui réorganise le réseau de particules, en faisant notamment s'interpénétrer les deux réseaux.

L'étude de l'écoulement de pâtes granulaires aux comportements en apparence différents fait apparaître une unité des mécanismes physiques. C'est la collaboration de chercheurs de spécialités variées qui a permis l'identification de cette unité. Les pâtes fascinent par ces comportements étranges dont les sables mouvants ou les écoulements de cendres sont les manifestations les plus dramatiques. Même un simple mélange d'eau et de farine de maïs permet d'obtenir un comportement étrange : en apparence liquide, ce mélange semble solide lorsqu'on le heurte. Toutefois, outre les mécanismes décrits dans cet article, ce comportement fait intervenir des effets colloïdaux. C'est la meilleure compréhension de tous ces mécanismes qui permettra, par exemple, de mieux couler du béton (voir la figure 7) ou de canaliser les écoulements de cendres.

Philippe COUSSOT est chercheur au Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil de Champs-sur-Marne (LCPC-CNRS). Henri VAN DAMME est physicien au Laboratoire de physico-chimie macromoléculaire de l'ESPCI. Christophe ANCEY est chercheur au Cemagref de Grenoble.

Ph. COUSSOT et Ch. ANCEY, *Rhéophysique des pâtes et des suspensions*, EDP-Sciences, 1999.

J. DURAN, *Sables, poudres et grains*, Eyrolles, 1997.
