

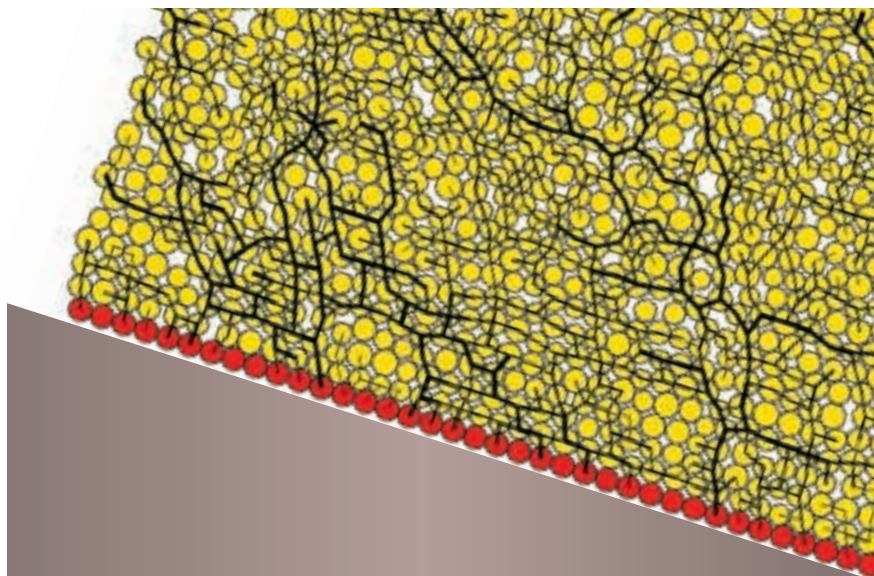
en supposant que tous les grains sont en contact, les physiciens n'arrivaient pas à déduire la proportionnalité observée expérimentalement. La distribution des forces au sein du mélange devait être plus complexe.

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,



François Chevoir et Michaël Prochnow

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-

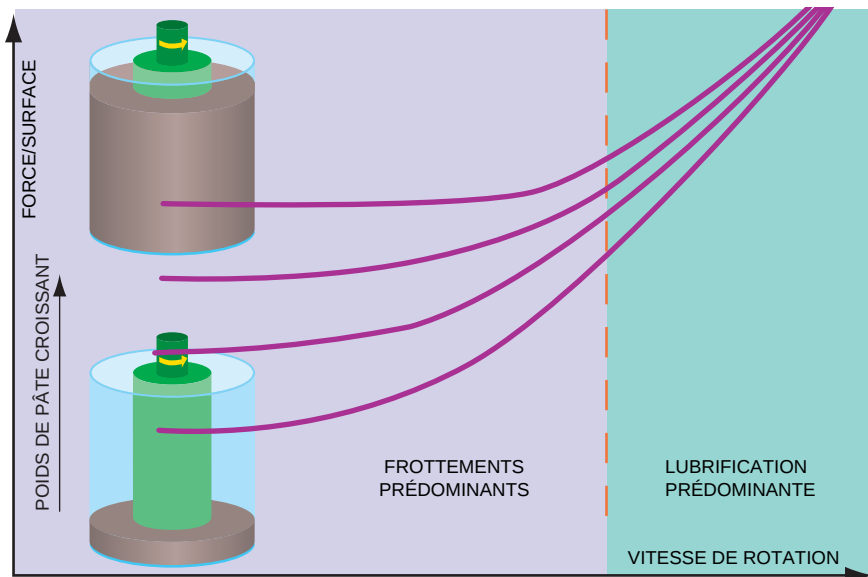
pui mutuelle liée au poids des particules. Dans ce cas, le glissement entre deux particules se fait sans effort : le mélange perd toute résistance à la déformation. Ce phénomène est l'une des causes des sables mouvants. La destruction des barrages en remblai

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.

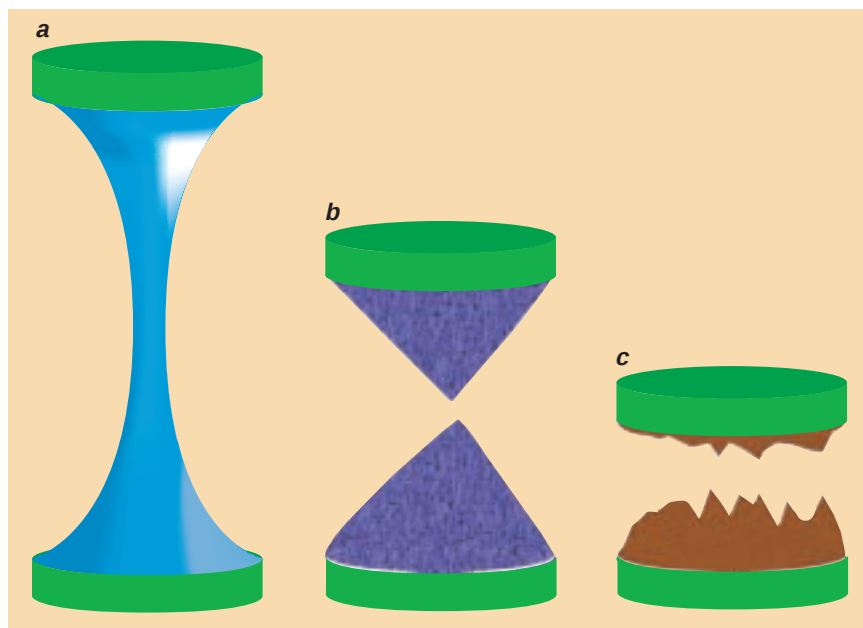
Ce mouvement du liquide par rapport aux grains amène des comportements contraires à l'intuition. La pose de carrelage à l'aide de mortier en est un exemple. On pose une certaine quantité de mortier au centre de la surface où l'on va placer le carreau, puis, en appuyant sur le carreau, on étale la couche 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.