

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-

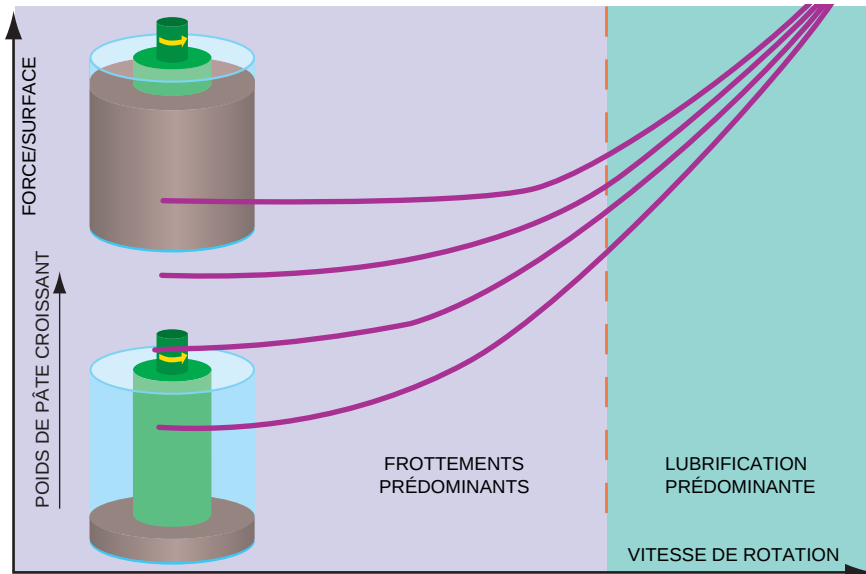
pui mutuelle liée au poids des particules. Dans ce cas, le glissement entre deux particules se fait sans effort : le mélange perd toute résistance à la déformation. Ce phénomène est l'une des causes des sables mouvants. La destruction des barrages en remblai

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.

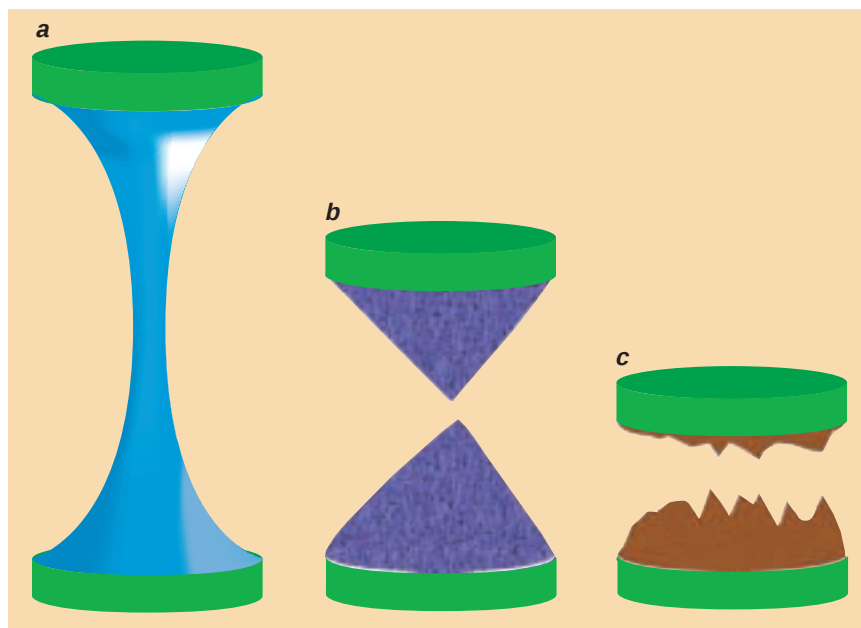
Ce mouvement du liquide par rapport aux grains amène des comportements contraires à l'intuition. La pose de carrelage à l'aide de mortier en est un exemple. On pose une certaine quantité de mortier au centre de la surface où l'on va placer le carreau, puis, en appuyant sur le carreau, on étale la couche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

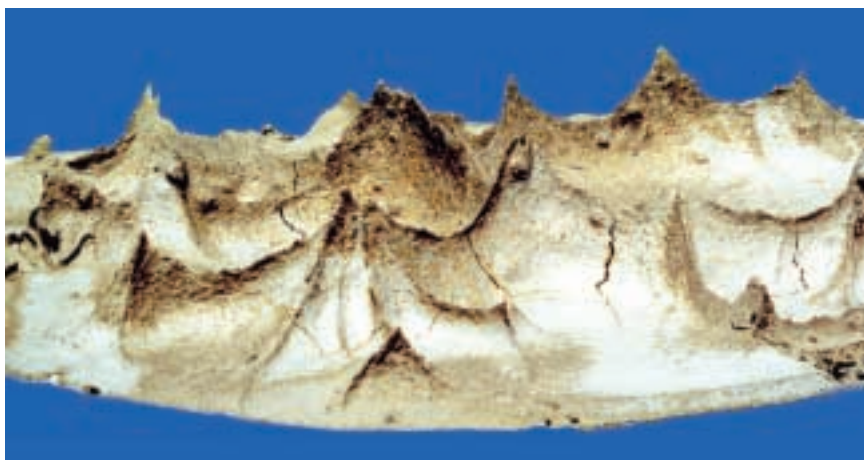


5. LORSQUE L'ON ÉTIRE UNE PÂTE FINE CONCENTRÉE, celle-ci a tendance à se fracturer (c), alors qu'un liquide simple s'allonge indéfiniment si son poids ne joue aucun rôle (a). Une pâte constituée de gros grains ou peu concentrée a un comportement intermédiaire : elle se déforme d'abord continûment, puis 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.
