



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.