



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.

---

# Astéroïdes et comètes : des tas de cailloux

**ERIK ASPHAUG**

*Les astéroïdes menacent la Terre, mais ils détiennent des informations précieuses sur l'origine des planètes.*

**A**u début de la conquête spatiale, personne n'avait entendu parler des astéroïdes. Les astronomes connaissaient mal ces petits corps célestes. Aujourd'hui, on commence tout juste à comprendre de quoi ils sont faits et comment ils se sont formés. Cependant, leur comportement reste énigmatique.

Bien qu'aucune sonde n'ait observé un astéroïde de près, on pense que les plus gros sont des versions miniatures et cabossées de la Lune. La pesanteur y est réduite : quand le diamètre est inférieur à quelques dizaines de kilomètres, elle est trop faible pour leur donner une forme sphérique, et ils ressemblent alors à un haricot sec, à une molaire, à une cacahuète... En raison de cette irrégularité, les objets peuvent même être attirés vers d'autres directions que celle du centre de masse. De surcroît, leur rotation parfois complexe contribue à produire des effets contraires à l'expérience quotidienne : sur certains astéroïdes, le bas n'est plus le bas, on y «tomberait» parfois vers le sommet d'une montagne, et des sauts trop vigoureux conduiraient soit dans l'espace infini, soit sur une orbite chaotique qui, après plusieurs jours, ramène en un endroit complètement imprévisible de la surface. Un caillou que l'on jette devant soi peut retomber sur la tête. Un petit saut conduit parfois à 100 mètres de la position initiale, voire modifie la forme de l'astéroïde. Le plus discret des visiteurs laisserait sur son passage un nuage de poussière qui subsisterait pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines.

Des sondes spatiales, telle NEAR (*Near Earth Asteroid Rendezvous*, soit «rendez-vous avec un astéroïde proche

de la Terre»), mise en orbite autour d'un astéroïde, améliorent notre compréhension de ces objets déroutants. Toutefois, malgré quelques observations lors du passage occasionnel de tels objets à proximité de la Terre, nous connaissons moins bien les astéroïdes (et les comètes, leurs cousines) que nous ne connaissions la Lune à l'aube de l'exploration spatiale. Ces petits corps sont le théâtre d'interactions subtiles entre des forces mineures, dont aucune n'est négligeable ni facile à simuler sur la Terre. Sont-ils solides ou constitués de cailloux agglomérés? Quelle est leur composition? Comment survivent-ils aux collisions avec les autres corps de petite taille? Une sonde ou un astronaute pourraient-ils s'y poser?

## Des gâteaux mal cuits

À la fin des années 1980, les astéroïdes n'étaient encore que des points lumineux (environ un millier) formant une ceinture entre Mars et Jupiter ; on en connaissait quelques-uns plus près de la Terre et l'on savait leur parenté avec les comètes, venues des confins du Système solaire. Comme leur couleur et leur luminosité variaient périodiquement, on avait déduit que ces corps avaient des formes irrégulières et une taille comprise entre celle d'une maison et celle d'un pays, avec une période de quelques heures à quelques jours.

Les analyses et observations des dernières décennies ont précisé les idées. En général, les astéroïdes proches de Mars et de la Terre sont faits de roches et de fer, tandis que les astéroïdes proches de Jupiter, sombres et rouges, semblent avoir une composition plus «primitive», c'est-à-dire ana-

logue à celle de la nébuleuse à partir de laquelle les planètes se sont formées, il y a 4,56 milliards d'années. La date de cette coalescence des planètes, naguère incertaine, a été précisée par l'analyse des isotopes du plomb (les produits de la désintégration radioactive de l'uranium) dans les plus vieilles météorites. En fait, on a longtemps pensé que ces roches tombées du ciel étaient des fragments d'astéroïdes ; la comparaison du spectre lumineux émis par les météorites et les astéroïdes a confirmé cette intuition.

De ce fait, de nombreux astronomes ont pensé que l'on éluciderait l'histoire du Système solaire si l'on observait les astéroïdes au télescope et si l'on analysait les météorites. La mise en œuvre de ce programme a été difficile, mais elle a conduit à une théorie bien acceptée de l'histoire du Soleil et de son cortège de corps. La formation des planètes à partir d'une nébuleuse de gaz et de poussières a commencé avec l'aggrégation de grains minuscules en «planétésimaux», les briques élémentaires des planètes. Au-delà de Mars, l'attraction exercée par Jupiter a bloqué la croissance de ces corps, dont le diamètre est resté inférieur à 1 000 kilomètres. Les fragments qui ne se sont pas agglomérés sont devenus les astéroïdes.

Les plus grosses de ces planètes «ratées» ont accumulé suffisamment de chaleur interne pour se «différencier» : les métaux, plus denses que les roches, ont été attirés vers l'intérieur, formant peut-être un noyau, dans certains cas. Des roches ont fondu, et des éruptions volcaniques se sont produites sur certains corps. Aucun astéroïde n'est assez gros pour retenir une atmosphère, mais les minéraux