

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 incompressibles.

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.