

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.

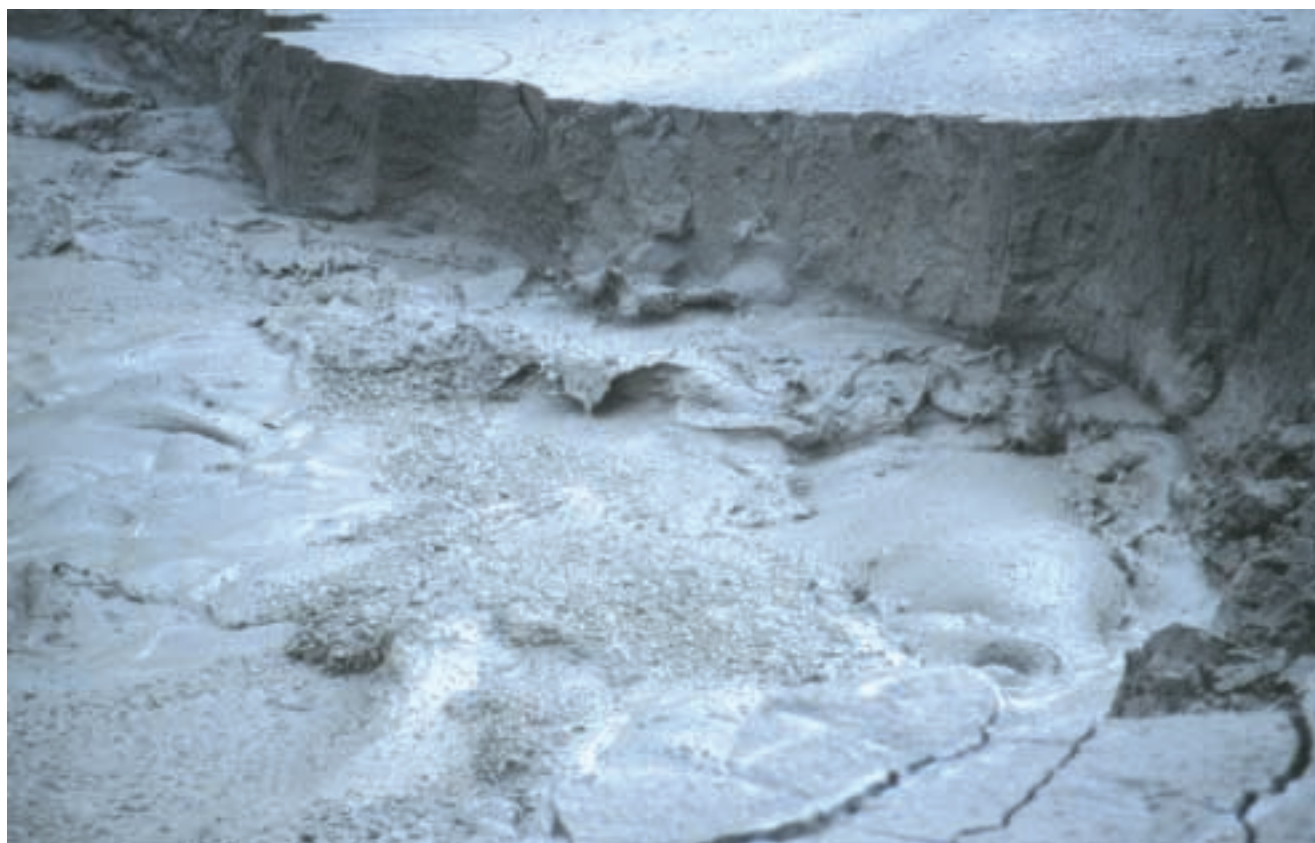
Après avoir examiné comment varie la viscosité d'une pâte en fonction du nombre de grains qu'elle contient, nous verrons que, pour décrire des pâtes très concentrées, il faut tenir compte des contacts entre les grains et du mouvement du fluide interstitiel ; plus précisément, de la configuration des 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 incomprises.

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

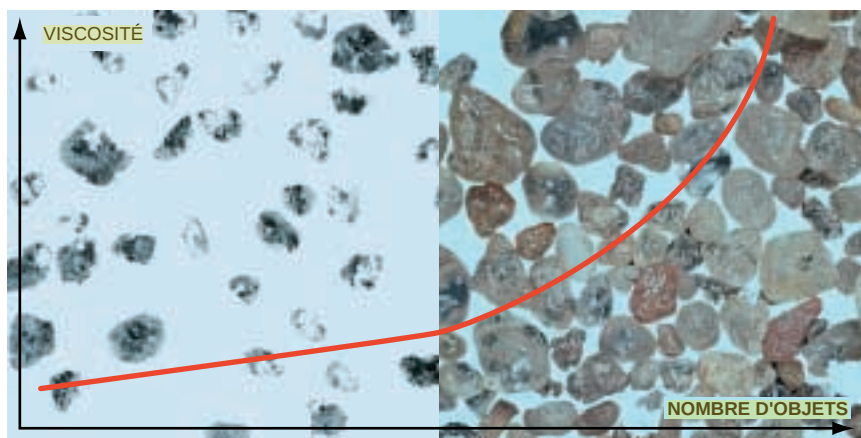
Plus un liquide est visqueux, plus il s'écoule lentement. Ainsi, le miel est plus visqueux que l'huile, elle-même plus visqueuse que l'eau. Peut-on définir une viscosité pour nos pâtes ? Si le volume des grains placés dans le liquide est bien inférieur à celui du liquide, sa viscosité moyenne n'est guère 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.



Frédéric Lécuyer/Pyros

1. LES COULÉES DE CENDRES (LAHARS) résultent de mécanismes de liquéfaction. Lorsque les cendres qui couvrent les flancs d'un volcan sont mouillées par les pluies, le mélange cendres et eau s'écoule dans la vallée, parfois sur des pentes très faibles. Ainsi,

des surfaces de plusieurs centaines de kilomètres carrés peuvent être ensevelies sous ces coulées. Ici, au Pinatubo (Philippines), les alentours du volcan subissent plusieurs coulées par an depuis l'éruption de 1991.



2. LORSQUE L'ON PLACE DES GRAINS, comme des grains de sable, dans un liquide, chacun de ces grains rencontre rarement ses voisins (à gauche). La viscosité du mélange est alors proche de celle du liquide et elle augmente lentement avec le nombre de grains. À partir d'une certaine concentration en grains, le liquide ne peut plus lubrifier les mouvements relatifs. Les grains se gênent lors des déformations (à droite). De surcroît, il se forme un réseau de particules en contact à travers tout le mélange. Dans ces conditions, le mélange ne se comporte plus comme un liquide simple, il possède les propriétés d'une pâte granulaire : notamment sa viscosité augmente très vite avec la concentration en grains.

Ajoutons des grains dans le mélange. Lorsque la concentration volumique dépasse quelques pourcent, la loi d'Einstein n'est plus valable, et la viscosité augmente de plus en plus rapidement. Cela peut être compris intuitivement : pour un volume donné, plus le matériau contient de grains, moins il contient de liquide, de sorte que la facilité des mouvements relatifs des grains diminue. Les forces nécessaires au déclenchement d'un mouvement donné sont alors supérieures : le mélange est d'autant plus visqueux que sa concentration en grains est grande.

À l'extrême, lorsque l'entassement des grains est maximal, les grains ne peuvent plus glisser les uns sur les autres, et la viscosité du mélange devrait tendre vers l'infini ; autrement dit, la pâte ne devrait pas couler. Cette hypothèse est mal vérifiée et ne donne pas la bonne viscosité pour les concentrations proches de la concentration maximale d'entassement (voir la figure 2).

Lorsque l'entassement est maximal, des phénomènes contraires à l'intuition apparaissent. Sur une plage humide, la pression des pas fait disparaître l'eau : le sable se dessèche sous le pied. C'est la manifestation d'une propriété des pâtes concentrées : la «dilatance», mise en évidence en 1885 par le physicien anglais Osborne Reynolds. Remplissant un ballon de baudruche d'un mélange de grains et d'eau, il déforme le ballon. Alors que l'on s'attendrait à ce

que la pression exercée sur cette pâte granulaire fasse sortir le liquide, le niveau d'eau dans le tuyau relié au ballon diminue. En fait, la déformation fait bouger des particules nichées dans des interstices formés par d'autres particules. En sortant de ces niches, ces particules s'écartent, au moins momentanément. La multiplication de ce phénomène au sein du mélange entraîne sa dilatation : l'enveloppe du volume occupé par les particules augmente. Le volume laissé libre pour le liquide augmente donc aussi, d'où la baisse du niveau de liquide dans le tuyau. L'eau sur du sable mouillé se comporte ainsi : elle s'enfonce dans le sol, dans les interstices laissés libres par la dilatation du sable qui résulte de la pression exercée par le pied du promeneur.

En mécanique des fluides, l'effet de dilatance n'était pas pris en compte : à tort, car, à partir d'une certaine vitesse d'écoulement, la viscosité augmente parfois brusquement (d'un facteur pouvant aller jusqu'à dix). Dans les années 1990, des expériences de diffusion et de diffusion sur des suspensions modèles, constituées de billes identiques, ont montré que, lors de ces sauts de viscosité, il se produisait des transitions ordre-désordre apparentées à une dilatance frustrée. Dans ces expériences, les suspensions concentrées sont entraînées entre deux plateaux mobiles. Lorsque l'on met ces plateaux en rotation, les contraintes dans la suspension engendrent, comme dans le sable mouillé, une dila-

tation. Cependant, le maintien constant du volume empêche la dilatation. Cette dilatance frustrée engendrerait les transitions ordre-désordre des configurations de particules.

Depuis le début des années 1990, les physiciens, notamment Luc Petit et Philippe Gondret, à l'École normale supérieure de Lyon, ont confirmé l'existence de ces modifications d'organisation des particules. Ainsi, la viscosité d'une suspension de billes identiques est inférieure si les particules sont alignées dans des plans qui glissent les uns sur les autres : les plans de glissement «lubrifient» l'écoulement. Ces expériences sur des écoulements modèles, où les particules sont toutes identiques, montrent que ce sont les évolutions de la configuration spatiale des particules qui engendrent les variations du comportement des pâtes. Il doit en être de même pour les pâtes naturelles, aux grains de tailles différentes.

En se fondant sur ces observations, les hydrodynamiciens pouvaient encore considérer les pâtes ou les suspensions comme des liquides classiques. À faible vitesse, la viscosité était proportionnelle à la concentration, de même qu'à grande vitesse, mais avec un coefficient différent. Dans ces deux régimes, correspondant à deux configurations spatiales, la proportionnalité subsiste. Les hydrodynamiciens extrapolaient ce comportement newtonien à toutes les pâtes granulaires, même les pâtes concentrées. Or, dans ces dernières, la prise en compte des interactions entre grains modifie cette vision.

Contact des grains et distribution des forces

Depuis longtemps, les mécaniciens des sols avaient observé que la force nécessaire pour déformer un sol granulaire humide est à peu près proportionnelle à la pression appliquée. Ce résultat exprime la loi de Coulomb : lorsqu'un bloc solide glisse sur un plan incliné, le frottement – la résistance au mouvement – est proportionnel au poids du bloc. Extrapolons ce résultat à une pâte granulaire que l'on déforme. La force normale entre deux grains en contact est en moyenne égale au poids de matériau situé au-dessus d'eux. En essayant de déduire une loi de comportement macroscopique à partir de cette hypothèse et