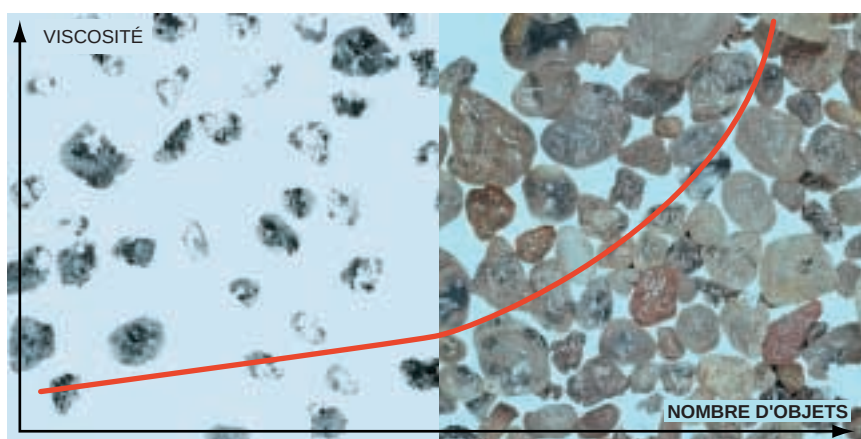




2. LORSQUE L'ON PLACE DES GRAINS, comme des grains de sable, dans un liquide, chacun de ces grains rencontre rarement ses voisins (à gauche). La viscosité du mélange est alors proche de celle du liquide et elle augmente lentement avec le nombre de grains. À partir d'une certaine concentration en grains, 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

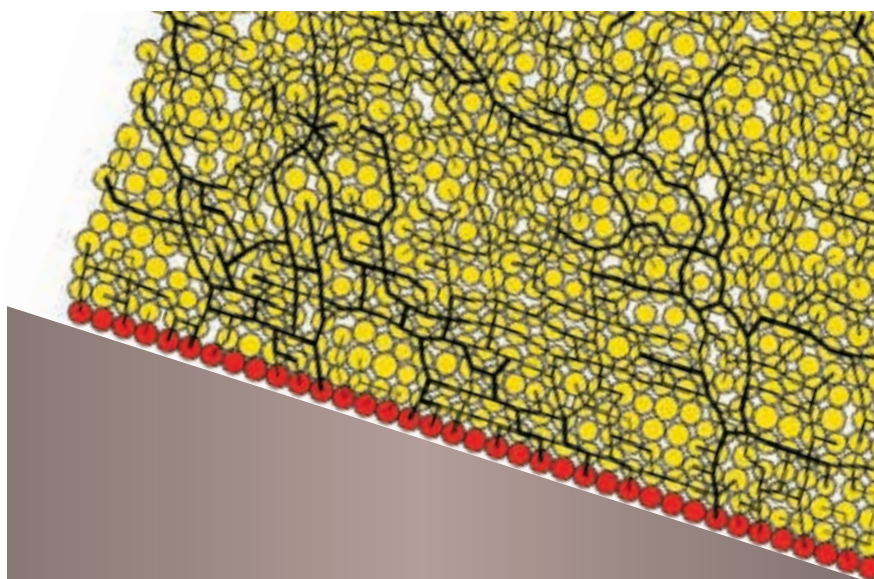
en supposant que tous les grains sont en contact, les physiciens n'arrivaient pas à déduire la proportionnalité observée expérimentalement. La distribution des forces au sein du mélange devait être plus complexe.

Dans les années 1950, le physicien français Pierre Dantu a étudié la distribution des forces au sein d'un ensemble de disques. Lors de déformations de ce milieu test, les disques étaient plus déformés dans des directions particulières : la transmission des forces se faisait selon des chemins préférentiels.

Plus récemment, des simulations numériques ont permis de quantifier le phénomène. Ainsi, à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles, Farhang Radjai a montré que des chaînons de force transmettent la plus grande partie des efforts à travers le mélange et, à côté de ces chaînons principaux, des branches secondaires de contact, mieux réparties dans le mélange, transmettent des forces nettement inférieures. Autrement dit, les branches secondaires sont constituées de particules assez mobiles (qui dissipent donc de l'énergie) et qui sont soumises à peu de contraintes. À l'inverse, les branches de contraintes principales sont composées de particules en contact prolongé et encaissent de ce fait des forces importantes. En poussant l'analogie, la pâte granulaire qui se déforme pourrait être comparée à un liquide dense placé dans un réseau solide : la pression hydrostatique est alors transmise par la «fraction liquide», tandis que les contraintes de cisaillement résultent de forces transmises par le «réseau solide» de particules en contact.

Par une technique analogue, François Chevoir et Michaël Prochnow, du Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil de Champs-sur-Marne, ont montré que ce «réseau» de forces apparaît aussi au sein d'écoulements granulaires secs sur un plan incliné. Toutefois, dans ces écoulements, les forces sont mieux réparties (voir la figure 3).

D'autres expériences sur des mousses, matériaux dont les objets ne sont pas des grains mais des bulles, ont donné des résultats analogues. À l'Université de Californie, Anthony Gopal et Douglas Durian ont éclairé des mousses. En analysant la lumière transmise, ils ont montré que, lorsque la déformation des mousses est faible,



3. SIMULATION D'UN ÉCOULEMENT DE DISQUES sur un plan incliné. L'intensité des forces entre les disques est représentée par des traits d'épaisseur proportionnelle au logarithme de l'intensité. La répartition des forces forme un chemin très hétérogène. Les forces se répartissent sur une large gamme d'intensité, mais certains chemins «encaissent» l'essentiel des efforts.

quelques bulles seulement sont déformées de manière irréversible, les autres ne sont soumises qu'à des déformations élastiques réversibles. En extrapolant ce résultat à des écoulements, où les déformations sont importantes, on estime que seules quelques bulles encaissent l'essentiel des efforts transmis au sein du réseau de bulles en contact.

Ainsi, au sein des suspensions granulaires concentrées, d'autres effets que l'écoulement purement hydrodynamique sont importants, notamment l'apparition de réseaux de grains. Ces réseaux agissent sur le comportement des pâtes, en particulier lorsqu'ils s'étendent d'un bout à l'autre de l'écoulement. Dans ce cas, le réseau de contact peut imposer son comportement à la pâte granulaire, d'où des blocages de l'écoulement.

Toutefois, les contacts ne sont pas toujours directs. Notamment, le liquide peut être en mouvement relatif par rapport aux grains, ce qui modifie leurs interactions.

Du liquide qui allège

Dans une suspension, les particules subissent la poussée d'Archimède, de sorte que la force qu'elles exercent lorsqu'elles glissent les unes sur les autres, liée à leur poids, est diminuée. Le liquide interstitiel abaisse donc la résistance à la déformation d'un milieu granulaire saturé en liquide

(qui ne comporte pas de bulles d'air). Par exemple, un terrain en pente qui s'humidifie progressivement peut se mettre en mouvement sans modification préalable de l'arrangement des particules. En s'humidifiant, les grains qui constituent ce sol deviennent «moins lourds», alors que la force d'entraînement, qui correspond à la composante du poids du mélange le long de la pente, ne varie pas. Les glissements sous-marins, l'équivalent sous les mers ou les océans des glissements de terrain, s'écoulent ainsi sur des pentes bien plus faibles que sur terre.

L'effet que nous venons de décrire est un effet statique, mais lorsque le liquide interstitiel est animé d'un mouvement différent de celui du réseau de particules, le résultat peut être plus dramatique encore. Imaginons qu'un réseau de grains en contact bloque la pâte. Le liquide va alors s'écouler dans l'espace laissé libre par les grains, assimilable à un réseau de conduites enchevêtrées. Comme l'écoulement d'un liquide à travers un tuyau est freiné par les frottements visqueux, l'écoulement nécessite l'application d'une différence de pression entre les extrémités. Ainsi, dans le réseau où circule le liquide, la pression augmente vers l'amont. C'est la loi de Darcy, établie au XIX^e siècle par cet ingénieur chargé de l'alimentation en eau de la ville de Dijon. Cette variation de pression au sein du