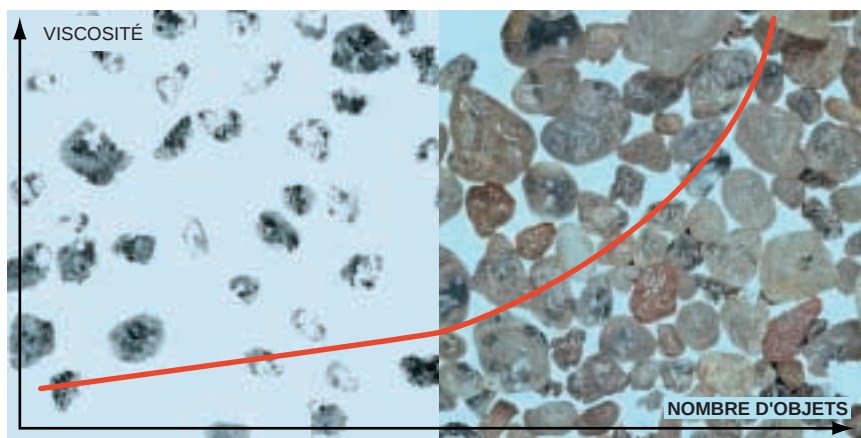




2. LORSQUE L'ON PLACE DES GRAINS, comme des grains de sable, dans un liquide, chacun de ces grains rencontre rarement ses voisins (à gauche). La viscosité du mélange est alors proche de celle du liquide et elle augmente lentement avec le nombre de grains. À partir d'une certaine concentration en grains,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