

> dans un fluide présente une viscosité effective qui est supérieure à celle du fluide pur. Pour de faibles teneurs en grains, la viscosité effective augmente proportionnellement à la concentration (une loi décrite pour la première fois par Albert Einstein lorsqu'il s'est intéressé au mouvement brownien de particules de taille microscopique). Mais pour des concentrations élevées, typiquement supérieures à 50% en volume pour des grains de même taille, les grains se gênent en se frottant et en entrant en collision, ce qui finit par les immobiliser.

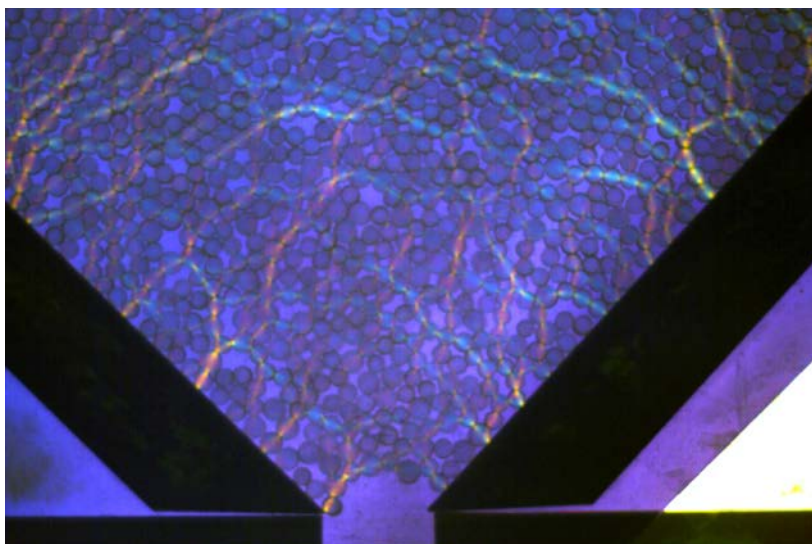
Dans l'exemple du sablier, lorsqu'une suspension très concentrée se bloque et que la vitesse de l'écoulement s'annule, tout se passe comme si la suspension était un liquide infiniment visqueux. Si, en revanche, les parois du sablier s'écartaient un peu en laissant le volume de l'ensemble s'ajuster, la compacité prendrait une valeur telle que l'écoulement se poursuivrait. D'après nos simulations, cette compacité critique est de 58% pour un fluide contenant des grains sphériques de même taille; ainsi, la viscosité de la suspension reste finie.

Il est possible de séparer les effets dus à la présence du fluide de ceux dus à l'encombrement des grains et à leurs collisions. Vers 2011, l'équipe d'Olivier Pouliquen à l'université d'Aix-Marseille a réalisé des expériences en ce sens, où l'on applique un cisaillement à une suspension granulaire (voir la figure page suivante, à gauche).

MESURER L'EFFET D'UN CISAILLEMENT

Dans ces expériences, le milieu granulaire est confiné entre deux plaques planes horizontales, dont la supérieure exerce une pression P . On applique un cisaillement à l'ensemble en faisant glisser la plaque supérieure à une certaine vitesse; le taux de cisaillement est défini par le quotient de cette vitesse par l'écart entre les plaques. De plus, on utilise une plaque supérieure poreuse, ce qui permet au liquide de la suspension de circuler librement. Ce dispositif permet d'évaluer la résistance au déplacement en fonction de la pression P exercée sur les grains; il rend compte de l'effet de viscosité d'une suspension concentrée comme on pourrait le faire pour un liquide en déplaçant deux doigts mouillés l'un par rapport à l'autre.

Ces expériences ont montré que, contrairement à celle des fluides simples tels que l'eau et l'air, la viscosité effective de la suspension diminue lorsque le taux de cisaillement augmente. On constate aussi qu'elle baisse lorsque la pression de confinement diminue (voir la figure page suivante, à droite). Comme le matériau granulaire peut adapter son volume, ces effets s'expliquent par le fait que dans les deux cas (augmentation du taux de cisaillement et diminution de la pression) la concentration des grains diminue, ce qui



Dans ce modèle à deux dimensions d'un sablier, les grains sont remplacés par des disques photoélastiques d'axes parallèles. En lumière polarisée, ces « grains » soumis à des efforts mécaniques apparaissent en clair, ce qui permet d'identifier un réseau de voûtes. Une telle voûte, constituée par une chaîne de forces, bloque ici l'écoulement à travers l'orifice du sablier.

réduit les encombrements entre les particules. En effet, les forces de viscosité exercées sur les grains tendent à les séparer et s'opposent à la pression de confinement, qui les rapproche. Le rapport entre le produit de la viscosité du fluide pur par le taux de cisaillement, d'une part, et la pression, d'autre part, mesure donc leur importance relative. Lorsque ce nombre, nommé « nombre visqueux », augmente, la viscosité effective augmente, par l'effet croissant des encombrements entre grains.

Cette façon dont la viscosité d'une suspension varie en fonction du nombre visqueux permet d'expliquer l'effet de la taille des grains sur la viscosité. Dans un écoulement libre de grains sur un plan incliné, la pression sur les grains est due au poids des couches supérieures et est donnée par le rapport du poids des grains (qui est proportionnel à r^3 , où r est le rayon des grains) divisé par leur section (proportionnelle à r^2). Par conséquent, le nombre visqueux varie comme l'inverse du rayon des grains: il est d'autant plus petit que les grains sont gros. Ainsi, pour une vitesse d'écoulement donnée, plus les grains sont gros, plus la viscosité



Plus les grains sont gros, plus la viscosité effective de la suspension est faible

