

> 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.

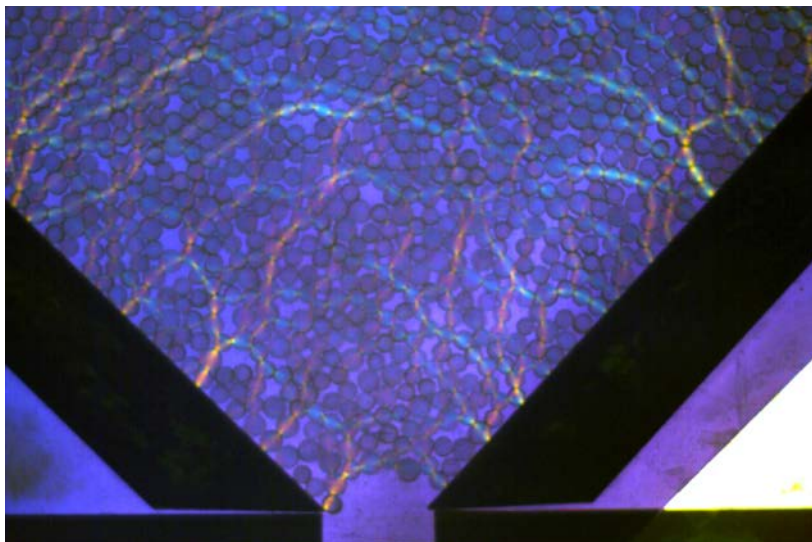
Dans l'exemple du sablier, lorsqu'une suspension très concentrée se bloque et que la vitesse de l'écoulement s'annule, tout se passe comme si la suspension était un liquide infiniment visqueux. Si, en revanche, les parois du sablier s'écartaient un peu en laissant le volume de l'ensemble s'ajuster, la 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

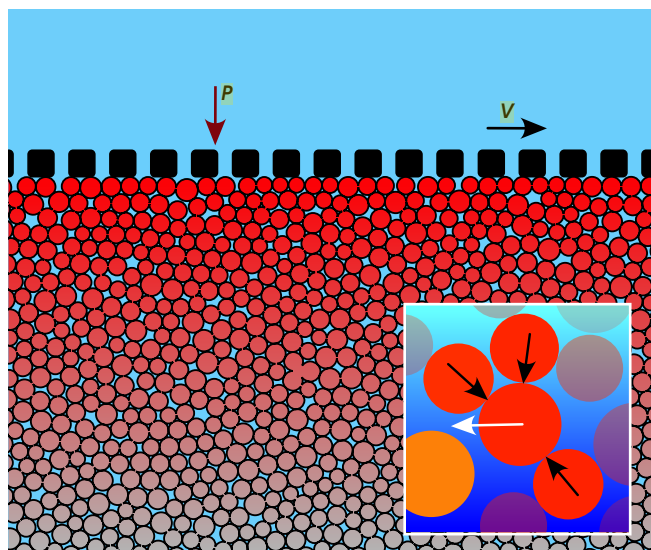


Dans ce modèle à deux dimensions d'un sablier, les grains sont remplacés par des disques photoélastiques d'axes parallèles. En lumière polarisée, ces « grains » soumis à des efforts mécaniques apparaissent en clair, ce qui permet d'identifier un réseau de voûtes. Une telle voûte, constituée par une chaîne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

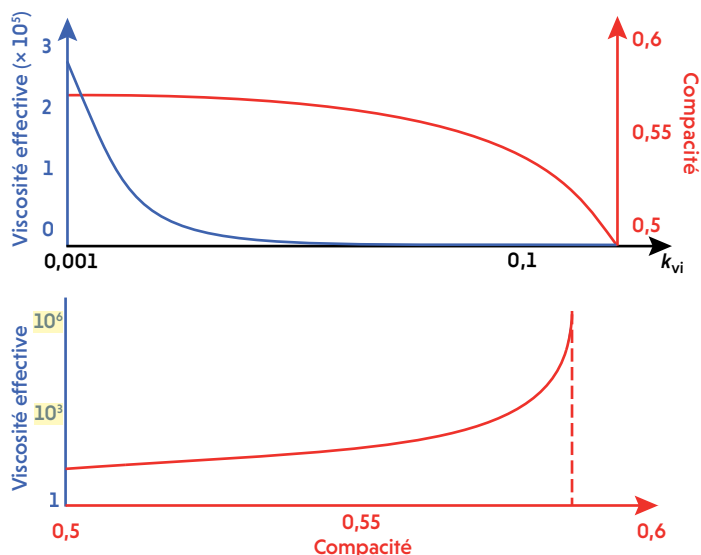
réduit les encombrements entre les particules. En effet, les forces de viscosité exercées sur les grains tendent à les séparer et s'opposent à la pression de confinement, qui les rapproche. Le rapport entre le produit de la viscosité du fluide pur par le taux de cisaillement, d'une part, et la pression, 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



Principe de l'étude expérimentale du cisaillement d'un milieu granulaire immergé dans un liquide. Le milieu est confiné entre deux plaques, la supérieure étant poreuse pour que le liquide soit libre de circuler. On déplace à une vitesse V la paroi supérieure, qui exerce une pression P sur la suspension. Ici, le niveau de couleur rouge est proportionnel à la vitesse des grains. À l'échelle microscopique (cartouche), chaque grain subit des forces de contact (flèches noires) de la part des grains qui le touchent, ainsi qu'une force résultante exercée par le fluide (flèche blanche).



Ces courbes, obtenues par simulations numériques, montrent comment la viscosité effective d'une suspension de grains, rapportée à celle du fluide pur, et sa compacité varient avec le nombre visco-inertiel k_{vi} (des valeurs élevées de k_{vi} correspondent à des écoulements rapides) pour des fortes densités de grains. La viscosité effective augmente rapidement lorsque k_{vi} diminue et tend vers zéro, alors que la compacité atteint une valeur limite (58 % pour des grains sphériques de même taille). En combinant les deux effets, on voit que la viscosité effective relative à celle du fluide augmente avec la compacité.

effective de la suspension est faible. C'est pourquoi il est plus facile de rincer un plat qui a contenu des gros grains (par exemple du riz ou des lentilles) plutôt que des petits grains (par exemple de la farine)...

Des simulations numériques, réalisées il y a environ deux ans par nos équipes à Montpellier en collaboration avec l'IRSN (Institut de radio-protection et de sûreté nucléaire), montrent que lorsque la vitesse d'écoulement de la suspension est suffisamment élevée, sa viscosité effective ne dépend plus uniquement du nombre visqueux. L'agitation accrue des grains conduit à une augmentation du nombre de collisions, donc à une diminution de la compacité. Dans le même temps, la viscosité effective de la suspension diminue.

L'effet des collisions des grains sur une surface se traduit par une pression (dont on montre qu'elle est proportionnelle au rapport entre l'énergie cinétique des grains et leur volume). Ce phénomène est assez comparable à l'effet des molécules dans un gaz dont les chocs erratiques, dus à l'agitation thermique, sont à l'origine de la pression. Mais dans le cas des grains, pour lesquels ce mouvement spontané est négligeable, c'est l'écoulement des grains qui est à l'origine des collisions et, partant, de l'effet de pression.

On peut décrire les écoulements rapides de grains secs à l'aide d'une autre quantité sans dimension, le « nombre inertiel », introduit en 2004 dans un article publié par GdR

MiDi, un groupement de recherche du CNRS sur les « milieux divisés ». Traduisant le rapport entre la pression due aux collisions des grains et la pression de confinement, ce nombre est petit lorsque cette pression est élevée et grand pour des écoulements rapides. Il caractérise l'écoulement dans des situations expérimentales variées.

Et dans le cas où les grains ne sont pas secs, mais baignent dans un liquide ? Nos simulations numériques, qui combinent la dynamique des fluides avec celle des grains, ont montré que les paramètres mesurables de la suspension (concentration en grains et viscosité effective) dépendent d'un seul nombre rassemblant les effets de la viscosité et ceux des collisions : le « nombre visco-inertiel », que l'on notera ici k_{vi} et qui remplace à la fois le nombre visqueux et le nombre inertiel (voir les graphiques ci-dessus).

Cette loi des suspensions rend compte, dans un cadre unifié, des effets de la vitesse d'écoulement des grains, de la viscosité du fluide et de la pression de confinement. Elle s'applique à de nombreuses situations concrètes d'écoulements des grains en présence d'un fluide, et ce même lorsque ces écoulements ne sont pas permanents.

Jusqu'ici, nous avons fait comme si les écoulements de grains étaient permanents. C'est insuffisant car, par exemple, il est essentiel de pouvoir anticiper le déclenchement d'un glissement de terrain sur un sol incliné après de fortes pluies.