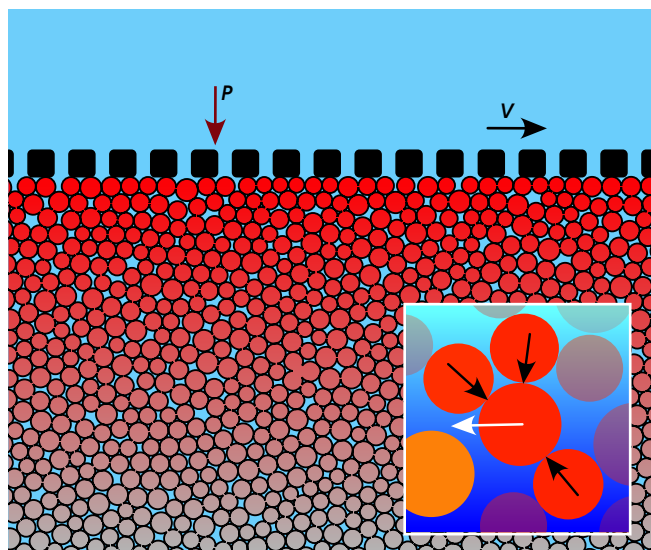
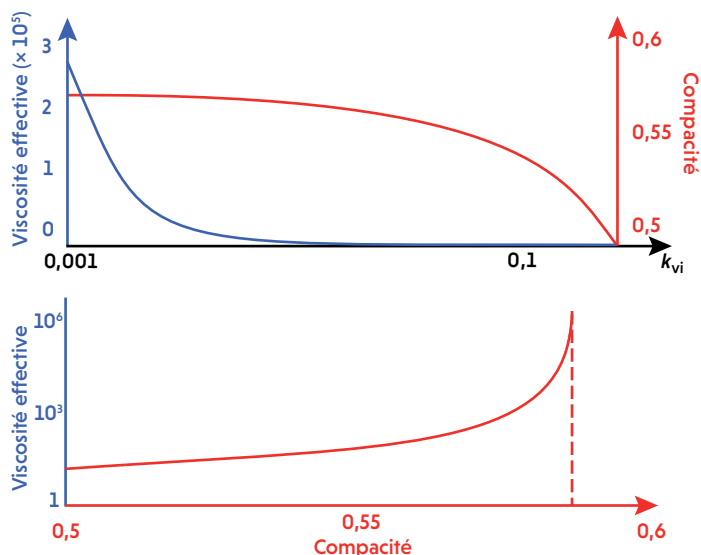




Principe de l'étude expérimentale du cisaillement d'un milieu granulaire immergé dans un liquide. Le milieu est confiné entre deux plaques, la supérieure étant poreuse pour que le liquide soit libre de circuler. On déplace à une vitesse V la paroi supérieure, qui exerce une pression P sur la suspension. 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 radioprotection 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.

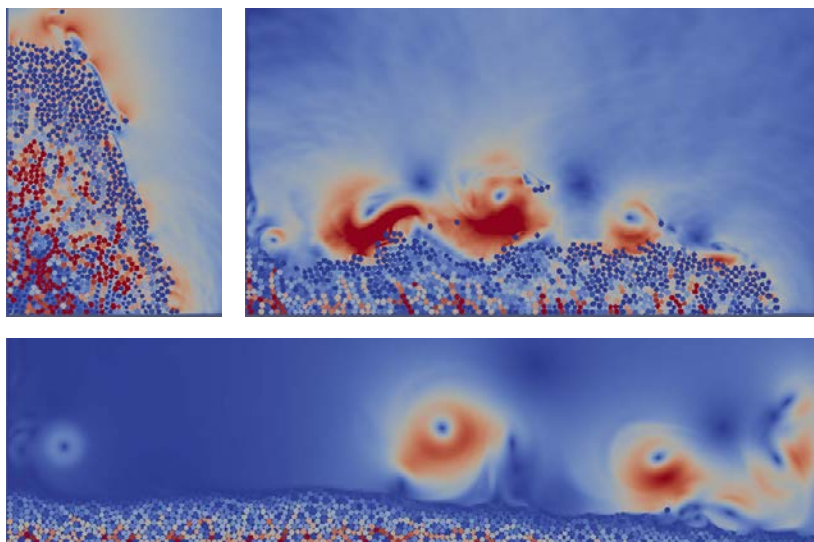
On peut décrire les écoulements rapides de grains secs à l'aide d'une autre quantité sans dimension, le « nombre inertiel », introduit en 2004 dans un article publié par GdR

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.

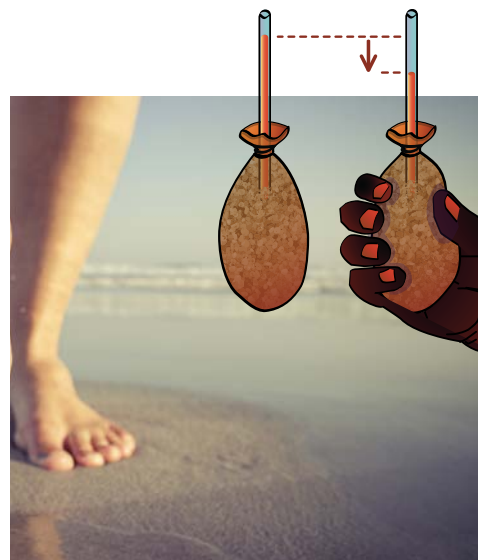
Et dans le cas où les grains ne sont pas secs, mais baignent dans un liquide ? Nos simulations numériques, qui combinent la dynamique des fluides avec celle des grains, ont montré que les paramètres mesurables de la suspension (concentration en grains et viscosité effective) dépendent d'un seul nombre 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.



Ces images d'une simulation numérique réalisée en 2012 par des chercheurs de l'université de Montpellier montrent trois instants d'une avalanche de grains sous l'eau. Dans le fluide, la vitesse est croissante du bleu au rouge; la pression subie par les grains est également représentée du bleu au rouge. On voit notamment qu'en raison de la présence du liquide, le talus s'étale sur de longues distances.



Le sable mouillé et tassé gonfle et s'assèche dès que l'on marche dessus : c'est le phénomène de dilatance, que l'on peut mettre en évidence en remplissant de sable et d'eau un ballon de baudruche surmonté d'un tube de verre. Si le sable est bien tassé initialement, une pression sur le ballon provoque un desserrement de la structure des grains : de l'eau s'engouffre dans le ballon et le niveau d'eau baisse, contrairement à ce que l'on attendrait *a priori*.

> Une expérience à la portée de chacun illustre le caractère transitoire du comportement d'un milieu granulaire imbibé d'eau. En marchant à marée basse sur une plage, vous pouvez mettre en évidence le rôle de l'eau présente dans le sable, que le va-et-vient des vagues l'ait tassé. Lorsque vous posez un pied sur ce sable humide, il se forme dans un premier temps une zone sèche autour, tandis que le dessous de votre pied se mouille (*voir la photographie ci-dessus, à droite*).

QUAND LA PRESSION DU PIED DILATE LE SABLE

C'est peut-être une telle observation qui a conduit en 1885 le scientifique irlandais Osborne Reynolds au concept de «dilatance», qu'une expérience simple permet de comprendre (*voir le dessin ci-dessus, à droite*). Remplissez un ballon gonflable de sable mouillé sans le tasser; attachez-y rigidement un tube de verre verticalement pour avoir un niveau de l'eau en excès. Pressez le ballon: le sable se tasse et de l'eau est poussée dans le tube, dont le niveau d'eau s'élève.

Si, au contraire, vous avez initialement bien tassé le sable mouillé, le niveau d'eau commence par baisser lorsque vous pressez le ballon. Pourquoi? Le sable ayant été tassé, sa compacité avait atteint sa valeur maximale; la déformation du sable n'a donc pu que réduire sa compacité, et l'eau est venue remplir les volumes libres qui se sont ainsi créés.

Cet effet de dilatance peut conduire à des phénomènes d'écoulement transitoire dans lesquels le matériau granulaire change de viscosité. C'est ce qui s'est produit en 1692 pour

le sable sur lequel la ville de Port-Royal était construite et qui a conduit à une catastrophe.

Un tel phénomène de liquéfaction se manifeste lors du passage d'une onde sismique à travers des sols fins, peu compacts et saturés d'eau. Pendant la brève durée de la secousse, les forces de contact entre les grains sont rompues et ceux-ci, libérés, sont mis en suspension. La charge des bâtiments sur le sol n'est alors plus supportée par les voûtes formées grâce aux chaînes de forces de contact. Cette charge se transmet alors à la suspension qui, comme une éponge, se densifie progressivement en expulsant de l'eau jusqu'à retrouver de nouvelles chaînes de forces qui soutiendront l'édifice. Au cours de ce phénomène transitoire qui dépend de la perméabilité du sol, le sol a perdu sa portance: des constructions massives peuvent s'enliser brutalement, parfois de plusieurs mètres, comme de lourdes pierres jetées dans la boue.



Par effet de dilatance, un sol peut changer de viscosité et ne plus supporter sa charge

