



« TEMPS IMPARTI-ÉCLIPSES »

Ce sablier monumental de l'artiste Jean-Bernard Métais fait s'écouler le sable par un ensemble d'ouvertures programmées. Présenté pour l'an 2000 au jardin des Plantes, à Paris, il est installé de façon permanente au Mans. Comme dans tout sablier, le sable s'y écoule comme un liquide, mais, contrairement à l'eau dans une clepsydre, son débit est constant. Autre différence avec un liquide : le matériau granulaire s'accumule en formant un cône.

et ne contribue pas à pousser les grains se trouvant près de l'orifice. Ainsi, globalement, la pression à ce niveau ne varie pas avec la hauteur de la colonne de sable, d'où le débit constant.

Une loi classique, dite de Hagen-Beverloo, découverte par l'Allemand Gotthilf Hagen en 1852 et précisée en 1961 par le Hollandais Wim Beverloo et ses collègues, rend compte de la façon dont le débit moyen du sablier (ou d'un silo) dépend de la taille de l'orifice reliant les deux compartiments, débit qui finit toujours par s'annuler pour des tailles d'orifice inférieures à six diamètres de grains.

En fait, ces écoulements sont irréguliers. Au-dessous d'une voûte, les grains se séparent et coulent comme un fluide, en se heurtant au cours de leur chute libre. Mais au-dessus, les grains restent bloqués tant que la voûte se maintient. L'écoulement est donc intermittent.

Une situation redoutée se produit lorsqu'une brèche s'ouvre accidentellement dans une structure où des grains sont confinés. Dans les réacteurs nucléaires, par exemple, le combustible nucléaire se présente sous la forme de grains stockés sous pression dans des gaines métalliques. Il est important d'évaluer la quantité de matière radioactive éjectée si la gaine se rompt. Des problèmes similaires se posent dans des applications où un fluide transporte des grains, comme dans un inhalateur de poudres médicamenteuses : dans ce cas, au contraire, on cherche à faciliter l'écoulement de la suspension de grains et à éviter les blocages.

Dans ces écoulements, quelle est l'influence du fluide (par exemple l'air dans le cas du sablier) où les grains sont immergés ? D'un côté, par sa viscosité, le fluide freine l'écoulement des grains. D'un autre côté, il a un effet lubrificateur qui rend plus difficile la formation d'arches. Ces dernières années, nos équipes du CNRS et de l'Inra à Montpellier ont effectué des simulations numériques afin d'évaluer ces contributions relatives. Ces études rendent compte d'expériences que l'équipe de Daniel Bideau, à l'université de Rennes, avait réalisées en 1995 pour déterminer l'effet de l'air sur l'écoulement dans le sablier.

FLUX D'AIR DANS LE SABLIER

Ces simulations et ces expériences ont montré qu'il se produit le scénario suivant. Dans le compartiment inférieur du sablier, la chute de grains augmente la pression de l'air par rapport à celle du compartiment supérieur ; cette surpression a alors pour effet de bloquer l'écoulement, jusqu'à ce que, sous l'effet du flux de l'air à travers les espaces entre grains, les deux pressions s'égalisent de nouveau. L'écoulement reprend alors, et ainsi de suite. Autrement dit, le sablier fait en quelque sorte tic-tac... comme une pendule ! La succession de phases d'écoulement est semblable aux glouglous d'une bouteille que l'on vide. La durée moyenne entre deux blocages successifs dépend de la viscosité de la suspension et de la taille de l'orifice.

Penchons-nous de plus près sur ce paramètre de viscosité. Une suspension de grains >

➤ 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.

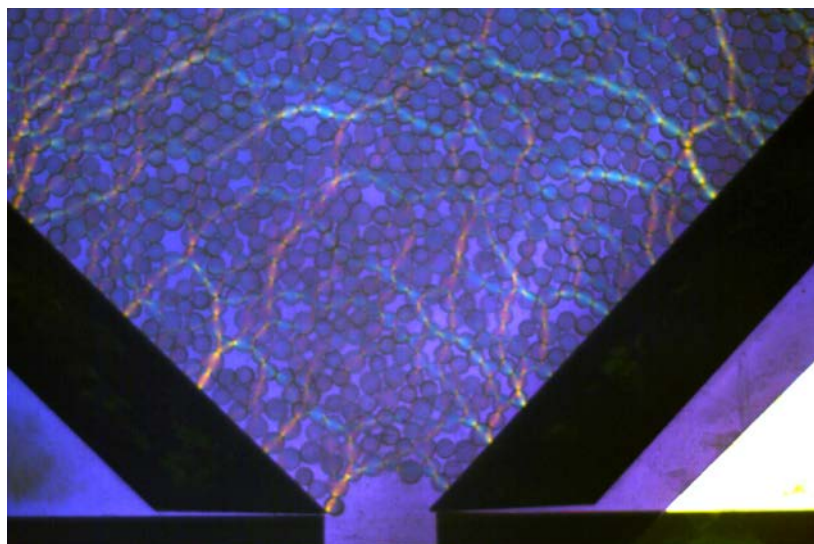
Dans l'exemple du sablier, lorsqu'une suspension très concentrée se bloque et que la vitesse de l'écoulement s'annule, tout se passe comme si la suspension était un liquide infiniment visqueux. Si, en revanche, les parois du sablier s'écartaient un peu en laissant le volume de l'ensemble s'ajuster, la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