

Sablier inversé

PIERRE ÉVESQUE

L'étrange comportement du sable quand on fait vibrer un sablier où les grains montent, au lieu de descendre.

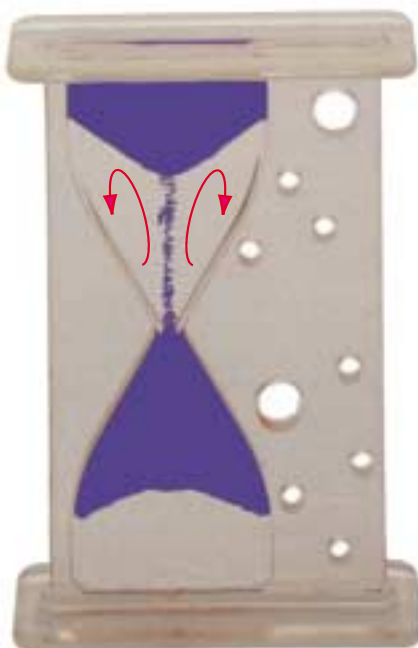
Étrange sablier ! L'écoulement du temps y est mesuré, non par la descente de grains de sable, mais par la montée de billes qui flottent dans un liquide. En avril 1995, nous en avons analysé le fonctionnement et avons vu que la chambre supérieure est le siège de deux circulations en sens opposés, engendrées par le déplacement du liquide, quand des billes remontent au centre de la chambre. Cet effet est semblable à celui qu'avait observé le médecin britannique M. Boycott, dans du sang coagulé qui sédimentait : les caillots qui descendent dans un tube vertical sont ralentis par le fluide qu'ils déplacent, mais la descente est facilitée quand le tube est incliné, parce que les caillots s'écoulent près de la face inférieure du tube, sans être gênés par le fluide qui remonte, au-dessus d'eux.

Nous avons également observé que, dans cette même chambre supérieure, la remontée des particules est plus lente près des parois verticales qu'au centre, et nous avons conclu que ce phénomène était dû à la viscosité du liquide environnant. Enfin nous avons remarqué l'existence d'une cheminée, dans la partie inférieure occupée par les billes : cette cheminée alimente en liquide la partie inférieure de la chambre inférieure, à mesure que les billes quittent cette dernière ; elle ressemble (en sens inverse) à la cheminée d'un volcan provoquée par l'expulsion des laves.

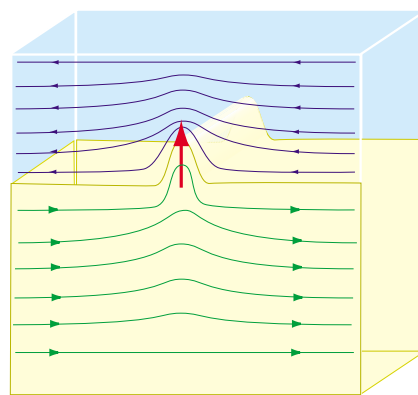
Je vous propose de reprendre le même sablier afin d'explorer d'autres effets hydrodynamiques. Nous nous limiterons à ceux qu'induisent des vibrations sur la forme de l'interface entre un liquide et un milieu granulaire (tas de sable ou tas de billes). Nous verrons que ces effets peuvent aussi être obtenus à l'interface de deux liquides.

Ces expériences permettent d'illustrer le comportement fluide d'un milieu granulaire. Nous verrons que, dans les cas examinés, les forces de frottement (forces visqueuses ou forces de frottement solide entre grains) sont négligeables et que les comportements

observés résultent des effets d'inertie dans les fluides incompressibles. Toutefois, avant d'examiner cette expérience avec le sablier inversé, nous examinerons une expérience similaire, dans une cellule de géométrie plus simple.



1. Circulation du liquide sous l'action de la montée des billes, dans un sablier inversé.



2. Une protubérance du milieu granulaire (en jaune) s'allonge dans le liquide qui surmonte ce milieu, parce que la vitesse augmente dans le liquide au passage de la protubérance : de ce fait, la pression diminue...

UNE EXPÉRIENCE DE VIBRATION

À l'aide de plaques de plexiglas, construisons une cellule rectangulaire, transparente, d'un centimètre d'épaisseur et de hauteur bien supérieure à l'épaisseur. Fixons cette cellule contre le cône d'un haut-parleur puissant, relié à un amplificateur où nous injectons l'enregistrement d'un *la* de diapason, le volume étant réglé au maximum (voir la figure 3). Ainsi nous pouvons faire vibrer la cellule horizontalement.

Remplissons à moitié la cellule de sable, complétons le remplissage avec de l'eau, et fermons hermétiquement sans laisser d'air. Lorsque la cellule est au repos, la pesanteur fait sédimer les particules. La surface du tas de sable dans l'eau peut être horizontale ou inclinée, mais l'inclinaison ne peut être supérieure à un angle nommé angle de talus : la stabilité du sable dans une configuration inclinée résulte de l'existence d'un frottement solide entre les grains de sable ; en raison de ces forces de frottement, les grains des couches supérieures ne roulent pas sur les grains inférieurs.

Faisons alors vibrer la cellule horizontalement avec une amplitude a et une fréquence f fixes. Une telle vibration correspond à une accélération qui dépend du temps : aussi, dans la cellule, les particules sont soumises à une gravité effective qui est la somme de cette accélération et de l'accélération de la pesanteur. Cette accélération résultante oscille périodiquement autour de la verticale d'un angle β donné par $\tan \beta = 4\pi^2 a f^2 / g$.

Lorsque les amplitudes de vibration sont limitées, la gamme des inclinaisons possibles de la surface libre du sable diminue d'autant plus que les variations d'accélération imposées par la vibration sont importantes : toutes les pentes supérieures à $\phi - \beta$ sont déstabilisées. Ainsi, si l'angle β est inférieur à l'angle de talus ϕ , la surface libre reste stable dans une gamme d'inclinaisons, qui diminue quand l'amplitude de vibration croît. Puis, lorsque l'angle β devient supérieur à l'angle de talus ϕ , aucune surface libre n'est plus en équilibre, et l'on observe un va et vient rapide du sable, qui oscille autour d'une position d'équilibre : le sable se « liquéfie ». Un stroboscope nous montrera que le détail de la surface libre moyenne horizontale, créée par la vibration, a des caractéristiques insoupçonnées.

Avant de construire le stroboscope qui montrera les phénomènes invisibles à l'œil nu, remarquons que l'observation de la surface du sable redevient facile si l'on vibre encore plus fort la cellule : cette surface est ridée avec des rides perpendicu-

lares à l'axe de vibration, la distance entre rides est supérieure à l'amplitude de vibration et la hauteur des rides est environ égale à la distance entre les rides. En modifiant l'amplitude ou la fréquence de vibration, on constate que la hauteur des rides dépend de l'amplitude et de la fréquence de vibration. Enfin les rides forment un relief stationnaire, dont la hauteur n'oscille pas au cours du temps.

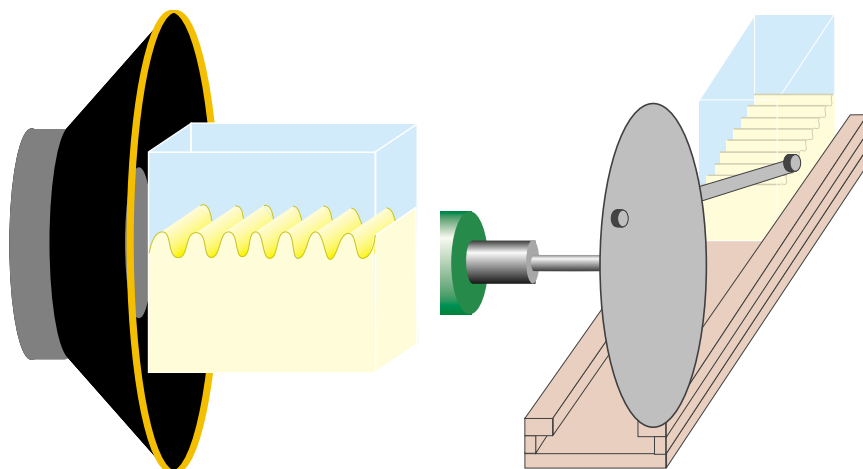
UN RELIEF STATIONNAIRE À LA SURFACE DU SABLE

Quand on réduit l'amplitude de vibration, l'aide du stroboscope devient essentielle, car le relief est complètement brouillé par le mouvement de la cellule. Pour construire le stroboscope, je vous conseille d'utiliser une perceuse à variateur de vitesse qui fera tourner un disque cranté (faites une dizaine de trous dans le disque pour augmenter la fréquence d'éclairement) devant une source intense de lumière. Vous continuerez de voir le profil stationnaire lorsque les distances entre rides sont inférieures à l'amplitude de vibration. Ainsi, quelle que soit l'amplitude de vibration, un relief stationnaire se crée !

Ceux qui voudront se lancer dans de la physique plus quantitative pourront déterminer les variations de la distance entre rides en fonction de l'amplitude et de la fréquence de la vibration : ils trouveront que le paramètre qui détermine les structures est $2\pi af$, et ils pourront vérifier expérimentalement que le résultat ne change pas si l'on change la taille des grains.

Le phénomène aurait-il encore lieu si les grains étaient de taille nulle ? Ce cas est celui de deux liquides non miscibles : dans les conditions de l'expérience précédente, on trouve que les rides n'apparaissent pas pour des vibrations trop faibles, mais qu'il existe un seuil au-delà duquel les rides apparaissent ; ce seuil correspond à des rides de longueur d'onde assez grande, observables à l'œil nu. L'absence de rides aux petites longueurs d'onde s'explique par l'existence de forces capillaires, à la surface des deux liquides : celles-ci empêchent l'existence de rides de petite longueur d'onde, qui correspond à un plissement trop important de l'interface (ces forces n'agissent pas dans le cas du sable plongé dans l'eau, car l'eau est partout présente). De surcroît, l'observation des rides pour des grains de taille nulle (pas de grains) montre que l'on doit chercher le moteur de la formation des rides dans le comportement liquide du milieu granulaire.

Pour comprendre la formation des rides, examinons les forces et les phé-



3. Deux façons de faire vibrer une cellule : à l'aide d'un haut-parleur ou d'une perceuse reliée à la cellule par une bielle. Ces vibrations engendrent des rides à l'interface du sable et de l'eau

nomènes importants dans les expériences précédentes. Le physicien américain Richard Feynman avait introduit les notions d'eau sèche et d'eau mouillée, pour distinguer respectivement les cas où les effets d'inertie sont les seuls à prendre en compte et ceux où la viscosité du fluide est notable.

UN LIQUIDE SEC

Un liquide sans aucune viscosité pourrait s'écouler contre une paroi sans exercer aucune force tangentielle sur cette dernière : au contact d'une paroi, la vitesse du liquide serait différente de la vitesse de la paroi. En revanche, un liquide visqueux se déplace à la même vitesse que les solides qu'il baigne : il mouille les parois. Loin de ces dernières, le liquide peut être soumis à des effets d'inertie qui l'obligent à bouger à une vitesse différente de celle de la paroi. L'eau réelle a les deux types de comportement : l'eau au contact d'une paroi a la même vitesse qu'elle, mais l'eau loin de la paroi peut avoir une vitesse différente si on exerce des forces qui la mettent en mouvement.

Que se passe-t-il si l'on impose à une plaque plane, mince, infinie, immergée dans l'eau, un mouvement vibratoire parallèle à son plan ? L'eau se comporte-t-elle comme de l'eau sèche, qui reste immobile, ou comme de l'eau visqueuse, entraînée par la vibration ? Le physicien irlandais George Stokes étudia théoriquement ce mouvement en postulant que l'eau était visqueuse. Il montra notam-

ment que le mouvement était essentiellement localisé sur une épaisseur nommée épaisseur de la couche visqueuse, et que l'amplitude de ce mouvement décroît exponentiellement avec la distance à la plaque. Par exemple, pour les fréquences de dix hertz dans l'eau, l'épaisseur de la couche visqueuse est de l'ordre de 0,5 millimètre.

Dans le cas qui nous intéresse, l'épaisseur de la couche visqueuse est inférieure à toutes les dimensions de la cellule, mais supérieure à la taille des pores entre les grains de sable. Aussi la viscosité des deux milieux peut être négligée, et ces derniers ne sont soumis qu'aux effets inertiels ; en revanche, les pores entre les grains ne sont pas suffisamment gros pour que le liquide interstitiel s'y meuve librement. Aussi l'eau interstitielle est piégée entre les grains et se meut à la vitesse du milieu granulaire. L'ensemble des grains et de l'eau interstitielle forme une phase unique, que nous nommerons phase granulaire.

LES DEUX PHASES

Cette observation explique pourquoi les phénomènes qui s'observent dans une cellule contenant du sable et de l'eau se retrouvent dans une cellule contenant deux liquides non miscibles. De surcroît, l'analyse précédente nous permet de négliger l'effet de la viscosité sur la dynamique de chacune des phases et de considérer que la mécanique y est régie par l'inertie. Dans ce cas, les deux milieux sont soumis à une gravité effective qui varie périodiquement en amplitude et en direction. Le milieu le plus dense tend à se mouvoir dans la direction de la gravité effective, et pousse le milieu le moins dense en sens inverse (le milieu le plus dense est le plus inerte). Cela

Pour se procurer le sablier utilisé dans les expériences décrites par P. Évesque, voir la page 92.