IDÉES DE PHYSIQUE

Des fluides sens dessus dessous

Pourquoi un verre d'eau tenu à l'envers se vide-t-il, en dépit de l'opposition de la pression atmosphérique ? Parce qu'un liquide dense reposant sur un fluide plus léger constitue un système en équilibre instable.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Une boisson contenue dans une paille verticale dont l'extrémité supérieure est bouchée ne s'écoule pas. Il est en revanche impossible de conserver cette même boisson dans un verre renversé et vertical. Pourquoi ? La réponse réside dans l'« instabilité de Rayleigh-Taylor », qui perturbe l'interface de deux fluides lorsque le fluide du dessus est plus dense que le fluide du dessous. Cette instabilité est visible autour de nous dans les bouteilles percées, les verres retournés, les « lampes à lave » ou les magnifiques marbrures des « peintures accidentelles » de l'artiste mexicain (et politiquement très engagé) David Alfaro Siqueiros (1896-1974).

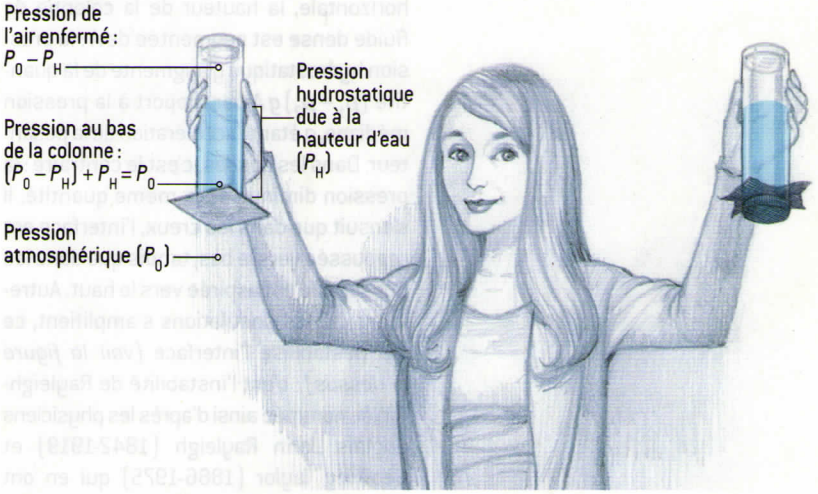
Verre retourné, chute d'eau assurée

Commençons par une expérience. Versons de l'eau dans un verre sans le remplir entièrement, recouvrons l'ouverture d'une feuille de papier cartonné et retournons l'ensemble, tête en bas, en maintenant le papier cartonné pour que l'eau ne s'écoule pas. Lorsque la feuille de carton est à nouveau à l'horizontale, lâchons-la. Au lieu de tomber, celle-ci reste comme collée au verre et le contenu liquide ne s'écoule pas *(voir la figure ci-contre)*. Comment l'expliquer ?

Tout est affaire de pression. Initialement, l'air qui surmonte l'eau dans le verre est à la pression atmosphérique. La pression au fond du verre est donc égale à cette pression additionnée de la pression hydrostatique correspondant à la hauteur de la colonne d'eau. Supposons que celle-ci soit d'environ 5 centimètres. La pression hydrostatique vaut alors 0,5 % de la pression atmosphérique (dans l'eau, la pression augmente de 1 atmosphère quand on s'enfonce de 10 mètres).

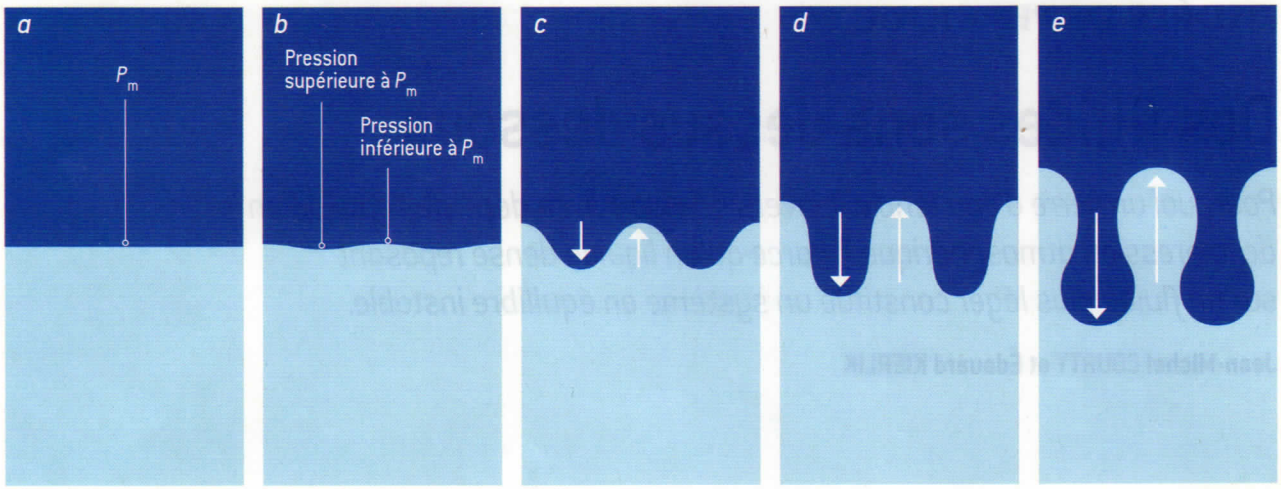
Lorsque le verre est renversé et qu'on lâche la feuille, la pression s'exerçant sur cette dernière dépasse donc légèrement la pression atmosphérique. L'ensemble eau-feuille se met alors à chuter en bloc. Ce faisant, le volume d'air dans le verre augmente, sa pression diminue et lorsque celle-ci a diminué de 0,5 %, la pression au niveau de la feuille devient égale à la pression atmosphérique : la chute cesse. Si la hauteur d'air au-dessus de l'eau est de 1 centimètre, on calcule facilement que l'ensemble eau-feuille descend de un vingtième de millimètre : une chute imperceptible.

Que se passe-t-il maintenant si nous enlevons rapidement le papier cartonné en le tirant horizontalement ? Tout ce que nous avons dit précédemment laisserait penser que l'eau peut rester dans le verre : comme, à la suite de la minichute, la pression à l'interface air-eau est la même dans l'air et dans



Dessins de Bruno Vacaro

LE CONTENU LIQUIDE D'UN VERRE RENVERSÉ et dont l'ouverture est recouverte par une feuille cartonnée *(à gauche)* ou par de la gaze ou un grillage fin *(à droite)* ne se déverse pas. En revanche, si l'on retire la feuille cartonnée ou la gaze, malgré l'équilibre initial des pressions, l'interface liquide-air se déstabilise très rapidement et le liquide tombe.



L'INSTABILITÉ DE RAYLEIGH-TAYLOR porte sur l'interface de deux fluides de densités différentes, le fluide le plus dense *(en bleu foncé)* étant posé au-dessus de l'autre *(en bleu clair)*. Même si, initialement, l'interface est parfaitement plane et horizontale *(a)*, de minuscules fluctuations sont inévitables *(b)*. Là où il y a un creux, la pression du fluide du dessus est supérieure à la pression médiane P_m, de sorte que le creux s'amplifie ; de la même façon, la pression dans les bosses étant inférieure à la pression médiane, les bosses grossissent *(c)*. L'interface se déstabilise et les deux fluides s'interpénètrent *(d, e)*.

l'eau en tout point de la surface, l'équilibre mécanique semble en effet assuré. Pourtant, l'expérience nous montre que cet équilibre est instable : l'eau se déverse ! En revanche, si l'on effectue l'expérience en remplaçant la feuille cartonnée par un grillage fin, un tissu ou une gaze tendue, l'équilibre persiste.

Pour le comprendre, imaginons que l'interface horizontale entre deux fluides soit déformée par de très légères ondulations, d'amplitude $+A$ ou $-A$ par rapport à un niveau médian. Le fluide le plus dense (l'eau par exemple), de densité ρ_1, surmonte le second fluide (l'air par exemple) de densité ρ_2 (avec $\rho_1 > \rho_2$).

Dans les creux par rapport à la médiane horizontale, la hauteur de la colonne de fluide dense est augmentée de A : la pression hydrostatique y augmente de la quantité $(\rho_1 - \rho_2)\, g\, A$ par rapport à la pression médiane, g étant l'accélération de la pesanteur. Dans les bosses, c'est le contraire : la pression diminue de la même quantité. Il s'ensuit que dans les creux, l'interface est repoussée vers le bas, tandis que dans les bosses elle est aspirée vers le haut. Autrement dit, les ondulations s'amplifient, ce qui déstabilise l'interface *(voir la figure ci-dessus)* : c'est l'instabilité de Rayleigh-Taylor, nommée ainsi d'après les physiciens anglais John Rayleigh (1842-1919) et Geoffrey Taylor (1886-1975) qui en ont déterminé les caractéristiques.

Comment se fait-il que, dans l'expérience utilisant un grillage fin pour contenir l'eau du verre, l'interface air-eau reste stable ? On a ici un mécanisme stabilisateur : la tension de surface, qui s'oppose à toute augmentation de l'aire d'une interface. Lorsque la surface n'est pas plane, cette tension superficielle engendre des surpressions dans les parties concaves par rapport aux parties convexes, ce qui favorise les déplacements de fluide susceptibles d'aplanir l'interface (c'est comme si l'interface était une surface élastique).

La tension de surface, un facteur stabilisant

Ces surpressions ne contrebalancent les effets de pression hydrostatique que si la taille caractéristique de l'ondulation ou de la perturbation de l'interface est inférieure à la longueur dite capillaire. Dans le cas de l'interface air-eau, cette dernière vaut de l'ordre de 3 millimètres. En pratique, cela signifie que si un orifice a un diamètre inférieur à cette longueur, la tension de surface domine et l'interface est stable, tandis que si l'orifice a un diamètre supérieur, la gravité l'emporte, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se développe et l'interface est instable.

Accessoirement, c'est aussi la tension de surface qui évite que l'eau ne s'écoule à travers le petit interstice formé entre la feuille cartonnée et le rebord du verre lors de notre première expérience.

Une fois l'instabilité déclenchée, la suite des événements dépend de nombreux paramètres, dont notamment la viscosité

Retrouvez la rubrique Idées de physique sur www.pourlascience.fr

© Pour la Science - n° 467 - Septembre 2016

des fluides et leur tension interfaciale. La pénétration d'un fluide dans l'autre peut se faire sous la forme de « doigts » qui s'élèvent pour l'un, plongent pour l'autre. Éventuellement, ces doigts se transforment en panaches ressemblant à des champignons, ou se détachent et forment des bulles.

C'est ce que l'on observe dans les lampes à lave, qui étaient à la mode dans les années 1970. Dans un tel objet à température ambiante, un mélange d'huiles minérales, de paraffine et de tétrachlorure de carbone est surmonté d'eau. Le tout se trouve au-dessus d'une lampe. Quand la lampe est éteinte, l'interface des deux fluides est parfaitement horizontale.

Lorsqu'on allume la lampe, l'échauffement dilate plus fortement le fluide du dessous. Il devient alors moins dense, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se déclenche et le fluide s'élève lentement, sous la forme de grosses bulles mues par la poussée d'Archimède. Arrivé dans le haut de la lampe, le fluide se refroidit, gagne en densité et retombe jusqu'en bas, puis le cycle recommence.

Les œuvres de David Alfaro Siqueiros offrent un autre exemple où l'instabilité de Rayleigh-Taylor joue un rôle capital. L'artiste mexicain a inventé en 1936 une technique qu'il appela « peinture accidentelle ».

Sur une toile horizontale, on verse une première peinture, qu'on laisse s'étaler progressivement jusqu'à une épaisseur de 1 à 2 millimètres. Puis, sur cette première couche, on en verse une seconde, de teinte différente et, surtout, un peu plus dense. Cette dernière commence par recouvrir la première couche, mais, au bout de quelques dizaines de secondes, sous l'effet de l'instabilité de Rayleigh-Taylor, on voit la première couleur réapparaître en formant des motifs aléatoires qui grossissent puis se figent lorsque la peinture sèche *(voir la figure ci-contre)*.

L'analyse et les mesures des physiciens ont confirmé les tailles caractéristiques de ces motifs, qui dépendent notamment des densités des fluides et de leur tension de surface – mais ces études n'élucident évidemment pas la puissance esthétique des œuvres telles que *Collective suicide* ou *Birth of fascism*. ■

LES « PEINTURES ACCIDENTELLES » de l'artiste mexicain David Alfaro Siqueiros étaient réalisées en déposant, sur une première couche de peinture, une seconde couche d'une peinture de teinte différente et de densité un peu supérieure. Au bout de quelques instants, l'instabilité de Rayleigh-Taylor se développe : la peinture de la couche inférieure remonte par endroits en dessinant des taches dans la couche du dessus, et ces motifs se figent à mesure que la peinture sèche.

LES AUTEURS

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris. Leur blog : www.scilogs.fr/idees-de-physique

BIBLIOGRAPHIE

S. Zetina *et al.*, A hydrodynamic instability is used to create aesthetically appealing patterns in painting, *PLoS One*, vol. 10(5), e0126135, 2015 (http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0126135).

D. H. Sharp, An overview of Rayleigh-Taylor instability, *Physica D*, vol. 12, pp.3-18, 1984.