

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

LES PETITS BATEAUX DE MARANGONI

Si la surface d'un liquide présente des différences de composition chimique ou de température, des écoulements peuvent y apparaître – par l'effet Marangoni.

Pour échapper à leurs prédateurs, les *Microvelia*, petites punaises de taille millimétrique qui marchent à la surface de l'eau, sont capables d'accélérer quasi instantanément pour atteindre une vitesse de près de 20 centimètres par seconde. Et cette propulsion n'est pas due à leurs pattes, mais à un phénomène physicochimique, l'« effet Marangoni ». Étudié vers 1865 par le physicien italien Carlo Marangoni, cet effet est aussi à l'origine des « larmes » observées dans un verre de vin ou de boisson suffisamment alcoolisée.

Le bateau à savon, expérience bien connue des écoliers, est une autre illustration flagrante de la propulsion par effet Marangoni. Découpons, dans un morceau de carton plastifié (donc non perméable), la forme grossière d'un bateau avec une proue pointue et une poupe dans laquelle nous pratiquons une échancrure (voir l'illustration et l'encadré ci-contre). Posons cet objet sur l'eau calme d'une cuvette ou d'une baignoire, puis versons avec un cure-dent ou une pipette une goutte de savon liquide dans l'échancrure: le bateau se

met à avancer et poursuit son voyage durant plusieurs secondes!

Pour comprendre ce qui se passe, il faut considérer la tension superficielle de l'eau. À cause des forces intermoléculaires qui assurent la cohésion de l'eau liquide, la surface de l'eau se comporte comme une sorte de trampoline: tout se passe comme si elle constituait un film élastique, extensible et tendu.

ACTEUR PRINCIPAL: LA TENSION SUPERFICIELLE

Lorsqu'un objet est posé sur l'eau, ce film exerce sur lui une force tout le long de la ligne de contact entre l'objet et la surface. Habituellement, le liquide est homogène et alors la somme des forces exercées tout le long du contour s'annule dans le plan horizontal: l'objet reste immobile s'il l'était initialement.

Tout change lorsque l'on dépose localement une goutte de savon. Le savon contient des molécules dites « tensioactives », qui ont une « tête » hydrophile et une « queue » hydrophobe: la tête tend à être au contact de l'eau, la queue tend à s'en écarter. Déposée sur l'eau, la goutte de savon s'étale et forme à la surface une

L'effet Marangoni est responsable des larmes de vin et de la propulsion d'un petit bateau en carton à l'arrière duquel on dépose du savon liquide.

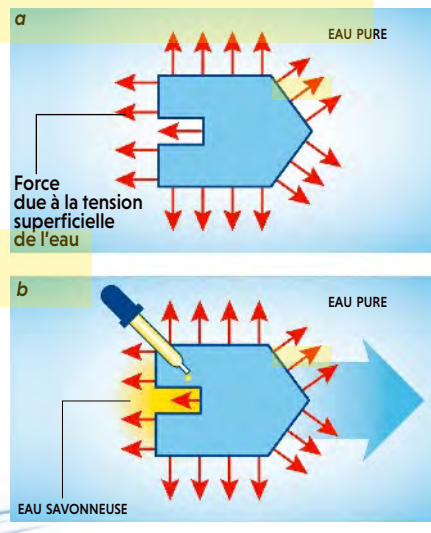
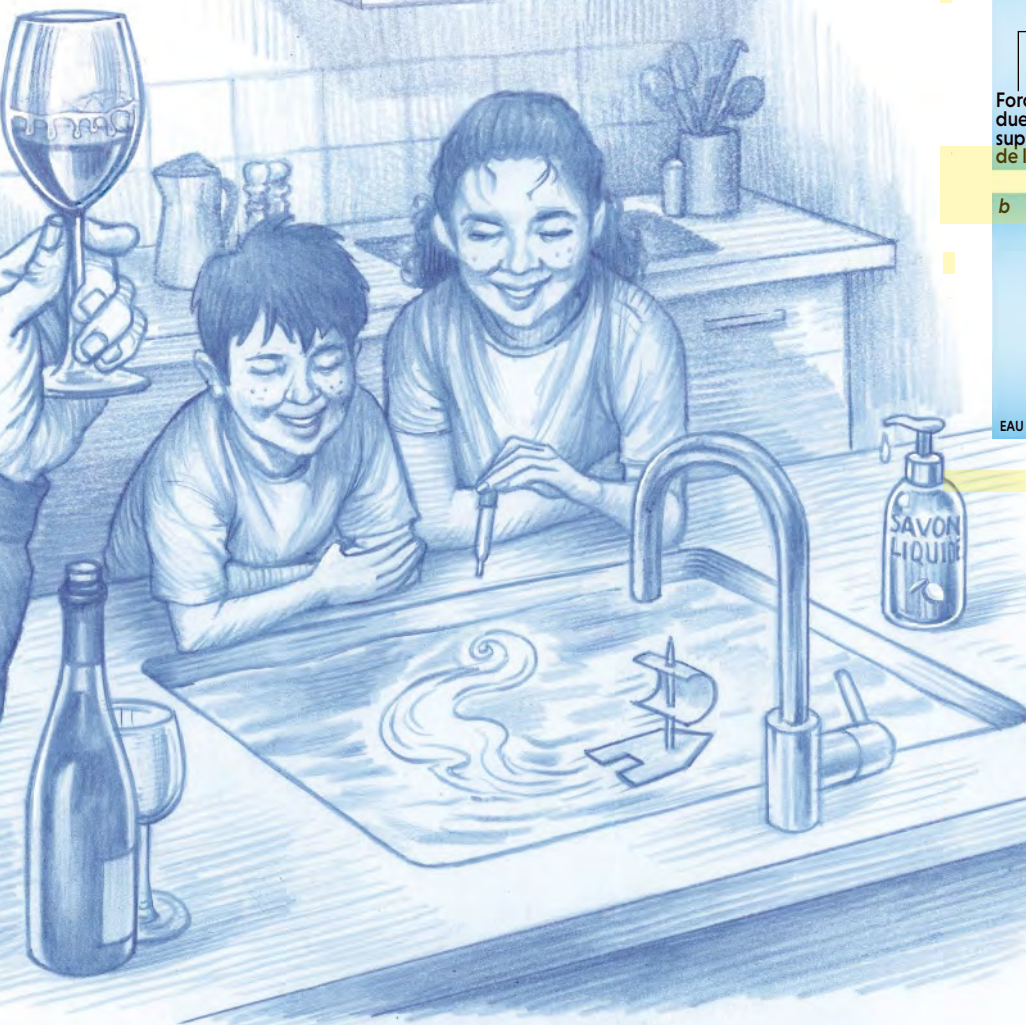
mince couche moléculaire qui en modifie les propriétés. En particulier, cette couche réduit considérablement la tension superficielle, qui peut passer d'environ 70 millinewtons par mètre pour l'eau pure à 25 pour l'eau savonneuse.

Qu'est-ce que cela implique pour le bateau de carton? À l'avant de celui-ci, l'eau est pure et sa tension superficielle tire l'objet. Pour un bateau supposé carré et large de 4 centimètres, la force exercée est d'environ 3 millinewtons. À l'arrière, en revanche, la tension superficielle est



PROPULSION PAR DIFFÉRENCE DE TENSION SUPERFICIELLE

Un petit bateau en carton posé sur l'eau subit, tout au long de son périmètre, des forces de traction (*a*, flèches rouges) dues à la tension superficielle de l'eau. Ces forces se compensent, de sorte que leur résultante est nulle : le bateau reste immobile. Du savon liquide déposé à l'arrière du bateau a pour effet d'abaisser notablement la tension superficielle à cet endroit (*b*). Les forces exercées sur le bateau ne se compensent plus, et leur résultante est dirigée vers l'avant : le bateau avance.



fortement réduite – divisée par trois environ – et la force exercée ne compense donc plus la force vers l'avant. La masse d'un morceau de carton de 16 centimètres carrés étant de l'ordre de 1 gramme, l'accélération initiale du bateau est de l'ordre de 2 mètres par seconde carrée.

Cette valeur est déjà appréciable, mais elle serait 10 fois plus élevée, soit le double de l'accélération de la pesanteur, pour un carré de 0,4 centimètre de côté. On comprend donc que certains insectes marchant sur l'eau puissent fuir

rapidement en exploitant ce type de propulsion. Il leur suffit de relâcher depuis leur abdomen une substance, par exemple la sténusine, qui abaisse la tension superficielle de l'eau pour que leur départ soit foudroyant.

DES MOUVEMENTS DU LIQUIDE

Bien que nous ayons considéré un bateau à la surface de l'eau, l'effet sous-jacent est indépendant de la présence d'un objet matériel. Supposons que la surface de notre liquide ne soit plus

homogène, par exemple parce que la température ou la concentration en tensioactifs varie d'un point à l'autre. Quand l'une de ces deux grandeurs augmente, la tension superficielle diminue. Si l'on découpe par la pensée une bande à la surface de ce liquide et que l'on effectue un bilan des forces sur son périmètre, on obtient le >

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> même résultat qu'avec le bateau: un déséquilibre apparaît et tire la «bande» vers la zone où la tension superficielle est la plus élevée, et ce d'autant plus fort que la différence de tension superficielle est importante.

Cela se traduit donc par un écoulement du liquide des zones de faible tension superficielle – zones les plus chaudes ou les plus concentrées en tensioactifs – vers les zones de tension superficielle élevée, plus froides ou peu concentrées en tensioactifs. C'est cela, à proprement parler, l'effet Marangoni.

Un grand classique des expériences de physique amusantes permet de le voir à l'œuvre. Remplissez un bol d'eau et saupoudrez la surface de poivre; versez au centre une goutte de savon liquide. Les grains de poivre, répartis uniformément à la surface de l'eau, sont alors instantanément chassés à la périphérie.

Dans cette expérience, les grains de poivre visualisent la mise en mouvement du liquide par l'effet Marangoni. Si les grains sont repoussés jusqu'à la périphérie du récipient, ce n'est pas parce qu'ils sont entraînés par le film tensioactif qui s'étale (une couche moléculaire ne peut déplacer un grain mesurant une fraction de millimètre), mais bien par le mouvement rapide de l'eau chassée radialement, par rapport à la goutte de savon, sous l'effet Marangoni.

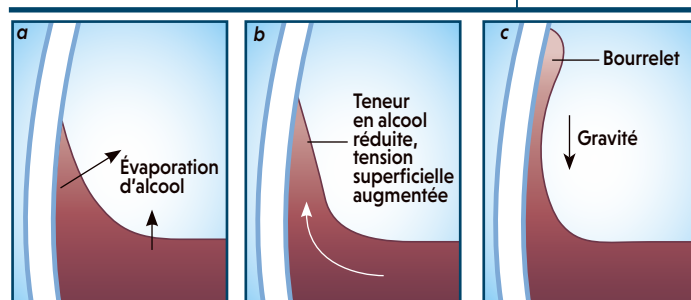
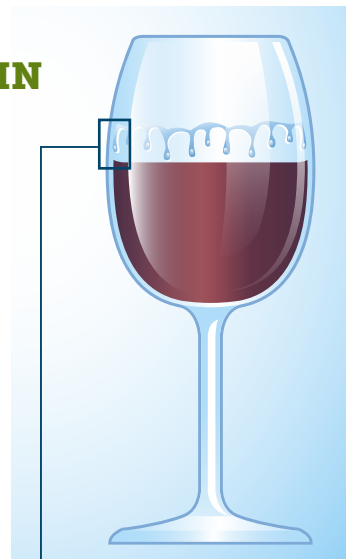
QUAND LE LIQUIDE REMONTE LA PAROI

Revenons aux larmes qui se forment spontanément sur les parois humides d'un verre de vin bien alcoolisé. Comment les expliquer? Une première chose à noter est que le liquide forme sur la paroi du verre un ménisque d'une taille de l'ordre du millimètre, qui résulte d'un équilibre entre forces de capillarité et gravité (*voir l'encadré ci-dessus*). Par ailleurs, le vin est, pour l'essentiel, un mélange d'eau et d'éthanol, ce qui a deux conséquences. D'une part, la présence de l'éthanol diminue la tension superficielle du mélange, par rapport à l'eau pure. D'autre part, l'éthanol étant plus volatil que l'eau, lorsque le vin s'évapore, les vapeurs sont plus riches en alcool que le liquide.

L'évaporation appauvrit donc le mélange en alcool. L'effet est relativement important dans le ménisque ou dans le film déposé sur la paroi en tournant le vin dans le verre, car le rapport surface/volume y est plus élevé que pour le reste du vin. De plus, l'évaporation abaisse la température du liquide restant,

UN BOURRELET QUI FAIT PLEURER LE VIN

Les larmes de vin sont des coulées que l'on observe sur la paroi du verre, au-dessus du niveau du vin. Elles naissent à intervalles plus ou moins réguliers le long d'un bourrelet liquide. La formation de celui-ci est due à l'effet Marangoni. Au départ, la surface du vin forme, au niveau de la paroi du verre, un ménisque (a). L'alcool du vin s'évaporant, la concentration en éthanol et la température du vin diminuent notablement dans le ménisque (où le rapport surface/volume du liquide est important). Il en résulte une tension superficielle plus élevée qu'à la surface horizontale du vin. Du liquide est ainsi soulevé et la hauteur du ménisque augmente (b), jusqu'à ce que cette ascension soit contrebalancée par le poids du liquide soulevé, d'où le bourrelet (c). La formation des coulées reste, elle, imparfaitement comprise.



cette diminution étant, encore une fois, plus ou moins importante selon le rapport surface/volume. Par conséquent, le ménisque et le film ont une teneur en alcool plus faible et une température plus basse que le reste du vin. La tension superficielle y est donc plus élevée.

La variation de tension superficielle, depuis la surface libre du vin jusqu'en haut du ménisque, crée un écoulement de liquide dirigé vers les parois et vers le haut. Le liquide grimpe le long du verre, jusqu'à ce que le poids du liquide soulevé compense la force qui le tire vers le haut. Un bourrelet liquide se forme alors à un ou deux centimètres au-dessus de la surface du vin.

À partir de ce bourrelet, du liquide redescend sous la forme de «larmes». Les raisons précises de ce ruissellement? Depuis 1992, date des travaux pionniers sur les larmes du vin de Jean-Baptiste Fournier et Anne-Marie Cazabat, au Collège de France, elles sont toujours débattues... Une interprétation très récente, proposée fin 2019, fait ainsi intervenir des ondes de choc au sein du film mouillant. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. Ivanov et S. Nikolov, **Molecular engine boat**, *Physics Education*, vol. 54(4), article 045006, 2019.

Y. Dukler et al., **A theory for undercompressive shocks in tears of wine**, prépublication arXiv :1909.09898, 2019.

J. B. Fournier et A. M. Cazabat, **Tears of wine**, *Europhysics Letters*, vol. 20(6), pp. 517-522, 1992.