

LES AUTEURS



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

DU GRANITÉ POUR BIEN PATINER

**Un bon lubrifiant est un fluide de viscosité élevée.
Ce n'est le cas ni de la glace ni de l'eau liquide. Et pourtant,
on glisse sur la glace comme sur une couche d'huile!
Des expériences récentes ont résolu l'énigme.**

Depuis le XIX^e siècle, on avait l'intuition que, lorsqu'on glisse sur de la glace, la surface de celle-ci se couvre d'un film très mince d'eau liquide qui évite le contact solide-solide et le lubrifie, même lorsque la température est inférieure à 0 °C. Pourtant, pour les physiciens, ce phénomène restait mal compris car l'eau, contrairement à l'huile, est en pratique un très mauvais lubrifiant.

Les expériences toutes récentes du groupe de Lydéric Bocquet, physicien du CNRS à l'École normale supérieure, à Paris, résolvent le paradoxe. Elles montrent que le film n'est pas aussi liquide que l'on croyait, mais a une consistance proche du granité, mélange de glace pilée et d'eau. Cela en fait un meilleur lubrifiant, comme nous allons l'expliquer.

Pour bien saisir le paradoxe, examinons quelques situations où la surface d'un solide est mouillée soit par de l'eau,

soit par de l'huile. Chacun aura constaté qu'il est bien plus facile de remuer de l'eau avec une cuillère que de l'huile. La raison en est que la viscosité, la grandeur physique qui exprime combien un fluide résiste à sa mise en mouvement quand on le « cisaille », est bien plus faible pour l'eau (1 millième de pascal·seconde) que pour l'huile (environ 0,08 pascal·seconde pour l'huile d'olive à 20 °C, par exemple, soit 80 fois plus!).

LUBRIFICATION À L'HUILE OU À L'EAU?

Pourtant, un piéton, par exemple, risque bien plus de glisser sur une flaque d'huile que sur une flaque d'eau. Autrement dit, l'huile frotte davantage sur un solide (la cuillère), mais réduit bien mieux le frottement entre deux solides (le sol et la chaussure), ce qui en fait un meilleur lubrifiant. Pour comprendre pourquoi et être plus quantitatif, il est nécessaire de s'intéresser à ce qui se passe à l'échelle microscopique.

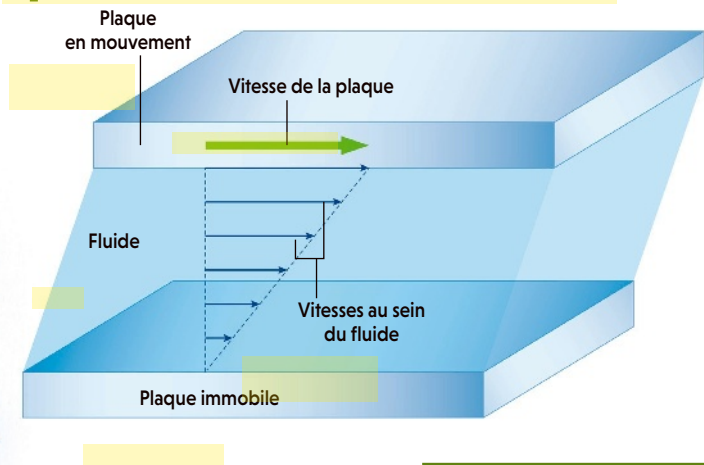
Plutôt qu'une semelle de chaussure, trop souple et dont la déformation viendrait compliquer la situation, considérons un cube de métal posé sur un sol plat et horizontal, métallique lui aussi pour simplifier l'analyse.

Lorsque les surfaces en contact sont sèches, le frottement est un « frottement solide ». Cela signifie que si l'on pousse le cube avec une force trop faible, il ne glisse pas, mais reste bloqué sur le sol. Ce phénomène a pour origine la rugosité des surfaces à l'échelle microscopique. À l'échelle du millième de millimètre, même les surfaces qui nous apparaissent lisses présentent des aspérités. Aussi,



GLISSER SUR UNE COUCHE DE FLUIDE

Lorsqu'un fluide est confiné entre deux solides et que ceux-ci se déplacent parallèlement l'un par rapport à l'autre, il subit un cisaillement. Aux points de contact avec un solide, sa vitesse doit être égale à celle du solide, et donc la vitesse du fluide varie linéairement dans son épaisseur. Ce cisaillement engendre une résistance au glissement, qui dépend de la viscosité du fluide.



Le glissement d'un solide sur la glace se fait grâce à un film d'eau liquide, pensait-on. Mais cette explication présentait des difficultés.

lorsqu'on pose un solide sur un autre, sommets et creux des deux surfaces s'imbriquent en partie, d'où une résistance au glissement. C'est lorsque la force exercée devient suffisante pour déformer ces aspérités que le glissement se produit.

Lorsque les surfaces ne sont pas sèches, tout dépend de la quantité de fluide présente (voir l'encadré page suivante). S'il y a trop peu de fluide, celui-ci se loge dans les cavités logées entre les deux surfaces. La situation n'est finalement guère changée et l'on reste dans une situation de frottement solide.

En revanche, lorsque l'épaisseur de la couche fluide entre les surfaces, quoique

faible, est plus grande que la hauteur maximale des rugosités, il n'y a plus aucun contact entre les solides, donc plus de blocage. Dans ce cas, même la plus infime force mettra le bloc en mouvement.

Ce mouvement crée aussi un écoulement dans le fluide, puisqu'au niveau du sol, sa vitesse est nulle, tandis qu'au niveau de la face inférieure du bloc, elle est égale à la vitesse du bloc. La résistance au mouvement est alors due uniquement à la viscosité du fluide. La force engendrée est proportionnelle à la surface de contact, à la viscosité et à la variation de vitesse du fluide (voir l'encadré ci-dessus).

Pour une surface de 250 centimètres carrés (celle d'un pied), une vitesse de déplacement de 1 mètre par seconde, typique de la marche, et une épaisseur de fluide de 2,5 millimètres, la force de frottement visqueux vaut 0,01 newton pour de l'eau et 0,8 newton pour de l'huile d'olive (soit le poids de 80 grammes).

Ainsi, pas de doute : l'huile frotte plus que l'eau. Mais attention, c'était sans se >

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



> soucier d'un phénomène crucial dans la lubrification, à savoir la présence d'une force qui tend à rapprocher les surfaces – le poids du bloc de métal dans notre exemple.

Cette force crée dans le fluide une surpression par rapport à son environnement, surpression qui chasse le liquide de la région comprise entre les deux surfaces. En combien de temps? La question est difficile, car le temps calculé est très sensible au choix fait dans la modélisation.

LE FILM LUBRIFIANT EST CHASSÉ... PLUS OU MOINS VITE

Cependant, les estimations indiquent que lorsque le film d'eau est soumis à une force pressante de 300 newtons sur 250 centimètres carrés, il faut de l'ordre de 0,05 seconde pour qu'une épaisseur initiale de 2,5 millimètres soit divisée par 10 (0,25 millimètre), et de l'ordre de 5 secondes pour qu'elle soit divisée par 100 (0,025 millimètre).

Autrement dit, lorsque nous marchons dans une flaque d'eau, l'eau est chassée de sous notre pied. La semelle entre-t-elle alors en contact avec le sol? Tout dépend de la taille des aspérités de ce dernier.

Sur un trottoir ou sur un sol irrégulier, le contact solide-solide se fait très certainement: le temps pour que l'épaisseur du film soit de l'ordre de grandeur des aspérités est court (moins d'une seconde); dans ce cas, on retrouve vite du frottement solide, et nous ne glissons pas.

Au contraire, certains carrelages mouillés sont traîtres, car leur surface est tellement lisse que, le temps de l'appui du pied au sol, le film d'eau s'amincit mais reste suffisamment épais pour qu'il n'y ait pas de contact solide-solide: nous glissons donc.

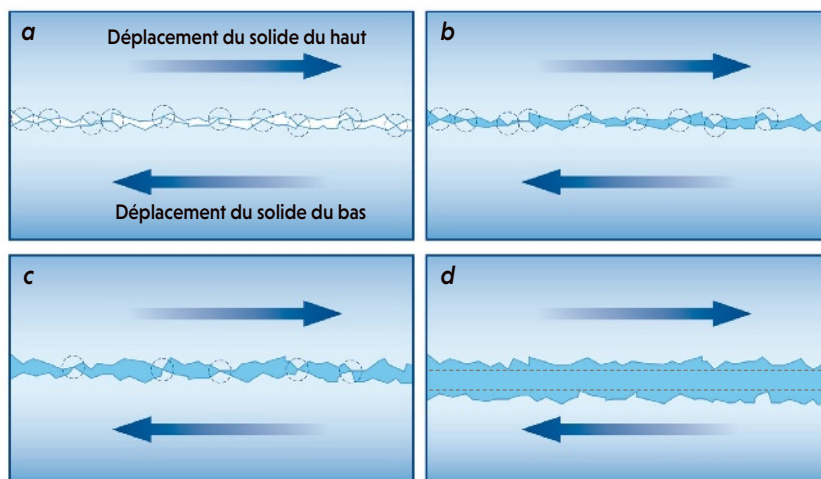
Dans le cas d'une flaque d'huile (d'olive), liquide près de 100 fois plus visqueux que l'eau, les temps de chasse sont à multiplier par un facteur de l'ordre de 100, à épaisseur identique. Il restera donc toujours un mince film de fluide entre la chaussure et le sol, et nous gliserons presque toujours.

Nous sommes désormais parés pour revenir au problème soulevé par la glace et l'existence d'un mince film d'eau à sa surface. Compte tenu de ce qui précède, les physiciens ne comprenaient pas pourquoi ce film d'eau ne s'échappait pas rapidement sur les côtés de la zone de contact entre le patin ou le ski et la glace.

Pour élucider ce mystère, Lydéric Bocquet et ses collègues ont utilisé comme sonde une bille de verre fixée sur une branche de diapason afin de mesurer

FROTTEMENT SANS FILM LIQUIDE OU AVEC

Lorsque deux solides glissent l'un sur l'autre, le poids du solide supérieur se répartit sur les points de contact (*cercles en pointillé*) entre les deux surfaces (a); le frottement est un « frottement solide ». Ce frottement n'est que très peu réduit en présence d'un liquide qui ne fait que remplir les interstices créés par les aspérités microscopiques (b). Un régime mixte de lubrification s'installe lorsque le liquide est plus abondant (c). Quand le liquide présent forme une couche assez épaisse pour que les aspérités des solides ne soient plus en contact (d), la lubrification est complète. Encore faut-il que le liquide lubrifiant ne soit pas chassé trop rapidement sous la pression exercée par le solide supérieur.



in situ les propriétés physiques de ce film d'eau. Ils ont ainsi estimé non seulement l'épaisseur de ce film, mais aussi la force de frottement (par l'analyse des vibrations de la bille parallèlement à la surface de contact) et la viscosité du fluide présent (par l'analyse des vibrations perpendiculaires à cette même surface).

Les résultats sont étonnants. D'abord, le film est bien plus mince qu'envisagé: son épaisseur est inférieure à 1 micromètre environ. Or plus on confine un fluide, plus les effets de la viscosité se font sentir et plus les temps caractéristiques pour l'amincir augmentent.

Par ailleurs, la viscosité du fluide présent au-dessus de la glace est, selon les conditions expérimentales, 10 à 100 fois supérieure à celle de l'eau liquide. Des analyses complémentaires suggèrent que cette viscosité plus élevée serait due à la présence de nanoparticules de glace dans le film d'eau: le frottement aurait pour effet non seulement de faire fondre la glace, mais aussi de l'abraser. Le fluide aurait ainsi une consistance plus proche d'un granité ou de la neige fondue. Très mince et plus visqueux que l'eau liquide, il serait donc un bien meilleur lubrifiant. ■

BIBLIOGRAPHIE

L. Canale et al.,
Nanorheology of interfacial water during ice gliding,
Physical Review X,
vol. 9, article 041025,
2019.

É. Guyon et al.,
Hydrodynamique physique, 3^e édition,
CNRS Éditions/
EDP Sciences, 2012.