



précisément, de l'eau circule dans le sédiment et apporte de la silice dissoute qui précipite, souvent à partir de «noyaux de cristallisation», et cimente l'ensemble.

La coloration ocre est due à la migration d'oxydes de fer dans la roche en formation. Par des mouvements d'ordre tectonique, le grès a ensuite rejoint la surface et a été exposé à l'érosion, essentiellement par l'eau. Peu à peu, les zones les plus dures, en l'occurrence les «piles d'assiettes» de la Pierre d'achoppement, ont été mises en relief. Les parties éliminées sont souvent les plus éloignées des noyaux de cristallisation, plus récentes et donc plus fragiles.

Plus largement, en quoi consiste le contexte géologique local? Le territoire d'Hauterives, où cette pierre a été trouvée, et bien d'autres similaires recueillies par la suite par le facteur, se situe à la limite nord de la formation argilo-caillouteuse de

Chambaran. Cette région appartient au sillon molassique périalpin, c'est-à-dire une accumulation de roches sédimentaires (les molasses), comme des grès, mais aussi des argiles et des conglomérats. La Pierre d'achoppement est une de ces molasses. Dans ce sillon, on trouve également des galets de quartzite (une roche siliceuse) d'origine alpine apportés à l'époque du Villefranchien, il y a environ 1,8 million d'années, à l'occasion d'une glaciation.

Autre particularité, à Tersanne, entre 1969 et 1984, le sous-sol a été percé à de grandes profondeurs pour récupérer, par dissolution, 6 millions de tonnes de sel, sans doute daté du Trias, que Rhône-Poulenc a utilisé pour produire du chlore. Cela a laissé place à d'immenses vides représentant plusieurs millions de mètres cubes. Aujourd'hui, la société Engie stocke dans ces réservoirs naturels étanches du gaz naturel sous pression.

En fin de compte, c'est à un contexte géologique peu commun que l'on doit une construction qui l'est encore moins. André Malraux ne s'y était pas trompé. En 1969, il fut le seul à défendre l'inscription du Palais idéal aux Monuments historiques. Pour fêter le cinquantenaire de ce classement, une exposition d'art contemporain «Le vent et les oiseaux m'encouragent», ainsi qu'une création de l'artiste Fabrice Hyber et un *fac-similé* d'un carnet de dessins de Picasso entièrement consacré au facteur Cheval rendent hommage au Palais idéal jusqu'au 5 janvier 2020. ■

Pour plus d'informations:
www.facteurcheval.com



L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)

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.

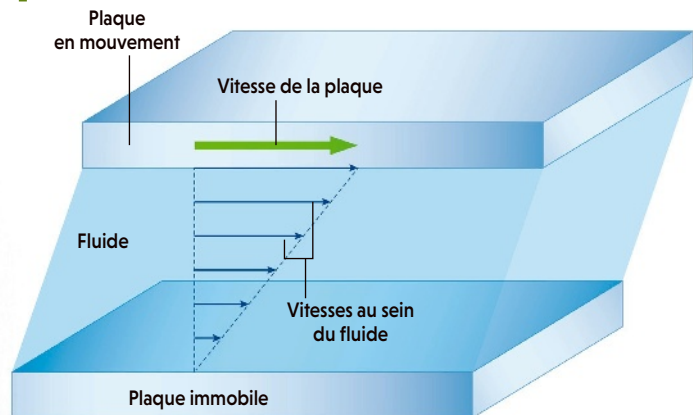
Plutôt qu'une semelle de chaussure, trop souple et dont la déformation viendrait compliquer la situation, considérons un cube de métal posé sur un sol plat et horizontal, métallique lui aussi pour simplifier l'analyse.

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.

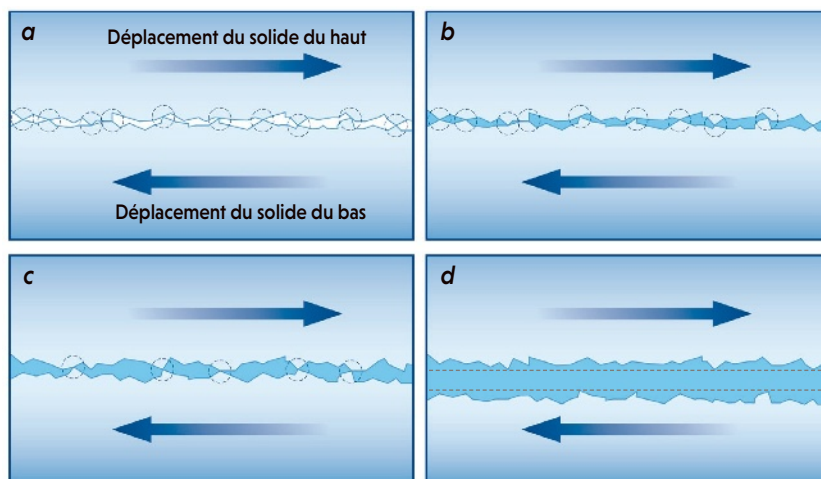
Dans le cas d'une flaque d'huile (d'olive), liquide près de 100 fois plus visqueux que l'eau, les temps de chasse sont à multiplier par un facteur de l'ordre de 100, à épaisseur identique. Il restera donc toujours un mince film de fluide entre la chaussure et le sol, et nous gliserons presque toujours.

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.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506



N° 505 (nov. 19)
réf. PL505



N° 504 (oct. 19)
réf. PL504



N° 503 (sept. 19)
réf. PL503



N° 502 (août 19)
réf. PL502



N° 501 (juillet 19)
réf. PL501



N° 500 (juin 19)
réf. PL500



N° 499 (mai. 19)
réf. PL499



N° 498 (avr. 19)
réf. PL498



N° 497 (mar. 19)
réf. PL497



N° 496 (févr. 19)
réf. PL496



N° 495 (jan. 19)
réf. PL495



À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science,
au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres
correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 01 x 9,90 € = 9,90 €
2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/07/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pourlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR