

DM14 – à rendre le 26 janvier 2022

« La glace est non seulement le seul corps glissant de la nature mais c'est la seule de toutes les substances solides qui possède, dans les conditions naturelles, la propriété d'être parfaitement glissante. (...) Les autres causes de glissement parfait sont complexes : une surface solide lisse recouverte d'un fluide visqueux, telle qu'une planche bien graissée, est parfaitement glissante tout comme la glace. (...). En essayant de me souvenir si j'avais déjà entendu parler d'une tentative d'explication du caractère glissant de la glace (..), je me suis rendu compte qu'il m'était impossible de me souvenir d'une quelconque mention de ce sujet. Alors, j'ai pensé que l'eau n'était pas considérée comme un lubrifiant, de telle sorte que James Thomson lui-même, ou son frère Lord Kelvin, pouvait n'avoir pas réalisé que la fusion de la glace sous l'effet de la pression du patin pouvait lubrifier le patin en mouvement et rendre la glace glissante pour tout corps dur appuyé contre elle. »

Osborne Reynolds (1901)

« J'ai fait du patinage dehors par -25°C sans problème. »

Alain Haché (2002)

« Si la vitesse de glissement est notable et si la température est inférieure à 0°C , la fusion locale en surface est produite, non sous l'effet de la pression, mais par l'échauffement dû au frottement des surfaces en train de glisser. »

F. P. Bowden (1953)

Frottement sur une surface

Un palet de hockey sur glace de masse m est lancé sur une surface plane de glace avec une vitesse initiale horizontale $v_0 \vec{u}_x$ dans la direction Ox de vecteur unitaire \vec{u}_x . Pour simplifier, on suppose que son mouvement est un mouvement de translation. On note \vec{v} la composante sur Ox du vecteur vitesse du palet. Le palet a la forme d'un disque de 2,54 cm d'épaisseur et 7,62 cm de diamètre.

Données : $v_0 = 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $m = 170 \text{ g}$; accélération de la pesanteur : $g = 9,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

1. Faire l'inventaire des forces subies par le palet en négligeant les frottements de l'air, mais pas les frottements du palet avec la glace. Représenter les vecteurs forces sur un schéma.
2. Hypothèse 1 : on suppose d'abord que la force de frottement \vec{T} subie par le palet est du type frottement fluide visqueux : $\vec{T} = -\alpha\vec{v}$, c'est-à-dire exercée par la couche d'eau fondue se trouvant sous le palet. Établir l'expression de la vitesse du palet en fonction du temps. Tracer l'allure du graphe correspondant.
3. Hypothèse 2 : On suppose désormais que la force de frottement est de type « frottement solide ». Les frottements ne sont plus dus à la couche de liquide fondue, mais au contact du palet avec la glace solide. Lorsqu'un solide glisse sur un plan solide, le solide subit de la part du support plan une réaction que l'on peut décomposer en une composante \vec{N} normale à la surface de contact et une force de frottement \vec{T} tangente à la surface de contact, colinéaire et de sens opposé à la vitesse. On appelle coefficient de frottement f le rapport des normes des deux composantes : $f = \|\vec{T}\|/\|\vec{N}\|$.
Le coefficient de frottement est supposé constant : $f = 0,02$.
 - Exprimer la norme de la force de frottement et calculer numériquement sa valeur.
 - Établir l'expression de la vitesse du palet en fonction du temps. Tracer l'allure du graphe correspondant.
 - En appliquant le théorème de l'énergie cinétique, établir l'expression de la distance parcourue par le palet avant de s'arrêter. Calculer numériquement cette distance.

Fusion de la glace sous l'effet de la pression

- Évaluer numériquement la pression exercée sur la glace par un patineur de masse M lorsqu'un seul patin est en contact avec la glace. On se reportera au document 3 pour les caractéristiques des patins. Estimer la température de la glace permettant une fusion en surface de la glace sous l'effet d'une telle pression à l'aide du document 1. Donnée : $M = 60 \text{ kg}$.
- Expliquer pourquoi, dans le cas du contact entre deux solides rugueux, il est envisageable que la surface réelle de contact soit plus petite que la surface totale. Dans le cas du patineur précédent, évaluer numériquement le pourcentage de la surface des lames des patins en contact réel avec la glace pour que la pression entraîne une fusion en surface si la température de la glace est de -10°C .
- À l'aide du document 1, déterminer la température minimale à laquelle on peut obtenir de l'eau liquide et la pression correspondante. Indiquer si ce résultat est en accord avec la théorie d'une fusion de la glace sous l'effet de la pression.

Document 1 : Propriétés de la glace

La glace Ih est le nom donné à la glace ordinaire. Il existe d'autres variétés cristallines de glace (notées II, III, etc.) mais on ne les rencontre quasiment pas sur Terre. La **Figure 1 (a)** présente le diagramme des phases de l'eau pour de hautes pressions avec diverses variétés cristallines de glace. La **Figure 1 (b)** présente la courbe de fusion de la glace Ih. D'autres propriétés de la glace Ih sont énumérées ci-dessous :

Masse volumique : $\rho = 9,2 \cdot 10^2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;

Capacité thermique massique : $c = 2,1 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

Conductivité thermique : $\lambda = 2,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;

Enthalpie massique de fusion : $L = \Delta_{\text{fus}}H = 333 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

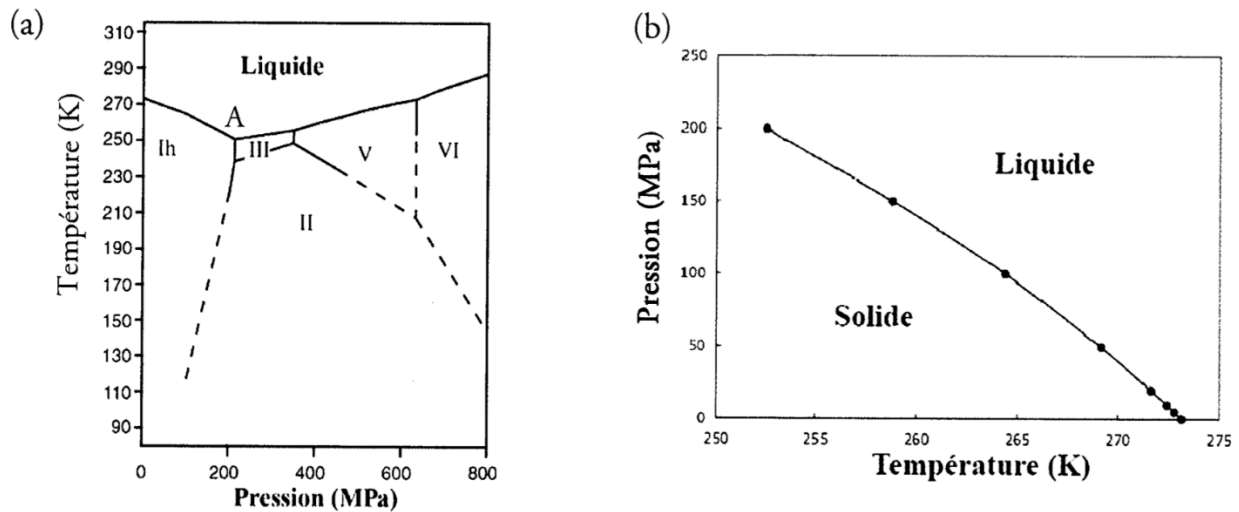


Figure 1. (a) Diagramme simplifié des phases de l'eau à haute pression. Les domaines Ih, II, III, V et VI correspondent à diverses variétés cristallines de glace (Ih est la glace ordinaire). Les coordonnées du point triple A sont 251,165 K et 209,9 MPa. **(b)** Courbe de fusion de la glace.

Document 2 : Modèle de contact entre la glace et le corps glissant

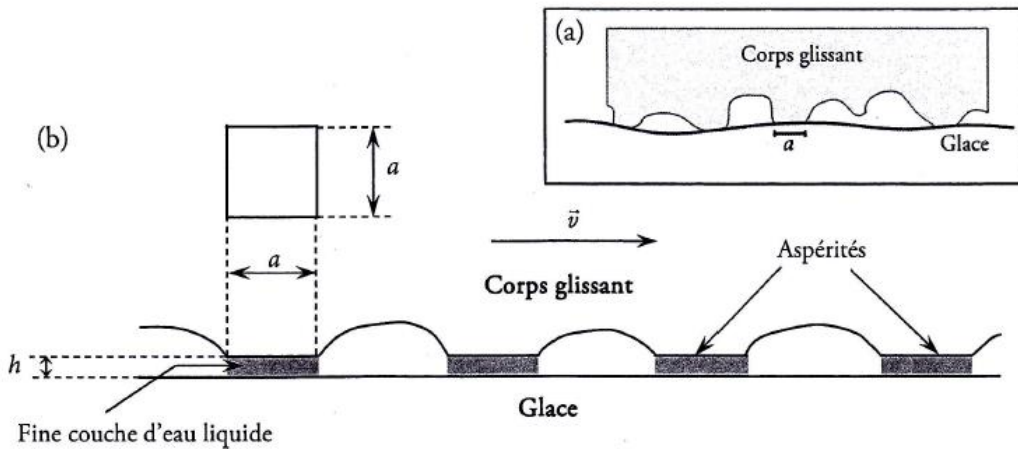


Figure 2. (a) Schéma d'un contact entre la glace et un corps plus dur.
(b) Modélisation du contact entre la glace et le corps glissant.

Le contact entre la glace et un corps glissant supposé plus dur que la glace est schématisé sur la **Figure 2(a)**. Il est modélisé sur la **Figure 2(b)** : seules des aspérités du corps glissant sont réellement en contact avec la glace. On suppose que le nombre total d'aspérités en contact avec la glace est n et que leur section est carrée de côté a . Entre chaque aspérité et la surface de la glace, supposée plane et horizontale, existe une fine couche d'eau liquide d'épaisseur h .

Document 7 : Mesure de température à l'interface glace-patin à glace

La **Figure 6** présente une mesure de la température à l'interface entre la glace et la lame d'acier d'un patin à glace. La chaussure de patinage utilisée pour l'expérience est représentée sur la **Figure 6(a)**. La lame étant légèrement courbe, seule une partie de sa surface est en contact avec la glace. La surface apparente de contact entre la lame et la glace est un rectangle de longueur égale à 150 mm et de largeur égale à 3 mm. La lame est percée d'un petit trou permettant d'installer un dispositif de mesure de température (thermocouple) au niveau de la surface inférieure de la lame. La vitesse de la patineuse, initialement immobile, a été augmentée à une vitesse très lente de $0,42 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pendant une durée de 480 s. La vitesse a été ensuite brutalement augmentée à la valeur de $1,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pendant encore une durée de 160 s avant que le mouvement soit soudainement arrêté. Le graphe de cette mesure est présenté sur la **Figure 6(b)**. La température de la glace était de $-13,4^\circ\text{C}$ pendant l'expérience, à l'exception de l'interface avec le patin.

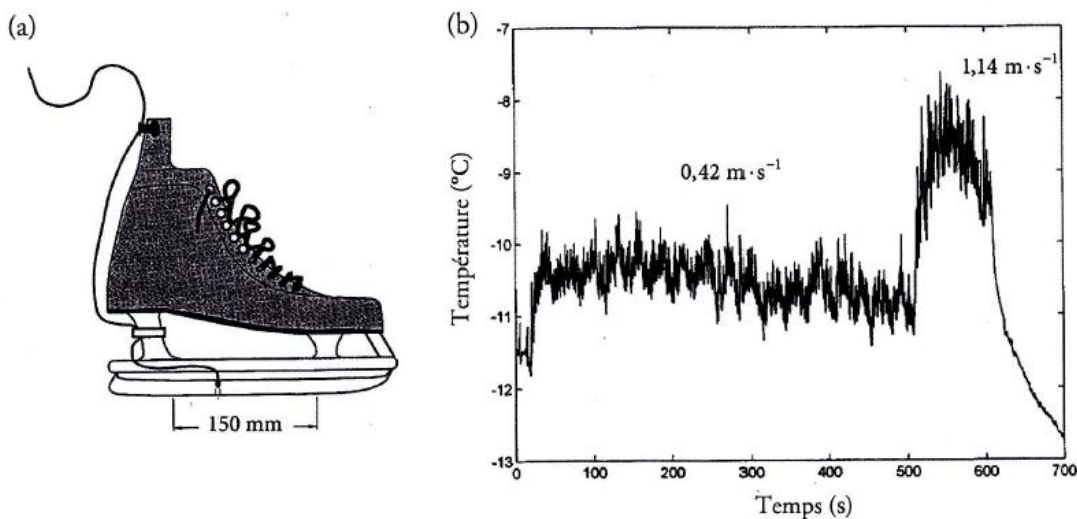


Figure 6. (a) Patin à glace utilisé pour la mesure.
(b) Mesure de la température à l'interface lame-glace en fonction du temps.