

PHYSIQUE II

Durée : 4 h

La calculatrice est autorisée.

L'énoncé de cette épreuve comporte 18 pages.

Les formulaires, valeurs numériques et figures éventuellement nécessaires sont regroupés en fin d'énoncé.

Ce problème se propose d'étudier quelques propriétés physiques de la glace.

I. Quelques aspects thermodynamiques de la glace

I.1. Détermination expérimentale de l'enthalpie massique de fusion de la glace

On propose dans cette sous-partie d'analyser les résultats expérimentaux obtenus par des étudiants à l'occasion d'une séance de travaux pratiques ayant pour but la détermination de la valeur de l'enthalpie massique de fusion de la glace à pression atmosphérique notée l_f .

Q1. Rappeler la définition de l'enthalpie massique de fusion de la glace l_f à pression atmosphérique.

La démarche expérimentale suivie pour déterminer l'enthalpie massique de fusion de la glace met en œuvre une technique calorimétrique particulière, la méthode des mélanges. Le protocole est détaillé dans le **document 1**, qui donne aussi toutes les indications utiles sur l'affichage des valeurs mesurées par les appareils utilisés.

Document 1. Détermination de l'enthalpie massique de fusion de la glace par la méthode des mélanges

Protocole :

1. Introduire une masse m_1 d'eau liquide connue (procéder à une pesée) dans le calorimètre.
2. Une fois l'équilibre thermique atteint, repérer la température θ_1 de l'eau (et donc du calorimètre).
3. Prélever 5 ou 6 glaçons et les placer dans un verre à pied et mesurer leur masse m_2 .
4. Attendre que les glaçons commencent à fondre et suivre leur température θ_2 .
5. Lorsque le thermomètre indique que la température des glaçons est $\theta_2 = 0\text{ °C}$, les introduire rapidement dans le calorimètre.
6. Une fois que les glaçons ont fondu et que l'équilibre thermique est atteint, repérer la température finale θ_f du système.

Résolution des appareils de mesure :

- les masses sont mesurées à l'aide d'une balance électronique qui affiche la valeur de la masse au gramme près. On assimile la valeur mesurée d'une masse à une variable aléatoire suivant une loi uniforme sur un intervalle de largeur égale à un gramme, centré sur la valeur affichée par la balance.
- les températures sont repérées à l'aide d'un thermomètre électronique qui mesure et affiche la valeur de la température au dixième de degré Celsius près. On assimile la valeur mesurée d'une température à une variable aléatoire suivant une loi uniforme sur un intervalle de largeur égale à un dixième de degré Celsius, centré sur la valeur affichée par le thermomètre.

Les résultats obtenus par un groupe d'étudiants sont les suivants :

$$m_1 = 250\text{ g} ; m_2 = 32\text{ g}$$

$$\theta_1 = 18,7\text{ °C} ; \theta_2 = 0,0\text{ °C}$$

$$\theta_f = 9,7\text{ °C}$$

Q2. En supposant que le système {eau + glaçons} évolue de façon adiabatique, établir l'expression de la chaleur latente de fusion en fonction des paramètres du protocole expérimental.

Afin d'exploiter le résultat de leurs mesures et de prendre en compte les incertitudes de mesure, les étudiants rédigent et utilisent le programme python suivant :

```
1  ## importation des bibliothèques
2  import numpy as np
3  import numpy.random as rd
4
5  ## Constantes physiques
6  # Capacité thermique massique de l'eau liquide
7  c = 4.18E3
8
9  ## fonctions définies par l'utilisateur
10 def lf(m1,m2,Tf,Te,Tg):
11     '''
12     Renvoie la valeur de lf à partir de
13     - masse d'eau liquide m1 à température initiale Te (en K)
14     - masse de glace m2 à température initiale Tg (en K)
15     - température finale Tf (en K)
16     '''
17     return
18
19 def calcul_lf(N,m1,m2,Tf,Te,Tg,delta_m,delta_T):
20     '''
21     Renvoie la valeur de l'enthalpie massique de fusion et calcule l'incertitude-type
22     par la méthode de Monte-Carlo, étant donné les valeurs des grandeurs utiles et
23     les largeurs de leurs intervalles de variation. Ces grandeurs sont considérées comme
24     des variables aléatoires avec une loi de probabilité uniforme sur ces intervalles de
25     variation.
26     '''
27     # Création d'un tableau vide contenant N termes
28     liste = np.empty(N)
29     # tirage aléatoire des valeurs des grandeurs (méthode de Monte-Carlo)
30     for i in range(N):
31         me_sim = m1 + (delta_m/2)*rd.uniform(-1,1)
32         mg_sim = m2 + (delta_m/2)*rd.uniform(-1,1)
33         liste[i] = lf(me_sim,mg_sim,Tf,Te,Tg)
34     return [np.mean(liste),np.std(liste)]
35 a=10000
36 resultat = calcul_lf(100000,0.250,0.032,282.7,291.7,273.0,0.001,0.1 )
37 print("Moyenne = %.2f kJ/kg ; écart-type = %.2f kJ/kg"%(resultat[0]/1000,resultat[1]/1000))
```

Q3. Expliquer pourquoi ce programme, bien que sa syntaxe soit correcte, ne fournit pas une valeur satisfaisante de l'incertitude-type sur la mesure de l'enthalpie massique de fusion de la glace.

Une fois l'erreur corrigée, le programme fournit le résultat suivant :

1 Moyenne = 253.38 kJ/kg ; écart-type = 3.03 kJ/kg

Q4. Comparer la valeur obtenue pour l_f à la valeur de référence. Commenter.

Q5. Proposer une critique succincte du protocole suivi.

I.2. Formation de glace dans un congélateur

a) Etude du congélateur

On s'intéresse dans cette partie au fonctionnement d'un congélateur. La machine frigorifique est constituée de quatre organes, représentés sur **la figure 1**.

Le fluide frigorigène circulant entre les différents organes est le 1,1,1,2-Tétrafluoroéthane, noté R134a par la suite. Le diagramme enthalpique est donné en **annexe B**.

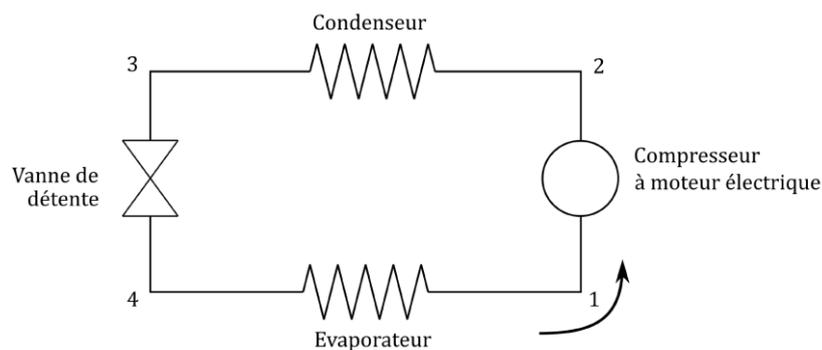


Figure 1. Principe de fonctionnement du congélateur

On utilise un modèle simple de cycle frigorifique pour décrire son fonctionnement.

On suppose que les transformations subies par le fluide frigorigène, supposé en écoulement stationnaire, sont les suivantes :

- 1 → 2 : compression adiabatique réversible du fluide par le compresseur ;
- 2 → 3 : échange thermique isobare dans le condenseur ;
- 3 → 4 : détente adiabatique sans partie mobile dans le détendeur ;
- 4 → 1 : échange thermique isobare dans l'évaporateur.

On donne les indications suivantes :

- La pression en fin de compression est $P_2 = 10$ bar.
- Le point 3 correspond à du liquide saturé.
- L'évaporation lors de la transformation 4 → 1 amène le fluide jusqu'à un état de vapeur saturante. La température du fluide lors de l'évaporation dans l'évaporateur est $\theta_1 = -30^\circ\text{C}$.

Notations : les grandeurs associées à l'état 1 du cycle sont indicées "1". Les quantités algébriques échangées entre le fluide et l'extérieur au cours de la transformation $1 \rightarrow 2$ sont indicées par "12". Exemples : enthalpie massique h_1 et travail massique utile w_{12} .

Q6. A l'aide des hypothèses de l'énoncé, placer les points 1,2,3 et 4 sur le diagramme fourni en annexe qu'on n'oubliera pas de rendre avec la copie. Donner dans un tableau les valeurs associées des températures et pressions en ces différents points.

Q7. Déterminer le titre massique en vapeur dans les états 2 et 4.

Q8. Si le compresseur était adiabatique mais non réversible, comment se situerait sa température de sortie par rapport à la température T_2 précédente ?

Q9. Déterminer, en le justifiant, les valeurs de w_{12} , q_{23} et q_{41} .

Q10. Définir l'efficacité du congélateur et déterminer sa valeur. Commenter le résultat obtenu.

Q11. Evaluer l'entropie massique créée au cours du cycle.

b) Fabrication de glace

On souhaite estimer la durée nécessaire pour que toute l'eau de masse $m = 150$ g d'un bac à glaçons, placé dans le congélateur, soit totalement transformée en glace à 0°C . L'eau est initialement à la température ambiante $T_a = 23^\circ$.

On fait l'hypothèse que l'air à l'intérieur du congélateur garde la température $\theta_c = -30^\circ\text{C}$ constante.

Les transferts thermiques entre le système {eau} et l'air intérieur du congélateur (mis en mouvement par une ventilation) peuvent être décrits par la loi de Newton. Cette loi lie la puissance thermique échangée Φ (en W) à l'écart de température entre l'air (T_c) et le système (T) et à la surface d'échange S selon la relation :

$$|\Phi| = hS|T - T_c|$$

La valeur du produit hS est estimée à $hS = 0,92$ W.K⁻¹

Q12. Exprimer le temps nécessaire à la transformation de l'eau. Déterminer sa valeur.

Q13. Expérimentalement, on constate que ce temps est de l'ordre de 1h pour un congélateur de puissance moyenne 40 W. Confronter avec la modélisation précédente et discuter brièvement.

II. La glace un corps glissant ?

II.1. Lois de Coulomb du frottement solide

On rappelle ci-dessous les lois de Coulomb, en notant f_s et f_g les coefficients statiques et dynamiques du frottement et \vec{T} et \vec{N} les composantes tangentielle et normale de la réaction.

- En mode statique (absence de glissement donc adhérence), la norme de la composante tangentielle $\|\vec{T}\|$ est inférieure à la quantité $f_s \|\vec{N}\|$ dans laquelle $\|\vec{N}\|$ représente la norme de la composante normale \vec{N} de la réaction : $\|\vec{T}\| \leq f_s \|\vec{N}\|$.

- En mode dynamique (présence de glissement), on a alors l'égalité $\|\vec{T}\| = f_g \|\vec{N}\|$ avec une composante tangentielle toujours opposée à la vitesse de glissement : $\vec{T} \cdot \vec{v}_g < 0$ et $\vec{T} \wedge \vec{v}_g = \vec{0}$.

a) Un dispositif de mesure du coefficient de frottement dynamique

On considère le dispositif représenté sur la **figure 2**. Un solide 1 de masse M est lié, par un fil inextensible et supposé sans masse, à un solide 2 de masse αM ($\alpha > 1 > f_s$). Le fil sans masse de longueur L passe sur la gorge d'une poulie idéale. Le solide 1 se déplace sur un support fixe S horizontal. On appelle H l'altitude du bas du solide 2 au-dessus d'un support horizontal S' . À l'état initial, les solides sont tous immobiles, le solide 1 est à l'abscisse $X(t=0) = X_0$ et le solide 2 est à l'altitude $H(t=0) = H_0$.

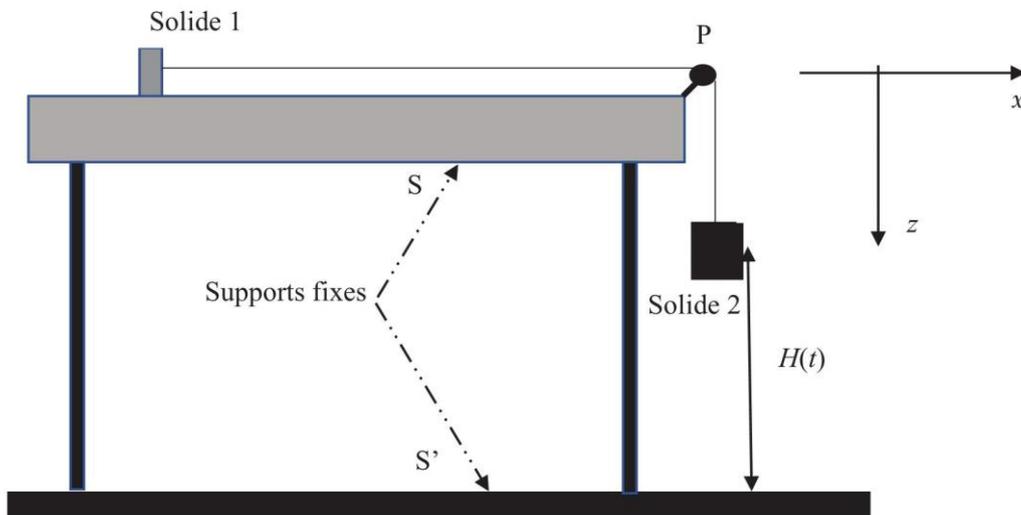


Figure 2. Premier dispositif : mesure du coefficient de frottement dynamique

On veut dans cette expérience déterminer la valeur du coefficient f_g de frottement relatif au glissement entre le matériau constitutif de du support S et celui du solide 1. On mesure la distance D parcourue par le solide 1 sur le support S , sachant que le solide 2 touche S' avant que le solide 1 ne s'arrête.

Q14. Justifier que la nature « idéale » de la poulie permet de considérer que la norme F de la tension du fil est conservée de part et d'autre de la poulie lorsque le fil est tendu.

Q15. Décrire qualitativement les deux phases successives du mouvement de l'ensemble en précisant pour chacune d'elles si le fil est tendu ou non tendu.

Q16. Déterminer la vitesse v_1 à la fin de la première phase en fonction de α , f_g et H_0 .

Q17. Déterminer f_g en fonction de α , H_0 et D .

Q18. Pour un contact bois-bois, on réalise l'expérience plusieurs fois de suite, en partant toujours de la valeur de $H_0 = 40,0$ cm. La masse du solide 1 vaut $M = 50$ g et celle du solide 2 vaut $\alpha M = 60$ g. Calculer la valeur du coefficient de frottement f_g sachant qu'on a trouvé une valeur moyenne de la distance D égale à $\langle D \rangle = 1,50$ m.

b) Mesure du coefficient de frottement statique

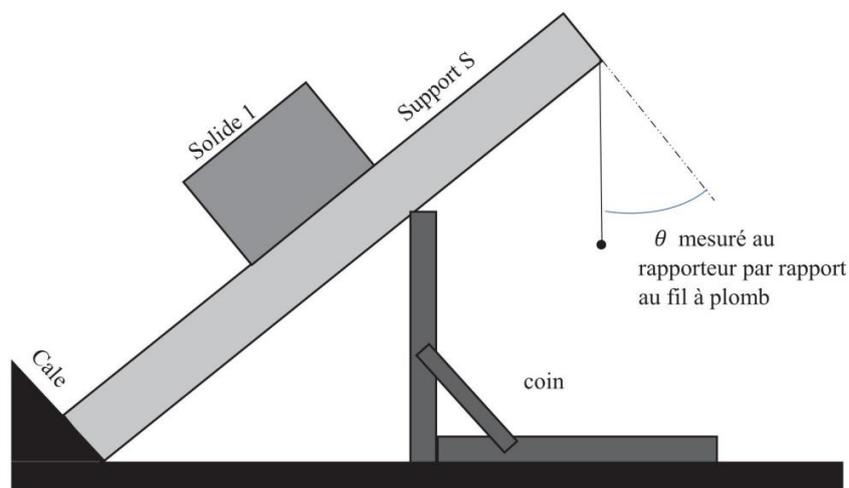


Figure 3. Second dispositif : mesure du coefficient de frottement statique

Q19. On pose maintenant le solide 1 sur le support S qui fait un angle θ avec le plan horizontal. Le dispositif est représenté sur la **figure 3**. On fait augmenter, à partir d'une valeur faible, l'angle θ en déplaçant lentement un coin et on mesure pour quelle valeur $\theta = \theta_{lim}$ le solide 1 se met à glisser. Montrer que cette expérience permet de mesurer le coefficient de frottement f_s .

Q20. On réalise plusieurs essais successifs de décrochement et la valeur moyenne de θ_{lim} est de l'ordre de $29,5^\circ$. En déduire l'ordre de grandeur du coefficient de frottement mesuré. Commenter.

II.3. Glissement sur la glace

Les forces de frottement associées au glissement d'un solide sur la glace ou la neige sont fréquemment étudiées en raison de leur importance pour diverses pratiques récréatives ou pour les moyens de transport dans les régions froides. Depuis plus de 150 ans, de nombreux scientifiques ont réfléchi à la raison pour laquelle la glace est glissante. Parmi eux, de célèbres physiciens tels Lord Kelvin ou Michael Faraday ; ce dernier, plus connu pour ses travaux en électromagnétisme, fut le premier à imaginer la présence d'une fine couche d'eau liquide couvrant la glace, même bien en dessous de 0°C . Au contact d'un solide, cette couche superficielle joue un rôle de lubrifiant diminuant fortement les frottements sur la glace. L'existence de cette couche liquide sera confirmée par l'expérience plus d'un siècle plus tard.

Le contact entre la glace et un corps glissant supposé plus dur que la glace est schématisé sur la **figure 4(a)**. Il est modélisé sur la **figure 4(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 d'épaisseur h . Le corps glissant est animé d'une vitesse \vec{v} supposée constante parallèle à la surface de la glace.

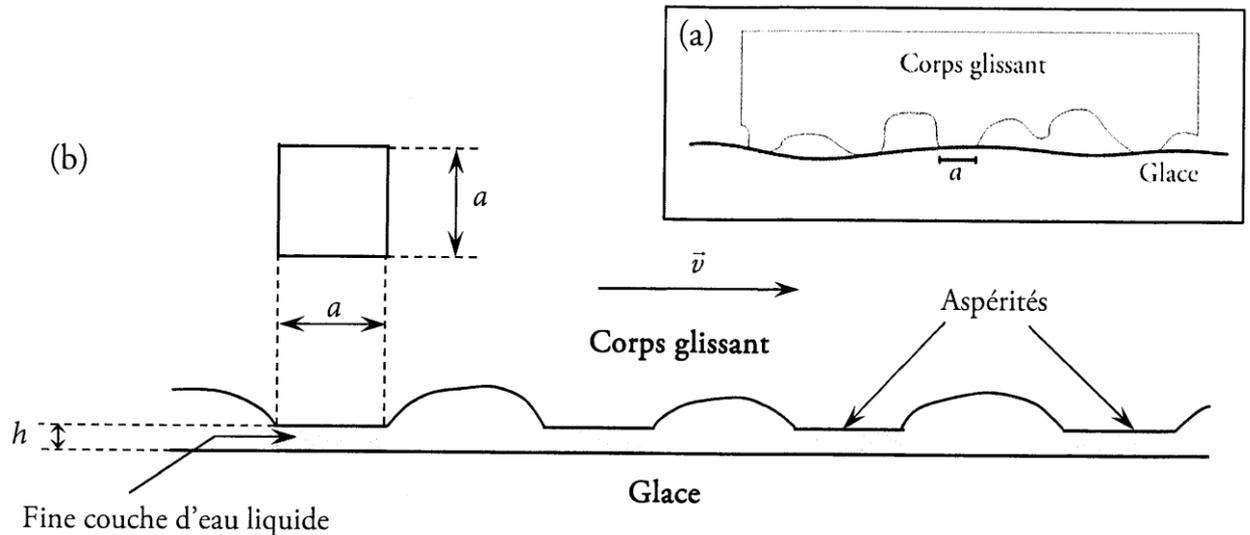


Figure 4 (a) : Schéma d'un contact entre la glace et un corps plus dur. **(b)** Modélisation du contact entre la glace et le corps glissant.

On définit la dureté (d'indentation) H de la glace par la relation $H = \frac{\|\vec{N}\|}{na^2}$ où \vec{N} a la même signification que dans la **partie II.1**. C'est le rapport de la norme de la force de réaction normale à la surface réelle de contact. Le graphe donnant la dureté de la glace en fonction de la température est représenté **figure 5**. On considère habituellement que la pression de contact au niveau des aspérités est égale à la dureté du matériau le moins dur.

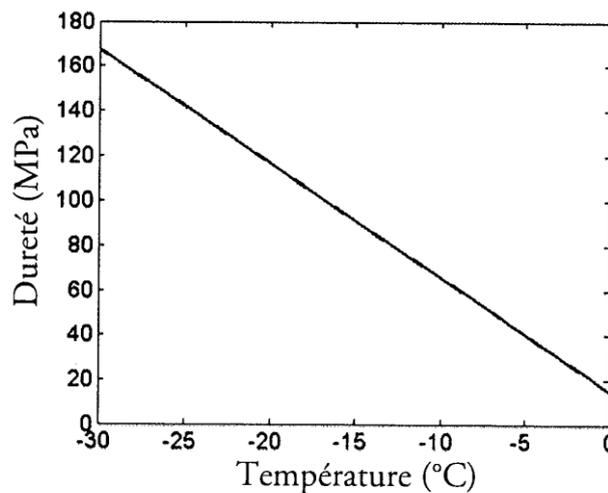


Figure 5. Dureté de la glace en fonction de la température.

Deux modèles ont historiquement été proposés pour expliquer la formation d'un film d'eau.

a) Modèle de Reynolds (1901)

Comme l'eau est plus dense dans sa phase liquide qu'à l'état de glace, on a longtemps cru que la fonte de la glace en surface était liée à un excès de pression dû par exemple au poids du patineur sur la faible surface de ses patins : en comprimant davantage la glace, donc en augmentant la densité localement, on provoquerait ainsi sa fonte. La courbe de fusion de la glace est donnée **figure 6**.

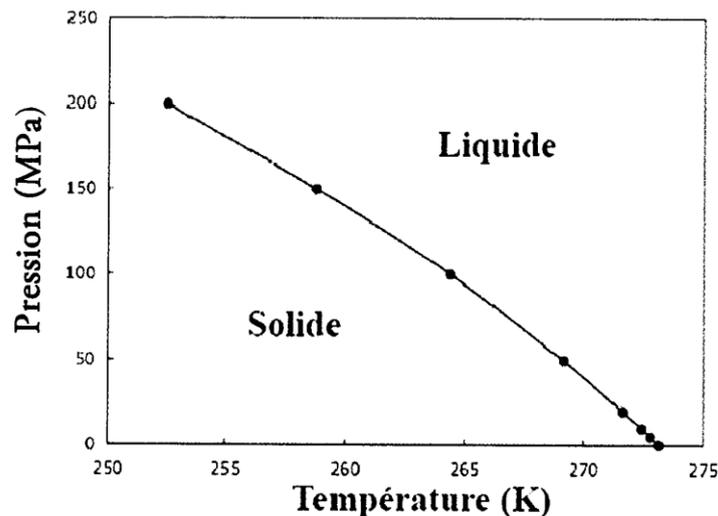


Figure 6. Courbe de fusion de la glace.

On se propose de considérer une expérience qui met en évidence les insuffisances ce modèle.

La **figure 7** 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 **figure 7(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 L égale à 150 mm et de largeur l 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 7(b)**. La température de la glace était de $-13,4 \text{ }^\circ\text{C}$ pendant l'expérience, à l'exception de l'interface avec le patin.

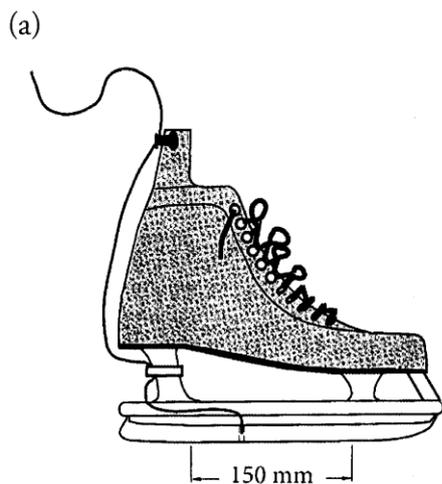


Figure 7(a) Patin utilisé

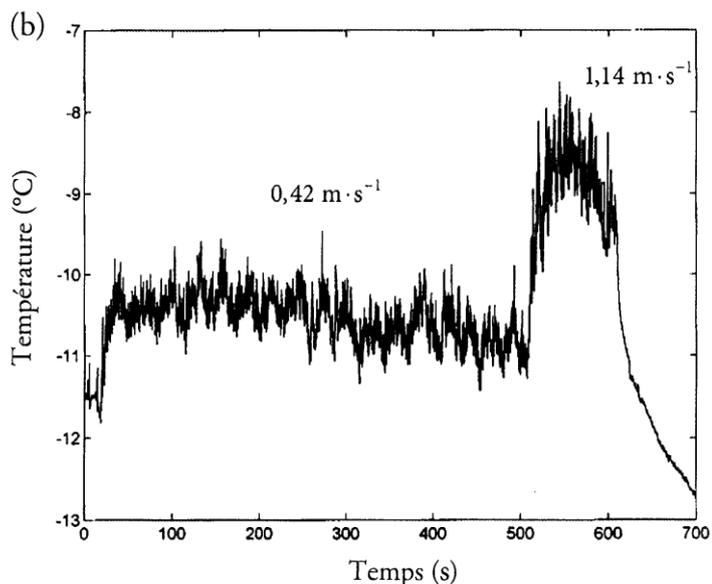


Figure 7(b) Mesure de la température à l'interface lame - glace en fonction du temps.

Q21. La masse de la patineuse est $m = 60 \text{ kg}$. Déduire de la courbe de dureté l'ordre de grandeur de la surface de contact réelle S' entre le patin et la glace. Commenter.

Q22. Evaluer la pression subie au cours de l'expérience par la glace au contact d'une aspérité du patin.

Q23. A l'aide des données expérimentales, donner un argument quantitatif qui montre que le modèle de Reynolds est déficient pour expliquer la formation initiale d'un film d'eau dû à la seule pression.

Q24. Peut-on, dans le modèle de Reynolds proposer une interprétation à la variation de la température à l'interface avec la vitesse au cours de l'expérience ? Une réponse qualitative courte est attendue.

b) Modèle de Bowden (1953)

Un deuxième modèle, proposé par Bowden, est basé sur l'action du frottement d'un solide en mouvement à la surface de l'eau.

On considère à cet effet l'écoulement d'un liquide d'épaisseur h provoqué par le mouvement de translation à la vitesse $\vec{v} = v\vec{u}_x$ constante d'un solide situé à la surface du liquide (**Figure 8**).

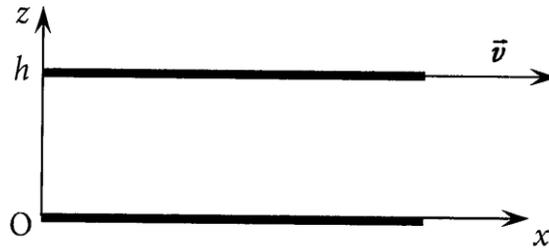


Figure 8. Modélisation de la force de frottement

On peut montrer que la force de frottement par unité de surface exercée par le solide à la surface du liquide s'écrit :

$$\vec{f}_T = \eta \frac{v}{h} \vec{u}_x$$

où η correspond à la viscosité du liquide.

On cherche d'abord à estimer l'épaisseur h d'eau liquide formée pendant la durée de déplacement $\tau = \frac{a}{v}$ d'une aspérité au contact de la glace (**figure 4**), en considérant que, sous l'action de la force de frottement, toute l'épaisseur h d'eau glace se transforme en eau liquide.

On considère comme système le volume d'eau fixe qui va se liquéfier pendant la durée τ sous l'action d'une aspérité. On se restreint dans cette étude à des températures de glace initialement comprises entre 0° et -7°C .

Q25. Montrer que l'énergie massique nécessaire à la variation de température de l'eau pour porter à température de solidification est négligeable devant l'énergie massique nécessaire à la liquéfaction.

On considère dans la suite pour simplifier l'étude que l'eau solide est initialement à la température de fusion à la pression imposée par le patin. On néglige de plus les variations de l'enthalpie de fusion l_f avec la température.

Q26. Exprimer le travail mécanique fourni par l'aspérité à l'eau pendant la durée τ en fonction de η , v , h et a .

Q27. A l'aide d'un bilan d'énergie, en déduire l'expression de la hauteur d'eau h qui fond pendant la durée τ en fonction de ρ , l_f , η , v et a .

Q28. En déduire l'expression de la force de frottement totale subie par le corps glissant.

Q29. A l'aide des lois de Coulomb, en déduire l'expression du coefficient de frottement f_d en fonction de H , a , ρ , l_f , η et v .

Proposer une application numérique pour $v = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour une température de glace $\theta = -5^\circ\text{C}$. On prendra $a = 0,1 \text{ mm}$ et $\eta = 3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

La **figure 9** représente des séries de mesures du coefficient de frottement sur la glace en fonction de la vitesse de glissement pour différents matériaux et diverses températures.

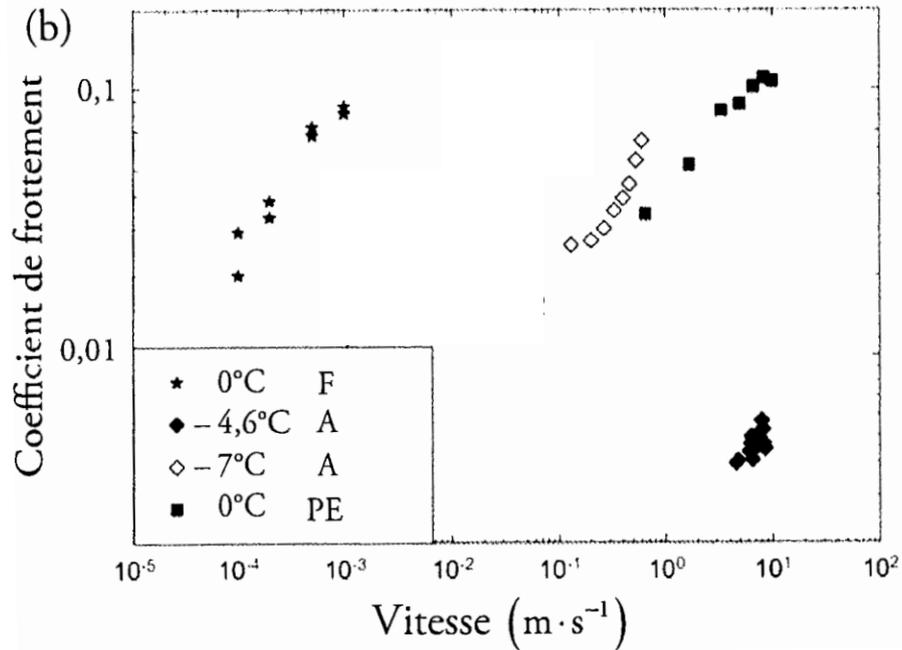


Figure 9. Mesure de coefficients de frottement sur la glace en fonction de la vitesse de glissement pour différents matériaux et diverses températures. A correspond à l'acier.

Q30. Expliquer pourquoi le dispositif de la **figure 2** ne permet pas de faire ces mesures.

Q31. Confronter les courbes expérimentales avec la relation théorique obtenue à la question **29**.

Commenter l'influence de la température dans le cas de l'acier.

Q32. Lorsque la température de la glace est initialement beaucoup plus basse, on constate que le coefficient de frottement diminue quand la vitesse augmente. Quelle(s) insuffisance(s) pouvez-vous proposer au modèle théorique précédent ?

III. Glace et comètes

Une comète est un mélange de roche et de glace constitué autour d'un noyau. À l'approche de notre étoile, cette glace mélangée à des poussières se sublime – passage de l'état solide à l'état gazeux – pour former une traînée vaporeuse que l'on appelle la chevelure. C'est à ce moment que cet astre devient comète.

La comète Tchouri a été rendue célèbre par la mission Rosetta en 2014 qui a réalisé la prouesse technologique d'y envoyer le robot Philae faire des prélèvements in-situ. Le télescope Subaru installé à plus de 4000 mètres d'altitude sur l'île d'Hawaï a pu prendre une photo de cette comète en 2016 mettant en évidence de nombreux détails

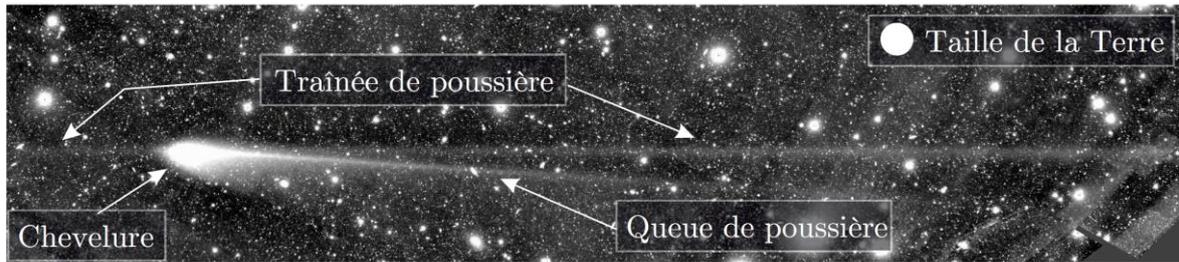


Photo 1. Photo de la comète Tchouri prise avec le télescope Subaru prise le 8 mars 2016 alors que la comète se trouvait entre les orbites de Mars et de Jupiter. Le temps de pose de la photo est de 6 minutes. La taille caractéristique de cette chevelure est de l'ordre de 10^5 km.

III.1. Trajectoire

On assimile la comète à un point matériel M de masse m soumis au seul champ de gravitation du Soleil de masse M_{\odot} . On note \overrightarrow{OM} le vecteur position de la comète dans le référentiel héliocentrique supposé galiléen et $r = \|\overrightarrow{OM}\|$.

Q33. Le soleil étant assimilé à un point matériel de masse M_{\odot} , montrer que la force d'interaction entre le soleil et la comète dérive d'une énergie potentielle $E_p(r)$ et établir son expression en fonction des données du problème.

Q34. Montrer que la trajectoire de la comète est contenue dans un plan que l'on précisera.

Q35. A quelle(s) condition(s) sur l'énergie mécanique E_m de la comète le mouvement de M vérifie-t-il $r_{min} < r < r_{max} < \infty$ avec $r_{min} \neq r_{max}$? Justifier la réponse. On exprimera au besoin cette (ces) condition(s) en fonction de $L_0 = \|\overrightarrow{OM}(t=0) \wedge m\vec{v}(t=0)\|$ et des données du problème.

On suppose désormais que la condition de la question **Q41** est vérifiée. On admet que la trajectoire est une ellipse dont les caractéristiques sont données sur la **figure 10** ci-dessous. Les distances minimales et maximales au soleil notées r_{min} et r_{max} sont respectivement appelées périhélie et aphélie de la trajectoire. a est le demi-grand axe de l'ellipse, e son excentricité.

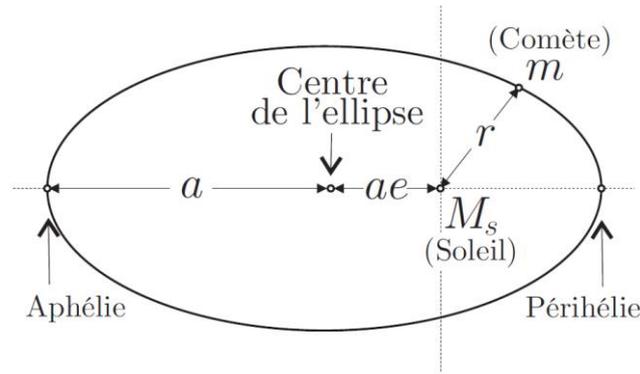


Figure 10. Caractéristiques de la trajectoire elliptique

Q36. Etablir une équation du second degré en r dont r_{min} et r_{max} sont solutions. En déduire l'expression de E_m en fonction de G, m, M_\odot et a .

Q37. Établir la troisième loi de Kepler dans le cas particulier d'une trajectoire circulaire de rayon r_0 . On admettra sa généralisation dans le cas de l'ellipse moyennant de remplacer r_0 par a .

Q38. La comète Tchouri possède une période de 6.44 ans et un périhélie de 1,243 ua. En déduire les valeurs de l'excentricité ainsi que du demi-grand axe et de l'aphélie (exprimées en ua).

Q39. La **photo 1** a été prise lorsque la comète se trouvait à environ 350 millions de kilomètres du Soleil. Estimer la vitesse de la comète à l'aide de la photo. Comparer avec valeur attendue.

III.2. Sublimation ?

On peut se demander si, les comètes étant constituées de glace, leur passage au voisinage du Soleil ne va pas les détruire. Plus précisément, on veut estimer à partir de quelle taille une comète résiste à un passage près du Soleil sans être détruite par la chaleur de notre étoile.

La constante solaire, notée ici Φ_\odot , correspond au flux d'énergie solaire, mesuré au niveau de la Terre (située à la distance D_T du Soleil, c'est-à-dire la puissance reçue du Soleil par unité de surface, perpendiculairement à la direction du Soleil).

Pour simplifier, on considère une comète qui partant de l'infini avec une vitesse nulle tomberait vers le Soleil. On cherche à estimer l'épaisseur de glace que perd cette comète au cours de sa chute, via la sublimation de son noyau de glace. On note $R_c(t)$ le rayon de la comète, supposée sphérique, à un instant t .

Q40. On ne prend dans un premier temps pas en compte la sublimation de la comète. On note $a(t)$ la distance de la comète au soleil à l'instant t . Exprimer $\frac{da}{dt}$ en fonction de $a(t)$ et des données du problème.

On cherche désormais à prendre en compte la sublimation de la comète au cours de sa chute.

Q41. On suppose lors de la sublimation, la matière est éjectée avec la même vitesse que la comète. Justifier que la relation précédente n'est pas modifiée.

Q42. Exprimer le flux d'énergie solaire $\Phi(t)$ à la distance $a(t)$ en fonction de D_T et de Φ_{\odot} .

Q43. On suppose que la comète absorbe tout le flux solaire qu'elle intercepte. Exprimer la perte de masse par unité de temps $\frac{dM}{dt}$ de la comète à la distance $a(t)$ en fonction de $a(t)$, $R_c(t)$ et des données du problème. Exprimer la variation d'épaisseur de glace dR_c correspondant à la perte de masse dM .

Estimer l'ordre de grandeur de la perte de masse lorsque la comète était à 350 millions de kilomètres du soleil avec un rayon de l'ordre de 3 km.

Q44. Calculer l'épaisseur totale de glace sublimée quand la comète passe de l'infini à la surface du Soleil et comparer cette épaisseur à la taille typique d'un noyau de comète, qui est de 10 km. Commenter.

Q45. En supposant que l'ordre de grandeur précédent reste valable pour la comète Tchouri, quelle serait sa durée de vie ? Estimer le nombre de passages autour du soleil. Discuter brièvement du modèle choisi.

À partir des données fournies par la sonde Rosetta de l'ESA sur la comète Tchouri, des chercheurs, ont pu en réalité mettre en évidence la première preuve de l'existence d'un cycle quotidien de « régénération » de la glace d'eau à la surface de la comète.

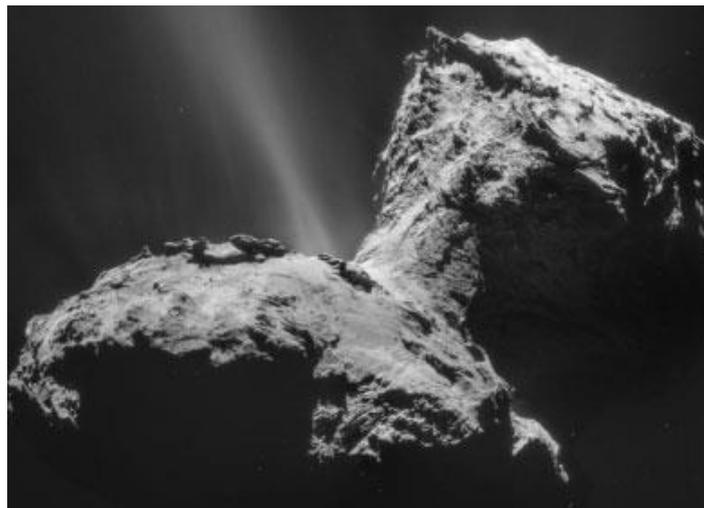


Photo 2. La comète Tchouri
© ESA/Rosetta/NAVCAM

Données numériques utiles

Norme de l'accélération de pesanteur $g = 9.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Masse volumique de la glace $\rho_g = 0,917 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Masse volumique de l'eau liquide $\rho_\ell = 1,0 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

Enthalpie massique de fusion de la glace à pression atmosphérique $\ell_f = 333,5 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

Enthalpie massique de sublimation de la glace : $l_s = 2.10^3 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_\ell = 4,18 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}$

Capacité thermique massique de l'eau glace $c_s = 2,06 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}$

Masse du soleil : $M_\odot = 2.10^{30} \text{ kg}$

Rayon du soleil : $R_\odot = 7.10^8 \text{ kg}$

Constante solaire : $\Phi_\odot = 1362 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

Distance Terre-Soleil : $D_T = 1,5.10^{11} \text{ m}$

Unité astronomique : $1 \text{ u a} = 1,5.10^{11} \text{ m}$

Masse comète Tchouri : $m = (1,0 \pm 0,1) \times 10^{13} \text{ kg}$

Rayon comète Tchouri : $R_c = 3 \text{ km}$

Constante de gravitation : $G = 6,67.10^{-11} \text{ m}^{-3} \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Annexe A : commandes Python

<code>numpy.empty(N)</code>	renvoie un tableau de taille égale à N, sans initialiser les éléments du tableau.
<code>numpy.mean(a)</code>	renvoie la moyenne arithmétique des éléments du tableau a.
<code>numpy.std(a)</code>	renvoie l'écart-type des éléments du tableau a.
<code>numpy.random.uniform(a, b)</code>	renvoie une réalisation (sous la forme d'un nombre de type float) d'une variable aléatoire suivant une loi uniforme sur l'intervalle $[a, b]$

Annexe B : diagramme enthalpique R 134a

