

Concours général des lycées

Épreuve de physique-chimie

Session 2022

Rapport du jury

1. Composition du jury

M. François VANDENBROUCK, inspecteur général de l'éducation, du sport et de la recherche, président du jury

Mme Mélanie PERRIN, inspectrice d'académie, inspectrice pédagogique régionale, vice-présidente du jury

Mme Muriel COQUELIN, professeure agrégée, académie de Normandie

M. Clément DEBLIECK, professeur agrégé, académie de Lille

Mme Karine FAYON, professeure agrégée, académie de Créteil

M. Pierre JAMONNEAU, professeur agrégé, académie de Reims

Mme Patricia KESTER professeure agrégée, académie de Versailles

Mme Caroline NOLORGUES-NAVINEL, professeure agrégée, académie de Versailles

M. Jean-Christophe PELHATE, professeur agrégé, académie de Versailles

Mme Élise PRALY, professeure agrégée, académie de Grenoble

M. Quentin ROVEILLO, professeur agrégé, académie de Lille

Mme Clara SCHATTNER, professeure agrégée, académie de Créteil

M. Pierre TOGNETTI, professeur agrégé, académie de Paris

2. Statistiques

La session 2022 a vu concourir 2547 candidats, soit un peu plus de 97% des 2631 candidats inscrits. Ce taux élevé révèle l'engagement fort et remarquable des candidats à préparer l'épreuve écrite de physique-chimie du concours général des lycées. Le nombre de candidats est en augmentation sensible par rapport à la session 2021, ce dont le jury se réjouit.

L'ensemble des candidats inscrits à la session 2022 se répartissent comme suit selon leur genre et leur origine territoriale.

Académie	Garçons	Filles
Aix-Marseille	70	29
Amiens	15	19
Besançon	15	3
Bordeaux	55	27
Clermont-Ferrand	29	11
Corse	1	0
Créteil	112	74
Dijon	30	15
Grenoble	50	32
Guadeloupe	2	1
Lille	72	31
Limoges	7	2
Lyon	116	59
Martinique	4	0
Montpellier	73	35
Nancy-Metz	30	18
Nantes	64	25
Nice	49	26
Normandie	42	22
Orléans-Tours	36	19
Paris	181	98
Poitiers	26	18
Polynésie Française	9	4
Reims	13	6
Rennes	62	24
Réunion	11	5
Strasbourg	43	20
Toulouse	134	59
Versailles	234	105
Lycées français à l'étranger	154	105
Totaux	1739	892

On dénombre donc 34% de filles parmi les inscrits, alors qu'elles représentent 47,4% des élèves qui suivent l'enseignement de spécialité physique-chimie en terminale générale à la rentrée 2021¹. Le jury forme le vœu que davantage de filles soient présentées à l'épreuve de physique-chimie du concours général des lycées lors des sessions futures.

Les candidats des lycées français à l'étranger représentent 36 pays différents. Ils se répartissent comme suit :

1. Note d'information de la DEPP n° 21.41, décembre 2021.

Ambassade	Filles	Garçons
Ambassade de France en Algérie	3	2
Ambassade de France en Allemagne	4	5
Ambassade de France en Arabie Saoudite	0	2
Ambassade de France en Australie	1	0
Ambassade de France en Autriche	5	2
Ambassade de France en Belgique	6	2
Ambassade de France au Canada	1	0
Ambassade de France en Chine	5	1
Ambassade de France en Colombie	5	2
Ambassade de France au Congo	1	0
Ambassade de France en Côte d'Ivoire	1	2
Ambassade de France au Danemark	2	1
Ambassade de France en Égypte	6	8
Ambassade de France aux Émirats Arabes Unis	1	0
Ambassade de France en Espagne	7	8
Ambassade de France aux États-Unis	0	1
Ambassade de France au Gabon	2	2
Ambassade de France au Honduras	1	0
Ambassade de France en Italie	5	1
Ambassade de France au Liban	21	10
Ambassade de France au Luxembourg	3	7
Ambassade de France au Maroc	37	23
Ambassade de France à Maurice	2	4
Ambassade de France à Monaco	3	2
Ambassade de France en Pologne	3	0
Ambassade de France au Qatar	5	1
Ambassade de France en Roumanie	1	3
Ambassade de France au Royaume-Uni	4	2
Ambassade de France en Russie	1	1
Ambassade de France au Sénégal	1	2
Ambassade de France à Singapour	3	0
Ambassade de France en Suisse	2	0
Ambassade de France à Taïwan	2	0
Ambassade de France en Tunisie	9	10
Ambassade de France en Turquie	0	1
Ambassade de France au Viet-Nâm	1	0

3. Commentaires sur l'épreuve écrite

L'épreuve de la session 2022 porte sur quelques aspects de la physique et de la chimie des glaces polaires. Le sujet comporte sept parties largement indépendantes. Il débute par une première partie traitant des propriétés chimiques de l'eau et de la structure cristalline de la glace. La deuxième partie aborde les conséquences de la dissolution du dioxyde de carbone sur les équilibres acido-basiques des océans. La troisième partie est une étude en ordre de grandeurs de la fonte des calottes polaires. La quatrième partie s'intéresse au suivi de l'épaisseur des calottes polaires. La cinquième partie propose une étude mécanique du déplacement d'une motoneige. La sixième partie étudie l'évolution de la température de surface des glaces polaires. Le sujet se termine par une méthode de datation d'une carotte glaciaire. De nombreux candidats ont abordé un nombre important de questions et ont ainsi réussi à bien avancer dans le sujet. Le jury constate avec satisfaction que les questions ouvertes et la résolution de problème ont été abordées par de nombreux candidats, qui en ont tiré profit.

3.1 Remarques à propos des réponses apportées par les candidats

Partie I

3. Peu de candidats se sont appuyés sur un schéma pour montrer l'existence d'un moment dipolaire dans la molécule d'eau.
6. À ce niveau d'études en physique-chimie, les membres du jury attendent que toute application numérique soit précédée d'un calcul littéral. Certains candidats ont manqué de regard critique sur le résultat obtenu.

Partie II

7. Beaucoup de candidats reformulent le texte sans apporter de commentaires pertinents.
15. La première partie de la question a été bien réussie par les candidats. Dans la seconde partie, très peu ont interprété la courbe fournie à l'aide de l'expression obtenue et du diagramme de prédominance.
18. De nombreux candidats ont abordé la résolution de problème. Les démarches, même non abouties, ont été valorisées. Le graphique fourni n'a pas souvent été utilisé. Beaucoup de candidats ont utilisé la masse molaire du carbone au lieu de celle de l'ion hydrogénocarbonate.

Partie III

20. De nombreux candidats ont bien pensé à voir le problème comme une coquille autour d'une sphère. Le jury a valorisé les candidats ayant pensé à introduire la proportion des océans sur la surface de la Terre. Malheureusement, certains candidats n'ont pas su convertir correctement les unités de l'énoncé. Des erreurs concernant la surface d'une sphère ont été observées.
22. La notion de moyenne a posé problème à de nombreux candidats.
26. Certains candidats n'ont pas tenu compte de leur résultat à la question précédente et ont gardé la poussée d'Archimède exercée par l'air sur le glaçon dans leur bilan des forces.
27. La démonstration montrant que la position de l'interface reste inchangée a rarement été faite. L'interprétation du résultat a été bien réussie.

Partie IV

28. Question bien réussie. Certains candidats ont démontré la valeur de la constante de la troisième loi de Kepler alors qu'elle était donnée en annexe.
29. De nombreux candidats confondent les ondes sonores et les ondes électromagnétiques. De plus, beaucoup de candidats ne connaissent pas les différents domaines des ondes électromagnétiques.
- 30 et 31. Questions bien réussies.
32. La définition de la résolution temporelle n'était pas forcément explicitée. Les candidats ont manqué de recul sur la valeur trouvée.
33. Le lien entre les documents et la loi de Snell-Descartes a été rarement fait.
34. Le jury rappelle qu'une analyse dimensionnelle n'est pas une démonstration.
- 35 à 41. Questions peu traitées.

Partie V

- 42 et 43. Peu de candidats s'appuient sur un schéma et rappellent le système étudié ainsi que le référentiel d'étude. La deuxième loi de Newton doit d'abord être écrite sous forme vectorielle avant d'être projetée sur les différents axes.
- 44 à 46. Questions très peu souvent abordées.

Partie VI

47. Le jury regrette l'absence de schéma définissant les différentes grandeurs introduites. Attention à l'homogénéité des formules écrites.
- 49 et 50. L'explication de la valeur de E à choisir et l'interprétation sur les mesures ont été difficiles.
51. L'utilisation des différents documents pour déterminer la température a été bien réussie.
52. Relativement peu de candidats ont abordé cette question en rapport à un script Python. Le jury attendait une appropriation du script donné dans l'énoncé en vue de l'adapter au cas proposé et non une simple réécriture. Toute démarche cohérente allant dans la bonne direction a été valorisée par le jury.
54. La définition de la résistance thermique est bien connue des candidats.

55. Peu de candidats ont fait le lien avec la présence de bulles d'air dans la neige fraîche et la laine de verre.
 57. Très peu de candidats ont démontré que l'air froid pouvait tomber au fond.
 58. L'utilisation des deux échelles de température des documents a posé problème.

Partie VII

59. La définition d'un isotope est bien comprise.
 60-61. Les candidats ont su mettre en lien les documents fournis.
 62. La charge des particules est ici égale à e et non à $-e$.
 63. L'utilisation de la base de Frenet et la manipulation des vecteurs étaient parfois hasardeuses. Très peu de candidats ont pensé à utiliser le théorème de l'énergie cinétique.
 68-69. Les graphiques ont été bien compris.

3.2 Conseils aux futurs candidats

Le jury attend des candidats que la présentation de leurs copies soit soignée, et que leurs réponses soient claires, précises, et accompagnées, le cas échéant, de schémas explicites. Il importe que les candidats justifient leurs affirmations et s'expriment au moyen du vocabulaire scientifique adapté. Les candidats doivent se montrer attentifs au respect de l'homogénéité des relations littérales qu'ils établissent. Le jury rappelle qu'une expression non homogène est nécessairement erronée, mais qu'à l'inverse, une relation homogène n'est pas forcément juste. Chaque application numérique doit être précédée d'une relation exprimée sous forme littérale. Les valeurs numériques doivent toujours être accompagnées de l'unité correspondante. Certaines questions demandent une prise d'initiative du candidat : toute démarche, même non aboutie, est valorisée.

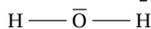
3.3 Proposition de corrigé

Le corrigé de l'épreuve écrite de physique-chimie de la session 2022 qui suit n'est qu'une proposition qui n'a d'autre but que celui d'aider les futurs candidats dans leur préparation au concours général des lycées. Il ne s'agit donc absolument pas d'un modèle normatif.

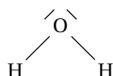
Étude des glaces polaires

I. Propriétés et structure de la glace

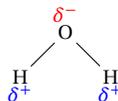
1 – H a un électron de valence et O en a 6, donc le schéma de Lewis de H_2O est :



2 – La molécule d'eau a une géométrie coudée :



3 – On lit dans le tableau périodique que $\chi(\text{O}) = 3,44$ et $\chi(\text{H}) = 2,20$. Les électronégativités de O et H étant différentes, la liaison OH est polarisée :



Du fait de sa géométrie coudée, la molécule d'eau est donc polaire.

4 – Dans la glace, les molécules d'eau interagissent en établissant des liaisons hydrogène.

5 – Les atomes au sommet sont partagés par 8 mailles, ceux au centre des faces par 2 mailles et ceux dans les sites appartiennent en propre à la maille. On en déduit :

$$N = 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} + 4 \times 1 = 8$$

6 – On en déduit la masse volumique :

$$\rho = \frac{NM(\text{H}_2\text{O})}{N_A a^3} = 930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

II. Les conséquences du réchauffement climatique

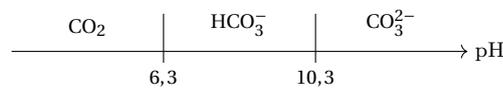
7 – Le réchauffement climatique détruit petit à petit la glace constituant la banquise, ce qui va entraîner une augmentation de la concentration en CO_2 dans l'océan Arctique. Cela risque d'augmenter la température de cet océan et perturber la faune vivant dans cet océan.

8 – L'ion HCO_3^- est une espèce ampholyte.

9 – $\text{pH} = -\log\left(\frac{[\text{H}_3\text{O}^+]}{c^\circ}\right)$.

10 – $\text{pH} = -\log(K^\circ_2) + \log\left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]}\right)$.

11 – $\text{pK}_2 = -\log(K^\circ_2) = 6,3$; $\text{pK}_3 = -\log(K^\circ_3) = 10,3$. On déduit le diagramme de prédominance des espèces associées au dioxyde de carbone :



12 – Comme le domaine de prédominance de CO_2 correspond à une valeur du pH inférieure à 6,3, la dissolution du dioxyde de carbone CO_2 dans les eaux de surface des océans va diminuer la valeur de leur pH.

13 – L'eau, initialement pure, est caractérisée par un pH de valeur égale à 7,0. Lors de l'ajout de CO_2 , on peut donc négliger la présence de l'ion CO_3^{2-} .

14 – Une solution tampon est une solution dont la valeur du pH varie peu par ajout d'espèces acido-basiques extérieures ou par dilution de la solution.

15 – On peut écrire :

$$\begin{aligned} C_t &= [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \\ &= \frac{K^\circ_1 P_{\text{CO}_2} c^\circ}{P^\circ} \left(1 + \frac{K^\circ_2}{[\text{H}_3\text{O}^+]} + \frac{K^\circ_2 K^\circ_3}{[\text{H}_3\text{O}^+]^2} \right) \end{aligned}$$

- Lorsque $\text{pH} < 6,3$, CO_2 prédomine et donc $C_t \approx \frac{K^\circ_1 P_{\text{CO}_2} c^\circ}{P^\circ}$, et par suite : $\log\left(\frac{C_t}{c^\circ}\right)$ est constant (c'est-à-dire indépendant du pH).
- Lorsque le pH a une valeur comprise entre 6,3 et 10,3, l'ion HCO_3^- prédomine. Alors, de façon approchée : $C_t \approx \frac{K^\circ_1 P_{\text{CO}_2} c^\circ}{P^\circ} \frac{K^\circ_2}{[\text{H}_3\text{O}^+]}$ et par conséquent $\log\left(\frac{C_t}{c^\circ}\right)$ varie linéairement en fonction du pH, avec une pente de valeur égale à 1.
- Lorsque le pH a une valeur supérieure à 10,3, l'ion CO_3^{2-} prédomine. Alors, on peut écrire, de façon approchée : $C_t \approx \frac{K^\circ_1 P_{\text{CO}_2} c^\circ}{P^\circ} \frac{K^\circ_2 K^\circ_3}{[\text{H}_3\text{O}^+]^2}$ et par conséquent $\log\left(\frac{C_t}{c^\circ}\right)$ varie linéairement en fonction du pH, avec une pente de valeur égale à 2.

16 – La quantité de carbone inorganique est la plus grande lorsque le pH prend des valeurs élevées. Si la valeur du pH des eaux de surface diminue, alors la capacité des océans à stocker le carbone va également diminuer.

17 – Certaines espèces vivantes ne pourront pas survivre dans des eaux plus acides, ce qui est nuisible à la biodiversité.

18 – Pour un pH de valeur égale à 8,1, on lit sur la courbe que $\log\left(\frac{C_t}{c^\circ}\right) = -3,2$, ce qui conduit à la valeur : $C_t = 6,3 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Pour une valeur du pH égale à 8,1, l'espèce issue du dioxyde de carbone qui prédomine est HCO_3^- . Par conséquent, on peut écrire (de façon approchée) que $C_t = [\text{HCO}_3^-]$. On en déduit :

$$m = C_t \times M(\text{HCO}_3^-) \times V = 0,038 \text{ g}$$

III. Fonte des glaces et élévation du niveau des océans

19 – D'après les données, en assimilant l'inlandsis du Groenland à un pavé droit :

$$m_{\text{Groenland}} \simeq (1 \times 10^3 \times 2 \times 10^6 \times 1 \times 10^6 \times 2 \times 10^3) \text{ kg} \simeq 4 \times 10^{18} \text{ kg}$$

$$m_{\text{Antarctique}} \simeq (1 \times 10^3 \times 11,4 \times 10^{13} \times 2 \times 10^3) \text{ kg} \simeq 3 \times 10^{19} \text{ kg}$$

On trouve un rapport sur les ordres de grandeur d'environ 10% en accord avec le document 4. En revanche, la masse totale est environ 3×10^{19} kg soit trente millions de milliards de tonnes (oubli d'un facteur 10^7 dans le document 4).

20 – En assimilant l'incrément de hauteur d'eau à une pellicule d'épaisseur h à la surface d'une sphère de rayon $R_T \gg h$, il vient

$$\frac{m_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} = 4\pi R_T^2 h \quad \text{soit} \quad h = \frac{m_{\text{eau}}}{4\pi R_T^2 \rho_{\text{eau}}} = \left(\frac{2,5 \times 10^{15}}{13 \times (6,4 \times 10^6)^2 \times 1 \times 10^3} \right) \text{ m} = 5 \text{ mm}$$

ce qui est proche de la valeur, quoiqu'un peu inférieur. Ce n'est guère surprenant puisque l'on a ici supposé la Terre recouverte d'océans. En multipliant la masse d'eau par un facteur 10^4 , on multiplie h du même facteur soit une élévation de 50 m. Idem : en accord avec l'article, valeur sous-estimée car on n'a pas pris en compte les continents.

21 – Une année de chute de neige correspond à $2,5 \times 10^{15}$ kg,

$$(2,5 \times 10^{15} \times 1,2 \times 10^4) \text{ kg} = 3 \times 10^{19} \text{ kg}$$

On retrouve bien la masse calculée à la question précédente.

22 – Sur le document 2, on observe une diminution moyenne δV comprise entre 2×10^2 et $5 \times 10^2 \text{ km}^3$ du volume sur 4,5 ans, soit

$$h = \frac{\delta V}{4\pi R_T^2} \quad \text{entre } 0,4 \text{ et } 1 \text{ mm}$$

23 – Notons V_{im} le volume immergé du glaçon. La poussée d'Archimède de l'eau liquide sur le glaçon est alors $\rho_{\ell} V_{\text{im}} g$.

24 – Notons V_a le volume émergé. La poussée d'Archimède de l'air sur le glaçon est alors $\rho_a V_a g$.

25 – Pour un glaçon, prenons $V_{\text{im}} \simeq V_a$, il vient

$$\frac{\rho_{\ell} V_{\text{im}} g}{\rho_a V_a g} \simeq \frac{\rho_{\ell}}{\rho_a} \simeq 10^3$$

La poussée d'Archimède due à l'air est donc négligeable devant celle due au liquide.

26 – Dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen, la deuxième loi de Newton appliquée au glaçon à l'équilibre donne (en projection sur la verticale) :

$$\rho_{\ell} V_{\text{im}} g = \rho_g (V_a + V_{\text{im}}) g \quad \text{d'où} \quad \frac{V_{\text{im}}}{V_a + V_{\text{im}}} = \frac{\rho_g}{\rho_{\ell}} = 0,91$$

Le volume immergé représente 91% du volume total du glaçon. En transposant ce résultat à l'iceberg, on en déduit que la partie émergée de l'iceberg représente seulement 9% de son volume. L'affirmation est correcte.

27 – Par conservation de la masse, lorsque le glaçon a fondu, l'eau qui le constituait occupe le volume V_{ℓ} tel que

$$V_{\ell} = \frac{\rho_g (V_a + V_{\text{im}})}{\rho_{\ell}} = V_{\text{im}}$$

Il s'ensuit qu'une fois fondue, l'eau du glaçon occupe exactement le volume V_{im} donc le niveau du liquide n'a pas changé. Cela suggère que la fonte des icebergs ne s'accompagne pas d'une élévation du niveau des océans. Ce n'est pas en contradiction avec le document 4, car les inlandsis ne sont pas des icebergs géants qui flottent : ils reposent sur des continents rocheux (deuxième phrase du document 4). Contrairement à la fonte des icebergs, la fonte des inlandsis s'accompagne d'une élévation de niveau des océans.

IV. Suivi satellitaire de la surface des calottes polaires

28 – On transpose la troisième loi de Kepler au système Sentinel-1A / Terre :

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\mathcal{G} M_{\text{Terre}}} \quad \text{d'où} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mathcal{G} M_{\text{Terre}}}} = \left(2\pi \sqrt{\frac{(7,1 \times 10^6)^3}{6,7 \times 10^{-11} \times 6 \times 10^{24}}} \right) \text{s} = 5,9 \times 10^3 \text{s} = 99 \text{ min}$$

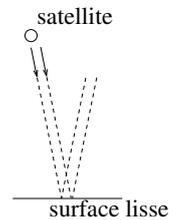
29 – Ce sont des micro-ondes qui sont utilisées dans les fours micro-ondes, le WIFI, la téléphonie portable.

30 – D'après la relation de dispersion du vide, $\lambda = c/f = (3,0 \times 10^8 / 5,3 \times 10^9) \text{ m} = 5,7 \text{ cm}$. Pour $\lambda > 2 \text{ cm}$ la transmission relative vaut 1. Au contraire pour les longueurs d'ondes plus petites la transmission est inférieure. Le choix $\lambda \approx 6 \text{ cm}$ permet d'avoir une transmission relative maximale.

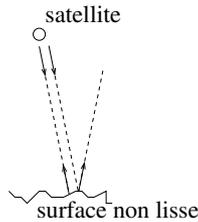
31 – L'onde doit parcourir $2d \approx 2 \times 700 \text{ km}$. Il lui faut $2d/c \approx 5 \text{ ms}$.

32 – On peut définir la résolution temporelle du capteur comme étant la durée minimale entre deux événements que le capteur permet de discerner. Une variation de $\delta = 1 \text{ cm}$ ($\times 2$) entraîne une variation de la durée du trajet de $2\delta/c = (2 \times 10^{-2} / (3 \times 10^8)) \text{ s} \approx 0,1 \text{ ns}$. Il faudrait une meilleure résolution que 0,1 ns, ce qui est techniquement difficile à atteindre.

33 – Si la surface est constituée de cailloux ou d'aspérités de petite taille en comparaison de la longueur d'onde, elle est « lisse » (du point de vue de l'onde). La loi de Snell-Descartes pour la réflexion conduit au schéma ci-contre. L'onde réfléchie ne revient pas vers le satellite et la surface est « sombre ».



En revanche, si des rochers de grande taille en comparaison de λ sont présents, alors on peut penser qu'il y a toujours un peu de réflexion vers le satellite :



Enfin, les aspérités de taille comparable (voire supérieure) à la longueur d'onde conduisent à de la diffraction, ce qui explique qu'une partie de l'onde est réfléchie vers le satellite, dès que des aspérités de taille comparable ou supérieure à λ sont présentes (la surface n'est pas « lisse »).

34 – Écrivons que : $\Psi(x + \lambda, t) = A(x + \lambda) \cos \left[2\pi \left(ft - \frac{x + \lambda}{\lambda} \right) \right] = A(x) \cos \left[2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) - 2\pi \right]$ (car $A(x + \lambda) \approx A(x)$ par hypothèse) donc $\Psi(x + \lambda, t) = \Psi(x, t)$, ce qui prouve que λ est la longueur d'onde. De même,

$$\Psi(x, t + 1/f) = A(x) \cos \left[2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right) + 2\pi \right] = \Psi(x, t)$$

donc $1/f$ est la période, donc f est la fréquence. Par hypothèse, la réflexion n'entraîne pas de changement de longueur d'onde donc $\lambda' = \lambda$. D'après la relation de dispersion du vide, $f' = c/\lambda' = c/\lambda = f$. Enfin l'hypothèse de continuité de la phase en $x = d$ donne

$$-\frac{2\pi d}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} + \Phi_0 \quad \text{d'où} \quad \Phi_0 = -\frac{4\pi d}{\lambda}$$

35 – $\Delta\Phi = \Phi'(O, t) - \Phi(O, t) = -4\pi d/\lambda$.

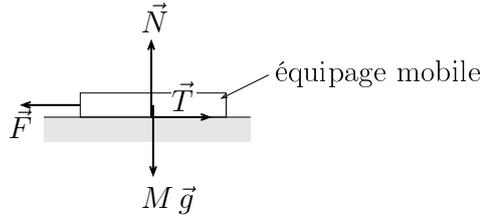
36 – Pour $d = 2,85 \text{ cm}$, $\Delta\Phi = -2\pi \times \frac{5,7}{5,7} = 0 - 1 \times 2\pi = -2\pi$ rad (ou 2π rad car $0 - 1 \times 2\pi = 2\pi - 2 \times 2\pi$, ces points de mesure sont assez sensibles au bruit de détection). Pour $d = 5,6 \text{ cm}$, $\Delta\Phi = 0,05 \times 2\pi - 2 \times 2\pi$ donc $0,05 \times 2\pi$ rad. Pour $d = 6,9 \text{ cm}$, $\Delta\Phi = -2\pi \times \frac{13,8}{5,7} = -3 \times 2\pi + 1,2\pi$, le système enregistre $1,2\pi$ rad.

37 – Les discontinuités correspondent aux sauts de phase lorsque $\Delta\Phi$ passe de $2\pi^-$ à $2\pi^+$.

- 38 – On part du point A (déplacement nul). $d_B \approx 2,85 \text{ cm}$; $d_C \approx (5,7 \text{ cm} + \frac{\lambda}{10}) = 6,4 \text{ cm}$. Au point D (qui correspond à peu près à $2\pi/10$) : $d_D \approx \frac{\lambda}{20} = 3 \text{ mm}$.
- 39 – $\Delta\Phi = -\frac{4d}{\lambda} \pi = -2\pi \times 0,70 = -2\pi + 0,6\pi$. Surface uniformément vert-cyan-turquoise.
- 40 – Par rapport à la méthode de temps de vol, un déplacement d'un centimètre (voire de quelques millimètres) est facilement mesurable.

V. Déplacement en motoneige sur les inlandsis

41 – Le bilan des forces s'appliquant au traîneau est représenté sur le schéma suivant :



Lorsque $v = 0$, $F_0 = T$ et au seuil de rupture du contact $T = f_s N = f_s M g$ d'où $F_0 = f_s M g = 8,0 \times 10^2 \text{ N}$.

42 – Cette fois, $M \dot{v} = F_0 - b v - f_d M g$, d'où $\dot{v} + \frac{b}{M} v = \frac{F_0}{M} - f_d g$. Ainsi $v(t) = v_0 (1 - e^{-bt/M})$ et $5 \times 10^{-2} = e^{-bt_1/M}$ donc $b = -\frac{M}{t_1} \ln(5 \times 10^{-2}) = 6,0 \times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

43 – La solution particulière v_0 est telle que $v_0 = \frac{1}{b} (F_0 - f_d M g)$, donc $F_0 = b v_0 + f_d M g = 5,9 \times 10^3 \text{ N}$.

44 – La puissance instantanée développée par le moteur est $P(t) = F(t) v(t)$ soit $P = (F_0 - b v) v$ qui est maximale pour $v = \frac{F_0}{2b} = 4,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

(calcul de dérivée ou tracé de l'allure de $P = f(v)$). Il s'ensuit que $P_{\max} = \frac{F_0^2}{4b} = 15 \text{ kW}$.

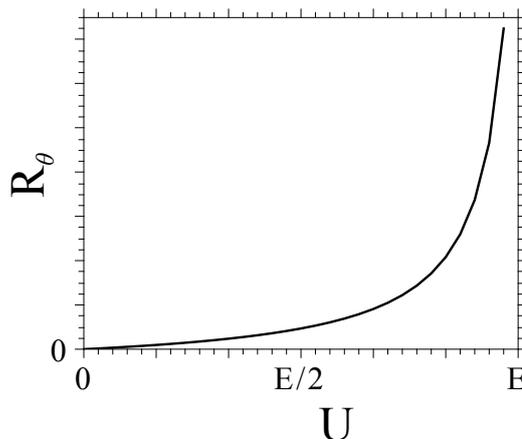
45 – Le moteur le moins performant développe au maximum 41 kW. Tous les moteurs proposés sont acceptables.

VI. Évolution de la température à la surface des inlandsis

VI.1) Détermination de la température avec un thermistor

46 – On remplace le voltmètre par une résistance R_V et on obtient $U = \frac{R_\theta R_V}{R(R_\theta + R_V) + R_\theta R_V} E$.

47 – Dans l'expression précédente, on remplace $R_V + R_\theta$ par R_V , alors $U = \frac{R_\theta}{R + R_\theta} E$ ce qui conduit à $R_\theta = \frac{U}{E - U} R$. Si la condition $R_V \gg R_\theta$ n'est pas vérifiée, l'introduction du voltmètre modifie la valeur de U (on ne mesure donc pas la tension U aux bornes de R_θ en l'absence de voltmètre).



48 – Lorsque $R_\theta \gg R$, U est proche de l'asymptote verticale $x = E$. Dans cette partie de la courbe, U varie peu même lorsque R_θ varie significativement, c'est-à-dire que la valeur de U est peu sensible à la valeur de R_θ . Au contraire, dans la limite $R_\theta \ll R$, U peut rester faible et les variations de R_θ peuvent ne pas être détectées par manque de sensibilité du voltmètre. Lorsque R_θ est du même ordre de grandeur que R , on évite ces deux situations défavorables. Dans la limite $R_\theta \simeq R$, $U \simeq E/2$.

49 – Si E est trop grand, le thermistor chauffe par effet Joule, ce qui fausse la mesure. Au contraire, si E trop faible, on retrouve la perte de précision évoquée dans la limite $R_\theta \ll R$. La valeur de E résulte d'un compromis entre une faible dissipation par effet Joule et une précision suffisante.

50 – On obtient $R_\theta = 114,80 \text{ k}\Omega$. Avec l'abaque du document 12, il vient $T = -30,425^\circ\text{C}$.

51 – On propose le script suivant :

```
import numpy as np
import numpy.random as rd
```

```
U = .7463
```

```
E = 1.0512
```

```
R = 46900
```

```
uU = 3*1e-4
```

```
uE = 3*1e-4
```

```
uR = 40
```

```
N = 10000
```

```
u = rd.uniform(U-uU, U+uU, N)
```

```
e = rd.uniform(E-uE, E+uE, N)
```

```
r = rd.uniform(R-uR, R+uR, N)
```

```
Rt=u/(e-u)*r
```

```
print('u(Rt) = ', np.std(Rt, ddof=1))
```

52 – Grâce à l'abaque, la pente de la fonction $f: R_\theta \mapsto T$ (fonction réciproque de celle tracée sur l'abaque) est $\left. \frac{-28,0 + 32,0}{103 - 124} \right| = 0,19^\circ\text{C}/\text{k}\Omega$, donc $u(T) = (0,13 \times 0,19)^\circ\text{C} = 2,5 \times 10^{-2}^\circ\text{C}$.

VI.2) Analyse des profils de température

53 – $\Phi = \frac{T(c) - T(0)}{R_{th}}$ avec $R_{th} = \frac{c}{\lambda ab}$

54 – La relation précédente entre Φ , $T(c) - T(0)$ et R_{th} montre qu'à $T(c) - T(0)$ donnée, la puissance thermique transférée est d'autant plus faible que R_{th} est grande. Or $R_{th} \propto 1/\lambda$ donc la puissance thermique transférée est d'autant plus faible que λ est faible.

55 – On constate que moins la neige est tassée, plus sa conductivité thermique est faible et proche de celle de l'air (que de celle de la glace). Or, en tassant la neige, on chasse l'air qu'elle contient. On peut donc penser que c'est l'air emprisonné dans la neige qui détermine sa conductivité. De la même manière, la laine de verre est un bon isolant thermique car elle emprisonne de l'air (en ce sens, la comparaison est légitime).

56 – Poussée d'Archimède : d'après la loi des GP ($P = \rho RT/M$), à pression donnée, plus T est faible, plus ρ est grand. La résultante \vec{F} des forces (poids, poussée d'Archimède) sur une bulle d'air froid de volume V , de masse volumique ρ_f entourée d'air de température supérieure (de masse volumique $\rho_0 < \rho_f$) s'écrit : $\vec{F} = (\rho_0 - \rho_f)Vg\vec{e}_z$ (\vec{e}_z selon la verticale ascendante) ; elle est orientée vers le bas.

57 – Entre 50 et environ 70 m de profondeur, on constate une variabilité de l'ordre de 6 mK. Au-delà de 70 m, elle est inférieure à 3 mK. En comparaison de la variation globale de température (environ 100 mK d'après le graphe de gauche), cela représente quelques pourcents. On montre ainsi que l'allure en « U » du graphe de gauche ne résulte pas d'une éventuelle thermalisation avec l'air extérieur.

VII. Datation de l'âge d'une carotte glaciaire

58 – Deux isotopes sont deux éléments dont le noyau contient le même nombre de protons mais pas le même nombre de nucléons. Pour l'oxygène-18 : 8 protons, 10 neutrons ; pour l'oxygène-16 : 8 protons, 8 neutrons.

59 – On part du marqueur 1980 (hiver car pic vers le bas, cf. doc 16), le point A correspond à l'automne 1972.

60 – On utilise le document 16 comme abaque. Hiver 1980 : $\delta^{18}O = -4,0\%$ donc $-39,5^\circ\text{C}$; été 1980 : $\delta^{18}O = -3,0\%$ donc $-24,5^\circ\text{C}$ (ou $-30,5^\circ\text{C}$) ; point A : $\delta^{18}O = -3,7\%$ donc -35°C .

61 – $\vec{F} = e\vec{E}$. Il faut $\vec{E} \cdot \vec{e}_x > 0$.

62 – En appliquant le théorème de l'énergie cinétique à l'ion dans le référentiel du laboratoire, galiléen, $v = \sqrt{2eEd/m}$, d'où $\vec{v} = \sqrt{2eEd/m}\vec{e}_x$ en L.

63 – On utilise le repère de Frenet. Pour un mouvement circulaire de rayon R , $\vec{v} = v\vec{t}$ et $\vec{a} = \frac{dv}{dt}\vec{t} + \frac{v^2}{R}\vec{n}$. Par application de la seconde loi de Newton à l'ion dans le même référentiel : $m\vec{a} = eV\vec{t} \wedge B\vec{u} = eVB\vec{n}$. En projetant sur \vec{t} , il vient $\frac{dv}{dt} = 0$, ce qui prouve que la norme de la vitesse est constante. En projetant sur \vec{n} , on obtient : $m\frac{v^2}{R} = eVB$ soit $R = \frac{mv}{eB}$.

64 – En combinant les réponses aux questions 62 et 63, on obtient : $R = \sqrt{\frac{2Edm}{eB^2}}$.

Pour $C^{16}O_2^+$, $m = \left(\frac{12,0 + 16,0 \times 2}{6,02 \times 10^{23}}\right) \text{kg} = 7,31 \times 10^{-26} \text{kg}$ donc $R = 21,2 \text{cm}$.

Pour $C^{18}O^{16}O^+$, $m = \left(\frac{12,0 + 16,0 + 18,0}{6,02 \cdot 10^{23}}\right) \text{kg} = 7,64 \times 10^{-26} \text{kg}$ et $R = 21,7 \text{cm}$.

65 – On positionne le capteur pour les ions $C^{16}O_2^+$ à 42,4 cm de L, celui pour les ions $C^{18}O^{16}O^+$ à 43,4 cm de L.

66 – $\delta^{18}O = 100 \times \left(\frac{1}{R_0(1+N_{16}/N_{18})} - 1\right) = -2,80\%$. D'après le document 16, la température était -22°C .

67 – Les quatre zones grisées correspondent à des phases de réchauffement (cf graphe du haut). Pour les réchauffements du XIV^{ème} et du XVII^{ème} siècle, les réchauffements s'accompagnent d'une augmentation des précipitations. Au contraire, les deux réchauffements observés depuis le début de l'ère industrielle ne sont pas corrélés à une augmentation des chutes de neige en Antarctique.

68 – En supposant que la circulation des vents est peu impactée par le réchauffement, on peut proposer que l'évaporation au niveau des océans étant plus importante lors des phases chaudes, il y a aussi plus de précipitations au niveau des pôles (qui restent toujours suffisamment froids pour que ces précipitations correspondent à des chutes de neige).