

CONCOURS GÉNÉRAL DES LYCÉES

—

SESSION 2022

—

PHYSIQUE-CHIMIE

(Classes de terminale voie générale spécialité physique-chimie)

Durée : 5 heures

—

*L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
L'usage de la calculatrice sans mémoire « type collègue » est autorisé.*

Consignes aux candidats

- Ne pas utiliser d'encre claire
- N'utiliser ni colle, ni agrafe
- Numéroté chaque page en bas à droite (numéro de page / nombre total de pages)
- Sur chaque copie, renseigner l'en-tête + l'identification du concours :

Concours / Examen : CGL

Epreuve : 101

Matière : PHCH

Session : 2022

Tournez la page S.V.P.

Étude des glaces polaires



Le candidat est invité à se référer régulièrement à l'annexe qui contient un ensemble de données et de formules utiles. Cette annexe se trouve au début du sujet : il est important d'en prendre connaissance avant de s'engager dans la résolution du problème. Les différents documents présents tout le long du sujet contiennent également des données complémentaires nécessaires à la résolution des questions posées.

Les réponses aux questions ne sauraient être de simples affirmations et devront être accompagnées d'une justification.

Les deux premières parties du sujet, relatives à la chimie, sont indépendantes des parties suivantes qui relèvent davantage de la physique.

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas guidées et demandent de l'initiative de la part du candidat. Les pistes de recherche doivent être consignées par le candidat sur sa copie ; si elles sont pertinentes, elles seront valorisées.

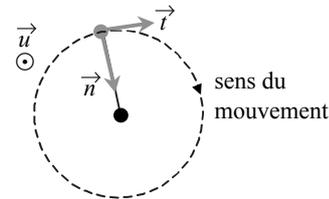
Données physiques utiles

Masse volumique de la glace	$\rho_g = 0,91 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Masse volumique de l'eau liquide	$\rho_\ell = 1,0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Masse volumique de l'air au niveau de la mer	$\rho_a = 1,3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$
Rayon de la Terre	$R_{\text{Terre}} = 6,4 \times 10^3 \text{ km}$
Masse de la Terre	$M_{\text{Terre}} = 6,0 \times 10^{24} \text{ kg}$
Constante gravitationnelle	$\mathcal{G} = 6,7 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
conversion	$1,00 \text{ Hp} = 746 \text{ W}$
Charge élémentaire	$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$
Intensité de la pesanteur terrestre	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Nombre d'Avogadro	$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Valeur de la conductivité thermique de l'air à 20°C	$3 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
Valeur de la conductivité thermique de la glace d'eau pure	$2 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

La constante de la troisième loi de Képler est égale à $\frac{4\pi^2}{\mathcal{G}m}$, où m est la masse de l'astre attracteur.

Pour les vecteurs \vec{n} , \vec{t} et \vec{u} (de norme égale à 1) tels qu'ils sont orientés sur la figure ci-contre, on a les relations :

$$\begin{aligned} a\vec{n} \wedge b\vec{t} &= ab\vec{u}; & a\vec{t} \wedge b\vec{n} &= -ab\vec{u}; \\ a\vec{t} \wedge b\vec{u} &= ab\vec{n}; & a\vec{u} \wedge b\vec{t} &= -ab\vec{n}; \\ a\vec{u} \wedge b\vec{n} &= ab\vec{t}; & a\vec{n} \wedge b\vec{u} &= -ab\vec{t}, \end{aligned}$$



où a et b sont des nombres ou des grandeurs physiques.

Données extraites de Wikipédia

L'inlandsis du Groenland (...) a des dimensions impressionnantes. Sa surface, relativement plate, mesure $2,4 \times 10^3 \text{ km}$ de long et $1,0 \times 10^3 \text{ km}$ de large, et a une altitude moyenne de $2,1 \times 10^3 \text{ m}$. La glace peut atteindre l'épaisseur de $3,0 \times 10^3 \text{ m}$ au centre de l'inlandsis.

L'inlandsis de l'Antarctique a une superficie de $14 \times 10^6 \text{ km}^2$, une épaisseur moyenne supérieure à $2,0 \times 10^3$ mètres et une altitude maximale de $4,0 \times 10^3$ mètres. Il se présente sous la forme d'un immense plateau de glace et de neige aux rebords abrupts donnant naissance aux barrières de Ross et de Filchner.

Tableau périodique des éléments

Pour certains éléments, l'électronégativité selon Pauling est indiquée sous la masse molaire (exprimée en g·mol⁻¹).

1 IA		18 VIIIA															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H Hydrogène	He Hélium	Li Lithium	Be Béryllium	B Bore	C Carbone	N Azote	O Oxygène	F Fluor	Ne Néon	Na Sodium	Mg Magnésium	Al Aluminium	Si Silicium	P Phosphore	S Soufre	Cl Chlore	Ar Argon
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K Potassium	Ca Calcium	Sc Scandium	Ti Titane	V Vanadium	Cr Chrome	Mn Manganèse	Fe Fer	Co Cobalt	Ni Nickel	Cu Cuivre	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Sélénium	Br Brome	Kr Krypton
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb Rubidium	Sr Strontium	Y Yttrium	Zr Zirconium	Nb Niobium	Mo Molybdène	Tc Technétium	Ru Ruthénium	Rh Rhodium	Pd Palladium	Ag Argent	Cd Cadmium	In Indium	Sn Étain	Sb Antimoine	Te Tellure	I Iode	Xe Xénon
55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs Césium	Ba Baryum	La-Lu Lanthanides	Hf Hafnium	Ta Tantale	W Tungstène	Re Rhenium	Os Osmium	Ir Iridium	Pt Platine	Au Or	Hg Mercure	Tl Thallium	Pb Plomb	Bi Bismuth	Po Polonium	At Astate	Rn Radon
87	88	89-103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr Francium	Ra Radium	Ac-Lr Actinides	Rf Rutherfordium	Db Dubnium	Sg Seaborgium	Bh Bohrium	Hs Hassium	Mt Meitnerium	Ds Darmstadtium	Rg Roentgenium	Uub Ununbium	Uut Ununtrium	Uuq Ununquadium	Uup Ununpentium	Uuh Ununhexium	Uus Ununseptium	Uuo Ununoctium
119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136
La Lanthanum	Ce Cérium	Pr Praseodyme	Nd Néodyme	Pm Prométhium	Sm Samarium	Eu Europium	Gd Gadolinium	Tb Terbium	Dy Dysprosium	Ho Holmium	Er Erbium	Tm Thulium	Yb Ytterbium	Lu Lutécium	101	102	103
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106
Ac Actinium	Th Thorium	Pa Protactinium	U Uranium	Np Neptunium	Pu Plutonium	Am Américium	Cm Curium	Bk Berkélium	Cf Californium	Es Einsteinium	Fm Fermium	Md Mendelevium	No Nobelium	Lr Lawrencium	107	108	109
		Z		masse mol.		électronég.		Symbole		Nom							

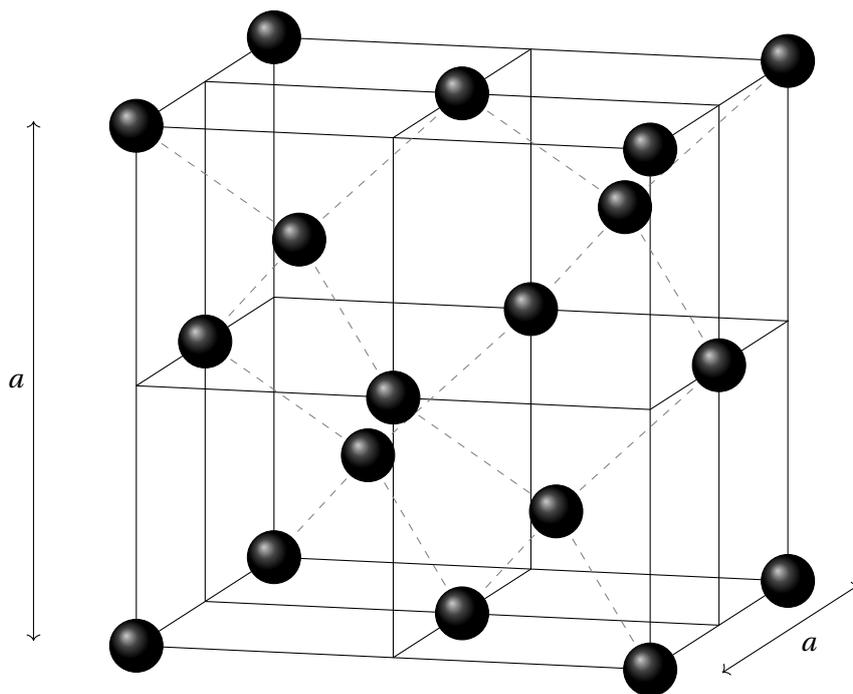
I. Propriétés et structure de la glace

La banquise est principalement constituée de glace. Nous allons étudier ses propriétés et sa structure.

- 1 – Donner la représentation de Lewis de la molécule d'eau H_2O .
- 2 – Donner la géométrie de la molécule d'eau. Représenter la molécule.
- 3 – Expliquer pourquoi la liaison $O - H$ est polarisée. En déduire si la molécule d'eau est polaire ou non.
- 4 – Préciser quelle est l'interaction stabilisante responsable de la cohésion de la glace.

On donne ci-dessous l'une des structures cristallines de la glace.

L'une des structures cristallines de la glace, appelée glace diamant, est représentée dans le document ci-dessous :



Seuls les atomes d'oxygène sont représentés sous la forme de boules sombres pour ne pas surcharger la maille. Chaque atome d'hydrogène se place entre deux atomes d'oxygène. On peut distinguer trois types de position d'atome d'oxygène dans cette maille : des atomes aux sommets du cube, des atomes au centre de chacune des faces du cube et quatre atomes d'oxygène dans des sites appelés sites tétraédriques. Dans la représentation de la maille ci-dessus, chacun des quatre atomes d'oxygène qui occupe un site tétraédrique est relié, par des lignes tiretées, à quatre atomes d'oxygène voisins qui constituent les sommets de quatre tétraèdres.

Le paramètre de maille vaut $a = 635,8 \text{ pm}$.

Doc. 1 – La structure diamant de la glace.

- 5 – Justifier que cette maille contient huit atomes d'oxygène qui lui appartiennent en propre.
- 6 – En déduire la valeur de la masse volumique de cette variété de glace, en utilisant également les données figurant dans l'annexe en début d'énoncé.

II. Les conséquences du réchauffement climatique

L'océan Arctique est la zone la plus touchée par le changement climatique global (IPCC, 2001). L'augmentation de la température moyenne en Arctique, de $2-3^{\circ}\text{C}$ depuis 1950 et de 4°C en hiver, est la plus forte du globe (Chapman et Walsh, 2003). À l'échelle d'une génération, des changements sont déjà perceptibles,

dont le plus remarquable est la réduction de la couverture et de l'épaisseur de la glace. La reconstruction récente de Kinnard et al. (2011) indique que cette diminution du couvert de glace se serait accélérée depuis 1970 et serait sans précédent depuis les 6 derniers siècles. D'après les projections climatiques fournies par des modèles de circulation globale (GCM), le réchauffement climatique devrait se poursuivre. L'augmentation estimée de la température serait de 1°C pour 2020, de 2-3°C en 2050 et 4-5°C en 2080 (IPCC 2007) et devrait amplifier les tendances en cours. Une disparition complète de la banquise arctique a été pronostiquée pour l'été 2040 (Wang et Overland, 2009). Le cycle du carbone de l'Arctique est une autre composante de l'Arctique qui pourrait être rapidement modifiée par le changement climatique. L'Arctique est actuellement un puits important de CO₂ et joue un rôle primordial dans l'équilibre entre les sources et les puits de CO₂ à l'échelle planétaire en contribuant à hauteur de 5 à 14% de la prise nette de CO₂ de l'océan mondial. La couverture de glace, la production biologique, les fleuves et la température sont autant de facteurs qui subissent actuellement des changements (Bates et Mathis, 2009; Jutterström et Anderson, 2010) qui peuvent modifier le puits arctique à CO₂. La réduction de la couverture de glace et l'augmentation de la période libre de glace conduirait à une prise accrue de CO₂ par cet océan polaire sous-saturé en CO₂ (Semiletov et al. 2004; Bates et al., 2006).

Doc. 2 – La fonte des glaces arctiques. D'après Pierre Coupel. *Impact de la fonte de la glace sur le phytoplancton et le CO₂ de l'Océan Arctique. Milieux et Changements globaux.* Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, 2012.

L'équation de la réaction qui modélise la dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau est :



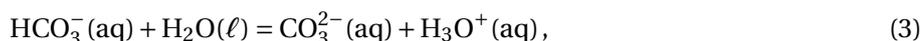
de constante thermodynamique d'équilibre : $K_1^\circ = \frac{[\text{CO}_2(\text{aq})]}{c^\circ} \frac{P^\circ}{P_{\text{CO}_2}} = 3,37 \times 10^{-2}$ à 298 K, où P_{CO_2} représente la pression partielle du dioxyde de carbone dans le mélange gazeux au contact de l'eau. La pression partielle moyenne actuelle du dioxyde de carbone dans l'atmosphère a une valeur égale à 360 μbar. La pression standard vaut : $P^\circ = 1$ bar.

Le dioxyde de carbone dissous dans l'eau est un acide faible dans l'eau, selon l'équation :



de constante d'acidité : $K_2^\circ = 5,012 \times 10^{-7}$.

L'ion hydrogénocarbonate est lui-même un acide faible dans l'eau :



de constante d'acidité : $K_3^\circ = 5,012 \times 10^{-11}$.

Doc. 3 – Équilibres chimiques.

- 7 – Préciser les conséquences sur le cycle du carbone dues au réchauffement climatique.
- 8 – À l'aide des différents équilibres chimiques décrits dans le document 3, proposer une qualification de l'ion hydrogénocarbonate au regard de ses propriétés acido-basiques.
- 9 – Rappeler la relation entre le pH d'une solution aqueuse, la concentration en ions oxonium [H₃O⁺(aq)] et la concentration standard $c^\circ = 1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- 10 – Exprimer le pH en fonction de K_2° , [CO₂(aq)] et [HCO₃⁻(aq)].
- 11 – Représenter le diagramme de prédominance des espèces CO₂(aq), HCO₃⁻(aq) et CO₃²⁻(aq) en fonction du pH de la solution.
- 12 – Prévoir qualitativement l'effet de la dissolution du dioxyde de carbone sur le pH des eaux de surface océaniques.
- 13 – À l'aide du diagramme de prédominance, expliquer quelle espèce, parmi CO₂(aq), HCO₃⁻(aq) et CO₃²⁻(aq), est minoritaire lorsqu'on met du dioxyde de carbone gazeux en présence d'eau pure initialement neutre.

En réalité, l'eau des océans contient de nombreuses autres espèces chimiques dissoutes dont certaines possèdent des propriétés de tampon. Le pH des eaux océaniques est actuellement proche de 8,1 mais on estime que cette valeur est le résultat d'une diminution de 0,1 à 0,2 unité de pH depuis le début de l'ère industrielle. Dans l'eau des océans, les espèces $\text{CO}_2(\text{aq})$, $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ et $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ sont en permanence à l'équilibre chimique. La quantité totale de dioxyde de carbone dissous, appelée *quantité totale de carbone inorganique*, est la somme des concentrations en quantité de matière de ces trois espèces :

$$C_t = [\text{CO}_2(\text{aq})] + [\text{HCO}_3^-(\text{aq})] + [\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})].$$

14 – Citer les propriétés d'une solution tampon.

15 – Donner l'expression de la quantité totale de carbone inorganique C_t en fonction de K_1^o , K_2^o , K_3^o , P_{CO_2} et de la concentration $[\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})]$ dans la solution. Interpréter ensuite la courbe représentant $\log(C_t)$ en fonction du pH de la solution (figure 1 ci-après).

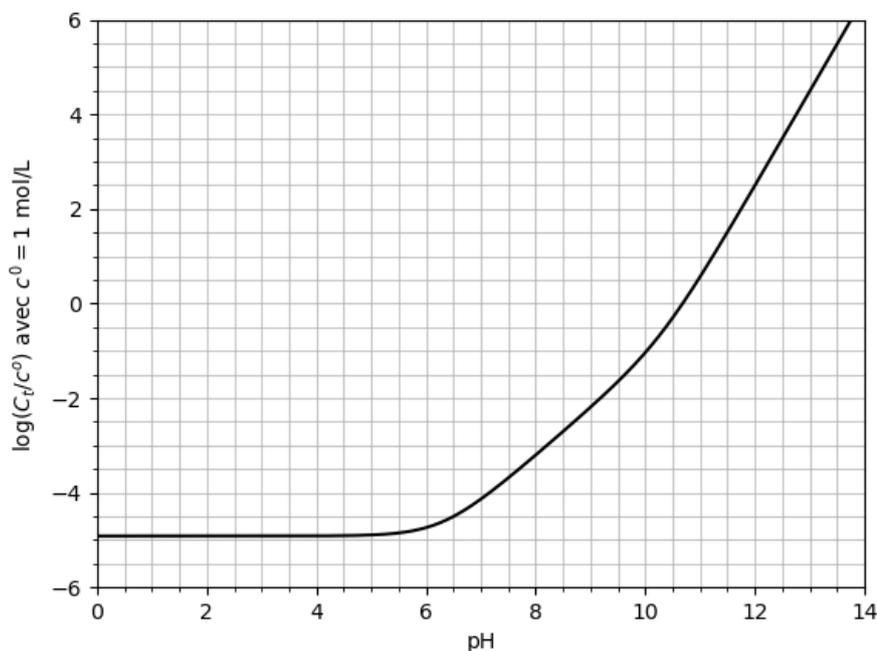


FIGURE 1 – Courbe $\log(C_t) = f(\text{pH})$ pour une pression partielle de dioxyde de carbone égale à sa valeur moyenne actuelle dans l'atmosphère ($P_{\text{CO}_2} = 360 \mu\text{bar}$).

16 – Préciser dans quel domaine de pH la quantité totale de carbone inorganique est la plus grande. En déduire quel est l'effet d'une diminution du pH des eaux de surface sur la capacité des océans à jouer le rôle de stockage du dioxyde de carbone.

17 – Indiquer quelles conséquences peut avoir sur la biodiversité la diminution du pH des eaux de surface des océans.

18 – On prélève un litre d'eau de mer. Une mesure du pH donne : $\text{pH} = 8,1$. Estimer la valeur de la masse totale de carbone inorganique contenue dans ce volume d'eau de mer.

III. Fonte des glaces et élévation du niveau des océans

Au cours des derniers millions d'années, au gré des alternances des périodes glaciaires et interglaciaires, le niveau de la mer a varié de plus de 100 mètres, principalement à cause des changements de volume des calottes polaires (...). Les calottes polaires, que l'on nomme inlandsis, sont d'énormes masses de glace qui reposent sur des continents. Seuls deux territoires extrêmes, l'Antarctique, situé au pôle Sud, et le Groenland, proche du pôle Nord, possèdent ce statut. Ces deux calottes contiennent environ trois milliards de tonnes de glace et induiraient une remontée du niveau des mers de 70 mètres si elles fondaient entièrement. Le Groenland ne représente qu'environ dix pour cent de cette masse de glace. L'Antarctique regroupe deux calottes quasi disjointes : l'Antarctique de l'Est, la plus importante, et l'Antarctique de l'Ouest, sa petite sœur, dix fois plus modeste. La glace de ces continents provient de l'accumulation continue de la neige. Cette dernière se transforme petit à petit en glace dans une zone de transition d'une centaine de mètres que l'on nomme le névé. En une seule année, il tombe environ 2 500 milliards de tonnes de neige sur les calottes. Si cette eau était directement versée dans la mer, celle-ci s'élèverait de 6,5 millimètres. En comparaison à ces précipitations annuelles, les réserves en eau des calottes polaires sont énormes, car elles représentent l'équivalent de 12 000 ans de chutes de neige!

Doc. 4 – Extrait de l'article *Les calottes polaires sont-elles en train de fondre?*, F. Parrenin et C. Ritz, Dossier Pour la science n°54.

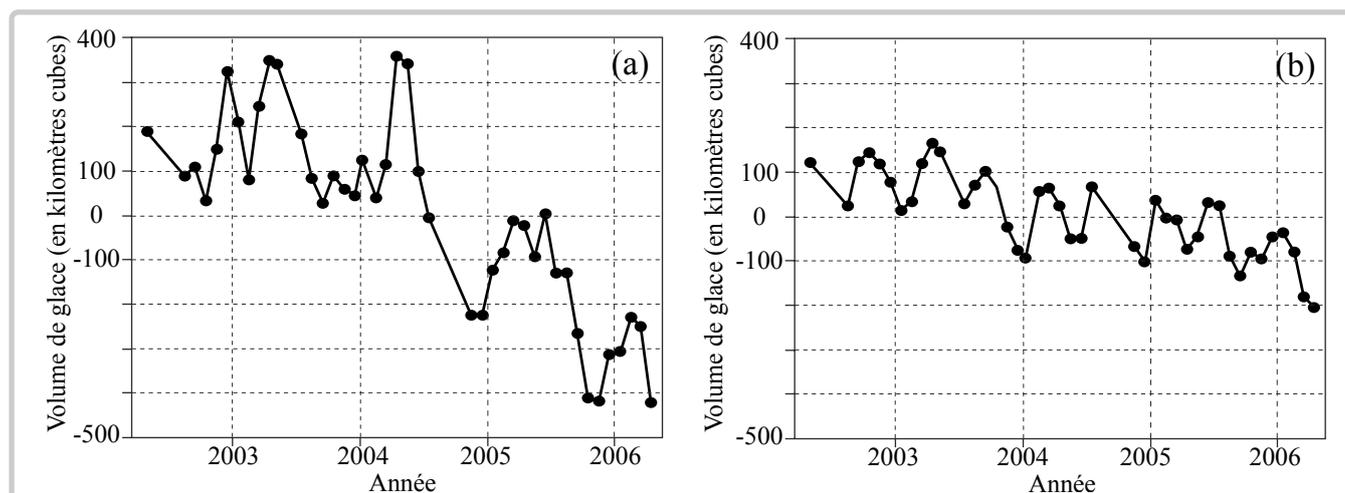
Certaines informations du document 4 semblent contradictoires. À l'aide d'estimations en ordre de grandeur, on se propose de retrouver l'erreur commise par les auteurs.

19 – Indépendamment du document 4, estimer la valeur de la masse des inlandsis du Groenland et de l'Antarctique. Indiquer si le rapport de ces masses est en accord avec le document 4. Qu'en est-il de la masse totale des deux inlandsis?

20 – Estimer la valeur de l'élévation du niveau des océans suite à la fonte de « 2500 milliards de tonnes de neige ». Indiquer si le résultat est en accord avec le document 4. Commenter la mention d'une « remontée de 70 mètres » envisagée dans ce document si toute la glace des deux inlandsis fondait.

21 – Indiquer si l'affirmation « les réserves en eau des calottes polaires (...) représentent l'équivalent de 12 000 ans de chutes de neige » est cohérente avec les autres données de l'article.

Dans l'article dont il est extrait, le texte du document 4 est accompagné des figures présentées sur le document 5.



Doc. 5 – Variation de volume du Groenland entre avril 2002 et avril 2006. Ces mesures ont été obtenues par satellite. Figure (a) : variation de masse dans la région Sud; figure (b) : variation de masse dans la région Nord. D'après *Les calottes polaires sont-elles en train de fondre?*, F. Parrenin et C. Ritz, Dossier Pour la science n°54.

22 – Estimer la valeur de l'élévation du niveau des océans entre 2002 et 2006 due à la fonte de l'inlandsis du Groenland.

On cherche à analyser l'effet de la fonte des icebergs sur le niveau des océans. Pour ce faire, on dépose un glaçon dans un verre d'eau liquide.

23 – Exprimer la norme de la poussée d'Archimède exercée par l'eau sur le glaçon en fonction du volume de glace immergée dans l'eau.

24 – Exprimer la norme de la poussée d'Archimède exercée par l'air sur le glaçon en fonction du volume de glace émergeant dans l'air.

25 – Comparer la norme de ces deux forces. Commenter.

26 – À l'aide d'un bilan de forces, estimer la valeur de la proportion de glace immergée. On affirme souvent que la partie immergée d'un iceberg est nettement plus importante que sa partie émergée. Commenter cette affirmation.

On repère le niveau de l'interface eau liquide/air juste après avoir déposé le glaçon. On le repère, de nouveau, après la fonte du glaçon.

27 – Comment la position de l'interface eau liquide/air s'est-elle déplacée? La fonte des icebergs s'accompagne-t-elle d'une élévation du niveau des océans? Commenter la première phrase du document 4.

IV. Suivi satellitaire de la surface des calottes polaires

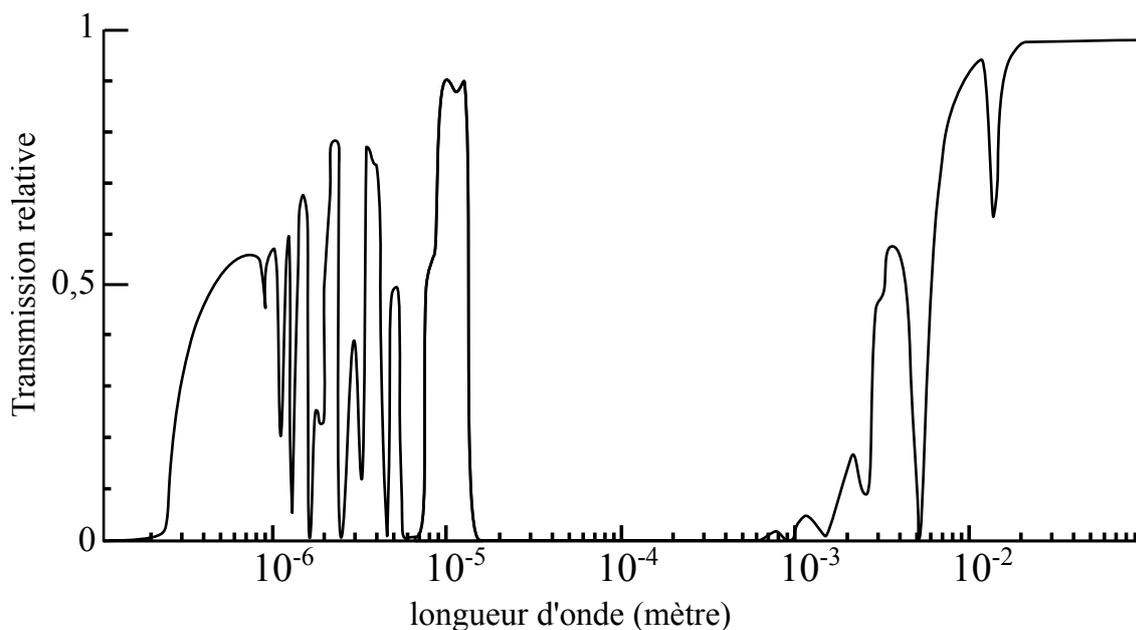
Les variations de volume des calottes polaires, telles que celles présentées sur le document 5, se déduisent de mesures par satellites de l'altitude de leur surface. Depuis plusieurs décennies, l'Agence spatiale européenne développe et lance des satellites à cette fin. C'est le cas du satellite Sentinel-1A, lancé en avril 2014, dont l'orbite circulaire à 693 km d'altitude passe au-dessus des deux pôles.

28 – Calculer la valeur de la période de Sentinel-1A.

Le satellite est muni d'un radar. L'émetteur du radar émet des ondes électromagnétiques de fréquence 5,3 GHz.

29 – Indiquer à quel domaine des ondes électromagnétiques ces ondes appartiennent. Citer des objets de la vie courante utilisant ce domaine de fréquence.

Le document 6 présente la transmission relative des ondes électromagnétiques par l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde dans le vide.



Doc. 6 – Transmission relative des ondes électromagnétiques par l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde dans le vide.

30 – Justifier qualitativement le choix de la valeur de la fréquence des ondes électromagnétiques émises par le radar.

Dans la suite, l'atmosphère est assimilée au vide du point de vue de la propagation des ondes électromagnétiques. Une première méthode de mesure consiste à émettre, grâce à l'émetteur du radar, une onde électromagnétique de durée finie depuis le satellite, en direction du sol. Cette onde se réfléchit sur le sol et on enregistre l'instant auquel son écho atteint le récepteur du radar après réflexion.

31 – Proposer une estimation de la valeur de la durée entre l'émission de l'onde et la réception de l'écho associé par le satellite Sentinel-1A.

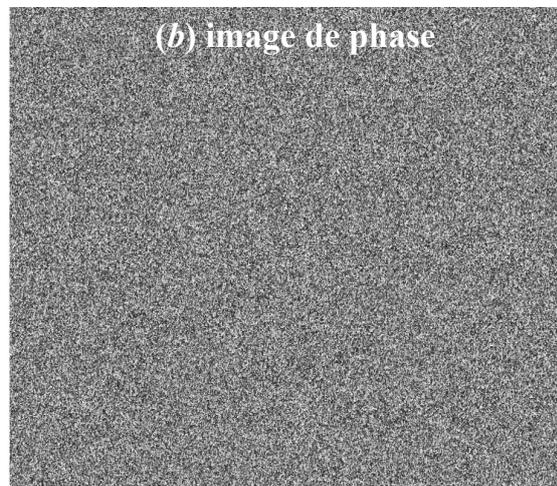
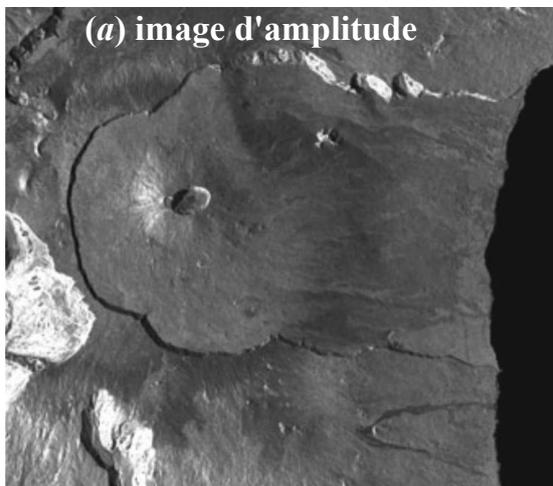
Le but de ces mesures est de déterminer des variations de hauteur de la surface des inlandsis. Pour ce faire, on réitère la mesure précédente à chaque passage du satellite au dessus d'un même point à la surface d'un inlandsis.

32 – Définir la résolution temporelle du récepteur du radar et calculer quelle doit être sa valeur pour pouvoir détecter une variation de 1 cm de l'épaisseur du glacier au niveau du point visé. Commenter la valeur obtenue.

Une autre méthode, dite *interférométrie*, consiste à enregistrer le décalage des oscillations de l'onde sinusoïdale réfléchi par rapport à celle de l'onde émise, elle aussi sinusoïdale.

Une onde sinusoïdale est caractérisée par une longueur d'onde et une amplitude. Un satellite Sentinel envoie une onde électromagnétique de longueur d'onde fixe. L'onde réfléchi vers le satellite a une longueur d'onde identique à celle de l'onde émise par le satellite. En revanche, sa phase change à cause de la propagation. À chaque instant, le satellite est capable de soustraire la phase de l'onde réfléchi à celle de l'onde émise à cet instant. La phase du signal reçu dépend de la distance entre le sol et le satellite dans la direction de visée. On construit ainsi deux images :

- L'image d'amplitude, qui dépend des propriétés du sol. Le signal est plus ou moins intensément réfléchi dans la direction du satellite. Par exemple, une zone lisse aura tendance à réfléchir le signal comme un miroir. Elle apparaît sombre sur l'image d'amplitude.
- L'image de phase, qui ressemble à du bruit, n'est pas exploitable en tant que telle.



Doc. 7 – D'après A. Augier, www.bcpst.kunos.fr.

Notons Ox la direction de visée (évoquée dans le document 7). La droite Ox joint le satellite et le point P au sol sur lequel l'onde se réfléchit. L'origine O est prise au niveau du satellite. On note d la distance OP .

33 – Sachant que la direction de visée n'est pas nécessairement perpendiculaire à la surface du sol, proposer une explication à l'affirmation « une zone lisse (...) apparaît sombre sur l'image d'amplitude ».

À l'abscisse x le long de la direction de visée et à l'instant t , l'onde $\Psi(x, t)$ émise par le satellite s'écrit :

$$\Psi(x, t) = A(x) \cos \Phi(x, t) \quad \text{avec} \quad \Phi(x, t) = 2\pi \left(ft - \frac{x}{\lambda} \right).$$

où $A(x)$ est une fonction décroissante de x , variant peu sur des longueurs de l'ordre de λ . La fonction $\Phi(x, t)$ est la phase de l'onde incidente sur le sol.

34 – Justifier que λ s'identifie à la longueur d'onde et f à la fréquence de l'onde considérée.

De manière analogue, l'onde $\Psi'(x, t)$ réfléchi vers le satellite s'écrit :

$$\Psi'(x, t) = A'(x) \cos \Phi'(x, t) \quad \text{avec} \quad \Phi'(x, t) = 2\pi \left(f' t + \frac{x}{\lambda'} \right) + \Phi_0.$$

où $A'(x)$ est une fonction croissante de x , variant peu sur des longueurs de l'ordre de λ . La fonction $\Phi'(x, t)$ est la phase de l'onde réfléchi par le sol. On suppose qu'à tout instant t , $\Phi'(d, t) = \Phi(d, t)$.

35 – Exprimer f' et λ' en fonction de f et λ , puis Φ_0 en fonction de d et λ .

36 – Exprimer la différence, notée $\Delta\Phi$, entre la phase de l'onde réfléchi lorsqu'elle atteint le satellite et la phase de l'onde émise par le satellite au même instant en fonction de d et λ .

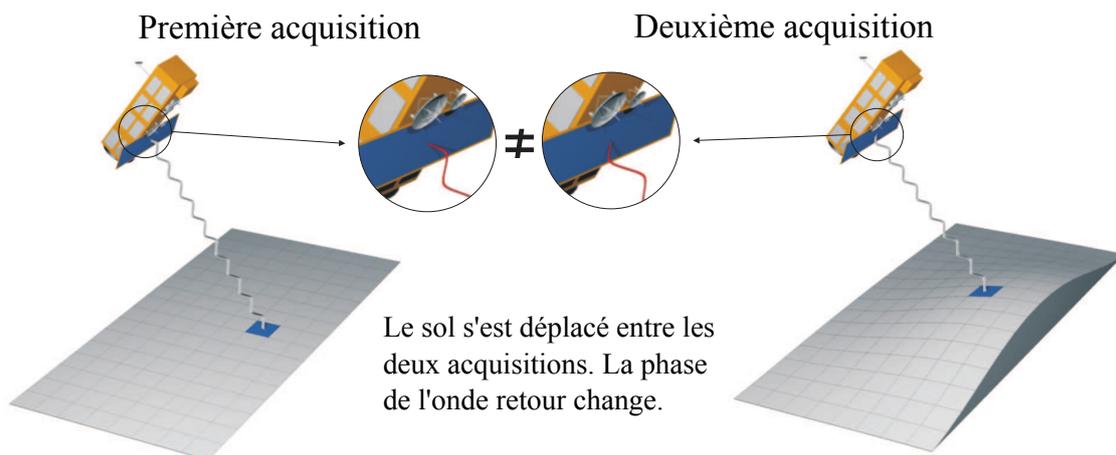
En réalité, la méthode de calcul de $\Delta\Phi$ ne donne que la valeur de $\Delta\Phi$ modulo 2π dans l'intervalle $[0, 2\pi]$, c'est-à-dire que, par exemple :

- si $\Delta\Phi = -5\pi/2 = 3\pi/2 - 2 \times 2\pi$, le système enregistre la valeur $3\pi/2$;
- si $\Delta\Phi = -39\pi/4 = \pi/4 - 5 \times 2\pi$, le système enregistre la valeur $\pi/4$.

37 – Calculer la valeur enregistrée par le système pour $d = 2,85$ cm, puis pour $d = 5,6$ cm et enfin pour $d = 6,9$ cm.

Le principe de la mesure est présenté dans le document 8.

L'acquisition est faite à deux dates différentes. Une image de phase est acquise à deux instants différents.

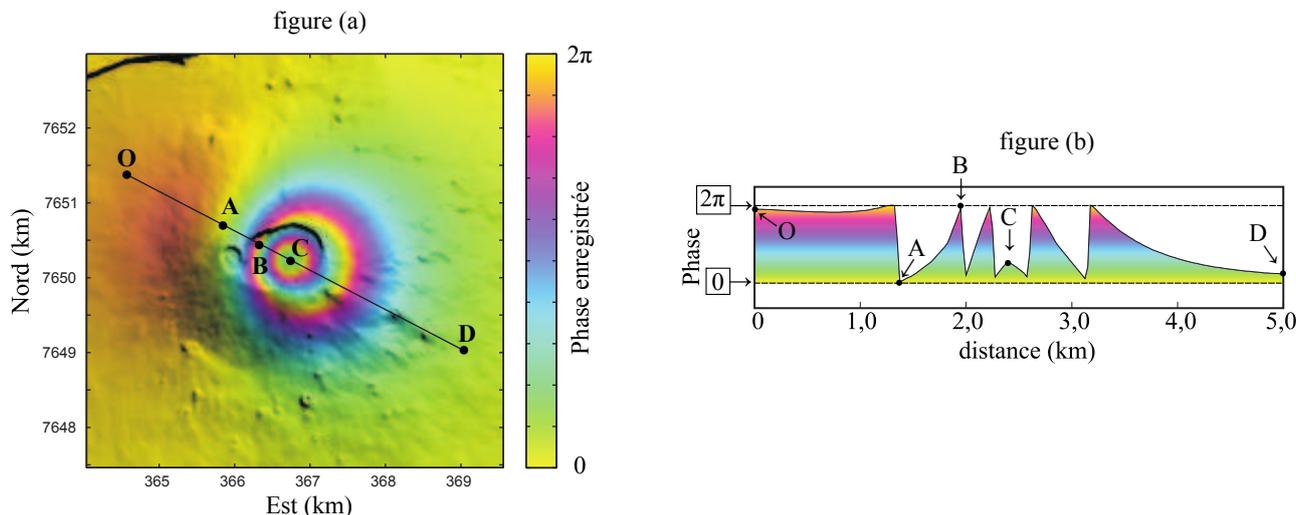


Si la nature du sol reste constante et le satellite occupe exactement la même position lors des deux acquisitions, et que le sol n'a pas bougé, alors la distance entre le satellite et chaque point de la Terre est exactement la même, la phase de trajet des deux images sera la même et les deux images de phase seront strictement identiques. En revanche, si le sol a bougé entre les deux acquisitions, les valeurs de phase de trajet pourront être différentes, et ne dépendront que du déplacement. En calculant la différence entre les deux valeurs de phase, on a donc accès au déplacement d'un point au sol dans la direction du satellite.

Doc. 8 – Principe de la mesure interférométrique par les satellites Sentinel.

D'après A. Augier, www.bcpst.kunos.fr.

La valeur de la phase enregistrée $\Delta\Phi$ (déduite de deux visées successives) est reportée sous forme d'un dégradé de couleur sur l'image d'amplitude (figure (a)). Sur la figure (b), on a reproduit la phase enregistrée $\Delta\Phi$ en fonction de la distance le long du segment $[OD]$.



On admet que le point A ne s'est pas déplacé entre les deux prises de vue. Les points O et D se sont peu déplacés. Des déplacements plus importants ont eu lieu au niveau des points B et C.

Doc. 9 – Illustration de l'exploitation combinée des images d'amplitude et de phase pour étudier la déformation d'un relief. D'après la thèse de A. Augier.

38 – Expliquer la présence de discontinuités (au niveau des points A et B par exemple) sur la figure (b) du document 9.

39 – Estimer la valeur de la déformation réelle (en centimètres) du terrain entre les deux passages du satellite aux points B, C et D du document 9.

40 – Décrire l'aspect qu'aurait eu la figure (a) du document 9 pour une diminution uniforme de l'altitude de la surface de l'inlandsis de 1 cm entre deux survols successifs.

41 – Commenter la sensibilité de cette méthode de mesure des variations de d .

V. Déplacement en motoneige sur les inlandsis

Les déplacements des chercheurs et du matériel scientifique sur les inlandsis se font à l'aide de traîneaux tractés par des motoneiges. L'ensemble {traîneau+motoneige} est appelé *équipage mobile*. L'étude est menée dans le référentiel du sol, supposé galiléen. Les vitesses de déplacement sont telles que les forces de frottement s'exerçant sur l'équipage mobile sont essentiellement dues à la neige sur les skis de l'équipage mobile. Il s'agit de forces de frottement solide dont les propriétés sont détaillées dans le document 10.

Lorsqu'il y a contact entre un support et un solide, dont la vitesse est \vec{v} par rapport au support, la réaction du support se décompose en une composante tangentielle \vec{T} , de norme T , colinéaire et opposée à \vec{v} et une composante \vec{N} , de norme N , normale au support.

Lorsque la vitesse \vec{v} est initialement nulle, le solide ne glisse pas par rapport au support, quelles que soient les valeurs de T et N , tant que

$$T < f_s N$$

où f_s est le coefficient de frottement statique. Dans cette situation, le glissement s'amorce dès que $T = f_s N$. Une fois le glissement amorcé, T et N sont liées par la relation $T = f_d N$ où f_d est le coefficient de frottement dynamique.

Doc. 10 – Lois du frottement solide.

La surface enneigée est supposée horizontale. Pour le contact entre les skis de l'équipage mobile et cette surface, on prendra $f_s = 8,0 \times 10^{-2}$ et $f_d = 5,0 \times 10^{-2}$. L'intensité de la force de traction F exercée par le moteur de la motoneige sur l'équipage mobile dépend de la vitesse v selon une loi de la forme $F = F_0 - bv$ où F_0 et b sont des constantes positives. La masse M de l'équipage mobile vaut $1,0 \cdot 10^3$ kg.

42 – Déterminer la valeur minimale de F_0 permettant le démarrage du traîneau.

Quelques instants après le démarrage, la vitesse de l'équipage mobile atteint une valeur quasiment constante $v_0 = 9,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette vitesse est atteinte à 5% près au bout d'une durée $t_1 = 5,0 \text{ s}$ après le démarrage.

43 – Exprimer b en fonction de M et t_1 . Calculer sa valeur.

44 – Exprimer F_0 en fonction de b , v_0 , f_d , M et g . Calculer sa valeur.

45 – Calculer la valeur de la puissance maximale développée par le moteur.

On dispose couramment de motoneiges équipées de moteurs présentant les caractéristiques suivantes :

modèle de moteur	550 Fan	600 E-tec	850 E-tec
puissance maximale	55 Hp	125 Hp	165 Hp

46 – Commenter la valeur obtenue à la question 45.

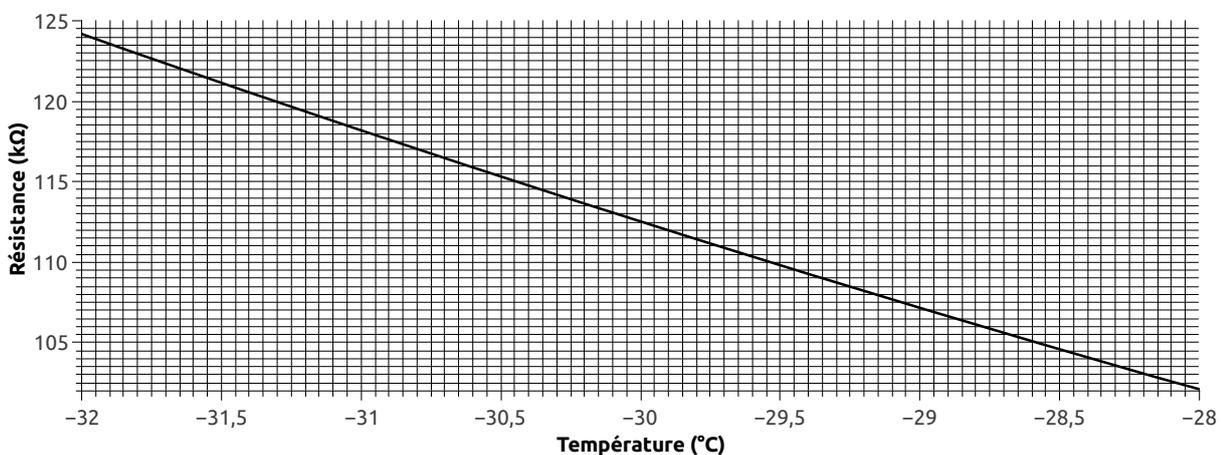
VI. Évolution au cours du temps de la température à la surface des inlandsis

À cause de sa faible conductivité thermique, la neige garde en mémoire la température qu'il faisait lorsqu'elle était à la surface. La mesure de la température dans les trous de forage repose sur un principe simple : la glace, et plus encore la neige, sont de bons isolants thermiques (comme la laine de verre dans nos maisons). Cent ans après qu'elle a été enfouie, elle garde une mémoire de la température au moment où elle était à la surface. Ainsi, rien qu'en mesurant la température dans un trou laissé par le forage d'une carotte de glace, on peut voir la différence de température entre le présent et le dernier âge glaciaire. Dès lors, on remonte dans le temps lorsqu'on s'enfonce dans le trou. Un modèle numérique permet, à partir de l'observation (les variations de la température dans le trou de forage en fonction de la profondeur), de transformer la courbe des températures en fonction de la profondeur en une histoire de la température au cours du temps.

Doc. 11 – D'après *Mille Ans de variations climatiques en Antarctique*, Pour la Science n°458.

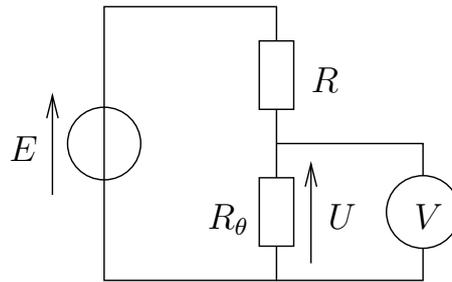
VI.1) Principe de la mesure de température avec un thermistor

Pour connaître l'évolution de la température moyenne en surface au cours du dernier millénaire, on peut faire descendre une sonde de température, appelée thermistor, dans un trou de plusieurs centaines de mètres de profondeur, foré dans la glace. Le thermistor est un dipôle assimilable à une résistance R_θ dont la valeur dépend de sa température.



Doc. 12 – Graphe de la résistance d'un thermistor CTN en fonction de la température.

Pour accéder à la valeur de sa résistance, le thermistor est placé dans le montage suivant.



La tension continue E (voisine de 1 V) est imposée par le générateur. Dans le circuit, le voltmètre se comporte comme une résistance R_V .

47 – Exprimer la tension U mesurée par le voltmètre en fonction de la tension E et des résistances R , R_V et R_θ .

48 – En pratique, la résistance R_V est grande devant R_θ . Montrer que, dans ce cas, l'expression obtenue à la question 47 conduit à

$$R_\theta = \frac{U}{E - U} R.$$

Préciser quel est l'intérêt expérimental de se placer, de manière générale, dans cette condition. Tracer l'allure de R_θ en fonction de U .

49 – Commenter la relation obtenue à la question 48 dans les cas $R_\theta \gg R$, puis $R_\theta \ll R$, enfin $R_\theta \simeq R$. Dans quel(s) cas a-t-on intérêt à se placer expérimentalement ?

Le choix de la valeur de E est un paramètre crucial pour la qualité de la mesure.

50 – Expliquer pourquoi on a intérêt à choisir une valeur de E ni trop élevée, ni trop faible.

Avec le matériel disponible au lycée, pour $E = 1,0512$ V (mesurée au voltmètre avec une précision de 0,3 mV) et $R = 46,90$ k Ω (mesurée à l'ohmmètre avec une précision de $4 \times 10^1 \Omega$), on mesure $U = 0,7463$ V (avec une précision de 0,3 mV).

51 – Estimer la valeur de la température T à laquelle la mesure a été effectuée.

On cherche à estimer la valeur de l'incertitude-type $u(T)$ sur la valeur de T . On admet que si la température T est reliée à la résistance R_θ par la loi $T = f(R_\theta)$ alors $u(T) = |f'(R_\theta)| u(R_\theta)$ où $u(R_\theta)$ est l'incertitude-type sur la valeur de R_θ . Dans un premier temps, on cherche donc à obtenir une estimation de $u(R_\theta)$ connaissant les précisions sur E , R et U . On se propose d'utiliser une simulation en Python en adaptant le script proposé dans le document 13.

Via la fonction `random` de la bibliothèque `numpy`, le script suivant réalise N tirages aléatoires de la valeur d'une grandeur autour d'une valeur moyenne m dans un intervalle correspondant à la précision a . Il affiche l'incertitude-type $u(m)$ associée.

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

# valeur centrale de l'intervalle
m = 10
# précision
a = 0.05
# nombre de tirages
N = 10000

# définition d'un tableau contenant N valeurs
# tirées aléatoirement dans l'intervalle [m - a ; m + a]
tab = rd.uniform(m-a, m+a, N)

# affichage de l'incertitude-type estimée par la simulation
```

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

Doc. 13 – Script simulant des tirages aléatoires permettant d’estimer la valeur de l’incertitude-type sur une grandeur à partir de la précision sur la mesure de cette grandeur.

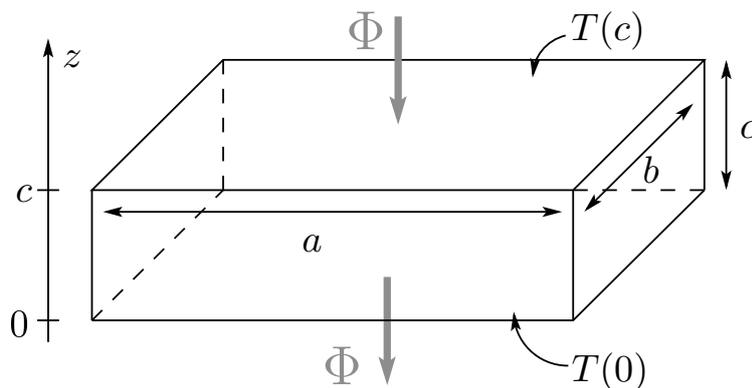
52 – Écrire un script adapté de celui du document 13 qui estime l’incertitude-type $u(R_\theta)$.

Le script affiche le résultat $u(R_\theta) = 1,3 \times 10^2 \Omega$.

53 – En déduire une estimation de la valeur de l’incertitude-type $u(T)$.

VI.2) Analyse des profils de température

Un échantillon parallélépipédique de neige dont les dimensions sont $a \times b \times c$ (voir schéma ci-dessous) est traversé par un flux thermique Φ selon l’axe Oz . On note $T(c)$ (respectivement $T(0)$) la température de l’interface neige-air à l’altitude $z = c$ (respectivement $z = 0$).



54 – Rappeler d’abord la relation entre la résistance thermique R_{th} de l’échantillon de neige, la puissance Φ , et les températures $T(0)$ et $T(c)$, puis l’expression de R_{th} en fonction des paramètres géométriques de l’échantillon et de la conductivité thermique λ de la neige.

55 – Expliquer pourquoi plus la conductivité thermique d’un matériau est faible, plus il constitue un bon isolant thermique.

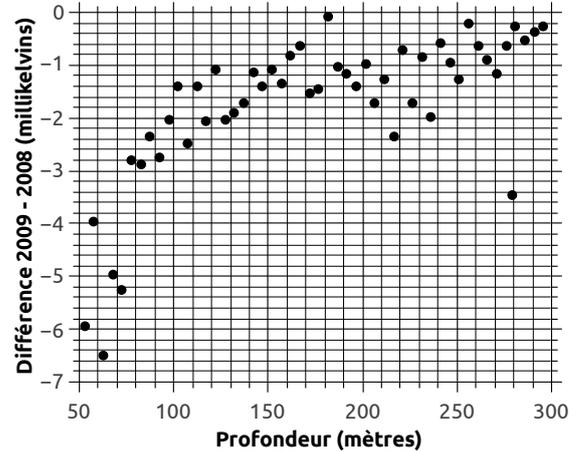
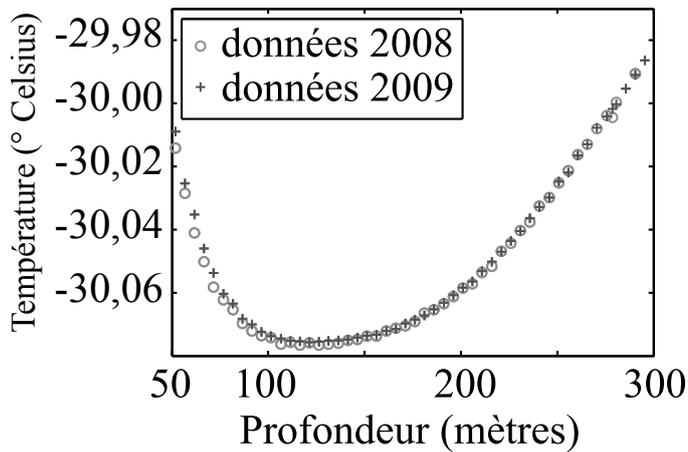
Type de neige	Masse volumique ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
neige fraîche meuble	$1,87 \times 10^{-1} \pm 6,8 \times 10^{-2}$	$8,7 \times 10^{-2} \pm 6,0 \times 10^{-2}$
neige tassée	$3,21 \times 10^{-1} \pm 6,1 \times 10^{-2}$	$1,64 \times 10^{-1} \pm 6,8 \times 10^{-2}$
neige très tassée	$4,03 \times 10^{-1} \pm 6,1 \times 10^{-2}$	$2,64 \times 10^{-1} \pm 7,0 \times 10^{-2}$
neige très fortement tassée	$5,07 \times 10^{-1}$	$5,28 \times 10^{-1}$

Doc. 14 – Tableau adapté de *Winter snow cover on the sea ice of the Arctic Ocean at the Surface Heat Budget of the Arctic Ocean (SHEBA) : Temporal evolution and spatial variability*, Sturm et al., Journal of Geophysical Research, 2002.

56 – En vous appuyant sur les données du document 14 et d’autres données, proposer une explication au caractère bon isolant thermique de la neige (en comparaison de l’eau liquide ou de la glace d’eau pure). Commenter la comparaison à la laine de verre effectuée dans le document 11.

Le document 15 présente : des mesures de températures dans le trou de forage juste après perçage en 2008, puis les mêmes mesures reproduites dans le même forage en 2009 (graphe de gauche) ; la différence entre les valeurs de températures obtenues en 2009 et en 2008, pour chaque profondeur (graphe de droite).

Lorsque je présente mes premiers résultats, je suis confrontée au scepticisme naturel des experts : « Sans fluide dans le trou de forage, n’est-il pas possible que de l’air froid soit tombé au fond et ait faussé tes mesures ? »



Doc. 15 – Texte adapté de *Mille Ans de variations climatiques en Antarctique*, Pour la Science n°458. Graphiques extraits de : *Little Ice Age cold interval in West Antarctica : Evidence from borehole temperature at the West Antarctic Ice Sheet Divide*, Orsi et al., *Geophysical Research Letters*, vol. 39, 2012.

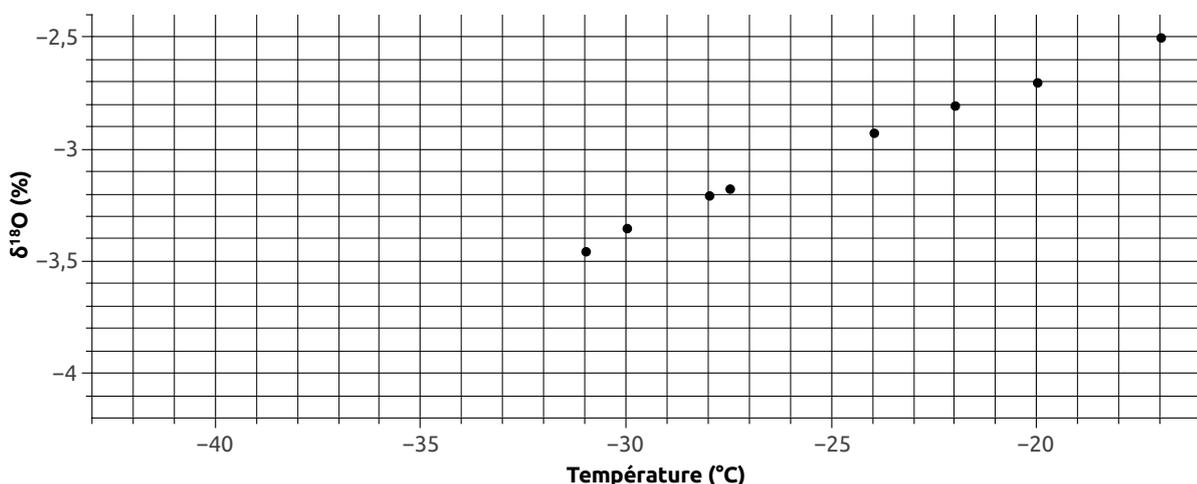
57 – En analysant les forces en jeu, expliquer pourquoi on pourrait objecter que « l'air froid serait tombé au fond » (document 15).

58 – Estimer la variabilité des mesures de température sur une année. Expliquer en quoi les graphiques du document 15 permettent d'apporter une réponse à la question de cet expert.

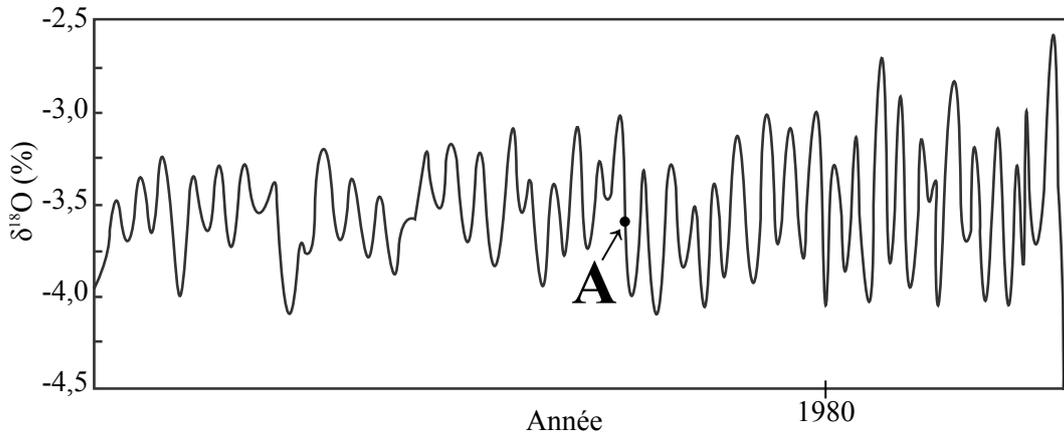
VII. Datation de l'âge d'une carotte glaciaire

La glace extraite du forage constitue une carotte glaciaire, dont l'analyse permet également d'obtenir des informations sur son histoire. La carotte est découpée en fines tranches. La mesure de la variation $\delta^{18}\text{O}$ du taux d'oxygène-18 dans l'eau qui constitue la glace d'une tranche permet notamment de la dater relativement aux tranches voisines.

Lors du transport de la vapeur d'eau des océans vers les pôles, les précipitations successives appauvrissent cette vapeur davantage en isotope lourd (H_2^{18}O) qu'en isotope léger (H_2^{16}O). La variation $\delta^{18}\text{O}$ du taux d'oxygène-18 dans la vapeur des nuages diminue avec l'augmentation de latitude (diminution de température). La variation $\delta^{18}\text{O}$ du taux d'oxygène-18 dans les précipitations formées à partir de cette vapeur diminue corrélativement. D'une part, ceci explique que les glaces polaires sont formées d'eau très appauvrie en isotope lourd ($\delta^{18}\text{O}$ très négatif). D'autre part, en période plus froide, l'appauvrissement isotopique de la vapeur est plus prononcé, car la température lors du transport de vapeur diminue plus « vite » avec la latitude, et la valeur de $\delta^{18}\text{O}$ dans les précipitations diminue pour un site donné. C'est l'origine du thermomètre isotopique appliqué aux glaces.



Doc. 16 – Texte adapté de *Isotopes de l'oxygène, paléotempératures et volume des glaces*, planet-terre.ens-lyon.fr/; graphique adapté de *Stable water isotope behavior during the last glacial maximum : A general circulation model analysis*, Jouzel et al., J. Geophys. Res., vol. 99, 1994.



Doc. 17 – Variations saisonnières de la composition isotopique de la glace en oxygène-18 pour le forage GRIP au Groenland. Extrait de *La datation des archives glaciaires*, Dossier Pour la Science n°42.

59 – Rappeler la définition de deux noyaux isotopes. Donner la composition du noyau d'un atome d'oxygène-18 ^{18}O . Expliquer ce qui le différencie d'un noyau d'oxygène-16.

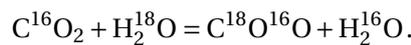
60 – Estimer l'année et la saison correspondant au point A sur le document 17.

La mesure des variations du taux d'oxygène-18 constitue également une autre méthode de détermination de la température moyenne lors de la saison à laquelle la glace s'est déposée.

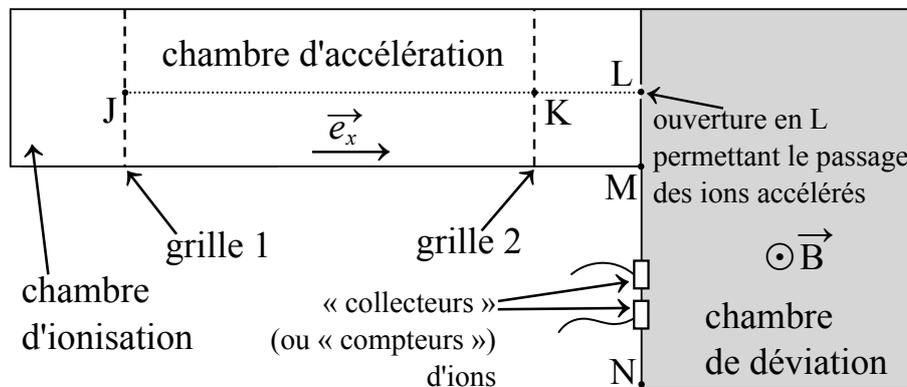
61 – Sur le document 17, estimer la valeur de la température moyenne au point de mesure à l'été 1980, puis à l'hiver 1980. Faire de même au point A.

La détermination du taux d'oxygène-18 s'effectue à l'aide d'un spectromètre à champ magnétique.

La préparation d'un échantillon d'eau en vue de son analyse en $\delta^{18}\text{O}$ se fait par échange avec du CO_2 , pendant 480 minutes dans un bac thermorégulé à environ 20°C . L'équation qui modélise cet échange est la suivante :



Le dioxyde de carbone CO_2 passe alors par un piège froid à -90°C (qui retient les molécules d'eau), puis est introduit dans le spectromètre de masse (schématisé ci-dessous).



Dans la chambre d'ionisation, les molécules de dioxyde de carbone CO_2 sont ionisées en ions CO_2^+ . On considère qu'à la sortie de cette chambre, en J, la vitesse des ions est négligeable. Lorsqu'ils atteignent la chambre d'accélération, les ions CO_2^+ sont accélérés entre J et K sous l'action d'un champ électrique uniforme \vec{E} généré par deux grilles. On note d la longueur JK. Dans la chambre de déviation, les ions sont

déviés par un champ magnétique uniforme \vec{B} perpendiculaire au plan de figure. Leur trajectoire est alors circulaire. Un collecteur d'ions compte les ions CO_2^+ atteignant la paroi MN . Les chambres sont sous vide. On négligera le poids des ions devant les autres forces.

Doc. 18 – Principe de la technique de détermination de la variation $\delta^{18}\text{O}$ du taux d'oxygène-18 par spectrométrie de masse.

62 – Donner l'expression de la force électrostatique \vec{F} s'exerçant sur un ion CO_2^+ en fonction de la charge élémentaire e et \vec{E} . Dans quel sens doit-on orienter le champ électrique \vec{E} pour que l'ion soit accéléré dans le sens des x croissants ?

63 – Exprimer le vecteur vitesse \vec{v} de l'ion en L en fonction de sa masse m , de e , d et de la norme E du champ électrique \vec{E} .

En présence d'un champ magnétique \vec{B} , une particule de charge électrique q et de vecteur vitesse \vec{v} subit la force de Lorentz $\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$.

64 – Justifier que la norme v de la vitesse de l'ion est constante dans la chambre de déviation. Exprimer le rayon de sa trajectoire dans cette chambre en fonction de m , v , B et e .

65 – Pour un champ magnétique de norme $B = 0,450 \text{ T}$ et un produit $Ed = 10,0 \text{ kV}$, calculer la valeur du rayon de la trajectoire d'un ion CO_2^+ et celui de la trajectoire d'un ion $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}^+$.

On place deux collecteurs (voir schéma sur le document 18). L'un permet de compter seulement les ions $\text{C}^{16}\text{O}_2^+$, l'autre seulement les ions $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}^+$.

66 – À quelle distance du point L faut-il positionner chaque compteur d'ions ?

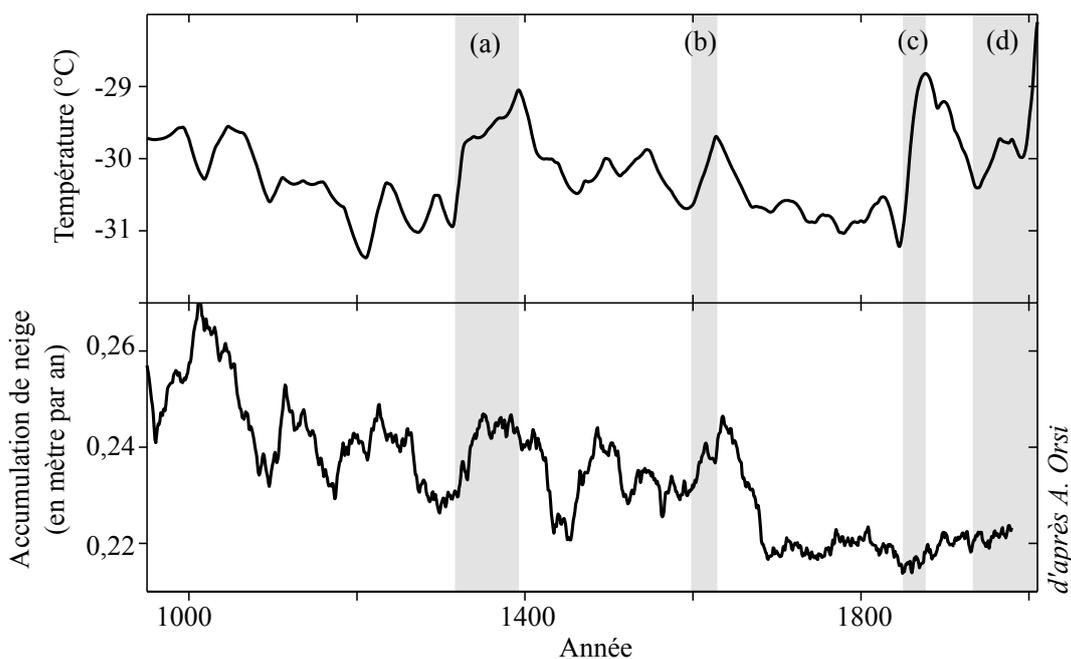
On note N_{18} (respectivement N_{16}) le nombre d'ions $\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}^+$ (respectivement $\text{C}^{16}\text{O}_2^+$) comptés par le collecteur pendant une durée Δt . La variation $\delta^{18}\text{O}$ du taux d'oxygène-18 s'obtient par la relation :

$$\delta^{18}\text{O} = 100 \times \left(\frac{N_{18}}{N_{18} + N_{16}} - 1 \right),$$

où $R_0 = 2,005 \times 10^{-3}$ est une valeur de référence. Lors d'une mesure sur un échantillon de glace, on trouve que le rapport N_{16}/N_{18} vaut 512,1.

67 – Estimer la valeur de la température lors de la formation de l'échantillon analysé.

La mesure directe de température dans le trou de forage en fonction de la profondeur, les mesures de spectrométrie de masse permettent d'obtenir le graphe de température du document 19.



d'après A. Orsi

Les trois pièces du puzzle s'emboîtent : la température de trou de forage, les mesures de gaz et le modèle qui permet de faire le lien entre les deux, écrit et testé sur un autre jeu de données en attendant que les

nôtres soient disponibles. Je peux enfin produire une série temporelle complète (voir la figure ci-dessus). Une surprise m'attend. En comparant la température avec d'autres indicateurs du climat, telles l'épaisseur des couches annuelles de neige, qui nous renseigne sur le taux des précipitations, je me rends compte que, contrairement aux événements antérieurs similaires, le réchauffement actuel est d'une nature différente de celle des réchauffements du passé. Il est probablement lié à des changements climatiques globaux plutôt qu'à des variations régionales du climat.

Doc. 19 – Graphes : reconstruction de la température sur le dernier millénaire (haut) ; reconstruction du taux d'accumulation de neige au niveau du site de forage (en bas). D'après *Mille Ans de variations climatiques en Antarctique*, Pour la Science n°458.

68 – Identifier le phénomène commun aux quatre zones qui apparaissent grisées sur les graphes du document 19. Expliquer en quoi l'analyse des courbes de ce document conduit à conclure à une « nature différente » du réchauffement actuel par rapport aux réchauffements antérieurs.

69 – Proposer une explication à l'augmentation de l'épaisseur des couches annuelles de neige lors des phases de réchauffement.

