DS n°4* (4 heures)

Transferts thermiques, Thermochimie

La calculatrice est **autorisée**

La plus grande importance sera apportée au soin de la copie ainsi qu'à la clarté des raisonnements. Toute réponse, même qualitative, se doit d'être justifiée. Les affirmations, même justes, mais non justifiées ne seront pas prises en compte. Les résultats doivent être **encadrés**.

En cas de non respect de ces consignes, un malus sera attribué à la copie comme indiqué dans les tableaux suivants qui stipulent les critères et les effets sur la note le cas échéant :

Critère	**Indicateur**
Lisibilité de l'écriture	L'écriture ne ralentit pas la lecture.
Respect de la langue	La copie ne comporte pas de fautes d'orthographe ni de grammaire.
Clarté de l'expression	La pensée du candidat est compréhensible à la première lecture.
Propreté de la copie	La copie comporte peu de ratures, réalisées avec soin et les parties qui ne doivent pas être prises en compte par le correcteur sont clairement et proprement barrées.
Identification des questions et pagination	Les différentes parties du sujet sont bien identifiées et les réponses sont numérotées avec le numéro de la question. La pagination est correctement effectuée.
Mise en évidence des résultats	Les résultats littéraux et numériques sont clairement mis en évidence.

Nombre de critères non respéctés	**Palier de Malus**	**Effet sur la note**
0	0	aucun
1–2	1	-3.3%
3–4	2	-6.7%
5–6	3	-10%

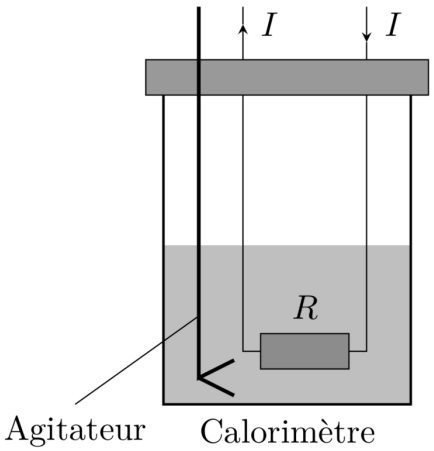
Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'essentiel des données et formules utiles se trouve dans un formulaire en fin d'énoncé.

Certaines questions, repérées par une barre en marge, ne sont pas ou peu guidées. Elles demandent de l'initiative de la part du candidat. Il est alors demandé d'expliciter clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

Exercice 1 : Étude d'un calorimètre

Un calorimètre est constitué d'une enceinte dans laquelle sont placés un agitateur (A) et une résistance électrique R reliée à un circuit extérieur, permettant d'y faire circuler un courant électrique. On désigne par C la capacité thermique totale de ces accessoires. L'agitateur permet d'homogénéiser la température Θ (en °C) du contenu de l'enceinte.



Toutes les phases condensées sont supposées idéales. On néglige la capacité thermique de l'air enfermé dans le calorimètre devant celle de l'eau et des accessoires. On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide, supposée constante :

$$c_{eau} = 4{,}18 \times 10^3\,\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

Le calorimètre contient initialement une masse $m_1 = 95\,\mathrm{g}$ d'eau liquide et le dispositif est en équilibre thermique à la température $\Theta_1 = 20\,^\circ\mathrm{C}$. On suppose dans un premier temps que le calorimètre est parfait, c'est à dire que ses parois sont adiabatiques. Aucun courant ne circule dans la résistance. Après avoir ajouté une masse $m_2 = 71\,\mathrm{g}$ d'eau à la température $\Theta_2 = 50\,^\circ\mathrm{C}$, on constate que la température finale du dispositif se stabilise à $\Theta_f = 31{,}3\,^\circ\mathrm{C}$.

Q.1 À l'aide du premier principe, déterminer C en fonction m_1, m_2, Θ_1, Θ_2, Θ_f et c_{eau}. En déduire la valeur en eau μ du calorimètre, définie par $C = \mu c_{eau}$. Faire l'application numérique.

Le calorimètre est entièrement vidé de l'eau qu'il contient et on y introduit une masse $m_0 = 83\,\mathrm{g}$ d'éthanol de capacité thermique massique c_0. À partir de $t = 0$, on fait circuler un courant électrique d'intensité $I = 1{,}40\,\mathrm{A}$ constante dans la résistance $R = 5{,}0\,\Omega$ dont la valeur est indépendante de la température.

Q.2 Faire un bilan énergétique pendant l'intervalle de temps dt et en déduire l'équation différentielle vérifiée par $\Theta(t)$.

Q.3 On constate que la température s'est élevée de $9{,}2\,^\circ\mathrm{C}$ au bout de $\tau = 120\,\mathrm{s}$. En déduire la capacité thermique massique c_0 de l'éthanol.

En fait, le calorimètre n'est pas parfait et il faut tenir compte des "fuites thermiques". Entre les instants t et $t + dt$, le contenu du calorimètre cède au milieu extérieur une énergie thermique δQ pouvant s'écrire :

$$\delta Q = K\,(\Theta(t) - \Theta_a)\,\mathrm{d}t$$

où $K = 0{,}48\,\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot s^{-1}}$ est une constante, $\Theta(t)$ la température dans l'enceinte à l'instant t et Θ_a la température de l'atmosphère extérieure, supposée constante. On suppose qu'à $t = 0$, $\Theta(0) = \Theta_1 = \Theta_a = 20\,^\circ\mathrm{C}$.

Q.4 Comment est modifiée l'équation différentielle de la **Q.2** ?

Q.5 En déduire $\Theta(t)$ et en donner une représentation schématique en fonction du temps. Quelle est la température limite atteinte par le contenu de l'enceinte ? Faire l'application numérique.

Exercice 2 : Dissipation thermique dans les systèmes électroniques

Les microprocesseurs des ordinateurs actuels sont constitués de plus d'un million de transistors répartis sur une plaque de silicium de quelques cm^2. L'évacuation de la chaleur dégagée par le microprocesseur est indispensable pour le bon fonctionnement du composant.

On étudie tout d'abord le transport thermique à travers un objet solide parallélépipédique, de dimensions $a \times b \times \ell$ avec $a \gg \ell$ et $b \gg \ell$, lorsque les faces repérées par les points O et A sont uniformément aux températures T_1 et T_0 respectivement (cf. FIGURE 1). L'objet est caractérisé par sa masse volumique μ, sa capacité thermique massique c et sa conductivité thermique λ. L'origine de l'axe des x est prise en O.

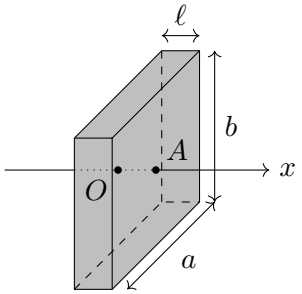


FIGURE 1

Q.1 Justifier qu'on puisse considérer que la température dans le solide est une fonction de x et t seulement.

Q.2 Établir l'équation de la diffusion thermique vérifiée par la température $T(x,t)$ dans le solide considéré.

Q.3 Les températures T_0 et T_1 étant constantes, on étudie le régime stationnaire. Établir la loi d'évolution de la température dans le solide en fonction de x. Exprimer la puissance thermique Φ qui traverse le solide de O vers A.

Q.4 Montrer qu'on peut relier la différence de températures $T_1 - T_0$ au flux Φ, de façon analogue à la loi d'Ohm en électrocinétique, faire apparaître la résistance thermique R_{th} de l'objet parallélépipédique.

Lorsqu'un solide est placé dans l'air dont la température est uniforme égale à T_a, l'échange thermique qui s'effectue à l'interface entre l'air et le solide est conducto-convectif. C'est à dire que dans une mince couche de fluide en surface du solide le gradient de température entraîne un mouvement de convection du fluide. Il en résulte une expression de la quantité de chaleur qui est transférée du solide vers l'air pendant $\mathrm{d}t$ à travers une surface de section $\mathrm{d}S = \mathrm{d}y\mathrm{d}z$:

$$\delta Q_{cc} = h(T_0 - T_a)\mathrm{d}y\mathrm{d}z\mathrm{d}t$$

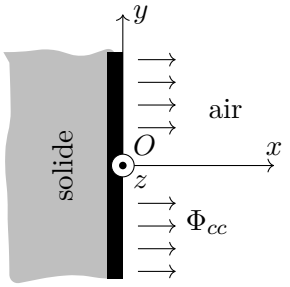


FIGURE 2

où h est appelé coefficient de Newton, qui caractérise l'échange thermique entre le solide et le fluide et T_0 est la température de surface du solide (cf. FIGURE 2).

Q.5 Donner l'unité de h dans le système international d'unités. Définir puis exprimer la résistance thermique R_h qui modélise l'échange thermique conducto-convectif pour une surface S de solide.

Q.6 Dans le cas d'une interface silicium/air, $h_s = 30\,\mathrm{SI}$ si l'air environnant est immobile et vaut $h_c = 300\,\mathrm{SI}$ si l'air environnant est brassé, par exemple grâce à un ventilateur. On considère un parallélépipède de dimensions $a \times b \times \ell = 40 \times 24 \times 1{,}5\,\mathrm{mm}^3$. Calculer les valeurs des résistances thermiques R_{th} dans le cas où l'objet est en cuivre puis en silicium, calculer aussi R_h l'air étant immobile, commenter.

Q.7 Dans le cas du microprocesseur dont la documentation est fournie en annexe, estimer la durée Δt au bout de laquelle celui-ci est détruit en l'absence de dispositif de refroidissement.

Pour maintenir le microprocesseur à sa température de fonctionnement optimale $\simeq 70\,^\circ\mathrm{C}$, on utilise un radiateur sur lequel souffle l'air brassé par un ventilateur d'une part et un dispositif appelé caloduc d'autre part, qu'on se propose d'étudier.
Le caloduc est une enceinte métallique (elle est parfois en silicium) creuse, de volume constant, plate et longue, qui relie thermiquement le microprocesseur situé en M au radiateur situé en R. La plupart des ordinateurs portables en sont équipés. La FIGURE 3 à gauche représente le caloduc vu de l'extérieur.

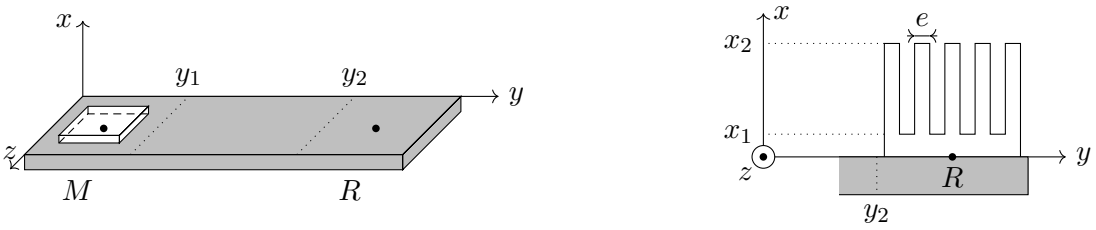


FIGURE 3

Dans un premier temps, on étudie le radiateur (cf. FIGURE 3 à droite) qui est une pièce métallique qui présente une surface de contact avec l'air très importante, grâce à un grand nombre d'ailettes parallélépipédiques représentées en coupe sur la FIGURE 3. La dimension des ailettes dans la direction $\vec{e}_z$ est notée l_z, e selon $\vec{e}_y$ et $H = x_2 - x_1$ selon $\vec{e}_x$.
Pour étudier l'évolution de la température dans les ailettes, on isole une ailette, que l'on assimile à un milieu unidimensionnel selon $\vec{e}_x$. La température est notée $T(x)$, elle est uniforme dans une section de l'ailette. Enfin, comme l'ailette est plongée dans l'air, qui est en permanence renouvelé grâce au ventilateur, on considère que l'air qui entoure l'ailette a une température $T_a = 20\,°\text{C}$, et on se limite à l'étude du régime stationnaire.
On note T_R la température au niveau du socle du radiateur, on considère que c'est la température en $T(x_1)$ sur chacune des ailettes.

Q.8 Après avoir fait un schéma correspondant à l'étude d'une ailette considérée isolément, effectuer un bilan d'énergie sur une tranche de longueur dx de l'ailette. Déduire de l'équation précédente l'équation différentielle vérifiée par $T(x)$:

$$\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2} - \frac{1}{\delta^2}(T(x) - T_a) = 0$$

où δ est à exprimer en fonction de λ, e, l_z et h.

Q.9 Résoudre cette équation en considérant que la longueur H de l'ailette est très grande, c'est à dire $H \to \infty$.

Q.10 Calculer la puissance thermique évacuée par le radiateur complet, constitué de 6 ailettes et donner la valeur de la résistance thermique équivalente au radiateur. Pour l'application numérique, on prendra $\lambda = 100\,\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, $e = 2\,\text{mm}$ et $l_z = 1\,\text{cm}$.

On étudie désormais le caloduc. Celui-ci est un constitué d'une enceinte métallique ou semi-conductrice de volume constant de petite dimension, dont la paroi interne est tapissée de fines rainures, dans lesquelles un liquide peut se déplacer par capillarité. À l'intérieur de l'enceinte, un corps pur diphasé (de l'eau, mais il peut être autre que de l'eau) a été injecté. L'ensemble forme un système fermé et passif.

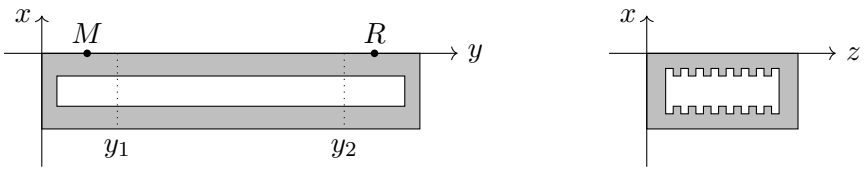


FIGURE 4

La FIGURE 4 représente deux coupes du caloduc. Le schéma de gauche représente une coupe dans la longueur du caloduc, dans un plan de direction $(\vec{e}_x, \vec{e}_y)$, le schéma à droite représente une vue d'une section droite du caloduc.
On suppose que le caloduc est parfaitement dimensionné pour un microprocesseur qui dissipe une puissance thermique $\mathcal{P}_{\text{micro}} = 20\,\text{W}$, la température en M sous le microprocesseur est égale à $71\,°\text{C}$, celle sous le point R vaut $70\,°\text{C}$ et l'eau circule à l'intérieur du caloduc de façon permanente. On admet qu'une goutte

de liquide qui arrive sous le microprocesseur se vaporise totalement et qu'une bulle de vapeur qui arrive sous le radiateur se liquéfie totalement et pénètre dans les rainures. L'eau reste liquide lorsqu'elle circule à l'intérieur des micro rainures entre y_1 et y_2.
Enfin, la zone intermédiaire, entre y_1 et y_2 est considérée adiabatique. Toutes les transformations envisagées sont supposées réversibles.

Q.11 Analyser le terme caloduc, à quel autre terme du langage courant vous fait-il penser ? Proposer une signification du terme caloduc.

Q.12 Les forces de capillarité sont susceptibles de provoquer la montée d'un liquide dans un tube vertical de petit diamètre. Justifier qualitativement que les forces de capillarité travaillent dans ce cas.

La FIGURE 5 représente l'allure du cycle (en trait noir) décrit par une goutte de liquide à l'intérieur du caloduc, dans un diagramme représentant la pression P en fonction du volume massique v. La courbe grise est la courbe de saturation qui délimite le domaine où règne l'équilibre liquide vapeur noté ℓ/v.

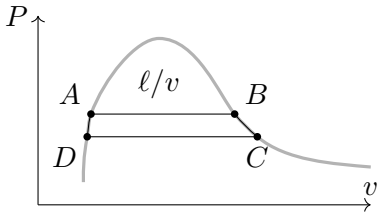


FIGURE 5

Q.13 Expliquer qualitativement le fonctionnement du caloduc, en reliant les positions internes au caloduc aux points A, B, C et D du cycle.

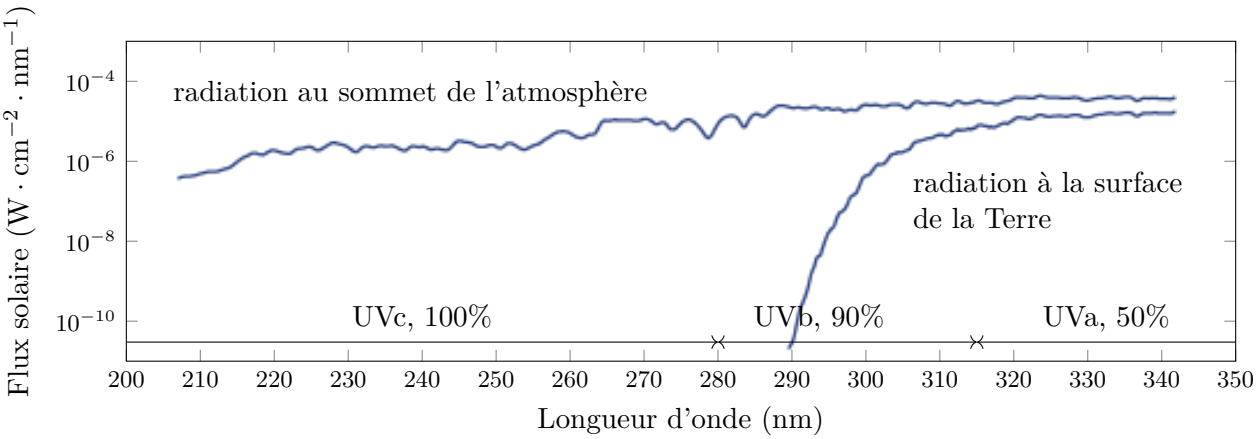
Q.14 En régime stationnaire de fonctionnement, le caloduc évacue toute la chaleur dissipée par le microprocesseur et les températures extrêmes sont séparées de $T_R - T_M = 1\,\text{K}$. Calculer la résistance thermique équivalente du caloduc et la comparer à celle d'un barreau de cuivre de mêmes dimensions. Quel est l'intérêt du caloduc ?

Exercice 3 : L'ozone dans l'atmoshpère

Cet exercice étudie un des composants de l'atmosphère terrestre qui a permis le développement de la vie sur Terre et peut-être un jour sur une exoplanète.

I – De l'importance de l'ozone

La FIGURE 6 montre le flux solaire ultra-violet reçu au sommet de l'atmosphère et le flux résiduel à la surface de la Terre. La différence est due à l'absorption du rayonnement ultra-violet par la couche d'ozone. Le graphique précise l'absorption moyenne pour chaque bande du rayonnement ultra-violet.



avec indication de l'absorption moyenne pour chaque bande UV

FIGURE 6 – Absorption du rayonnement solaire par la couche d'ozone – d'après NASA Ozone Watch

La FIGURE 7 présente la répartition de l'ozone (O_3) dans l'atmosphère terrestre. Sa concentration varie avec l'altitude, le maximum se situe entre 30 et 35 km d'altitude avec une moyenne de 8 molécules d'ozone pour un million de molécules d'atmosphère.

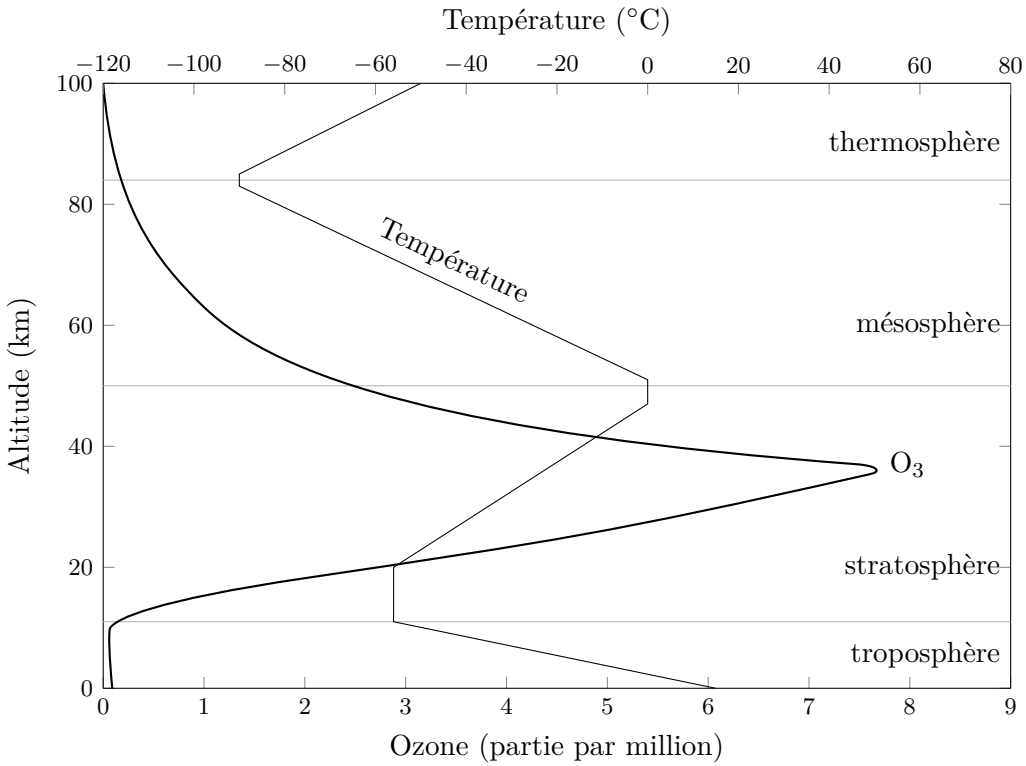


FIGURE 7 – Répartition de l'ozone et température aux latitudes moyennes dans l'atmosphère terrestre

Q.1 Justifier que les rayonnements présentés sur le graphique de la FIGURE 6 correspondent à des rayonnements ultra-violet. Pourquoi les rayonnements ultra-violets sont-ils qualifiés de rayonnements ionisants ?

Q.2 Expliquer l'importance de la couche d'ozone dans la protection de la vie terrestre.

II – Atome et molécule de l'oxygène

Q.3 Donner la configuration électronique de l'oxygène dans son état fondamental.

Q.4 Proposer une représentation de Lewis pour la molécule de dioxygène.

Q.5 Proposer une représentation de Lewis de la molécule d'ozone sachant qu'elle n'est pas cyclique.

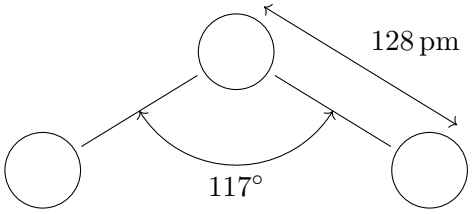


FIGURE 8 – Schématisation d'une molécule d'ozone où chaque sphère représente un atome d'oxygène

Q.6 La molécule d'ozone a la structure spatiale présentée sur la FIGURE 8. Justifier l'existence d'un moment dipolaire et le représenter sur un schéma de la molécule.

III – Thermodynamique de la formation de l'ozone

Nous étudions l'équilibre :

$$3\,O_{2(g)} = 2\,O_{3(g)}$$

Q.7 Calculer la constante de cet équilibre à 25 °C à l'aide des données fournies en fin d'énoncé.

Q.8 Calculer la pression partielle en ozone dans l'atmosphère terrestre au niveau du sol.

Q.9 Dans quel sens est déplacé cet équilibre lorsqu'on s'élève dans la troposphère ? Que peut-on en dire dans la stratosphère ? Un raisonnement qualitatif argumenté est attendu.

IV – Cinétique de la formation de l'ozone

Le mécanisme de la production de l'ozone stratosphérique a été élucidé dès 1930 par le géophysicien britannique Sydney Chapman. Pour fabriquer cette molécule constituée de trois atomes d'oxygène, il faut des atomes d'oxygène libres. Aux longueurs d'onde inférieures à 240 nm, le rayonnement ultra-violet peut dissocier les molécules de dioxygène O_2 suivant la réaction :

$$O_2 = O^\bullet + O^\bullet$$

Cette première partie du mécanisme est rapide sous l'effet du rayonnement ultra-violet et conduit à un équilibre de constante K_R°.
La seconde partie du mécanisme est une réaction simple qui obéit à la loi de van't Hoff en cinétique : les ordres partiels dans l'expression de la vitesse de réaction sont les coefficients stoechiométriques de la réaction. On note k la constante cinétique de cette réaction.

$$O_2 + O^\bullet \xrightarrow{k} O_3$$

Q.10 Expliquer qualitativement que la concentration en ozone dans l'atmosphère présente un maximum à une altitude particulière, comme le montre la Figure 7.

Q.11 Exprimer la pression partielle en radical $O^\bullet$ en fonction de la pression partielle en dioxygène et de la constante K_R°.

Q.12 Quel est l'ordre de la vitesse de formation de O_3 par rapport à la pression partielle en dioxygène ?

Exercice 4 : Nucléation et formation des nuages

On s'intéresse à la formation des nuages et on considère donc, dans un premier temps, un système constitué d'eau liquide et d'un mélange gazeux air-vapeur d'eau à l'équilibre. On note P_v la pression partielle de vapeur dans le gaz, et $P_{\text{sat}}(T)$ la pression de vapeur saturante.

Q.1 Donnez la relation entre le potentiel chimique $\mu_\ell(T)$ de l'eau liquide, supposé ne dépendre que de la température, et le potentiel $\mu_v[T, P_v = P_{\text{sat}}(T)]$ de la vapeur d'eau à la pression de vapeur saturante.

On considère maintenant une pression de vapeur quelconque, et on s'intéresse à l'évolution d'une gouttelette d'eau liquide dans l'atmosphère. L'existence d'une interface de surface A entre le liquide et le gaz conduit à un terme d'énergie de surface supplémentaire, σA, qu'il convient d'ajouter à l'énergie du système (ou au potentiel thermodynamique considéré). Le coefficient σ est une constante positive appelée tension de surface. Son unité est le $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$. Le système considéré contient un nombre fixe de molécules d'air, et un nombre total fixe $n_{\text{tot}} = n_\ell + n_v$ de moles d'eau, où n_ℓ est le nombre de moles d'eau liquide et n_v le nombre de moles de vapeur d'eau. Le système est maintenu à pression et température constantes.

Q.2 Exprimez la différentielle de l'enthalpie libre du système en fonction de σ, A, μ_ℓ, μ_v, n_ℓ et/ou de leurs différentielles.

Q.3 On suppose que la phase liquide consiste à tout instant en une gouttelette d'eau sphérique de rayon r et de masse volumique constante $\rho_0 = 1000\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$. Exprimez la différentielle de l'enthalpie libre en fonction de μ_ℓ, μ_v, ρ_0, r, σ, $M_{\mathrm{H_2O}}$ et dr, où $M_{\mathrm{H_2O}}$ est la masse molaire de l'eau.

Q.4 Intégrez cette relation pour obtenir l'enthalpie libre $G(r)$ (à une constante près, qui ne joue pas de rôle dans ce qui suit). Tracez l'allure de $G(r)$ pour μ_ℓ et μ_v fixés. On distinguera les cas $\mu_\ell < \mu_v$ et $\mu_\ell > \mu_v$.

Q.5 Discutez l'évolution de la gouttelette suivant son rayon initial, en distinguant à nouveau les cas $\mu_\ell < \mu_v$ et $\mu_\ell > \mu_v$. Quand cela est pertinent, on identifiera une valeur remarquable r_c de r, dont on donnera l'expression en fonction des mêmes paramètres qu'à la **Q.3**. On définira également une « énergie d'activation » pour l'apparition de la phase liquide, lorsque l'on part uniquement d'un mélange gazeux air-vapeur d'eau, dont on donnera l'expression en fonction de ces mêmes paramètres.

Q.6 On modélise la phase gazeuse comme un mélange de gaz parfaits. En exprimant le potentiel chimique de la vapeur d'eau, exprimez le rayon critique au-delà duquel une gouttelette croît spontanément en fonction du paramètre $\chi = P_v/P_{\mathrm{sat}}(T) > 1$ appelé « sursaturation » et de $M_{\mathrm{H_2O}}$, σ, ρ_0, T et de la constante R des gaz parfaits.

Q.7 À partir de vos connaissances sur la loi d'Arrhénius, ou sur le facteur de Boltzmann, proposez une expression pour la dépendance de la vitesse d'apparition des gouttelettes dans l'atmosphère en fonction de la sursaturation χ (cette expression sera obtenue à une constante multiplicative près). Commentez cette dépendance en χ.

On considère maintenant la situation représentée sur la FIGURE 9 : une particule solide en suspension dans l'atmosphère présente une cavité conique ouverte sur l'extérieur, de demi-angle d'ouverture θ. On étudie la possibilité que de l'eau liquide se forme à partir du fond de la cavité. L'eau liquide occupe alors un domaine conique dont la base est un disque de rayon r perpendiculaire à l'axe du cône. Le volume d'un tel cône est $\pi r^2\ell/3$, où ℓ est la hauteur du cône.

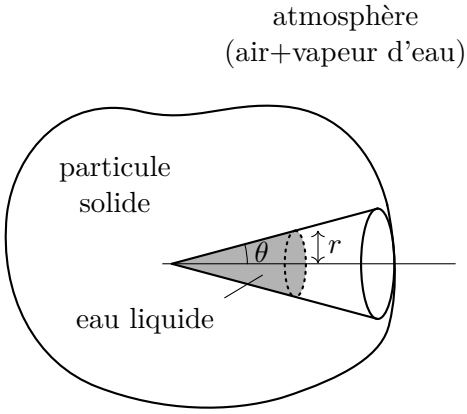


FIGURE 9

On fait l'hypothèse que seule l'interface liquide-gaz intervient dans le terme de tension de surface, et donc que l'interface solide-liquide n'engendre aucun terme de tension de surface.

Q.8 Exprimez la différentielle de l'enthalpie libre en fonction de μ_ℓ, μ_v, ρ_0, r, σ, $M_{\mathrm{H_2O}}$, θ et dr.

Q.9 Comme à la **Q.5**, identifiez une valeur remarquable de r. Exprimez l'énergie d'activation associée en fonction de σ, $M_{\mathrm{H_2O}}$, ρ_0, μ_ℓ, μ_v et θ.

Q.10 Expliquez alors pourquoi la présence de particules en suspension dans l'atmosphère favorise l'apparition de nuages.

••• FIN •••

Données

Constante des gaz parfait	$R = 8{,}314\,\mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}}$
Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_a = 6{,}02\times10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}}$
Constante de Boltzmann	$k = 1{,}38\times10^{-23}\,\mathrm{J\cdot K^{-1}}$
Énergie de l'atome d'hydrogène dans son état fondamental	$-13{,}6\,\mathrm{eV}$
Numéro atomique de l'oxygène	8
Masse molaire atomique de l'oxygène	$16{,}0\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$
Enthalpie molaire standard de formation de O_3	$141{,}9\,\mathrm{kJ\cdot mol^{-1}}$ (à 298 K)
Entropie molaire standard de O_2	$205\,\mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}}$ (à 298 K)
Entropie molaire standard de O_3	$239\,\mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}}$ (à 298 K)
Masse molaires (en $\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$) :	$M_H = 1$, $M_C = 12$, $M_N = 14$, $M_O = 16$

Données sur le cuivre et le silicium :

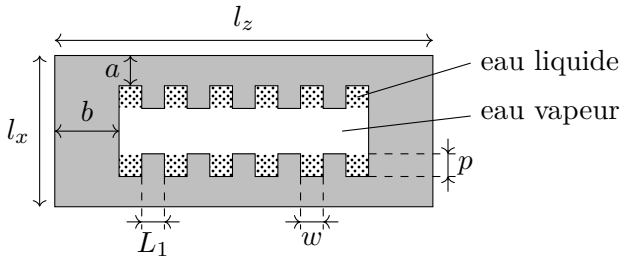
	Cu	**Si**
Numéro atomique	29	14
Masse atomique relative ($\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$)	63,546	28,0855
Température de fusion (°C)	1083	1410
Température d'ébullition (°C)	2567	2355
État de la matière à 20 °C et 1 bar	solide	solide
Densité à 20 °C ($\mathrm{g\cdot cm^{-3}}$)	8,92	2,33
Niveaux d'oxydation	1 ou 2	-4 ou 4
Électronégativité	1,75	1,74
Rayon atomique (pm)	127,8	117,6
Configuration électronique	$[\mathrm{Ar}]3d^{10}4s^1$	$[\mathrm{Ne}]3s^23p^2$
Énergie d'ionisation (eV)	7,7264	8,1517
Fraction de masse dans le géosphère (%)	0,01	25,8
Conductivité électrique ($\mathrm{S\cdot m^{-1}}$)	$59{,}6\times10^6$	$2{,}52\times10^{-4}$
Conductivité thermique ($\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$)	401	148
Capacité thermique massique ($\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$)	380	700

Équilibre liquide vapeur de l'eau au voisinage de 70 °C :

T	P	ρ_ℓ	ρ_v	h_ℓ	h_v	S_ℓ	S_ℓ	$C_{v,\ell}$	$C_{v,v}$
(K)	(kPa)	($\mathrm{kg\cdot m^{-3}}$)		($\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}}$)		($\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$)			
342	27,188	979,503	0,174 40	279,866	2620,69	0,9165	7,8013	3,9416	1,4888
343	32,366	977,247	0,205 37	296,628	2627,55	0,9655	7,7414	3,9208	1,4951
344	38,354	974,904	0,240 77	313,401	2634,35	1,0140	7,6833	3,8999	1,5018

Dimensions du caloduc :

b (mm)	a (mm)	l_x (mm)	l_z (cm)	w (µm)	L_1 (µm)	p (µm)	$y_2 - y_1$ (cm)
6	1	2,9	2	20	80	70	10



Thermodynamique générale :

- Pour un système formé de N constituants (ou phases) de potentiels chimiques μ_i, avec les quantités de matière n_i, la différentielle de l'énergie interne s'écrit :

$$\mathrm{d}U = T\mathrm{d}S - P\mathrm{d}V + \sum_{i=1}^{N} \mu_i \mathrm{d}n_i$$

  le dernier terme de la différentielle n'apparaît pas lorsque l'on considère une phase pure ou un système sans transformation de phases ($\mathrm{d}n_i = 0$).

- L'enthalpie libre est définie par $G = U + PV - TS$

Spécification du microprocesseur i7-4500U :

Status	Launched
Launch Date	Q3'13
DMI2	5 GT/s
Processor Number	i7-4500U
# of Cores	2
# of Threads	4
Clock Speed	1.8 GHz
Max Turbo Frequency	3 GHz
Intel® Smart Cache	4 MB
Instruction Set	64-bit
Instruction Set Extensions	SSE 4.1/4.2, AVX 2.0
Lithography	22 nm
Max TDP	15 W
Recommended Customer Price	TRAY: $393.00
Max Memory Size (dependent on memory type)	16 GB
Memory Types	DDR3L-1333/1600; LPDDR3-1333/1600
# of Memory Channels	2
Max Memory Bandwidth	25.6 GB/s
PCI Express Revision	2.0
PCI Express Configurations ‡	4x1, 2x4
Max # of PCI Express Lanes	12
Max CPU Configuration	1
$T_{JUNCTION}$	100°C
Package Size	40mm x 24mm x 1.5mm
Sockets Supported	FCBGA1168
Low Halogen Options Available	See MDDS