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%

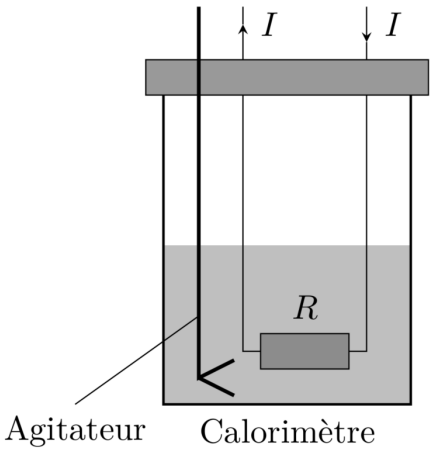
Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

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.

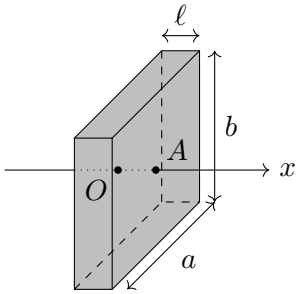


FIGURE 1

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 $\mathrm{d}S = \mathrm{d}y\mathrm{d}z$:

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

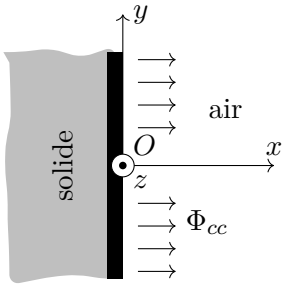


FIGURE 2

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.

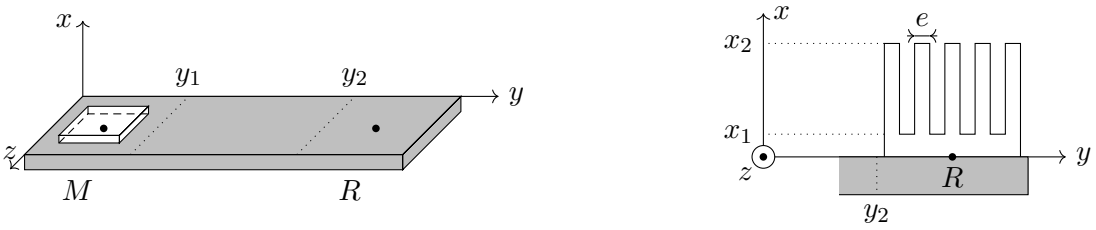


FIGURE 3

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.

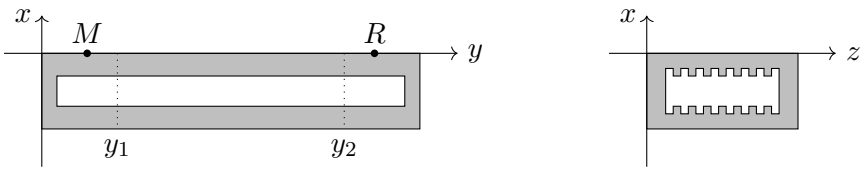


FIGURE 4

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.

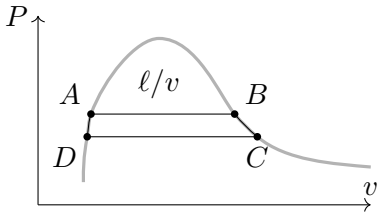


FIGURE 5

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 : Quelques aspects des routes

Ce problème s'intéresse à plusieurs aspects des routes comme leur traitement en hiver pour éviter l'accumulation de neige ou encore la fabrication du béton routier. Les données sont regroupées en fin d'énoncé.

I – Les routes en hiver

Nous étudions dans un premier temps différentes propriétés de l'eau, susceptibles d'exister sous plusieurs formes sur les routes.

Q.1
a) Donner les structures électroniques de l'hydrogène H ($Z = 1$) et de l'oxygène O ($Z = 8$).
b) Donner, en justifiant, la formule de Lewis de la molécule d'eau.
c) Pourquoi la liaison O–H est-elle polarisée ?

Q.2 L'étude expérimentale permet de constater que la molécule d'eau est plane et coudée. L'angle $\widehat{HOH}$ est de 104,45° avec une distance entre oxygène et hydrogène qui vaut 95,84 pm.
a) Comment interpréter le fait que l'angle ne soit pas celui qui existe dans un tétraèdre régulier (109,5°) autour de son centre vers deux sommets ?
b) La molécule possède un moment dipolaire égal à 1,8 D. Préciser sa direction et le sens de ce moment à l'aide d'un schéma.
c) Déterminer la charge partielle portée par l'hydrogène.
d) Quel type de solvant est l'eau ? Citer des conséquences de cette propriété.

Q.3
a) Indiquer ce qu'on appelle les forces de Van der Waals.
b) De quelle nature sont les interactions dites liaisons hydrogène ?
c) Pouvez-vous donner un ordre de grandeur de l'énergie de la liaison hydrogène et la comparer aux autres liaisons chimiques que vous connaissez ?

Le cristal de glace est un cristal moléculaire dans lequel la cohésion entre molécules est assurée par les liaisons hydrogène. Il existe plusieurs variétés allotropiques de glace. Dans les cristaux de glace de type *diamant*, les atomes d'oxygène occupent les positions du réseau cubique à faces centrées ainsi qu'un site tétraédrique sur deux de ce réseau. Entre l'oxygène d'un site tétraédrique et un oxygène d'un sommet voisin se trouve un hydrogène qui n'est pas à égale distance des deux oxygènes car il est engagé avec l'un dans une liaison de covalence (distance $d_1 = 96\,\text{pm}$) et avec l'autre dans une liaison hydrogène (distance $d_2 = 180\,\text{pm}$).

Q.4 Représenter le cristal de glace de type *diamant* puis déterminer la longueur de l'arête a de la maille.

Q.5 Estimer l'énergie de la liaison hydrogène sachant que l'enthalpie standard de sublimation de la glace vaut $\Delta_{sub}H^\circ = 47{,}8\,\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. Comparer à l'énergie de la liaison O–H qui vaut $460\,\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Q.6 a) Tracer l'allure du diagramme d'état de l'eau avec en abscisse la température et en ordonnée la pression en indiquant les phases stables dans les différents domaines.
b) Calculer numériquement la quantité d'énergie thermique reçue par $m = 1\,\text{kg}$ d'eau qui passe, à la pression atmosphérique P°, d'une température initiale $\theta_i = 4\,^\circ\text{C}$ à une température finale $\theta_f = -10\,^\circ\text{C}$.

Q.7 L'eau peut assez facilement présenter du retard à la solidification quand elle se refroidit à pression constante : le phénomène s'appelle *surfusion*. La phase liquide métastable peut se maintenir de $0\,^\circ\text{C}$ à $-39\,^\circ\text{C}$ mais le contact avec un objet fait se solidifier au moins partiellement l'eau de façon rapide et irréversible. Le verglas est un dépôt mince et lisse de glace issue d'eau de pluie en surfusion.
a) Pourquoi peut-on considérer la solidification d'une eau en surfusion comme isenthalpique ?
b) En supposant que l'eau de pluie est à $-10\,^\circ\text{C}$ et qu'elle évolue vers un état biphasé à $0\,^\circ\text{C}$ à l'arrivée au sol, quelle proportion x en masse de glace obtient-on ?

Q.8 Les transferts thermiques s'établissent avec le sol que l'on considère comme un thermostat de température $T_{sol} = -10\,^\circ\text{C}$. Sachant que l'eau passe de l'état biphasé de la question précédente à l'état monophasé stable en équilibre thermique avec le sol, que vaut l'énergie thermique fournie à l'eau par unité de surface quand le sol se recouvre d'une épaisseur $e = 1\,\text{mm}$ de verglas ?

Q.9 Faire un bilan entropique littéral pour $m = 1\,\text{kg}$ d'eau qui passe de l'état surfondue à $\theta_i = -10\,^\circ\text{C}$ à l'état solide à $\theta_f = -10\,^\circ\text{C}$ en calculant :
a) la variation d'entropie de l'eau,
b) la variation d'entropie du sol,
c) la création d'entropie.

Une technique très utilisée pour faire disparaitre la glace des routes est le saupoudrage avec du sel qui permet de faire fondre la phase solide de l'eau. Quand on envisage l'équilibre entre une phase solide "glace" et une solution aqueuse de chlorure de sodium NaCl :

$$\text{H}_2\text{O}_{(\text{s})} = \text{H}_2\text{O}_{(\ell,\text{NaCl})}$$

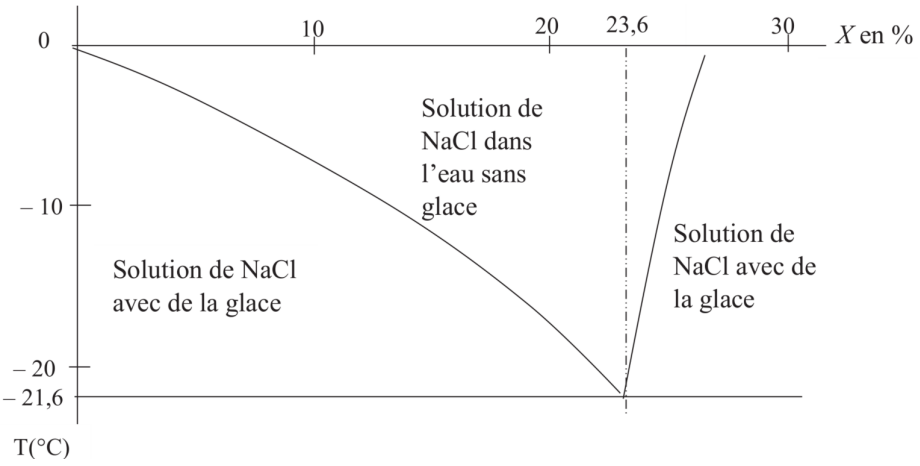
on peut, comme pour une réaction chimique, écrire l'égalité des potentiels chimiques de l'eau dans les deux phases, définir une constante d'équilibre K°, un quotient de réaction Q_r et appliquer la loi de Van't Hoff. Les potentiels chimiques (à la température T et à la pression P°) de l'eau solide et de l'eau dans une solution de chlorure de sodium s'écrivent respectivement :

$$\begin{cases} \mu_s &= -18\times10^{-3}\,(16\,213 + 2{,}40T) \\ \mu_{aq} &= -18\times10^{-3}\,(15\,880 + 3{,}62T - 8{,}31\ln(1-Y)) \end{cases}$$

où Y est la fraction molaire de NaCl dans la solution.

Q.10 a) En déduire $\ln(1-Y)$ en fonction de T pour les équilibres entre les deux phases (glace, solution salée).
b) Retrouver la température de fusion de l'eau pure à P°.

Sur la figure ci–dessous, on a représenté la température d'équilibre en fonction du titre massique X du chlorure de sodium de la solution pour des concentrations faibles. À titre massique donné, le point de la courbe donne la température limite au–dessus de laquelle il n'y aura plus de glace.



Q.11 a) Quel pourcentage massique minimum de sel doit-on obtenir par l'opération de salage dans les zones verglacées par $-10\,^\circ\mathrm{C}$?
b) Cette technique peut-elle convenir en Sibérie où les températures descendent en dessous de $-50\,^\circ\mathrm{C}$?

II – Élaboration d'un béton routier

Le béton est obtenu par mélange de ciment, d'eau, de sable et autres granulats. En usine, on produit du *clinker* qui, mis en poudre très fine avec des ajouts, constitue le ciment. Le ciment Portland est le plus utilisé au monde. Son *clinker* est fabriqué dans un four à 1700 K par la réaction entre du calcaire $CaCO_3$ et de l'argile assimilée à de la silice SiO_2. Cette réaction produit également du gaz carbonique CO_2. On supposera l'enthalpie et l'entropie standards de réaction comme des grandeurs indépendantes de la température.

Q.12 Écrire le bilan réactionnel (réaction (1)) entre la silice et le calcaire qui engendre une mole du constituant solide principal du ciment, c'est-à-dire une mole de silicate de calcium Ca_3SiO_5.

Q.13 a) Calculer, à partir des données, les enthalpie standard de réaction $\Delta_r H_1^\circ$ et entropie standard de réaction $\Delta_r S_1^\circ$ associées.
b) Commenter leurs signes.

Q.14 a) En déduire que l'expression de l'enthalpie libre standard de réaction $\Delta_r G_1^\circ$ peut s'écrire :

$$\Delta_r G_1^\circ(T) = 419 \times 10^3 \left(1 - \frac{T}{T_i}\right)$$

b) Préciser son unité et la valeur de T_i.
c) Commenter le choix industriel de la température.
d) Évaluer la constante d'équilibre de la réaction (1) à 1700 K.

Q.15 Calculer l'énergie thermique Q_p nécessaire pour produire une tonne de ciment assimilé à du silicate de calcium pur à 1700 K et P°.

Cette énergie thermique est apportée par la réaction (2), de combustion du méthane, supposée totale :

$$CH_{4(g)} + 2\,O_{2(g)} = CO_{2(g)} + 2\,H_2O_{(g)}$$

dont l'enthalpie standard de réaction vaut $\Delta_r H_2^\circ = -830\,\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ à 298 K.
Elle est réalisée sous pression standard entre le méthane et l'air pris à 298 K dans les proportions stœchiométriques. L'air est considéré comme un mélange d'un volume de dioxygène O_2 et de quatre volumes de diazote N_2.

Q.16 Calculer la température atteinte en supposant que l'énergie thermique de la combustion n'a pas le temps de s'évacuer et en supposant que les capacités thermiques molaires standards sont indépendantes de la température.

Q.17 On veut utiliser l'énergie thermique fournie par le retour à 1700 K des constituants engendrés par la réaction (2). Quelle est la quantité n de dioxyde de carbone CO_2 produite par tonne de ciment ? Commenter sachant que la production de ciment dans le monde représente 4,6 milliards de tonnes par an.

• • • FIN • • •

Données

Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_a = 6{,}02 \times 10^{23}\,\text{mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k = 1{,}38 \times 10^{-23}\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$
Constante des gaz parfait	$R = 8{,}314\,\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
Unité de moment dipolaire (Debye)	$1\,\text{D} = 3{,}30 \times 10^{-30}\,\text{C}\cdot\text{m}$
Charge élémentaire	$e = 1{,}6 \times 10^{-19}\,\text{C}$
Masses atomiques molaires (en $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	$M_\text{H} = 1$; $M_\text{C} = 12$; $M_\text{O} = 16$; $M_\text{Si} = 28$; $M_\text{Ca} = 40$
Électronégativité (échelle de Pauling)	$\chi_\text{H} = 2{,}2$ et $\chi_\text{O} = 3{,}44$
Enthalpie standard de fusion de la glace	$\Delta_{fus}H^\circ = 333\,\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
Point triple de l'eau	$T_t = 273{,}16\,\text{K}$ et $P_t = 0{,}06\,\text{bar}$
Point critique de l'eau	$T_c = 647{,}15\,\text{K}$ et $P_c = 218\,\text{bar}$

Données sur le cuivre et le silicium :

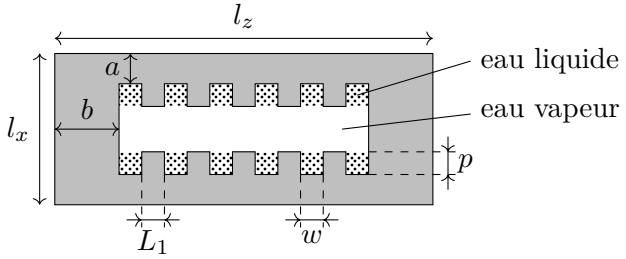
	Cu	**Si**
Numéro atomique	29	14
Masse atomique relative ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	63,546	28,0855
Température de fusion (°C)	1083	1410
Température d'ébullition (°C)	2567	2355
État de la matière à 20 °C et 1 bar	solide	solide
Densité à 20 °C ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	8,92	2,33
Niveaux d'oxydation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



Autres caractéristiques de l'eau à 0 °C :

	Masse volumique ρ	Capacité thermique massique C
État liquide	$1000\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$	$4{,}22\,\mathrm{kJ \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$
État solide	$917\,\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$	$2{,}06\,\mathrm{kJ \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$

Grandeurs standard utiles (à 298 K) :

Espèce	$CO_{2(g)}$	$CaCO_{3(s)}$	$SiO_{2(s)}$	$Ca_3SiO_{5(s)}$
$\Delta_f H^\circ$ (en $\mathrm{kJ \cdot mol^{-1}}$)	−393	−1206	−910	−2930
S_m° (en $\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$)	213,6	92,3	41,3	130,5

Espèce	$N_{2(g)}$	$O_{2(g)}$	$H_2O_{(g)}$	$CH_{4(g)}$	$CO_{2(g)}$
C_{pm}° (en $\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}}$)	29,1	29,4	33,6	35,3	37,1

On rappelle que la variation d'entropie ΔS d'un corps monophasé liquide ou solide de capacité thermique massique C et de masse m qui passe de la température initiale T_i à la température finale T_f vaut

$$\Delta S = mC \ln\left(\frac{T_f}{T_i}\right)$$

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