

<p style="text-align: center;"><b>Devoirs surveillé n° 2</b> <b>14h00 – 18h00 4 heures</b></p>
--

**Calculatrice autorisée**

Le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction.

Toutes les interprétations seront comptabilisées

Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Certaines questions, peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par une barre en marge. Il est alors demandé d'explicitier 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.

**RAPPEL DES CONSIGNES**

- Utiliser uniquement un stylo noir ou bleu foncé non effaçable pour la rédaction de votre composition ; d'autres couleurs, excepté le vert, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les schémas et la mise en évidence des résultats.
- Ne pas utiliser de correcteur.
- Écrire le mot FIN à la fin de votre composition.

**Le devoir se compose de 4 problèmes indépendants.**

\* \* \*

## 1<sup>er</sup> problème : Carbonatation de l'oxyde de baryum

### Données :

Enthalpies standard de formation et entropies molaires standard à 298 K :  $\Delta_f H^\circ$  (kJ.mol<sup>-1</sup>) et  $S^\circ$  (J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

	$\Delta_f H^\circ$ (kJ.mol <sup>-1</sup> )	$S^\circ$ (J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
BaCO <sub>3(s)</sub>	-1216	112
BaO <sub>(s)</sub>	-553	70
CO <sub>2(g)</sub>	-393	213

Le baryum de symbole  ${}_{56}\text{Ba}$  ( $M = 137 \text{ g.mol}^{-1}$ ) est utilisé pour piéger les gaz résiduels dans les tubes à vide, lors de la désoxydation de la fonte ou encore pour former des alliages. Les composés ioniques du baryum sont utilisés dans diverses fabrications industrielles : céramiques, peinture, verres, caoutchouc... En médecine, le sulfate de baryum est également une substance de marquage en radiographie.

Le carbonate de baryum solide BaCO<sub>3(s)</sub> peut être formé à partir de l'oxyde de baryum solide BaO(s) et du dioxyde de carbone gazeux CO<sub>2(g)</sub>.

- Q1.** Ecrire l'équation de la réaction de formation du carbonate de baryum à partir de BaO(s).
- Q2.** Calculer l'enthalpie standard de réaction de la réaction étudiée. Conclure.
- Q3.** Prévoir le signe de l'entropie standard de réaction, puis calculer sa valeur.
- Q4.** Exprimer la constante d'équilibre de cette réaction de carbonatation à 298 K en fonction des valeurs thermodynamiques obtenues précédemment. Calculer sa valeur. Commentaire ?
- Q5.** Calculer la valeur de la pression partielle du CO<sub>2</sub> à l'équilibre,  $P_{\text{CO}_2\text{eq}}$ , à 298 K.
- Q6.** Sachant que la pression partielle du CO<sub>2</sub> dans l'air vaut  $3,0 \cdot 10^{-4}$  bar, est-il possible de conserver de l'oxyde de baryum à l'air libre à 298 K?
- Q7.** On enferme maintenant une mole de BaCO<sub>3(s)</sub> dans un récipient initialement vide de volume variable V. La température demeure constante et égale à 298 K. Quel est l'effet d'une augmentation de volume à température et composition constantes sur l'équilibre chimique précédemment étudié ?
- Q8.** En déduire l'évolution de la quantité de matière de CO<sub>2</sub> dans l'enceinte en fonction de la valeur de V (V évoluant de 0 à  $\infty$ ). Si l'évolution n'est pas monotone, on précisera la valeur de la quantité de matière de CO<sub>2</sub> au point de changement de pente.

## 2<sup>e</sup> problème : Echauffement d'un accumulateur

Les données se trouvent en fin de ce problème.

Depuis l'utilisation des batteries Li-ion, plusieurs cas d'explosion ont été recensés que ce soit pour les téléphones portables, les ordinateurs ou encore les véhicules. Des courts-circuits au sein de l'accumulateur ont souvent été incriminés. En 2011, des chercheurs Taiwanois ont montré que lorsque la température dépasse 100 °C, les accumulateurs Li-ion peuvent exploser et induire localement une élévation de température de 900 °C.

**Q 9.** Estimer le temps de décharge d'une batterie Li-ion mise en court-circuit dont la résistance interne est  $r = 7,7 \text{ m}\Omega$ , la tension à vide  $U = 3,7 \text{ V}$  et la capacité spécifique  $2600 \text{ mA}\cdot\text{h}$ .

**Q 10.** Déterminer s'il est possible qu'un court-circuit puisse être responsable d'une telle élévation de température.

### Influence de l'électrolyte

Ces chercheurs ont constaté que l'explosion d'une batterie Li-ion peut survenir même pour un accumulateur déchargé. Parmi les réactions intervenant dans les explosions de batteries Li-ion, la combustion de l'acide pyruvique ( $\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3(\text{l})$ ), utilisé comme électrolyte, joue un rôle important dans l'élévation de température. Sa réaction de combustion est modélisée par l'équation



**Q 11.** Justifier que l'enthalpie standard de formation de  $\text{O}_2(\text{g})$  est nulle.

**Q 12.** Déterminer l'enthalpie standard de réaction à 298 K. Commenter son signe.

Afin d'évaluer les risques lors d'une surchauffe d'une batterie Li-ion, un accumulateur de type 18650 initialement à la température  $T_i = 298 \text{ K}$  sous une pression  $P_i = 1,0 \text{ bar}$  est placé dans un calorimètre en acier fermé hermétiquement de volume  $V_0 = 150 \text{ mL}$  (figure 3). Le système est équipé d'une mesure en temps réel de la température et de la pression malgré l'explosion. Cette batterie est chauffée progressivement jusqu'à  $\theta_0 = 129^\circ\text{C}$ , température à partir de laquelle l'explosion de la batterie commence. Dans toute l'étude, on suppose que la capacité thermique du calorimètre est négligeable et que le volume occupé par la batterie est négligeable devant l'espace libre disponible. En outre, on considère les gaz comme parfaits.

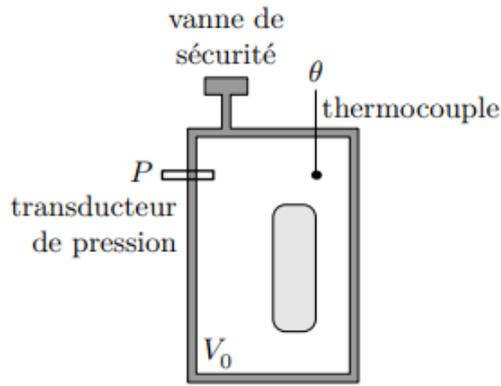
**Q 13.** Déterminer, compte tenu de l'évolution de la température observée (figure 4), si le calorimètre est parfaitement calorifugé.

**Q 14.** En estimant le temps caractéristique de retour à la température ambiante, justifier que la transformation du contenu du calorimètre liée à l'explosion peut être assimilée à une transformation adiabatique.

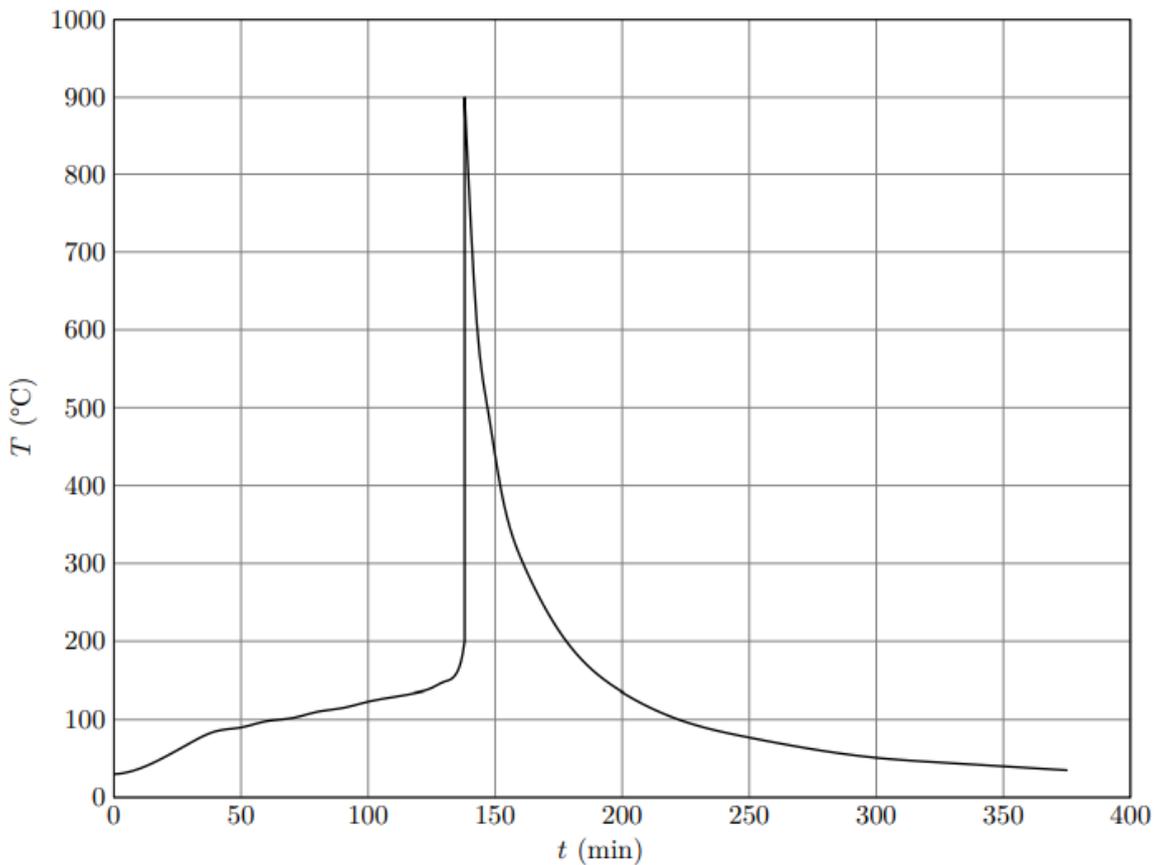
**Q 15.** En utilisant la figure 4, estimer la quantité de matière d'acide pyruvique mise en jeu lors de l'explosion.

**Q 16.** Déterminer la quantité de matière d'acide pyruvique  $n(\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3)_{\text{lim}}$  conduisant à la pression  $p_{\text{lim}} = 75 \text{ bar}$  dans le calorimètre.

**Q 17.** Sachant que le calorimètre utilisé peut résister à une pression de 75 bar, conclure quant à l'intérêt d'un des éléments constitutifs du calorimètre schématisé sur la figure 3.



**Figure 3** Vent Sizing Package 2 (VSP2™), calorimètre adiabatique à faible inertie thermique, d'après <https://www.fauske.com>



**Figure 4** Profil de température d'une batterie chauffée dans un calorimètre, d'après Can-Yong Jhu *et al*, Journal of Hazardous Materials, 2011

### Emballlement thermique

On suppose que la réaction de combustion de l'électrolyte (I.3) suit une loi de vitesse d'ordre 1 par rapport à l'acide pyruvique  $C_3H_4O_3$ . On considère que les réactifs sont introduits en proportions stœchiométriques dans un volume  $V$  constant. On note  $\alpha_{\text{diss}}(t)$  le taux d'avancement de la réaction comme rapport de la quantité de matière en acide pyruvique consommé par la quantité de matière initiale, notée  $n_0$ .

**Q 18.** Exprimer la loi de vitesse donnant la vitesse de disparition de l'acide pyruvique en fonction de  $\alpha_{\text{diss}}(t)$ ,  $n_0$ ,  $V$  et la constante de vitesse  $k$ .

**Q 19.** Rappeler la loi d'Arrhénius. Préciser l'influence de la température sur la vitesse de réaction.

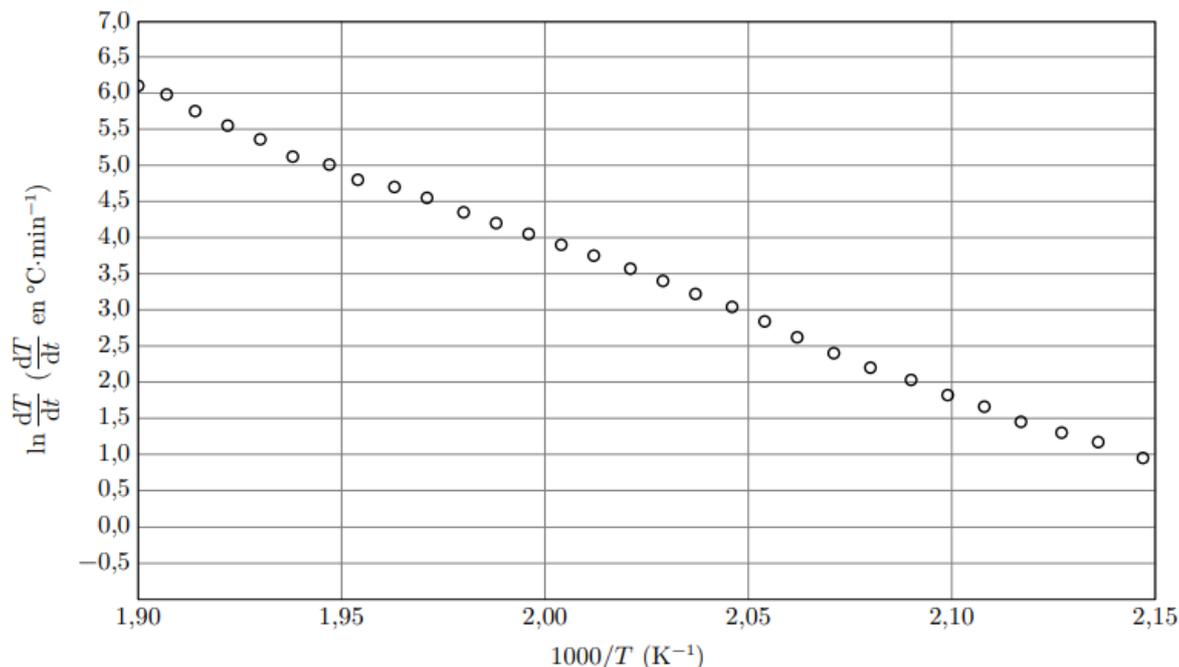
**Q 20.** On considère une batterie de capacité thermique  $C$ , siège de la réaction (I.3) de combustion de l'électrolyte. On décompose la transformation adiabatique entre  $t$  et  $t+dt$  en une transformation chimique à température et pression constantes puis un échauffement isobare de la batterie. Exprimer la variation d'enthalpie lors de ces deux transformations infinitésimales. Montrer que l'évolution de température vérifie :

$$\frac{dT}{dt} = \beta(1 - \alpha_{\text{diss}}) \exp\left(-\frac{E\alpha}{RT}\right)$$

où  $\beta$  est une constante positive à exprimer en fonction des constantes et données du problème.

**Q 21.** Au regard de l'équation différentielle ci-dessus, justifier le terme *d'emballement thermique* lorsque l'avancement de la réaction est faible ( $\alpha_{\text{diss}} \ll 1$ ).

Le dispositif expérimental décrit figure 3 permet de relever la température en fonction du temps notamment pour  $\alpha_{\text{diss}}(t) \ll 1$ . La figure 5 donne une représentation de  $\ln\left(\frac{dT}{dt}\right)$  en fonction de  $1/T$ .



**Figure 5** Tracé de  $\ln(dT/dt)$  en fonction de  $1000/T$  pour une batterie Li-ion déchargée pendant son explosion, d'après Can-Yong Jhu *et al*, Journal of Hazardous Materials, 2011

**Q 23.** En supposant que le modèle isobare reste valide, calculer l'énergie d'activation à l'aide de la courbe de la figure 5.

**Données pour le 2<sup>e</sup> problème :**

— Constante universelle des gaz parfaits :  $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

— Enthalpies standard de formation à 298 K

	$\text{C}_3\text{H}_4\text{O}_3(\text{l})$	$\text{CO}_2(\text{g})$	$\text{H}_2\text{O}(\text{g})$
$\Delta_f H^\circ \text{ (kJ}\cdot\text{mol}^{-1}\text{)}$	-1165,30	-393,5	-241,8

— Masses molaires

	Li	Fe	P	C	O	H
$M \text{ (g}\cdot\text{mol}^{-1}\text{)}$	6,9	55,8	31,0	12,0	16,0	1,0

*Valeurs relatives à l'accumulateur 18650*

- Capacité spécifique  $Q = 2600 \text{ mA}\cdot\text{h}$
- Tension  $U = 3,7 \text{ V}$
- Masse  $m = 45,5 \text{ g}$
- Diamètre  $d = 18 \text{ mm}$
- Hauteur  $h = 65 \text{ mm}$
- Résistance interne  $r = 7,7 \text{ m}\Omega$
- Capacité thermique massique  $c_p = 0,73 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- Conductivité thermique  $\lambda = 0,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

### 3<sup>è</sup> problème : Refroidissement de composants électroniques

Il est nécessaire d'évacuer la chaleur dégagée par les transistors des microprocesseurs notamment. Pour ce faire, des ventilateurs sont installés afin de renouveler en permanence l'air au contact des composants. De plus, des ailettes de refroidissement sont assemblées directement sur la surface des composants afin de pouvoir dissiper le plus possible de chaleur vers l'extérieur par transfert conducto-convectif.

On modélise une de ces ailettes par un cylindre d'axe  $(Ox)$ , de rayon  $a$ , de longueur  $b \gg a$  et de conductivité thermique  $\lambda$ . Elle est accolée en  $x = 0$  au composant de température  $T_d$  ; le contact thermique en  $x = 0$  est supposé parfait. Le reste de l'ailette est au contact de l'air que l'on suppose de température  $T_a$  uniforme.

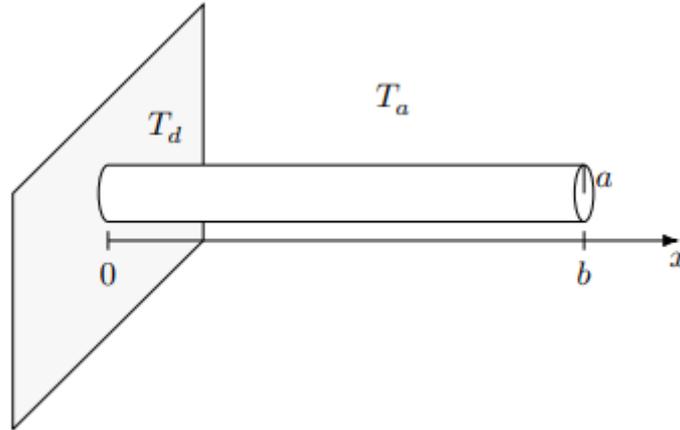


Figure 1 Modélisation de l'ailette

**Q24.** Énoncer la loi de Fourier relative au vecteur densité de flux thermique  $\vec{j}_Q$  qui caractérise le phénomène de conduction thermique le long de l'axe de l'ailette.

L'air qui entoure le solide, constamment renouvelé et de température uniforme  $T_a$ , échange avec l'ailette un transfert conducto-convectif. Dans une fine couche de fluide au contact de la surface du solide, ce transfert latéral peut-être modélisé par la loi de Newton :

$$\vec{j}_{cc}(x) = h(T(x) - T_a) \vec{n}$$

où  $\vec{j}_{cc}$  correspond à la densité de flux conducto-convectif et  $\vec{n}$  est un vecteur unitaire, normal à la surface d'échange et orienté du solide vers l'air. Le coefficient  $h$ , dont certaines valeurs numériques sont disponibles en fin d'énoncé, est appelé coefficient de transfert thermique de surface.

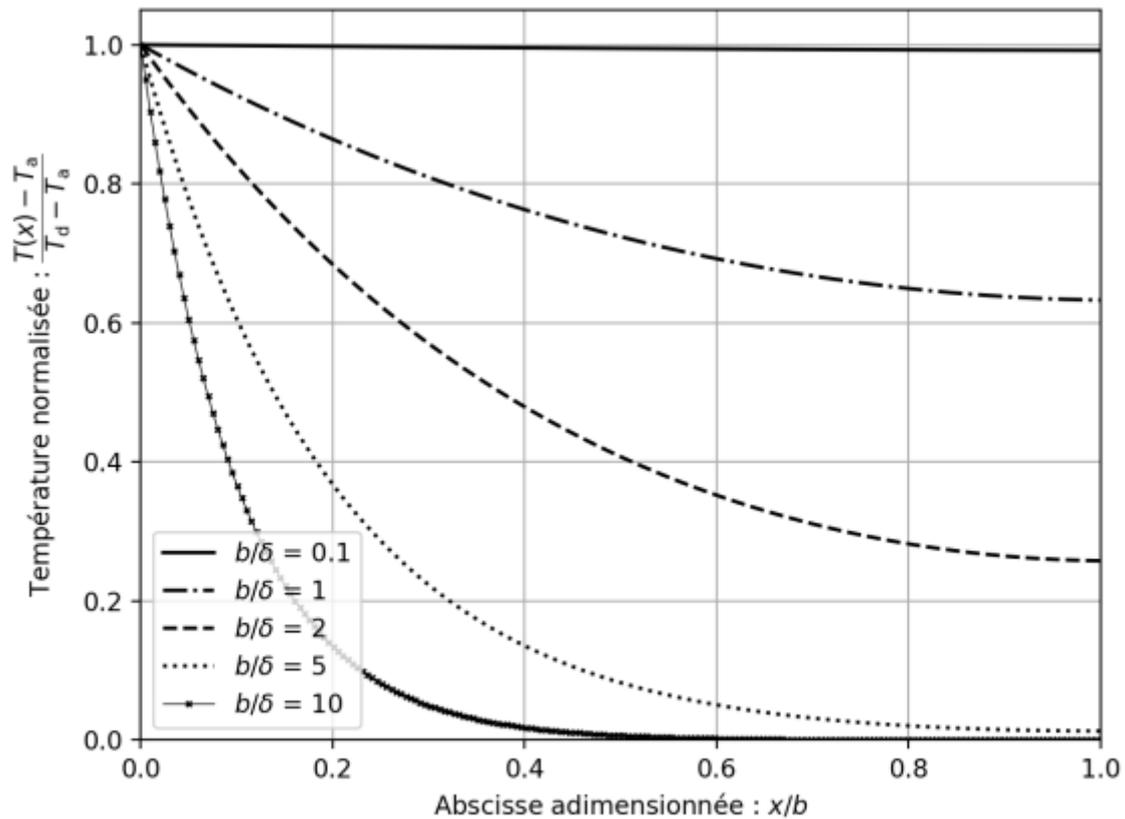
**Q25.** En réalisant un bilan de puissance thermique sur une tranche de longueur  $dx$  de l'ailette, montrer que la température suit l'équation différentielle

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{T}{\delta^2} = -\frac{T_a}{\delta^2} \quad \text{avec} \quad \delta = \sqrt{\frac{\lambda a}{2h}} \quad (\text{I.1})$$

**Q26.** Vérifier l'homogénéité de l'expression du paramètre  $\delta$  introduit dans la question précédente. Estimer sa valeur numérique dans le cas d'une ailette en silicium de rayon  $a = 1 \text{ mm}$ .

**Q27.** Expliciter les conditions aux limites que doit vérifier le champ de température  $T(x)$  en  $x = 0$  et en  $x = b$ .

Sur la figure 2 est représentée la solution « normalisée » de l'équation (I.1), définie par  $\frac{T(x) - T_a}{T_d - T_a}$  en fonction de l'abscisse adimensionnée  $x/b$ , pour différentes valeurs du rapport  $b/\delta$ .



**Figure 2** Représentation graphique du champ de température dans une ailette en silicium (solution de l'équation (I.1)) pour différentes valeurs du rapport  $b/\delta$

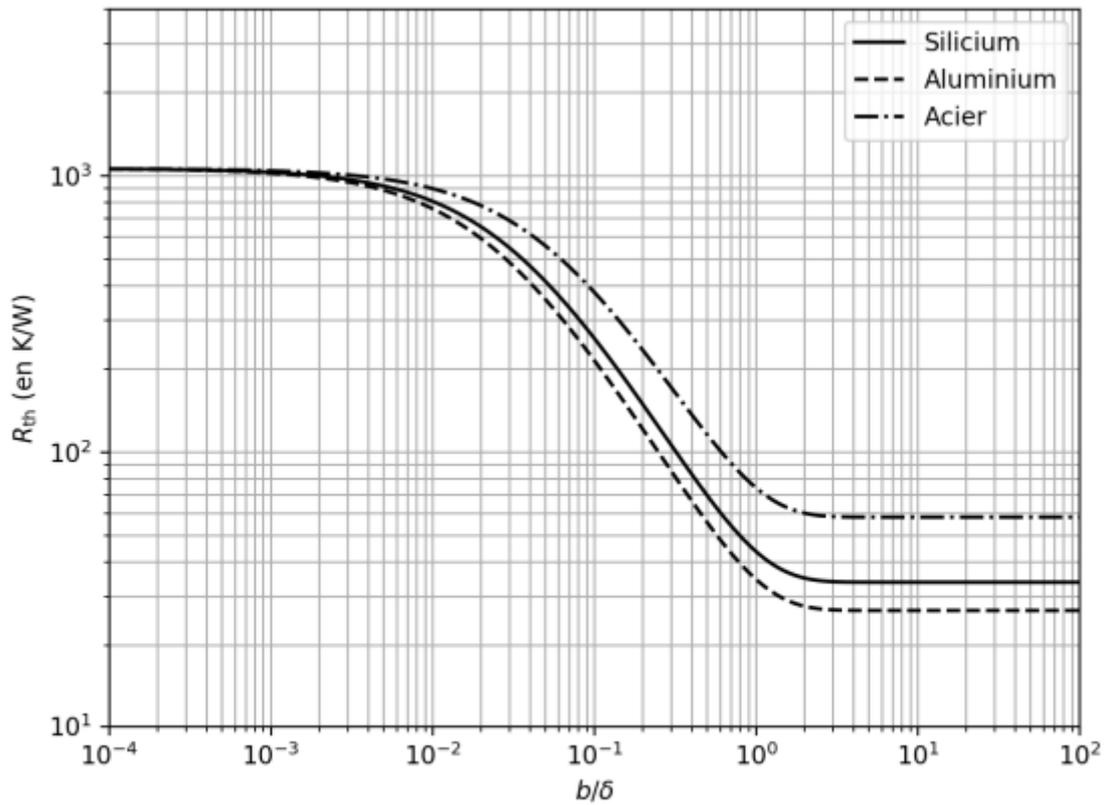
**Q27.** En précisant les approximations effectuées, obtenir une expression analytique approchée de  $T(x)$  dans le cas où  $b \gg \delta$ . Vérifier la cohérence de cette expression avec la figure 2.

On définit la résistance thermique  $R_{th}$  de l'ailette de refroidissement par  $R_{th} = \frac{T_d - T_a}{\mathcal{P}}$ , où  $\mathcal{P}$  désigne la puissance thermique totale évacuée par l'ailette dans l'air.

**Q28.** La figure 3 donne une représentation graphique de l'évolution de la résistance thermique d'une ailette cylindrique en fonction du rapport  $b/\delta$ , pour différents matériaux. Interpréter physiquement l'existence d'une valeur asymptotique de  $R_{th}$  commune aux différents matériaux lorsque  $b \ll \delta$  ; justifier sa valeur numérique.

**Q29.** Retrouver, par le calcul, la valeur asymptotique de la résistance thermique  $R_{th}$  de l'ailette en silicium dans le cas où  $b \gg \delta$ .

**Q30.** En pratique, les ailettes sont réalisées en aluminium et leur longueur est fixée à  $b = 2$  cm. En vous appuyant sur la figure 3, justifier ces choix, puis estimer le nombre d'ailettes (de rayon  $a = 1$  mm) à associer à un microprocesseur dissipant une puissance thermique de 200 W pour que la température de ce dernier n'excède pas  $60^\circ\text{C}$  en régime stationnaire de fonctionnement. Commenter.



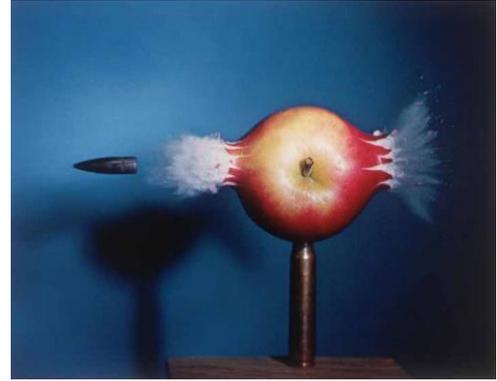
**Figure 3** Évolution de la résistance thermique d'une ailette de rayon  $a = 1$  mm, en présence de ventilation, en fonction du rapport  $b/\delta$

**Données pour le 3è problème :**

Conductivité thermique du silicium	$\lambda_{Si} = 148 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique de l'aluminium	$\lambda_{Al} = 237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique de l'acier	$\lambda_{acier} = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Coefficient conducto-convectif air-métal (air statique)	$h_s = 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Coefficient conducto-convectif air-métal (air renouvelé)	$h_r = 300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

## 4è problème : De l'utilisation d'impulsions électromagnétiques ultracourtes...

Au début du 19<sup>ème</sup> siècle, les prises d'images de mouvements mécaniques étaient réalisées à l'aide de dispositifs photographiques, dont les temps d'expositions étaient contrôlés par des obturateurs mécaniques. Ces derniers permettaient de "figer" un mouvement avec des durées d'exposition minimales de typiquement 1 ms. Tout mouvement s'effectuant sur des échelles de temps inférieures donne alors une image floue.



Afin de réaliser des prises de vue de mouvements rapides, un changement de paradigme a été proposé durant les années 1940 par Harold Eugene Edgerton, professeur de génie électrique au MIT. Plutôt que de développer des capteurs plus rapides avec un objet éclairé continûment, il proposa la technique de photographie stroboscopique. Le principe consiste alors à utiliser un capteur lent, mais d'éclairer l'objet avec un flash lumineux. Ainsi, malgré la lenteur du détecteur, la durée d'exposition est limitée désormais par la durée du flash lumineux, soit typiquement 1  $\mu$ s. Cette technique a permis de produire les premières images de phénomènes mécaniques rapides, comme par exemple l'impact d'une balle dans une pomme, réalisée avec un flash de 0.3  $\mu$ s (MIT Museum Collections, Bullet through apple (1964)). Le développement récent des technologies laser a permis de produire des impulsions lumineuses dites "ultracourtes" offrant alors la possibilité, de façon similaire à H. E. Edgerton, d'étudier la dynamique moléculaire ultrarapide à l'échelle microscopique. Le prix Nobel de Chimie a été attribué en 1999 au professeur Ahmed H. Zewail (California Institute of Technology) pour avoir montré qu'il est possible ainsi d'observer le mouvement des atomes d'une molécule au cours des réactions chimiques à l'aide de telles sources lumineuses.

L'objet de ce problème est d'étudier l'interaction entre une impulsion femtoseconde (1 fs = 10<sup>-15</sup>s) de puissance suffisamment forte pour détériorer une surface métallique par sublimation du métal, due à l'échauffement par effet Joule. On modélise le métal comme une maille cristalline fixe, constituée d'ions positifs immobiles, et d'un gaz d'électrons libres.

		Au	Cu	Al
$\sigma_0$	Conductivité à basse fréquence ( $\times 10^6 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	45.2	59.6	37.7
$n$	Densité d'électrons libres ( $\times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ )	5.9	8.47	18.1
$\kappa$	Conductivité thermique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	314	385	205
$\Delta h_{\text{liq}}$	Enthalpie de liquéfaction ( $\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1.22	1.80	1.08
$\Delta h_{\text{vap}}$	Enthalpie de vaporisation ( $\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3}$ )	31.7	42.4	29.4
$T_{\text{liq}}$	Température de liquéfaction (K)	1337	1358	933
$T_{\text{vap}}$	Température de vaporisation (K)	3129	2835	2792
$C_i$	Capacité calorifique volumique des ions du réseau ( $\times 10^6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ )	2.5	3.46	2.43
$A_e$	Coefficient de capacité calorifique volumique ( $C_e = A_e T_e$ ) ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-2}$ )	71	97	135
$\gamma$	Coefficient de couplage thermique électrons-réseau ( $\times 10^{16} \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ )	2.1	10	56.9
$\alpha$	Coefficient d'absorption optique à $\lambda = 800 \text{ nm}$ ( $\times 10^7 \text{ m}^{-1}$ )	6.9	6.3	5.9

TABLE 3 – Propriétés physiques de métaux usuels.

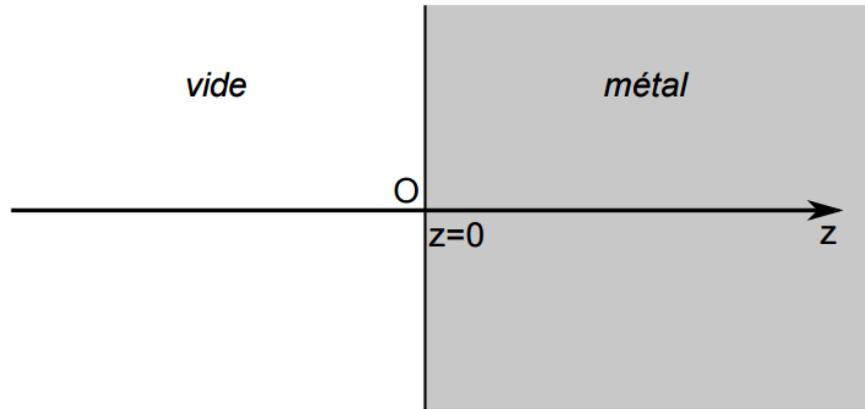


FIGURE 7 – Géométrie 1D considérée dans la sublimation laser d'un métal.

On considère une onde incidente, se propageant selon Oz, d'intensité surfacique, en  $W.m^{-2}$ ,  $I(t)$  en  $z = 0$ . L'espace est constitué d'un métal dans le demi-espace  $z > 0$  et du vide pour  $z < 0$ . L'interface vide-métal pour l'impulsion est caractérisée par un coefficient de réflexion en intensité R.

On note  $\alpha = -\frac{1}{I} \cdot \frac{dI}{dz}$  le coefficient linéique d'absorption dans le métal.

La description thermodynamique du processus de sublimation est modélisée ainsi :

- le gaz d'électrons et la maille cristalline sont considérés comme deux sous-systèmes thermodynamiques couplés ;
- l'énergie lumineuse dissipée par effet Joule est initialement transférée uniquement aux électrons ;
- on néglige les effets de bords selon x et y, et donc on adopte un modèle 1D selon Oz.

On introduit deux températures pour décrire le système :  $T_e$  la température du gaz d'électrons et  $T_i$  la température de la maille cristalline d'ions.

L'échange de chaleur volumique par unité de temps  $\Pi_{e \rightarrow i}$  des électrons vers la maille cristalline s'exprime selon  $\Pi_{e \rightarrow i} = \gamma(T_e - T_i)$ , où  $\gamma$  est le coefficient de couplage électrons-cristal.

On adopte les notations suivantes :

- $C_e$  et  $C_i$  sont les capacités thermiques volumiques respectivement du gaz d'électrons et de la maille cristalline ;
- $S$  est le taux de création volumique de chaleur par unité de temps dans le gaz d'électrons ;
- les deux sous-systèmes vérifient la loi de Fourier pour la conductivité thermique ; la densité de courant de chaleur s'exprime alors selon  $\vec{j}_{e,i} = -\kappa_{e,i} \text{grad } T_{e,i}$ , où  $\kappa_e$  et  $\kappa_i$  sont les coefficients de conductivité thermique respectivement du gaz d'électrons et de la maille cristalline.

**On admet** que la conductivité thermique de la maille cristalline est négligeable  $\kappa_i \approx 0$ , et que  $C_i$  est indépendante de la température.

En revanche, **on tient compte de la dépendance en température de**  $C_e = A_e T_e$ , où  $A_e$  est un coefficient constant.

Pour simplifier, on considère une impulsion de profil temporel rectangulaire de durée  $\tau$ , d'intensité surfacique  $I_0$ , dont le front montant arrive en  $z = 0$  à  $t = 0$ .

Initialement, on a  $T_e(0^-) = T_i(0^-) = T_0$ .

**Q31.** Exprimer l'énergie interne volumique du gaz d'électrons en fonction de la température.

**Q32.** Justifier physiquement la forme de  $\Pi_{e \rightarrow i}$  par analogie avec une situation physique connue.

**Q33.** Montrer que le terme source de chaleur volumique par unité de temps du gaz d'électrons est de la forme  $S(z,t) = S_0(t)\exp(-\alpha z)$ , où l'on explicitera  $S_0(t)$ .

**Q34.** En effectuant un bilan d'énergie à une tranche  $dz$  située en  $z$ , de section  $\sigma$ , établir un système de deux équations couplées sur les températures  $T_e$  et  $T_i$ .

**Q35.** Par analyse dimensionnelle, établir l'expression de trois constantes de temps associées aux transferts thermiques, caractéristiques du système couplé.

Dans le cas général, la résolution d'un tel système se fait numériquement. On cherche une solution dans un régime particulier se décomposant en 2 étapes :

- la diffusion et le transfert électrons-ions ne s'effectuent pas à l'échelle de la durée de l'impulsion lumineuse. À cette échelle de temps, seul le gaz d'électrons est chauffé, sans diffusion ;
- une fois la puissance lumineuse absorbée, l'énergie est transférée aux ions, sans que la diffusion soit notable.

**Q36.** Expliciter une condition sur les constantes de temps mentionnées précédemment, ainsi que  $\tau$  la durée de l'impulsion lumineuse, pour que ces hypothèses soient valables. On supposera cette condition vérifiée dans la suite.

**Q37.** Calculer la température du gaz d'électron  $T_e(z, \tau)$  à  $t = \tau +$ , et montrer que dans la limite où  $T_e(z, \tau) \gg T_0$ ,

$$T_e(z, \tau) \approx \sqrt{\frac{2(1-R)I_0\tau\alpha}{A_e}} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha z}{2}\right).$$

La quantité  $F_i = I_0\tau$  est la *fluence* de l'impulsion incidente.

**Q38.** Pour  $t > \tau$ , montrer que si on néglige la diffusion, un simple bilan thermodynamique appliqué au bon système permet de calculer  $T_f(z) = T_i(z) = T_e(z)$  le profil de température à la fin de la thermalisation électrons-ions. Simplifier  $T_f$  en tenant compte de l'ordre de grandeur relatif des capacités thermiques  $C_i$  et  $C_e$ , ainsi que de l'hypothèse  $T_e(\tau) \gg T_0$  (pour simplifier, on supposera que  $T_0 = 0K$ ).

**Q39.** Dans le régime où l'intensité surfacique est suffisante pour sublimer le métal, montrer que la profondeur  $\mathcal{L}$  de métal sublimé en fonction de la fluence incidente est de la forme

$$\mathcal{L} = \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{F_a}{F_{th}}\right),$$

où  $F_a = (1-R)F_i$  est la fluence absorbée et  $F_{th}$  est une fluence seuil que l'on exprimera en fonction de l'enthalpie volumique de vaporisation  $\Delta h_{vap}$ , de l'enthalpie volumique de liquéfaction  $\Delta h_{liq}$ , de la capacité thermique du réseau  $C_i$  supposée constante, du coefficient d'absorption optique  $\alpha$ , de  $T_{vap}$  la température de vaporisation et de  $T_0$  (température initiale du métal).

Calculer  $F_{th}$  numériquement dans le cas du cuivre.

**Q40.** On considère le cas d'une impulsion de 150 fs. En utilisant les données situées en début de sujet, évaluer les différentes constantes de temps pertinentes du problème pour un métal que l'on choisira parmi le cuivre, l'aluminium ou l'or. On évaluera ces dernières à une température de 2800K.

**Q41.** Commenter les valeurs obtenues et discuter les hypothèses précédentes. Conclure.

**Fin de l'énoncé**