

Epreuve de physique chimie du concours blanc
Devoirs surveillé n° 5
9h30 – 12h00 2,5 heures

Calculatrice autorisée

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. 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.

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 d'un seul problème dont les parties sont indépendantes entre elles.

Capteurs photovoltaïques

Ce problème traite de quelques aspects du fonctionnement d'un capteur photovoltaïque. Il se compose de trois parties. La première traite de la production d'électricité à l'aide de tels capteurs. La deuxième s'intéresse au mécanisme électronique de l'effet photovoltaïque, et la troisième au refroidissement des composants électroniques.

Ce sujet est accompagné d'une annexe (pages 8 et 9) fournissant certaines données utiles.

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 et les choix effectués 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.

I Énergie photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dipôle électrique qui, lorsqu'il reçoit de la lumière, est susceptible de produire de l'énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. La figure 1 présente des données relatives au fonctionnement d'une telle cellule.

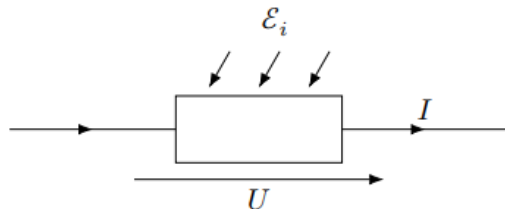
Q 1. En utilisant les données de la figure 1, déterminer à l'aide d'un graphe les valeurs de U et I qui maximisent la puissance électrique fournie pour un éclairement $\mathcal{E}_i = 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Comparer ces résultats aux valeurs nominales données en figure 1 et commenter.

Q 2. Évaluer et commenter l'efficacité énergétique de la cellule en régime nominal.

Le facteur de forme de la cellule est $FF = \frac{U_n I_n}{U_v I_c}$. Il indique la qualité de la cellule photovoltaïque.

Q 3. En reproduisant l'allure de la caractéristique $I(U)$ de la cellule, illustrer graphiquement les produits présents au numérateur et au dénominateur de ce rapport et proposer une majoration très simple de FF .

Q 4. Quelle est la valeur du facteur de forme FF pour la cellule étudiée ?



Valeurs sous éclairement
 $\mathcal{E}_i = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Caractéristique	Valeur
Tension à vide	$U_v = 0,60 \text{ V}$
Courant de court-circuit	$I_c = 3,0 \text{ A}$
Puissance nominale	$P_n = 1,32 \text{ W}$
Tension nominale	$U_n = 0,47 \text{ V}$
Courant nominal	$I_n = 2,8 \text{ A}$

Caractéristiques pour $\mathcal{E}_i$ allant de 200 à $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

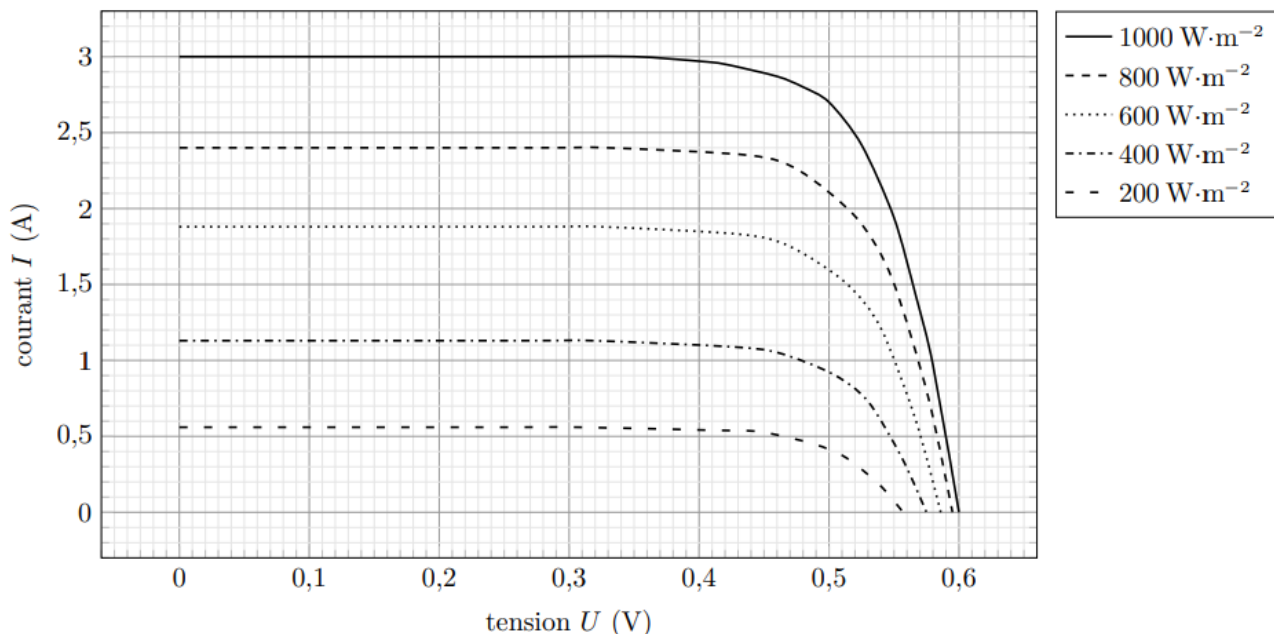


Figure 1 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque de 100 cm^2

II Conduction, jonction, effet photovoltaïque

II.A – Conduction électrique

Dans une approche classique, un milieu est conducteur s'il contient des charges mobiles. Ainsi, des électrons, de masse m et de charge $-e$, peu liés aux noyaux, peuvent se déplacer dans le réseau cristallin : ce sont les électrons de conduction. Lors de l'application d'un champ électrique $\vec{E}$ au matériau, les électrons sont soumis à la force de Lorentz correspondante qui entraîne leur déplacement à la vitesse $\vec{v}$ par rapport au réseau cristallin. Dans le modèle de Drude, les électrons sont également soumis à une force de frottement fluide exercée par le réseau cristallin. Ainsi, en négligeant l'effet du poids et de la force de Lorentz magnétique, l'évolution d'un électron de conduction est décrite par l'équation

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = -e\vec{E} - m \frac{\vec{v}}{\tau}$$

Q 5. Indiquer la signification de chacun des trois termes de cette équation.

Q 6. Montrer qu'en régime permanent la vitesse $\vec{v}$ des électrons est proportionnelle au champ électrique $\vec{E}$.

On définit ainsi la mobilité des électrons μ_e en posant $\vec{v} = \mu_e \vec{E}$. On note n_e la densité volumique d'électrons de conduction dans le matériau.

Q 7. Exprimer la conductivité γ du conducteur en fonction de n_e , e , τ et m .

Quand un électron de conduction est libéré par les atomes de silicium pour se déplacer dans le réseau cristallin, son départ crée un trou, ou défaut électronique, de charge $+e$, qui peut lui aussi se déplacer de proche en proche entre atomes voisins. La mobilité d'un trou est notée μ_p . Pour du silicium pur, la conductivité intrinsèque est assurée par les électrons de conduction et par les trous, qui ont ici même densité $n_e = n_p$. Pour simplifier, on admet que la masse des trous est identique à celle des électrons.

Q 8. Déterminer la densité électronique n_e à partir des données figurant en annexe, à la température de 25 °C. En déduire la proportion d'atomes de silicium qui libèrent un électron de conduction.

II.B – Semi-conducteur dopé

Dans un cristal de silicium dopé, des atomes d'un autre élément (dit dopant) se substituent à des atomes de silicium. Dans le cas d'un dopant de type *N* (dit donneur), le nombre d'électrons de valence de l'élément dopant est supérieur à celui du silicium. Le ou les électrons supplémentaires deviennent des électrons de conduction. De façon symétrique, un dopant de type *P* (dit accepteur) possède un nombre d'électrons de valence inférieur à celui du silicium. Le ou les électrons manquants deviennent des trous. Ainsi, la présence de dopants peut modifier fortement les densités d'électrons et de trous de conduction, qui peuvent alors être très différentes l'une de l'autre.

Q 9. Le bore (B), le phosphore (P), l'arsenic (As), le gallium (Ga) sont souvent utilisés comme dopants pour le silicium. Classer ceux-ci en types *N* ou *P*.

Q 10. Du silicium est dopé au bore à raison de 10^{22} atomes de substitution par unité de volume. Quel est le taux de dopage (ou pourcentage de substitution) obtenu ?

Q 11. Proposer, en précisant les choix utilisés pour cela, une évaluation de la conductivité de ce silicium dopé. Commenter cette valeur.

Q 12. Quel intérêt présente ce dopage pour un générateur électrique comme une cellule photovoltaïque ?

II.C – Jonction PN

Une feuille de silicium a été dopée *P*. Un traitement de surface permet de créer une couche dopée *N* dont l'épaisseur est typiquement de 0,5 μm . Dans la zone *P* (respectivement *N*), n_p (respectivement

n_N) est le nombre d'atomes dopants par unité de volume. L'interface entre la zone P et la zone N constitue la jonction PN : de part et d'autre, les porteurs de charge mobiles majoritaires sont de signes opposés, de concentrations n_P et n_N dans les zones P et N respectivement. Des porteurs de charge migrent d'une zone à l'autre, engendrant une zone de charge d'espace (ou zone de déplétion) et un champ électrique de jonction. La figure 2 donne une représentation simplifiée de cette situation dans une modélisation unidimensionnelle.

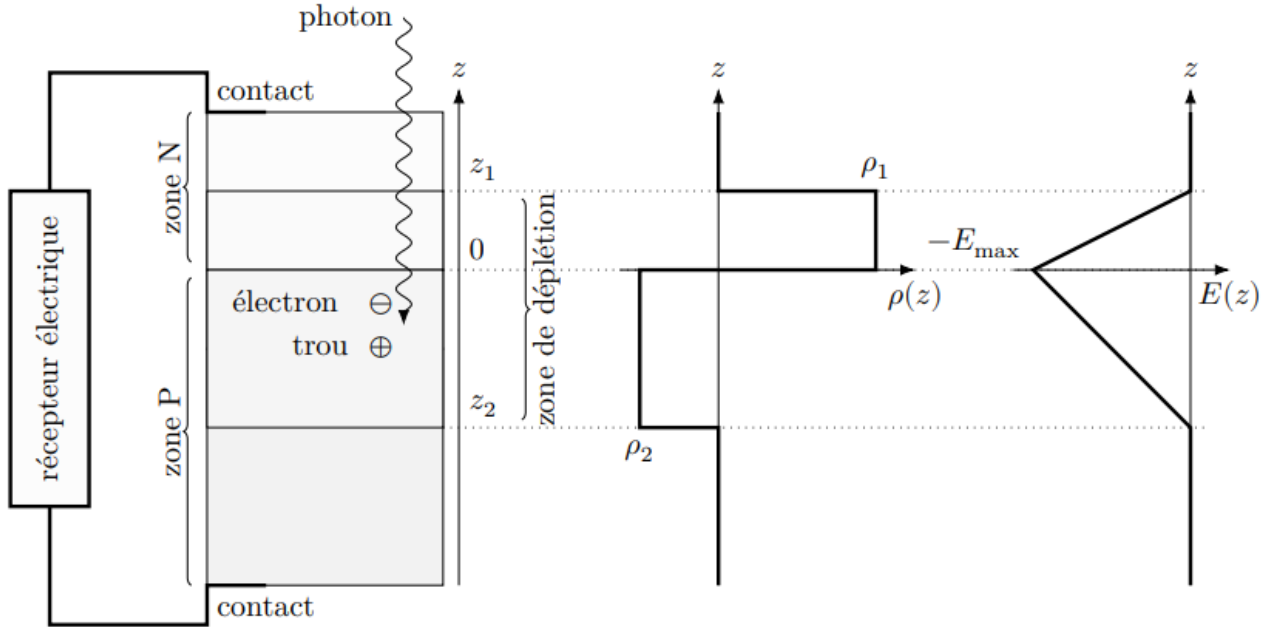


Figure 2

On associe le milieu à un diélectrique linéaire homogène et isotrope. On admet que dans un tel milieu, les équations de Maxwell pour le vide restent valables en remplaçant la permittivité diélectrique du vide ϵ_0 par $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ où ϵ_r est appelé permittivité relative du milieu. Pour le silicium, $\epsilon_r = 11,8$.

Q 13. Quel peut-être le phénomène physique responsable d'une migration des porteurs majoritaires, électrons ou trous, d'une zone vers l'autre ?

Q 14. Dans un modèle simplifié de jonction abrupte, tous les atomes accepteurs situés dans une zone d'épaisseur $-z_2$ au voisinage de la jonction captent les électrons venus d'atomes donneurs de la zone N sur une épaisseur z_1 . Déterminer les densités de charge ρ_1 et ρ_2 associées à cette modélisation (figure 2).

Q 15. Déterminer une relation liant n_P , n_N , z_1 et z_2 .

Q 16. Expliquer pourquoi, dans ce modèle unidimensionnel, le champ électrostatique est parallèle à l'axe (Oz) . Justifier la forme de la représentation graphique de $E(z)$ donnée figure 2.

Q 17. Relier la valeur maximale $E_{\max}$ de la norme du champ électrique à e , ϵ , n_N et z_1 d'une part, à e , ϵ , n_P et z_2 d'autre part.

Q 18. Déterminer la différence de potentiel électrostatique $V_0 = V(z_1) - V(z_2)$ en fonction de $E_{\max}$, z_1 et z_2 .

Q 19. Établir l'expression de l'épaisseur de la jonction $w = z_1 - z_2 = \sqrt{\frac{2\epsilon V_0}{e} \left(\frac{1}{n_P} + \frac{1}{n_N} \right)}$.

Q 20. Évaluer numériquement l'épaisseur de jonction w si $V_0 = 0,84 \text{ V}$, $n_N = 1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3} = 100 \text{ n}_P$.

II.D – Effet photovoltaïque

L'absorption d'un photon incident crée au niveau de la jonction une paire électron-trou. On admet que l'énergie minimale nécessaire à cette création est comparable à celle permettant à un électron (ou à un trou) de franchir une barrière de potentiel associée à une tension de valeur V_0 .

Q 21. Quelles sont les longueurs d'onde susceptibles de créer une paire électron-trou ? Cette jonction PN convient-elle à la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire ?

Q 22. Reproduire le schéma de la cellule, avec sa jonction PN, reliée à un récepteur électrique. En complétant ce schéma, décrire qualitativement les évolutions de l'électron et du trou créés dans la zone de déplétion, expliquer le rôle de générateur électrique réalisé par la cellule photovoltaïque, en précisant sa polarité et le sens du courant électrique délivré par celle-ci.

III. 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 λ . 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.

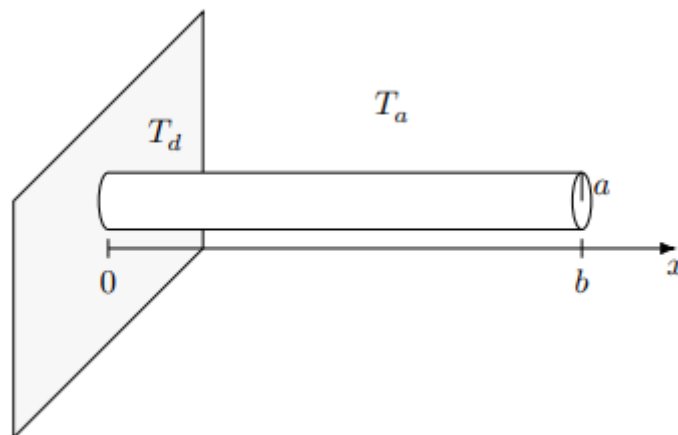


Figure 1 Modélisation de l'ailette

Q23. 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.

Q24. En réalisant un bilan de puissance thermique sur une tranche de longueur dx de l'ailette, montrer que la température suit l'équation différentielle

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

Q25. Vérifier l'homogénéité de l'expression du paramètre δ introduit dans la question précédente. Estimer sa valeur numérique dans le cas d'une ailette en silicium de rayon $a = 1 \text{ mm}$.

Q26. 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/δ .

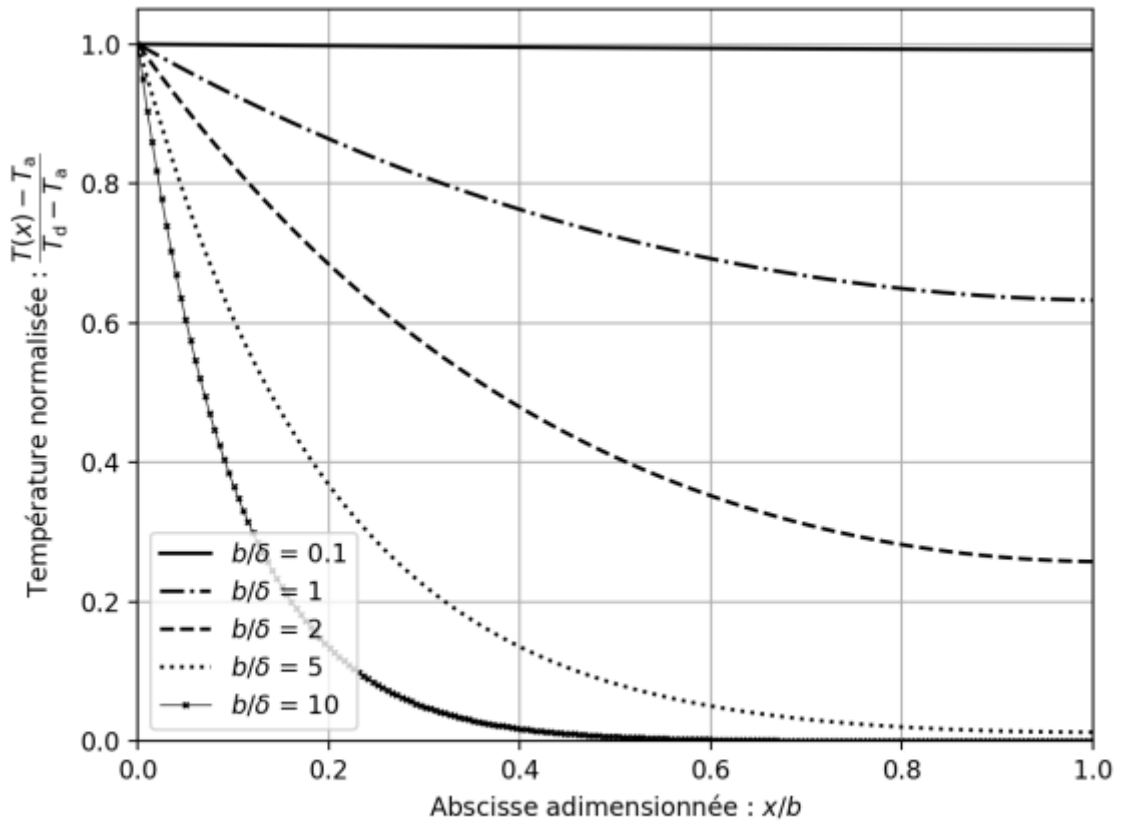


Figure 2 Représentation graphique du champ de température dans une ailette en silicium (solution de l'équation (I.1)) pour différentes valeurs du rapport b/δ

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/δ , 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 °C en régime stationnaire de fonctionnement. Commenter.

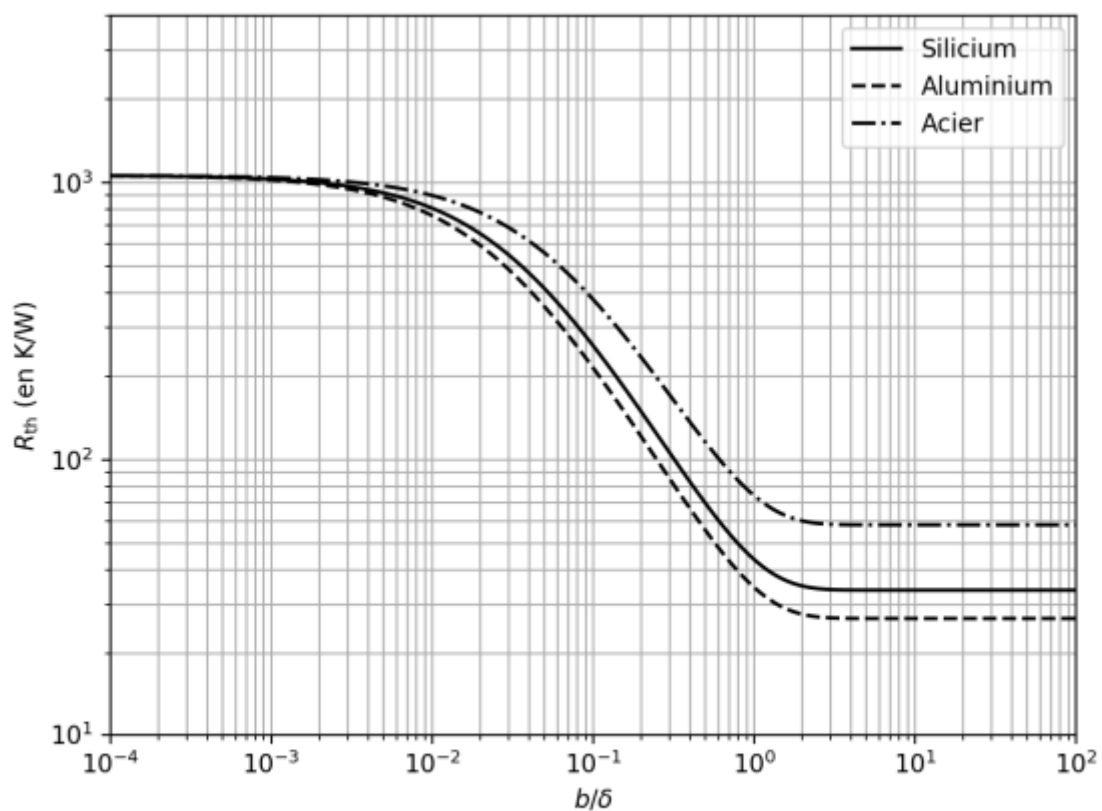


Figure 3 Évolution de la résistance thermique d'une ailette de rayon $a = 1$ mm, en présence de ventilation, en fonction du rapport b/δ

Annexe

Données et formulaire

Constantes physiques

Célérité de la lumière dans le vide	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Masse de l'électron	$m = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Charge élémentaire	$e = 1,62 \times 10^{-19} \text{ C}$
Permittivité diélectrique du vide	$\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$
Constante d'Avogadro	$\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
Constante de Planck	$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Données sur le silicium (à 20 °C)

Structure électronique	$[\text{Ne}]3s^23p^2$
Masse molaire	$M = 28,1 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
Masse volumique	$\rho = 2,33 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Mobilité des électrons	$ \mu_e = 1,5 \times 10^{-1} \text{ m}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
Mobilité des trous	$\mu_p = 4,5 \times 10^{-2} \text{ m}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
Conductivité intrinsèque	$\gamma = 4,3 \times 10^{-4} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$

Formulaire

Soient $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$ un repère orthonormé direct et $\vec{A} = A_x \vec{u}_x + A_y \vec{u}_y + A_z \vec{u}_z$ un champ vectoriel

$$\text{div}(\vec{A}) = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}}(\vec{A}) = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \vec{u}_x + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{u}_y + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \vec{u}_z$$

Conductivité thermique du silicium	$\lambda_{\text{Si}} = 148 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique de l'aluminium	$\lambda_{\text{Al}} = 237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique de l'acier	$\lambda_{\text{acier}} = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
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)	$h_r = 300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$

