

Générateur thermoélectrique

La difficulté d'alimenter en énergie électrique des habitations isolées, situées dans des endroits inaccessibles, oblige à produire l'énergie électrique sur place de façon autonome. Pour des installations domestiques, consommant une puissance modérée, les unités de production d'énergie utilisant la technologie thermoélectrique présentent des intérêts indéniables. En effet, l'utilisation de cette technologie ne nécessite pas de partie mobile (souvent bruyante), ne produit pas de gaz nocifs pour l'environnement. Par ailleurs, les thermogénérateurs, produisant de l'énergie électrique à partir d'une différence de température, récupèrent de l'énergie thermique perdue en la revalorisant, présentent une forme compacte et peuvent fonctionner très longtemps en quasi-absence de maintenance.

Ce sujet aborde un des procédés de fabrication du tellure de bismuth, matériau thermoélectrique intervenant dans certains thermogénérateurs. Il étudie ensuite le principe de fonctionnement d'un module à effet Seebeck ainsi que son dimensionnement pour alimenter une installation domestique isolée.

I Obtention de tellure de bismuth

L'effet thermoélectrique est un phénomène qui dépend de la température et de la composition chimique du matériau. Parmi les bons matériaux thermoélectriques à température ambiante, le tellure de bismuth Bi_2Te_3 est couramment utilisé.

On élabore, par électrodéposition sur un substrat adapté, des petites cellules de Bi_2Te_3 , de diamètres voisins de $50\ \mu\text{m}$, se comportant comme des microgénérateurs thermoélectriques dont la polarité dépend du dopage du matériau.

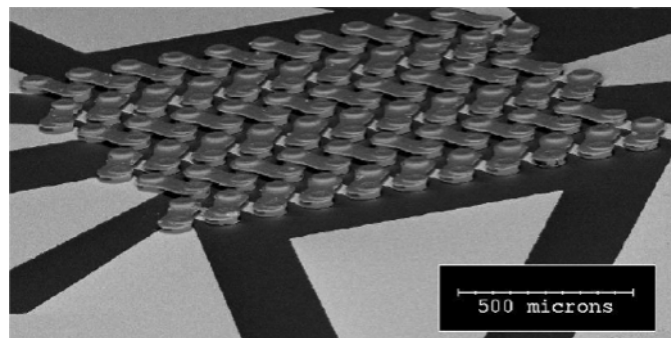


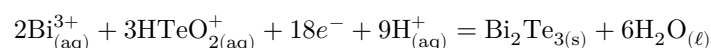
Figure 1

I.A – Introduction

L'élément tellure Te possède 52 électrons, appartient à la cinquième période et à la même colonne de la classification périodique des éléments que l'oxygène O. Sa masse molaire atomique vaut $127,6\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$. L'élément bismuth Bi possède 83 électrons, appartient à la sixième période et à la même colonne de la classification périodique des éléments que l'azote N. Sa masse molaire atomique vaut $209,0\ \text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Donner la configuration de la couche de valence du tellure et du bismuth.

L'élaboration par voie électrochimique du tellure de bismuth consiste à placer en solution aqueuse les espèces solubles qui pourront, avec apport d'énergie électrique, réagir sur une électrode adaptée selon la demi-équation électronique suivante :



On admettra que les électrons ne sont pas apportés par un réducteur chimique mais par un dispositif générateur électrique, non étudié dans ce problème, qui achemine les électrons jusqu'à l'électrode. Le solide $\text{Bi}_2\text{Te}_{3(\text{s})}$ ainsi formé se dépose sur l'électrode.

Il convient donc d'étudier le comportement électrochimique du tellure et du bismuth en solution aqueuse.

Pour tout le problème, on utilisera la forme approchée à $T = 298\ \text{K}$, $\frac{RT}{\mathcal{F}} \ln(10) \approx 0,06\ \text{V}$ et on rappelle que la charge d'une mole d'électrons est égale à $96\ 500\ \text{C}$ et que $\mathcal{F} = 96\ 500\ \text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$.

I.B – Diagramme potentiel-pH du bismuth

Le diagramme simplifié du bismuth (figure 2) est tracé à $T = 298 \text{ K}$, en prenant sur les frontières et pour les espèces concernées, la concentration des espèces dissoutes égale à $C_0 = 0,01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ et en ne considérant que les espèces suivantes : $\text{Bi}_{(s)}$, $\text{Bi}_2\text{O}_{5(s)}$, $\text{Bi}_2\text{O}_{3(s)}$ et $\text{Bi}_{(aq)}^{3+}$.

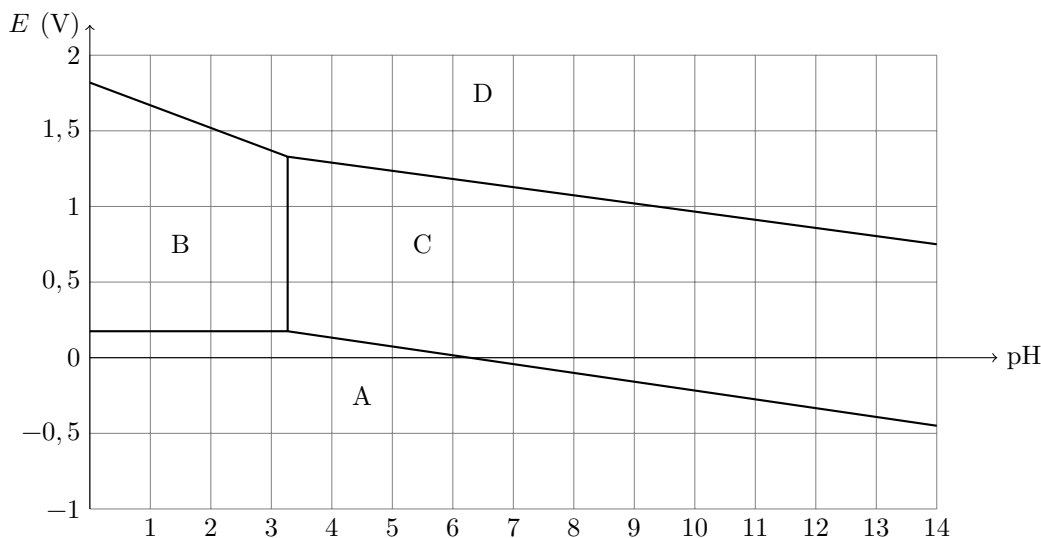


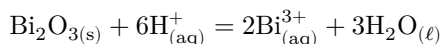
Figure 2 Diagramme potentiel-pH simplifié du bismuth

Le point d'intersection des domaines A, B, C a pour abscisse 3,37 et pour ordonnée 0,175 V et celui des domaines B, C, D a pour ordonnée 1,33 V. La frontière B/D a pour ordonnée 1,82 V à $\text{pH} = 0$.

I.B.1) Donner le nombre d'oxydation de l'élément bismuth dans chacune des espèces envisagées.

I.B.2) Identifier les espèces A et D sur le diagramme. On justifiera la réponse.

I.B.3) L'oxyde $\text{Bi}_2\text{O}_{3(s)}$ se dissout dans l'eau selon la réaction :



À l'aide du diagramme, calculer la constante de l'équilibre de dissociation K_s de $\text{Bi}_2\text{O}_{3(s)}$. Établir les domaines de chaque espèce puis identifier B et C.

I.B.4) À l'aide du diagramme, déterminer le potentiel standard du couple $\text{Bi}_{(aq)}^{3+}/\text{Bi}_{(s)}$.

I.B.5) Écrire l'équation de la demi-réaction électronique entre les espèces C et A. Établir l'équation de la frontière entre ces deux espèces.

I.B.6) À l'aide du diagramme déterminer le potentiel standard du couple $\text{Bi}_2\text{O}_{5(s)}/\text{Bi}_{(aq)}^{3+}$, écrire la demi-équation entre ces deux espèces puis établir l'équation de la frontière.

I.B.7) Écrire la demi-réaction entre les espèces C et D. Établir l'équation de la frontière entre ces deux espèces.

I.B.8) Préciser pour chacun des domaines A, B, C et D s'il s'agit d'un domaine d'existence et dans le cas contraire, préciser la signification de l'appartenance à ce domaine.

I.B.9) L'eau intervient dans deux couples rédox. Écrire la demi-réaction électronique associée à chaque couple puis établir l'équation correspondant à sa frontière. Tracer sommairement ces deux courbes du diagramme potentiel-pH de l'eau sur le document réponse et indiquer les domaines associés à chacune des espèces intervenant dans les deux couples de l'eau.

La pression partielle de toutes les espèces gazeuses sera prise égale à 1 bar. On prendra $E^\circ(\text{H}_{(aq)}^+/\text{H}_{2(g)}) = 0,00 \text{ V}$ et $E^\circ(\text{O}_{2(g)}/\text{H}_2\text{O}_{(\ell)}) = 1,23 \text{ V}$.

I.B.10) En utilisant le diagramme potentiel-pH du bismuth superposé à celui de l'eau (document réponse), discuter de la stabilité du bismuth dans l'eau.

I.C – Diagramme potentiel-pH du tellure

On étudie le diagramme simplifié du tellure faisant intervenir les espèces $\text{Te}_{(s)}$, $\text{Te}_{2(aq)}^{2-}$, $\text{Te}_{(aq)}^{4+}$ et HTeO_2^+ tracé pour la température $T = 298 \text{ K}$, en prenant sur les frontières, et pour les espèces concernées, la concentration de toutes les espèces dissoutes égale à $C = 0,01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (figure 3).

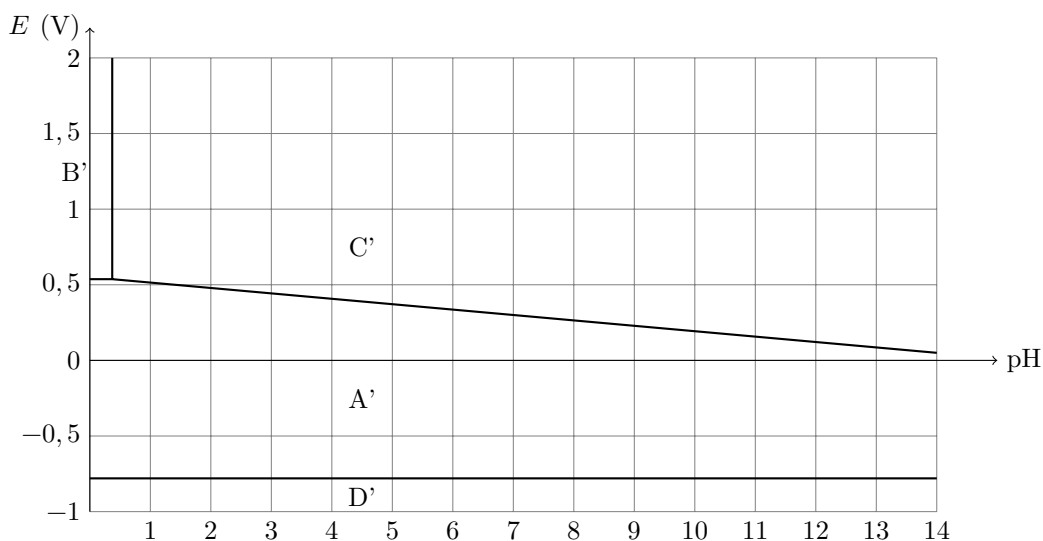


Figure 3 Diagramme potentiel-pH simplifié du tellure

Le point d'intersection des frontières des domaines A', B', C' a pour abscisse 0,37 et pour ordonnée 0,537 V. L'ion $\text{Te}_{(aq)}^{4+}$ appartient au couple acide-base $\text{Te}_{(aq)}^{4+}/\text{HTeO}_2^+$ de constante K_a . La frontière entre les domaines A' et D', à $\text{pH} = 0$, a pour ordonnée $-0,780 \text{ V}$.

I.C.1) Donner le nombre d'oxydation de l'élément tellure dans chacune des espèces envisagées.

I.C.2) Écrire l'équation de la réaction d'équilibre acido-basique associée au couple $\text{Te}_{(aq)}^{4+}/\text{HTeO}_2^+$. Établir l'espèce prédominante de ce couple en fonction des valeurs du pH. Représenter ces domaines sur un axe gradué en pH où l'on fera intervenir $\text{p}K_a$.

I.C.3) À partir du diagramme, déterminer la valeur de $\text{p}K_a$. Commenter sa valeur.

I.C.4) Identifier les espèces A', B', C', D' sur le diagramme. Préciser la signification de chacun de ces domaines.

I.C.5) À l'aide du diagramme, déterminer la valeur du potentiel standard du couple B'/A' puis déterminer l'équation des frontières entre A' et B' puis A' et C'.

I.C.6) À partir du diagramme, déterminer la valeur du potentiel standard du couple A'/D'.

Comment se déplace la frontière A'/D' lorsque la concentration de travail C_0 diminue ? De même comment se déplace la frontière C'/A' lorsque la concentration de travail C_0 diminue ? Lorsque les deux frontières se coupent, que peut-on prévoir pour l'espèce A' au-delà du croisement de ces deux frontières ? Écrire l'équation chimique correspondante et nommer cette réaction.

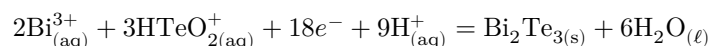
Conclure, dans les conditions du tracé de la figure 3, quant à la stabilité de l'espèce A' pour $0 < \text{pH} < 14$.

I.C.7) Étudier la stabilité du tellure dans l'eau.

I.D – Synthèse des résultats

La figure A du document réponse représente les diagrammes du bismuth et du tellure précédemment étudiés sur une même courbe.

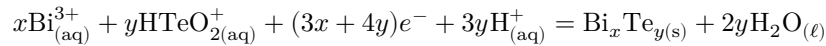
I.D.1) Le dépôt électrolytique du tellure de bismuth résulte de la demi-réaction



À l'aide des résultats précédents, déterminer le domaine de pH dans lequel on doit se placer pour réaliser cette demi-réaction.

I.D.2) Ce domaine de pH obtenu à l'aide des diagrammes simplifiés est modifié lorsqu'on appréhende l'étude complète du système binaire contenant du bismuth et du tellure. Nous admettrons cependant pour la suite qu'il existe un domaine de pH dans lequel le couple $\left(\begin{array}{c} \text{Bi}_{(aq)}^{3+} \\ \text{HTeO}_2^+ \end{array} \right) / \text{Bi}_2\text{Te}_{3(s)}$ intervient et que la réaction utile à la l'élaboration de $\text{Bi}_2\text{Te}_{3(s)}$ est possible.

Sachant que cette réaction peut se mettre sous une forme plus générale :



déterminer le nombre d'oxydation du bismuth et du tellure dans $\text{Bi}_x\text{Te}_y(\text{s})$.

I.D.3) La masse volumique du tellure de bismuth vaut $7,642 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Quelle charge doit fournir le générateur relié à l'électrode où s'effectue le dépôt afin de fabriquer une cellule cylindrique de diamètre $50 \mu\text{m}$ et de hauteur $25 \mu\text{m}$?

II Générateur thermoélectrique : études préliminaires

II.A – Résistance électrique d'un conducteur

Le milieu étudié est conducteur de constantes électromagnétiques suivantes :

- permittivité électrique $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi 10^9} \text{ SI}$;
- perméabilité magnétique μ_0 ;
- conductivité électrique γ .

On considère dans cette partie un barreau conducteur B représenté **figure 4**, de longueur L et de section S . Ce barreau est parcouru par un courant électrique d'intensité I , de densité volumique de courant $\vec{j} = j(x)\vec{u}_x$ (uniforme dans une section droite). On néglige les effets de bords et on suppose que les grandeurs ne dépendent que de la variable x . Les extrémités du barreau sont maintenues aux potentiels constants $V(0)$ et $V(L)$. On notera $U = V(0) - V(L)$.

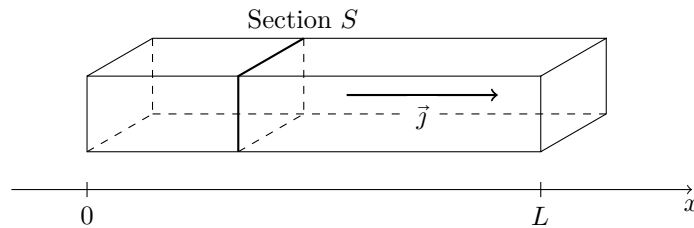


Figure 4

Dans toute la suite du problème, on se place en régime stationnaire, sauf pour les questions **II.A.3** à **II.A.6** qui visent à discuter de l'approximation des régimes quasi-stationnaires

II.A.1) Déterminer la direction du champ électrique $\vec{E}(M)$.

II.A.2) Énoncer la loi d'Ohm locale, donner les unités usuelles de chaque grandeur intervenant dans cette loi, commenter sa forme. Dans quelle(s) condition(s) est-elle applicable ?

II.A.3) Le régime est supposé quelconque, établir par un bilan sur le système unidimensionnel de la **figure 4** l'équation locale de conservation de la charge reliant le vecteur densité de courant $\vec{j} = j(x,t)\vec{u}_x$ à la densité volumique de charge $\rho(x,t)$.

II.A.4) En utilisant l'équation de Maxwell Gauss, en déduire l'équation différentielle satisfaite par la densité volumique de charge ρ .

II.A.5) On notera $\delta\rho_0$ une fluctuation de la densité volumique de charge en un point donnée de l'espace et à un instant pris pour origine des temps. Résoudre cette équation différentielle. Tracer le profil local de la densité volumique de charge en fonction du temps.

II.A.6) Dans le cas où $\gamma = 1,00 \times 10^5 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$, montrer que, dans l'approximation des régimes quasi stationnaires, la densité volumique de charge ρ dans le conducteur peut être considérée comme nulle. Cette approximation sera appliquée dans la suite du problème.

II.A.7) En déduire que le champ électrique dans le barreau B est uniforme. On notera : $\vec{E}(M) = E_0\vec{u}_x$.

II.A.8) Établir l'expression de la résistance ohmique de ce barreau définie par $R = U/I$.

II.A.9) On prendra pour les applications numériques les valeurs suivantes : $L = 25 \mu\text{m}$, $S = 2,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, $\gamma = 1,00 \times 10^5 \text{ SI}$. Calculer la valeur de la résistance du barreau B.

II.B – Force électromotrice créée par un gradient de température

On considère dans cette partie le même barreau B que dans la partie précédente, (conducteur de longueur L et de section S), dont la température n'est plus homogène.

Les températures aux extrémités, $T(0)$ et $T(L)$, sont maintenues constantes. Ce barreau n'est pas parcouru par un courant électrique. On néglige les effets de bords et on suppose que les grandeurs ne dépendent que de la variable x . Le matériau est caractérisé par son coefficient Seebeck ε_B , constante réelle positive, définie par la relation valable en l'absence de courant électrique :

$$\overrightarrow{\text{grad}} V = \varepsilon_B \overrightarrow{\text{grad}} T$$

II.B.1) Déterminer l'unité usuelle du coefficient ε_B .

II.B.2) Montrer que la différence de potentiel $U = V(0) - V(L)$ vérifie l'égalité

$$U = V(0) - V(L) = -\varepsilon_B (T(L) - T(0))$$

II.C – Présentation de l'effet Seebeck et calcul de la puissance

On considère le barreau conducteur B, à la température T_B , dont le coefficient Seebeck est noté ε_B . La puissance thermique par unité de surface, notée J_{SB} , traversant une section droite S du barreau, dans le sens du courant électrique, d'un conducteur parcouru par une densité volumique courant électrique $\vec{j} = j\vec{u}_x$, a pour expression $J_{SB} = \varepsilon_B T_B j$. On remarquera que J_{SB} s'exprime en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

On note I l'intensité du courant traversant la section S du conducteur.

II.C.1) Rappeler l'unité de la densité volumique de courant \vec{j} . En déduire l'unité de ε_B . Cette unité est-elle cohérente avec ce qui a été trouvé précédemment ?

II.C.2) Calculer le transfert thermique δQ_B traversant S pendant dt , en fonction de ε_B , T_B , I et dt .

II.C.3) On considère maintenant une jonction en régime permanent entre deux matériaux conducteurs A et B, de coefficients Seebeck respectifs ε_A et ε_B , parcourus par un même courant électrique d'intensité I , et représentés [figure 5](#).

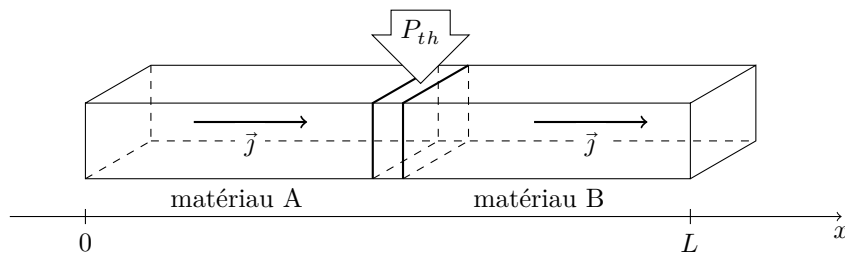


Figure 5

La jonction est maintenue à la température T par contact avec une source de chaleur extérieure (non représentée sur la figure). On note P_{th} la puissance thermique reçue par la jonction.

À l'aide d'un bilan d'énergie appliqué à la jonction établir que l'expression de la puissance reçue par la jonction de la part de l'extérieur est : $P_{th} = (\varepsilon_B - \varepsilon_A)TI$.

Cette relation caractérise l'effet Seebeck dans la jonction.

II.C.4) Quelle est la puissance thermique donnée par la jonction à la source de chaleur ?

II.C.5) Application numérique

Calculer P_{th} avec : $\varepsilon_A = -208 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$, $\varepsilon_B = +210 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$, $T = 300 \text{ K}$, $I = 50 \mu\text{A}$.

III Modèle électrique et thermique du module Seebeck

On considère un module Seebeck élémentaire S constitué de deux barreaux de matériaux différents (semi-conducteur Bi_2Te_3 dopé P et dopé N) de longueur L et de section S , reliant des barres conductrices (barres A et B). On utilisera l'abréviation SC pour semi-conducteur.

Les barres conductrices ayant une température uniforme, leur potentiel électrique est uniforme. La température des jonctions A/SC dopé N et A/SC dopé P est T_c , celle des jonctions B/SC dopé N et B/SC dopé P est T_f . Ces températures sont maintenues constantes par les sources chaudes et froides représentées sur la figure 6. On assimilera les barres conductrices A et B à des conducteurs parfaits de résistance ohmique nulle.

On notera respectivement γ_p et ε_p la conductivité électrique et le coefficient Seebeck du SC dopé P. La conductivité électrique et le coefficient Seebeck du SC dopé N seront notées respectivement γ_n et ε_n . Les barres conductrices A et B ont une conductivité électrique γ_c supposée infinie et un coefficient Seebeck ε_c . On se place toujours en régime stationnaire.

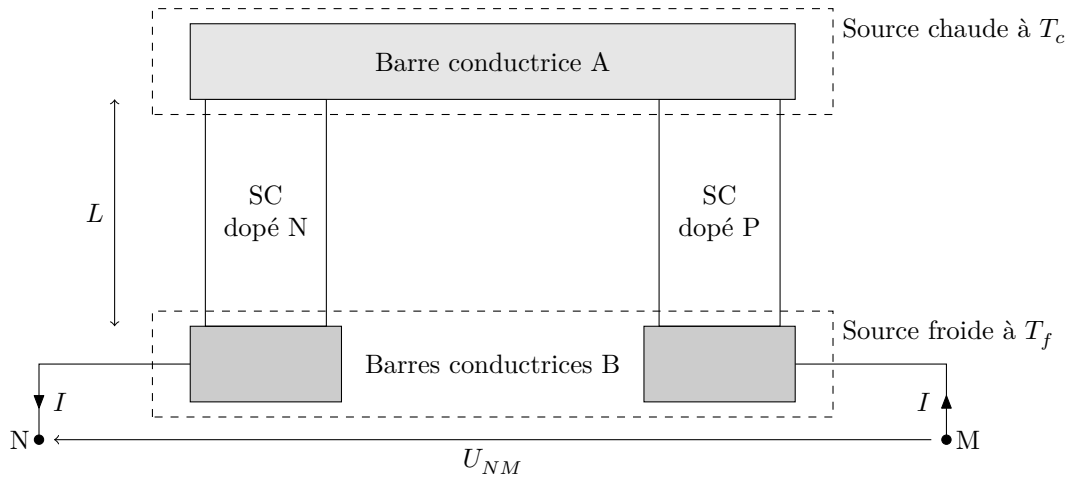


Figure 6

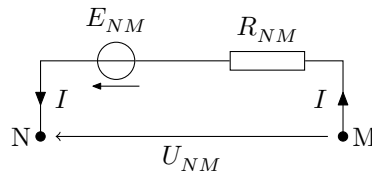


Figure 7

III.A – Modèle électrique du module Seebeck

Le module Seebeck S est relié au reste du circuit électrique par l'intermédiaire des points M et N . Le dipôle de Thévenin équivalent au module Seebeck S entre M et N est représenté figure 7.

III.A.1) Donner la relation entre E_{NM} , R_{NM} , I et U_{NM} .

III.A.2) Dans le cas d'un circuit ouvert ($I = 0$), déterminer l'expression de la force électro-motrice E_{NM} en fonction de ε_n , ε_p , T_c et T_f .

III.A.3) Faire l'application numérique avec $\varepsilon_n = -208 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$, $\varepsilon_p = +210 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$, $T_c = 500 \text{ K}$ et $T_f = 300 \text{ K}$. On admettra que, pour ce matériau, l'expression de la force électromotrice E_{NM} calculée à courant d'intensité nulle est la même que pour un courant d'intensité non nulle.

III.A.4) En supposant que l'on impose $T_c = T_f$, déterminer R_{NM} en fonction de γ_n , γ_p , L et S .

III.A.5) Faire l'application numérique avec $L = 25 \mu\text{m}$, $S = 2,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2$, $\rho_n = 1/\gamma_n = 14 \mu\Omega\cdot\text{m}$ et $\rho_p = 1/\gamma_p = 12 \mu\Omega\cdot\text{m}$.

III.A.6) En admettant que la puissance maximale produite par ce module Seebeck soit $P_{\max} = \frac{E_{NM}^2}{4R_{NM}}$, déterminer numériquement la puissance maximale produite par ce module élémentaire Seebeck. Que peut-on en conclure ?

III.B – Modèle thermique du module Seebeck

Le module Seebeck S est relié au reste du circuit électrique par l'intermédiaire des points M et N . Dans cette partie il est parcouru par un courant électrique d'intensité I . Les échanges thermiques avec les sources chaude et froide n'ont lieu qu'au niveau des différentes jonctions.

III.B.1) Exprimer la puissance P_S^c cédée par le module Seebeck à la source chaude par effet Seebeck en fonction de ε_p , ε_n , T_c et I .

III.B.2) Exprimer la puissance P_S^f cédée par le module Seebeck à la source froide par effet Seebeck en fonction de ε_p , ε_n , T_f et I .

III.B.3) Un transfert thermique a lieu entre la source chaude et la source froide par l'intermédiaire des barres de SC dopés de longueur L . La puissance de ce transfert est proportionnelle à la différence de température entre la source chaude et la source froide. On note K le coefficient de proportionnalité. La puissance thermique totale (à travers les deux barres) transférée de la source chaude à la source froide a donc pour expression $P_T^c = K(T_c - T_f)$.

En déduire la puissance P_T^f donnée par transfert thermique par la partie froide du module Seebeck à la partie chaude du module.

III.B.4) Un échauffement par effet Joule a lieu lors du passage du courant d'intensité I dans le module de résistance ohmique R_{NM} . On suppose que les parties chaude et froide du module reçoivent de façon égale à cette puissance.

Déterminer les puissances Joule P_j^c et P_j^f reçues respectivement par les parties chaude et froide du module en fonction de R_{NM} et de I .

III.B.5) Montrer que la puissance P_c reçue par le module de la part de la source chaude est

$$P_c = -(\varepsilon_p - \varepsilon_n)T_c I + K(T_c - T_f) - \frac{1}{2}R_{NM}I^2$$

III.B.6) Montrer que la puissance P_f reçue par le module de la part de la source froide est

$$P_f = -(\varepsilon_n - \varepsilon_p)T_f I - K(T_c - T_f) - \frac{1}{2}R_{NM}I^2$$

III.C – Efficacité du module Seebeck

III.C.1) On désigne par P_e la puissance électrique reçue par le module Seebeck de la part du reste du circuit auquel il est relié. Montrer grâce aux résultats précédents que l'on a $P_c + P_f = U_{NM}I = -P_e$.

III.C.2) On peut assimiler le module Seebeck à une machine ditherme dont on représente les échanges énergétiques avec l'extérieur suivant le schéma de la **figure 8**.

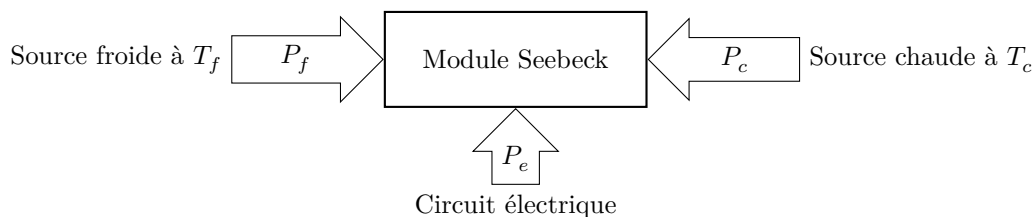


Figure 8

On définit le rendement du module Seebeck par $e = -P_e/P_c$. Justifier physiquement la définition de l'efficacité proposée.

III.C.3) Exprimer le rendement e du module Seebeck en fonction de ε_p , ε_n , T_f , T_c , R_{NM} , K et I .

III.C.4) Par un raisonnement qualitatif, dire dans quel cas elle est maximale. Montrer que l'on retrouve alors le rendement d'un cycle de Carnot ditherme s'effectuant entre une source chaude à T_c et une source froide à T_f .

IV Exemple d'utilisation de ce module

Cette technologie de production d'énergie électrique est utilisée dans des domaines variés (spatial, automobile, domestique,...). Un industriel commercialise des générateurs thermoélectriques pour l'alimentation d'habitations isolées. Nous allons dans ce paragraphe étudier quelques aspects de cette utilisation.

IV.A – Ordre de grandeur de la consommation électrique totale d'une installation domestique isolée

L'énergie produite par le générateur thermoélectrique est stockée dans des batteries. Les appareils électriques fonctionnent en régime sinusoïdal (à la fréquence 50 Hz). Les batteries fournissent une puissance électrique continue qui alimente un convertisseur transformant cette puissance en puissance alternative. On cherche dans cette sous-partie à déterminer l'énergie électrique totale que le générateur thermoélectrique doit fournir chaque jour afin de déterminer le nombre de modules élémentaires à utiliser.

Les habitants utilisent une télévision et trois lampes de la façon suivante :

Appareils	Puissance (W)	Utilisation (heures/jour)
Télévision	100	4
Lampes	3×60	3

IV.A.1) Calculer l'énergie électrique W_e consommée chaque jour par les utilisateurs.

IV.A.2) En admettant que le rendement global de la conversion entre le générateur thermoélectrique et les appareils est de 80%, calculer l'énergie W_g que doit produire quotidiennement le générateur thermoélectrique.

IV.A.3) En supposant que ce générateur fonctionne en permanence, calculer la puissance moyenne P_g fournie par ce générateur.

IV.A.4) Estimer le nombre de modules Seebeck à associer en parallèle pour réaliser le générateur dans l'hypothèse où les températures des sources sont celles de la question III.A.3.

IV.B – Modèle électrique d'une télévision

Une télévision en fonctionnement consomme $P_{TV} = 100$ W. Son facteur de puissance est $\cos \varphi = 0,9$. Elle est alimentée par une tension sinusoïdale de valeur efficace de 230 V et de fréquence $f = 50$ Hz. On cherche dans cette partie à définir le dipôle équivalent à la télévision que l'on modélise par l'impédance $\underline{Z} = R + jX$ avec R et X réels (cf figure 9). La partie imaginaire de l'impédance X est une grandeur positive. On prendra les notations $u(t) = U\sqrt{2} \cos(\omega t)$ de représentation complexe \underline{u} et $i(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$ de représentation complexe \underline{i} .

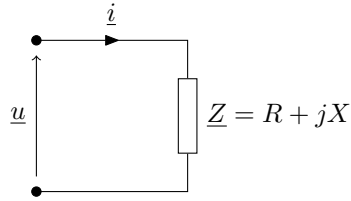


Figure 9

IV.B.1) Exprimer en fonction, d'une part de R et I , d'autre part de R , X et U , la puissance moyenne consommée par la télévision.

IV.B.2) Déterminer I en fonction de P_{TV} , U et $\cos \varphi$.

IV.B.3) En déduire R et X . Faire l'application numérique avec les valeurs données dans l'énoncé.

IV.B.4) On branche maintenant cette télévision en parallèle avec trois lampes, également placées en parallèle, assimilables à des résistances pures R_L de valeur 900Ω . Déterminer alors l'expression de l'intensité du courant $i(t)$ fournie par l'alimentation.

• • • FIN • • •
