

ETUDE DES PHENOMENES THERMOELECTRIQUES

Note au candidat. A lire attentivement.

Le candidat veillera à respecter **impérativement** les conventions générales de la thermodynamique : un échange, quelque soit sa nature, est **positif** s'il est effectivement **reçu** par le système; négatif dans le cas contraire.

L'attention est attirée sur le fait que dans les schémas, les flèches représentant les échanges énergétiques indiquent le **sens effectif** du transfert, non une convention algébrique (orientation positive).

S'il le juge nécessaire, le candidat pourra préciser entre parenthèses le caractère « reçu » ou « cédé » du résultat énoncé.

Dans ce problème, on désigne par le terme «univers», l'ensemble constitué par le système et le milieu extérieur (sources comprises). Par ailleurs, toutes les formes mécaniques d'énergie sont ici négligées.

Les trois parties qui composent ce problème sont **indépendantes** et peuvent être traitées séparément.

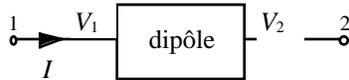
PREMIERE PARTIE

ETUDE THERMODYNAMIQUE DE DIVERS ELEMENTS ELECTRIQUES ET THERMIQUES

I - Travail électrique

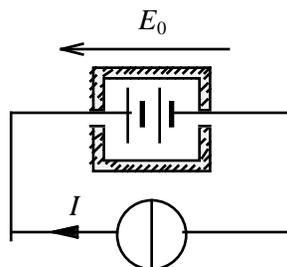
1.1. Lors de son déplacement dans un champ électrostatique, une charge électrique q , positive, voit son potentiel passer de V_1 à V_2 ($V_2 > V_1$). Quel travail W_q la charge q a-t-elle reçu du milieu extérieur au cours de ce déplacement ?

1.2. Un dipôle électrique, dont les bornes 1 et 2 sont respectivement fixées au potentiel V_1 et V_2 ($V_2 > V_1$), est traversé dans le sens 1 vers 2 par un débit de charge $I = dq/dt$ positif. Quelle est la valeur algébrique dW_d/dt du travail électrique reçu par unité de temps par le dipôle ? Le dipôle est-il électriquement générateur ou récepteur ?



II - Etude thermodynamique d'une pile réversible

Une pile électrochimique de force électromotrice constante, E_0 , fonctionnant de façon réversible, est placée dans une enceinte qui l'isole thermiquement du milieu extérieur. Elle est connectée durant un intervalle de temps τ à une source de courant parfaite d'intensité I , constante, qui assure sa charge.



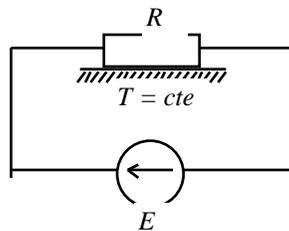
2.1. Dire, en le justifiant, si la transformation subie par le système (*i.e.* la pile) est ou non isentropique.

Pour cette transformation,

- 2.2. Exprimer le travail électrique W échangé entre le système et le milieu extérieur.
- 2.3. Effectuer un bilan énergétique en précisant la variation U de l'énergie interne du système et celle U_u de l'univers.
- 2.4. Effectuer un bilan entropique en précisant la variation S d'entropie du système et celle S_u de l'univers.
- 2.5. Qu'est devenu le travail électrique W reçu par le système ?
- 2.6. Au cours de la transformation, le système change-t-il d'état thermodynamique ?

III - Etude thermodynamique d'une résistance électrique thermostatée

Une résistance électrique, R , est maintenue à température constante et homogène, T , par contact étroit avec un thermostat. Elle est parcourue, durant un intervalle de temps τ , par un courant constant délivré par une source de tension parfaite, de force électromotrice (f.e.m.) E .



- 3.1. Dire, en le justifiant, si la transformation subie par le système (*i.e.* la résistance R) est, d'une part isotherme, d'autre part réversible.

Pour la transformation considérée,

- 3.2. Exprimer le travail électrique W et la quantité de chaleur Q échangés entre le système et le milieu extérieur.
- 3.3. Effectuer un bilan énergétique en précisant la variation U de l'énergie interne du système.
- 3.4. Effectuer un bilan entropique en précisant :
 - a. l'entropie S^c échangée entre le système et le milieu extérieur;
 - b. la variation S d'entropie du système et celle S_u de l'univers;
 - c. l'entropie S^c créée (par effet Joule) au sein du système.De quel signe est l'entropie créée ?
- 3.5. Le système a-t-il changé d'état au cours de la transformation ?
Votre conclusion concernant le changement d'état et vos réponses aux questions 3.3. et 3.4.b. sont-elles en accord avec les premier et deuxième principe de la thermodynamique ? Justifiez.

IV - Etude thermodynamique d'un diffuseur thermique

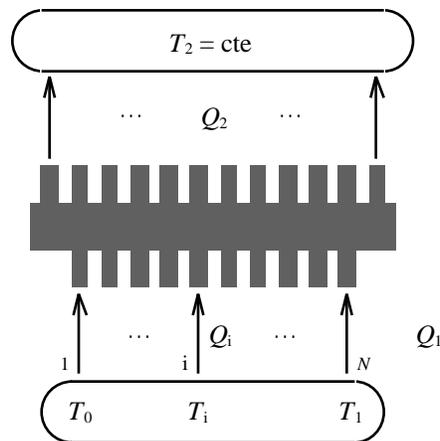
Un diffuseur thermique (échangeur) reçoit, durant un intervalle de temps τ , une chaleur Q_1 d'une source chaude à la température T_1 . Il restitue dans le même temps une chaleur Q_2 ($Q_2 < 0$) à une source froide de température T_2 .

- 4.1. Justifier qu'en régime établi, lorsque toutes les grandeurs intensives du système (*i.e.* le diffuseur) sont indépendantes du temps, on a : $Q_1 = -Q_2$, et que l'entropie S du système reste stationnaire.

On note Q la valeur absolue commune de Q_1 et Q_2 .

- 4.2. Effectuer un bilan entropique, en indiquant pour la transformation en régime établi :
- l'entropie S^c échangée entre le système et le milieu extérieur;
 - l'entropie S^c créée (par diffusion) au sein du système;
 - la variation S_u d'entropie de l'univers.

Le diffuseur n'échange plus avec une source chaude unique, mais avec N sources chaudes dont les températures sont régulièrement échelonnées entre T_0 et T_1 ($T_0 < T_1$). La source chaude i ($i = 1$ à N) est à la température $T_i = T_0 + (i-1)(T_1 - T_0)/(N-1)$ et cède une quantité de chaleur $Q_i = Q/N$, identique pour toutes les sources.



- 4.3. Dans le cas des N sources chaudes, écrire l'entropie S^c_N créée au sein du système, sous la forme d'une somme sur i .
- 4.4. Donner l'expression de la limite S^c vers laquelle tend cette entropie, lorsque le nombre N de sources entre T_0 et T_1 tend vers l'infini, la chaleur Q_1 restant équirépartie sur les N sources ?

V - Etude thermodynamique d'un radiateur électrique

En régime établi, un radiateur électrique –association de la résistance et du diffuseur précédents– reçoit un travail électrique W qu'il convertit en chaleur à la température T_1 . Cette chaleur est intégralement transférée à une source froide à température T_2 .

- 5.1. En considérant les deux causes de création d'entropie ici en action (effet Joule, diffusion), montrer que l'entropie S^c_R produite par le radiateur au cours de la transformation ne dépend que de l'une des températures T_1, T_2 . Exprimer S^c_R .
Ne pouvait-on obtenir directement ce résultat par une approche globale ?

DEUXIEME PARTIE

ETUDE GENERALE DES MACHINES THERMOELECTRIQUES

VI - Etude d'un thermogénérateur réversible

On considère un générateur thermoélectrique fonctionnant de façon réversible entre deux sources thermiques de température T_1 (source chaude) et T_2 (source froide). On note respectivement q_1 et q_2 les quantités de chaleur échangées par unité de temps entre le thermogénérateur et les sources chaude et froide, et w le travail électrique échangé par unité de temps entre le thermogénérateur et un récepteur électrique.

- 6.1. Faire un schéma du thermogénérateur et de ses sources, en indiquant le sens effectif des transferts thermiques et électrique. Préciser le signe de ces échanges.
- 6.2. En raisonnant par unité de temps, appliquer le premier principe de la thermodynamique à cette machine thermoélectrique. En déduire une relation entre q_1 , q_2 et w .
- 6.3. Le fonctionnement étant réversible, que peut-on dire de l'entropie s^c créée par seconde au sein du thermogénérateur ? Déduire du deuxième principe de la thermodynamique une seconde relation entre q_1 , q_2 , w et les températures des sources.
- 6.4. Définir le rendement énergétique η de ce thermogénérateur réversible en fonction de q_1 , q_2 , et w .
- 6.5. Exprimer le rendement η en fonction des seules températures de source T_1 , T_2 .
Comparer η au rendement de Carnot η_C d'un moteur réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources thermiques. –On se contentera de rappeler, sans la démontrer, l'expression de η_C –.

VII - Thermogénérateur réversible en fonctionnement inversé

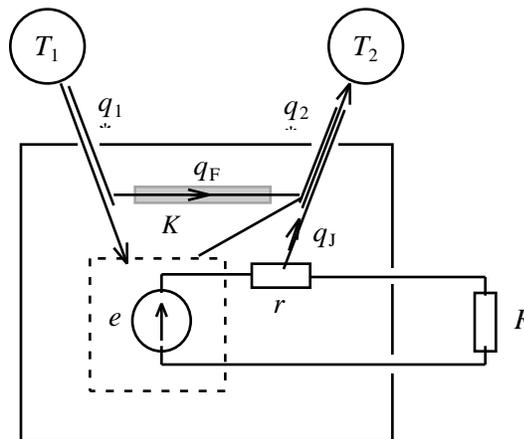
On prend le thermogénérateur réversible précédent (§ VI), que l'on fait fonctionner « à l'envers » en changeant le signe de tous ses échanges avec le milieu extérieur. La machine reçoit donc, de la part d'un générateur extérieur, un travail électrique w par unité de temps, positif. On note, comme précédemment, q_1 et q_2 les quantités de chaleur échangées par unité de temps entre la machine et les sources thermiques T_1 (source chaude) et T_2 (source froide).

- 7.1. Faire un schéma de la machine et de ses sources, en indiquant le sens effectif des transferts. Préciser le signe de q_1 et q_2 .
Une telle machine présente-t-elle un intérêt pratique ? Si oui, lequel (lesquels) ?
- 7.2. Définir l'efficacité thermique e_{th} de cette machine utilisée en refroidisseur, en fonction de q_1 et q_2 . Exprimer celle-ci en fonction des seules températures de source.
- 7.3. *Application numérique.*
Le présent dispositif est utilisé pour maintenir à la température constante de 30 °C un composant électronique dissipant une puissance $P = 35$ W, dans une atmosphère à 70 °C.
Quelle puissance électrique P_r doit-on fournir au refroidisseur, supposé parfait, pour effectuer cette tâche ?
Le refroidisseur réel présente une efficacité égale à 25 % de l'efficacité théorique.
Quelle puissance P_r^* faudra-t-il fournir au refroidisseur réel pour accomplir la même tâche ?

VIII - Etude d'un thermogénérateur réel (non réversible)

L'irréversibilité affectant le thermogénérateur précédent (§ VI) a deux causes distinctes :

- **a. les pertes Joule** dans les conducteurs constituant le générateur. Celles-ci se traduisent par un dégagement de chaleur égal à $q_J (> 0$ par définition) joules par unité de temps. On admet que cette chaleur s'écoule en totalité vers la source froide T_2 .
- **b. la fuite thermique** entre la source chaude et la source froide, due à la conductance thermique des conducteurs placés entre les deux sources, qui se comportent en « shunt thermique ». Cette fuite se traduit par un transfert de chaleur d'un débit de $q_F (> 0$ par définition) joules par unité de temps, proportionnel à la différence de température entre sources sous la forme : $q_F = K(T_1 - T_2)$, où K représente la conductance thermique, supposée constante, entre sources.



On note q_1^* et q_2^* les quantités de chaleur échangées par unité de temps entre le thermogénérateur réel et les sources thermiques, et w^* le travail électrique échangé par unité de temps.

On désigne par e la f.e.m. du thermogénérateur, r sa résistance interne (résistance des conducteurs constituants) et par R la résistance d'utilisation qui absorbe le travail électrique fourni.

- 8.1. Exprimer l'entropie s_F^c produite par unité de temps du fait de la présence du shunt thermique, en fonction de q_F et des températures de source.
- 8.2. Exprimer l'entropie s_J^c produite par unité de temps du fait de l'existence de la résistance interne r du thermogénérateur, en fonction de q_J et des températures de source.
- 8.3. Effectuer le bilan entropique. En déduire l'expression de q_2^* en fonction de q_1^* , s_F^c , s_J^c , et des températures de source.
- 8.4. Exprimer le rendement η^* du thermogénérateur réel, en fonction du rapport de température T_2/T_1 , et du rapport de l'entropie totale créée sur l'entropie reçue de la source chaude : $(s_F^c + s_J^c)/s_1$.
Vérifier que $\eta^* \leq \eta$.

IX - Maximisation du rendement d'un thermogénérateur réel

On se propose d'établir les relations devant exister entre les paramètres K , r et R , pour, qu'à températures de source fixées, le rendement du thermogénérateur réel précédent (§ VIII) soit maximal.

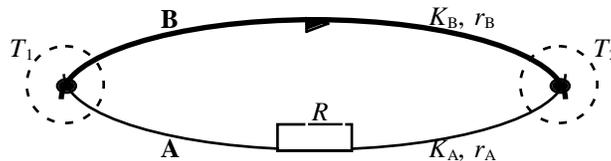
9.1. Exprimer w^* et q_J en fonction de e , R et r .

En déduire l'expression de q_1^* , sous la forme : $q_1^* = q_F + \frac{e^2}{R+r} \varphi(T_1, T_2)$,

où φ est un rapport de températures à déterminer.

Exprimer le rendement réel η^* en fonction de q_F , e , R , r et du rapport φ .

Le thermogénérateur est constitué de deux branches **A** et **B**, disposées électriquement en série et thermiquement en parallèle, de telle sorte que : $r = r_A + r_B$ et $K = K_A + K_B$.



$$K = K_A + K_B$$

$$r = r_A + r_B$$

On montre que le produit de la résistance électrique r_X par la conductance thermique K_X d'un conducteur **X** est indépendant de sa géométrie et égal à une constante $\sigma_X = k_X \rho_X$, produit de sa conductivité thermique k_X (en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) par sa résistivité ρ_X . On vérifie expérimentalement que cette constante σ_X est elle-même peu fonction du matériau retenu au sein d'une même famille. Nous retiendrons par conséquent, qu'indépendamment de la géométrie des conducteurs : $K_A r_A = K_B r_B = \sigma$.

Le modèle du thermocouple fait apparaître que la f.e.m. délivrée par le thermogénérateur est, au premier ordre, proportionnelle à la différence de température entre sources sous la forme : $e = \alpha (T_1 - T_2)$, où α est le coefficient thermoélectrique propre au couple **A-B** (cf. § XI).

9.2. On introduit les variables réduites : $x_A = r_A/R$ et $x_B = r_B/R$, et on pose : $S = x_A + x_B$ et $P = x_A \cdot x_B$.

Exprimer K et r en fonction de S , P , R et σ .

En déduire les expressions de w^* et q_1^* en fonction de S , P , R , $(T_1 - T_2)$, T_1 , α et σ .

9.3. Mettre le rendement réel sous la forme : $\eta^* = \eta/F$, où η est le rendement obtenu dans le cas réversible, F étant la fonction symétrique en x_A et x_B :

$$F(S, P) = (1 + S) + \frac{1}{\mu T_1} \frac{S(1 + S)^2}{P} \quad 1$$

La constante μ représente le facteur de mérite des matériaux constituant le thermogénérateur.

Expliciter μ en fonction de α et σ . Quelle est sa dimension physique ?

9.4. On montre que le rendement maximal à T_1 et T_2 fixées, η^*_M , est obtenu pour une valeur commune de x_A et x_B , notée x_M .

Déterminer x_M en fonction de μT_1 .

En exprimant μT_1 en fonction de x_M , mettre η^*_M sous la forme : $\eta (1 - z)/(1 + z)$, où z dépend de x_M .

9.5. Les conducteurs **A** et **B** étant supposés de même longueur, quel devra être le rapport A/B de leur section en fonction des caractéristiques ρ , k des matériaux, pour obtenir le rendement maximal ?

9.6. Application numérique. Calculer x_M , η et η^*_M , pour $T_1 = 727^\circ\text{C}$, $T_2 = 27^\circ\text{C}$ et $\mu = 10^{-3}$ S.I.

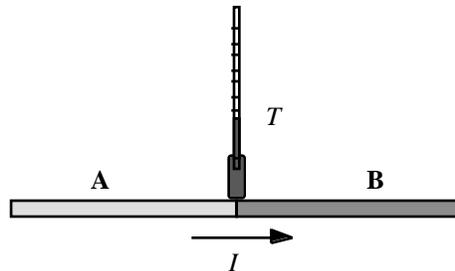
TROISIEME PARTIE
ETUDE DU THERMOCOUPLE

Effet SEEBECK (1821) : Lorsque deux conducteurs **A** et **B** de nature différente sont mis en contact (par soudure), on observe de part et d'autre de l'interface l'existence d'une différence de potentiel, dite « différence de potentiel de contact ». La soudure se comporte comme une thermopile réversible, dont la tension E dépend de la température et de la nature des conducteurs en présence.

Effet PELTIER (1834) : Lorsque la soudure précédente est parcourue par un courant d'intensité I , on observe, localisé sur celle-ci, un effet calorifique : dégagement ou absorption de chaleur, dont le signe dépend du sens de circulation du courant. Le processus étant totalement réversible, l'inversion du sens du courant entraîne le changement de signe de l'effet calorifique. Le débit de chaleur sur la soudure est algébriquement donné par :

$$\frac{dQ}{dt} = E(T)I$$

où $E(T) = V_B(T) - V_A(T)$ est la différence de potentiel de contact entre conducteurs à la température T (cf. effet Seebeck).



Cet effet est proportionnel à l'intensité I du courant, ce qui permet de le distinguer de l'effet Joule, proportionnel à I^2 .

Effet THOMSON : Lorsqu'un conducteur de nature homogène n'est pas à température uniforme, on observe l'existence en son sein d'un champ électrique E_T , proportionnel au gradient de température, sous la forme :

$$E_T = -h_X \text{ grad } T$$

où h_X représente le coefficient Thomson du matériau **X** utilisé. Ce coefficient, qui est fonction de la température, peut être positif ou négatif selon la nature du conducteur.

Ce champ électrique, présent même en l'absence de courant, produit une différence de potentiel, –de faible valeur–, entre deux points d'un même conducteur portés à des températures différentes. Lorsque le conducteur est parcouru par un courant, cette différence de potentiel s'ajoute à celle résultant de la loi d'Ohm.

De façon comparable à l'effet Peltier, la circulation d'un courant dans un conducteur à température non uniforme s'accompagne d'un effet calorifique réversible, dont le signe dépend de celui du coefficient Thomson et du sens de circulation du courant vis-à-vis du gradient de température. C'est l'effet Thomson, qui se superpose à l'effet Joule.

X - Effet Peltier et effet Thomson

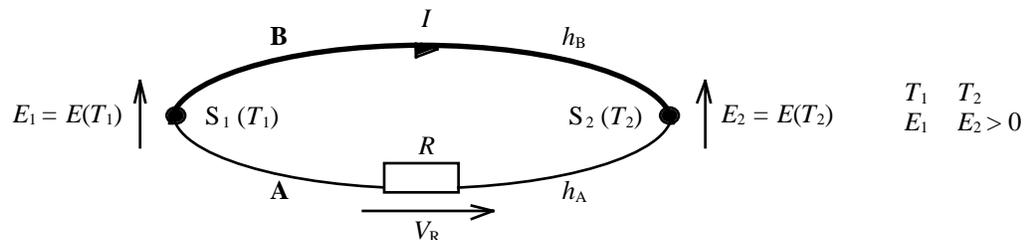
- 10.1. En isolant une soudure, justifier le fait qu'un courant I traversant celle-ci dans le sens des potentiels de contact croissants ($E > 0$), entraîne une *absorption* de chaleur de débit $dQ/dt = EI$.

On considère un conducteur homogène filiforme, de coefficient Thomson h . On désigne par $T(x)$ sa température à l'abscisse x , et par T_1 et T_2 les températures de ses extrémités **1** ($x = 0$) et **2** ($x = l$).

- 10.2. Exprimer la différence de potentiel Thomson dV_T entre les points d'abscisse x et $x+dx$, en fonction de leur différence de température dT .
En déduire la différence de potentiel Thomson V_T entre les extrémités de ce conducteur, sous la forme d'une intégrale sur T .
- 10.3. Soit un tronçon élémentaire du conducteur précédent, de longueur dx , dont les extrémités sont aux températures T et $T+dT$. Quel débit de chaleur Thomson $d(\delta Q_T)/dt$ échange-t-il avec le milieu extérieur lorsqu'il est parcouru dans le sens des températures croissantes par un courant d'intensité I ? Pour h positif, la chaleur est-elle dégagée ou absorbée?

XI - Loi du couple thermoélectrique (cas réversible)

couple thermoélectrique ou thermocouple : On réalise un couple thermoélectrique, ou thermocouple, en soudant entre elles les extrémités de deux conducteurs **A** et **B** de nature différente, de façon à constituer un circuit fermé. Lorsque les deux soudures S_1, S_2 sont portées à des températures différentes ($T_1 \neq T_2$), on constate l'existence dans le circuit d'une force électromotrice e .



On note :

- T_1, T_2 : la température des soudures S_1 et S_2 , respectivement chaude et froide ($T_1 > T_2$);
- T : la température, fonction de l'abscisse, le long des conducteurs **A** et **B**;
- $E_1 = E(T_1), E_2 = E(T_2)$: les d.d.p. de contact $V_B - V_A$ sur les soudures S_1 et S_2 ($E_1 > E_2 > 0$);
- $h_A(T), h_B(T)$: les coefficients Thomson des conducteurs **A** et **B**, fonction de la température;
- V_{TA}, V_{TB} : les tensions Thomson aux bornes des conducteurs **A** et **B**;
- R : la résistance d'utilisation de forte valeur;
- I : l'intensité dans le circuit;
- e : la f.e.m. du couple thermoélectrique.

On se propose d'établir la loi du thermocouple qui relie, sous forme différentielle, la f.e.m. $e = f(T_1, T_2)$ aux caractéristiques thermoélectriques des conducteurs : $E(T), h_A(T), h_B(T)$. Afin de simplifier l'étude, nous nous placerons dans des conditions telles que le processus puisse être considéré comme réversible. Pour cela, nous ferons en sorte de pouvoir négliger, d'une part les pertes et chutes de tension ohmiques dans les conducteurs (faible intensité dans le circuit), d'autre part les fuites dues à la conduction thermique des conducteurs (faible section, donc faible conductance thermique des conducteurs).

La f.e.m. e du couple thermoélectrique s'identifie alors à la tension V_R .

Nous considérerons, de plus, que la résistance d'utilisation R est de valeur suffisamment élevée pour que la puissance qui y est dissipée reste négligeable devant les autres puissances, électriques ou thermiques, mises en jeu.

- 11.1.** Dans les hypothèses simplificatrices précédentes, écrire la loi des mailles relative au circuit.
Que vaut e lorsque $T_1 = T_2$?
- 11.2.** Exprimer les débits de chaleur dQ_1/dt et dQ_2/dt échangés par les soudures.
- 11.3.** Exprimer le débit de chaleur Thomson dQ_T/dt , ainsi que le débit d'entropie Thomson dS_T/dt échangés par l'ensemble des deux conducteurs **A** et **B**, sous la forme d'une intégrale sur T .
- 11.4.** Ecrire le bilan énergétique et le bilan entropique relatifs au thermocouple en régime stationnaire.
- 11.5.** On considère que T_2 est constante et T_1 variable.
Montrer, qu'en différenciant les deux bilans précédents par rapport à T_1 , ils prennent respectivement la forme :

$$de = dE + H(T) dT$$

$$d(E/T) + H(T) dT/T = 0$$

où l'on a remplacé T_1 par T .
Expliciter la quantité $H(T)$.

- 11.6.** Tirer des équations précédentes les relations différentielles :

$$E(T) = \chi \frac{de}{dT}$$

$$h_A(T) - h_B(T) = -\chi \frac{d^2e}{dT^2}$$

où l'on explicitera χ .

- 11.7.** Dans une large plage de température, la différence des coefficients Thomson peut s'exprimer sous la forme :

$$h_A - h_B = \varepsilon T$$

où ε est indépendant de la température.

Donner l'expression générale de de/dt en fonction de T .

Montrer que la quantité $E/T + \varepsilon T$ est constante, indépendante de T .

- 11.8.** Montrer que la f.e.m. thermocouple e s'exprime sous une forme polynomiale simple en fonction de la différence de température $T_1 - T_2$:

$$e(T_1, T_2) = \int_{T_2}^{T_1} de = a(T_1 - T_2) - b(T_1 - T_2)^2$$

Le coefficient a s'identifiant au coefficient thermoélectrique α , –déjà rencontré au § IX–, relier b aux coefficients Thomson des matériaux.

- 11.9.** Les coefficients a et b sont supposés positifs. Tracer l'allure de $e(T_1)$, à T_2 fixée, pour $T_1 > T_2$.
A T_2 fixée, pour quelle température T_{1M} la f.e.m. e passe-t-elle par un maximum ?

ooooooo

Commentaires du jury de physique

L'épreuve écrite portait à dessein sur une partie de programme (la thermodynamique) uniquement traitée en classe ATS, de façon à mettre tous les candidats sur un pied d'égalité et à ne favoriser aucune filière – ce qui aurait pu être le cas avec une épreuve à dominante mécanique ou électricité –.

Outre son découpage en trois parties indépendantes, l'épreuve était conçue avec un étagement des questions sur trois niveaux de difficulté : le niveau de base portant sur la connaissance du cours et des définitions, le niveau intermédiaire correspondant à des applications directes des connaissances de base, le niveau avancé nécessitant une

aptitude à la généralisation ou un certain recul par rapport à la discipline ; chaque niveau représentant sensiblement un tiers du barème.

L'épreuve était destinée, dans ses deux premières parties, à évaluer la compréhension et la maîtrise des premier et second principes de la thermodynamique appliqués à des systèmes simples autres que le traditionnel gaz parfait. Au vu des copies, il est apparu qu'une proportion significative des candidats, de l'ordre de 10%, ne possédaient pas la moindre connaissance en thermodynamique, et qu'environ 50% des autres ne maîtrisaient pas véritablement les définitions et raisonnements de base. Ceci explique le nombre important de très basses notes attribuées. Seules les copies restantes (~ 40%) étaient d'un niveau conforme à ce que l'on était raisonnablement en droit d'attendre. Cette dichotomie au sein des candidats a sans doute eu un effet couperet regrettable, que le jury a tenté de corriger en abaissant la barre d'admissibilité.

Examinons les erreurs ou difficultés les plus fréquemment rencontrées dans l'épreuve écrite.

Il est surprenant de constater à quel point les mots « isotherme », « thermostat », « adiabatique », « réversible » et « isentropique » sont perçus de façon confuse. Pour beaucoup de candidats, la transformation subie par un système en contact avec un thermostat n'est pas isotherme. Plus grave, pour la majorité d'entre eux, l'effet Joule n'est pas reconnu comme la manifestation d'une transformation fondamentalement irréversible. Quelques-uns allant jusqu'à affirmer que la transformation est réversible car la résistance est un élément ... linéaire, quand ce ne sont pas des justifications plus extravagantes encore.

La vision du premier principe en tant que principe de conservation de l'énergie ne semble acquise que par une minorité. Très peu sont en effet capables d'expliquer en termes purement qualitatifs que l'énergie électrique reçue par une pile réversible est intégralement transformée et stockée sous forme électrochimique. Certains vont jusqu'à écrire, qu'au cours de la charge, l'énergie interne de la pile diminue.

Peu de candidats ont vu ou ont été capables d'exprimer que l'application des premier et second principes à un système en état stationnaire, montre l'impossibilité d'un stockage d'énergie ou d'entropie au sein de ce dernier, et qu'il y a par conséquent égalité des flux entrant et sortant. On retrouve aussi assez souvent la classique confusion entre la notion d'échange énergétique et celle de variation d'une grandeur d'état, certains parlant de « variation de chaleur ». Il est fréquent de trouver des entropies créées négatives.

De nombreuses fautes d'homogénéité sont à déplorer, en particulier des travaux homogènes à des puissances. Concernant les machines thermiques, trop nombreuses sont les erreurs, voire les incohérences de fléchage et/ou de signe, relatives aux échanges thermiques. Les définitions du rendement ou de l'efficacité thermique sont souvent fantaisistes. On aurait pu s'attendre à ce que cette partie, très proche du cours, soit dans l'ensemble mieux traitée.

La troisième partie consacrée au thermocouple a été assez peu abordée. Très rares sont ceux qui ont correctement écrit la loi de la maille, la plupart oubliant de comptabiliser les f.e.m. Thomson au sein des conducteurs. Si la relation champ-potential semble connue, beaucoup ont éprouvé des difficultés d'ordre analytique, dans l'intégration d'une dérivée (!), ou en sortant abusivement du signe somme des grandeurs dépendant de la variable d'intégration.

L'épreuve orale portait sur l'ensemble du programme, à l'exception de la thermodynamique qui avait été abondamment évaluée à l'écrit.

Chaque candidat était interrogé sur deux, voire trois questions indépendantes, de façon à apprécier aussi largement que possible l'étendue de ses connaissances et de ses capacités de réaction.

Lors de ces interrogations, l'examineur cherche essentiellement à s'assurer de la maîtrise des concepts et théorèmes de base, ainsi que de la capacité du candidat à appliquer ceux-ci dans des cas simples, sans excès calculatoire.

Un minimum d'aisance dans la formulation des problèmes, leur mise en équations et la résolution de ces dernières est toutefois exigée. Une formule apprise par coeur, mais qui ne peut être expliquée et appliquée dans un cas simple, n'est d'aucun intérêt. Indiquons que le jury apprécie à sa juste valeur le fait que le candidat soit capable, lorsque la situation s'y prête, d'invoquer les grands principes physiques de symétrie, d'invariance et de conservation ; qu'il soit également capable de préciser le domaine de validité de ce qu'il écrit, et de justifier les hypothèses simplificatrices retenues.

Comme l'écrit, l'oral a fait apparaître une grande disparité de niveau parmi les candidats, aussi bien sur l'étendue des connaissances que sur l'aisance de mise en oeuvre. D'importantes lacunes ont été constatées, en particulier en ontique. Par ailleurs, de nombreux candidats sont handicapés par des difficultés liées à la formulation des

problèmes sous forme différentielle ou au choix de la géométrie des éléments d'intégration.