

# CONCOURS ATS

- SESSION 1998 -

**E P R E U V E**

**DE SCIENCES PHYSIQUES**

**Matériel autorisé:** calculatrice scientifique

*Code de l'épreuve :ATS-PHYS*

*Durée de l'épreuve: 3 heures*

# ETUDE DES PHENOMENES THERMOELECTRIQUES

*Note au candidat. A lire attentivement.*

Le candidat veillera à respecter **impérativement** les conventions générales de la thermodynamique: un échange, quelle que 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.

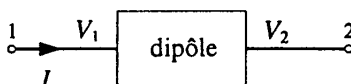
## PREMIERE PARTIE

### ETUDE THERMODYNAMIQUE DE DIVERS ELEMENTS ELECTRIQUES ET THERMIQUES

#### I - Travail électrique

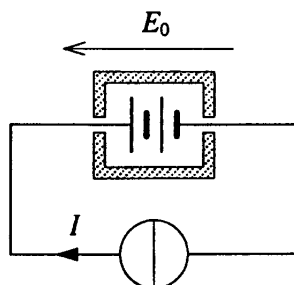
**1.1.** Lors de son déplacement dans un champ électrostatique, une charge électrique  $q$ , positive, voit son potentiel passer de  $V_1$  à  $V_2$ . Quel travail la charge  $q$  a-t-elle reçu du milieu extérieur au cours de ce déplacement ?

**1.2.** Un dipôle électrique, dont les bornes 1 et 2 sont respectivement fixées au potentiel  $V_1$  et  $V_2$ , est traversé dans le sens 1 vers 2 par un débit de charge  $I = dq/dt$  positif. Quelle est la valeur algébrique 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  $\Delta t$  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 de l'énergie interne du système et celle de l'univers.

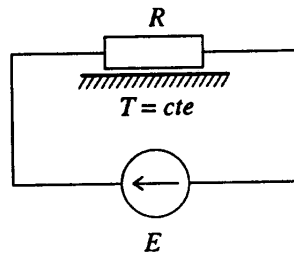
**2.4.** Effectuer un bilan entropique en précisant la variation d'entropie du système et celle de l'univers.

**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, 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 de l'énergie interne du système.

**3.4.** Effectuer un bilan entropique en précisant:

- a. l'entropie échangée entre le système et le milieu extérieur;
- b. la variation d'entropie du système et celle de l'univers;
- c. l'entropie 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 principes de la thermodynamique ? Justifiez.

#### IV- Etude thermodynamique d'un diffuseur thermique

Un diffuseur thermique (échangeur) reçoit, durant un intervalle de temps, une chaleur d'une source chaude à la température. Il en restitue dans le même temps une chaleur () à une source froide de température.

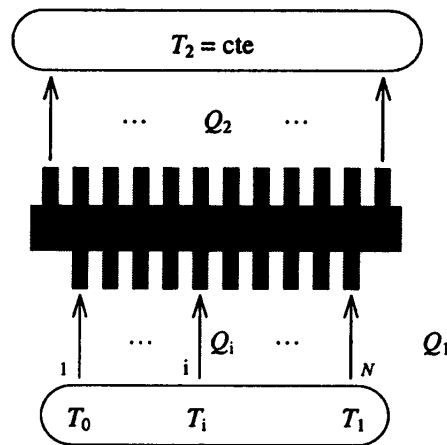
- 4.1. Justifier qu'en régime établi, lorsque toutes les grandeurs intensives du système (i.e le diffuseur) sont indépendantes du temps, on a: , et que l'entropie du système reste stationnaire.

On note la valeur absolue commune de et.

- 4.2. Effectuer un bilan entropique, en indiquant pour la transformation en régime établi :

- a. l'entropie échangée entre le système et le milieu extérieur;
- b. l'entropie créée (par diffusion) au sein du système;
- c. la variation d'entropie de l'univers

Le diffuseur n'échange plus avec une source chaude unique, mais avec sources chaudes dont les températures sont régulièrement échelonnées entre et (). La source chaude () est à la température et cède une quantité de chaleur, identique pour toutes les sources.



- 4.3. Dans le cas des sources chaudes, écrire l'entropie créée au sein du système, sous la forme d'une somme sur.

- 4.4. Donner l'expression de la limite vers laquelle tend cette entropie, lorsque le nombre de sources entre et tend vers l'infini, la chaleur restant épartie sur les 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 qu'il convertit en chaleur à la température. Cette chaleur est intégralement transférée à une source froide à température.

- 5.1. En considérant les deux causes de création d'entropie ici en action (effet Joule, diffusion), montrer que l'entropie produite par le radiateur au cours de la transformation ne dépend que de l'une des températures, . Exprimer.

Ne pouvait-on obtenir directement ce résultat par une approche globale ?

## VI - Etude d'un thermogénérateur réversible

On considère un générateur thermoélectrique fonctionnant de façon réversible entre deux sources thermiques de température (source chaude) et (source froide). On note respectivement et 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 thermique 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 , et  $w$ .
- 6.3. Le fonctionnement étant réversible, que peut-on dire de l'entropie créée par seconde au sein du thermogénérateur ? Déduire du deuxième principe de la thermodynamique une seconde relation entre ,  $w$  et les températures des sources.
- 6.4. Définir le rendement énergétique de ce thermogénérateur réversible en fonction de , et  $w$ .
- 6.5. Exprimer le rendement en fonction des seules températures de source ,.  
Comparer au rendement de Carnot d'un moteur réversible fonctionnant entre les deux mêmes sources thermiques. -On se contentera de rappeler, sans la démontrer, l'expression de -.

## VII - Thermogénérateur réversible en fonctionnement inversé

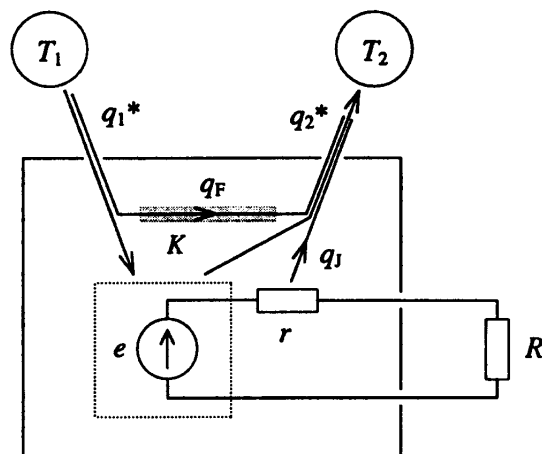
On prend le thermogénérateur réversible précédent (§ VI), que l'on fait fonctionner « à l'envers » en changeant le signe de tous ses échanges avec le milieu extérieur. La machine reçoit donc, de la part d'un générateur extérieur, un travail électrique  $w$  par unité de temps, positif. On note, comme précédemment, et les quantités de chaleur échangées par unité de temps entre la machine et les sources thermiques (source chaude) et (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 et .  
Une telle machine présente-t-elle un intérêt pratique ? Si oui, lequel (lesquels) ?
- 7.2. Définir l'efficacité thermique de cette machine utilisée en refroidisseur, en fonction de et .  
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 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 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  $I^2 r$  (par définition) joules par unité de temps. On admet que cette chaleur s'écoule en totalité vers la source froide.
- **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  $K(T_1 - T_2)$  (par définition) joules par unité de temps, proportionnel à la différence de température entre sources sous la forme:  $q_F$ , 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  $P$  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 constituant) et par  $R$  la résistance d'utilisation qui absorbe le travail électrique fourni.

- 8.1. Exprimer l'entropie produite par unité de temps du fait de la présence du shunt thermique, en fonction de  $T_1$  et  $T_2$  et des températures de source.
- 8.2. Exprimer l'entropie produite par unité de temps du fait de l'existence de la résistance interne  $r$  du thermogénérateur, en fonction de  $T_1$  et  $T_2$  et des températures de source.
- 8.3. Effectuer le bilan entropique. En déduire l'expression de  $P$  en fonction de  $T_1$ ,  $T_2$  et des températures de source.
- 8.4. Exprimer le rendement 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:  $S_{\text{crée}}/S_{\text{reçue}}$ . Vérifier que

## 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.

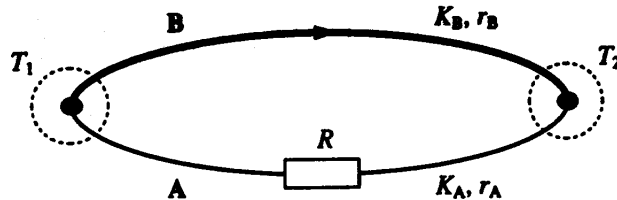
9.1. Exprimer  $\eta$  en fonction de  $e$ ,  $R$  et  $r$ .

En déduire l'expression de  $\eta$  sous la forme:  $\eta = \frac{e}{R + r}$ ,

où  $\frac{r}{R}$  est un rapport de températures à déterminer.

Exprimer le rendement réel  $\eta$  en fonction de  $e$ ,  $R$ ,  $r$  et du rapport  $\frac{r}{R}$ .

Le thermogénérateur est constitué de deux branches **A** et **B**, disposées électriquement en série et thermiquement en parallèle, de telle sorte que:  $T_1$  et  $T_2$ .



On montre que le produit de la résistance électrique par la conductance thermique d'un conducteur **X** est indépendant de sa géométrie et égal à une constante  $\frac{1}{KX}$ , produit de sa conductibilité thermique  $k$  (en  $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ) par sa résistivité  $\rho$ . On vérifie expérimentalement que cette constante 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:  $\frac{1}{KX} = \frac{1}{k\rho}$ .

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  $\alpha$  est le coefficient thermoélectrique propre au couple **A-B** (cf § XI).

9.2. On introduit les variables réduites:  $\theta = \frac{T_2}{T_1}$  et on pose:  $\eta = \frac{e}{R + r}$ .

Exprimer  $\eta$  et  $r$  en fonction de  $S$ ,  $P$ ,  $R$  et  $\theta$ .

En déduire les expressions de  $\eta$  et  $r$  en fonction de  $S$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $\theta$ , et  $\frac{1}{KX}$ .

9.3. Mettre le rendement réel sous la forme:  $\eta = \frac{e}{R + r}$ , où  $\eta$  est le rendement obtenu dans le cas réversible,  $F$  étant la fonction symétrique en  $\theta$  et  $\frac{1}{KX}$ :

La constante  $\frac{1}{KX}$  représente le facteur de mérite des matériaux constituant le thermogénérateur. Expliciter  $\frac{1}{KX}$  en fonction de  $k$  et  $\rho$ . Quelle est sa dimension physique?

9.4. On montre que le rendement maximal à  $T_1$  et  $T_2$  fixées, est obtenu pour une valeur commune de  $\frac{r}{R}$  notée  $z$ . Déterminer  $z$  en fonction de  $\theta$ .

En exprimant  $\eta$  en fonction de  $\theta$ , mettre  $\eta$  sous la forme:  $\eta = \frac{F(\theta)}{1 + z}$ , où  $z$  dépend de  $\theta$ .

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

9.6. Application numérique. Calculer  $\eta$ , et, pour  $\theta = 0.5$ , et  $\frac{1}{KX} = 0.01$ .

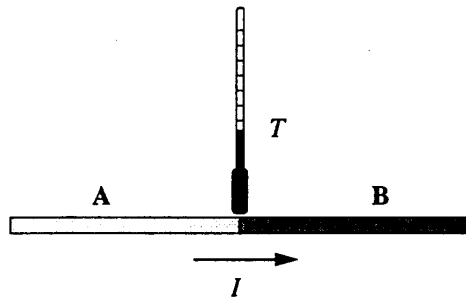
## TROISIEME PARTIE

### 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:

où 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 .

**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 , proportionnel au gradient de température, sous la forme:

où 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  $T$  sa température à l'abscisse  $x$ , et par  $T_1$  et  $T_2$  les températures de ses extrémités 1 et 2.

**10.2.** Exprimer la différence de potentiel Thomson entre les points d'abscisse  $x$  et  $x+dx$ , en fonction de leur différence de température  $dT$ .

En déduire la différence de potentiel Thomson 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 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, 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:

- $T_1$ : la température des soudureset  $T_2$ , respectivement chaude et froide ();
- $T$ : la température, fonction de l'abscisse, le long des conducteurs **A** et **B**;
- $\phi_A$  et  $\phi_B$ : les d.d.p. de contact sur les soudures et ;
- $h_A$  et  $h_B$ : les coefficients Thomson des conducteurs **A** et **B**, fonction de la température;
- $V_A$  et  $V_B$ : 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. aux caractéristiques thermoélectriques des conducteurs:  $E(T)$ ,  $h(T)$ . 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  $V$ .

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 ?

**11.2.** Exprimer les débits de chaleur et échangés par les soudures.

**11.3.** Exprimer le débit de chaleur Thomson, ainsi que le débit d'entropie Thomson 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 est constante et variable. Montrer, qu'en différenciant les deux bilans précédents par rapport à , ils prennent respectivement la forme:

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

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

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

où l'on explicitera .

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

où est indépendant de la température.

Donner l'expression générale de  $de/dt$  en fonction de  $T$ . Montrer que la quantité  $E/T + T$  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 :

$$e(,) = = a(-) -$$

Le coefficient  $a$  s'identifiant au coefficient thermoélectrique , -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 , à fixée, pour .  
A fixée, pour quelle température la f.e.m.  $e$  passe-t-elle par un maximum ?

oooooooo