

# Étude d'un thermoélément à effet Peltier

par **André DOMPS**

Lycée Henri Poincaré - 54000 Nancy

[domps.andre@ac-nancy-metz.fr](mailto:domps.andre@ac-nancy-metz.fr)

## RÉSUMÉ

*Nous proposons une approche des effets thermoélectriques au travers de l'étude d'un thermoélément réfrigérant à effet Peltier, sous la forme de manipulations adaptées à des travaux pratiques en CPGE (Classes préparatoires aux grandes écoles) ou en licence. Après une approche qualitative, on caractérise les propriétés des matériaux utilisés dans la fabrication du dispositif ainsi que l'efficacité du radiateur. Ces données permettent d'interpréter quantitativement les températures et flux thermiques mesurés en fonction de l'intensité d'alimentation.*

## INTRODUCTION

Dès les années 1960, l'utilisation de matériaux semi-conducteurs a permis la réalisation de dispositifs thermoélectriques générateurs ou réfrigérateurs au rendement compatible avec des applications pratiques. Depuis quelques années, on observe un regain d'activité dans ce domaine, porté par les besoins de refroidissement en électronique et l'engouement pour les appareils mobiles. L'activité de la société internationale de thermoélectricité [1], comme les prix Lépine attribués en 2005 et 2010 à la société HEALTH WORKS pour ses réfrigérateurs miniatures, témoigne du dynamisme des recherches actuelles dans ce secteur dont on trouvera un panorama dans [2].

D'un point de vue pédagogique, les effets thermoélectriques constituent un sujet particulièrement riche [3]. Les phénomènes de transport ainsi que les bilans énergétiques et entropiques mis en jeu sont bien adaptés à la formation d'étudiants de CPGE ou de licence. Nous en proposons dans cet article une approche expérimentale au travers de la manipulation d'un thermoélément réfrigérant à effet Peltier. Bien que ce thème soit abordé dans la littérature [4-5], ces manipulations sont rarement proposées aux élèves. En effet, l'interprétation quantitative des mesures est réputée délicate en raison de leur faible précision, des délais de thermalisation et de la multiplicité des phénomènes en jeu.

Nous présentons ici les solutions adoptées au lycée Henri Poincaré pour la réalisation du dispositif expérimental, le choix des grandeurs relevées et leur analyse. L'ensemble des manipulations et interprétations peut être réalisé au cours d'une séance de travaux pratiques de quatre heures. Le modèle adopté ne se limite pas à la considération du thermoélément lui-même, mais prend aussi en compte la conductance thermique du radiateur

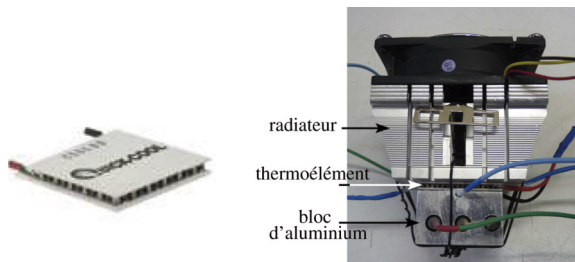
évacuant les flux vers l'air ambiant. Cela présente un double intérêt. D'une part, on se rapproche des conditions réelles d'utilisation ou de conception d'un réfrigérateur. D'autre part, cela enrichit et clarifie l'interprétation des résultats expérimentaux en fournissant une expression explicite de chacune des températures mesurées.

## 1. PRÉSENTATION ET MODÉLISATION DU SYSTÈME RÉFRIGÉRANT

### 1.1. Premier contact avec le thermoélément

Un thermoélément à effet Peltier se présente sous la forme d'une plaquette munie de deux bornes (partie gauche de la figure 1). Aux élèves découvrant les effets thermo-électriques, on peut proposer les observations qualitatives suivantes :

- ♦ On impose une différence de température entre les deux faces, par exemple en plaquant la main sur l'une d'elles. On constate l'apparition d'une ddp  $U$  associée à l'*effet Seebeck*. La f.é.m. correspondante peut être utilisée pour alimenter un dipôle récepteur. Ce mode de fonctionnement générateur, bien que spectaculaire, n'est pas étudié dans la suite.
- ♦ On branche le thermoélément sur une alimentation continue réglable en portant la borne rouge au potentiel le plus élevé pour faire circuler un courant d'intensité de l'ordre de 1 A. Simultanément, on touche des doigts les deux faces planes. On constate immédiatement que l'une d'elles s'échauffe alors que l'autre se refroidit. Il s'agit d'une manifestation de l'*effet Peltier*, qui consiste en un flux thermique distinct de l'*effet Joule* apparaissant au passage du courant électrique dans une jonction de température uniforme.



**Figure 1 :** Partie gauche : thermoélément à effet Peltier Quick-cool QC-127-1.4-8.5M possédant  $N = 127$  thermocouples de longueur  $L = 1,5$  mm et section  $S = 1,4 \times 1,4$  mm<sup>2</sup>.  
Partie droite : dispositif d'étude.

Dans la suite, nous désignerons par « face chaude » celle d'où la chaleur se dégage, par « face froide » celle où elle est absorbée et noterons  $T_c$  et  $T_f$  leurs températures respectives, même si leurs valeurs s'inversent momentanément au cours des manipulations. La sensation de froid éprouvée ici donne immédiatement l'idée d'utiliser le thermoélément comme réfrigérateur. C'est dans ce but qu'il a été conçu et c'est ce mode de

fonctionnement qu'on étudie dans la suite. Pour des applications pratiques, on place la face froide au contact de la matière à refroidir. Il peut s'agir de composants électroniques au sein desquels a lieu un effet Joule à compenser, on encore du contenu d'un réfrigérateur portable. Nous noterons  $P_u$  la puissance thermique puisée par la face froide dans cette « charge thermique » afin d'y maintenir une température suffisamment basse.

## 1.2. Physique du thermoélément

L'interprétation microscopique des effets thermoélectriques sort du cadre de cet article et relève de la physique du solide [6]. À l'échelle macroscopique, ils sont décrits par des relations phénoménologiques généralisant les lois d'Ohm et de Fourier [3, 7]. Les densités volumiques de courant électrique  $j_e$  et de chaleur  $j_q$  s'expriment par les relations couplées :

$$j_e = \gamma \nabla V - \gamma \varepsilon \nabla T \quad (1)$$

$$j_q = -\lambda \nabla T + \varepsilon T j_e \quad (2)$$

Ici,  $\gamma$  et  $\lambda$  désignent les conductivités électrique et thermique du matériau et  $\varepsilon$  son pouvoir thermoélectrique. Le terme  $\varepsilon T j_e$  de la relation (2) correspond à l'effet Peltier découvert plus haut. Ce transfert de chaleur accompagnant le passage du courant électrique se produit dans le même sens que celui-ci si  $\varepsilon > 0$ , en sens inverse si  $\varepsilon < 0$ .

En observant latéralement le thermoélément manipulé plus haut, on y aperçoit de nombreux barreaux. Ils sont constitués de semi-conducteurs de type  $p$  et  $n$  associés deux par deux pour former des *thermocouples* comme le montre la figure 2, leurs extrémités se trouvant au contact de plaques de cuivre placées sous l'une ou l'autre des deux faces. Le courant circule de la face chaude vers la face froide dans les semi-conducteurs  $n$ , horizontalement dans le cuivre et revient en sens inverse dans les semi-conducteurs  $p$ . Comme  $\varepsilon_n < 0$  et  $\varepsilon_p > 0$ , le transfert thermique Peltier s'effectue de la face froide vers la face chaude dans tous les barreaux.

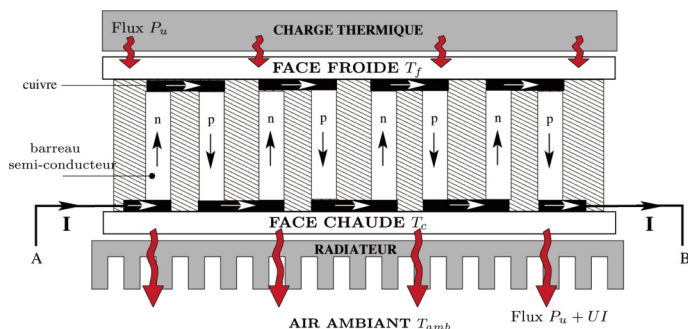


Figure 2 : Représentation schématique du thermoélément, de la charge thermique et du radiateur.

À partir des lois locales (1) et (2), on peut étudier le fonctionnement du thermoélément dans son ensemble [8]. Soit  $L$  la longueur des barreaux et  $S$  leur section. Sous l'hypothèse simplificatrice de grandeurs  $\lambda$ ,  $\gamma$  et  $\varepsilon$  indépendantes de la température, on obtient les deux relations :

$$V_A - V_B = U = N\varepsilon_{pn}(T_c - T_f) + RI \quad (3)$$

$$P_u + G(T_c - T_f) + \frac{RI^2}{2} - N\varepsilon_{pn}T_f I = 0 \quad (4)$$

avec  $\varepsilon_{pn} = \varepsilon_p - \varepsilon_n$ ,  $R = NL(\rho_n + \rho_p)/S$  et  $G = NS(\lambda_n + \lambda_p)/L$ . L'équation (3) montre que le comportement électrique du thermoélément est celui d'une source de tension de résistance interne  $R$  et de f.é.m.  $e = N\varepsilon_{pn}(T_c - T_f)$  associée à l'effet Seebeck. L'équation (4) traduit le bilan des flux thermiques sur la face froide. En plus de  $P_u$ , il fait intervenir :

- ♦ La puissance  $P_c = G(T_c - T_f)$  traversant l'élément par conduction thermique de la face chaude vers la face froide.
- ♦ La puissance  $RI^2/2 = P_j/2$  associée à l'effet Joule dans les barreaux ; le coefficient  $1/2$  s'explique par le fait que seule une partie de cette puissance parvient à la face froide, l'autre se dirigeant vers la face chaude.
- ♦ La puissance  $P_{\text{Peltier}} = N\varepsilon_{pn}T_f I$  de l'effet Peltier à la face froide. Le signe moins devant ce terme signifie que la face froide cède de l'énergie aux barreaux semi-conducteurs qui l'évacuent vers la face chaude. C'est lui qui permet la réfrigération !

### 1.3. Rôle du radiateur

Comme on l'a ressenti plus haut, la face chaude voit sa température s'élever rapidement pendant le fonctionnement. C'est au travers d'elle que sont finalement évacuées vers le milieu ambiant, de température  $T_{\text{amb}}$ , la puissance  $P_u$  prélevée à la charge thermique ainsi que celle reçue par le thermoélément de son alimentation électrique, égale à  $UI$ . Une réfrigération satisfaisante requiert donc la présence d'un radiateur. En facilitant le transfert thermique de la face chaude vers l'air ambiant, il modère l'élévation de  $T_c$  et conditionne aussi la température de la face froide. La modélisation complète de la chaîne de refroidissement doit prendre en compte cet aspect. Dans l'hypothèse d'une réponse linéaire, nous introduisons la conductance thermique  $G_{\text{rad}}$  du radiateur définie par :

$$P_u + UI = G_{\text{rad}}(T_c - T_{\text{amb}}) \quad (5)$$

### 1.4. But de l'étude

Supposons connue la puissance  $P_u$  à prélever à la source froide. Les relations (3), (4) et (5) permettent alors d'exprimer  $T_f$  et  $T_c$  en fonction de  $I$ . La forme détaillée de

ces expressions, fournie en annexe, ne mérite pas de commentaire. Par contre, l'existence de relations du type  $T_f = f(I)$  et  $T_c = g(I)$  est digne d'intérêt. Elle signifie que l'utilisateur, en agissant uniquement sur cette intensité d'alimentation, contrôle la température de la matière à refroidir. Plus prosaïquement, se ramener à un système « monovariant » permet l'exploitation des mesures au travers de courbes, chacune pouvant s'interpréter à partir des paramètres du modèle que sont le pouvoir thermoélectrique  $NE_{pn}$  du thermoélément, sa résistance  $R$ , sa conductance thermique  $G$ , et la conductance thermique  $G_{rad}$  du radiateur.

L'étude expérimentale s'effectue donc en deux étapes. On mesure tout d'abord ces quatre grandeurs à intensité nulle. Puis on étudie le régime où le thermoélément alimenté joue son rôle réfrigérant. On peut alors éprouver la validité du modèle et montrer comment les paramètres mesurés précédemment déterminent son fonctionnement.

## 2. DISPOSITIF D'ÉTUDE

Le dispositif d'étude est visible sur la partie droite de la figure 1. Contre la face chaude du thermoélément, on a placé le radiateur muni d'un ventilateur, initialement conçu pour le refroidissement de processeurs. Contre la face froide se trouve un bloc d'aluminium jouant le rôle charge thermique. Ce métal est couramment choisi lors des tests industriels d'éléments Peltier en raison de sa bonne diffusivité thermique qui permet l'établissement des équilibres en un temps raisonnable. Trois résistors en série, de résistance totale 10  $\Omega$ , y ont été logés dans des trous cylindriques. On peut ainsi y produire un effet Joule dont la puissance s'identifie, en régime permanent, à celle  $P_u$  qu'absorbe la face froide du thermoélément.

La mesure de  $T_c$  et  $T_f$  s'effectue au moyen de thermistances. Ces capteurs peuvent être aisément logés dans des cavités millimétriques pratiquées à la surface du bloc d'aluminium et à la base du radiateur respectivement, se trouvant ainsi plaqués contre les faces du thermoélément. Deux rainures permettent de glisser des conducteurs recouverts de gaine thermorétractable par lesquelles ces thermistances sont reliées aux appareils de mesure. Toutes les interfaces sont recouvertes de pâte thermique afin d'assurer une bonne conduction des flux et de réduire les hétérogénéités de température. Le bloc d'aluminium est finalement calorifugé sur cinq de ses faces par de la laine de verre (la sixième se trouve au contact du thermoélément). Puis le tout est inséré dans une cassette en bois munie d'un bornier pour assurer la robustesse du dispositif, seul émergeant le radiateur. Un inconvénient est qu'une grande partie du système devient invisible aux étudiants. Cela justifie les manipulations élémentaires menées dans la partie 1.1. qui évitent de donner à ce travail un caractère trop abstrait.

Le prix de l'ensemble s'élève à quelques dizaines d'euros, ce qui autorise la mise en œuvre du travail à l'échelle d'un groupe entier de travaux pratiques. L'établissement des équilibres thermiques impose une attente de cinq ou dix minutes entre deux mesures. Ce temps pourra être utilisé pour réfléchir au modèle et/ou programmer le logiciel de trai-

tement des données. Pour des élèves manipulant rapidement, l'enseignant peut aussi prévoir quelques expériences supplémentaires à intercaler dans les éventuels temps morts.

### 3. MESURE DES PARAMÈTRES DU MODÈLE

Parmi les paramètres  $R$ ,  $N\mathcal{E}_{pn}$ ,  $G$  et  $G_{rad}$  intervenant dans le modèle, celui dont la mesure semble la plus simple est  $R$ . Branchons naïvement le thermoélément sur un multimètre et lisons la valeur affichée, de l'ordre de l'Ohm. On constate qu'elle se modifie de plusieurs centaines de pour-cent au fil des secondes, rendant cette approche inopérante. Il s'agit d'une excellente occasion de faire prendre conscience aux étudiants du caractère actif d'un ohmmètre. Il envoie un courant d'intensité connue au travers du dipôle à étudier puis la résistance cherchée se déduit de la tension mesurée à ses bornes. Ici, le courant de mesure provoque par effet Peltier une variation de température des deux faces du thermoélément. Une f.é.m. Seebeck y apparaît ; elle fausse la mesure de  $R$ .

Une manière simple d'aplanir cette difficulté est d'utiliser un ohmmètre fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, le flux Peltier gênant s'inverse périodiquement sur des échelles de temps très inférieures au temps de diffusion thermique dans les barreaux de sorte que son effet se moyenne à zéro. À 120 Hz comme à 1 kHz, nous mesurons ainsi  $R = 1,58 \Omega$ . Pour la résistivité moyenne des deux semi-conducteurs, cela conduit à la valeur  $(\rho_n + \rho_p)/2 = 8,0 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$ . Pour comparaison, la littérature fournit la valeur typique  $\rho = 1,0 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot m$  pour les semi-conducteurs couramment utilisés par l'industrie thermoélectrique ([2] chap. 5 § 1.6.).

Les grandeurs  $N\mathcal{E}_{pn}$ ,  $G$  et  $G_{rad}$  se déduisent d'une même série de mesures pour lesquelles le thermoélément est en circuit ouvert. Pour  $I = 0$ , les équations (3), (4) et (5) se simplifient en :

$$U = N\mathcal{E}_{pn}(T_c - T_f) \quad P_u = G(T_f - T_c) = G_{rad}(T_c - T_{amb})$$

En alimentant les résistances logées dans le bloc d'aluminium, on y dissipe une puissance connue. Après quelques minutes, un régime permanent s'établit et cette puissance s'identifie à  $P_u$ . Les mesures de  $T_c$ ,  $T_f$  et  $U$  fournissent alors les grandeurs cherchées.

Sur les graphes (a), (b) et (c) de la figure 3, on a respectivement représenté les variations de  $U$  en fonction de  $T_c - T_f$ , de  $P_u$  en fonction de  $T_f - T_c$  puis de  $P_u$  en fonction de  $T_c - T_{amb}$ . Ces résultats montrent la validité des modèles linéaires adoptés ici, pour la f.é.m. Seebeck comme pour les transferts thermiques. Par des régressions linéaires on obtient :

$$N\mathcal{E}_{pn} = 52 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1} \quad G = 0,68 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \quad G_{rad} = 2,03 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$$

La valeur de  $G_{rad}$  correspond à une résistance thermique de radiateur égale à  $0,49 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$  ; exprimée sous cette forme, elle sera plus parlante aux élèves familiers du

bricolage informatique et qui, peut-être, contrôlent la ventilation de leur processeur en lien avec sa température et la puissance qui y est dissipée.

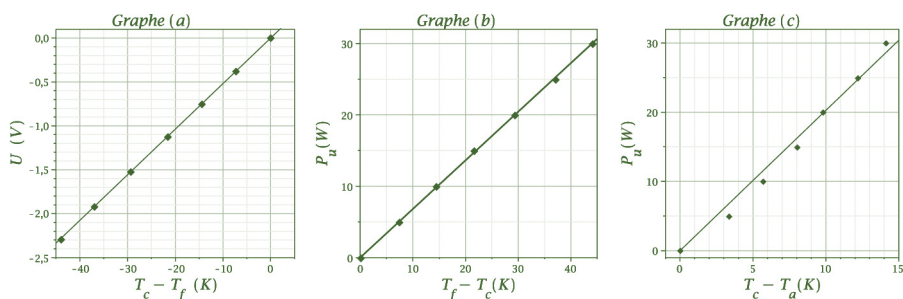


Figure 3 : Résultats des mesures réalisées avec le thermoélément en circuit ouvert.

À partir de  $G$  et  $N\mathcal{E}_m$ , on peut obtenir grâce aux relations de la partie 1.2. la conductivité thermique et le pouvoir thermoélectrique moyens des deux semiconducteurs :

$$\lambda_m = \frac{\lambda_n + \lambda_p}{2} = 2,0 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\mathcal{E}_m = \frac{\mathcal{E}_p + |\mathcal{E}_n|}{2} = 0,20 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1}$$

On retrouve à nouveau des valeurs typiques, [2] fournissant  $\lambda_m = 1,4 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  et  $\mathcal{E}_m = 0,210 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1}$ . La valeur un peu trop élevée obtenue ici pour la conductivité thermique s'explique par le fait qu'on a mesuré la conductance thermique globale de l'espace séparant les deux faces où le transfert de chaleur ne s'effectue pas seulement au travers des barreaux. C'est cependant bien la valeur mesurée pour  $G$  qui caractérise le fonctionnement du thermoélément.

## 4. ÉTUDE EN FONCTIONNEMENT

Dans cette partie, on fixe à 20 W la puissance  $P_u$  dissipée dans la charge thermique. Les températures des faces chaudes et froides s'établissent alors à 306 K et 335 K respectivement. Puis le thermoélément est relié à une alimentation stabilisée et reçoit un courant d'intensité réglable entre 0 et 8 A, valeur maximale préconisée par le constructeur. Il trouve alors son mode de fonctionnement normal, le flux Peltier associé au passage du courant refroidissant le bloc d'aluminium. On relève systématiquement les valeurs de  $T_c$ ,  $T_f$  et  $U$  en fonction de  $I$ .

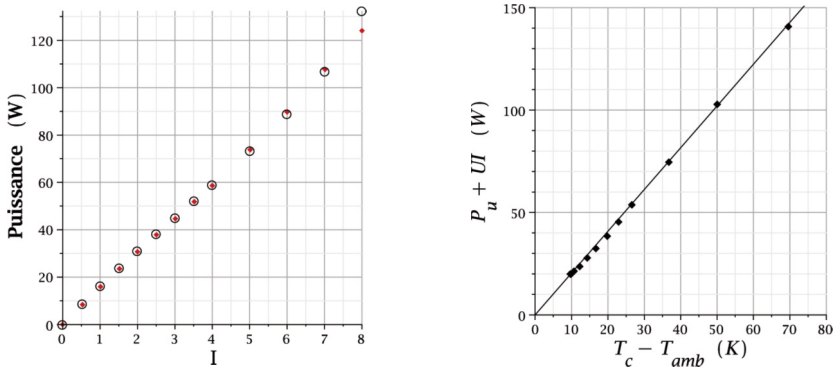
### 4.1. Analyse des flux thermiques

Commençons par quantifier l'effet Peltier qu'on a simplement ressenti au bout des

doigts dans la partie 1.1. La relation (4) peut se mettre sous la forme :

$$P_u + P_c + P_J/2 = P_{\text{Peltier}}$$

l'effet Peltier doit compenser trois flux positifs qui tendent à échauffer la face froide. Sur la figure 4, on a représenté en fonction de  $I$  les séries de valeurs de  $P_u + P_c + P_J/2$  et de  $N\varepsilon_{pn}T_fI = P_{\text{Peltier}}$  déduites des mesures. Les puissances obtenues s'étendent jusqu'à 120 W environ, révélant un effet Peltier assez intense. Le très bon accord entre les deux séries de points montre que l'équilibre thermique de la face froide est atteint. De plus, cet accord a été obtenu en utilisant dans  $P_{\text{Peltier}}$  la valeur de  $N\varepsilon_{pn}$  trouvée dans la partie 3 en circuit ouvert. Cela montre que les effets Seebeck et Peltier sont intimement liés, ce que traduisent ici les relations (1) et (2) et que Kelvin a montré sur la base d'arguments thermodynamiques généraux [9].



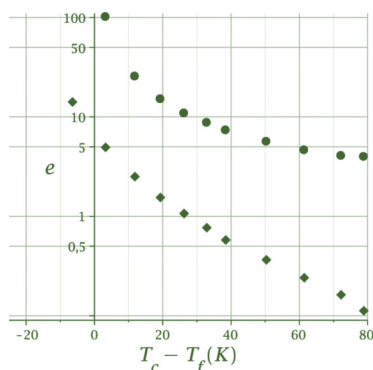
**Figure 4 :** À gauche : série de valeurs obtenues pour  $P_u + G(T_c - T_f) + RI^2/2$  (points rouges) et  $N\varepsilon_{pn}T_fI = P_{\text{Peltier}}$  (cercles noirs). À droite : puissance dissipée par le radiateur.

Examinons maintenant la dissipation à la face chaude connectée au radiateur. Dans ces manipulations, il évacue une puissance  $P_u + UI$  pouvant s'élever jusqu'à presque 150 W, bien au-delà des valeurs envisagées dans la partie 3 pour mesurer  $G_{\text{rad}}$ . On peut donc se demander si le modèle linéaire de la relation (5) s'applique encore. Sur la figure 4, on a représenté les variations de  $P_u + UI$  en fonction de  $T_c - T_{\text{amb}}$ , avec pour comparaison la droite d'équation  $G_{\text{rad}}(T_c - T_{\text{amb}})$  : l'accord demeure très satisfaisant. Pédagogiquement, tracer cette courbe présente un double intérêt :

- d'une part, elle exige des étudiants un bilan correct des puissances évacuées ;
- d'autre part, elle permet de se dispenser de la mesure de  $G_{\text{rad}}$  dans la partie 3 afin de gagner du temps.

Pour conclure cette analyse des flux thermiques, déduisons des mesures l'efficacité  $e = P_u/UI$  du thermoélément réfrigérant et comparons-la à celle obtenue pour un fonc-

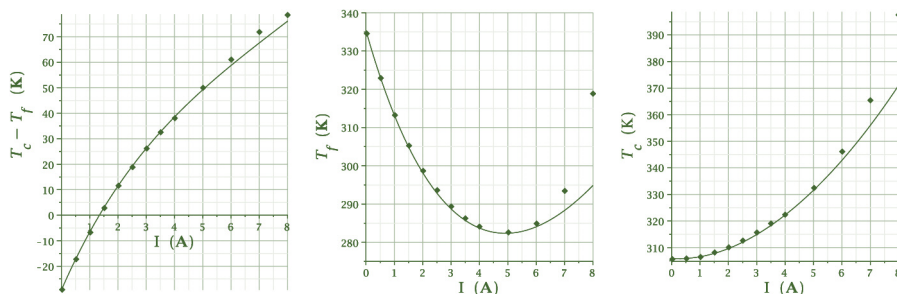
tionnement réversible  $e_c = T_f / (T_c - T_f)$  (celle-ci n'ayant de sens que dans le régime où  $T_c > T_f$ ). Les résultats, représentés sur la figure 5, montrent que l'on atteint au mieux  $1/10^{\circ}$  de l'efficacité de Carnot dans les conditions de l'expérience. Cela explique que la réfrigération thermoélectrique ne soit en pratique employée que pour des applications où le rendement n'est pas l'objectif prioritaire. On peut saisir cette occasion pour faire réfléchir les élèves aux sources d'irréversibilité. Elles résident ici dans la conduction thermique et la conduction électrique dans les barreaux, toutes deux créatrices d'entropie [3]. Dans le cas idéal où  $R = 0$  et  $G = 0$ , les relations (3) et (4) conduisent d'ailleurs à  $e = e_c$ .



**Figure 5 :** Efficacité du système réfrigérant en fonction de l'écart de température. Les carrés représentent les valeurs mesurées, les cercles celles calculées pour un fonctionnement réversible.

## 4.2. Analyse des températures

Les valeurs de  $T_c - T_f$ , de  $T_f$  et de  $T_c$  mesurées sont représentées sur la figure 6. Pour comparaison, leurs valeurs prévues par les relations (6) et (7) issues du modèle, avec les paramètres mesurés dans la partie 3, ont été tracées en traits pleins. Ces résultats appellent plusieurs commentaires.

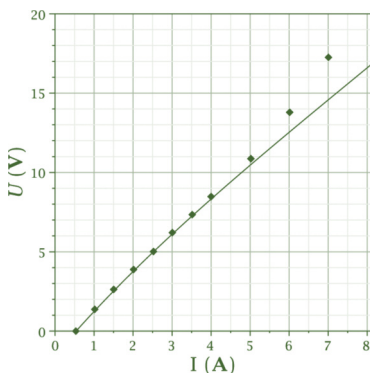


**Figure 6 :** Graphes des températures en fonction de l'intensité dans le thermoélément.

Tout d'abord, examinons la différence de température  $T_c - T_f$  que le thermoélément peut maintenir entre ses deux faces. Elle est, dans l'intervalle d'étude, d'autant plus grande que l'intensité est plus forte. C'est à partir d'une valeur de l'ordre de 1,3 A que l'effet Peltier devient suffisant pour imposer  $T_f < T_c$  malgré les 20 W dissipés au sein du bloc d'aluminium. L'intensité augmentant, la concavité de la courbe montre que l'effet supplémentaire associé à une augmentation de l'intensité devient de plus en plus faible. C'est une conséquence de l'effet Joule au sein du thermoélément, le terme  $RI^2/2$  dans la relation (4) entrant progressivement en compétition avec l'effet Peltier.

Bien que cette analyse de la différence  $T_c - T_f$  soit instructive et retienne généralement l'attention, la température de la source froide présente bien plus d'importance en pratique. Les résultats représentés sur la figure 6 montrent qu'on parvient à abaisser  $T_f$  jusqu'à 282 K pour une intensité de 5 A. Au-delà de cette valeur,  $T_f$  repart à la hausse bien que son écart à  $T_c$  continue à croître. C'est que parallèlement,  $T_c$  augmente vivement, la face chaude recevant le flux  $P_u + UI$  à dissiper vers l'air ambiant. Un radiateur idéal, de conductance thermique infinie, permettrait de maintenir  $T_c = T_{amb}$ . Dans ce cas, les variations de  $T_c - T_f$  refléteraient celles de  $T_f$  et l'étude de cette différence serait satisfaisante. On voit ici que ce n'est pas la cas, le radiateur jouant un rôle décisif dans l'établissement des diverses températures. Pour s'en convaincre expérimentalement, on peut porter la tension d'alimentation du ventilateur au-delà de la valeur normale de 12 V afin d'augmenter le flux d'air dans les ailettes. Sous 18 V par exemple,  $G_{rad}$  prend la valeur  $2,3 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$  et on parvient à abaisser  $T_f$  jusqu'à 279 K.

En ce qui concerne la fidélité des mesures au modèle théorique, elle s'avère satisfaisante jusqu'aux environs de 6 A. Pour des valeurs supérieures, la croissance des températures devient plus rapide que prévu. Cette déviation se retrouve d'ailleurs si l'on représente les variations de  $U$  pour les comparer aux valeurs attendues (cf. figure 7). Il faut y voir une conséquence de l'approximation selon laquelle les grandeurs  $\lambda$ ,  $\rho$  et  $\varepsilon$  ne dépendent pas de la température. La résis-



**Figure 7 :** Tension aux bornes du thermoélément alimenté. Les valeurs mesurées sont représentées par les points, celles prédites par le modèle par le trait continu.

tance et le pouvoir thermoélectrique du thermoélément ont été mesurés à température ambiante alors qu'on atteint presque 400 K près de la face chaude. Avec les valeurs de  $U$ ,  $T_c$  et  $T_f$  mesurées sous  $I = 8$  A, les relations (3) et (4) seraient satisfaites pour  $NE_{pn} = 57 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1}$  et  $R = 2,2 \Omega$ . Ces valeurs ne sont pas très éloignées de celles trouvées dans la partie 3, mais l'augmentation de  $R$ , associée à un effet Joule quadratique en  $I$ , entraîne une modification visible des températures pour les fortes intensités. Les élévations de  $R$  et  $NE$ , voisines de 35 % et 10 % respectivement depuis leurs valeurs à température ambiante, sont de l'ordre de grandeur auquel on pouvait s'attendre ([2] cf. figure 5.13).

## CONCLUSION

Les manipulations proposées ici permettent à des étudiants de découvrir les effets thermoélectriques au travers d'une application surprenante, concrète et contemporaine. Cela constitue un sérieux gage de motivation. La progression de sensations tactiles vers l'évaluation de flux thermiques et leur suivi jusqu'à l'évacuation vers l'air ambiant, relativement rare en travaux pratiques, amène à approfondir le concept de bilan et à mieux saisir celui de résistance thermique. Le modèle adopté s'avère suffisamment simple pour ne pas masquer les phénomènes étudiés et suffisamment élaboré pour donner une interprétation convaincante des mesures, tant du point de vue de leur cohérence mutuelle que de celui de leur confrontation aux valeurs publiées. À l'issue de ce travail, chaque élève devrait être en mesure de saisir l'influence de  $G_{rad}$ ,  $R$ ,  $NE_{pn}$  et  $G$  sur l'efficacité de la réfrigération thermoélectrique, et donc l'importance des recherches visant à améliorer le facteur de mérite  $z = \frac{\varepsilon}{\rho\lambda}$  des nouveaux matériaux.

## REMERCIEMENTS

L'auteur remercie l'équipe technique du laboratoire de physique du lycée Henri Poincaré pour son aide dans la conception et la réalisation du dispositif expérimental.

## BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

- [1] Site de la société internationale de thermoélectricité :  
<http://www.its.org>
- [2] NOLAS G.S., SHARP J. and GOLDSMID H.J. *Thermoelectrics, basic principles and new material developments*. New York : Springer, 2001
- [3] GIÉ H. « Chaleur et flux entropique ». *Bull. Un. Phys.*, juin 1974, vol. 68, n° 566, p. 1045-1064.

- [4] DOMINICI J.-M. et QUARANTA L. *Dictionnaire de physique expérimentale - Tome III : Thermodynamique et applications*. Sarreguemines : Pierron, 2004, chap. 19.
- [5] CUNIN B. et DEISS J.-L. « Le refroidissement thermoélectrique ». *Bull. Un. Phys.*, décembre 1976, vol. 71, n° 589 (1), p. 295-313.
- [6] BARRAT J.-P. « Effet Volta, effet Peltier ». *Bull. Un. Phys.*, juin 1988, vol. 82, n° 705, p. 779-785.
- [7] PÉREZ J.-Ph. et ROMULUS A.-M. *Thermodynamique, fondements et applications*. Paris : Masson, 1993.
- [8] Sujet de l'épreuve de physique-chimie du concours Centrale-Supélec 2005, filière MP.
- [9] BRUHAT G. *Cours de physique générale - Thermodynamique*. 5<sup>e</sup> édition, Paris, 1962, § 127.



**André DOMPS**

*Professeur*

Lycée Henri Poincaré

Nancy (Meurthe-et-Moselle)

## *Annexe*

### *Expressions détaillées de $T_c$ et $T_f$ obtenues en résolvant les relations (3), (4) et (5)*

$$T_c = \frac{G(P_u + G_{rad}T_{amb} + RI^2) + (G_{rad}T_{amb} + RI^2/2)}{GG_{rad} + G_{rad}N\epsilon_{pn}I - N^2\epsilon_{pn}^2I^2} \quad (6)$$

$$T_f = \frac{G(P_u + G_{rad}T_{amb} + RI^2) - (N\epsilon_{pn}I - G_{rad})(P_u + RI^2/2)}{GG_{rad} + G_{rad}N\epsilon_{pn}I - N^2\epsilon_{pn}^2I^2} \quad (7)$$