



INSTITUT  
NATIONAL  
des SCIENCES  
APPLIQUÉES



Projet de Physique P6-3  
STPI/P6-3/2008 – # 32



Pierre CHAPOUL

Paul GALLAIS

Christophe DOM

Kévin GUERINEAU

Jean-Baptiste MOUSSARD



**CONVERSION DE LA CHALEUR  
EN ELECTRICITE :**

**Etude du module  
thermoélectrique à  
effet Peltier**



À TAILLE  
HUMAINE  
À L'ECHELLE  
DU MONDE

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

Date de remise du rapport : 20/06/08

Référence du projet : *STPI/P6-3/2008 – Conversion de la chaleur en électricité*

Intitulé du projet : *Etude du module thermoélectrique*

Type de projet :

Le projet comporte une partie expérimentale ainsi qu'une partie documentaire qui nous a permis d'étudier l'appareil.

Objectifs du projet :

Nous avons eu comme projet l'étude du module thermoélectrique à effet Peltier  
Etude de l'effet Peltier (mise en évidence) et ses applications.

Dans notre étude nous nous sommes donc focalisés sur l'aspect quantitatif. Nous avons fait fonctionner le module Peltier en pompe à chaleur. A partir de cela nous avons calculé le rendement (rendement de Carnot, rendement ajusté). Ensuite, une fois le phénomène thermoélectrique assimilé, nous avons cherché à savoir en quoi il était utile dans des applications concrètes de la vie quotidienne et comment il a pu évoluer au fil des recherches. Ceci effectué, nous avons pu recouper nos expérimentations avec ces dernières données.

Trombinoscope :

*Pierre Chapoul*



*Chritophe Dom*



*Paul Gallais*



*Kevin Guerineau*



*Jean-Baptiste Moussard*



## Sommaire

Introduction .....	3
1. Travaux expérimentaux : étude des effets Peltier et Seebeck .....	4
1.1. Expérience 1 : .....	4
1.2. Expérience 2 : .....	6
1.3. <i>Expérience 3</i> : .....	9
2. Effet Peltier .....	12
2.1. Explications de l'effet Peltier .....	12
2.1.1. Expérience .....	12
2.1.2. Effet Peltier .....	12
2.2. La force électromotrice de Peltier .....	13
2.2.1. Définition .....	13
2.2.2. Mesure de E .....	13
2.2.3. Propriétés de la force électromotrice de Peltier .....	13
2.2.4. Schémas équivalents .....	13
2.3. Rôle de la température .....	14
2.3.1. Expérience N° 1 .....	14
2.3.2. Expérience N° 2 .....	14
2.4. Couple thermoélectrique .....	15
3. Autres effets .....	16
3.1. Effet Seebeck .....	16
3.2. Effet Thomson .....	17
3.3. Relation entre les coefficients Seebeck, Thomson et Peltier .....	17
4. Module thermoélectrique à effet Peltier .....	18
4.1. TEA : Thermo Efficiency Apparatus .....	18
4.2. Cellule à effet Peltier .....	19
4.2.1. Présentation .....	19
4.2.2. Pompe à chaleur .....	20
4.2.3. Générateur .....	20
4.3. Performance théorique .....	21
4.3.1. Quelques formules .....	21
4.3.2. Coefficient de performance froid .....	21
4.3.3. Ecart maximum de température .....	22
4.4. Performance réelle .....	22
4.4.1. Echangeurs de chaleur .....	22

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

4.4.2. Alimentation électrique.....	22
4.5. Les applications des modules à effet Peltier : .....	23
4.6. Les différents modèles de modules à effet Peltier .....	24
4.7. Avantages et limites du refroidissement .....	24
Conclusion .....	26
Bibliographie .....	27

## Introduction

Lors de notre quatrième semestre à l'institut national des sciences appliquées, une UV de découverte physique nous est proposée. Cette dernière a pour but de nous faire visualiser puis étudier des phénomènes physiques que nous connaissons mal alors même qu'ils nous entourent. Le travail demandé peut être de nature théorique, expérimentale, simulation numérique, documentation selon le thème qui est attribué. Malgré son côté un peu plus ludique, cette UV est sanctionnée d'une note puis d'une validation qui sera le reflet de notre aptitude à travailler en groupe de projet, à nous organiser mais surtout à être efficace ensemble !

Pour notre part, malgré une demande préliminaire pour le sujet « bateau moteur hydrogène », nous nous en sommes vu attribué un autre, à savoir « conversion de la chaleur en électricité », que nous partageons avec un second groupe.

Monsieur Guillotin, notre professeur encadrant, nous demanda de nous focaliser sur le module à effet Peltier (conversion de l'électricité en chaleur), ses applications (dans notre environnement de vie) et bien entendu sur le phénomène physique pur duquel il est issu.

Pour mener à bien notre projet, durant trois heures et toutes les deux semaines nous nous sommes réunis afin de mettre en place des expériences visant à comprendre le fonctionnement du module et donc l'effet Peltier en lui-même. De plus, un important travail de documentation a été réalisé en dehors car pour interpréter l'expérimental il faut une base théorique assez solide. A la fin de ces séances de travaux, l'objectif immédiat était de rédiger un dossier contenant les résultats et l'interprétation de nos diverses expériences ainsi qu'une synthèse sur l'effet Peltier.

Outre le dossier papier, une soutenance orale est prévue afin d'évaluer si le sujet est « bien maîtrisé » et d'apporter des précisions sur le côté humain de l'UV (travail de groupe, les difficultés rencontrées, l'organisation, ...).

Pour la présentation de notre dossier, nous avons choisi des axes précis nous paraissant essentiels. Tout d'abord, nous avons cherché à mettre en évidence de manière expérimentale les effets Peltier et Seebeck. Dans un second temps, nous nous sommes penchés sur la partie plus théorique de l'effet Peltier. Nous avons ensuite étudié les effets Seebeck et Thompson ainsi que la relation entre les trois effets. Pour finir, nous avons effectué des recherches sur les modules à effet Peltier.

## 1. TRAVAUX EXPERIMENTAUX : ETUDE DES EFFETS PELTIER ET SEEBECK

Utilisation du TEA (thermo efficiency apparatus)

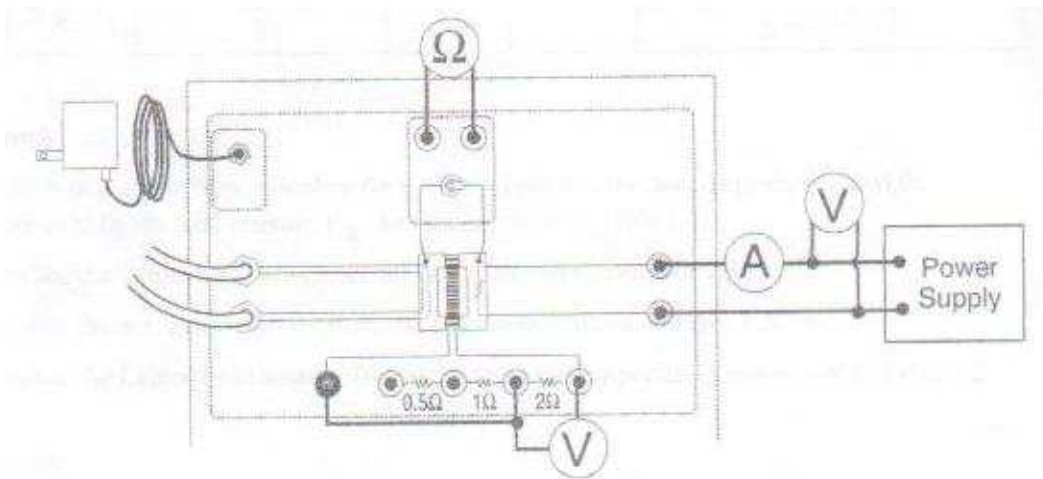
### 1.1. Expérience 1 :

But :

- Mettre en évidence l'effet Seebeck
- Déterminer le rendement du TEA

Mode opératoire :

Schéma de la 1<sup>ère</sup> expérience :



- 1) On alimente le circuit en eau froid
- 2) On alimente la résistance chauffante
- 3) On ferme le circuit de sortie sur la résistance de 2 volts
- 4) On place différents appareils de mesure (comme le montre le schéma)

Manipulations :

- On laisse évoluer le système jusqu'à ce qu'il atteigne un équilibre : en effet, on va attendre la stabilisation des températures des réservoirs chaud et froid. Puis on mesure ces 2 températures grâce à l'ohmmètre et grâce à la table de conversion. Plus la résistance (en kOhms) est grande, plus la température (en °C) est faible.
- Ensuite, on effectue différentes mesures :
  - $U_h$  et  $I_h$  : Tension et intensité d'alimentation du réservoir chaud.
  - $V_w$  : Tension du circuit de sortie.
  - $R_h$  et  $R_c$  : Résistances des réservoirs chaud et froid.
  - $T_h$  et  $T_c$  : Températures des réservoirs chaud et froid correspondantes.

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

- On renouvelle l'expérience plusieurs fois : on commence à une tension d'alimentation puis par intervalle de 1 volt on va jusqu'à 12 volts.

Résultats :

U	R <sub>c</sub> (KΩ)	T <sub>c</sub> (°C)	R <sub>h</sub> (KΩ)	T <sub>h</sub> (°C)	V <sub>h</sub> (V)	I <sub>h</sub> (A)	V <sub>w</sub> (V)	P <sub>h</sub> (W)	P <sub>w</sub> (W)	P <sub>w</sub> /P <sub>h</sub>	e <sub>carnot</sub>
1	113,1	22,5	110,6	22,5	1,08	0,21	0,013	0,2268	0,0000845	0,000372575	0
2	109,2	23	99,6	25,5	2,15	0,41	0,0477	0,8815	0,001137645	0,001290579	0,0083612
3	103,6	24	88,4	27,5	3,1	0,6	0,0827	1,86	0,003419645	0,001838519	0,01162791
4	94,6	26	72,2	31	4,11	0,79	0,1541	3,2469	0,011873405	0,003656843	0,01642036
5	77,9	30,5	53,4	39	4,96	1	0,224	4,96	0,025088	0,005058065	0,0272
6	69,7	33	43,1	44	5,88	1,19	0,307	6,9972	0,0471245	0,006734765	0,03464567
7	62,4	35,5	34,4	49	6,85	1,4	0,399	9,59	0,0796005	0,008300365	0,04186047
8	57,2	37,5	29	53	7,93	1,6	0,51	12,688	0,13005	0,010249842	0,0474732
9	53,5	39	24	58	8,9	1,78	0,668	15,842	0,223112	0,014083575	0,05731523
10	51,5	40	18,5	65	9,79	2	0,796	19,58	0,316808	0,016180184	0,07385524
11	54,9	38,5	12,5	76	10,9	2,16	0,945	23,544	0,4465125	0,018965023	0,10729614
12	55,6	38	7,8	90	11,92	2,38	1,161	28,3696	0,6739605	0,023756433	0,14305365

Calcul et exploitation des résultats :

Grâce aux valeurs précédemment mesurées, nous avons effectué plusieurs calculs :

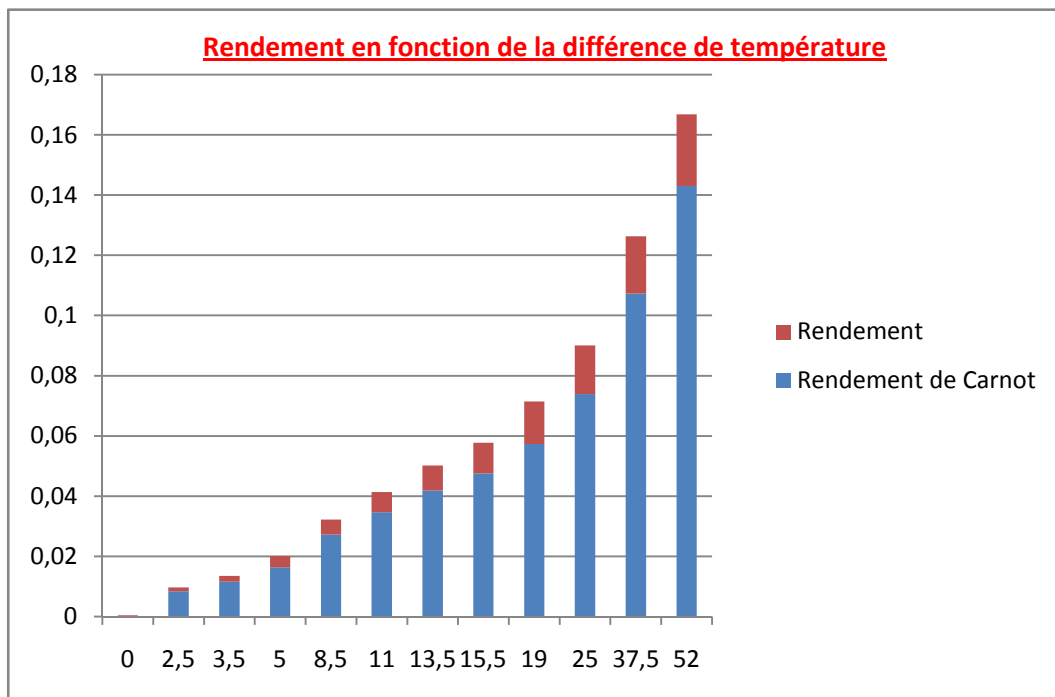
- La puissance fournie par le réservoir chaud :  $P_h = I_h \times V_h$   
 $P_h$  en Watts  
 $I_h$  en Ampère  
 $V_h$  en Volts
- La puissance fournie par le circuit de sortie :  $P_w = V_w \times I_w = V_w^2 / R$   
 $P_w$  en Watts  
 $V_w$  en Volts  
 $R = 2$  Ohms
- Le rendement :  $e = P_w / P_h$
- Le rendement équivalent de Carnot :  $e' = (T_h - T_c) / T_c$



*Conclusion :*

L'effet Seebeck a bien été mis en évidence. En produisant une différence de température, nous avons permis une production de courant dans le circuit de sortie. Ainsi, nous avons pu mesurer une puissance positive utilisée par le circuit de sortie. La différence de température à l'origine de l'effet Peltier peut avoir plusieurs origines.

On a un histogramme représentant le rendement de Carnot et le rendement en fonction de la différence de température. Plus la différence de température est grande, plus le rendement est élevée.



On peut observer que le rendement obtenu est toujours très inférieur au rendement de Carnot. Ceci est tout à fait normal parce que le rendement de Carnot correspond au rendement maximum que l'on peut obtenir, pour une différence de température donnée. De plus lorsque la différence de température augmente, le rendement augmente. Le fait que le rendement soit inférieur au rendement de Carnot s'explique par le fait que le module thermoélectrique n'est pas parfait. Cependant, l'utilisation de tel module reste courante parce qu'ils sont très fiables. Dans de nombreux appareils, on peut trouver de tels appareils.

## 1.2. Expérience 2 :

*But :*

- Calculer les différentes pertes d'énergie
- Compenser le rendement grâce au calcul des différentes pertes d'énergie
- Comparer le rendement ajusté et le rendement de Carnot

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

### Mode opératoire et manipulation :

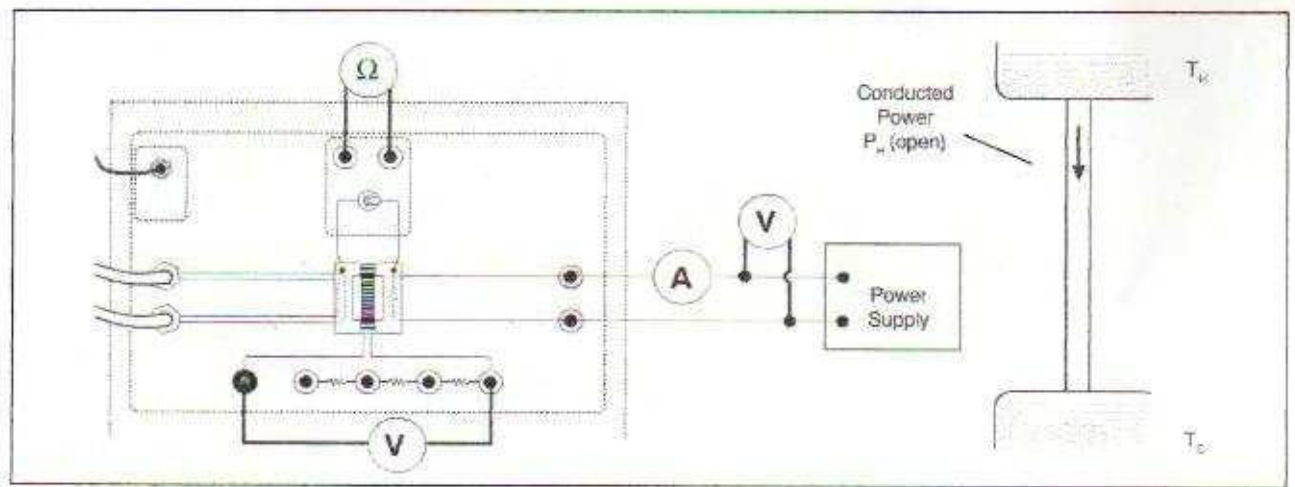
L'expérience se déroule en deux parties.

#### ➤ Utilisation comme appareil à chaleur

On réalise le même dispositif qu'à l'expérience 1. On va donc faire les mêmes mesures.

#### ➤ Utilisation en circuit ouvert

### Schéma (fonctionnement en effet Seebeck)



On déconnecte la résistance de  $2\Omega$ . Ainsi on n'utilise pas le circuit de sortie. Tout le courant délivré est soit conduit au thermostat froid, soit dissipé.

Grâce à un voltmètre, on peut alors mesurer la tension obtenue par effet Seebeck.

Il va nous falloir atteindre la même température que l'on a précédemment mesurée. Pour cela, il faut régler la tension du générateur.

La différence de température est la même que lorsque le module produit du travail, la même quantité de chaleur est maintenant conduite à travers l'appareil qu'il y ait une résistance ou pas.

### Résultats :

Mode	$R_h$ (k $\Omega$ )	$R_c$ (k $\Omega$ )	$T_h$ (°C)	$T_c$ (°C)	$V_h$	$I_h$	$V_w$	$V_s$
Engine	14,17	133,13	72	19	10,35	1,942	0,817	
OPEN	14,17	130,56	72	19,5	9,14	1,726		1,423

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

Calculs :

Grâce aux valeurs mesurées, on effectue différents calculs.

- La puissance fournie par le réservoir chaud :

$$P_h = I_h \times V_h$$

- La puissance utilisée par le circuit de sortie (c'est-à-dire la résistance de 2 volts) :

$$P_w = V_w^2 / R$$

- L'intensité utilisée par le circuit de sortie :  $I_w = V_w / R$

- La résistance interne :  $r = (V_s - V_w / V_w) \times R = \mathbf{1,48 \Omega}$

On obtient donc :

	$R_h$ (k $\Omega$ )	$R_c$ (k $\Omega$ )	$T_h$ (°C)	$T_c$ (°C)	$P_h$ (W)	$P_w$ (W)	$I_w$ (A)
Engine (2 $\Omega$ )	14,17	133,13	72	19	20,1	0,334	0,409
OPEN	14,17	130,56	72	19,5	15,77		

Exploitation des résultats :

Les calculs suivants ont pour but de calculer les pertes d'énergie.

Le rendement est obtenu à l'aide des puissances :

1<sup>er</sup> calcul :

$$e = P_w / P_h = 0,334 / 20,1 = \mathbf{0,017}$$

2<sup>ème</sup> calcul :

On va tenir compte de la puissance dissipée par la résistance interne.

$$\text{Ainsi : } P_w' = P_w + (I_w)^2 \times r = \mathbf{0,58 W}$$

3<sup>ème</sup> calcul :

La chaleur doit être réajustée.

Une partie de la chaleur est utilisée pour produire du travail mais traverse aussi l'appareil par conduction et radiation, ce transfert a lieu que la résistance soit connectée ou pas. Donc cette chaleur peut être considérée comme non-disponible pour produire du travail et doit donc être inclus dans la chaleur d'entrée. D'où :  $P_h' = P_h - P_{h(\text{open})} = \mathbf{4,33 W}$

Résultats			
$e = P_w / P_c$	$e' = P_w' / P_h'$	$e_{\text{Carnot}} = (T_h - T_c) / T_h$	% Différence
<b>0,017</b>	<b>0,133</b>	<b>0,153</b>	<b>15,3 %</b>

*Conclusion :*

Grâce à l'expérience en circuit ouvert, nous avons pu mettre en évidence l'effet Seebeck.

En fonctionnement moteur, le module reçoit une certaine quantité de la chaleur de la part de la source chaude, par l'intermédiaire de la résistance chauffante d'entrée alimentée par une alimentation électrique continue. Cette puissance thermique fournie est transformée en travail par le module thermoélectrique sous forme d'un courant de sortie  $I_w$ . La mesure de ce travail est effectuée en mesurant la puissance dissipée par effet Joule dans la résistance  $R_w$ . L'autre partie de la chaleur est évacuée par la circulation d'eau.

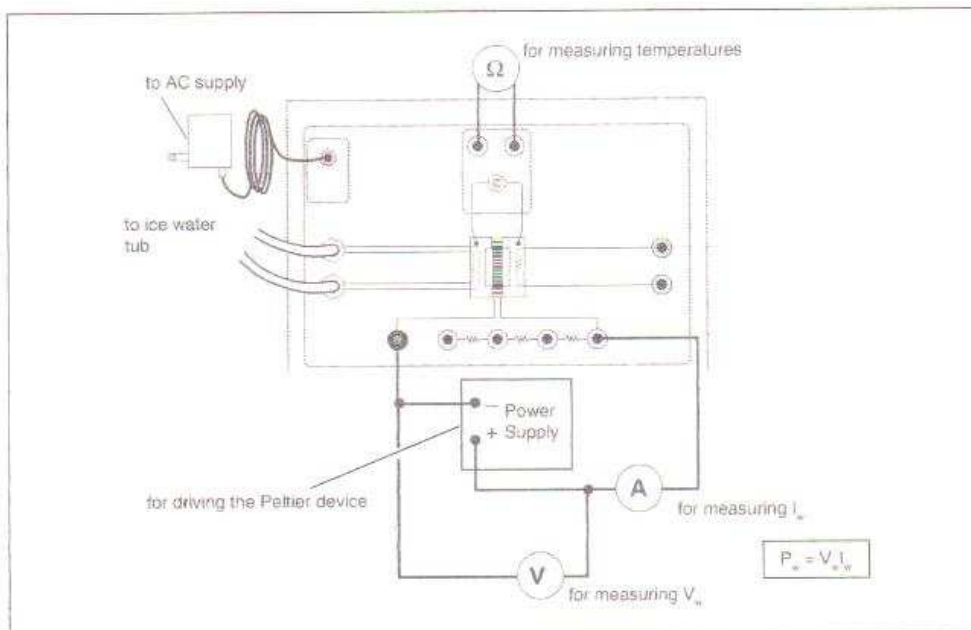
Les pertes d'énergie ont plusieurs origines : la **conduction** de chaleur directement de la source chaude vers la source froide à travers le module, le **rayonnement** et la **convection** due à une mauvaise isolation du système, **l'effet Joule** due à la résistance interne  $R$  du module. Ces pertes sont principalement dues à la dissipation de la chaleur et à la résistance interne. En effet, on constate que le rendement est assez proche du rendement de Carnot. Le rendement de Carnot est très proche du rendement ajusté. Cependant, les résultats auraient pu nettement être améliorés.

**1.3. Expérience 3 :**

*But :*

- Mettre en évidence l'effet Peltier
- Calculer les Coefficients de Performance

*Mode opératoire :*



➤ On alimente le circuit du

réservoir froid en eau froide.

- On déconnecte l'alimentation du circuit du réservoir chaud.
- On alimente le circuit de sortie (courant continu)
- Enfin, différents appareils de mesure sont placés dans le circuit comme le montre le schéma ci-dessus.

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

### Manipulation :

On laisse le système évoluer jusqu'à ce qu'il atteigne la même température qu'à l'expérience précédente.

Ensuite divers relevés sont réalisés :

- $V_w$  : la tension appliquée au circuit de sortie,
- $I_w$  : l'intensité du circuit de sortie,
- $R_c$  et  $R_h$  : les résistances des réservoirs froid et chaud,
- $T_c$  et  $T_h$  : les températures des réservoirs froid et chaud.

### Résultats :

$R_h$ (k $\Omega$ )	$R_c$ (k $\Omega$ )	$T_h$ (°C)	$T_c$ (°C)	$I_w$ (A)	$V_w$ (V)
14,19	150,67	72,5	16	1,55	3,957

On peut, à partir de ces résultats, calculer la puissance fournie par le circuit :

- $P_w = I_w \times V_w = \mathbf{6,13\ W}$

### Exploitation des résultats :

- Calcul du coefficient de performance réel :

$$\text{On a donc: } \chi = P_c/P_w = (P_{h(\text{open})} - P_w)/P_w = \mathbf{1,57}$$

- Calcul du coefficient de performance ajusté :

On va tenir compte de la résistance interne.

$$\text{On a donc } \chi_{\text{ajusté}} = (P_{h(\text{open})} - P_w)/(P_w - I_w^2 \times r) = \mathbf{3,74}$$

- Calcul du coefficient de performance maximum :

$$\chi_{\text{max}} = T_c/(T_h - T_c) = \mathbf{5,11}$$

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

*Bilan de l'expérience 3 :*

$R_h$ (k $\Omega$ )	$R_c$ (k $\Omega$ )	$T_h$ ( $^{\circ}$ C)	$T_c$ ( $^{\circ}$ C)	$I_w$ (A)	$V_w$ (V)	$P_w$ (W)	COP actual	COP max	COP ajusté	% différence
14,19	150,67	72,5	17,5	1,55	3,957	6,13	1,57	5,11	3,74	26,81017613

*Conclusion :*

En injectant un courant  $I_w$  directement dans le module thermoélectrique sans passer par la résistance de sortie  $R_w$ , celui-ci fonctionne alors en effet Peltier. Le courant qui circule dans les jonctions va créer une différence de températures : il y a **production de chaleur**.

Grâce aux différentes mesures, on a pu étudier le coefficient de performance du TEA. On a ainsi pu constater que l'appareil n'atteint pas le coefficient de performance maximum.

La puissance réelle effectivement utilisée par le module doit tenir compte de la perte par effet Joule dans la résistance interne. De même, de la chaleur est dissipée par la résistance interne et donc ne provient pas de la source froide (c'est pour cela que l'on cherche un coefficient de performance ajusté).

### **CONCLUSION GENERALE**

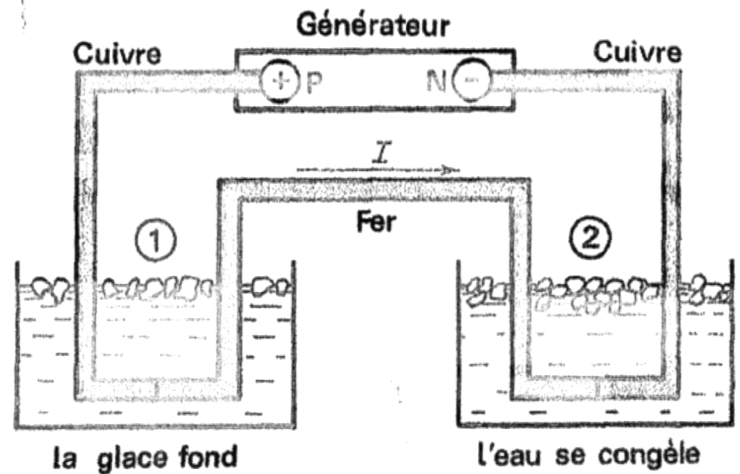
Les effets Peltier et Seebeck ont pu être mis en évidence grâce aux expériences réalisées. Une étude quantitative et qualitative nous a permis de déterminer les coefficients de performances, les rendements et les pertes d'énergie. Nous n'avons rencontré aucun problème lors de la réalisation de ces expériences. Nous avons pu mieux appréhender les différents effets (Seebeck, Peltier) ainsi que les modes de fonctionnement du module Thermoélectrique.

## 2. EFFET PELTIER

### 2.1. Explications de l'effet Peltier

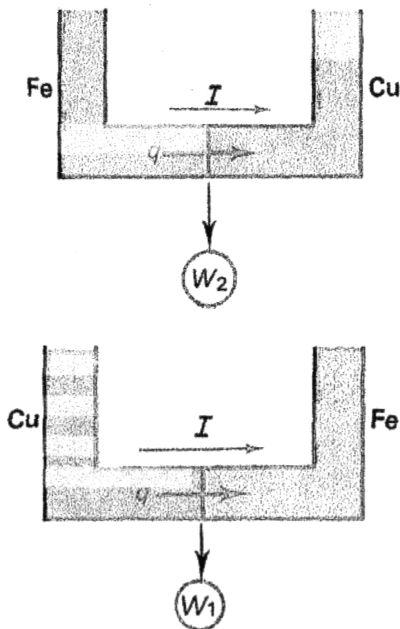
#### 2.1.1. Expérience

Pour mettre en évidence l'effet Peltier, on réalise l'expérience liée au montage ci-dessus. Une barre de fer de grosse section est reliée à deux barres de cuivre qui elles mêmes sont reliées aux deux bornes d'un générateur. On essaye d'obtenir des contacts de bonne qualité pour avoir de faibles résistances. Les jonctions fer-cuivre sont chacune plongées dans un récipient contenant un mélange d'eau et de glace donc ayant sa température égale à 0°C. Nous faisons passer un courant du plus au moins et nous constatons que dans le récipient 1 la glace fond alors que dans le 2 l'eau se congèle. La connaissance de l'effet joule nous aurait amené à penser que la glace fondrait dans les deux récipients du fait de la chaleur dégagée.



Puisqu'il n'en est pas ainsi, il est clair qu'à l'effet joule se superpose un autre effet : l'effet Peltier.

#### 2.1.2. Effet Peltier



**Récipient 1.** On quantifie par  $q$  coulombs, l'électricité traversant la jonction du fer vers le cuivre. L'eau et la glace cèdent de la chaleur. Celle-ci reçue par les  $q$  coulombs est transformée en énergie électrique. Par conséquent la jonction fer  $\rightarrow$  cuivre fonctionne comme un générateur électrique.

**Récipient 2.** Dans ce récipient les  $q$  coulombs passent du cuivre au fer. Le phénomène est alors inversé. De l'énergie électrique transportée par la charge  $q$  est transformée en chaleur et cédée à l'eau et la glace. Cet effet s'additionne à l'effet Joule.

En conclusion de cette expérience nous pouvons donc dire que l'effet Peltier est la transformation réversible :

Chaleur  $\longleftrightarrow$  Energie électrique

L'effet Peltier a lieu lorsqu'un courant transverse la jonction de deux métaux différents. Il existe un coefficient propre à la combinaison de deux conducteurs  $a$  et  $b$  appelé coefficient de Peltier (noté  $\pi_{ab}$ ). Le coefficient de Peltier est positif lorsque le flux électrique du conducteur 1 au conducteur 2 produit de la chaleur au point de contact. La quantité de chaleur  $Q_p$  absorbée ou produite par unité de temps est proportionnelle à la force du courant électrique  $I$ .

$$I \cdot \pi_{ab} = Q_p$$

## 2.2. La force électromotrice de Peltier

### 2.2.1. Définition

$W$  : Energie thermique transformée en énergie électrique quand une jonction est traversée par  $q$  coulombs.

La force électromotrice du générateur constitué par cette jonction est  $\mathcal{E} = \frac{W}{q}$

Si  $t$  est la durée de passage du courant on peut écrire  $W = \mathcal{E} \cdot q = \mathcal{E} \cdot I \cdot t$

### 2.2.2. Mesure de $\mathcal{E}$

La mesure de  $\mathcal{E}$  nécessite la connaissance des échanges d'énergie dans les deux récipients. Il faut ainsi prendre en compte l'effet Peltier mais également l'effet Joule. L'effet Joule est égal à l'énergie liée à la transformation de l'électricité en chaleur dans les résistances des jonctions.

Considérons les énergies cédées par le système électrique aux deux récipients.

Récipient 1 :  $Q_1 = r_1 I^2 t$

Récipient 2 :  $Q_2 = r_2 I^2 t$

Pour obtenir le fém. on fait la différence entre les deux expressions :  $Q_1 - Q_2 = 2 \mathcal{E} I t$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = \frac{Q_1 - Q_2}{2 I t}$$

Remarque : Etant donné que la fusion d'un gramme de glace nécessite 335 J, on parvient à mesurer les énergies  $Q_1$  et  $Q_2$  en mesurant la masse de glace apparue en 2 et disparue en 1.

### 2.2.3. Propriétés de la force électromotrice de Peltier

Les forces électromotrices de Peltier sont très faibles (de l'ordre de quelques mV). Ainsi, la mise en évidence du phénomène d'effet Peltier est difficile. Pour obtenir une congélation dans le récipient 2  $\mathcal{E}$  doit être négative. On doit donc avoir  $t < 0$  soit enfin  $\mathcal{E} < 0$ . On comprend alors pourquoi la résistance de la jonction doit être faible.

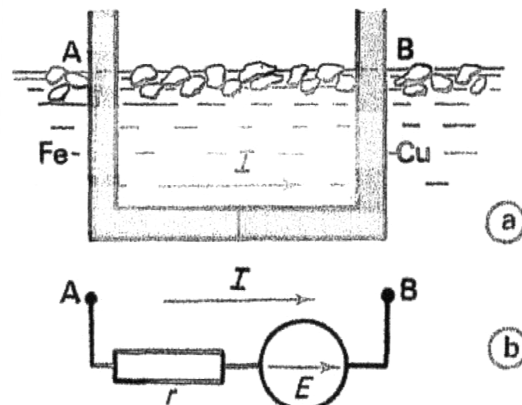
Propriétés de la force électromotrice de Peltier :

- Dépend de la nature des métaux en contact (fer-cuivre : 3 mV, zinc-cuivre : 3mV, cuivre-bismuth : 21mV)
- Ne dépend pas de la forme et de l'étendue de la jonction.
- Varie avec la température de la jonction :  $\mathcal{E}$  est fonction de  $\theta$

### 2.2.4. Schémas équivalents

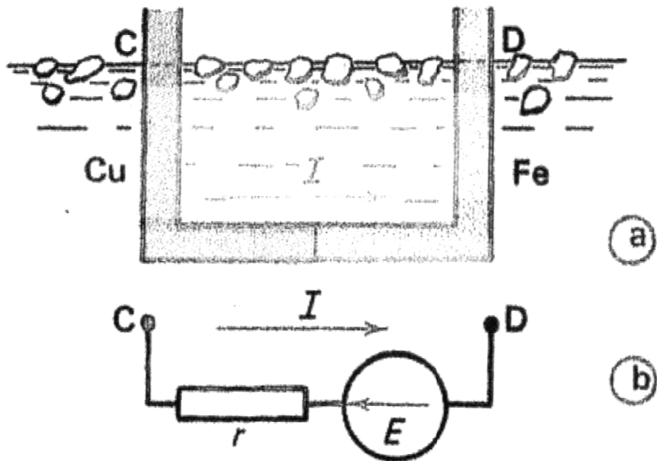
#### Récipient 2

est orienté du fer vers le cuivre. La source fonctionne en générateur. Ce schéma correspond bien au fait qu'il y a conversion de la chaleur en énergie électrique.





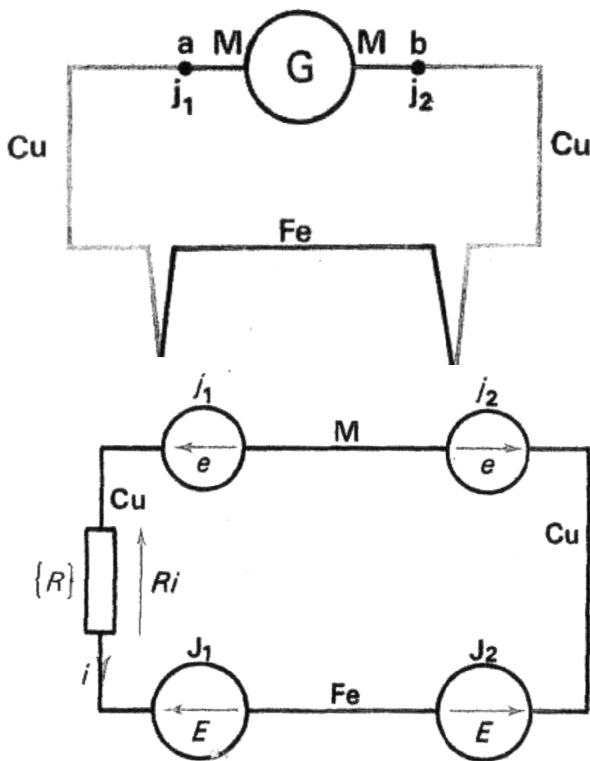
Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier



est orienté du fer vers le cuivre. La source de tension est alors en opposition avec le courant et fonctionne en récepteur. Ce schéma correspond bien au fait qu'il y a conversion de l'énergie électrique en chaleur.

2.3. Rôle de la température

2.3.1. Expérience N° 1



G est un galvanomètre. Son enroulement est constitué d'un métal M qui peut être différent du cuivre. Les deux jonctions et que nous considérons comme les bornes du galvanomètre, sont donc des jonctions M-cuivre. On est à la température ambiante et le galvanomètre ne dévie pas. Il n'y a donc pas de courant dans le circuit

En observant le schéma équivalent et en appliquant la loi des mailles on a :

$$-e + e - Ri = 0 \implies = 0$$

2.3.2. Expérience N° 2

On met maintenant à la température supérieure à . Ainsi, le galvanomètre dévie. On en conclue qu'un courant circule dans le sens positif.

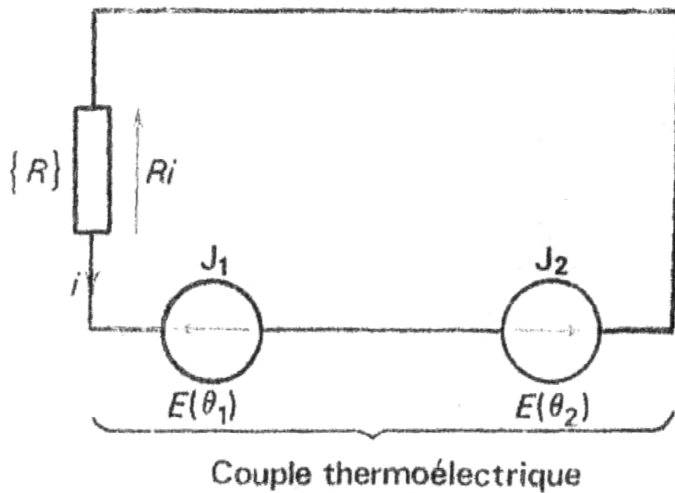
Les forces électromotrices des jonctions et égales dans l'expérience 1 ne le sont plus. On a maintenant :  $E_1 > E_2$

Par une loi de maille on obtient :

$$(E_1 - E_2) - Ri = 0 \implies (3) = \text{---}$$

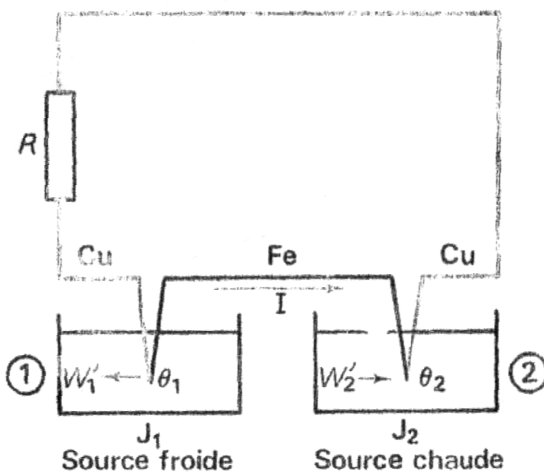
### 2.4. Couple thermoélectrique

Grace à (3) nous pouvons simplifier le schéma.



et fonctionnent comme un générateur de fém. : =

On a ici une pile thermoélectrique de fém. . Le fém. résulte de la dissymétrie des températures aux deux jonctions. Son comportement est donc analogue aux piles hydroélectriques.



Prélève dans le récipient 2 la quantité de chaleur  $Q_2$ . Le milieu 2 est appelé la source chaude. La jonction  $J_2$  rejette, quand à elle, par effet peltier, la chaleur  $Q_1$  dans le récipient 1. Ce dernier est appelé la source froide.

$Q_2 - Q_1 > 0$  représente l'énergie thermique transformée en énergie électrique par la pile thermoélectrique.

### 3. AUTRES EFFETS

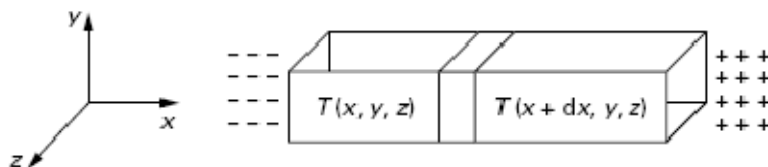
En dehors de l'effet Peltier, d'autres effets découlent de ce dernier et lui sont complémentaires. Parmi eux, on isole l'effet Seebeck ainsi que l'effet Thomson.

#### 3.1. Effet Seebeck

En 1821, le médecin Thomas Seebeck découvre une autre façon de produire de l'électricité. Sa méthode consiste à placer l'un sur l'autre un disque d'antimoine (élément chimique) et un disque de cuivre, il presse à la main un fil de cuivre relié à un galvanomètre (ampèremètre de type analogique), qui indique alors le passage d'un courant. Il comprend que l'échauffement des deux métaux par le contact de la main distribue une différence de température, laquelle provoque cette électricité : c'est la découverte de la thermoélectricité : « un courant électrique (très faible) se manifeste dans un circuit dont les deux soudures se trouvent à des températures différentes. On fabrique alors les premières piles thermoélectriques. »

Physiquement, l'effet Seebeck peut s'expliquer par la polarisation de tout élément de conducteur placé dans un gradient de température non nul. En effet, les observations ont montré que le fait de chauffer ou de refroidir un élément conducteur induit un déplacement d'électron à l'origine du courant électrique qui s'établit. Physiquement, ce phénomène s'explique de la façon suivante :

Tout d'abord il faut considérer un conducteur (métallique) dans lequel la température n'est pas uniforme. On observe après un petit temps que l'extrémité chaude se charge positivement (déficit d'électrons) et qu'à l'inverse l'extrémité froide se charge négativement (excès d'électrons). Ceci s'explique par la conduction thermique. Une stabilité à cause d'un champ électrique interne (la diffusion des électrons chauds va être compensée par la diffusion des électrons froids).



#### Conducteur métallique à une température non uniforme : répartition des charges électriques

Ainsi la force électromotrice dépend uniquement des températures des deux jonctions. On peut la mesurer en séparant les deux conducteurs au niveau de l'une des jonctions et en reliant les deux extrémités obtenues à un voltmètre.

Une première relation a été établie par Seebeck reliant les potentiels électriques à la chaleur : « une différence de température  $dT$  entre aux jonctions de deux matériaux a et b, ce qui implique une différence de potentiel électrique  $dV$  » :

$$S_{ab} = \frac{dV}{dT}$$

D'autre part, à chaque conducteur dans un montage à effet Seebeck, est relié un coefficient appelé le coefficient Seebeck qui informe sur le pouvoir thermoélectrique du matériau. Il existe une relation mathématique reliant ces derniers :

$$S_{ab} = S_a - S_b$$

Avec  $S_{ab}$  : Coefficient de Seebeck du thermocouple

$S_a$  : Coefficient Seebeck du matériau a (conducteur a)

$S_b$  : Coefficient Seebeck du matériau b (conducteur b)

### 3.2. Effet Thomson

Cet effet correspond au dégagement ou à l'absorption de chaleur, autre que l'effet Joule, qui accompagne le passage d'un courant électrique à travers un conducteur homogène dont la température n'est pas uniforme. Une relation peut être établie :

$$Q = \tau_a \cdot \Delta T \cdot I$$

Avec : Q : quantité de chaleur échangée avec l'extérieur par effet Thomson, par unité de longueur d'un conducteur homogène et par unité de temps.

$\Delta T$  : différence de température qui existe entre deux points du conducteur distant d'une longueur unité.

$\tau_a$  : Coefficient de Thomson

I : intensité du courant qui circule

### 3.3. Relation entre les coefficients Seebeck, Thomson et Peltier

Ces trois effets (Peltier, Seebeck et Thomson) ne font pas référence à des phénomènes réellement distincts et ils s'avèrent être reliés. Thomson (devenu Lord Kelvin) a ainsi établi deux relations entre les coefficients de Seebeck, Peltier et Thomson. Ces dernières, vérifiées expérimentalement, sont connues sous le nom de relation de Kelvin et s'expriment de la manière suivante :

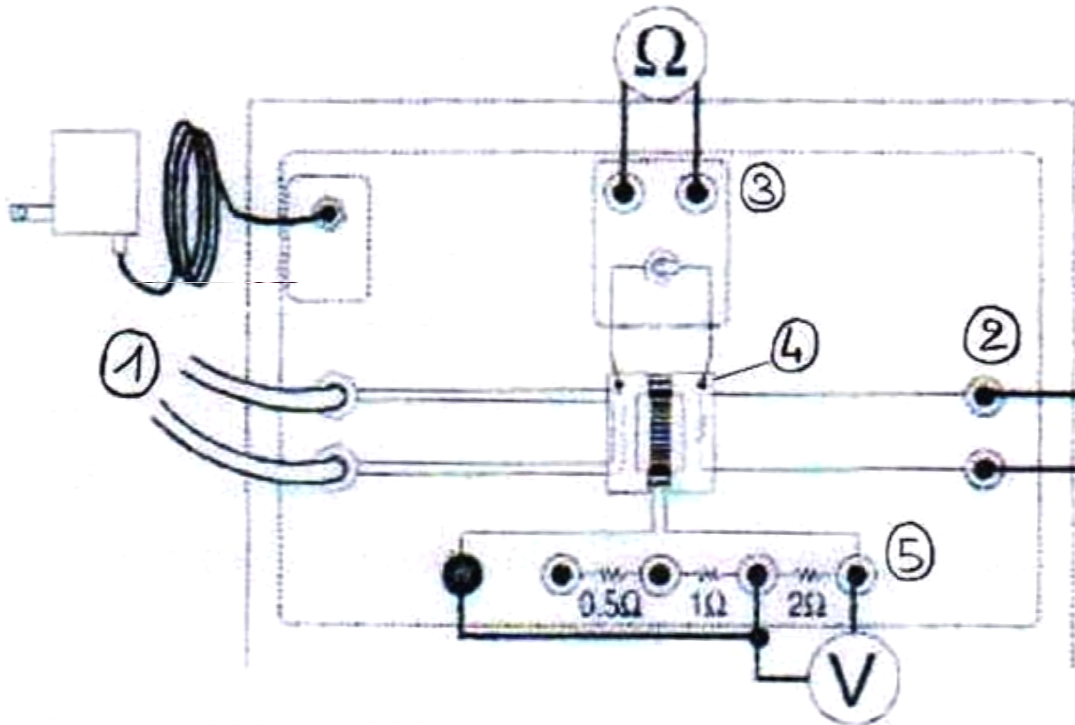
$$\pi_{a/b} = T \cdot (S_a - S_b)$$

$$\tau_a - \tau_b = T \cdot \frac{d(S_a - S_b)}{dT}$$

Ces relations marquent donc bien la dépendance entre les trois coefficients.

#### 4. MODULE THERMOELECTRIQUE A EFFET PELTIER

##### 4.1. TEA : Thermo Efficiency Apparatus



Le TEA est composé de 5 parties :

- 1) Un circuit hydraulique qui constitue le « réservoir froid ». On relie ce circuit à un robinet : le tuyau d'entrée est relié au robinet et le tuyau de sortie est lié à l'évier. Avec la pression du réseau d'eau l'eau circule dans le module à effet Peltier. Le côté gauche de l'appareil est donc maintenu à une température froide et constante.
- 2) Un circuit électrique qui constitue le « réservoir chaud ». Il s'agit d'une résistance chauffante interne à l'appareil que l'on alimente en courant continu. Plus la tension est importante, plus la résistance va produire de la chaleur (cependant on ne dépassera pas les 12 volts en alimentation).
- 3) Deux sorties et un interrupteur. En branchant un ohmmètre à ces bornes de sortie, on peut mesurer la résistance du « réservoir froid » et du « réservoir chaud ». Grâce au tableau ci-dessous on peut faire correspondre une température à la résistance : on obtient ainsi la température (en °C) des différents réservoirs.
- 4) Le cœur de l'appareil : les différents composants sont soudés et reliés au circuit 5.
- 5) Quatre bornes de sortie qui permettent de fermer le circuit tout en choisissant la résistance (0,5 ; 1 ou 2 ohms).

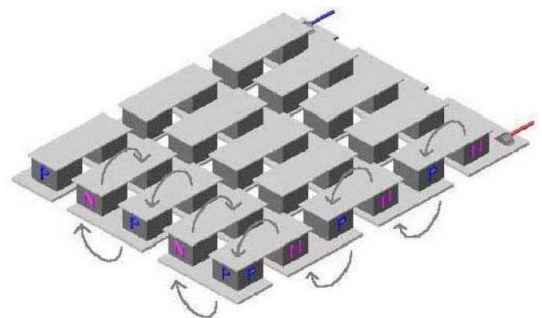
Table 1: Resistance to Temperature Conversion Chart

kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C	kΩ	°C
461	-5	146	17	53.2	39	21.7	61	9.76	83
436	-4	139	18	51.0	40	20.9	62	9.43	84
413	-3	133	19	48.9	41	20.1	63	9.12	85
391	-2	126	20	46.8	42	19.3	64	8.81	86
370	-1	120	21	44.9	43	18.6	65	8.52	87
351	0	115	22	43.0	44	17.9	66	8.24	88
332	1	109	23	41.2	45	17.3	67	7.96	89
315	2	104	24	39.6	46	16.6	68	7.70	90
298	3	100	25	37.9	47	16.0	69	7.45	91
283	4	95.4	26	36.4	48	15.5	70	7.21	92
269	5	91.1	27	34.9	49	14.9	71	6.98	93
255	6	87.0	28	33.5	50	14.4	72	6.75	94
242	7	83.1	29	32.2	51	13.8	73	6.53	95
230	8	79.4	30	30.9	52	13.4	74	6.33	96
218	9	75.9	31	29.7	53	12.9	75	6.12	97
207	10	72.5	32	28.5	54	12.4	76	5.93	98
197	11	69.3	33	27.4	55	12.0	77	5.74	99
187	12	66.3	34	26.4	56	11.6	78	5.56	100
178	13	63.4	35	25.3	57	11.2	79	5.39	101
169	14	60.7	36	24.4	58	10.8	80	5.22	102
161	15	58.1	37	23.4	59	10.4	81	5.06	103
153	16	55.6	38	22.5	60	10.1	82	4.91	104

## 4.2. Cellule à effet Peltier

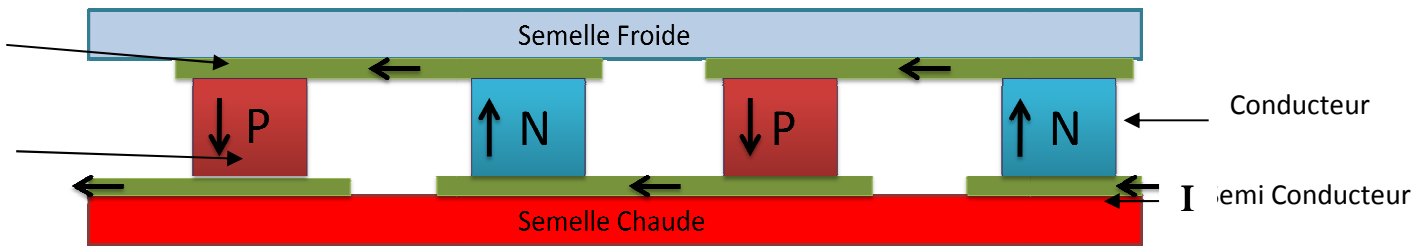
### 4.2.1. Présentation

Les cellules à effet Peltier (CEP) ou modules thermoélectriques sont constitués de pavés semi conducteurs (principalement du tellure de bismuth) de type  $n$  et  $p$ , reliés en série par un matériau conducteur (souvent le cuivre) et des semelles d'échange thermique en céramique. Nous pouvons remarquer que les jonctions sont de type  $p-n$  sur une face et  $n-p$  sur l'autre.



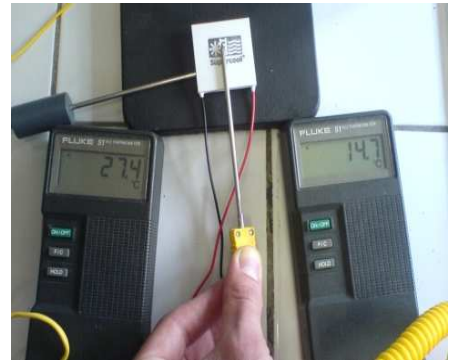
Lorsqu'on fait circuler un courant électrique continu dans un tel circuit, il apparaît une face « froide » et une face « chaude ». Si on inverse le sens du courant, la température des deux faces change de côté.

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier



### 4.2.2. Pompe à chaleur

Tout d'abord, une pompe à chaleur est un dispositif qui permet de transférer de la chaleur d'une source froide vers une source chaude. Dans ce cas là, la source froide est le milieu ou l'élément à refroidir et la source chaude est le milieu à réchauffer. La plupart des CEP sont utilisés en pompe à chaleur. L'association de plusieurs éléments Peltier permet d'acquérir une plus grande capacité frigorifique. Les CEP sont une alternative aux pompes à chaleurs thermodynamiques.

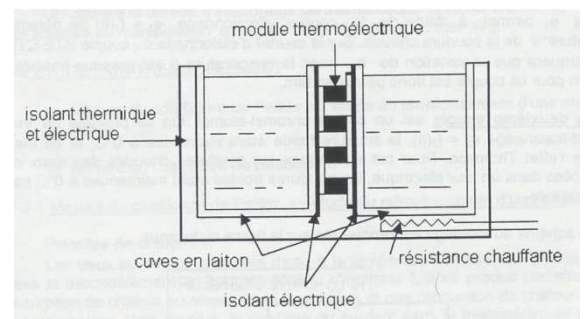


Exemple : nous nous sommes procuré une cellule à effet Peltier que nous avons alimenté par un générateur (0,5A, 3V). Nous avons ainsi pu constater une différence de température des deux côtés.

### 4.2.3. Générateur

Les CEP peuvent être utilisés en générateur. Si on maintient une face froide et une face chaude, cela crée une tension à ses bornes (effet Seebeck).

Grâce au dispositif expérimental ci-contre, nous pouvons faire fonctionner la cellule à effet Peltier en générateur. En effet, grâce à la différence de température générée entre les deux bacs, une différence de potentiel se crée ainsi qu'un courant de sortie.



Pour mettre ce phénomène en application, on peut réaliser une expérience toute simple dans laquelle on place une face de la cellule sur une plaque chauffante et sur l'autre un dissipateur. A l'aide d'un voltmètre on peut voir la tension produite



### 4.3. Performance théorique

Les performances théoriques d'une CEP (les circuits d'échange thermique avec les milieux chaud et froid n'étant pas pris en compte) découlent des caractéristiques du matériau constituant les pavés semi conducteurs, c'est-à-dire du pouvoir thermoélectrique  $\alpha$ , de la résistivité électrique  $R$  (du pavé) et de la conductivité thermique  $K$  (du pavé).

#### 4.3.1. Quelques formules

Dans les formules qui vont suivre,  $n$  représente le nombre de pavés de la cellule,  $I$  le courant traversant la cellule,  $T_c$  la température de la face froide et  $T_h$  la température de la face chaude des pavés.

- La puissance frigorifique absorbée par la semelle froide de la cellule. Elle a pour expression

$$P_c = n \left[ \alpha I T_c - \frac{1}{2} R I^2 - K (T_h - T_c) \right]$$

- La puissance frigorifique absorbée par la semelle chaude de la cellule. Elle a pour expression

$$P_h = n \left[ \alpha I T_h + \frac{1}{2} R I^2 - K (T_h - T_c) \right]$$

- La puissance électrique fournie à la cellule

$$P_w = P_h - P_c = n[\alpha I (T_h - T_c) + R I^2]$$

- Tension aux bornes de la cellule

$$U = n[\alpha (T_h - T_c) + R I]$$

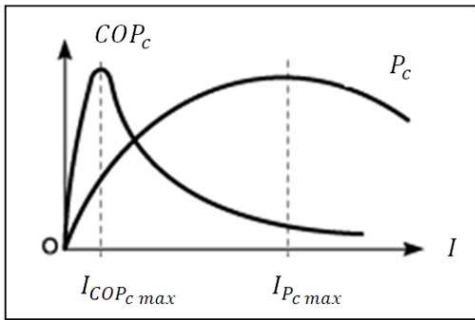
#### 4.3.2. Coefficient de performance froid

Le rendement énergétique, également appelé « Coefficient de performance froid »

$$COP_c = \frac{P_c}{P_w}$$

Dans le graphique ci-dessous sont représentés les courbes de variations de  $Q_c$  et de  $COP_c$  en fonction du courant  $I$ . Les températures  $T_h$  et  $T_c$  sont supposées égales ou constantes.





Grâce à ces courbes, nous pouvons remarquer qu'il existe deux points optimum : un pour  $COP_c$  et un pour  $P_c$ . Le point de fonctionnement idéal choisi correspond au point intermédiaire entre ces deux optima.

#### 4.3.3. Ecart maximum de température

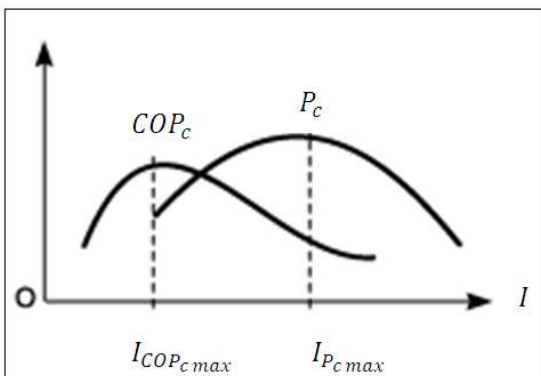
L'écart maximum de température entre la face froide parfaitement isolée thermiquement ( $P_c = 0$  et la face chaude, dépend du matériau thermoélectrique et de la température  $T_c$  pour un courant  $I = I_{P_c \max}$ .

$$\Delta T_{max} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{RK} T_c^2$$

#### 4.4. Performance réelle

Lorsqu'une personne a besoin d'utiliser une cellule à effet Peltier, il lui faut optimiser un montage et tenir compte de certains paramètres.

##### 4.4.1. Echangeurs de chaleur



Pour réaliser le transfert thermique, des échangeurs de chaleur chaude et froide vont être placés entre les deux faces de la cellule. Ils ont chacun une résistance thermique globale :  $S_h$  et  $S_c$ .

En tenant compte des échangeurs de chaleur, en fixant les résistances thermiques et la température des milieux, des courbes de performances réelles peuvent être tracées, comme présenté ci-contre.

Les performances réelles sont logiquement plus faibles que les performances théoriques. En effet,  $Q_{c \max}$  et  $COP_{c \max}$  sont diminués dans un rapport de 1 à 3.

Nous allons maintenant parler du dispositif d'alimentation électrique.

##### 4.4.2. Alimentation électrique

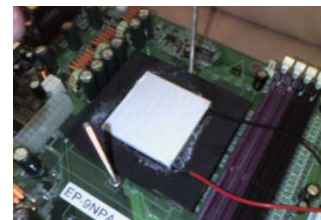
Dans la pratique, pour déterminer le dispositif d'alimentation électrique, il faut trouver  $I_{P_c \max}$  et utiliser une source de tension constante. De plus, il faut étudier le régime transitoire de mise en température du montage. Pour cela, il faut établir la relation de la puissance frigorifique  $Q_c$  en fonction du voltage et de la température des milieux chaud et froid.

Lorsque tous les paramètres ont été optimisés, on peut déterminer le nombre de cellules à effet Peltier dont on aura besoin, l'intensité du courant la tension d'alimentation, et la résistance globale des échangeurs de chaleur.

### 4.5. Les applications des modules à effet Peltier :

Les modules à effet Peltier sont alimentés par un courant et présente par un effet thermoélectrique une face chaude et une face froide. Ses applications dans la vie de tous les jours ont donc en général pour but de refroidir un objet de manière peu encombrante et silencieuse.

Son utilisation la plus courante se situe dans le milieu de l'informatique où la plaque froide est en contact avec le circuit intégré de manière que celui-ci soit maintenu à une température inférieure à 40°C. De l'autre côté du module, un ventilateur se charge de refroidir la plaque chaude pour éviter toute surchauffe. Il peut également être utilisé pour refroidir des enregistreurs magnétiques ou des disques durs.



Montage d'un module à effet Peltier dans un ordinateur

Une seconde application des modules à effets Peltier réside dans la modification de l'humidité de l'air. En effet, il peut être monté dans un système d'assècheur-réchauffeur d'air où la plaque froide sert de condenseur. On trouve également des systèmes similaires d'assècheurs dans les bateaux. En effet, les cellules à effet Peltier permettent de créer une atmosphère sèche pour certains appareils tout en résistant à l'environnement salin.

Dans le milieu industriel, on retrouve les modules dans toutes sortes d'étalonnages de températures. Par exemple une caméra infrarouge pour être étalonnée utilise comme cible optique une cellule à effet Peltier dont la température évolue selon un modèle programmé. Ce genre de variation de la température trouve également plusieurs applications dans l'industrie chimique afin de pouvoir changer rapidement et précisément la température d'une réaction ou de stockage de produits. Enfin, les cellules à effet Peltier sont utilisées pour usiner des pièces sur machine-outil. Afin d'être usinées, les pièces sont immobilisées sur le plateau (la face froide de la cellule) par une fine couche de glace. La libération des pièces s'obtient par un cycle de dégel.

On utilise également fréquemment les modules Peltier dans les laboratoires dans des rôles de maintien ou de baisse de la température (analyse à basse température, refroidissement d'éprouvettes...). Les cellules peuvent comme dans l'industrie servir à étalonner les chromatographes par différents cycles de températures. Son rôle réfrigérant trouve également son utilité dans les milieux médicaux et agro-alimentaires.

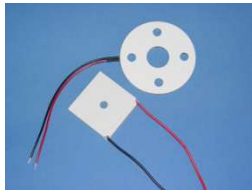
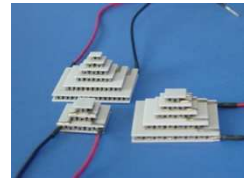
Les cellules à effets Peltier servent aussi dans des applications bien plus complexes comme par exemple la détection du point de rosée. Le principe de mesure à injecter un courant électrique périodique afin de produire une oscillation thermique, en utilisant la réversibilité de l'effet Peltier. La tension Seebeck aux bornes du générateur permet de mesurer l'écart de température et de détecter les flux thermiques liés aux changements de phase qui apparaissent sur la jonction dès que sa température devient inférieure à la température de point de rosée. La fréquence d'oscillation varie alors en fonction du niveau d'humidité.

Les cellules à effet Peltier possèdent donc de nombreuses utilités pour leur capacité réfrigérante, on en trouve dans les réfrigérateurs de voiture, les containers pour le transport d'organes, refroidissement des systèmes laser et infrarouges des missiles... Mais son utilité ne se limite pas qu'à ça puisqu'il existe bien d'autres applications plus complexes comme nous l'avons vu avec la détection du point de rosée.

#### 4.6. Les différents modèles de modules à effet Peltier

Il existe différents modèles de modules à effet Peltier. En effet, en fonction de l'application, différentes formes et tailles sont disponibles afin de répondre à tous les besoins.

Il existe par exemple des modules de type cascade, ainsi, le modèle UEPT-41173 de UWE Electronic permet un  $\Delta T$  maximal de  $140^{\circ}\text{C}$ . Ce genre de modèle est donc très utile quand il est nécessaire de refroidir fortement un composant. Son inconvénient réside dans sa hauteur et sa forme peu pratique.



On trouve également des modèles troués, rectangulaires ou circulaires. Leur utilité se trouve dans leur forme qui permet de fixer les modules. On peut citer les modèles [CH-21-1.0-1.3](#) et [CH-43-1.0-0.8](#) du fabricant TE Technology.

L'entreprise [TECHNICOME.com](#) propose des modules spécifiques tels que des modules étanches, des modules avec gaines thermo-rétractables ou encore des modules pré-assemblés.



L'entreprise propose également de fabriquer des modèles avec une nouvelle géométrie sur cahier des charges.

Il se vend donc aujourd'hui toutes sortes de modules à effet Peltier, principalement pour sa capacité réfrigérante. Il faut donc réussir pour les entreprises à créer des modèles dont la taille, la géométrie et la puissance correspondent à des demandes bien précises. Avec la miniaturisation des composants notamment dans le domaine informatique, on est amené à fabriquer des cellules à effet Peltier de plus en plus petits (moins 5 mm de côté pour 3mm de hauteur).

#### 4.7. Avantages et limites du refroidissement

Les cellules à effet Peltier sont très faciles d'utilisation. Elles sont silencieuses, peu encombrantes, de petites tailles, compactes et légères. On peut aisément les utiliser dans presque toutes les positions et la régulation de la température est précise. De plus, ces modules sont écologiques car ils n'utilisent pas de fluides réfrigérants et ne nécessitent aucun entretien.

Les cellules à effet Peltier dispersent beaucoup de chaleur

Les cellules à effet Peltier présentent néanmoins quelques désavantages. Tout d'abord, on ne peut négliger l'important risque de surchauffe. C'est la raison pour laquelle on accompagne généralement les modules avec des ventilateurs.

## Etude du module Thermoélectrique à effet Peltier

A cela s'ajoute le problème de la condensation. En effet il est courant que la face froide de la cellule ait une température inférieure à la température ambiante, de ce fait il se produit une condensation sur la plaque froide. Ceci est particulièrement problématique quand le module est utilisé dans un milieu électrique (ordinateur...) car il peut occasionner des courts-circuits. Cependant, certaines applications utilisent cette capacité par exemple pour détecter le point de rosée.

Le problème de l'utilisation de cellules à effet Peltier pour des particuliers (en général pour le refroidissement de leur ordinateur) est de trouver une taille adaptée. Un module trop grand provoquerait de la condensation alors qu'un module trop petit ne refroidirait de manière inégale et insuffisante.

## Conclusion

Après ces douze semaines de travaux autour de l'effet Peltier nous avons donc rédigé un rapport théorique mais également expérimental (sous forme de compte rendu) afin de mettre au mieux en lumière ce qu'étais réellement cet effet qui constitue la base de divers applications souvent insoupçonnées à notre niveau. En effet, utilisé dans de très nombreux appareils de notre vie quotidienne (petits réfrigérateurs,) le module à effet Peltier est présent afin de refroidir certains composants insérés par exemple dans des machines : grâce à un courant électrique, une face du module va chauffer ce qui va, selon le principe de l'effet Peltier, induire un refroidissement de l'autre face.

Ce travail, assez lourd du fait de notre manque de connaissance à ce sujet, fut néanmoins une expérience enrichissante autant sur le plan humain qu'intellectuel. Il nous a permis d'augmenter notre modeste expérience du travail de groupe avec tout ce que cela comporte (Confrontation des idées, organisation du travail, gestion du temps) mais nous a également donné la possibilité de mener à bien un projet concret où la pratique vient véritablement se mêler à la théorie ! Ainsi, la découverte de la physique et de ce phénomène en particulier fût certes sérieuse mais aussi ludique et le fait de faire soi-même des expériences est bénéfique pour une meilleure compréhension des choses. Le bilan global de ce projet est donc tout à fait positif et de l'avis général du groupe, sa réalisation nous a conforté dans l'idée qu'un travail de groupe était toujours bénéfique et que la communication entre ses membres était un facteur clé d'efficacité.

Par ailleurs, on peut souligner le fait que des parties de ce projet 2008 deviendront, dans un futur proche, quelque peu obsolètes. De grandes opportunités de développement sont offertes aux systèmes de récupération et de réinvestissement de l'énergie comme le module à effet Peltier : les perspectives d'avenir sont immenses. Il s'agit à présent de trouver de nouveaux matériaux qui constitueront les systèmes thermoélectriques et qui offriront des performances bien plus importantes. Ceci est d'autant plus d'actualité à notre époque où l'on va au devant d'une problématique essentielle : où trouver de nouvelles sources d'énergie. Le soleil semble être pour le moment la seule alternative propre, viable et surtout inépuisable. L'intérêt des recherches doit donc résider dans le fait : « comment capter cette source d'énergie gigantesque et comment l'utiliser au maximum dans des applications aussi multiples qu'utiles ». Un autre groupe ayant fait l'expérience de catalyser l'énergie du soleil à l'aide d'une loupe a obtenu des résultats surprenants : la température est montée jusqu'à 450°C avec ce seul mécanisme ! Il faut donc exploiter plus en profondeur ce potentiel qui est à notre portée.

La difficulté rencontrée jusqu'à présent, en particulier par les industriels, était la complexité de mise en œuvre de cet effet Peltier (mais aussi de tous les effets thermoélectriques). Aujourd'hui les recherches sont relancées mais l'innovation en matière de thermoélectricité (surtout sur les matériaux thermoélectriques) n'est encore suivie que par peu de pays. Effectivement, dans le monde, seul les Etats-Unis et le Japon se sont réellement engagés sur ce type de recherche. En Europe, sa cause n'est que peu défendue et c'est principalement l'Allemagne qui a mené les actions de R&D les plus poussées à ce niveau. Il est certain que si maintenant d'autres puissances telles que la France, l'Angleterre se lancent véritablement dans la « course thermoélectrique » les avancées seraient encore plus précoces et les applications plus nombreuses (développement plus important dans le militaire, par exemple). Mais ceci doit résulter d'une volonté première de l'état qui doit se rendre compte du fort intérêt que ce développement représente notamment au niveau environnemental !

## Bibliographie

Instruction manual and experiment Guide for the PASCO scientific Model TD-8564

<http://www.uweelectronic.de/fr/funktionsweise.html>

<http://www.bricotronique.com/bricolage/peltier.php>

[http://blogs.nofrag.com/DoC\\_FouALieR/2007/fev/20/26103-tipe-post-mortem/](http://blogs.nofrag.com/DoC_FouALieR/2007/fev/20/26103-tipe-post-mortem/)

<http://www.iut-lannion.fr/LEMEN/MPDOC/CMMEST/mtherthr.htm>

<http://www.technicome.com/pageSite.aspx?rp=23>

<http://tpphycomes.fupl.asso.fr/manip/modeffetpeltier.htm>

<http://tpphycomes.fupl.asso.fr/manip/modeffetpeltier.htm>

<http://aviatechno.free.fr/thermo/thermo01.php>

<http://membres.lycos.fr/jafo/peltier.html>

<http://www.seem-semrac.fr/seem/6Etudes/etudetpF.htm>