

# La Thermoélectricité

---

## Etude bibliographique

**Roux-Briffaud Jonas MP1 A2**

**26/05/2008**



# Introduction

---

Les préoccupations d'ordre énergétique n'ont jamais autant été d'actualité. Le changement climatique se confirme tandis que le prix des matières fossiles s'envole. Il convient donc de trouver de nouvelles sources d'énergie n'influant pas sur notre climat et pouvant faire face à la crise énergétique. De nombreuses pistes sont étudiées ou en voie de développement notamment l'énergie solaire, éolienne, marémotrice, géothermique...

Parmi ces nouvelles manières de produire de l'électricité nous trouvons la thermoélectricité. Son principe est simple : un matériau transforme directement de la chaleur en électricité, ou déplace des calories par l'application d'un courant électrique. Ces applications concernent donc la réfrigération et la génération d'électricité grâce aux sources de chaleur perdue. Ce système offre de multiples avantages : absence de système mécanique et de désagréments sonores, grande fiabilité, durée de vie quasi illimitée, de surcroît, il permet de lutter contre les différentes pollutions créées par la combustion ou l'utilisation en réfrigération de gaz frigorigènes. Ces applications peuvent être utiles dans de nombreux domaines comme la réfrigération des circuits électroniques ou la production d'électricité grâce à la chaleur dégagée par nos moteurs thermiques. Cependant le rendement des modules thermoélectriques reste encore faible et leurs prix élevés limitent leurs utilisations à grande échelle. De nombreuses recherches ont donc été engagées à partir des années 1990 en vue de développer cette technologie pourtant connue depuis 1821.

Dans cette recherche bibliographique nous présenterons, dans un premier temps, les différents principes régissant la thermoélectricité afin d'en comprendre son fonctionnement puis, dans un second temps, les matériaux thermoélectriques utilisés dans les dispositifs actuels ainsi que ceux dévoilant des propriétés attrayantes pour l'avenir. Enfin nous dresserons un panorama des utilisations actuelles de la thermoélectricité et des recherches en cours, afin d'imaginer les applications futures de la thermoélectricité.

# Sommaire

---

INTRODUCTION .....	3
SOMMAIRE.....	4
<b>PRINCIPE THERMOELECTRIQUE .....</b>	<b>5</b>
HISTORIQUE .....	6
EFFET SEEBECK.....	7
<i>Principe</i> .....	7
<i>Applications</i> .....	7
EFFET PELTIER .....	8
<i>Principe</i> .....	8
<i>Applications</i> .....	8
EFFET THOMPSON .....	9
<i>Principe</i> .....	9
LES COEFFICIENTS THERMOELECTRIQUES .....	10
<i>Coefficient Seebeck</i> .....	10
<i>Coefficient Peltier</i> .....	10
<i>Coefficient Thomson</i> .....	10
<i>Les relations de Kelvin</i> .....	10
GENERATION ET REFROIDISSEMENT THERMOELECTRIQUE .....	11
RENDEMENT ET FACTEUR DE MERITE .....	12
<i>Rendement de conversion</i> .....	12
<i>Facteur de mérite</i> .....	13
<b>LES MATERIAUX THERMOELECTRIQUES .....</b>	<b>14</b>
L'OPTIMISATION DES MATERIAUX.....	15
<i>Optimisation du facteur de puissance</i> .....	15
<i>Diminution de la conductivité thermique</i> .....	15
<i>La naissance de nouveaux matériaux</i> .....	16
MATERIAUX CLASSIQUES .....	17
<i>Basses températures (100K – 200K)</i> .....	17
<i>Températures ambiantes (&lt;300K)</i> .....	17
<i>Températures moyennes (400K – 750K)</i> .....	17
<i>Hautes températures (+1000K)</i> .....	17
NOUVEAUX MATERIAUX .....	18
<i>Les Skutterudites</i> .....	18
<i>Les clathrates</i> .....	18
<i>Les oxydes</i> .....	18
<i>Les semis Heuslers</i> .....	18
<b>LA THERMOELECTRICITE DEMAIN .....</b>	<b>19</b>
LES APPLICATIONS FUTURES.....	20
<i>Le point sur les applications actuelles</i> .....	20
<i>Les voies de recherche</i> .....	20
<i>Les applications futures</i> .....	21
CONCLUSION .....	22
BIBLIOGRAPHIE.....	23

## Principe thermoélectrique

# Historique

---

La thermoélectricité a connu 2 principales périodes de développement. Une première de 1821 à 1851 et une seconde de la fin des années 1930 au début des années 1960.

- **1821** : Le physicien allemand Thomas Johann Seebeck découvre le premier effet thermoélectrique. Il remarqua qu'une aiguille métallique est déviée lorsqu'elle est placée entre 2 conducteurs de nature différentes liés à leur extrémité par des jonctions et que une des jonctions est maintenue à une température plus élevée que l'autre.
- Cet effet fut interprété comme une apparition d'un champ magnétique et servit même à expliquer le champ magnétique terrestre. Ce n'est que plus tard que l'on démontrât que ce phénomène s'expliquait par l'apparition d'un courant électrique entre les jonctions froide et chaude
- **1834** : Le physicien Français Jean Peltier découvre le second effet thermoélectrique, qui est en fait le phénomène inverse de l'effet Seebeck soit : si l'on applique un courant à un solide métallique on observe un déplacement de chaleur d'une face à l'autre. Là aussi les explications que fournit Peltier se trouvent incorrectes.
- **1838** : Heinrich Lenz explique les découvertes de Peltier. Si l'on fait passer un courant électrique dans un circuit conçu avec 2 matériaux différents et dont les raccords sont à la même température, la chaleur est absorbée à une jonction et restituée à l'autre. Cette démonstration fut effectuée à l'aide du couple thermoélectrique antimoine/bismuth. La jonction de ces 2 fils métalliques est placée dans une goutte d'eau : quand le courant passe dans un sens la goutte d'eau gèle, quand le courant passe dans l'autre sens, la glace fond.
- **1851** : William Thomson (lord Kelvin) relie les effets Seebeck et Peltier. Un matériau, soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique, échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Inversement un courant électrique est généré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur.
- **1865** : Robert Bunsen et Joseph Stefan montrent que les semi-conducteurs donnent également naissance à l'effet Seebeck avec un rendement très supérieurs à ceux obtenus avec les métaux.
- **1909** : Le scientifique Allemand Edmund Altenkirch effectue pour la première fois le calcul satisfaisant des propriétés des circuits thermoélectriques.
- **1950** : Abraham Ioffe découvre que les semi-conducteurs dopés ont un effet thermoélectrique plus élevé que les autres matériaux.
- **1990** : Regain d'intérêt pour la thermoélectricité dû aux préoccupations environnemental.

# Effet Seebeck

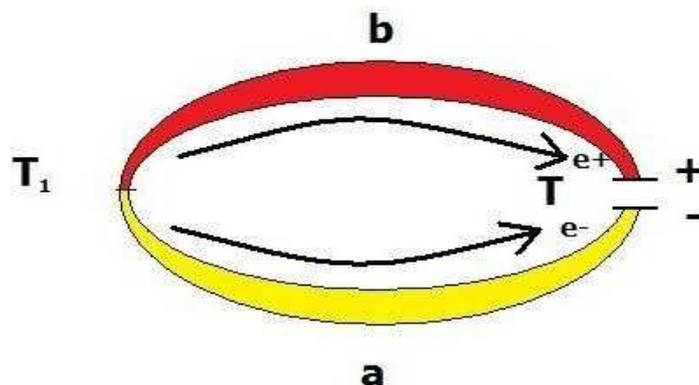
---

## *Principe*

---

Soit 2 matériaux a et b de nature différente reliés entre eux par 2 jonctions de température T. Une des jonctions est portée à la température  $T_1$  tel que  $T_1 > T$ . Une différence de tension apparaît alors entre les jonctions froide et chaude.

Considérons maintenant a et b comme des semi-conducteurs respectivement de type n et de type p. L'effet Seebeck s'explique par la diffusion de porteur de charge,  $e^-$  (électrons) ou  $e^+$  (trou) du côté chaud vers le côté froid. Pour un circuit ouvert les  $e^-$  (électrons) se massent dans la partie froide du matériau de type n alors que les  $e^+$  (trou) se massent dans la partie froide du matériau de type p. La partie froide du semi-conducteur n sera donc polarisée négativement et celle du semi-conducteur p positivement. Nous sommes donc en présence d'une différence de charges qui a pour effet de créer une différence de potentiel entre les 2 extrémités froides de ces matériaux.



## *Applications*

---

L'application principale de cet effet est la mesure de température. En effet pour 2 matériaux donnés la différence de tension ne dépend que de la différence de température. On peut donc déduire de la fém mesurée l'écart de température entre les 2 jonctions.

La deuxième application, et non des moins intéressantes, est celle du thermo générateur, soit un générateur fonctionnant grâce à une différence de température.

De telles applications sont utilisées en Russie pour alimenter, grâce à une lampe à pétrole, un poste de radio dans les régions reculées n'ayant pas accès à l'électricité.

# Effet Peltier

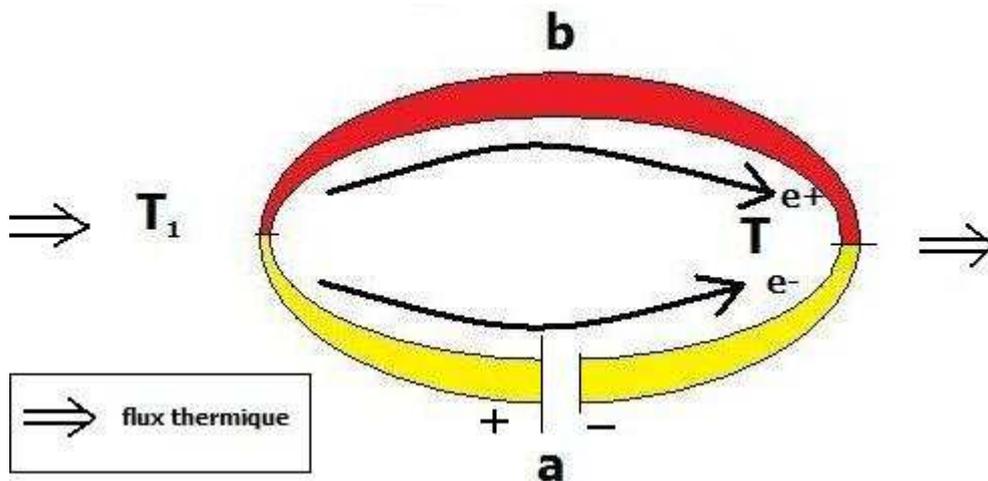
---

## Principe

---

Si l'on fait passer un courant dans un circuit avec 2 conducteurs différents ayant leur jonction à une même température, la chaleur est absorbée à une jonction et restituée à l'autre.

Considérons maintenant a et b comme des semi-conducteurs respectivement de type n et de type p. La jonction qui absorbe de la chaleur est alors celle dans laquelle le courant passe du matériau de type n (b) au matériau de type p (a) soit la jonction à la température  $T_1$ . Inversement celle qui la restitue est la jonction dans laquelle le courant passe du matériau de type p (a) au matériau de type n (b) soit la jonction à la température  $T$ . On a donc  $T > T_1$ .



## Applications

---

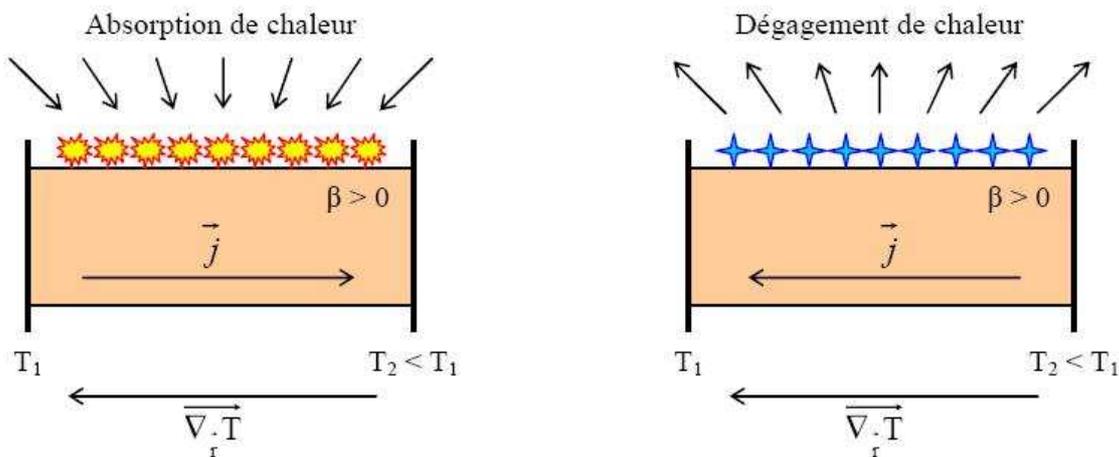
Les applications les plus intéressantes de cet effet se trouvent dans le domaine de la réfrigération miniature de faible puissance et en particulier dans l'aéronautique et l'électronique. Les réfrigérateurs thermoélectriques présentent des caractéristiques pour le moins très intéressantes : longue durée de vie, précisions, fiabilité, silence. Ils ont cependant un faible rendement. Toute fois des modèles de glacières portables fonctionnant sur allume-cigares sont commercialisés par certaine entreprise.

# Effet Thompson

## Principe

Le troisième effet thermoélectrique (l'effet Thomson) est mis en évidence lorsque sont présents simultanément un gradient de température et un courant électrique.

Un matériau soumis à un gradient de température et à un courant électrique échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Soit une absorption de la chaleur du milieu extérieur quand le courant circule dans le sens inverse de la différence de température, et un dégagement de chaleur quand le courant circule dans le sens de la différence de température.



Réciproquement un courant électrique est généré si le matériau est soumis à un gradient de température et à un flux de chaleur.

**Cet effet est différent des effets Peltier et Seebeck. Ce dernier existe pour un seul matériau et ne nécessite pas de jonction.**

# Les coefficients thermoélectriques

---

## *Coefficient Seebeck*

---

Une différence de température  $dT$  aux jonctions de deux matériaux a et b implique une différence de potentiel électrique  $dV$  selon :

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

Le coefficient Seebeck, également appelé "pouvoir thermoélectrique" s'exprime en V.K-1 (ou plus généralement en  $\mu\text{V/K}$  au vu des valeurs de ce coefficient dans les matériaux usuels).

Les coefficients Seebeck des deux matériaux sont reliés au coefficient Seebeck du couple selon :

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

## *Coefficient Peltier*

---

Dans le cas de l'effet Peltier, un courant électrique  $I$  est imposé à un circuit composé de deux matériaux, ce qui entraîne une libération de chaleur  $Q$  à une jonction et une absorption de chaleur à l'autre jonction, selon :

$$\pi_{ab} = \frac{Q}{I}$$

## *Coefficient Thomson*

---

Le coefficient Thomson peut être défini directement pour un seul matériau. Lorsque sont présents simultanément un gradient de température et un courant électrique, il y a génération ou absorption de chaleur dans chaque segment de matériau pris individuellement. Le gradient de flux thermique au sein du matériau est alors donné par :

$$\frac{dQ}{dx} = I\tau \frac{dT}{dx}$$

Où  $x$  est la coordonnée spatiale et  $\tau$  est le coefficient Thomson du matériau.

## *Les relations de Kelvin*

---

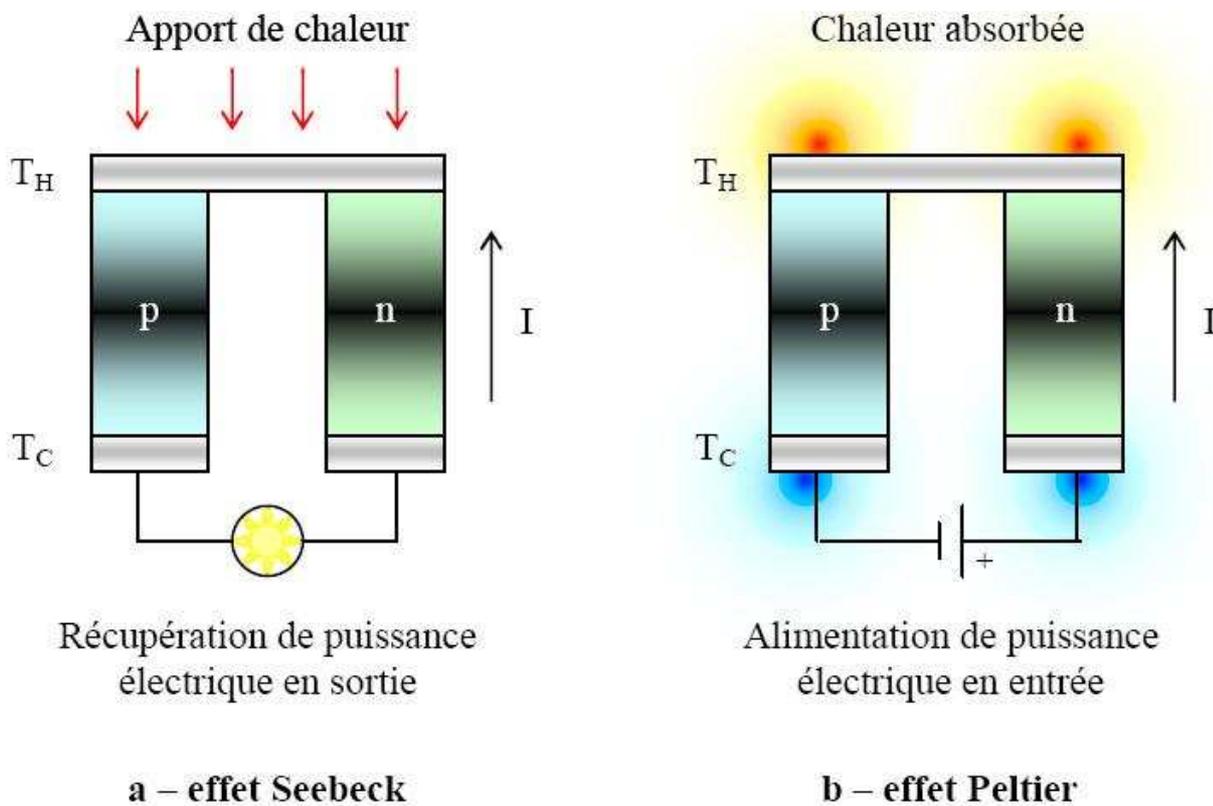
Les trois effets Seebeck, Peltier et Thomson sont liées entre eux par les relations de Kelvin suivantes ;

$$S_{ab} = \frac{\pi_{ab}}{T}$$

$$\tau_a - \tau_b = T \frac{dS_{ab}}{dT}$$

# Génération et refroidissement thermoélectrique

La génération d'électricité et le refroidissement sont produits par des machines thermiques appelées convertisseurs thermoélectriques, générateurs thermoélectriques ou encore refroidisseurs thermoélectriques. Dans la pratique les applications thermoélectriques utilisent des semi-conducteurs de type n et p placés thermiquement en parallèle et reliés électriquement en série par un matériau dont le pouvoir thermoélectrique est supposé nul. En effet les semi-conducteurs n et p ont un courant créé de sens opposé pour une même différence de température. Ceci est exprimé par un coefficient de Seebeck positif pour les semi-conducteurs type p et un coefficient de Seebeck négatif pour ceux de type n.



a – générateur thermoélectrique – b – refroidisseur thermoélectrique.

# Rendement et facteur de mérite

---

## *Rendement de conversion*

---

Le calcul du rendement de conversion suppose la détermination d'une relation entre le flux de chaleur et le courant électrique dans le matériau.

Un convertisseur thermoélectrique est supposé fonctionner comme un générateur idéal sans perte de chaleur. L'expression de son rendement sera donc sa puissance électrique ( $W$ ) sur la puissance thermique absorbée du côté chaud ( $Q_h$ ) soit :

$$\vartheta = \frac{W}{Q_h}$$

La puissance électrique  $W$  s'exprime en fonction de l'effet Seebeck et de la différence de température  $\Delta T$ , selon l'équation suivante :

$$W = (S_p - S_n)I \times \Delta T$$

Par ailleurs, le flux de chaleur diffusif  $\varphi$  se calcule par le produit de la conductance thermique totale  $\lambda$  par la différence de température  $\Delta T$ , soit :

$$\varphi = \lambda \times \Delta T$$

Dans cette équation,  $\lambda$  représente la conductance thermique des matériaux n et p placés en parallèle. Quant à la puissance thermique absorbée  $Q_h$ , elle est la résultante de la somme du flux de chaleur et de l'effet Seebeck, soit :

$$Q_h = (S_p - S_n)I \times T_h + \lambda \times \Delta T$$

Ainsi, en négligeant les résistances de contact au niveau des jonctions chaudes et froides devant la somme des résistances des bras, nous obtenons finalement  
L'expression du rendement :

$$\vartheta = \frac{(S_p - S_n)I \times \Delta T}{(S_p - S_n)I \times T_h + \lambda \times \Delta T}$$

Par ailleurs, le maximum du rendement peut se mettre sous la forme :

$$\vartheta = \eta_c \times \eta_{th}$$

Où  $\eta_c$  et  $\eta_{th}$  représentent respectivement le rendement de Carnot et le rendement propre au système thermoélectrique :

$$\eta_c = \frac{T_h - T_c}{T_h}$$

$$\eta_{th} = \frac{\sqrt{1 + Z_c T_m} - 1}{\sqrt{1 + Z_c T_m} + \frac{T_c}{T_h}}$$

Dans cette dernière équation,  $Z_c$  et  $T_m$  sont définis respectivement comme étant le coefficient de mérite du couple n - p et la température moyenne. Le rendement maximal est donc le produit du rendement de Carnot, et de  $\eta_{th}$  qui prend en compte les propriétés physiques des thermo-éléments.

### *Facteur de mérite*

---

Le facteur de mérite ( $ZT$ ) définit si le matériau a de bonnes propriétés thermoélectriques ou non. Nous retrouvons ce facteur dans l'expression du rendement  $\eta_{th}$ . Plus le facteur de mérite est élevé plus le matériau est bon.

Un matériau est bon quand il a un pouvoir thermoélectrique élevé soit une conductivité électrique haute et une conductivité thermique faible.

Les meilleurs matériaux actuels présentent des  $ZT$  légèrement supérieur à 1. Les rendements de conversion des modules thermoélectriques se limitent donc à des valeurs de l'ordre de 7 voir 15% c'est-à-dire que 7 à 15 % de la chaleur traversant le module thermoélectrique est convertie en électricité ou que 7 à 15 % de l'électricité passant dans le module sert à réfrigérer.

## **Les matériaux thermoélectriques**

# L'optimisation des matériaux

---

Les matériaux sont à la base des applications thermoélectriques. La recherche de meilleurs rendements thermoélectriques passe donc par une optimisation des matériaux utilisés. Ce paragraphe présentera les différents aspects qu'il faut améliorer pour optimiser les matériaux électriques.

Précédemment nous avons vu que le rendement d'un convertisseur thermoélectrique dépendait du facteur de mérite des matériaux utilisés. Ce facteur de mérite dépendant lui même de la conductivité thermique ainsi qu'électrique et du coefficient de Seebeck.

$$Z_c = \frac{S^2}{\rho \times \lambda}$$

$$Z_c = \frac{S^2 \sigma}{\lambda}$$

Où  $T_m$  est la température moyenne ( $T_m = (T_h + T_c)/2$ ),  $S$  le coefficient de Seebeck,  $\lambda$  la conductivité thermique,  $\rho$  la résistivité électrique et  $\sigma$  ( $\sigma = 1/\rho$ ) la conductivité électrique. On nomme  $S^2 \sigma$  « facteur de puissance ». Un matériau à ZT élève est donc un matériau possédant à la fois un fort facteur de puissance, et une conductivité thermique faible. Cela revient donc à chercher un matériau possédant la conductivité thermique du verre alliée à la conductivité électrique d'un bon conducteur.

## *Optimisation du facteur de puissance*

---

Le facteur de puissance dépend de 2 paramètres : le coefficient de Seebeck et la conductivité électrique. Paradoxalement ces deux grandeurs varient de manière opposée. Le pouvoir thermoélectrique est élevé pour les matériaux présentant une faible concentration de porteurs de charges tandis que pour les éléments de forte conductivité électrique les matériaux présentent une forte concentration de porteurs de charges. Les meilleurs matériaux seront donc des semis conducteurs.

## *Diminution de la conductivité thermique*

---

Une élévation de la conductivité thermique s'oppose à la création d'un gradient thermique. Il faut donc diminuer la conductivité thermique mais sans toucher à la conductivité électrique.

La conductivité thermique se compose principalement de 2 conductivités : la conductivité électronique ( $\lambda_e$ ) et celle du réseau ( $\lambda_L$ ).

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_L$$

$\lambda_L$  dépend des porteurs de charges il n'est donc pas judicieux de la réduire ce qui affecterait les propriétés électriques du matériau.

$\lambda_e$  dépend de la vibration du réseau et de la propagation des phonons. Elle peut donc être modifiée. La plus grande partie de la chaleur est transportée par les phonons acoustiques. La diminution de

Il passe donc par la minimisation de la contribution de ces phonons à la conductivité thermique mais aussi par l'augmentation de la diffusion des phonons autres qu'acoustiques.

### La naissance de nouveaux matériaux

---

Selon les propriétés énoncées dans la partie précédente une diffusion importante de phonons permet de réduire la conductivité thermique. Plusieurs processus permettent à un cristal de s'approcher de la conductivité thermique du verre, en voici les principaux :

- **Une structure cristalline complexe.** L'intérêt d'une telle structure est qu'un matériau possédant  $N$  atomes par maille aura 3 modes acoustiques, et  $3(N-1)$  modes optiques. Nous avons une augmentation des phonons optiques au détriment des acoustiques et donc une plus faible conductivité thermique (la chaleur est principalement transportée par les phonons acoustiques).
- **L'insertion d'atomes lourds** dans des cages de structures cristallines. Ces atomes peuvent vibrer indépendamment du réseau ce qui entraîne la diffusion de nouveaux phonons. Leurs masses doivent être supérieures à 3% de la masse de la structure.
- **L'élaboration de solutions solides** entre différents matériaux de mêmes types. Cela crée une augmentation du désordre, impliquant un accroissement de la propagation des phonons due à une variation de masse sur un site cristallographique.
- **Des impuretés ou défauts ponctuels** dans le matériau afin d'augmenter sa diffusion de phonons. Ce qui nous oriente vers des matériaux composites à base d'un bon matériau thermoélectrique et d'un matériau neutre d'un point de vue thermoélectrique.
- **La réduction du libre parcours des phonons.** Ceci induit d'étudier les matériaux nanocristallins.

Sur la base de ces différentes propriétés plusieurs matériaux ont ainsi été créés ou améliorés (voir chapitre « *nouveaux matériaux* »)

# Matériaux classiques

Les matériaux thermoélectriques n'ont de bonnes propriétés thermoélectriques que sur des intervalles de température restreints. Nous présenterons donc les différents matériaux en fonction de leurs plages d'utilisation.

## *Basses températures (100K – 200K)*

Le matériau le plus utilisé dans cette plage de température est l'alliage de bismuth et d'antimoine (Bi-Sb). Actuellement cet alliage n'admet pas de bon rendement pour le type p ce qui réduit énormément le rendement de conversion du convertisseur thermoélectrique. Doublé d'un aimant son facteur de mérite  $ZT$  passe de 0,6 à 1,1. On l'utilise donc en association avec un champ magnétique.

## *Températures ambiantes (<300K)*

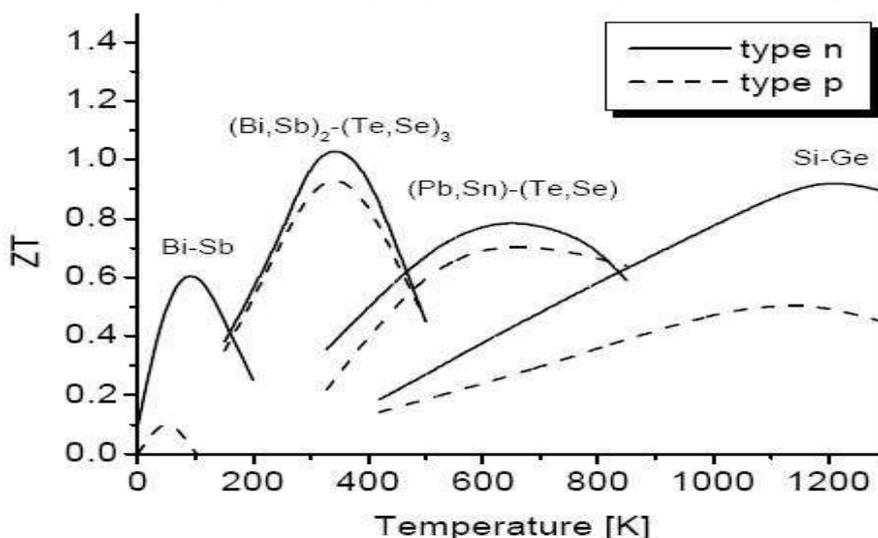
C'est dans cette plage de température que l'on retrouve le plus d'applications commerciales surtout dans la réfrigération. Le matériau convoité est le  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (alliage de bismuth et de tellure). On obtient de bonnes performances quand il est allié à du  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  (alliage d'antimoine et de tellure) de même structure cristalline. Le facteur de mérite de ce couple avoisine 1. Ceci est dû à une faible conductivité thermique de l'ordre de  $\lambda = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

## *Températures moyennes (400K – 750K)*

Les alliages à base de plomb, d'étain, de tellure et de sélénium sont les plus couramment utilisés bien qu'il faille prendre des précautions dans les hautes températures pour assurer leurs stabilités chimiques. On y retrouve donc le tellure de plomb ( $\text{PbTe}$ ), l'alliage entre le tellure de plomb et l'étain ((PbSn)Te) ainsi que le tellure de sélénium (TeSe). Le facteur de mérite est de l'ordre de l'unité pour les alliages de type n mais est bien inférieur pour ceux de type p. La branche p est alors assurée par un matériau de type Te-Ag-Ge-Sb (tellure, argent, germanium, antimoine). Cependant ces alliages sont appelés à être remplacés par les matériaux, aux performances plus élevées, de structure skutterudite.

## *Hautes températures (+1000K)*

Dans les hautes températures les alliages utilisés sont à base de silicium et de germanium (SiGe). C'est un alliage de ce type qui fut utilisé par les sondes spatiales Voyager pour les fournir en électricité.



Variation du facteur de mérite en fonction de la température.

# Nouveaux matériaux

---

De nombreux matériaux thermoélectriques ont été développés à partir des années 1990 pour les raisons expliquées dans le paragraphe intitulé « *la naissance de nouveaux matériaux* ». Il convient donc de consacrer un paragraphe à leur sujet afin de dresser une liste non exhaustive de ceux-ci.

## *Les Skutterudites*

---

Ce sont les plus étudiés depuis 10 ans. Ils ont été identifiés en 1928 par Oftung. Les skutterudites regroupent des composés binaires de compositions  $MX_3$  où M est un atome de métal (cobalt (Co), rhodium (Rh) ou iridium (Ir)) et X un atome de type pnictogène (phosphore (P), arsenic (As) et antimoine (Sb)). Leurs structures laissent 2 emplacements vides permettant d'insérer des espèces dans le réseau. Ce remplissage favorise la modification de  $\sigma$  (conductivité électrique) et de  $\lambda$  (conductivité thermique) permettant une augmentation du facteur de puissance ZT (jusqu'à 1,4).

## *Les clathrates*

---

Ces récents matériaux présentent un fort potentiel thermoélectrique. Inorganiques, le plus souvent composés d'intermétallures, se sont des solides périodiques avec des nano cages dans lesquelles on peut insérer des atomes lourds (terres rares, alcalino-terreux). Les cages remplies ont pour effet de diminuer la conductivité thermique atteignant des valeurs proches de celles du verre ou de la silice. Cependant les clathrates doivent subir des transformations avant de devenir des semis conducteurs.

## *Les oxydes*

---

Les recherches entreprises sur les oxydes date de 1997, année de la découverte du  $Na_xCoO_2$  comme matériau thermoélectrique. Ils présentent une stabilité chimique en atmosphère oxydante particulièrement intéressante. Beaucoup des oxydes ont un coefficient de Seebeck élevé ( $S > 100 \mu V.K^{-1}.m^{-1}$ ) et une conductivité thermique faible ( $\lambda \approx 1 W.K^{-1}.m^{-1}$ ) mais leur utilisation est limitée par une résistance électrique forte.

Les oxydes de type p (à base de cobalt) présentent une performance thermoélectrique élevée et un facteur de mérite de l'ordre de l'unité. Pour l'instant les oxydes de type n ont un ZT inférieur à 1.

## *Les semis Heuslers*

---

Ils se composent de 4 réseaux cubiques faces centrées interpénétrées, dont un des sous réseaux est remplacé par un sous réseaux de lacunes. Ceci favorise la diffusion de phonons et donc diminue la conductivité thermique. Bien que présentant un produit  $S^2\sigma$  très élevé que se soit en type n ou p, sa  $\lambda$  reste encore trop élevée.

## La thermoélectricité demain

# Les applications futures

---

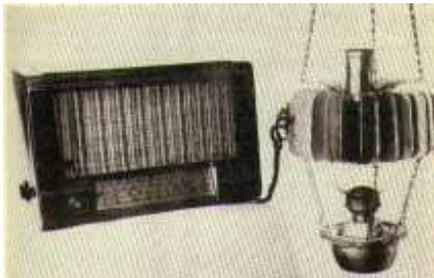
Aujourd'hui la plupart des matériaux ont un ZT proche de 1. Cependant si nous voulions fabriquer un réfrigérateur thermoélectrique concurrentiel il nous faudrait un ZT proche de 3. De plus pour que les générateurs thermoélectriques soient économiquement rentables nous devons approcher un  $ZT > 2$ . Ainsi dans cette partie nous ferons un point sur les applications existantes, sur les recherches engagées ainsi que sur les applications imaginables de la thermoélectricité.

## *Le point sur les applications actuelles*

---

L'application actuelle la plus importante concerne la réfrigération de glacières portatives alimentées par la prise allume cigare d'une voiture et les petits frigos de chambre. En effet ces frigos n'ont pas de compresseur et ne font donc aucun bruit. La société américaine Amerigon a par ailleurs développé un siège de voiture à refroidissement thermoélectrique. Dans le domaine de l'électronique, Apple utilise la thermoélectricité pour refroidir ces puces d'ordinateurs, apportant une fiabilité plus importante que les ventilateurs. Les containers utilisés pour le transport d'organes à transplanter, les applications dans lesquelles les vibrations sont gênantes (les systèmes de guidage laser ou les circuits intégrés) ont eux aussi recours au refroidissement par thermoélectricité. Notons que dans certains cas les convertisseurs sont couplés à des capteurs solaires procurant une autonomie totale aux systèmes de refroidissement.

La première application (vers 1950) en génération d'électricité est sans doute la lampe à pétrole russe alimentant un poste de radio (voir photo ci contre).



Quelques montres thermoélectriques (se rechargeant grâce à la chaleur dégagée par le poignet) ont été commercialisées mais sans grand succès. L'union soviétique a produit des pacemakers jusqu'au début des années 1980 fonctionnant grâce à des capsules de plutonium 238. L'industrie spatiale est sans doute celle qui utilise le plus les générateurs thermoélectriques. Les sondes Voyager utilisent la chaleur produite par la radioactivité

naturelle du dioxyde de plutonium pour fournir l'énergie électrique nécessaire aux instruments et autres systèmes embarqués.

## *Les voies de recherche*

---

La recherche s'oriente, comme expliqué dans les parties précédentes, vers la découverte de nouveaux matériaux. Ces nouveaux matériaux doivent améliorer le rendement de conversion des modules thermoélectriques mais aussi permettre une application à grande échelle de la thermoélectricité et donc de faire baisser son prix de production. Parmi ces recherches, un domaine est en plein essor, se sont les matériaux à dimensions réduites : les couches minces (structure 2D), les nano fils (structure 1D) et les nano poudres (structure 0D), où l'effet des puits quantiques prédomine. Cette voie de développement a été lancée par le professeur Millie Dresselhaus du MIT. Selon lui il faudra 7 à 10 ans avant que les débouchés n'atteignent l'industrie. Ces structures possèdent généralement des propriétés assez différentes des matériaux massifs de même composition. Des améliorations du facteur de mérite ont été prédites théoriquement pour ces matériaux puis confirmées par observation. Ces études ont montré plusieurs phénomènes : les phonons sont fortement diffusés par les joints de grains ce qui induit une baisse de la conductivité thermique, et des phénomènes de type quantique modifient les propriétés de transport électrique. En laboratoire des facteurs de mérite allant jusqu'à 2,5 ont été observés à la température ambiante.

Les applications possibles de la thermoélectricité sont très nombreuses. En effet, au vu des recherches engagées dans ce domaine on peut imaginer la récupération de toute énergie perdue sous forme de chaleur que ce soit dans les cheminées d'incinérateurs, les circuits de refroidissement des centrales nucléaires ou dans les pots d'échappements des véhicules... Dans un moteur de voiture 40% de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Les matériaux thermoélectriques offrent la possibilité de réduire la consommation d'essence en évitant l'usage de l'alternateur. Des capteurs réagissant à un échauffement pourraient aussi être créés. Le capteur à base de matériaux thermoélectriques produirait un courant qui déclencherait un système d'alerte.

De plus en électronique les refroidissements à air et à eau sont devenus insuffisants et pas assez précis. Ainsi nous pourrions refroidir, comme commence à le faire Apple, les ordinateurs grâce à la thermoélectricité ce qui, par ailleurs, réduirait la nuisance sonore de ceux-ci, et permettrait d'améliorer leurs performances. Pourquoi ne pas aussi récupérer la chaleur produite par ces mêmes circuits électriques afin de recharger les batteries de nos appareils portables, permettant de la sorte d'accroître leurs autonomies.

# Conclusion

---

Après avoir dressé un bref historique de la thermoélectricité nous avons décrit les 3 principes la régissant (effet Seebeck, Peltier et Thomson) ainsi que les conséquences que ceux ci engendraient (refroidissement et génération d'électricité).

Nous nous sommes ensuite intéressés à la base des composants thermoélectriques (les matériaux) et nous avons montré comment ils pouvaient être optimisés (diminution de la conductivité thermique), pour enfin dresser une liste non exhaustive des matériaux classiques et des matériaux en voies de développement.

Pour refermer ce sujet nous avons fait un point sur le peu d'applications qui existent actuellement mais nous en avons déduit qu'au vu des recherches engagées sur ce sujet les applications futures devraient être très prometteuses.

La thermoélectricité devrait donc contribuer, avec les nouvelles énergies, à faire face à la crise énergétique ; mais n'oublions pas que la principale réponse à cette crise n'est pas le développement de nouvelles énergies mais le changement de nos habitudes de vie, et la réduction de notre consommation d'énergie. En effet aujourd'hui les nouvelles énergies ne servent pas à réduire la consommation d'énergies fossiles mais à compenser l'augmentation de la demande énergétique mondiale.

# Bibliographie

---

- **David Bérardan**, « Etude de skutterudites de terres-rares (R) et de métaux d (M) du type RM4Sb12 : de nouveaux matériaux thermoélectriques pour la génération d'électricité. », Thèse, Université Paris XII Val de Marne (2004).
- **Guillaume Savelli**, « Étude et développement de composants thermoélectriques à base de couches minces », thèse, Université Joseph Fourier de Grenoble (2007).
- **J. G. Stockholm**, « génération thermoélectrique », Journées Electrotechniques du Club EEA ISBN 2-909968-10-3, Cachan (2002).
- **Alexandre Jacquot**, « Ingénierie des Matériaux et des Micro générateurs Thermoélectriques Planaires», thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine (2003).
- **Claude Godart**, « Thermoélectricité : une nouvelle mine « verte » ? », La revue 3EI n°52, mars 2008, page 3.
- <http://fr.wikipedia.org>
- <http://gdr-thermoelectricite.cnrs.fr>
- [www.amerigon.com](http://www.amerigon.com)
- [www.eneco.com](http://www.eneco.com)
- [www.inbthermoelectric.com](http://www.inbthermoelectric.com)
- [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com)
- Microsoft® Études 2008 [DVD]. Microsoft Corporation, 2007.