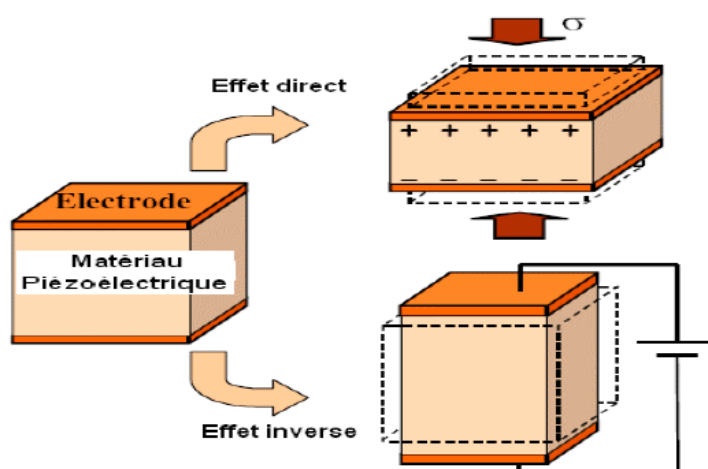


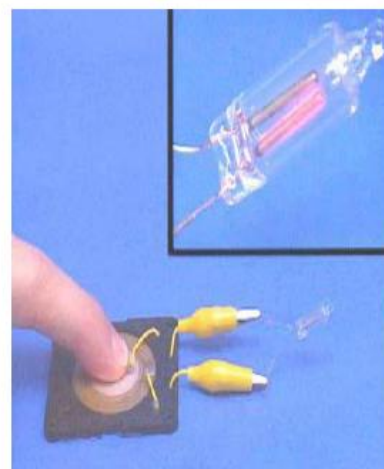
L'effet piézoélectrique

La piézoélectricité caractérise l'aptitude de certains matériaux cristallins de convertir une contrainte mécanique en une énergie électrique et réciproquement.

Il s'agit d'une polarisation électrique induite par une déformation mécanique dans des cristaux appartenant à certaines classes cristallines. Cette polarisation est proportionnelle à la déformation et charge de signe avec elle. Cet effet appelé «effet piézoélectrique direct», est réversible : l'application d'un champ électrique externe induit une déformation mécanique c'est l'effet piézoélectrique inverse.



(a)



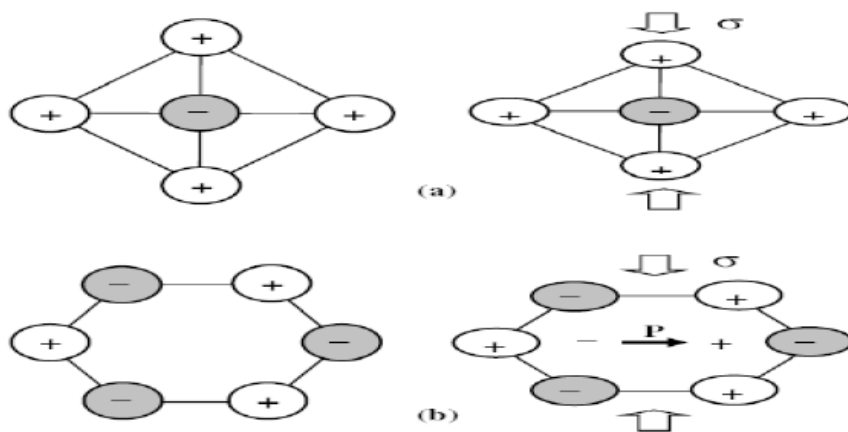
(b)

Schématisation de l'effet de la Piézoélectricité :a) Illustration de l'effet direct et inverse d'un matériau Piézoélectrique, b) L'effet Piézoélectrique direct.

Symétrie et Piézoélectricité

A l'échelle de la maille cristalline, la Piézoélectricité se manifeste par une polarisation de la maille, résultant de la séparation du centre de gravité des charges positives et négatives.

L'origine de l'effet piézoélectrique est liée à la structure et la symétrie cristallines des matériaux. En effet, pour qu'un cristal soit piézoélectrique, il doit être non centrosymétrique c'est-à-dire que les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident pas dans la maille

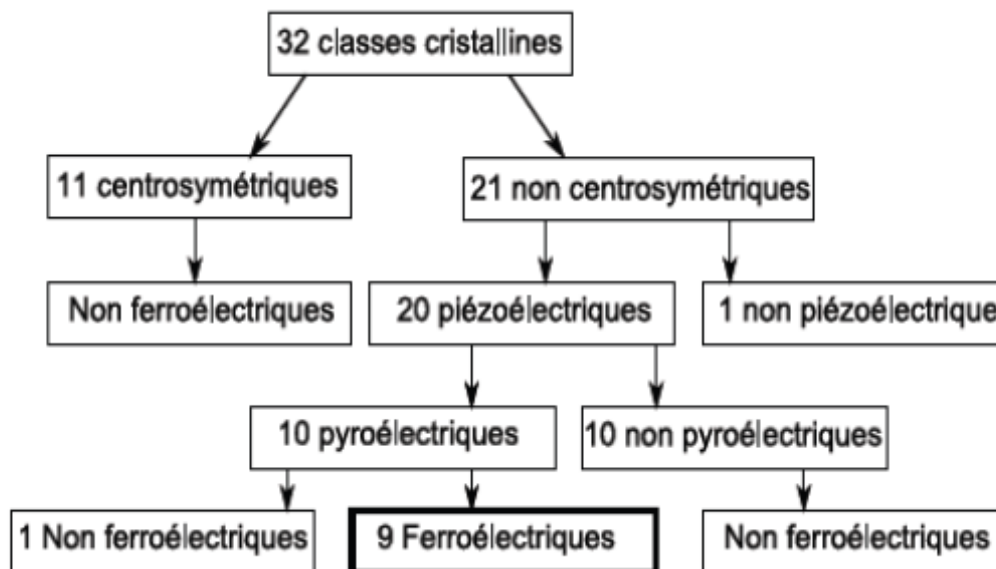


Représentation schématique de l'apparition de la polarisation

(a) Corps centrosymétrique (non Piézoélectrique)

(b) Corps non centrosymétrique (Piézoélectrique)

Sur les 32 classes cristallines, figure, 21 sont dépourvues de centre de symétrie, parmi celles-ci, 20 sont piézoélectriques. Dans ces 20 classes, 10 présentent une polarisation spontanée en l'absence d'un champ extérieur et possèdent une polarisation naturelle selon au moins une direction; elles sont dites pyroélectriques et polaire.



Organigramme des différentes classes cristallines.

La Ferroélectricité

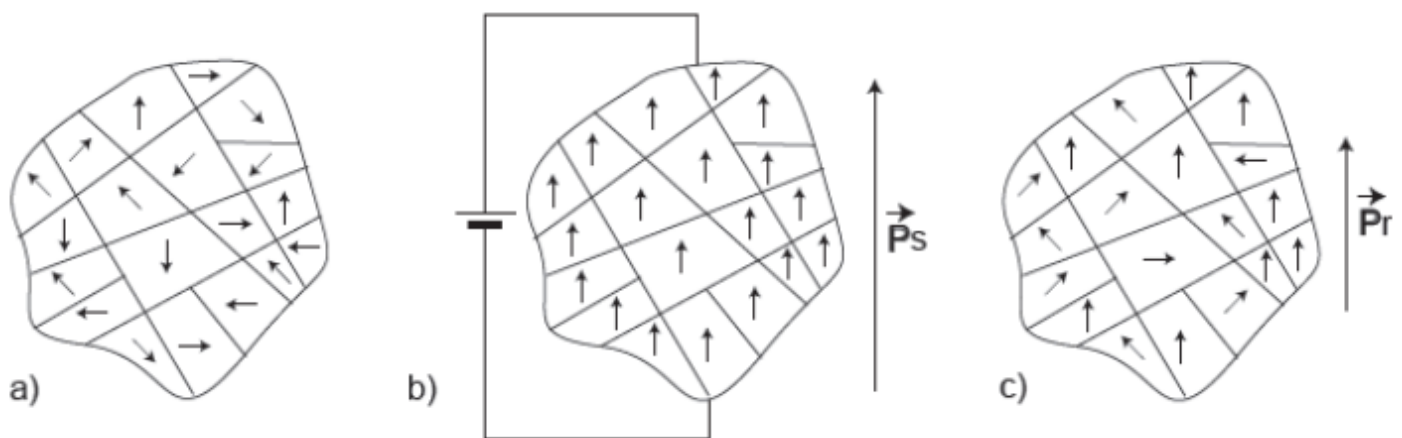
Définition

La Ferroélectricité forme un sous groupe de la pyroélectricité comme la montre la. La direction de polarisation d'un cristal ferroélectrique varie en fonction du champ électrique extérieur. Elle peut être simplement réorientée voire même s'inverser si le champ est suffisamment intense.

Le terme ferroélectrique a été utilisé pour la première fois en 1935, par MULLER pour rappeler le comportement hystérétique de la polarisation électrique macroscopique en fonction du champ électrique appliqué.

Un matériau ferroélectrique ne présente pas de propriété macroscopique piézoélectrique avant polarisation. Une fois polarisé, il devient alors piézoélectrique.

- Du point de vue macroscopique le matériau ferroélectrique "non polarisé " est organisé en différents domaines de polarisation aléatoires dont il résulte une polarisation macroscopique nulle.
- Le matériau soumis à un champ électrique aura pour tendance de réaligner ses différents domaines dans la direction d'application du champ, le matériau est alors macroscopiquement polarisé (polarisé P_s).
- Cet effet de polarisation est "rémanent", c'est-à-dire que lorsque l'on supprime le champ électrique tous les domaines ne retournent pas dans un état d'orientation aléatoire et il existe alors un état de polarisation macroscopique rémanent (P_r).



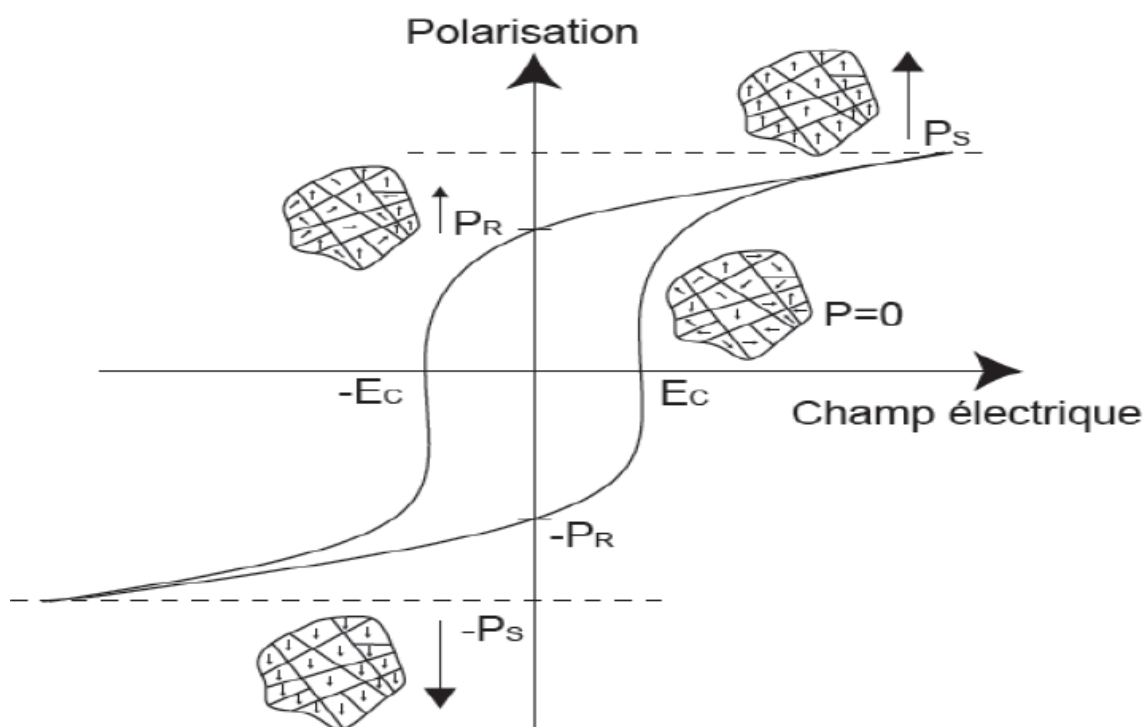
Schématisation des domaines

a) avant polarisation, b) pendant polarisation et c) après polarisation

Cycle d'hystérésis

Le matériau ferroélectrique polarisé possède une polarisation rémanente à champ nul. L'évolution de la polarisation en fonction du champ apparaît sous la forme d'un cycle d'hystérésis $P = f(E)$. Le champ coercitif noté E_c est le champ électrique nécessaire pour réorienter les dipôles du matériau ferroélectrique.

La polarisation rémanente P_r correspond à la valeur de la polarisation à champ nul. Sous des valeurs élevées de champ, la polarisation sature à $\pm P_s$.



Cycle d'hystérésis de la polarisation d'un matériau ferroélectrique.

Un matériau ferroélectrique peut être polarisé si on le soumet à un champ électrique supérieur au champ coercitif. Un matériau ferroélectrique polarisé présente alors des propriétés Piézoélectriques.

Références

E. Boucher .Thèse doctorat, Université de Lyon, 02 ISAL 0088, 2002.

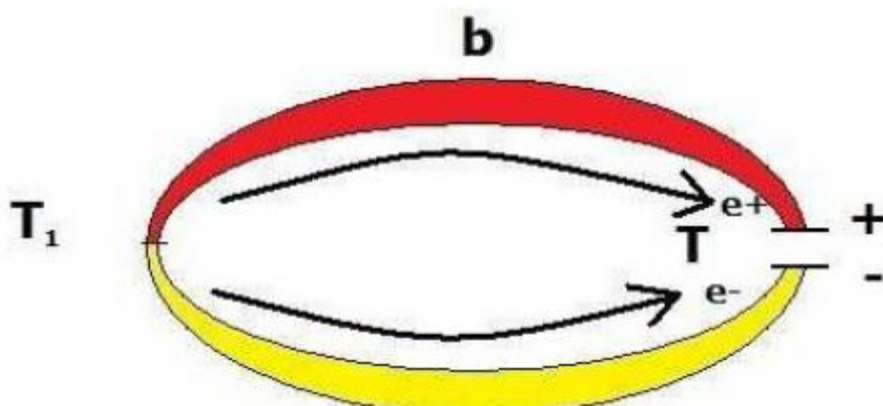
A.HAJJAJI, Caractérisation multi échelle et lois de comportement dans les matériaux ferroélectriques. Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007

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.

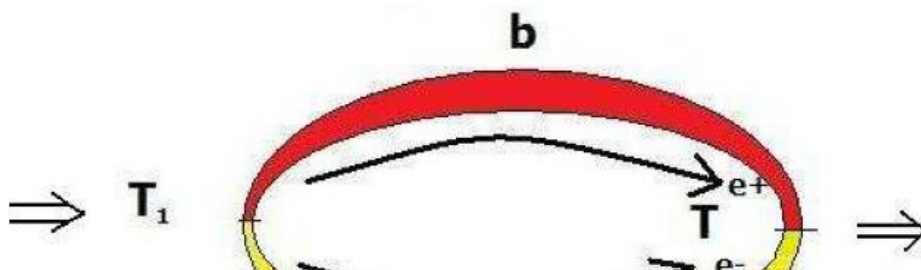
De telles applications sont utilisées en Russie pour alimenter, grâce à une lampe à pétrole, un poste de radio dans les régions reculées n'ayant pas accès à l'électricité.

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

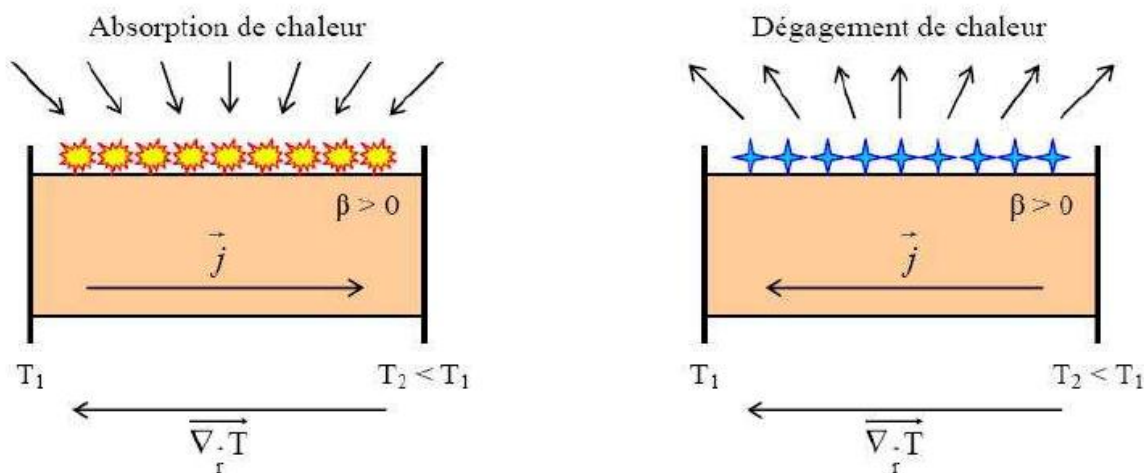
Coefficient Seebeck

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 $\mu\text{V}/\text{K}$ 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 :



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 $\mu\text{V}/\text{K}$ 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 :

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

Les relations de Kelvin

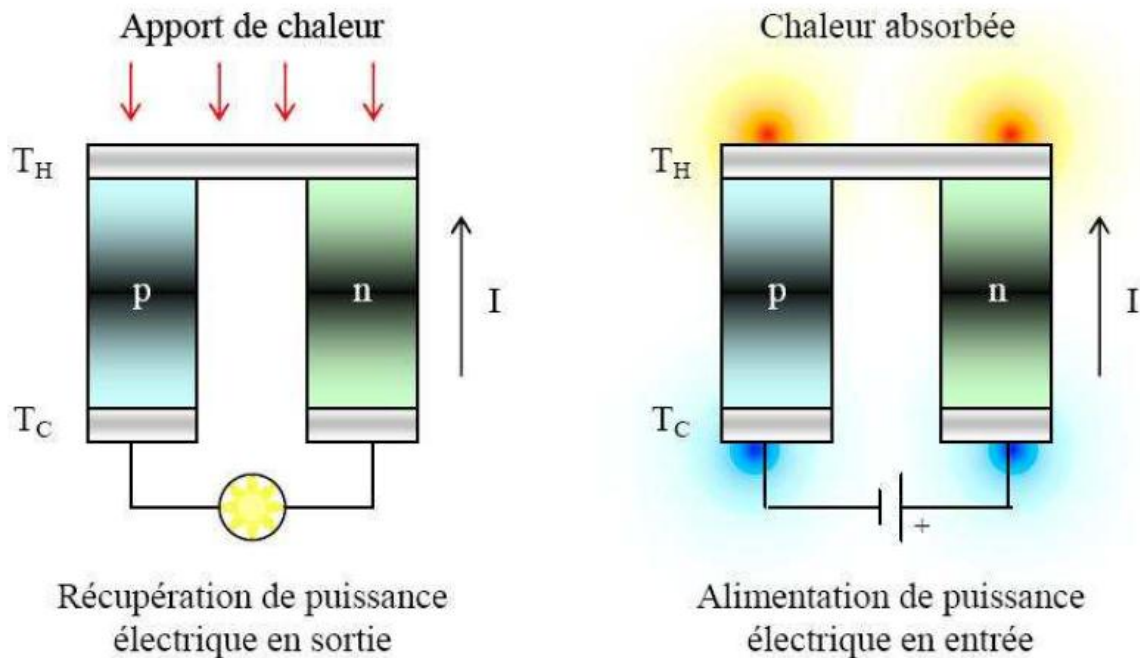
Les trois effets Seebeck, Peltier et Thomson sont liées entre eux par les relations de Kelvin suivantes ;

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

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 semiconducteurs 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 – effet Seebeck

b – effet Peltier

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 :

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

La puissance électrique W s'exprime en fonction de l'effet Seebeck et de la différence de Température ΔT , selon l'équation suivante :

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

Par ailleurs, le flux de chaleur diffusif φ se calcule par le produit de la conductance thermique totale par la différence de température ΔT , soit :

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

Dans cette équation, λ 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 η_c et η_{th} représentent respectivement le rendement de Carnot et le rendement propre au système thermoélectrique :

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

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

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 η . 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.

Références :

- **David Bérardan**, « Etude de skutterudites de terres-rares (R) et de métaux d (M) du type RM_4Sb_{12} : 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.

LA RECUPERATION D'ENERGIE VIBRATOIRE

Définition

La récupération d'énergie est une thématique visant à utiliser l'énergie ambiante (lumière, vibrations, gradients thermiques) présente dans l'environnement pour alimenter des dispositifs électroniques (via des capteurs) de façon à prolonger leur durée de fonctionnement, voire à les rendre totalement autonomes . La récupération d'énergie est généralement mise en oeuvre pour alimenter de petits systèmes électroniques autonomes communicants pour le transport, l'industrie ou l'habitat ,du fait que les puissances récupérées sont assez faibles ; Appliquée au cas de l'Homme, la récupération d'énergie peut atteindre des puissances de plusieurs milliwatts voire de plusieurs watts permettant d'alimenter des systèmes plus complexes tels que les lecteurs MP3, les téléphones portables ou les systèmes de localisation GPS.

Les réseaux de capteurs autonomes

Les récents progrès des techniques de communication sans fil, la miniaturisation des microprocesseurs et l'amélioration des techniques de mesures ont permis l'émergence de réseaux de capteurs autonomes communicants sans fil. Ces réseaux sont constitués d'un nombre conséquent de noeuds miniaturisés qui sont déployés dans un environnement afin d'en mesurer des données caractéristiques. Ces données sont ensuite traitées et communiquées à un noeud central par l'intermédiaire de processus de communication sans fil.

Le développement de ces réseaux autonomes répond à un besoin grandissant de mesurer, d'analyser et de contrôler l'évolution de notre environnement naturel, le comportement de constructions civiles ou militaires, ou encore l'état de santé du corps humain. Parmi les nombreux domaines d'application, citons le domaine militaire qui en premier lieu s'est intéressé aux réseaux de capteurs sans fil dans le but d'étudier les déplacements de troupes ennemies, ou bien d'analyser un terrain de bataille avant de s'y engager.

Développer des capteurs sans fil dans la nature fait également l'objet de recherches dans le domaine environnemental, pour détecter et prévenir des catastrophes naturelles telles que des incendies, pour obtenir une compréhension de l'évolution des habitats naturels et des mouvements de populations animales dans un but de connaissance et de protection des espèces, ou encore dans le milieu agricole afin d'optimiser la gestion des sols.

Les réseaux de capteurs ont également une utilité dans la surveillance des environnements difficiles ou de structures telles que des ponts, véhicules ou environnements industriels, dans le but de détecter des altérations et prévenir des catastrophes. Par exemple, Kim, Fenves et Glaser ont développé un réseau de 64 capteurs autonomes sur le Golden Gate Bridge de San Francisco permettant de mesurer les vibrations du pont et les mouvements importants. Le traitement des données permet ensuite de détecter un changement dans le comportement du système révélateur indirect d'un dysfonctionnement.

Dans le domaine biomédical, l'implantation de capteurs autonomes au sein du corps humain ou de l'habitat permettrait de récolter et stocker en continu des données physiologiques, et de les transmettre à un centre médical compétent, permettant par exemple une surveillance à

distance d'un patient en convalescence sans réduire son autonomie, ou encore facilitant un diagnostic précoce et la prévention de maladies.

En fait, de nombreux dispositifs ne nécessitent que peu de puissance pour fonctionner, c'est par exemple le cas des capteurs et des implants médicaux qui peuvent être alimentés par quelques dizaines de μW . Quant aux appareils nomades tels que les téléphones, les lecteurs MP3, ils sont plutôt dans la gamme 10 mW - 1 W mais peuvent également être rechargés par des systèmes de récupération d'énergie. De plus, la tendance est à une réduction de la consommation électrique des dispositifs électroniques nomades dans le but d'augmenter leur autonomie, ce qui fait que les puissances présentées dans le tableau 1 devraient baisser dans les prochaines années, rendant tous ces dispositifs plus facilement compatibles avec la récupération d'énergie. Le tableau montre les consommations électriques de systèmes électroniques courants et implantés.

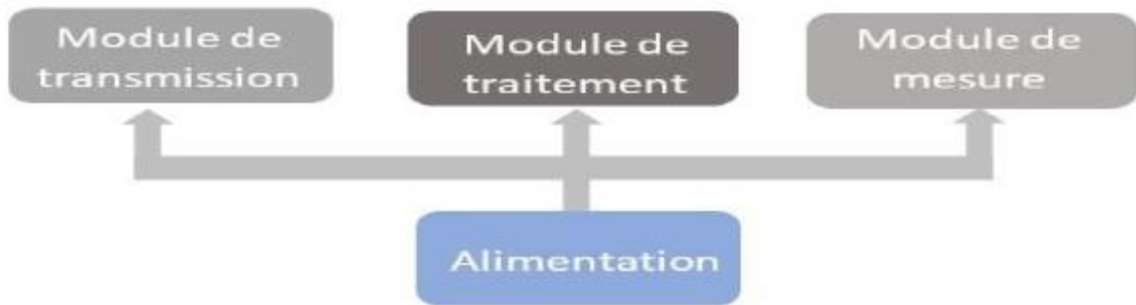
Consommations électriques des systèmes électroniques courants et implantés.

Systèmes électroniques	Consommation moyenne
Lecteur MP3	50 mW - 70 mW
Récepteur GPS	70 mW
Smartphones	0.5 W - 1 W
Accéléromètre 3 axes	30 μ W
Montre	1 μ W - 5 μ W
Capteur de température	30 μ W
LED	1 mW - 10 mW
Microcontrôleur (actif)	1 mW
Microcontrôleur (standby)	3 μ W
Implant auditif	145 μ W - 5.16 mW
Pompe à médicament	400 μ W
Neurostimulateur	50 μ W
Stimulateur musculaire	1.3 mW
Pacemaker	8 μ W

Enfin, d'autres applications incluent la domotique (contrôle efficace de la consommation d'énergie dans les bâtiments en fonction de la localisation des personnes), ou la microchirurgie.

Enjeux de la récupération d'énergie

Un nœud de réseau de capteurs, est composé de quatre parties : une unité effectuant l'acquisition des données (capteur), une unité de traitement des informations (processeur), une unité servant à leur communication (émetteur-récepteur), et une unité de puissance chargée d'alimenter les précédentes fonctions .



Structure d'un nœud de réseau de capteurs

De nombreuses sources d'énergie sont susceptibles de fournir des niveaux de puissance suffisants pour alimenter des systèmes autonomes communicants : l'énergie mécanique résultant de vibrations (charges ou contraintes), l'énergie solaire photovoltaïque issue du soleil, l'énergie électromagnétique, l'énergie thermique ou encore l'énergie chimique issue de processus biologiques sont autant d'exemples d'énergies naturelles ou inhérentes à un processus industriel, qui sont actuellement envisagées pour être conditionnées en production utile. La comparaison de ces différentes sources est délicate car dépendante de nombreux facteurs, et de l'application considérée. Néanmoins des études comparatives classiques ont pu comparer les densités de puissance de plusieurs sources classiques. Des résultats sont répertoriés dans le Tableau

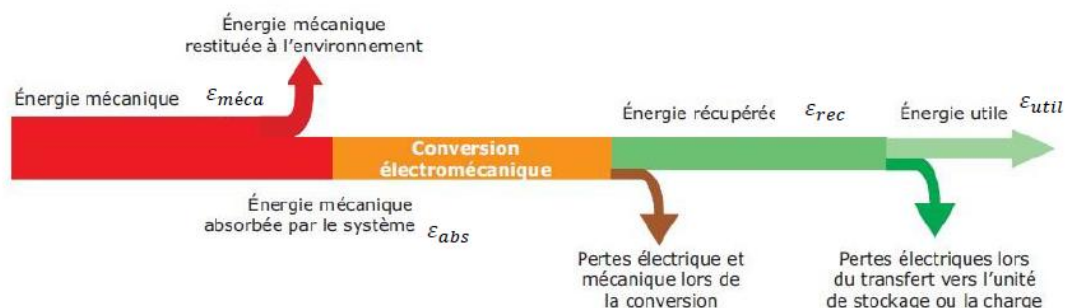
Etude comparative des densités de puissance de plusieurs sources classiques

Technologie	Densité de puissance
Photovoltaïque extérieure (cellule de rendement 15 %, irradiance incidente de 100 mW/cm^2)	$1500 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$
Photovoltaïque intérieure (cellule de rendement 6 %, irradiance incidente de 0.5 mW/cm^2)	$30 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$
Piézoélectrique (inserts dans chaussures)	$330 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$
Vibrations (Petit four à micro-ondes)	$116 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$
Thermoélectrique (pour un gradient de 10° C)	$40 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$
Bruit acoustique (100 dB)	$0.96 \text{ } \mu\text{W/cm}^2$

Il apparaît que l'exploitation de l'énergie des vibrations ambiantes permet d'obtenir potentiellement une forte densité d'énergie après l'énergie solaire. Cette source présente également l'avantage d'être plus simple à mettre en oeuvre (moins de contraintes qu'un système photovoltaïque), et d'être disponible dans de nombreux domaines d'application, notamment dans les milieux industriels, ou de transport, où l'utilisation de réseaux de capteurs autonomes peut être envisagée.

I.2 Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes

Un récupérateur d'énergie à partir de vibrations se compose typiquement de 4 unités : un dispositif mécanique permettant d'optimiser les vibrations mécaniques, un dispositif électromécanique dont l'objectif est de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique ou un transducteur, un circuit électrique d'extraction qui va effectuer la conversion de l'énergie électrique récupérée en énergie électrique exploitable, et enfin un dispositif de gestion et stockage de l'énergie . La structure classique d'un système de récupération d'énergie est présentée à la Fig suivante.

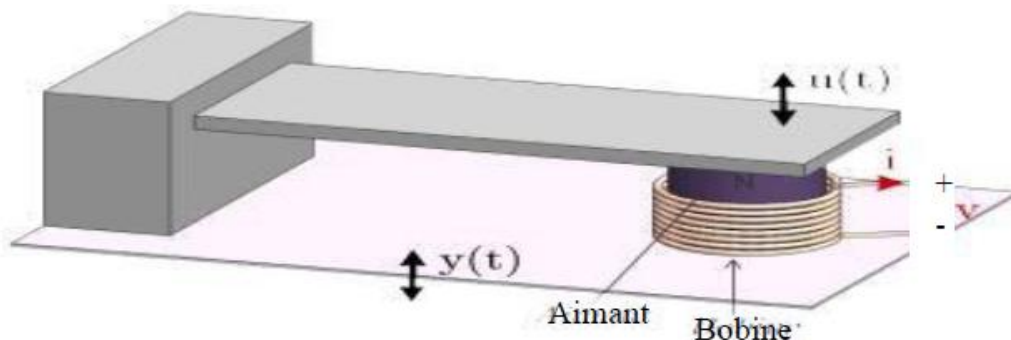


Energies mises en jeu lors du processus de récupération d'énergie

a) Transduction électromagnétique

Un transducteur de type électromagnétique simple se compose d'un ou plusieurs aimants créant un champ magnétique constant, et d'une bobine plongée dans ce champ. Un système mécanique (classiquement résonant) tel qu'une poutre encastrée comme indiqué sur la Fig. 1.5 ou un ressort permet de générer un déplacement relatif $u(t)$ entre l'aimant et la bobine lorsque le système est excité par une vibration $y(t)$. Le changement au cours du temps du flux magnétique

à travers la surface entourée par la bobine crée une tension V proportionnelle à la vitesse de changement du flux magnétique et au nombre de tours N de la bobine, selon la loi de Faraday. Une culasse ferromagnétique peut éventuellement être ajoutée autour de l'aimant dans l'objectif de canaliser les lignes de champ. Il existe de nombreuses manières différentes de disposer le ou les aimants par rapport à la bobine. Les systèmes électromagnétiques présentent l'avantage d'une mise en oeuvre simple, avec des éléments technologiquement bien connus et performants. Ils permettent de générer de forts niveaux de courant au détriment de tensions faibles. Ces systèmes sont en outre bien adaptés pour des vibrations de forte amplitude, telles que celles liées aux mouvements du corps humain. L'intégration à l'échelle micrométrique est à priori difficile, du fait des faibles performances des aimants de tailles micrométriques et de l'augmentation des pertes résistives lors de la miniaturisation. La figure montre un exemple du transducteur électromagnétique.

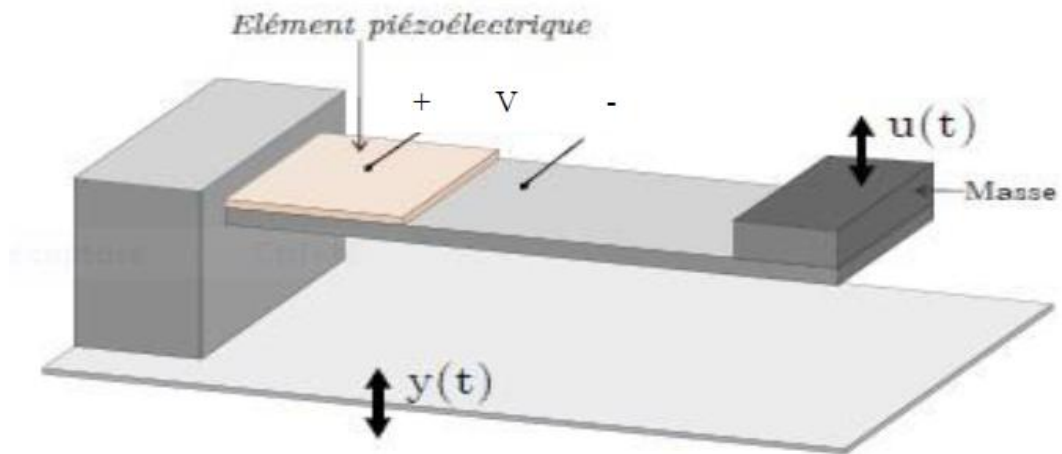


Exemple d'un transducteur électromagnétique

b) Transduction piézoélectrique

Les transducteurs piézoélectriques reposent sur la propriété qu'ont certains matériaux non conducteurs de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (effet direct), et inversement de se déformer mécaniquement sous l'application d'un champ électrique (effet inverse). Dans le cas de la récupération d'énergie, l'effet piézoélectrique direct est généralement exploité en couplant une céramique PZT à une structure résonante qui lui impose une déformation. La structure mécanique est dans la majorité des cas une poutre encastree, sur laquelle une ou plusieurs céramiques sont liées. Les vibrations de la poutre induisent une déformation du matériau piézoélectrique, créant ainsi sa polarisation. Les systèmes piézoélectriques contrairement aux systèmes électromagnétiques produisent de forts niveaux de tensions

pour de plus faibles courants, et sont adaptés à des systèmes à faible amplitude de déplacement. Ils présentent l'avantage d'être plus adaptés aux techniques de fabrications MEMS et facilement miniaturisables. La figure suivante montre un exemple de la structure d'un transducteur piézoélectrique.

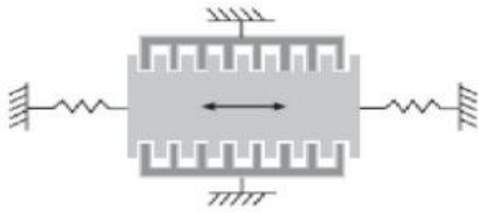


Exemple d'un transducteur piézoélectrique

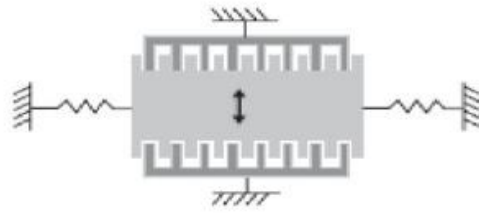
c) Transduction électrostatique

Les générateurs de type électrostatique sont composés de deux plateaux électriques isolés entre elles et préchargés qui vont avoir un déplacement relatif l'une par rapport à l'autre sous l'effet des vibrations extérieures. Si le générateur opère à charge constante, la diminution de la capacité du générateur induite par la variation de distance entre les deux plaques, aura pour effet d'augmenter la tension aux bornes du générateur, et de ce fait augmente l'énergie potentielle stockée dans le condensateur. De la même manière, en fixant la tension, le mouvement des plaques a pour effet la production d'un courant dû au mouvement des charges.

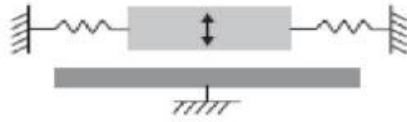
Malgré une densité de puissance à priori moins importants qu'avec d'autres modes de transduction, et l'inconvénient de nécessiter une source de tension annexe, les générateurs de ce type présentent l'avantage d'être particulièrement bien adaptés à des réalisations de dimensions microscopiques, et ont donc fait l'objet de nombreuses réalisations avec des techniques de fabrication de type MicroElectroMechanicSystem(MEMS). La figure suivante montre des différents mécanismes électrostatiques.



a convertisseur dans le plan à entrefer variable (*In plane gap closing*)



b convertisseur dans le plan à chevauchement variable (*In plane overlap*)



c convertisseur hors plan à entrefer variable (*Out of plane gap closing*)

Thèse : RAHARINJATOVO Kiady