

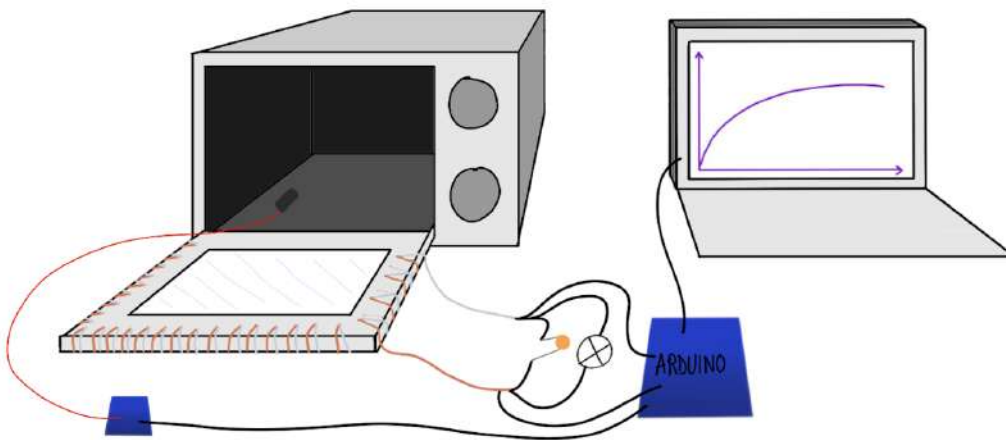


XXIXème édition des Olympiades de Physique



- Edition 2021-2022 -
Equipe O du Lycée Blomet
Novembre 2021 - Janvier 2022

Mémoire : Une énergie Eco-Seebeck



Membres du projet

Marie Valenciennes
Timothée Serin
Chloé Segond
Pierre Quintart
Tobias Libreros
Inès Deparis

Professeur encadrant

Nadia Djebbar

Sommaire

Introduction	3
PARTIE 1 : Théorie de l'effet Seebeck	5
1.A - L'effet Seebeck : à l'échelle macroscopique	5
1.B - L'effet Seebeck : à l'échelle de l'atome	6
1.C - Module Peltier	8
PARTIE 2 : Choix du thermocouple et de son utilisation	9
2.A - Choix du thermocouple	9
2.B - Nombre de jonctions et température	11
2.C - Facteurs de rendement	12
PARTIE 3 : Conception, réalisation et résultats du four	15
3.A - Réalisation du four	15
3.B - Dispositif de lecture des résultats	17
3.C - Interprétation des résultats et applications possibles	19
En conclusion	20

Introduction

Tandis que 90% de la population congolaise n'a pas accès à une source d'électricité de manière quotidienne, le gaspillage énergétique électroménager s'élève à plus de 13% dans un ménage européen moyen. Ces fortes disparités énergétiques nous interrogent sur les moyens d'utiliser nos énergies, dans un souci d'économie et de partage des ressources disponibles.

Pas besoin de chercher bien loin pour trouver des pertes énergétiques dans notre vie de tous les jours : l'important dégagement de chaleur à l'ouverture d'un four, en fin de cuisson, nous rappelle que notre consommation énergétique du quotidien n'est pas exempte de gaspillage. Nous avons donc cherché à mettre en place un dispositif qui convertirait une partie de cette énergie thermique gaspillée en une énergie électrique réutilisable.

Pour ce faire, l'effet Seebeck nous vient en aide. Phénomène physique découvert par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck en 1821, il fait qu'une différence de température entre deux conducteurs électriques ou semi-conducteurs électriques différents génère une différence de potentiel électrique entre les deux matériaux. Ainsi, si la température entre ces corps conducteurs est différente, une tension sera produite.

Le système que nous proposons poursuit donc l'objectif de convertir l'énergie thermique gaspillée du four en énergie électrique, une énergie Eco-Seebeck. Pour récupérer cette énergie gaspillée, nous nous proposons de construire des modules Seebeck, sur la base de modules Peltier, capables, à notre échelle, de convertir cette énergie thermique en énergie électrique.

Ainsi, notre étude poursuit un double objectif : sensibiliser à l'enjeu énergétique, au gaspillage de l'énergie et aux solutions pour le limiter, tout en appliquant de manière pratique l'effet Seebeck. Au programme : physique, thermodynamique, électricité, mathématiques et informatique...

PARTIE 1 : Théorie de l'effet Seebeck

1.A - L'effet Seebeck : à l'échelle macroscopique

Notre projet éco-Seebeck repose avant tout sur l'effet du même nom. Découvert en 1821 par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck, l'effet Seebeck s'inscrit dans le domaine de la thermoélectricité.

Assez simplement, cet effet revient à l'apparition d'un différentiel de potentiel dû à un différentiel de température. Lorsqu'un conducteur est chauffé à l'une de ses extrémités, les électrons libres s'y déplacent vers l'extrémité la plus froide (→ Figure 1).

Cependant, deux métaux différents possèdent des conductivités thermiques et électriques également différentes. En créant deux jonctions entre deux métaux différents (thermocouple), en chauffant l'une et en refroidissant l'autre, une différence de potentiel va apparaître entre les deux extrémités (→ Figure 2). En cas de fermeture du circuit, un courant électrique continu circule.

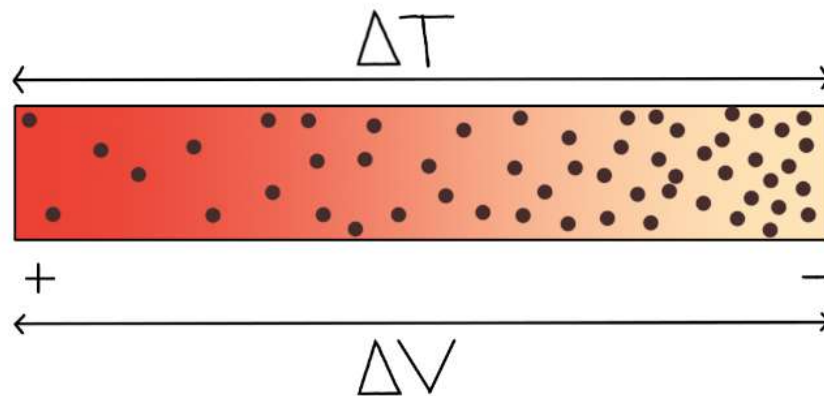


Figure 1 - Densité des porteurs de charges au niveau de l'extrémité chaude et de l'extrémité froide.

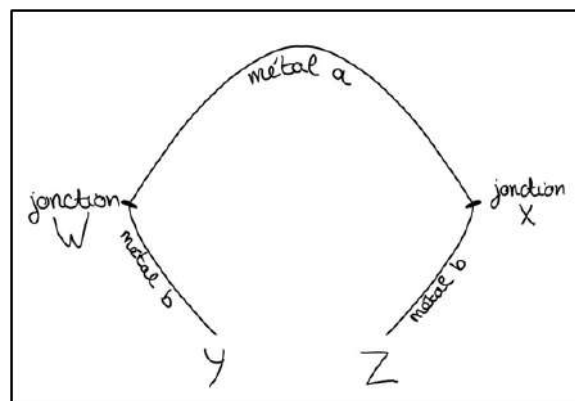


Figure 2 - Jonctions et différence de potentiel entre les points Y et Z.

La différence de potentiel qui apparaît est proportionnelle à la différence de température entre les deux jonctions. La constante de proportionnalité est appelée coefficient Seebeck¹ (s'exprimant en V.K-1) et se calcule par la relation suivante :

$$S_{AB} = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_Y - V_Z}{T_W - T_X}$$

Avec :

S_{AB} le coefficient Seebeck du couple de matériaux AB

ΔV la différence de potentiel mesurée

ΔT la différence de température entre les jonctions

1.B - L'effet Seebeck : à l'échelle de l'atome

Pour mieux comprendre le comportement des matériaux, évoquer la théorie des bandes semble nécessaire (→ Figure 3).

La conductivité des matériaux est déterminée par les électrons de la bande de valence et ceux de la bande de conduction. Les électrons qui se trouvent dans la bande de valence n'ont pas assez d'énergie pour se détacher du noyau, mais peuvent commencer à circuler autour de deux noyaux rapprochés, créant ainsi des liaisons covalentes. Les électrons qui se trouvent dans la zone de conduction possèdent une assez grande énergie, ce qui leur permet de se détacher de leur noyau ; on les appelle électrons libres.

Matériaux conducteurs

La bande de valence et la bande de conduction se chevauchent. Une simple agitation thermique permet aux électrons de "passer" d'une bande à l'autre. Les électrons libres circulent ainsi dans tout le corps d'une manière aléatoire. Leur mouvement s'ordonne en présence d'un champ électrique ; on obtient un courant électrique.

Matériaux isolants

La bande de valence est complètement occupée, tandis que la bande de conduction reste vide. Une large bande dite interdite crée un gap important à franchir ; sous des conditions normales, rares sont les électrons de valence recevant assez d'énergie pour passer d'une bande à l'autre². En conséquence, la conductivité électrique des isolants est très faible.

Matériaux semi-conducteurs

La largeur de la bande interdite est faible. Le gap peut être franchi par certains électrons à la suite d'un faible apport d'énergie. Une fois dans la bande de conduction, les électrons deviennent mobiles, à l'image d'un conducteur. Couplés aux "trous" de charge positive qu'ils laissent en quittant la bande de valence, ces électrons assurent la conduction dans les corps semi-conducteurs.

¹ Seul peut être calculé le coefficient Seebeck d'un couple de matériaux. Dans le cas d'un matériau seul, l'utilisation d'un coefficient Seebeck de référence $S_{réf}$ s'impose. Ce dernier s'obtient grâce aux matériaux supraconducteurs, dont le coefficient Seebeck est nul à 0K. Le coefficient Seebeck du matériau est ainsi calculé par la relation suivante : $S_{matériau} = S_{réf} - S_{couple}$

² Pour permettre le passage des électrons de valence, il faudrait alors porter le matériau à très forte température (de l'ordre de plusieurs centaines de degrés, ou le soumettre à des photons très énergétiques - de type UV par exemple).

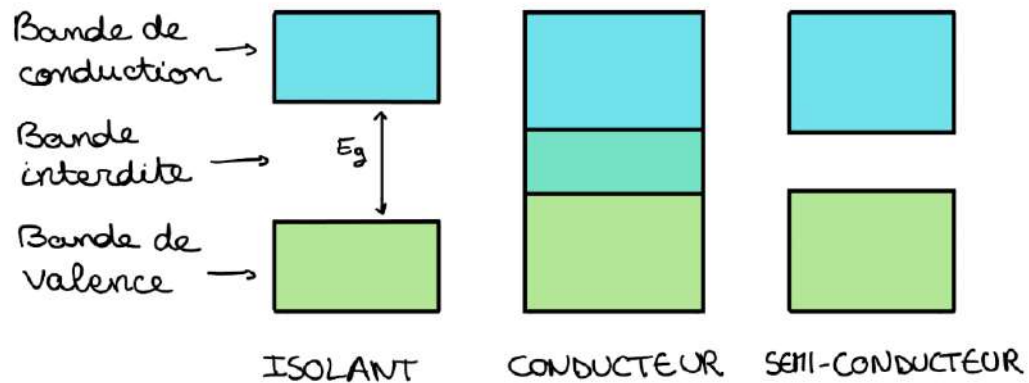


Figure 3 – Illustration imagée de la théorie des bandes.

Complément : deux types de dopage

La pratique du dopage consiste à implanter des atomes nommés “impuretés” au sein d’un semi-conducteur intrinsèque (non dopé et ayant peu d’impuretés). L’introduction de plusieurs impuretés va conduire à l’apparition de nouveaux états d’énergie accessibles à l’intérieur des bandes interdites, rendant le gap plus facile à franchir.

Dopage de type N : Pour doper un semi-conducteur intrinsèque, on introduit des atomes pentavalents, comme le phosphore P, possédant 5 électrons de valence. Quatre électrons vont former des liaisons covalentes avec les atomes voisins et le cinquième électron va se retrouver libre dans la bande de conduction, et peut participer ainsi à la conduction électrique dans le matériau. Un matériau dopé de type N présente donc des électrons libres et des charges positives fixes (ions) en nombre identique.

Dopage de type P : On injecte, dans le semi-conducteur intrinsèque, des impuretés trivalentes comme le bore B, auxquelles il manque un électron pour former les quatre liaisons covalentes. Un électron appartenant à un atome de ce semi-conducteur vient combler la place vacante, rendant l’atome trivalent stable et chargé négativement. Un matériau dopé de type P présente donc des lacunes, ou trous libres, et des charges négatives fixes en nombre identique.

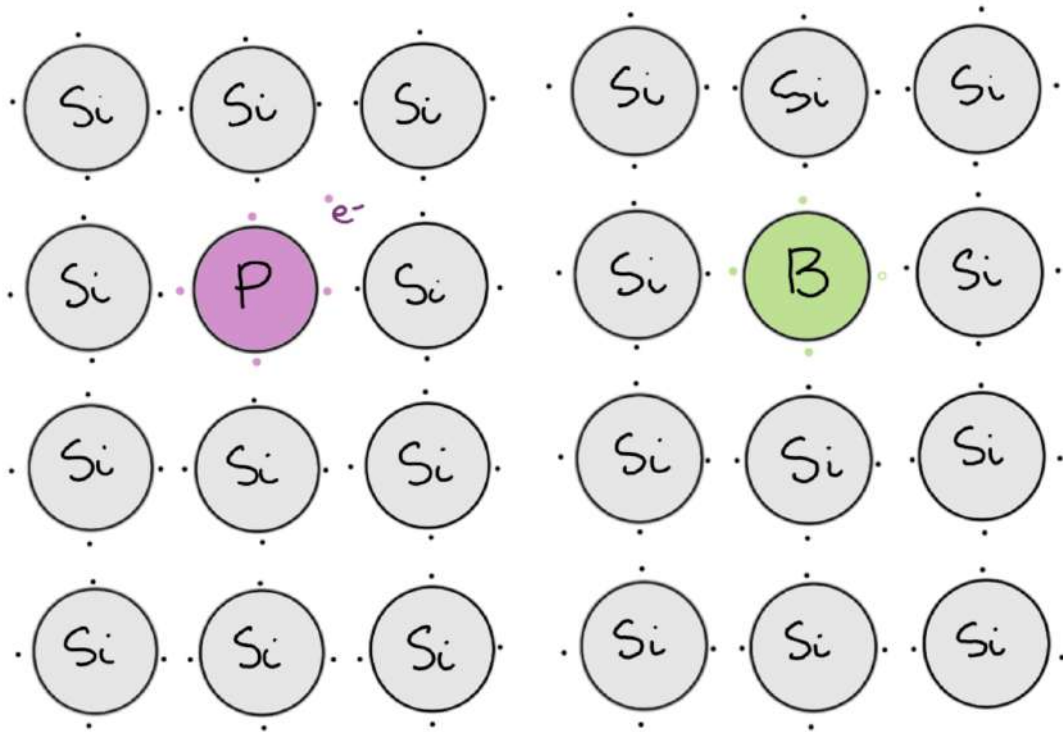


Figure 4 - Exemple du silicium dopé : à gauche, un dopage de type N avec un atome de phosphore, à droite, un dopage de type P avec un atome de bore.

1.C - Module Peltier

Après avoir vu le principe de l'effet Seebeck, évoquons rapidement son application pratique. On retrouve l'effet dans un dispositif de type module Peltier (→ Figure 5), du nom de l'effet réciproque du principe Seebeck : l'effet Peltier. En effet, en distribuant une tension au dispositif, il génère un différentiel de température. On peut cependant l'utiliser dans le sens de l'effet Seebeck : en appliquant un différentiel de température sur ses deux faces, on génère une tension électrique. Notre défi va donc être de recréer un module Peltier capable de récupérer l'énergie thermique gaspillée par le four.

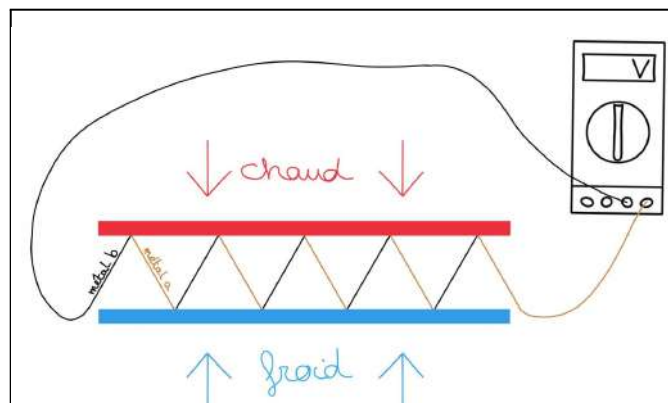


Figure 5 - Schéma du fonctionnement d'un module Peltier.

[Conclusion de la partie 1]

Dans cette première partie, nous avons détaillé la théorie sur laquelle notre projet repose. A l'échelle macroscopique et de l'atome, l'effet Seebeck présente un fort potentiel pour produire de l'énergie à partir d'un différentiel de chaleur. Ce mécanisme est d'autant plus probant que des applications pratiques, telles que le module Peltier, existent déjà. Cependant, afin de mener complètement notre démarche scientifique, nous avons décidé de créer nos propres modules Seebeck. Ces derniers, faute de moyens, ne seront pas composés de semi-conducteurs mais de simples conducteurs. Nous nous proposons d'exposer et d'expliquer le choix du bon thermocouple et de son utilisation dans notre deuxième partie.

PARTIE 2 : Choix du thermocouple et de son utilisation

2.A - Choix du thermocouple

Maintenant que le principe de l'effet Seebeck ainsi que son explication physique sont connus, il faut déterminer quel thermocouple utiliser pour la réalisation des expériences suivantes et pour notre four Eco-Seebeck.

Plusieurs critères entrent en jeu pour déterminer le thermocouple le plus avantageux : le rendement, afin d'obtenir la meilleure puissance électrique possible, le prix, déterminant pour la faisabilité du projet, ainsi que la maniabilité, c'est-à-dire la facilité d'utilisation et d'adaptation du matériau, indispensable en pratique pour monter notre dispositif.

Nous l'avons vu, il est déjà nécessaire de faire un choix entre matériaux conducteurs et semi-conducteurs. Une grande gamme de conducteurs nous est plus ou moins accessible, notamment sous forme filaire, la plus facile d'utilisation. À l'inverse, le choix pour les semi-conducteurs est plus que restreint : le plus accessible est le tellure de bismuth (de formule Bi_2Te_3), et il n'est disponible qu'en grandes quantités (un kilogramme minimum), dépassant largement le budget alloué. Sa forme est de plus peu pratique, cubique, avec une taille ne dépassant pas les deux millimètres de diamètre. Ainsi, nous retenons les conducteurs comme thermocouples pour notre dispositif Eco-Seebeck.

Pour tester différents couples de conducteurs, nous nous sommes procurés sous forme filaire divers matériaux aux coefficients Seebeck variés :

Métaux purs

- Cuivre ($\varnothing 0,32$ mm et $\varnothing 0,8$ mm)
- Nickel ($\varnothing 0,8$ mm)
- Fer ($\varnothing 0,8$ mm)

Alliages

- Constantan (CuNi - 44% de Nickel) ($\varnothing 0,32$ mm et $\varnothing 0,8$ mm)
- Nichrome (NiCr - 80% de Nickel) ($\varnothing 0,32$ mm et $\varnothing 0,8$ mm)

Il vient donc $\binom{5}{2} = 10$ couples à tester. Pour chacun de ces couples, nous réalisons l'expérience suivante:

En série, nous branchons un voltmètre, sur la borne V, un fil de métal b, relié à un fil de métal a, lui-même relié à un autre fil de métal b, lui-même relié à la borne COM du voltmètre. L'une des jonctions entre les fils de métal a et b est immergée dans de l'eau liquide à 0,3°C, tandis que l'autre est chauffée par conduction à 200°C à l'aide d'un banc Kofler³ (schéma et photographie ci-dessous).

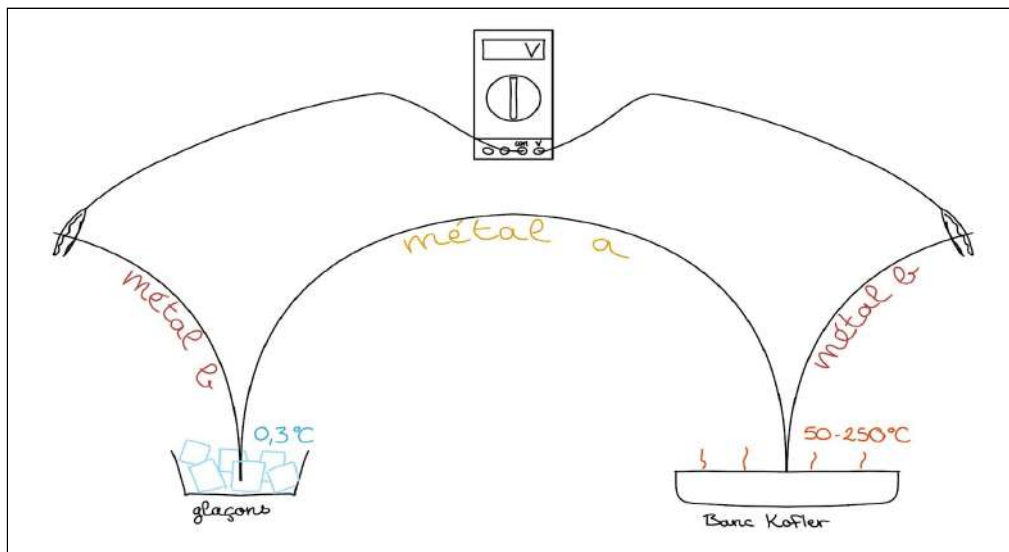


Figure 6 - Schéma du montage de test

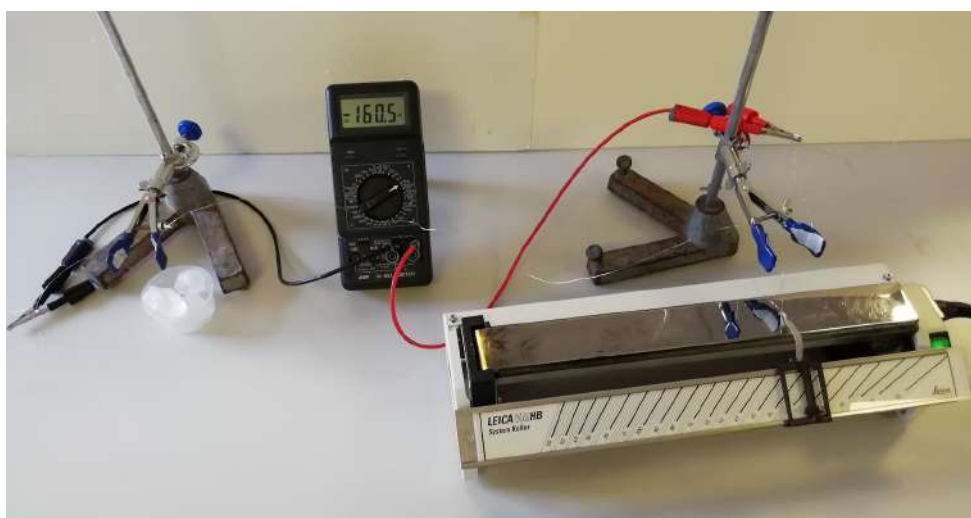


Figure 7 - Photographie du montage

³ Initialement, ces expériences étaient réalisées en chauffant la jonction avec une bougie, la température de la flamme étant mesurée par un thermomètre ; mais face à la fluctuance de la température, l'utilisation d'un banc Kofler étalonné est apparue comme plus précise.

Après réalisation de l'expérience, on obtient le tableau de valeurs suivant⁴ :

Couple de métaux	Tension obtenue (en mV)
constantan / cuivre	7,1
constantan / nickel	2,0
constantan / fer	6,9
constantan / nichrome	0,4
cuivre / nickel	4,7
cuivre / fer	1,2
cuivre / nichrome	0,6
nickel / fer	5,4
nickel / nichrome	5,3
fer / nichrome	0,5

À la lumière de ces résultats, le couple constantan / cuivre apparaît comme le plus prometteur, avec une tension obtenue de 7,1 mV pour un différentiel de température de 473K (200°C).

(→ annexe, partie I - choix du thermocouple)

Cette valeur expérimentale peut se vérifier par la théorie. Nous en avons donné une *approximation* ci-dessus, avec la relation entre le coefficient Seebeck, la différence de température et la différence de potentiel. Ainsi, par une règle de trois :

$$\Delta V = S \times \Delta T = (S(b) - S(a)) \times \Delta T$$

Dans le cas du couple constantan / cuivre :

A.N:

$$\Delta V = |(- 48,5 - 2,9)| \times 10^{-6} \times (200 - 0,3) = 1,0 \times 10^{-2} V$$

Or cette application n'est en réalité qu'une approximation de la tension produite grâce à l'effet Seebeck. Au cours de nos recherches, nous avons découvert cette formule :

$$U = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT$$

⁴ Le voltmètre a une résolution de 0,1 mV. Les tensions relevées étant elles aussi de l'ordre du millivolt, des séries de 5 mesures ont été réalisées pour chaque expérience. Les résultats indiqués sont les moyennes de ces mesures (le tableau de mesure complet peut être trouvé en annexe).

Un problème se posait néanmoins. Nous n'avions aucune méthode mathématique afin de déterminer l'expression des fonctions décrivant l'évolution du coefficient Seebeck, qui dépend du matériau et donc de la température, comme indiqué. Afin d'y remédier, nous avons choisi comme solution une intégration par parties.

En effet, il est possible de rechercher des graphiques décrivant ces évolutions manquantes, puis d'y lire les valeurs des coefficients Seebeck (voir ci-dessous) afin de modéliser finalement ces fonctions comme un certain nombre (correspondant au nombre choisi de parties) de fonctions affines.

Constantan		
Température	Coeff. Seebeck	Coeff. directeur fonction
0	-34	-0,15
20	-37	-0,05
40	-38	-0,05
60	-39	-0,1
80	-41	-0,05
100	-42	-0,05
120	-43	-0,085
140	-44,7	-0,065
160	-46	-0,075
180	-47,5	-0,05
200	-48,5	

Cuivre		
Température	Coeff. Seebeck	Coeff. directeur fonction
0	1,72	0,0115
20	1,95	0,004
40	2,03	0,008
60	2,19	0,0075
80	2,34	0,004
100	2,42	0,0065
120	2,55	0,005
140	2,65	0,004
160	2,73	0,0045
180	2,82	0,004
200	2,9	

Une fois ces équations de fonctions déterminées, il suffit de calculer une intégrale pour chaque plage de température, et d'additionner le tout.

Ex : ici, l'étendue de températures 0-200°C a été découpée en 10 plages de 20°C.

Calculer l'intégrale de la 1ère partie revient à effectuer le calcul suivant :

$$\int_0^{20} ((0,0115x + 1,72) - (-0,15x - 34))dX, \text{ ce qui équivaut à } 746,7.$$

On obtient alors les résultats suivants, pour une intégration en 10 et en 5 parties :

Partie correspondante	Résultat
1	746,7
2	746,8
3	772,4
4	864,9
5	811,6
6	838,7
7	948,4
8	921,4
9	984,7
10	919,6
Total	8555,2

Partie correspondante	Résultat
1	1515
2	1627,4
3	1649,8
4	1874
5	1909,4
Total	8575,6

Les coefficients Seebeck utilisés étant en $\mu V/K^{-1}$, multiplier ces valeurs finales par 10^{-3} permet de déterminer un résultat théorique en mV.

Dans le cas des 10 parties, ce résultat vaut **8,55 mV**, contre **8,58 mV** pour 5 parties intégrées. Ceci tend à montrer que, plus le nombre de parties intégrées est important, plus le résultat s'affine et diminue. D'une manière plus générale, cette formule apparaît donc comme bien plus précise que la 1ère et, de surcroît, en cohérence avec nos résultats expérimentaux.

2.B - Nombre de jonctions et température

2.B.1 - Nombre de jonctions

Tout d'abord, il faut noter que, avec un seul couple de métaux, la tension générée est de l'ordre de quelques millivolts. Pour tenter d'obtenir un différentiel de potentiel exploitable, il faut recourir à la loi d'additivité des tensions, stipulant que la tension aux bornes d'un ensemble de dipôles récepteurs associés en série est égale à la somme des tensions aux bornes de chacun des dipôles. Autrement dit, plus il y a de jonctions associées en série, plus la tension produite sera grande. Pour vérifier cette loi, on réalise l'expérience suivante :

On assemble plusieurs séries de fils alternés constantan / cuivre. Pour chaque série, on augmente de deux le nombre total de fils. Ainsi, la première série ne possède que 2 jonctions, la deuxième 4, et ce jusqu'à 16 jonctions. Alternativement, la première jonction est immergée dans de l'eau à 0,3°C, tandis que la suivante est à nouveau chauffée par conduction à 200°C à l'aide d'un banc Kofler étalonné⁵.

(→ annexe, partie 2.1 - Impact du nombre de jonctions sur la tension produite)

2.B.2 - Influence de la température

On peut ensuite se demander quelle est l'influence de la température pour une production de tension. Pour cela, on réalise un étalonnage en fonction de la température : On assemble une série de fils constantan / cuivre, avec, alternativement, un fil de cuivre, un fil de constantan et un fil de cuivre. On a donc deux jonctions : l'une est immergée dans de l'eau à 0,3°C, l'autre est chauffée par conduction à 200°C à l'aide d'un banc Kofler étalonné.

(→ annexe, partie 2.2 - Mesure de la tension en fonction de la température pour les 5 meilleurs thermocouples)

2.C - Facteurs de rendement

L'expérience précédente a permis de déterminer quel thermocouple utiliser, et comment. Pour réaliser notre dispositif Eco-Seebeck, il reste encore une multitude de facteurs à étudier pour déterminer ceux qui influent sur le différentiel de potentiel généré par les thermocouples.

⁵ Le montage étant en série, isoler chaque fil les uns des autres se révèle rapidement complexe : puisque les fils sont dépourvus de gaine, ils doivent chacun être orientés de façon à ce qu'ils ne se touchent pas, alors même qu'ils partagent la même source de chaleur : la borne 200°C du banc Kofler. De même, toutes les jonctions qui arrivent sur ce point doivent aussi être isolées de la plaque du banc Kofler, ce qui est fait en insérant entre les jonctions et la plaque une fine couche de papier. Enfin, pour l'autre moitié des jonctions, chacune est immergée dans de l'eau à 0,3°C.

(→ annexe, partie III - Écarter les facteurs de confusion)

2.C.1 - Longueur des fils

Il faut tout d'abord déterminer si la longueur des fils influe sur le rendement du dispositif. Pour cela, on réalise donc l'expérience suivante :

On assemble 4 séries de fils constantan / cuivre, avec, alternativement, un fil de cuivre, un fil de constantan et un fil de cuivre. On a donc deux jonctions : l'une est immergée dans de l'eau à 0,3°C, l'autre est chauffée par conduction à 200°C à l'aide d'un banc Kofler étalonné. Pour chacune de ces 4 séries, la longueur des fils qui les composent prend une valeur différente : les fils de la première série ont une longueur de 10 cm, ceux de la deuxième 20 cm, 40 cm pour la troisième et 80 cm pour la quatrième.

Après avoir réalisé l'expérience, on obtient les valeurs suivantes :

Longueur des fils (en cm)	Tension produite (en mV)
40	7,5
80	7,4

On peut donc en conclure que la longueur des fils n'influe pas, ou très peu, sur le rendement des thermocouples.

(→ annexe, partie 3.2 - Longueur des fils)

2.C.2 - Longueur de la jonction

On peut également se demander si la longueur de la jonction a une quelconque influence. Pour le déterminer, on réalise l'expérience suivante :

On assemble 4 séries de fils constantan / cuivre, avec, alternativement, un fil de cuivre, un fil de constantan et un fil de cuivre. On a donc deux jonctions : l'une est immergée dans de l'eau à 0,3°C, l'autre est chauffée par conduction à 200°C à l'aide d'un banc Kofler étalonné. Pour chacune de ces 4 séries, la longueur des jonctions prend une valeur différente : 2,0 cm, 1,0 cm, 0,5 cm, 0,2 cm⁶.

Après avoir réalisé l'expérience, on obtient les valeurs suivantes :

Longueur de la jonction (en cm)	Tension mesurée (en mV)
2,0	5,7
1,0	6,6
0,5	7,6
0,2	7,6

⁶ Chacune des séries de fils est testée 5 fois. Les résultats affichés sont les moyennes de chaque série de mesures (les résultats complets sont trouvables en annexe).

On peut donc en conclure que plus la longueur de la jonction est courte, plus la tension mesurée est élevée. Cependant, il n'est techniquement pas possible d'avoir des jonctions de 0,1 ou 0,2 cm. On choisit donc de réaliser des jonctions d'une longueur de 0,5 cm.

(→ annexe, partie 3.3.2 - Longueur de la jonction)

2.C.3 - Epaisseur des fils

Enfin, il reste à déterminer si l'épaisseur des fils a un impact. Pour cela, on réalise encore une fois deux séries de fil constantan / cuivre / constantan. On a donc deux jonctions : l'une est immergée dans de l'eau à 0,3°C, l'autre est chauffée par conduction à 200°C à l'aide d'un banc Kofler étalonné. Les fils de la première série ont une épaisseur de 0,3 mm, tandis que ceux de la deuxième série en ont une de 0,8 mm⁷.

Après avoir réalisé l'expérience, on obtient les valeurs suivantes :

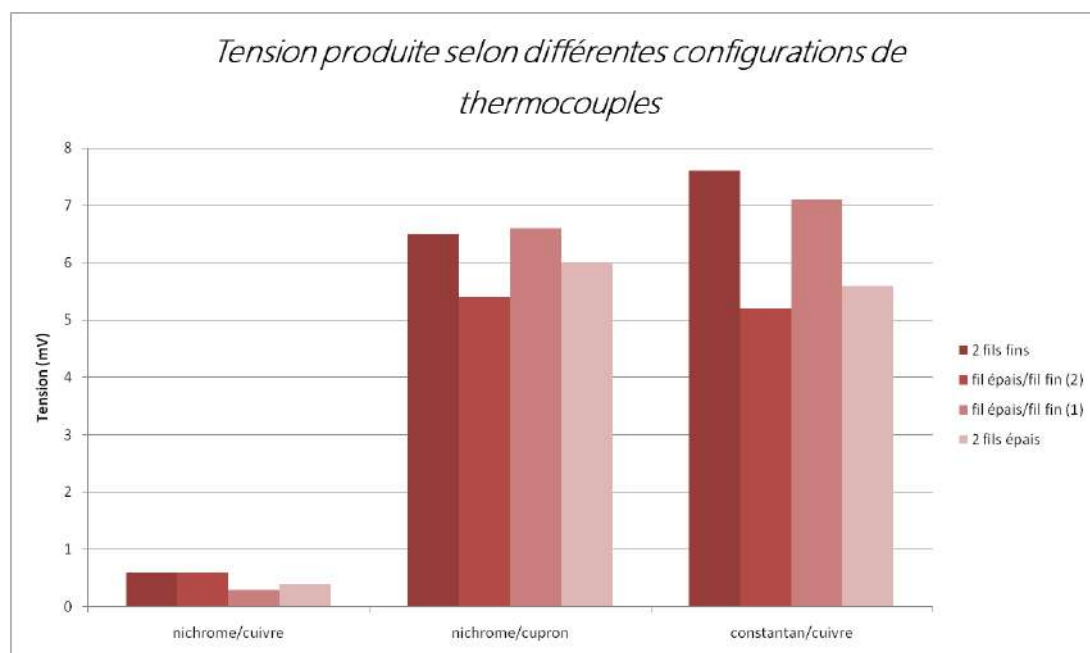


Figure 8 - Tension produite en fonction de l'épaisseur des thermocouples.

On remarque que les valeurs sont globalement cohérentes. Les différences s'expliquent probablement par le fait qu'il est plus difficile de chauffer uniformément la jonction quand le thermocouple est constitué de fils épais. On peut donc conclure que l'épaisseur des fils utilisés n'influe pas sur la tension produite⁸. Dans un souci de praticité, on utilisera des fils fins pour la suite du projet.

⁷ Chacune des séries de fils est testée 5 fois. Les résultats affichés sont les moyennes de chaque série de mesures (les résultats complets sont trouvables en annexe).

⁸ Si l'épaisseur des fils n'influe pas sur la tension, on peut en revanche conjecturer qu'il n'en est pas de même pour l'intensité. En effet, on rappelle que $I = Ne / \Delta t$, avec Ne le nombre d'électrons traversant la tranche du matériau parcouru par le courant électrique, et Δt la durée pendant laquelle on mesure ce flux d'électrons. Par conséquent, à tension égale, si le diamètre de cette tranche augmente, alors le nombre d'électrons parcouru augmente aussi.

(→ annexe, partie 1.4 - Tension obtenue en fonction du thermocouple testé)

[Conclusion de la partie 2]

Dans cette deuxième partie, nous avons cherché à déterminer avec le plus de précision possible lequel des thermocouples nous permettrait de mener à bien notre entreprise. Il s'est avéré que le thermocouple cuivre/constantan présente les caractéristiques les plus avantageuses. Il s'agit alors de traduire cette étude par son application pratique, c'est-à-dire la conception du four et l'affichage des résultats, à l'aide d'une carte Arduino et de graphiques dynamiques Python.

PARTIE 3 : Conception, réalisation et résultats du four

3.A - Réalisation du four

En première partie, nous avons exploré la théorie de l'effet Seebeck. Après expérience, nous avons choisi comme thermocouple le couple constantan / cuivre. Il a de plus été déterminé que la longueur d'une jonction devait être la plus petite possible. D'un point de vue pratique, une longueur de jonction de 5 mm semble la plus adaptée : elle est techniquement réalisable, tout en étant très courte. Reste maintenant à mettre en place notre four Eco-Seebeck.

Au fur et à mesure de notre projet, la forme à donner à notre module Peltier modifié a largement évolué. Initialement, nous comptions réaliser une sorte de module Peltier cylindrique, placé directement à l'intérieur du four, avec, en son sein, un dispositif de refroidissement. Devant la complexité presque superflue du dispositif, nous avons ensuite imaginé retirer la porte du four, et la remplacer par un module Peltier de grande taille. Cependant, face à la difficulté de réalisation, notamment au niveau de l'isolation, l'idée a rapidement été abandonnée.

Finalement, l'idée est venue de faire passer nos thermocouples non pas à travers la porte du four, mais autour. La technique présente l'avantage d'être relativement facile à mettre en œuvre, sans intervention directe sur le four en lui-même. Cependant, il reste compliqué et peu modulable de fixer directement des fils sur la porte du four : puisque le circuit est en série, il faut non seulement isoler les fils les uns des autres, mais aussi du reste de la porte, composée en partie de métal. De plus, l'inconvénient majeur d'un circuit en série réside dans sa difficulté de modulation : si un faux contact se fait à n'importe quel endroit du circuit, l'ensemble du dispositif est dysfonctionnel.

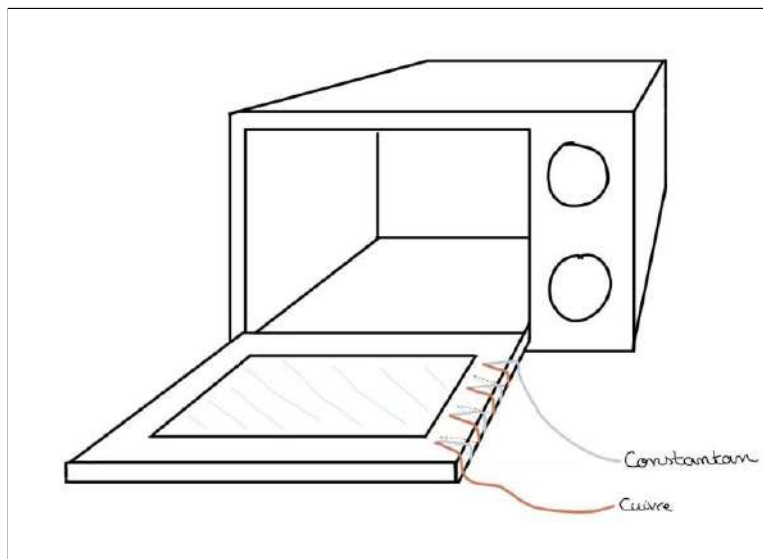


Figure 9 - Schéma du dispositif initialement prévu.

Pour parer au problème, nous avons décidé de réaliser des petits modules, chacun composés de dix couples de fils thermocouples, isolés entre eux et de l'extérieur, que nous relierons par la suite entre eux. Ces modules doivent répondre aux exigences suivantes : être relativement faciles à produire, flexibles, isolants et résistants à une chaleur de 200°C. Plusieurs techniques ont été mises au point : d'abord, après avoir "tressé" les couples, les envelopper dans un scotch type électricien, puis réaliser des "rails" de silicone, comme celui utilisé pour les moules de cuisson, et y encastrer les fils. La deuxième méthode, plus longue mais plus sûre, a été retenue pour la réalisation du four.



Figure 10 - Différents prototypes réalisés.

Reste enfin un problème : comment stocker l'énergie ? Il faut en effet reconnaître que la tension délivrée est assez fluctuante, puisque la température à l'intérieur du four peut elle aussi varier de quelques degrés. Il faut donc intégrer à notre montage un dispositif permettant d'assurer à la fois un stockage temporaire de l'énergie et une libération d'énergie constante. Pour cela, nous nous tournons vers des condensateurs. Ces composants électroniques ont la particularité de pouvoir stocker une partie de l'énergie électrique produite par notre dispositif, et de pouvoir la libérer dans le circuit lorsque la puissance délivrée par notre four est insuffisante.

3.B - Dispositif de lecture des résultats

Nous avons souhaité mettre en place un suivi dynamique de l'évolution de la tension et de la température. Pour cela, nous avons utilisé deux modules Arduino. La température et la tension sont respectivement mesurées par un microcontrôleur chacun. (Nous utilisons deux ordinateurs afin d'éviter d'éventuelles interférences).

Pour mesurer la température à l'intérieur du four, un thermocouple de type k est utilisé. Ce thermocouple permet de générer une tension qui varie en fonction de la température du milieu dans lequel il se trouve. Ainsi, plus la température du milieu sera importante, plus la tension produite sera élevée. Cependant, ces tensions produites restent faibles : elles sont donc augmentées par un amplificateur avant d'être transmises au microcontrôleur. Un calcul sera alors réalisé par l'ordinateur afin de retrouver la valeur de la température à partir de la tension reçue.

Pour mesurer la tension générée par le système, le microcontrôleur est directement utilisé. Les données sont récupérées par l'ordinateur.

Dans les deux cas, le logiciel Arduino installé sur l'ordinateur permet de contrôler le microcontrôleur et d'extraire les données. Mais dans un souci de lecture plus précise des résultats, nous avons souhaité les afficher sous forme de graphiques s'actualisant en temps réel. Celle-ci permet, lorsqu'elle est installée, de faire le lien entre l'éditeur Python et la carte Arduino. Il est ainsi possible de contrôler la carte Arduino avec un programme Python. L'évolution de la tension et de la température est ensuite affichée sous forme de graphique à l'aide d'une autre librairie, nommée Matplotlib.

```
main.py x
1 import pyfirmata
2 import time
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 board = pyfirmata.Arduino('COM3')
6
7 it = pyfirmata.util.Iterator(board)
8 it.start()
9 analog_input = board.get_pin('a:0:i')
10
11 plt.ion() ## Note this correction
12 fig=plt.figure()
13 plt.axis([0,1000,0,5])
14
15 i=0
16 x=list()
17 y=list()
18
19 plt.ylabel("Tension (en V)")
20 plt.xlabel("temps (en s)")
21
```

Figure 11 - Extrait du programme Python.

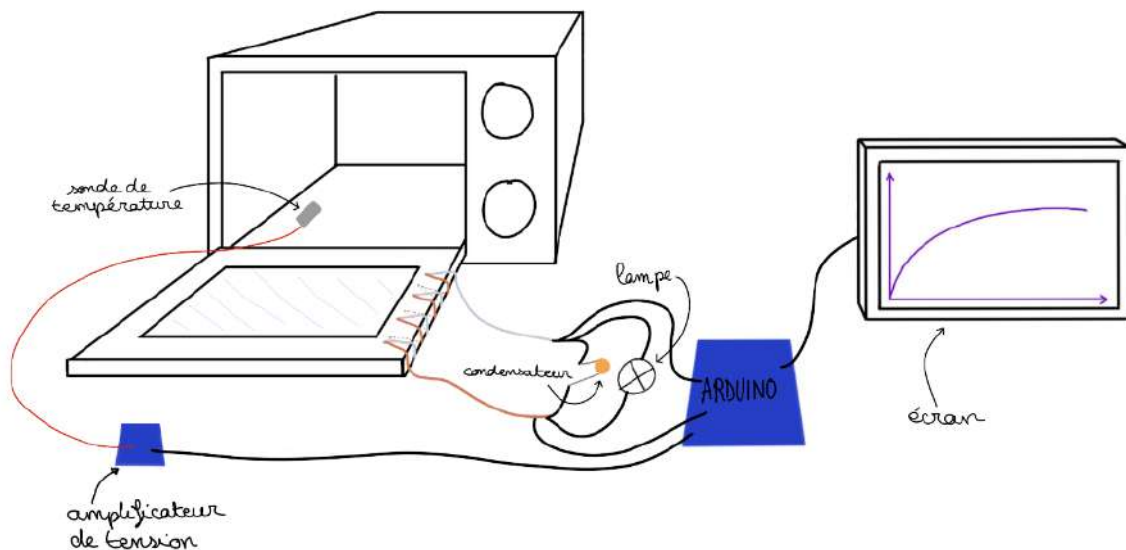


Figure 12 - Schéma du montage final du dispositif.

3.C - Interprétation des résultats et applications possibles

Avec une fabrication de 24 modules, chacun composés de 10 couples de matériaux, on obtient une tension de l'ordre de 1,5 V qui, avec l'intensité produite, est suffisante pour allumer une DEL.

Si, avec les techniques rudimentaires et les matériaux accessibles dont nous disposons, nous avons pu obtenir ce rendement d'1,5 V, on peut imaginer, en industrialisant le processus, obtenir des rendements bien supérieurs, notamment avec les semi-conducteurs que nous avons évoqué en première partie.

Les applications du procédé sont nombreuses. Dans les différentes centrales, notamment nucléaires, ces dispositifs fonctionneraient comme des convertisseurs d'appoint, récupérant l'énergie thermique trop faible pour être utilisée par l'alternateur conventionnel.

[Conclusion de la partie 3]

Dans cette dernière partie, nous avons montré le processus amenant à l'élaboration de notre dispositif de récupération de l'énergie thermique. A l'aide de bibliothèques et codes Python, couplés à un module Arduino et à un amplificateur de tension, nous avons pu développer un système de représentation graphique des résultats.

En conclusion

En définitive, rappelons l'objectif du projet. Il s'agissait d'abord, dans un monde où énergie rime avec économie, d'en proposer une alternative simple tant sur le plan de la construction que de l'utilisation. Pour se faire, nous avons donc cherché dans nos vies quotidiennes quelles énergies pouvaient être (ré)utilisées afin de mener à bien ce projet. Assez naturellement, les appareils électroménagers ont attiré notre attention : nous avons remarqué qu'un four électrique gaspillait de l'énergie thermique en fin de cuisson, et avons donc cherché à récupérer cette chaleur perdue, nous conduisant au projet que nous avons ici détaillé.

En premier lieu, nous avons présenté les principes théoriques de l'effet Seebeck et de ces dérivés que nous pourrions utiliser. Ce faisant, nous avons ensuite entamé une phase plus pratique, consistant en une série de tests, et poursuivant l'objectif de déterminer expérimentalement les meilleurs thermocouples – et la manière de les utiliser dans notre expérimentations. Cela fait, nous avons procédé au montage du four, en mettant en valeur par un programme Python - Arduino les résultats obtenus.

Il reste nécessaire de garder un regard critique sur ces rendements : certes probante, la quantité d'énergie électrique générée reste largement perfectible. Ce succès relatif s'explique par la nature de nos thermocouples ; car comme détaillé dans ce mémoire, les matériaux que nous avons utilisés demeurent d'entrée de gamme : ils sont relativement faciles d'accès et abordables financièrement. A l'instar des semi-conducteurs que nous avons évoqués, et que nous retrouvons par exemple dans les modules Peltiers avec le Tellure de bismuth, il se pourrait que ces techniques de productions énergétiques deviennent viables pour des populations ayant des problèmes d'accès à l'électricité. En d'autres termes, cela nous amène à penser que, *in fine*, si des matériaux de qualité industrielle sont utilisés pour mettre en œuvre ce projet, alors la rentabilité du dispositif sera grandement exacerbée – remplissant alors notre objectif de départ : remédier au gaspillage énergétique de la vie de tous les jours, en faisant de l'énergie thermique inutilisée une énergie Éco-Seebeck.

Bibliographie

Development of stove-powered thermoelectric generators: A review

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431115012685>

Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply

[Low cost stove-top thermoelectric generator for regions with unreliable electricity supply - ScienceDirect](#)

Study of a Thermoelectric Generator incorporated in a multifunction wood stove

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00727162/document>

Development and testing of a domestic woodstove thermoelectric generator with natural convection cooling

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890404001931>

Experimental study of a mesoscale combustor-powered thermoelectric generator

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248471930767X>

Une pompe à chaleur : le module Peltier

http://ww2.retronik.fr/Documentation-Thematique/Theorie/Une_pompe_a_chaleur_-_Le_module_Peltier_%5BEA18_1981_5p%5D.pdf

Les thermocouples

<https://aviatechno.net/files/thermocouples.pdf>

Coefficients seebeck

<https://www.linseis.com/fr/grandeurs-mesurees/coefficient-seebeck/>