

Université Paris Sud

Licence et magistère de physique fondamentale

PROJETS EXPÉRIMENTAUX DE PHYSIQUE

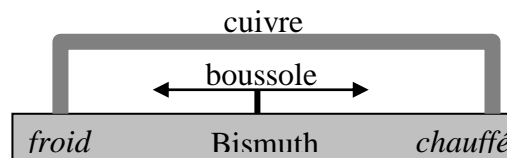
Projet Effet Seebeck
Projet Semiconducteur

<http://hebergement.u-psud.fr/projets>

Projets de Physique statistique

Effet Seebeck

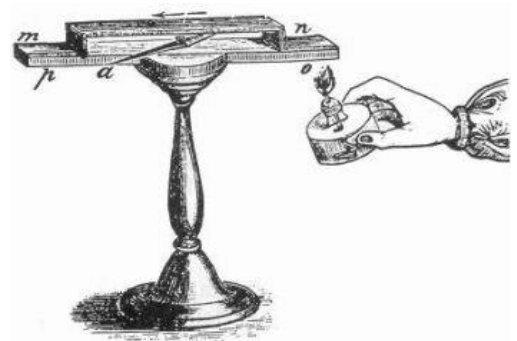
Ce TP vous propose d'étudier *l'effet Seebeck* et de mesurer le coefficient thermoélectrique (ou pouvoir thermoélectrique). Cet effet met en évidence un des effets thermoélectriques des matériaux conducteurs. Cet effet est à l'origine des thermocouples, outils utilisés pour mesurer la température dans de nombreuses applications.



Thomas Seebeck (1770-1831)



L'instrument original utilisé



Seebeck chauffe la partie droite d'un des deux métaux, il voit la boussole s'aligner.

Un peu d'histoire

Seebeck observe le phénomène suivant, décrit ci-dessus : en faisant un circuit électrique formé de deux conducteurs différents (cuivre et bismuth), et en maintenant un gradient de température entre les deux soudures, il observe l'apparition d'un champ magnétique. En fait, plus tard, il se rend compte qu'avec une expérience analogue en circuit ouvert cette fois, il voit apparaître une différence de potentiel électrique. Cette expérience complète celles de Thomson et de Peltier. Peltier observe qu'en faisant cette fois passer un courant électrique à travers la jonction de deux conducteurs différents maintenus à une température constante, il apparaît un transfert de chaleur entre les deux jonctions.

Un peu de théorie

Il s'agit dans ces expériences de comprendre comment se comporte un système conducteur en présence d'inhomogénéités de température et/ou de potentiel électrochimique, donc hors équilibre thermodynamique. Ces inhomogénéités vont donner naissance à un flux d'électrons. Ces électrons portent à la fois la chaleur et l'électricité. On leur associe un flux de chaleur J_Q et d'électricité J_E . En utilisant l'énergie interne du système et des variables conjuguées, on peut étudier la variation de cette énergie en présence de gradients. On fait l'approximation que les perturbations et gradients sont suffisamment faible pour traiter les effets linéairement (théorie de la réponse linéaire). On peut alors montrer, à partir de cette énergie interne, que :

$$\begin{aligned}\vec{J}_Q &= L_{QQ}\vec{F}_Q + L_{Qe}\vec{F}_e \\ \vec{J}_e &= L_{eQ}\vec{F}_Q + L_{ee}\vec{F}_e\end{aligned}$$

où F_Q est la force thermodynamique associée au flux de chaleur $\vec{F}_Q = -\vec{\nabla}(1/T)$

où F_e est la force thermodynamique associée au flux d'électricité $\vec{F}_e = -\vec{\nabla}(\Phi)/T = \vec{E}/T$ (E champ électrique et Φ potentiel électrique). On peut exprimer les coefficients L_{ij} en fonction du coefficient (ou pouvoir) thermoélectrique ε , de la conductivité thermique κ , et de la conductivité électrique σ selon :

$$\vec{J}_Q = -\kappa\vec{\nabla}T + T\varepsilon\vec{J}_e \quad (i)$$

$$\vec{J}_e = -\sigma\varepsilon\vec{\nabla}T + \sigma\vec{E} \quad (ii)$$

En l'absence de courant électrique, on retrouve la loi de Fourier qui caractérise la conduction thermique : $\vec{J}_Q = -\kappa\vec{\nabla}T$.

En l'absence de gradient de température, on retrouve la loi d'Ohm : $\vec{J}_e = \sigma\vec{E}$.

Par contre, si l'on impose un gradient de température à l'échantillon, dans un circuit ouvert où $\vec{J}_e = 0$, d'après la formule (ii), il y aura apparition d'un champ électrique et d'une ddp entre les points chaud et froid du métal : c'est l'effet Seebeck.

Cette ddp sera proportionnelle à ε :

$$\varepsilon = \frac{\|\vec{E}\|}{\|\vec{\nabla}T\|} = \frac{\partial V}{\partial T}$$

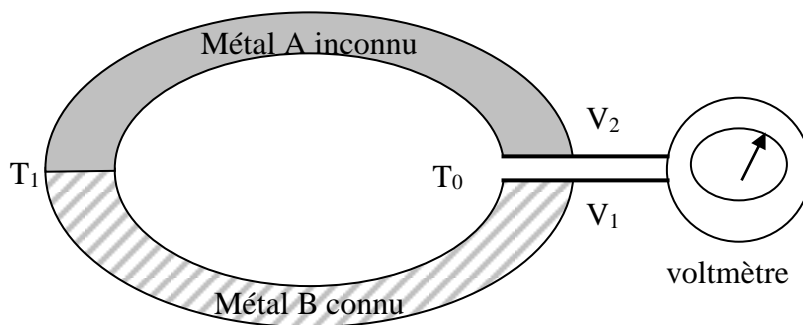
Pourquoi un gradient de température induit un champ électrique ?

Nous n'avons jusque là que constaté via les relations ci-dessus le lien entre $\vec{\nabla}T$ et \vec{E} sans l'expliquer pour autant. Pour cela, étudions les différents temps de l'expérience :

- Au départ, on applique un gradient de température à un circuit ouvert. Dans la zone haute température, les électrons ont alors une énergie et une vitesse plus importante que dans la zone basse température (car les chocs qu'ils subissent les laissent avec une quantité de mouvement plus importante).
- Il y aura donc juste après application du gradient de température un mouvement moyen des électrons vers les basses températures, d'où un courant électrique vers la zone de basse température.
- Le circuit de mesure étant ouvert, il y aura au bout d'un certain temps accumulation des électrons du côté basse T , d'où apparition d'un champ électrique. Ce champ électrique lui-même va alors s'opposer au mouvement de ces électrons, d'où établissement d'un régime permanent où il n'y a plus de courant et présence d'un champ électrique opposé au gradient de température.

Le principe de la mesure

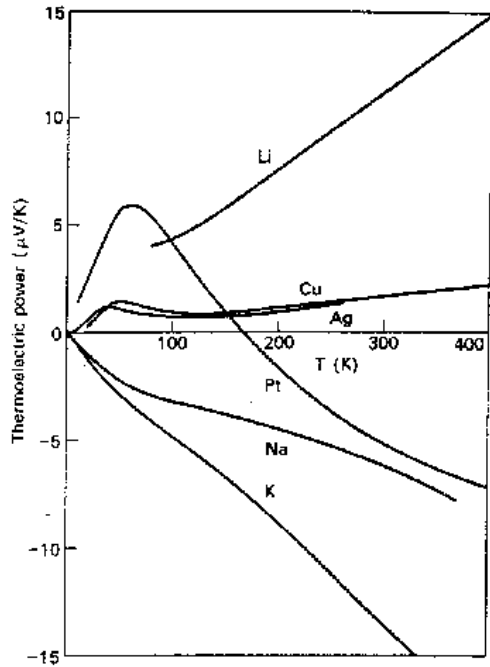
Pour mesurer la ddp due à un gradient de température, et donc ε , on ne peut pas juste connecter un voltmètre à un échantillon qui subirait un gradient. En effet, dans ce cas, les fils de mesure seraient aussi à des températures différentes, d'où un effet thermoélectrique additionnel dû au voltmètre lui-même. On utilise donc un deuxième métal soudé en un point au premier et le montage suivant :



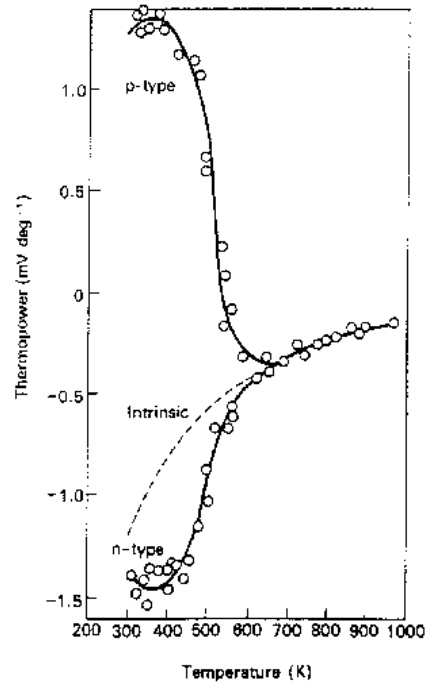
Dans cette configuration, les deux fils de mesure sont bien à la même température T_0 , et il y aura apparition d'une ddp due au gradient imposé entre T_0 et T_1 dans chacun des métaux. Le voltmètre n'ajoutera pas de contribution et mesurera donc la différence entre ces deux ddp d'où :

$$U = V_2 - V_1 = \int_{T_0}^{T_1} (\varepsilon_B - \varepsilon_A) dT$$

Si l'on connaît ε_B (matériau calibré), on en déduit ε_A . Ou encore, si on choisit pour B un supraconducteur dans lequel il n'y aura pas de ddp, on mesure directement $\varepsilon(A)$. Pour remonter à la dépendance en température de ε , il faut utiliser les propriétés des solides, statistique de Fermi-Dirac, bandes, effet Kondo, etc... Cela dépasse le cadre de ce TP. Voici juste quelques exemples de comportements que l'on peut rencontrer :



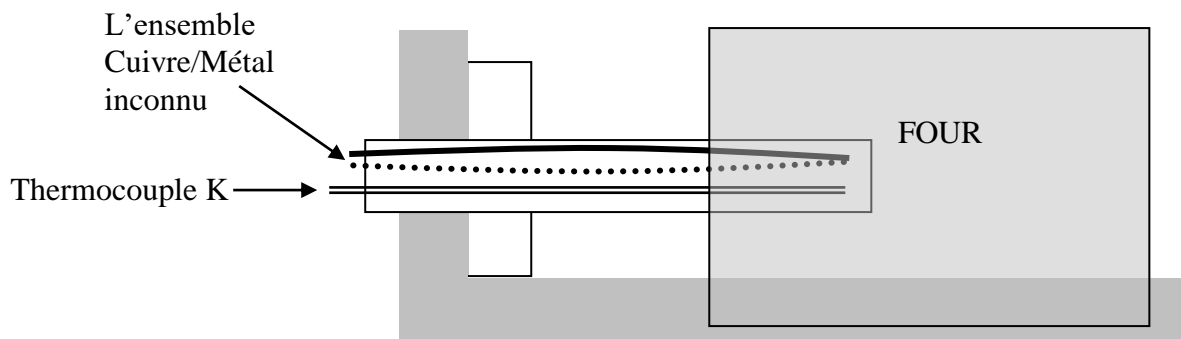
ε pour quelques métaux



ε pour un semi-conducteur Si dopé ou non

L'expérience et l'analyse :

Le montage expérimental permet de mesurer le pouvoir thermoélectrique ε d'un matériau inconnu. Pour cela, le matériau est soudé à du cuivre, dont on connaît le pouvoir thermoélectrique $\varepsilon = 2.7 \mu\text{V.K}^{-1}$. L'ensemble est placé de telle sorte qu'une des deux soudures est mise au bout d'un doigt de mesure, l'autre soudure étant à température ambiante.



On peut faire varier la température du point chaud grâce à un four coulissant (attention de ne pas se brûler). On mesure la température au point chaud via un thermocouple de type K dont la table de calibration est fournie.

- Vous devez donc écrire un programme Labview qui permette de mesurer simultanément les 2 tensions :
 - V_0 aux bornes du thermocouple de type K qui vous permettra d'en déduire la température du four via la table de calibration,
 - V_I aux bornes du thermocouple inconnu de laquelle vous déduirez ε .Attention, ce programme servira de base pour les expériences de la deuxième partie de l'année, apportez donc beaucoup de soin à son écriture et insérez des commentaires !
- La table de calibration qui vous est donnée pour le thermocouple de type K est établie par convention pour l'une des extrémités du thermocouple plongée dans une ambiance à 0° Celsius. Vous devez donc faire en sorte que la tension introduite dans la formule de calibration et qui dépend de la tension lue sur le thermocouple de type K permette d'obtenir une température ambiante dans la salle aux alentours de 20° C ?
- Tracer la ddp $U=V_2-V_I$ aux bornes du thermocouple inconnu en fonction de la température. Calculer et tracer le pouvoir thermoélectrique $\varepsilon_{\text{metal inconnu}}$ en fonction de la température.
- Pourquoi peut-on se servir de ce dispositif comme d'un thermomètre ? Dans quelles gammes ce thermomètre pourrait-il être utilisé ?

Pour en savoir plus :

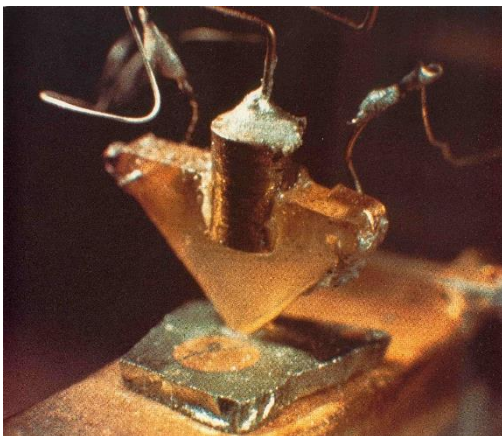
- Polycopié et cours de Michel Héritier (2^{ème} semestre, magistère)
- A Ashcroft, N. W. and Mermin, N. D., 1976, *Solid State Physics*
- <http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/history/seebeck.html>
- <http://www.engr.orst.edu/~aristopo/temper.html>
- <http://www.lpthe.jussieu.fr/DEA/pottier.html> : chapitre 5

Projets de Physique statistique

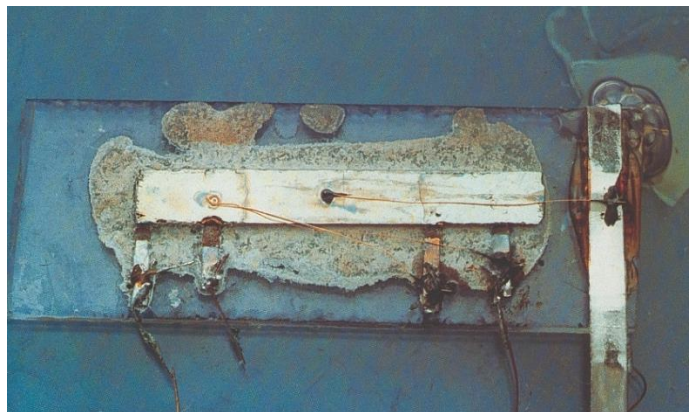
Conductivité de semi-conducteurs

But du TP

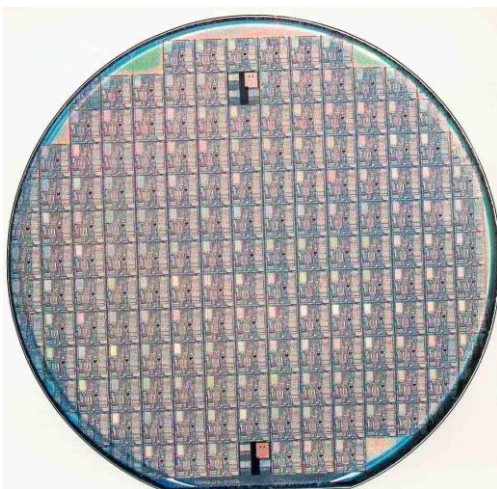
Ce TP vous propose de mesurer la conductivité de semi-conducteurs de différents types. C'est la compréhension de la conductivité de ces matériaux, grâce à la mécanique quantique, qui a permis ensuite l'invention du transistor, puis de toute l'électronique, la télécommunication, et l'informatique que nous connaissons aujourd'hui. C'est sûrement la plus importante des applications de la mécanique quantique, et un des plus beaux succès de la physique fondamentale, en amont d'une application industrielle.



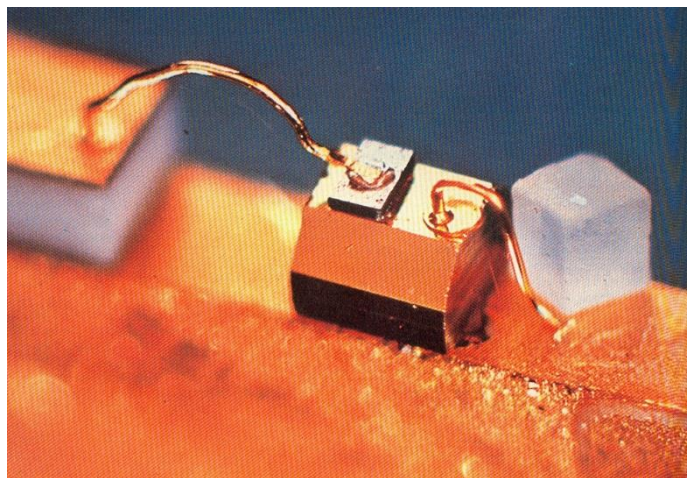
Le premier transistor (Bell Labs, 1947)



Le premier circuit intégré (Texas Instrument, 1958)



Production des puces : 20 milliards de transistors (20 cm)



Une autre application : le laser à semiconducteurs (à côté d'un grain de sel)

Quelques éléments théoriques succincts

En général, la conductivité est liée au mouvement des électrons dans les solides. Elle est liée aux chocs élastiques et inélastiques entre ces électrons et les imperfections du cristal (vibrations de réseau, défauts, ...). Cette conductivité suit la loi de Drude :

$$\sigma = ne\mu = \frac{ne^2\tau}{m}$$

où n est le nombre d'électrons par unité de volume (m^{-3}), e la charge de l'électron (C), μ la mobilité de l'électron ($cm^2/V.s$) et m la masse effective de l'électron (kg).

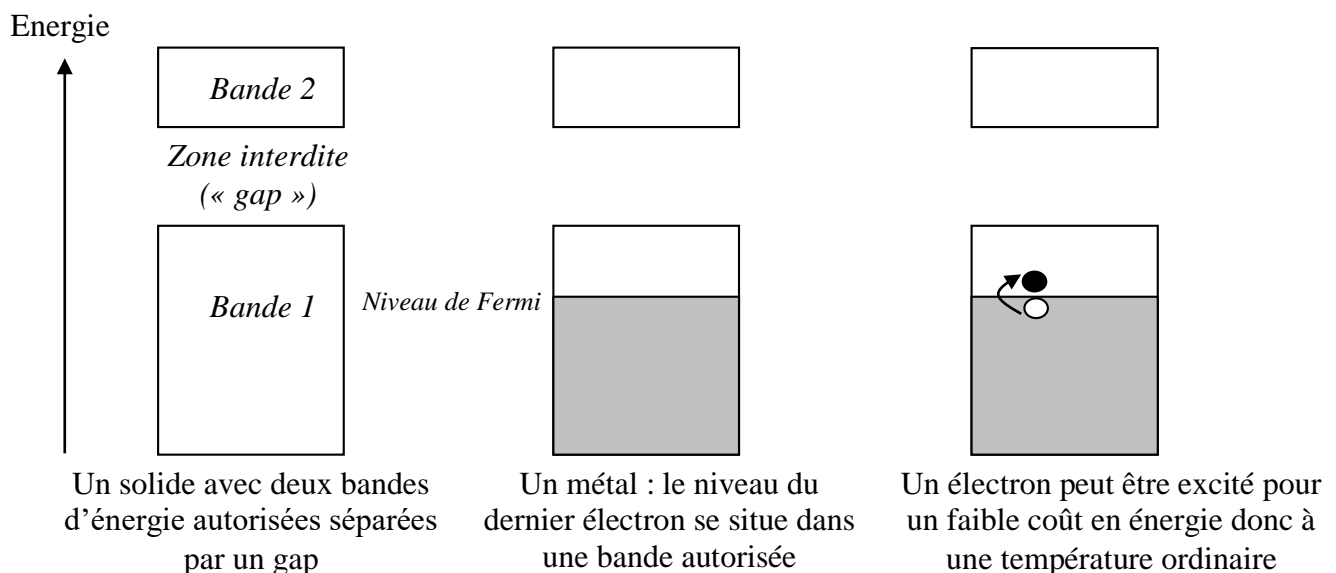
τ quant à lui est le temps de diffusion (s) (temps moyen entre deux chocs). Il est dominé dans les solides à température ambiante par les phonons et varie donc en $T^{-3/2}$.

Dans un métal, n est le nombre d'électrons de valence (ou de conduction) par unité de volume (1 par atome pour le cuivre par exemple). Le temps τ quant à lui est lié aux vibrations du réseau ainsi qu'aux défauts éventuels. La résistivité ρ , inverse de la conductivité σ , varie alors en puissance de la température T .

Dans une boîte fermée, un électron a différents niveaux quantiques autorisés. De la même manière, du fait du principe de Pauli et de la taille finie d'un solide, il existe des bandes d'énergie autorisées pour les électrons. On remplit ces bandes avec tous les électrons du solide. La position en énergie du dernier électron, dite énergie de Fermi, va décider du caractère isolant ou conducteur du matériau.

En effet, comme on le voit dans la figure ci-après, si l'énergie de Fermi est dans une bande autorisée, comme c'est le cas dans un métal, une petite énergie permettra d'exciter un électron juste au-dessus de ce niveau. L'énergie de Fermi étant de l'ordre d'1 eV c'est à dire 10000 kelvins, une température de 300 K jouera donc exactement le rôle de cette petite énergie, d'où la conduction électrique d'un métal à température ambiante.

Au contraire, dans un isolant, l'énergie de Fermi est dans la zone interdite. Le gap, c'est à dire la différence d'énergie entre niveaux vide et occupé, est de l'ordre de quelques eV. L'électron devra alors subir un apport d'énergie comparable au gap pour être excité, l'agitation thermique n'étant pas suffisante à température ambiante pour jouer ce rôle.

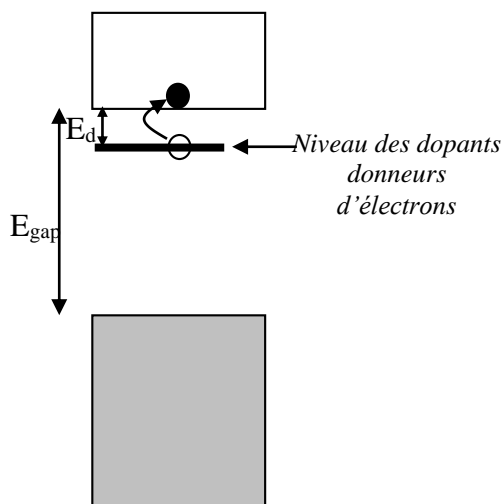


Un semi-conducteur dit intrinsèque est un isolant dont la valeur du gap est faible. Celle-ci n'est que de quelques dixièmes d'eV dans un tel semi-conducteur. On attend donc un comportement proche de l'isolant, mais avec une meilleure conductivité. On peut montrer (voir cours) que le nombre d'électrons qui participent à la conduction varie comme :

$$n \sim T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{gap}}{2k_B T}\right)$$

où E_{gap} est l'énergie du gap, et k_B la constante de Boltzmann. On voit bien ici le fait que la taille du gap intervient de façon activée, comme on l'attendrait naïvement pour toute barrière en énergie à franchir (comme par exemple un effet tunnel).

Dans **un semi-conducteur dit extrinsèque**, on ajoute des atomes étrangers (dopage) dont le niveau atomique se situe dans la bande interdite mais proche de la bande vide (cas du dopage par électrons ; il existe également la possibilité d'un dopage en arrachant des électrons de la bande pleine, on appelle alors cela un dopage par trous).



Typiquement, $E_g \sim \text{eV}$ et $E_d \sim 0.01$ à 0.1 eV .

Dans ce cas, comme on le voit ci-contre, les atomes ainsi dopés fournissent des électrons pour une valeur de gap réduite E_d .

Cette astuce permet de contrôler le nombre et les caractéristiques des électrons qui participent à la conduction dans le matériau, et de réduire la valeur de gap.

On obtient alors 3 régimes en température :

- Si $k_B T < E_d$, on est ramené au cas d'un semi-conducteur intrinsèque de gap E_d .
- Si $E_d < k_B T < E_g$, toutes les impuretés ont donné leur électron à la bande vide, donc n est constant, et la dépendance en température ne vient que de τ .
- Si $k_B T > E_g$, les électrons du vrai semi-conducteur peuvent être activés, et on retrouve cette fois le comportement du semi-conducteur pour le gap E_g .

Pour en savoir plus :

- C. Kittel, Physique de l'état solide
- A Ashcroft, N. W. and Mermin, N. D., 1976, *Solid State Physics*
- <http://www.unine.ch/phys/enseignement/PhysSemi/IntroSemi.html>

Description du Montage Expérimental

L'expérience proposée consiste à mesurer la résistance de deux types de semi-conducteurs différents S_1 et S_2 , l'un intrinsèque, l'autre extrinsèque, puis d'en déduire leurs caractéristiques respectives en fonction de la température.

Comment mesure-t-on les valeurs des résistances des 2 semi-conducteurs S_1 et S_2 :

Les 2 semi-conducteurs S_1 et S_2 ont été mis en série respectivement avec une résistance $R_1=1\text{ k}\Omega$ et une résistance $R_2=17,8\text{ k}\Omega$. L'ensemble est monté en parallèle et alimenté par une tension constante $V_0=5\text{ V}$, comme le montre la figure 1 ci-dessous, représentant le schéma électrique du montage. En mesurant en permanence, la tension d'alimentation V_0 et les 2 tensions V_1 et V_2 respectivement aux bornes de l'ensemble et des 2 semi-conducteurs S_1 et S_2 , il est alors possible d'en déduire les valeurs de leur résistance respective à une température donnée.

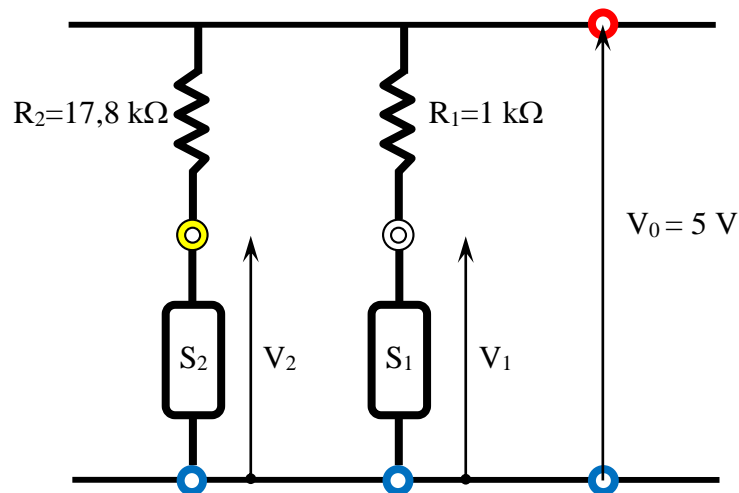


Figure 1 : Schéma électrique du pont de résistance utilisé pour déterminer les valeurs des résistances des 2 semi-conducteurs S_1 et S_2 en mesurant les valeurs des 3 tensions V_0 , V_1 et V_2 .

La figure 2 ci-dessous montre 2 photographies du boîtier de mesure témoin dont la boîte a été fabriquée en plexiglas transparent pour pouvoir observer l'intérieur. Vous pouvez également observer ce boîtier témoin qui se trouve dans une des salles d'expériences. Les boîtiers standards ont été réalisés avec des capots en aluminium et l'intérieur n'est alors pas visible.

Il faudra fournir au montage, une tension $V_0=5$ volts, via un boîtier d'alimentation par l'intermédiaire du câble blanc sortant de la face avant du boîtier.

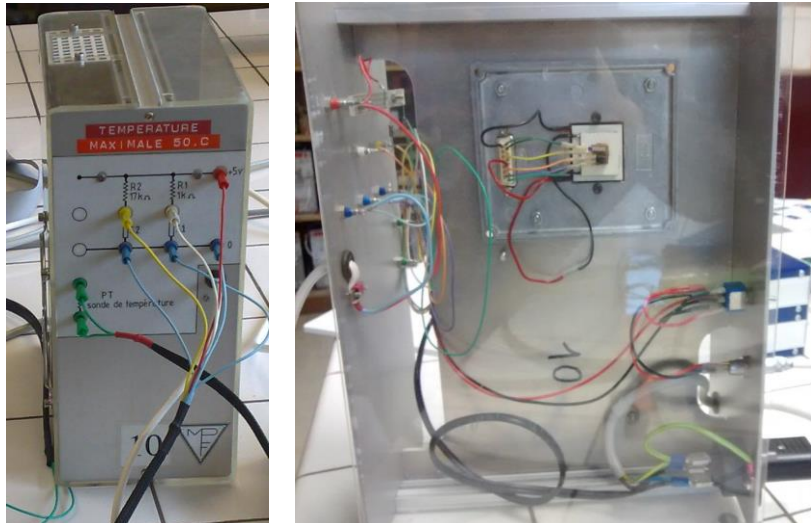


Figure 2 : Photographie des faces latérale et avant du boîtier de mesure témoin qui permet l'étude de l'évolution de la résistance des 2 semi-conducteur S_1 et S_2 en fonction de la température.

Comment fait-on varier la température ?

Pour varier la température, on fait passer un courant continu d'environ 1 A dans 2 étages d'un module à effet Peltier sur lequel est collé un bloc de laiton supportant les 2 semi-conducteurs ainsi qu'une résistance de platine, comme vous pouvez le voir sur la figure 3 ci-dessous montrant le détail du cœur de ce dispositif expérimental. Le bloc de laiton est utilisé pour limiter les problèmes d'inertie thermique en homogénéisant le plus rapidement possible la température. La résistance de platine, quant à elle, sert de thermomètre.

L'effet Peltier, aussi appelé effet thermoélectrique se produit lorsque l'on fait passer un courant dans des matériaux (conducteurs ou semi-conducteurs) de natures différentes et que l'on a liés par des jonctions. Du fait de la nature différente des matériaux constituant les jonctions, les conductivités électronique et thermique ne sont pas les mêmes, ce qui entraîne que certaines jonctions se refroidissent alors que d'autres se réchauffent. Si l'on change le sens du courant, on peut alors inverser le flux de chaleur et refroidir une jonction qui se réchauffait auparavant. Cet effet permet de modifier précisément une température par passage de courant au sein d'une jonction. Ce procédé est utilisé notamment à bord des véhicules spatiaux et dans certains petits réfrigérateurs de laboratoire. Pour refroidir ou réchauffer le dispositif, il suffit donc d'alimenter le bloc à effet Peltier avec une tension continue, positive ou négative. On pourra ici faire varier la température d'environ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

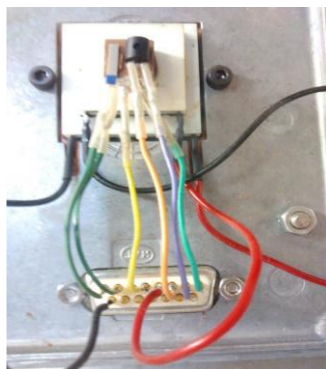


Figure 3 : Photographie du cœur du dispositif. On peut distinguer les 2 étages du module à effet Peltier (les 2 parallélépipèdes fins blancs superposés), le bloc de laiton dont la couleur est caractéristique, la résistance de platine (collée sur la gauche du bloc de laiton), un cylindre noir (collé à droite du bloc de laiton) correspondant à un premier semi-conducteur. L'autre semi-conducteur est, quant à lui, encastré à l'intérieur du bloc de laiton et n'est pas visible sur cette photo.

Pour alimenter le module à effet Peltier et faire varier la température, on utilisera le bloc d'alimentation « jaune » que l'on branchera à l'arrière du boîtier de mesure. La vitesse de chauffage/refroidissement est contrôlée par le réglage tension/courant. Pour passer du mode chauffage en mode refroidissement, on utilise le switch situé derrière le boîtier (haut=chauffage, bas=refroidissement).

ATTENTION : Lorsque l'on change le sens du switch, pour changer le sens du courant, l'alimentation doit être à 0. Sinon, vous allez endommager le module à effet Peltier.

De plus, attention à ne pas laisser le boîtier alimenté trop longtemps pour ne pas trop chauffer le dispositif. En effet, il ne faut pas aller au-delà de $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, les colles thermiques utilisées pour souder les semi-conducteurs et la résistance de platine au bloc de laiton n'y résisteraient pas.

Comment mesure-t-on la température ?

Une résistance de platine permet, quant à elle, la mesure de la température. En effet, les variations de la valeur de sa résistance avec la température sont bien connues et calibrées. Il faudra donc mesurer, en permanence, les valeurs de la résistance de Pt pour connaître la température au niveau du module à effet Peltier, via une courbe de calibration qui vous sera fournie.

Pour cela, on mesurera en permanence, la tension V_3 aux bornes de la résistance de Pt, après l'avoir alimentée avec une source de courant de 1 mA dont 2 photographies ainsi que le schéma électrique interne sont présentés sur la figure 4 ci-dessous. Cette source de courant est alimentée par une alimentation de 5V fournie (la même que vous utilisez pour alimenter le circuit des semi-conducteurs).

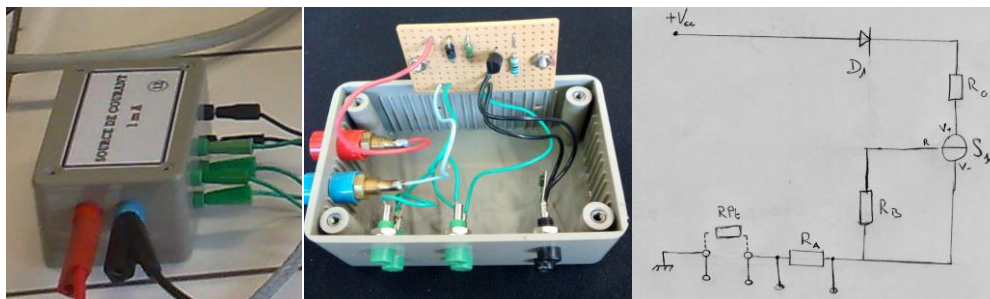


Figure 4 : Vue extérieure, intérieure et schéma électrique de la source de courant stabilisée de 1mA utilisée pour alimenter la résistance de platine. Deux des 4 sorties vertes permettent de fermer le circuit et d'alimenter la résistance de platine, les 2 autres permettant de faire la mesure de V_3 . La mesure de la tension aux bornes de la résistance $R_A=21\ \Omega$ se fait au niveau des 2 bornes noires.

Pour mesurer en permanence, la valeur du courant de cette source de courant, on mesurera la tension V_4 aux bornes d'une résistance, appelée R_A , dont la valeur est de $21\ \Omega$ et que l'on peut apercevoir sur le schéma électrique. Dans le circuit électrique de la source de courant, cette résistance est en série avec la résistance de platine, le courant qui les traverse est donc identique. Mesurer la tension aux bornes de la résistance R_A permet ainsi de connaître le courant qui traverse la résistance de Pt et la mesure de la tension aux bornes de cette dernière permet d'extraire la valeur de sa résistance et d'en déduire la température T grâce à la courbe de calibration fournie.

ATTENTION : La mesure de la tension aux bornes de la résistance R_A doit se faire en mode différentiel (sans cavalier entre la borne low et la masse). En effet, comme le schéma électrique de la source de courant l'indique, aucune des 2 bornes de cette résistance n'est à la masse du circuit.

Ce que vous devez faire

Vous devez concevoir un programme de mesure qui doit permettre de mesurer et d'afficher, en temps réel, les 5 valeurs des tensions V_0 , V_1 , V_2 , V_3 et V_4 décrites précédemment. Vous devez également prévoir dans ce programme, les calculs permettant d'extraire et d'afficher en temps réel, les valeurs des résistances des 2 semi-conducteurs S_1 et S_2 en fonction du temps et de la température T que l'on aura aussi pris soin d'afficher en fonction du temps. Il faut également que ce programme sauvegarde, dans un fichier texte, les données brutes V_0 , V_1 , V_2 , V_3 et V_4 ainsi que les valeurs calculées S_1 , S_2 et T . Ce programme vous servira de programme de base pour la deuxième partie de l'année, apportez-y beaucoup de soin.

Vous devrez ensuite pouvoir relire vos fichiers et analyser vos données par le logiciel IGOR.

- Commencer tout d'abord générer un programme qui mesure et affiche simultanément 5 tensions différentes,
- Etablir les formules donnant les valeurs des résistances des 2 semi-conducteurs S_1 et S_2 en fonction des valeurs mesurées des tensions V_0 , V_1 et V_2 et des valeurs données des 2 résistances R_1 et R_2 et afficher en temps réel les valeurs des résistances de S_1 et de S_2 ,
- Faire le montage concernant l'alimentation du pont diviseur et vérifier avec un multimètre que les tensions données par la carte d'acquisition sont correctes et auprès de l'enseignant que les valeurs de résistances S_1 et S_2 que vous donne le programme sont correctes à température ambiante,
- Etablir les formules permettant de mesurer le courant i émis par la source de courant, celles donnant la valeur de la résistance P_t ainsi que celles donnant la température après avoir ajusté au mieux, la courbe de calibration qui vous aura été fournie. Attention, cette courbe correspond à un rapport de résistance. Il faut donc la calibrer en introduisant la valeur de la résistance R_{pt} à température ambiante. Pour cela, mesurer la valeur de cette résistance avec un multimètre et relever la température de la pièce,
- Faire le montage concernant l'alimentation de la résistance de platine et la mesure des 2 tensions V_3 et V_4 et vérifier que la température donnée par le programme est bien celle de la salle d'expérience,
- Faire le montage de l'alimentation du module à effet Peltier et faire varier la température vers les basses températures puis vers les hautes en changeant la position du switch.
- Faire des tests en observant les variations de la résistance des 2 semi-conducteurs en fonction de la température d'environ -25 °C à $+50\text{ °C}$ lorsque l'on diminue la température mais aussi lorsqu'on l'augmente,
- Tester la reproductibilité de vos mesures en vérifiant si le fait de changer la vitesse de chauffage/refroidissement influe sur la mesure,
- Adopter le protocole expérimental le mieux adapté à la reproductibilité des mesures et enregistrer les courbes $S_1(T)$ et $S_2(T)$,
- Déduire de ces 2 courbes, lequel de ces 2 semi-conducteurs est l'intrinsèque et lequel est l'extrinsèque,
- Donner, en eV, la valeur du gap pour le semi-conducteur intrinsèque et l'exposant de la dépendance en température pour le semi-conducteur extrinsèque,
- Comparer les valeurs des résistances obtenues pour S_1 et S_2 à celles que vous obtiendriez pour un conducteur métallique standard ayant une taille comparable (quelques mm de section).