

Université Paris-Sud

Licence et magistère de physique fondamentale

PROJETS EXPÉRIMENTAUX DE PHYSIQUE

Exercices d'initiation à IGOR

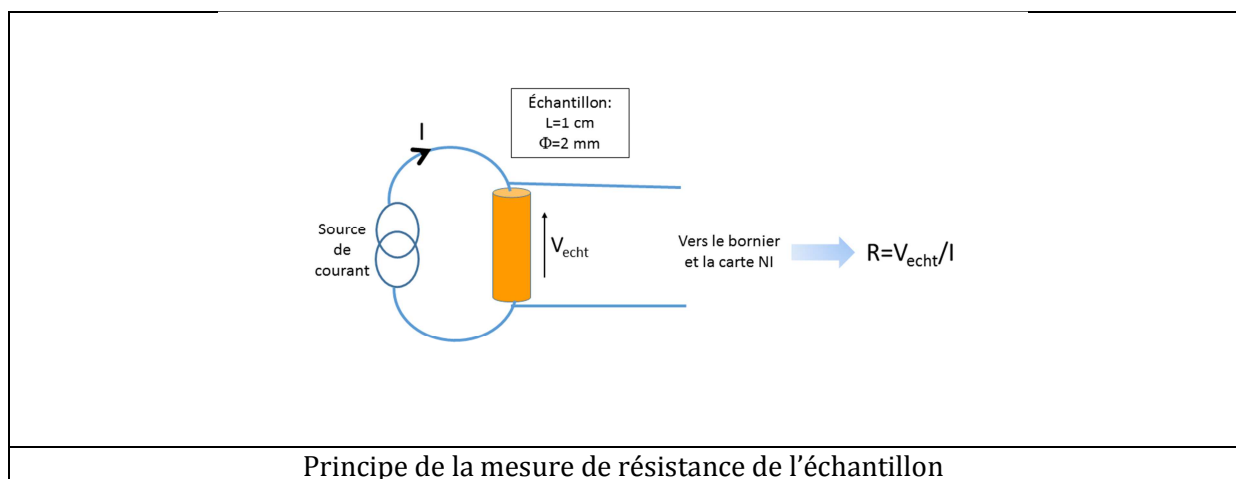
<http://hebergement.u-psud.fr/projets>

TRAITEMENT DE DONNEES AVEC IGOR

Dans cet exercice vous allez apprendre à utiliser les outils de base du logiciel Igor pour traiter des données et en extraire des grandeurs physiques.

CONTEXTE

Vous allez travailler sur des fichiers de données contenant les mesures d'une expérience. Cette expérience est la suivante : on mesure la résistance électrique d'un échantillon semiconducteur dont on fait varier la température. Cet échantillon a un diamètre de 2 mm et une longueur de 1 cm. Pour mesurer la température, un thermomètre Pt100 est utilisé : il s'agit en fait d'une résistance de platine dont la valeur est calibrée en fonction de la température.



Vous avez deux fichiers à exploiter :

- Le fichier de calibration de la résistance de platine ;
- Le fichier contenant les mesures effectuées.

Le but de cette expérience est de mesurer la résistivité de ce matériau en fonction de la température afin d'en extraire les grandeurs physique caractéristiques du matériau.

Pour vous aider dans l'analyse une rapide description de la physique des semiconducteurs vous est fournie en annexe.

CALIBRATION DU THERMOMETRE

La courbe de calibration résistance vs température vous est fournie dans le fichier `calibration_platine.txt`. La 1ère colonne correspond à la résistance de platine R_{Pt} en ohm, et la 2ème à la température T en degré celsius.

Importez le fichier dans Igor et tracez la courbe.

Choisissez le type de fit le plus approprié (vu la forme de la courbe) et établissez l'équation de la courbe de calibration $T = f(R)$. Essayez d'estimer la qualité de votre calibration.

ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le fichier `mesures.txt` correspond à la mesure de la résistance R de l'échantillon en fonction de la résistance R_{Pt} (2^e colonne).

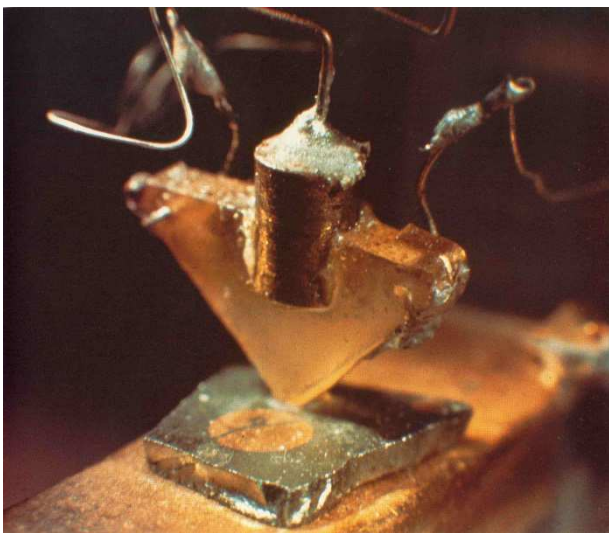
Tracez la courbe $R(T)$.

En utilisant les outils de fit d'Igor, extrayez les grandeurs physiques caractéristiques du matériau.

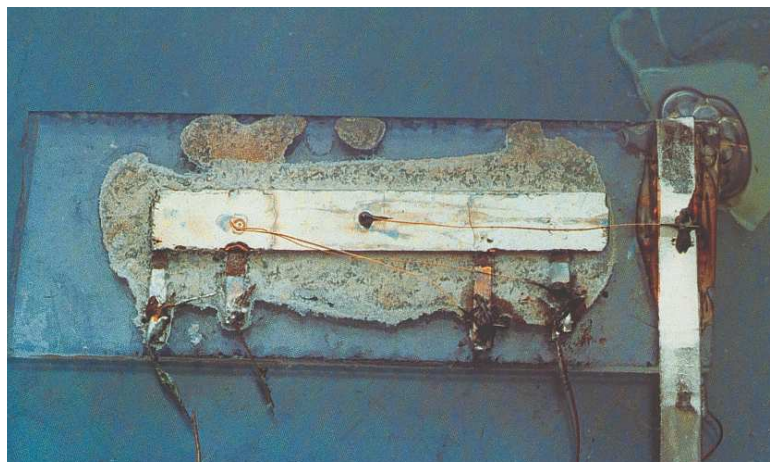
De quel semiconducteur peut-il s'agir ?

ANNEXE : CONDUCTIVITE DE SEMI-CONDUCTEURS

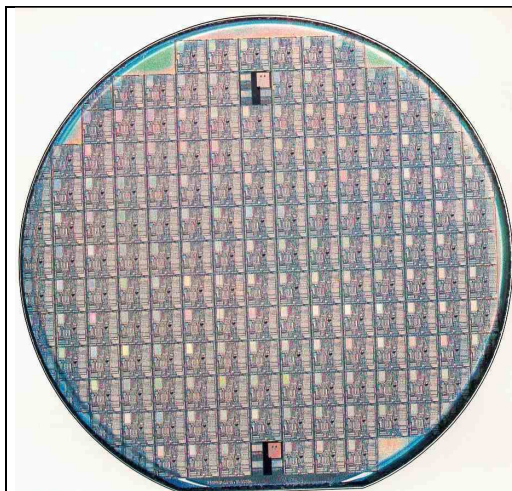
C'est la compréhension de la conductivité de ces matériaux, grâce à la mécanique quantique, qui a permis ensuite l'invention du transistor, puis de toute l'électronique, la télécommunication, et l'informatique que nous connaissons aujourd'hui. C'est sûrement la plus importante des applications de la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



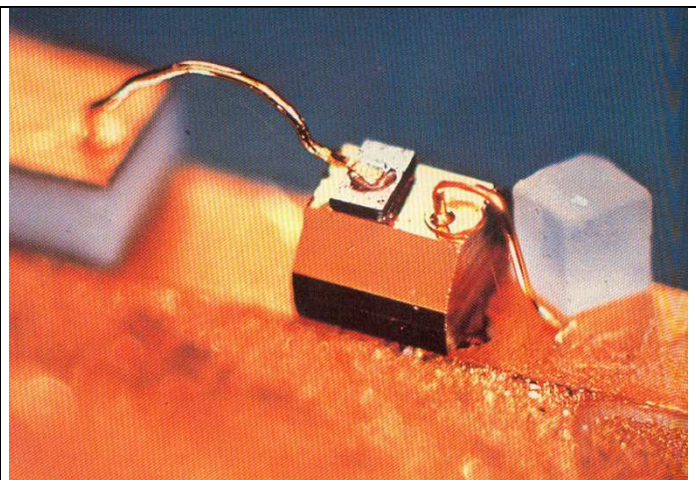
Le premier transistor (Bell Labs, 1947)



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 :

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

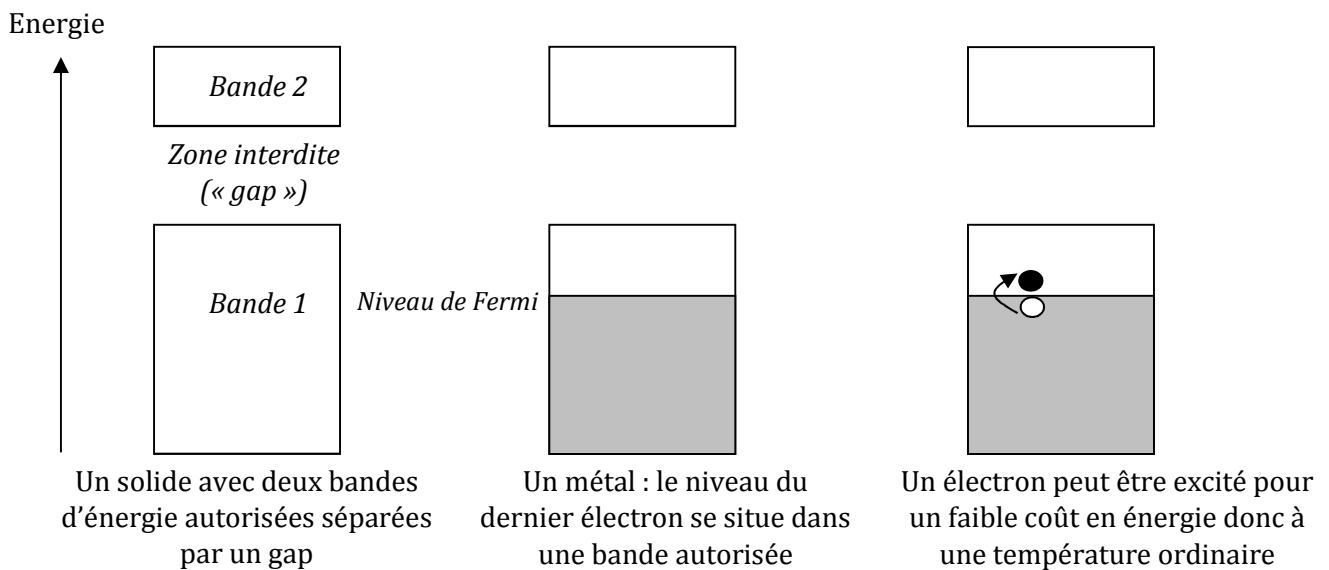
où n est le nombre d'électrons par unité de volume (m^{-3}), e la charge de l'électron (C), μ la mobilité de l'électron ($\text{cm}^2/\text{V.s}$), τ le temps entre deux chocs (s) et m la masse effective de l'électron (kg).

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.

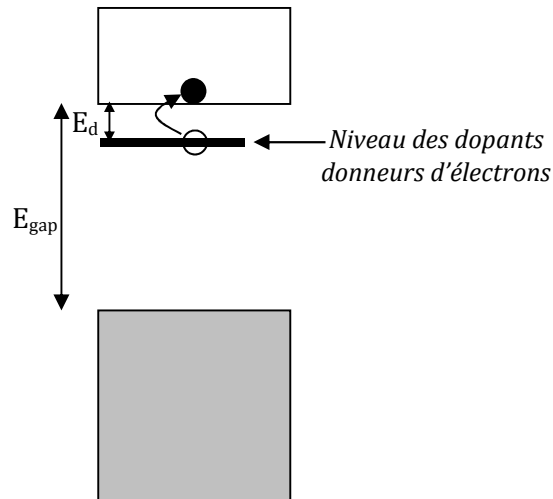


Un semi-conducteur dit intrinsèque est un isolant dont la valeur du gap est faible. Les valeurs typiques sont de l'ordre de l'eV dans un tel semi-conducteur. On attend donc un comportement proche de l'isolant, mais avec une meilleure conductivité. On peut montrer (voir cours) que le nombre d'électrons 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 :

- Polycopié et cours de Michel Héritier (2^{ème} semestre, magistère)
- 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>