

## Laboratoire de PHYSIQUE I

**La Physique des SEMI-CONDUCTEURS : (E4)*****DIODES ET TRANSISTORS*****Introduction :**

Les semi-conducteurs sont, à basse température, des isolants, mais lorsqu'on les chauffe, ils se comportent comme des conducteurs. Cela s'explique par le fait que, dans ces matériaux, le « gap » entre deux couches électroniques est petit (relativement aux isolants). Le « gap » est la distance ou l'énergie qu'il faut à un électron pour passer d'une orbitale à l'autre ou plus précisément, dans notre cas, pour passer de la bande de valence (où ils sont « fixes », donc non-conducteur) à la bande de conduction où ils rendront les semi-conducteurs conducteurs. Cette énergie peut être fournie aux électrons par la chaleur. C'est ce cas que nous « étudierons ». Pour que les semi-conducteurs « classiques » puissent fonctionner à température ambiante, on doit les « doper » en introduisant dans leur structure (réseau cristallin) un atome qui déséquilibre le nombre de trous et d'électrons. On parle de semi-conducteur de *type n* lorsque l'on rajoute des électrons. (Je ne parle pas de n'importe lesquels mais de ceux qui permettent la conduction.) A l'inverse, aux semi-conducteurs de *type p*, on retire des électrons.

**I. Diodes :**Petit Rappel théorique :

Une diode est composée de deux de ces éléments : un n et un p. Lorsque l'on réunit deux semi-conducteurs de type différent, un phénomène nommé *diffusion* se produit. Cela signifie que quelques électrons de la « zone n » vont migrer vers la « zone p ». Cela créera donc une différence de potentiel (noté ddp par la suite) qui induira un champ électrique. Ce champ peut, selon la tension et le sens du courant que l'on applique aux bornes de la diode, s'opposer au courant faisant de la diode une excellente résistance. A l'inverse, si le sens du courant est favorable, alors la diode laissera passer le courant. La diode agit un peu comme une valvule ne laissant passer le courant électrique (le sang) que dans un sens.

**I.1 Caractéristique I-V des diodes :**

Dans cette expérience, nous regardons comment réagissent les diodes (par rapport au courant, leur résistivité), lorsque l'on applique une ddp à ses bornes.

Si les diodes étaient parfaites (du point de vue de l'électronicien), nous aurions obtenu le graphe I(V) ci-contre... mais nous vivons dans un monde physique. Il faut donc créer une ddp non négligeable aux bornes de la diode pour que celle-ci laisse enfin passer un courant sensible (pour qu'elle joue le rôle du parfait conducteur). C'est cette ddp que nous avons mesuré, elle se nomme *tension de seuil* (que nous noterons désormais  $V_F$  (pourquoi F ?)).

En étudiant les graphes 1 à 3 (voir en annexe) nous trouvons pour ces  $V_F$  les résultats suivants :

diode	au silicium	électroluminescente	zener
$V_F$	0.53 [V]	1.58 [V]	0.68 [V]

La diode au silicium semble donc être la plus performante des trois du point de vue de la tension de seuil puis suis ensuite de près la diode zener. La diode électroluminescente (LED), elle, a une tension de seuil relativement haute, peut-être cela est-il du au fait qu'en plus de conduire, elle doit émettre un signal lumineux. D'ailleurs, son rôle (je crois) est un peu limité à celui de voyant lumineux.

La pente du graphe I(V) n'étant pas infinie, cela implique qu'il y a une résistance, la *résistance interne*. Elle se calcul simplement avec la « loi suisse » ou plus sérieusement loi d'Ohm :

$$U = R \cdot I \Leftrightarrow R = \frac{U}{I} \quad \text{où } U/I \text{ n'est rien d'autre que l'inverse de la pente du graphe.}$$

Nous obtenons les résultats suivants :

diode	au silicium	électroluminescente	zener
r	35 [ $\Omega$ ]	25 [ $\Omega$ ]	14 [ $\Omega$ ]

Nous voyons que la diode au silicium a la plus haute résistivité (même plus que la LED). L'erreur sur r est quand même de l'ordre de 2 ou 3 [ $\Omega$ ], résultat obtenu grâce à la formule suivante :

$$\Delta\left(\frac{U}{I}\right) = \frac{1}{I} \Delta U + \frac{U}{I^2} \Delta I$$

Mais attention, nous avons considéré, pour ce calcul, que l'erreur que nous faisons pour mesurer la pente, pas l'erreur absolue sur chaque mesure...

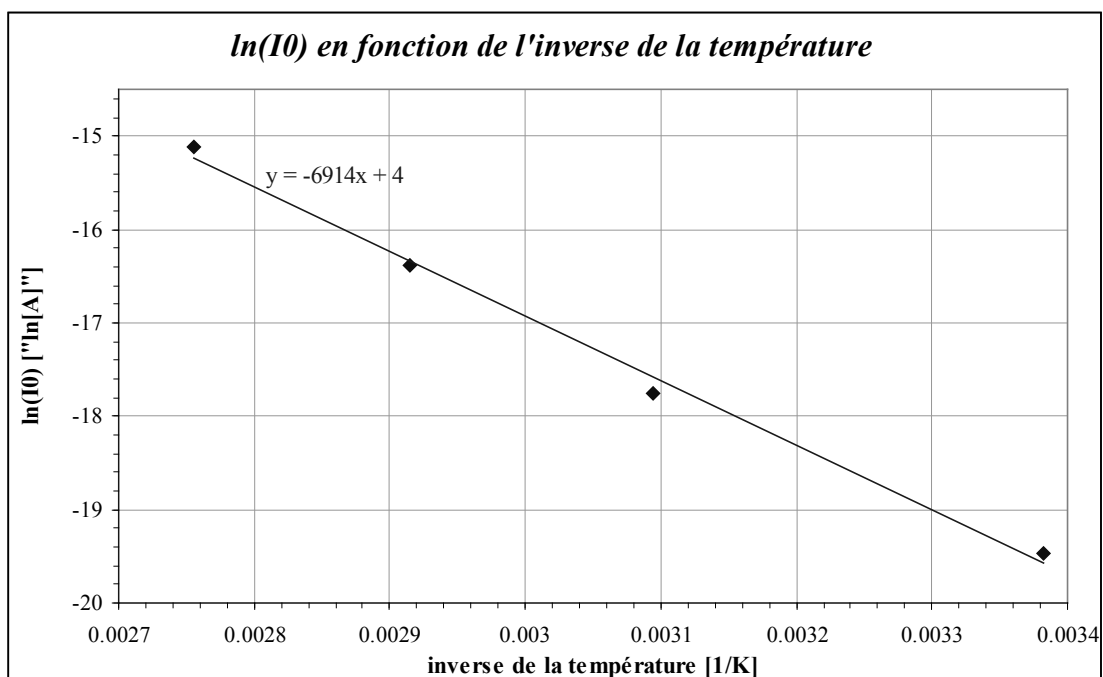
Finalement, on remarque un comportement singulier de la part de la diode zener pour des tensions inférieures à -2 [V] (le moins signifie simplement que le courant s'oppose au champ de la diode). Voir graphe 4. En effet, elle ne joue plus du tout son rôle de résistance parfaite. Ceci s'explique (peut-être) par le fait que la diode est finie (voire courte) (en longueur) et que la zone qui se polarise est donc finie, elle aussi, d'où un champ électrique qui ne peut plus augmenter significativement quand toute la diode est polarisée. A ce moment là, la résistance ne peut plus augmenter en parallèle avec la tension aux bornes et laisse donc le courant passer. On peut donc supposer que ce phénomène se produit sur toutes les diodes mais que sur la silicium et la LED, la tension n'était pas assez basse (ie : assez grande du côté négatif... hum) pour pouvoir entièrement polariser la diode et vaincre le champ. Nous pourrions aisément le vérifier en refaisant l'expérience avec de plus hauts voltages.

La diode zener doit très bien s'appliquer à des montages où circuleront de faible courant (moins de 2[V] mais pas trop faible non plus (>0.7[V])) car elle jouera alors très bien son rôle de diode et opposera une résistance trois fois moindre que la diode au silicium. La diode au silicium a l'air assez bien par sa résistance finalement pas si grande... (On ne trouve pas beaucoup de vraie résistance en dessous de 10 [ $\Omega$ ]). De plus, elle a une tension de seuil relativement basse qui doit suffire à nombre d'applications.

## 1.2 Courant de fuite :

Comme cela a été exposé dans l'introduction, la résistance des semi-conducteurs dépend de l'excitation de leurs électrons ; dans notre cas l'excitant sera la chaleur. Une forte excitation thermique (= apport d'énergie) permet de rendre les semi-conducteurs un peu plus conducteurs...

T [K]	295.7	323.2	343.1	362.9
I [ $\mu$ A]	0.004	0.019	0.077	0.270



Le tableau de la page précédente montre que la diode joue son rôle de résistance plus ou moins bien selon la température. Plus la température est haute plus le *courant de fuite* augmente. Cette relation est connue et donnée par la formule suivante :

$$I_0 = A \cdot \exp\left(\frac{E_g}{k_B \cdot T}\right) \quad \Rightarrow \quad \ln(I_0) = \ln(A) + \left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

où  $k_B = 1.3807 \cdot 10^{-23}$  [J/K], la constante de Boltzmann,  
 $E_g$  est (l'énergie pour passer ?) la bande interdite,  
 $T$  est la température (en Kelvin).

Le graphe a donc une pente de  $-E_g/(k_B T)$ . On peut donc en tirer la valeur de  $E_g$  facilement en mesurant la pente de la (meilleure) droite tracée par les moindres carrés (en réalité, c'est Excel qui l'obtient...) :

$$\text{pente} =: p = \frac{\ln(I_0)}{1/T} = \ln(I_0) \cdot T = -\frac{E_g}{k_B} \quad \Rightarrow \quad \boxed{E_g = -p \cdot k_B}$$

On obtient donc, pour  $E_g$ , la valeur suivante (nous avons utilisé le  $p$  qui est sur le graphe de la page précédente) :

$$\underline{\underline{E_g = 9.5462 \cdot 10^{-20} \text{ [J]}}}$$

La tension ne devrait pas influencer le courant de fuite puisqu'elle n'apparaît pas dans l'équation ! Cependant on remarque que l'on n'obtient pas des pentes nulles sur le graphe 5... Cela signifie que la tension intervient d'une manière ou d'une autre mais de manière relativement discrète.

Il est amusant de constater que l'on peut calculer, trouver une énergie si minuscule avec un matériel si rudimentaire (et quand même quelque jolies formules)...

### 1.3 Redresseur une alternance :

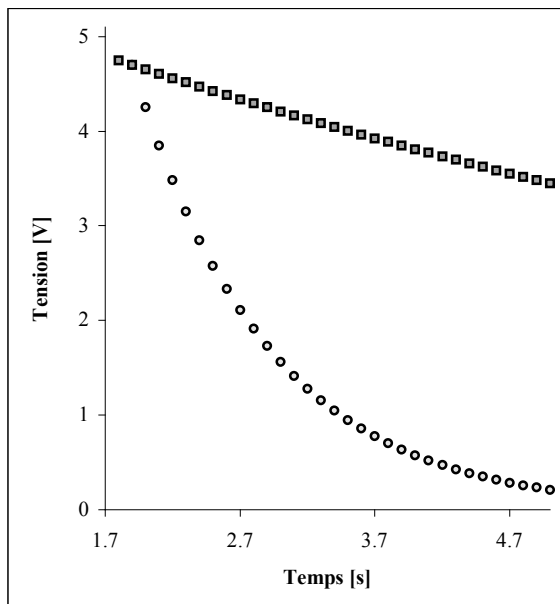
Remarquons d'abord qu'il y a un problème d'acquisition des données pour les deux premiers points (pas seulement sur cette expérience...) ; il ne faut donc pas les considérer.

Notre redresseur ne fait en fait que filtrer une partie du courant en « supprimant » toute la partie « négative » de l'ondulation, on perd donc la moitié de l'énergie fournie par la tension alternative ; c'est loin d'être optimal...

Il apparaît tout de suite que l'on n'atteint pas la tension d'entrée lorsque l'on fait le montage, avec ou sans condensateur. Cela provient sans doute du fait que la diode ne laisse pas passer l'intégrité du courant (résistance interne). Ce n'est pas (du moins pas beaucoup) à cause du condensateur, puisque varier la capacité de celui-ci ne fait quasi pas varier la tension. A part cela, on obtient une courbe tout à fait conforme à ce à quoi on s'attendait, suivant la formule :

$$V_C(t) = V_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{R_L \cdot C}\right)$$

où  $C$  est la capacité du condensateur et  $R_L$  la résistance et  $V_0$  la tension dans le circuit.



Elle n'est valide qu'à partir du moment où la tension diminue. Le graphe ci-contre montre ce que l'on obtient (lorsque l'on applique la formule ci-dessus) pour les conditions de l'expérience avec un condensateur de 10 µF (ronds jaunes) ou 100 [µF] (carrés oranges) et une résistance de 100 [KΩ]. On obtient bien quelque chose de semblable (voire même *très* semblable !). La formule ci-dessus est donc très correcte.

La tension d'ondulation est fortement (puisque la capacité est dans la fonction exponentielle) dépendante de la capacité que l'on met en parallèle. Sans capacité, nous avons bien entendu une tension qui varie entre 0 et un peu moins que la tension d'entrée (à cause de la diode). Les résultats qui sont résumés ci-dessous sont directement tirés du graphe 7 (voir aussi graphe 6) :

capacité :	0	10 [ $\mu$ F]	100 [ $\mu$ F]
tension d'ondulation :	4.56 [V]	4.38 [V]	1.34 [V]

La tension d'ondulation optimale devrait être 0 [V] mais pour cela, il faudrait une capacité infinie... mais pour n'avoir, par exemple qu'une tension d'ondulation de disons 1%, il faudrait une capacité de quelque milliFarad (soit dix fois plus que notre plus grosse capacité mais on pourrait en mettre une ou deux en parallèle ( $C_{tot} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$ .)

#### I.4 Redresseur deux alternances :

L'expérience est identique à la précédente sauf qu'on remplace la diode par quatre diodes disposées en sorte de redresser le courant « négatif » aussi, afin de ne pas perdre la moitié de l'énergie. Nous obtenons les résultats suivants grâce au graphe 8 :

capacité :	0	10 [ $\mu$ F]	100 [ $\mu$ F]
tension d'ondulation :	3.85 [V]	2.77 [V]	0.59 [V]

On a donc effectivement une tension d'ondulation à *peu près* deux fois plus faible mais notre tension maximale est, elle aussi, nettement plus basse (approximativement 75% contre près de 90%). Il est naturel de ne pas avoir exactement deux fois moins de tension d'ondulation puisque, dans le premier cas nous avons utilisé *une* diode au silicium et que la seconde fois, le courant doit passer *deux* diodes électroluminescente. Nous perdons donc un peu moins d'énergie avec deux ondulation mais cela se paie par une diminution de la tension.

## II. Transistors :

### Petit rappel théorique :

Le transistor est un élément composé de trois semi-conducteurs. Son but est très souvent d'amplifier un faible courant. Pour cela, il utilise un courant plus fort, lui permettant d'amplifier le faible courant en question. Il existe deux sortes de transistors : les pnp et les npn, ces noms faisant évidemment référence aux semi-conducteurs les composants. Nous avons travaillé avec des *transistors npn*. On peut schématiser leur fonctionnement de la manière suivante : un faible courant arrive sur la base (B) (qui est du type p), c'est ce courant que l'on veut mesurer ; un courant\* « normal » arrive sur l'émetteur (E) et, celui-ci ne pourra sortir par le collecteur (C) que si un certain courant arrive sur la base. Plus courant de base est important plus de courant passe par le collecteur. (Les noms ont l'air renversé... c'est parce qu'en électronique on considère le déplacement des trous.)

#### II.1 Caractéristiques :

On mesure tout d'abord la caractéristique  $I_C$  en fonction de  $I_B$ . On voit que le courant du collecteur (d'où sortent les électrons) ne dépend pas de la ddp (en réalité, on décèle une légère différence mais elle très faible). Le signal (courant) qui arrive sur la base d'un transistor est amplifié d'un certain facteur. Ce facteur se calcule aisément de la manière suivante :

$$h_{FE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = 190$$

Le résultat provient directement du graphe 9 (dont la pente de la droite n'est rien d'autre que  $h_{FE}$ ) sur lequel il y a les quelques petits calculs nous ayant permis de trouver ce résultat. Sur le « multigraphe » issu du protocole, cette droite correspond à la droite verte (voir ci-dessous).

On mesure ensuite le courant du collecteur en fonction de la ddp entre le collecteur et l'émetteur avec différentes valeurs pour  $I_B$ . On obtient les graphes 10 et 10b. On remarque que le courant qui sort\* du

\* Lorsque je parle de courant, je considère le déplacement des électrons comme sens positif (contraire des conventions en électronique mais facilitant la discussion)...

collecteur ( $I_C$ ) est constant pour un  $I_B$  donné ( $I_C$  ne dépend que de  $I_B$ ) sauf sur les premières fractions de volt. Sur cette partie du graphe (très faible  $V_{CE}$ ), on observe le même phénomène que dans le cas des diodes, une sorte de tension de seuil, le point de fonctionnement y est directement lié.

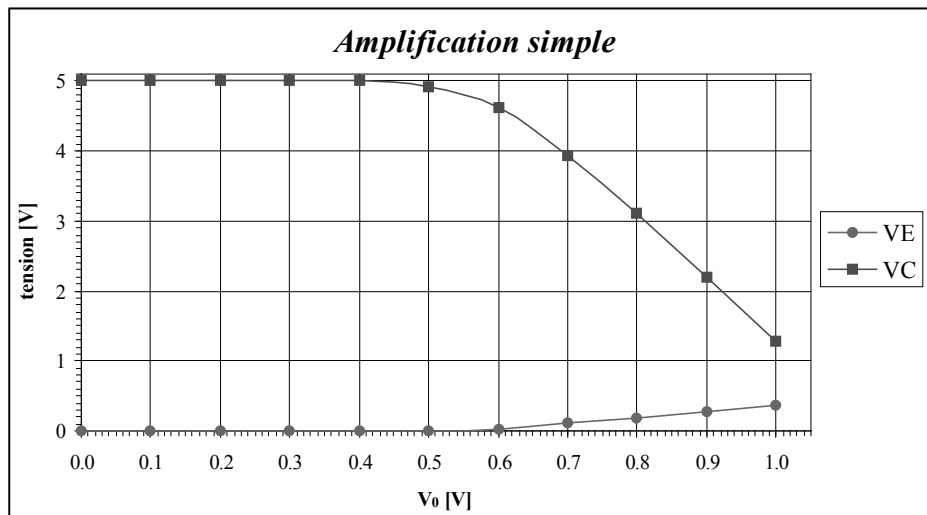
## II.2 Amplification :

### a) Courant continu :

Comme nous l'avons expliqué au début, un des principal rôle du transistor est l'amplification. On mesure d'abord des tensions qui nous permettent de voir ce qui sort ou entre des « pôles » C ou E du transistor. On remarque d'abord un bruit de quelques centièmes de volt sur  $V_E$ .

L'amplification de  $V_E$  ou  $V_C$  ne varient pas directement, car il y a cette fameuse résistance pour de faibles ddp.  $V_C$  diminue car la ddp entre avant et après la résistance de 10 [K $\Omega$ ] diminue grâce à un apport de courant du transistor qui est directement lié à  $V_E$ ... En faisant le rapport de l'un et de l'autre, on trouve l'amplification de  $V_E$  qui vaut un peu plus que 10. (Attention, pour  $V_C$ , il faut faire  $5 - V_C$  !!! mais ce n'était apparemment pas demandé...) On remarque que, après le « décollage » de la courbe, la pente vaut - 8.4 et 0.83 pour réciproquement  $V_C$  et  $V_E$ .

entrée	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
$V_E$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.11	0.19	0.27	0.36
$V_C$	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.92	4.63	3.94	3.10	2.20	1.29



### b) Courant alternatif :

Nous utilisons le même montage que pour la partie a) sauf que la tension  $V_0$  qui était auparavant constante (continue) est maintenant alternative. Il faut bien choisir  $V_0$  pour que le signal ne sture pas pour des tensions trop haute ou trop basse (voir graphe 13). Le signal qui arrive sur  $V_E$  est systématiquement amplifié une dizaine de fois à sa sortie sur  $V_C$  quelque soit la valeur de  $V_0$  choisie (voir graphe 12 à 14). Les transistors amplifient donc bien un signal alternatif et pourrait donc servir à amplifier un signal radio par exemple (à tout hasard, l'exemple !).