

TRACÉ ET MODÉLISATION DE CARACTÉRISTIQUES - corrigé du TP3

1. Caractéristique d'une diode

• Les composants électroniques évoluent (en s'améliorant) sans cesse. Durant la période 1950-70 on étudiait beaucoup les lampes diodes et triodes... ces dernières sont devenues obsolètes et remplacées par des diodes et transistors à semi-conducteurs, nettement plus performants. L'étude de ces composants, très fréquente dans la période 1980-2010, va inexorablement devenir à son tour obsolète à l'occasion de leur remplacement par d'autres circuits encore plus efficaces.

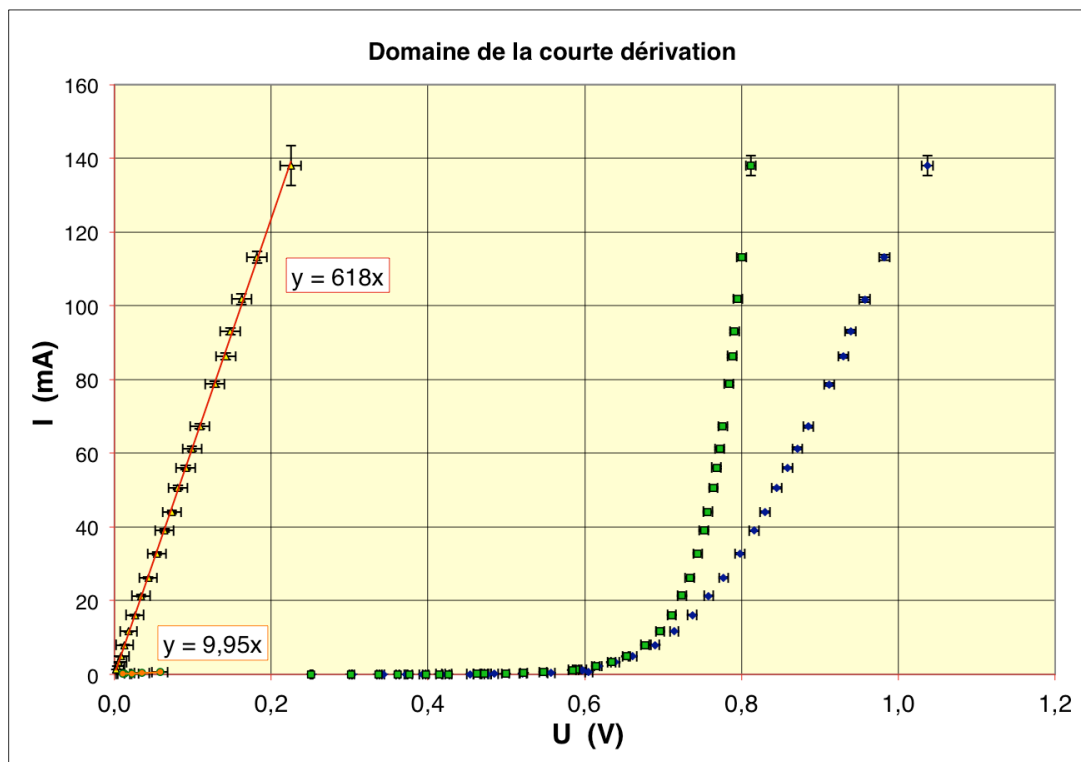
L'important ici reste toutefois la démarche expérimentale, éternelle... Quels que soient les dispositifs étudiés, il est primordial d'en comprendre le fonctionnement pratique (même si les détails techniques internes importent peu) et de savoir déterminer et interpréter (modéliser) précisément leurs caractéristiques, en utilisant les instruments de mesure à disposition, sans se laisser piéger par les imperfections de ces derniers.

Les diodes font en outre intervenir des propriétés des semi-conducteurs qui ne sont pas indépendantes de celles en œuvre dans les cellules photovoltaïques des panneaux solaires.

2. Mesure de la courbe "caractéristique"

• Les mesures ont été effectuées pour les deux montages, avec l'ampèremètre sur un calibre 200 mA.

On s'intéresse d'abord au domaine de la courte dérivation (sens "passant").



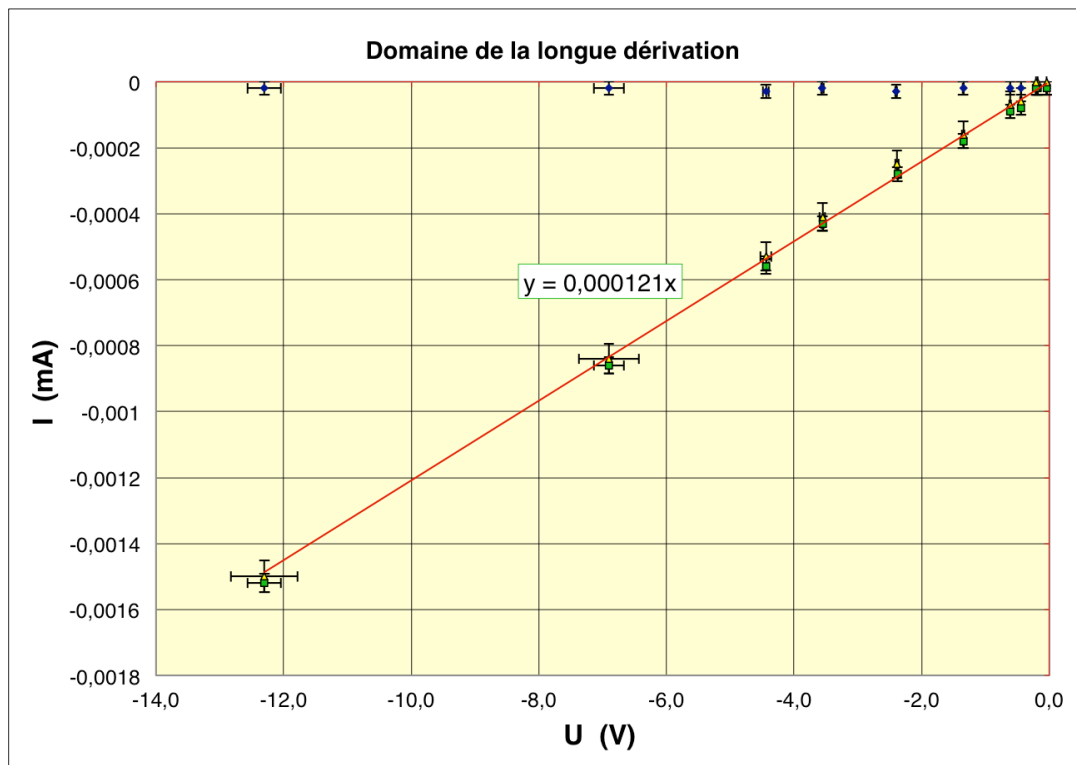
On constate que, pour une même valeur du courant, la tension mesurée est plus grande avec le montage longue dérivation (courbe plus à droite sur le graphique) : l'écart correspond à la tension aux bornes de l'ampèremètre, dans ce cas non négligeable.

En reportant cette différence, on vérifie qu'elle varie de façon linéaire : la pente correspond à la conductance de l'ampèremètre sur ce calibre : $G_A = 618 \pm 20 \text{ mS}$; soit $R_A = 1,62 \pm 0,05 \Omega$.

♦ remarque : les courbes détaillées n'ont pas été reportées, mais les mesures pour un calibre 2 mA donnent de façon analogue : $G_A = 9,95 \pm 0,30 \text{ mS}$; soit $R_A = 101 \pm 3 \Omega$.

- On constate donc effectivement que l'ampèremètre utilisé n'est pas idéal : pour mesurer le courant il consomme une certaine puissance, à laquelle est associée une tension non nulle entre ses bornes.

- On s'intéresse ensuite au domaine de la longue dérivation (sens "bloqué").



On constate alors que, pour une même valeur de la tension, le courant mesuré est plus grand (en valeur absolue) avec le montage courte dérivation (courbe plus en bas sur le graphique) : l'écart correspond au courant dans le voltmètre, dans ce cas non négligeable.

♦ remarque : pour cette diode et ce voltmètre, l'observation du défaut de la courte dérivation nécessite l'observation du courant à une échelle très petite ($\approx 2 \mu\text{A}$).

En reportant cette différence, on vérifie qu'elle varie de façon linéaire : la pente correspond à la conductance du voltmètre : $G_V = 121 \pm 4 \text{ nS}$; soit $R_V = 8,26 \pm 0,25 \text{ M}\Omega$.

Par contre, on constate qu'on obtient le même résultat pour différents calibres (20 V ; 2 V ; 200 mV). Il s'agit ainsi probablement de la résistance d'entrée d'un même circuit intégré à base d'A.O., qui ne fait que traiter ensuite différemment le signal détecté selon le calibre utilisé.

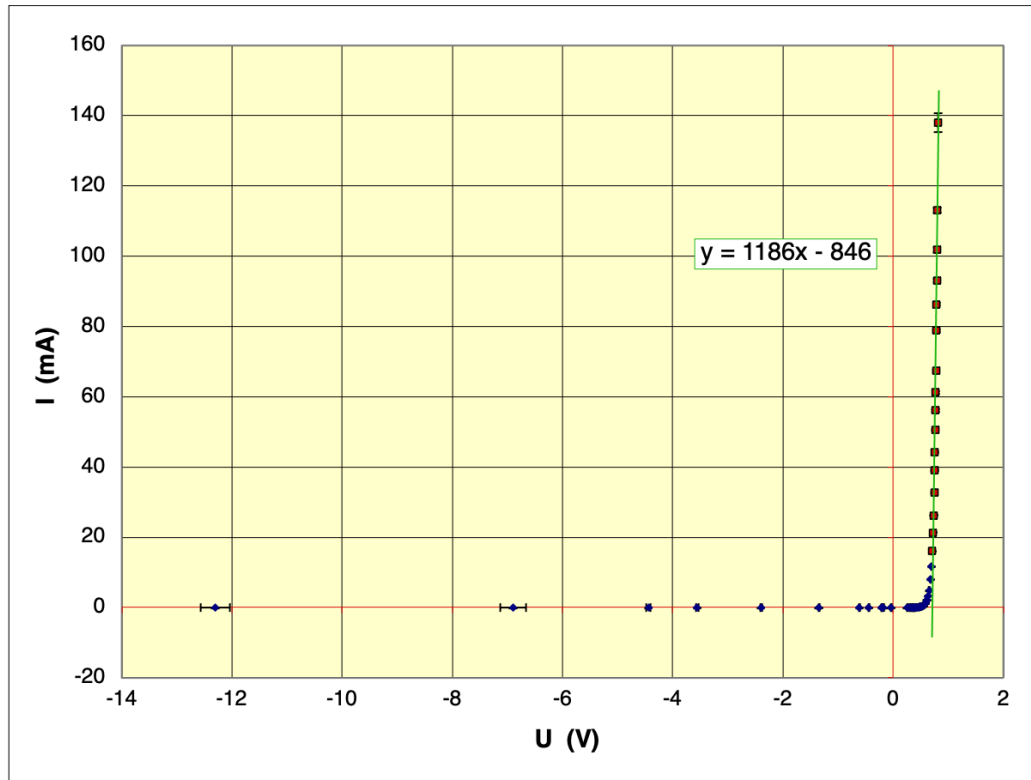
- On constate donc que le voltmètre utilisé est presque idéal : pour mesurer la tension il ne consomme pratiquement de puissance sur son entrée (il en consomme sur son alimentation) ; avec l'évolution technologique, les voltmètres sont de plus en plus "parfaits".

♦ remarque : en attente de données fournies par les étudiants pour ce qui concerne la résistance affichée par branchement direct d'un ohmmètre.

3. Modélisation de la caractéristique

3.1. Modèle affine ; notions de f.c.e.m. et de résistance

- On peut tracer l'ensemble de la courbe caractéristique en choisissant pour chaque zone la méthode de mesure appropriée.



- En première approximation (assez grossière) le courant I est nul quand la tension U est négative (sens bloqué) et la tension est nulle (relativement faible) quand le courant est positif (sens passant).

En deuxième approximation, I est positif quand U est égale à une “tension seuil” : $U_s = 0,77 \pm 0,01$ V.

En troisième approximation, le sens passant (la partie passante) peut être décrit par :

- ♦ en notation de Norton : $I = I_c + G U$ avec $I_c = -846 \pm 97$ mA et $G = 1186 \pm 50$ mS ;
- ♦ en notation de Thévenin : $U = E + r I$ avec $E = 0,71 \pm 0,08$ V et $r = 0,84 \pm 0,05$ Ω .

Dans la partie bloquée, on peut considérer en notation de Norton : $I = I_c + G U$ avec $I_c = 0$ et $G = 0$ (générateur de Norton “idéal” de courant nul, équivalent à un interrupteur ouvert).

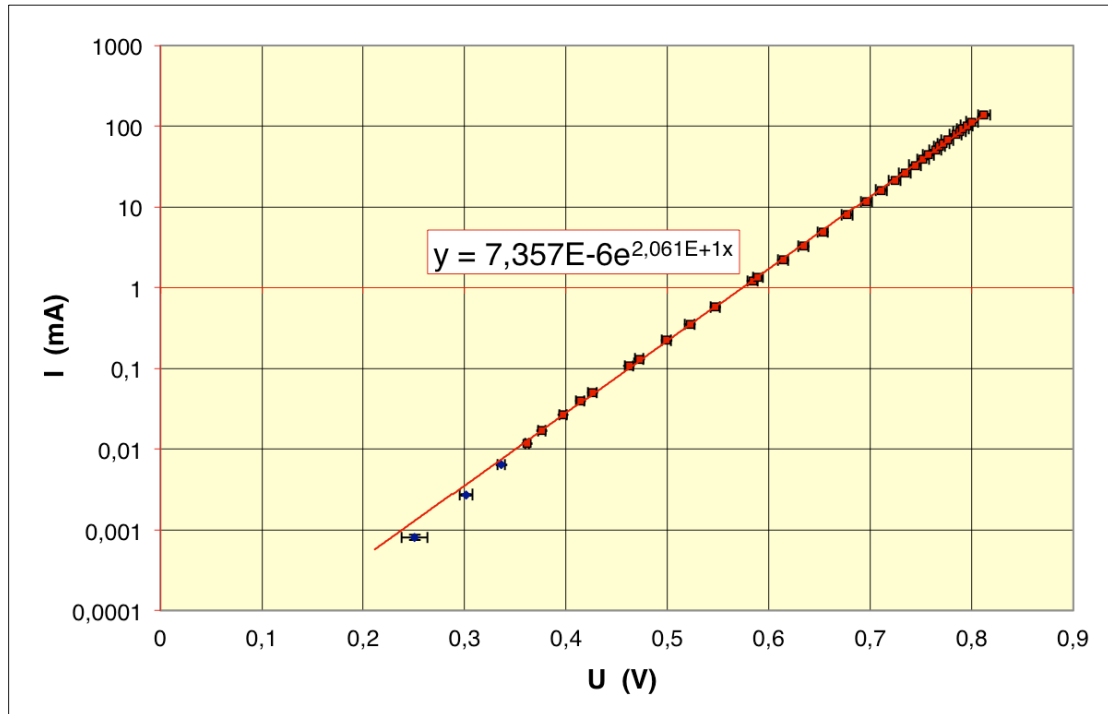
♦ remarque : en quatrième approximation, un faible courant est peut-être détecté dans le sens bloqué, mais il est compatible avec zéro compte tenu des incertitudes ($\approx -0,02 \pm 0,02$ μ A) ; on peut considérer au total une incertitude relative ≈ 1 % .

3.2. Modèle exponentiel

♦ remarque : ce modèle est “hors programme” ; c'est un approfondissement à ne considérer que comme tel.

- Les semi-conducteurs sont ainsi nommés car ils disposent a priori de peu de porteurs de charge mobiles pour transporter le courant, mais que des conditions raisonnablement simples peuvent les rendre plus conducteurs en “libérant” des porteurs de charge. Si le seuil d'énergie à fournir pour cela est $\Delta \varepsilon$, la statistique de l'agitation thermique décrite par Boltzmann indique que la probabilité de “libération” est proportionnelle à $e^{-\Delta \varepsilon / RT}$ (avec la constante des gaz parfaits $R = \mathcal{N}_A k$ où k est la constante de Boltzmann).

Dans la diode, l'énergie requise peut être apportée par le champ électrique (si la tension imposée agit dans le sens passant). En notant $\mathcal{F} = N_A |q_e|$ le faraday (charge d'une mole d'électrons en valeur absolue), l'énergie apportée à un porteur par une tension U serait $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{F}U$. Mais les interactions liées à l'agitation thermique font que seule une proportion α de cette énergie est utilisée pour cela ; on propose donc pour modèle une courbe proportionnelle de la forme $I = I_0 e^{\lambda U}$ avec $\lambda = \frac{\alpha \mathcal{F}}{RT}$.



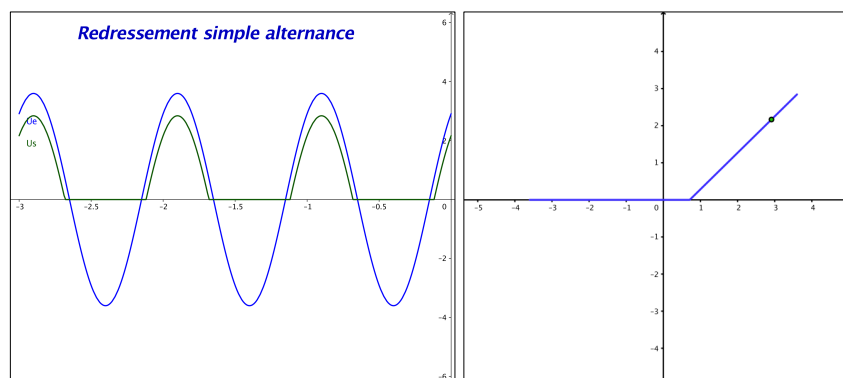
À part à l'approche du régime “bloqué”, cette modélisation semble très bonne, avec $I_0 = 7,4 \pm 1,5$ nA et $\alpha = 0,52 \pm 0,02$ (ajusté sur la partie $U > 0,35$ V).

• L'interprétation microscopique précédente est simplifiée ; une description plus précise de l'ensemble de la courbe, incluant le sens “bloqué”, doit tenir compte du fait que dans ce sens l'agitation thermique peut toujours “libérer” quelques porteurs de charge (très faible courant en sens inverse). Ceci conduit à une expression de la forme $I = I_0 \cdot (e^{\lambda U} - 1)$; on obtient ainsi $I_0 = 6,77 \pm 0,40$ nA et $\alpha = 0,533 \pm 0,003$.

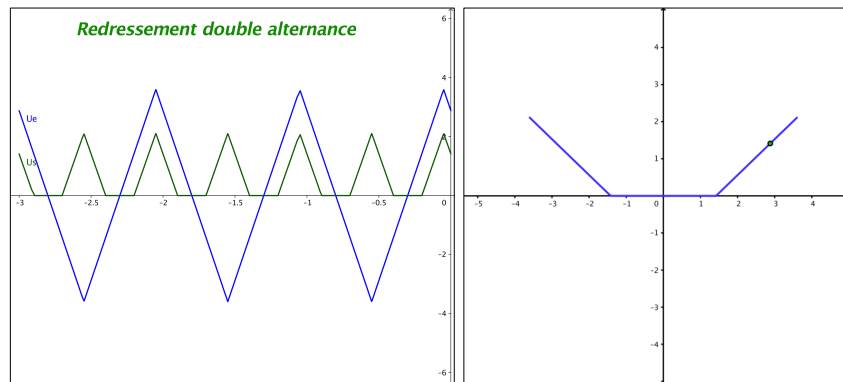
4. Montage redresseur

• En attente de données fournies par les étudiants... on peut tout de même effectuer une simulation ; la modélisation affine est pour cela tout à fait suffisante.

On obtient pour le redressement “simple alternance” sinusoïdal (à droite en mode XY) :



De même pour la “double alternance” triangulaire avec le pont de Graetz :



- On constate l'inévitable perte associée à la f.c.e.m. (seuil) de la diode, d'autant plus néfaste qu'elle correspond à une proportion importante du signal (ce dernier a donc intérêt à être nettement supérieur).

L'avantage de la double alternance est d'éviter de perdre la moitié de l'énergie “récupérable” du signal, mis à part l'inévitable effet du seuil. Mais l'inconvénient est que ce dernier est doublé puisque ce pont comporte dans chaque voie deux diodes en série (le doublement de la résistance associée importe peu car elle est très faible). Il est donc dans ce cas encore plus important de travailler avec des signaux nettement supérieurs au seuil.