

CHAPITRE 4 : INTRODUCTION A LA PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS

I. Structure atomique

D'après Bohr, l'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons.

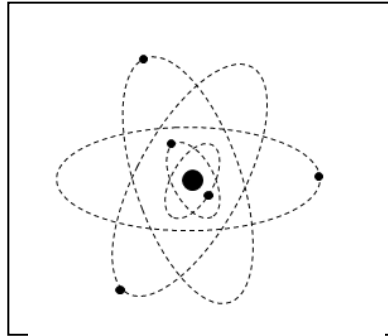


Figure 1 : Modèle de Bohr

Le modèle de Bohr est une théorie physique basée sur le modèle de Rutherford.

- l'électron ne rayonne aucune énergie lorsqu'il se trouve sur une orbite stable ou stationnaire
- l'électron ne rayonne ou n'absorbe de l'énergie que lors d'un changement d'orbite.

II. Niveaux d'énergie

Les électrons dans un atome sont assujettis à occuper des niveaux d'énergie discrets (E_1 , $E_2, \dots$; E_n) définissant chacun une couche électronique.

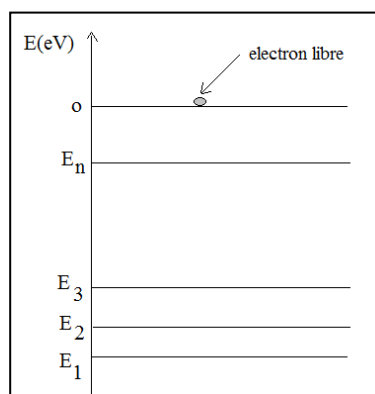


Figure 2 : Niveaux d'énergie

On distingue :

- Les électrons internes qui occupent les premières couches. Ils sont fortement liés au noyau.
- Les électrons périphériques ou de valence qui occupent la couche la plus externe.

III. Conducteurs, isolants et semi-conducteurs

1. Les 3 types de matériaux

a. Conducteurs

Un matériau conducteur conduit aisément le courant. Les meilleurs conducteurs sont des matériaux constitués d'un seul élément (Cu, Ag, Al). Ces éléments sont caractérisés par des atomes ayant un seul électron de valence faiblement lié à l'atome. Résistivité $\rho < 10^{-6} \Omega.m$

b. Isolants

Un isolant est un matériau qui ne conduit pas le courant électrique sous des conditions normales. Ce sont des matériaux composés de plusieurs éléments. Les électrons de valence sont solidement attachés aux atomes laissant peu d'électrons libres. Résistivité $\rho > 10^{10} \Omega.m$

c. Semi-conducteurs

Selon l'habilité à conduire le courant électrique, un semi-conducteur est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant. Ils sont isolants au zéro absolu.

Exemple : les dispositifs au silicium sont prédominants.

2. Bandes d'énergie

En physique du solide, la théorie des bandes est une modélisation des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un solide à l'intérieur de celui-ci.

- les bandes de faible énergie correspondent aux électrons de valence.
- les bandes de haute énergie correspondent à des électrons quasi-<<libres>> de se détacher de la structure et peuvent participer à une conduction

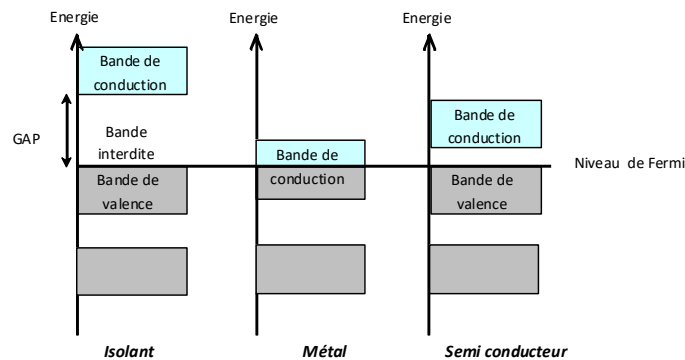


Figure 3 : Diagramme énergétique pour les 3 types de matériaux

IV. Semi-conducteurs intrinsèques

1- Cristal de silicium

Quand les atomes de silicium s'assemblent pour faire un solide, ils s'ordonnent selon un motif appelé cristal. La structure cristalline du silicium consiste en une répétition régulière à 3 dimensions d'une cellule unité de la forme d'un tétraèdre ayant un atome à chaque sommet. La figure suivante est la représentation symbolique à deux dimensions de cette structure.

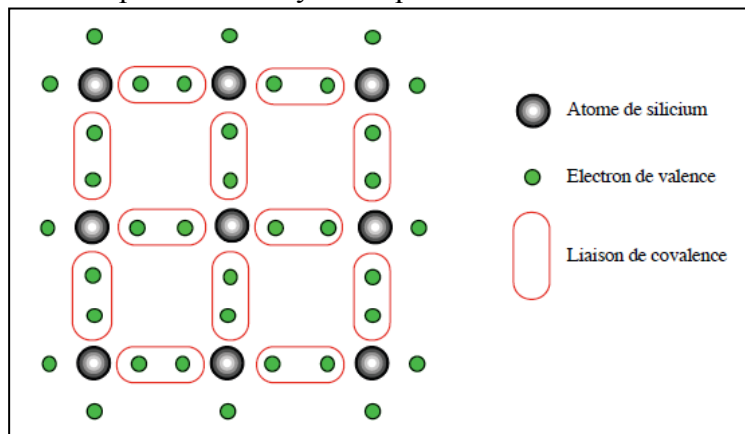


Figure 4 : Cristal de silicium à 0 K

A 0 K, le silicium est un isolant, en effet la bande de valence est saturée.

3. Ionisation thermique : génération de paires électrons-trous

Lorsque la température augmente, l'agitation thermique désordonne la configuration figée à 0 K. En effet les électrons les plus énergétiques acquièrent suffisamment d'énergie pour s'échapper de leurs liaisons et deviennent libres laissant derrière eux des trous qui ont des charges opposés à celles des électrons.

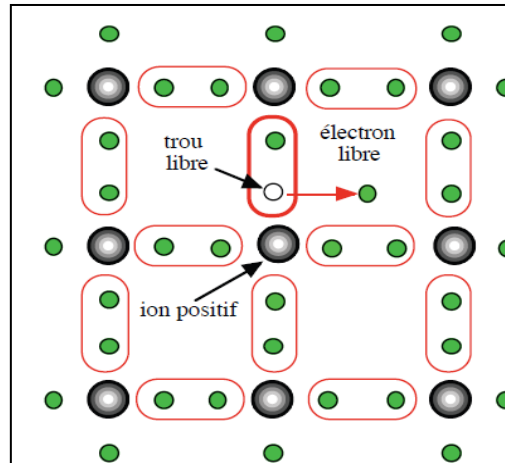


Figure 5 : Création d'une paire électron-trou par rupture d'une liaison de covalence sous l'effet de la température

Ce phénomène d'ionisation thermique n'intéresse qu'un nombre très faible d'atomes de silicium (3 sur 10^{13} à $T=300$ K)

L'ionisation thermique est compensée par la recombinaison d'électrons libres. En effet un électron libre arrivant lors de son déplacement dans le cristal à proximité d'un trou peut être « capturé » par ce dernier.

La durée entre la création et la disparition d'un électron libre est appelée durée de vie (elle varie de quelques nanosecondes à plusieurs microsecondes).

4. Concentration intrinsèque n_i des électrons et des trous dans le silicium pur

A température constante, un cristal de silicium possède le même nombre d'électrons libres que de trous. Les concentrations par unité de volume (cm^3) n en électrons libres dans la bande de conduction, p en trous libres dans la bande de valence sont égales à n_i : la concentration intrinsèque :

$$n = p = n_i$$

La mécanique statistique montre que la population des porteurs libres (n électrons/ cm^3) dans la bande de conduction et (p trous/ cm^3) dans la bande de valence est :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_n}{kT}\right)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_p}{kT}\right)$$

où

- N_c et N_v sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états dans la bande de valence. N_c et N_v évoluent avec la température.

- ΔE_c et ΔE_v représentent deux différences d'énergie liée à un niveau fermi.

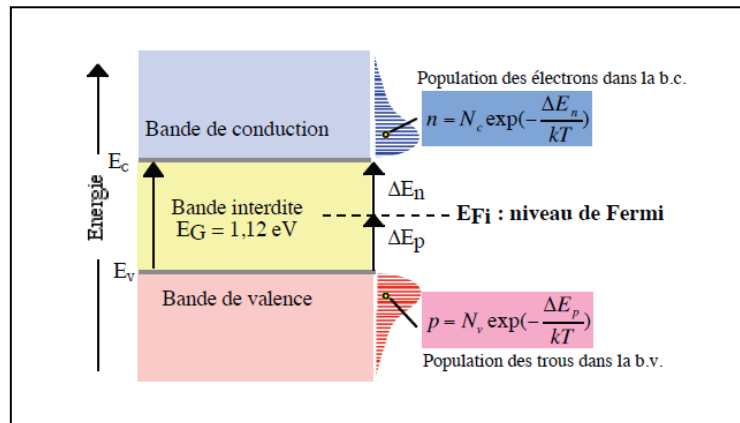


Figure 6 : Populations des électrons et des trous du silicium pur position du niveau de Fermi

Le niveau de Fermi est une caractéristique propre à un système qui traduit la répartition des électrons dans ce système en fonction de la température

Quelque soit la température du cristal, un cristal de silicium possède le même nombre d'électrons libres que de trous

Remarque : les paires d'électrons trous sont les seuls porteurs de courant d'un semi conducteur intrinsèque mais il n'y en a pas suffisamment pour produire un courant utilisable en pratique.

V. Semi-conducteur extrinsèque

1. Doper un semi conducteur

Le dopage est une méthode permettant d'augmenter la conductivité d'un semi conducteur en introduisant des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques.

2. Semi-conducteurs de type N

Le silicium dopé avec une impureté pentavalente (Arsenic As; phosphore P; Bismuth Bi et l'Antimoine Sb) est appelé semi-conducteurs de type N.

Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.

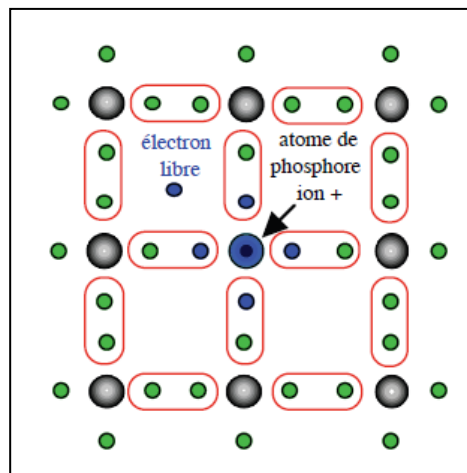


Figure 7 : Semi-conducteur de type N

Remarque : Le matériau demeure neutre

3. Semi-conducteur de type P

Le silicium dopé avec une impureté trivalente (B, Al, Ge...) est appelé semi-conducteur de type P.

Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons libres les porteurs minoritaires.

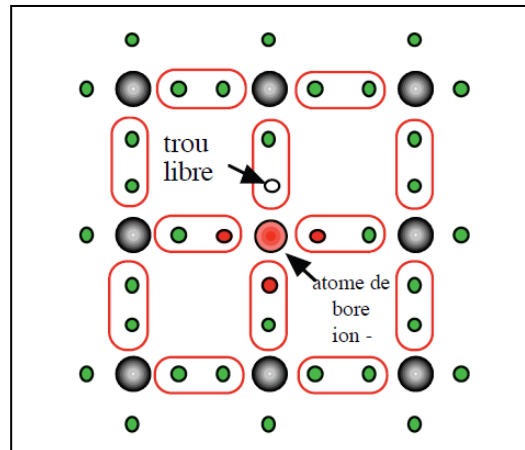


Figure 8 : Semi-conducteur de type P

Remarque : Le matériau reste neutre

VI. Jonction PN en circuit ouvert

1. Jonction PN en circuit ouvert

a. Création d'une jonction PN

Une jonction PN est constituée par la réunion de 2 semi-conducteurs dopés P et N.

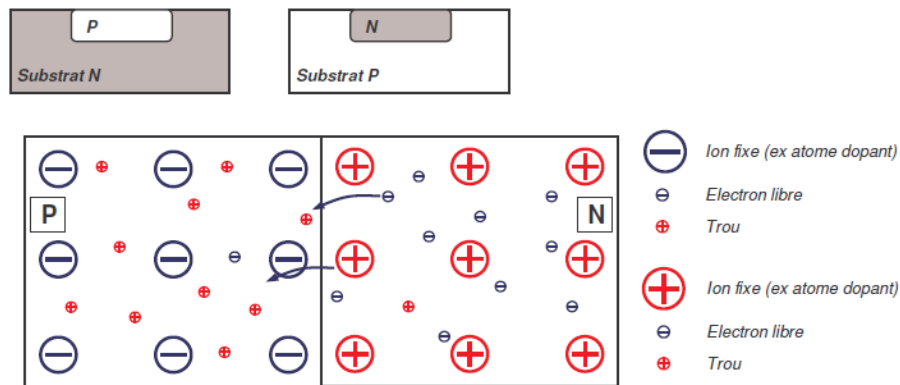


Figure 9 : Création d'une jonction PN

b. Formation de la région d'appauvrissement

Lorsque la jonction PN est créée la région N perd des électrons à mesure qu'ils diffusent à travers la jonction. Ceci engendre une couche de charges positives (ions pentavalents) près de la jonction. A mesure que les électrons traversent la jonction, la région P perd des trous puisqu'ils se combinent aux électrons. Ceci crée une couche de charges négatives (ions trivalents) à proximité de la jonction. Les deux couches de charges positives et négatives forment la région d'appauvrissement.

L'équilibre de la jonction est atteint lorsqu'il n'y a plus de diffusion.

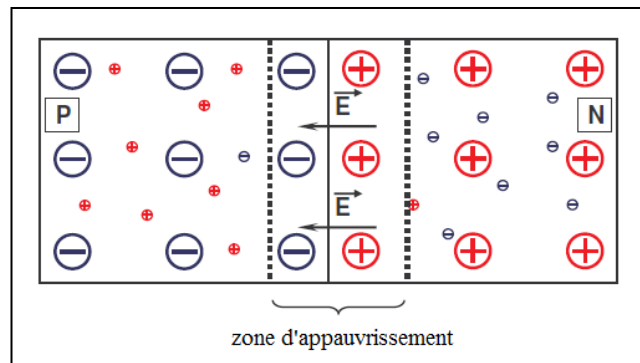


Figure 10: Formation de la zone d'appauvrissement

c. Barrière de potentiel

Les forces entre charges opposées de la zone d'appauvrissement forme " un champ de charges" appelé champ électrique qui est une barrière aux électrons libres de la région N.

La différence de potentiel du champ électrique est appelée barrière de potentiel.

Elle dépend de plusieurs facteurs (type du matériau semi-conducteur, qualité du dopage, température).

- 0,7 V pour le silicium à 25°C
- 0,3 V pour le germanium à 25°C

d. Diagramme énergétique de la jonction PN et de la région d'appauvrissement

Les électrons diffusent de N vers P. Après avoir traversé la jonction, ils perdent rapidement leur énergie et tombent dans les trous de la bande de valence de la région P, pendant que la diffusion continue, la région d'appauvrissement commence par se former et le niveau d'énergie de la bande de conduction de la région N décroît (diminution provoquée par la perte d'électrons).

Une dénivellation énergétique existe ainsi à travers la région d'appauvrissement.

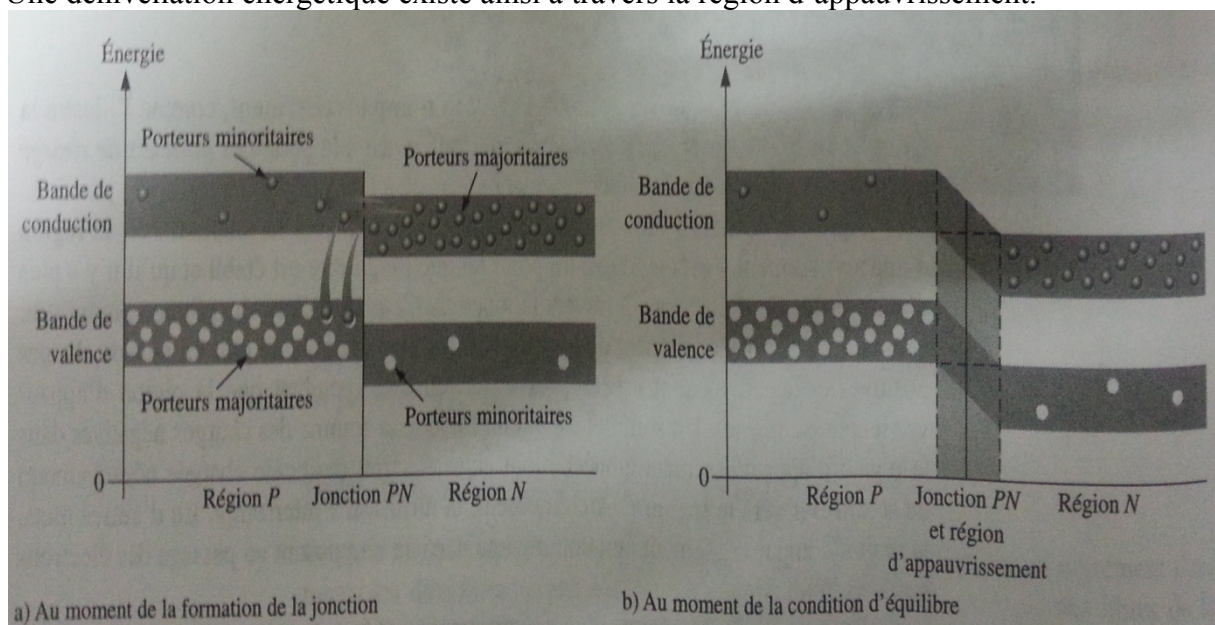


Figure 11 : Diagramme énergétique de la jonction PN et de la région d'appauvrissement

2. Polarisation d'une jonction PN

- Pour polariser une jonction PN, on applique une source de tension continue à travers elle. La borne négative sur le côté N et la borne positive sur le côté P.

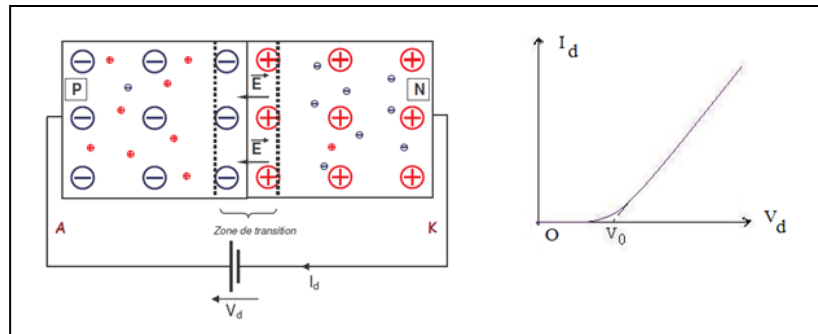


Figure 12: Polarisation directe

Si la source de tension est supérieure à la barrière de potentiel, les électrons libres ont assez d'énergie suffisante pour traverser la zone d'appauvrissement et aller se recombiner avec les trous de la région P. Le courant continu à travers la diode provient de l'entrée continue d'électrons libres à la droite de la diode et de la création incessante de trous à l'extrémité à gauche.

- **En effet la polarisation directe sur la région d'appauvrissement.**

A mesure que les électrons se déplacent dans la région d'appauvrissement le nombre d'ions positifs est réduit. A mesure que les trous se déplacent vers la région d'appauvrissement de l'autre côté de la jonction le nombre d'ions négatifs diminue. Cette réduction des électrons et ions positifs amène un rétrécissement.

3. Polarisation inverse

Le champ produit par la source externe a même direction que le champ de la zone d'appauvrissement.

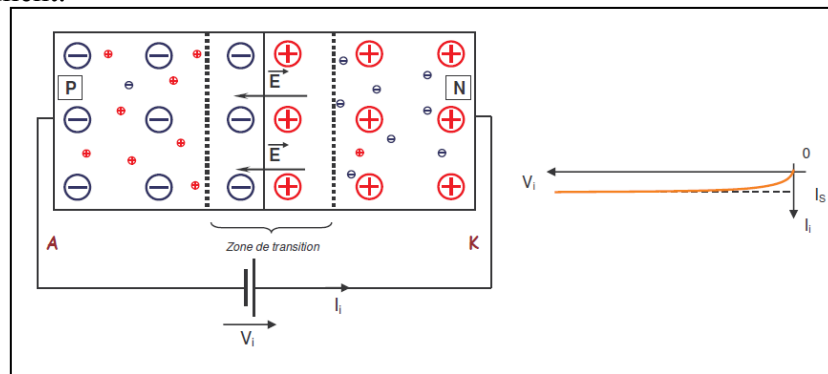


Figure 13 : Jonction PN en polarisation inverse

Les électrons et trous se déplacent vers les extrémités du cristal : la zone d'appauvrissement s'élargit.

• **Courant transitoire**

Pendant que la zone d'appauvrissement s'ajuste à sa nouvelle largeur, électrons et trous s'éloignent de la jonction. Des électrons sortent du cristal par la droite et s'écoulent vers la borne positive de la source. Ce courant transitoire s'annule dès que la zone d'appauvrissement cesse de s'élargir.

• **Courant inverse**

Dès que le courant transitoire cesse, les paires électrons-trous générées par la chaleur produisent des porteurs minoritaires aux régions P et N créant un faible courant inverse, ce courant est appelé courant de saturation. Car on ne peut plus avoir plus de porteurs minoritaires que ceux venant de l'agitation thermique.

Remarque : le courant inverse d'une diode au silicium est tellement faible qu'il est ignoré dans la plupart des applications.

- **Claquage inverse**

Normalement le courant inverse est si petit qu'il peut être négligé. Cependant, si l'on augmente la tension suffisamment pour atteindre une valeur appelée tension de claquage, le courant inverse augmentera de façon drastique.

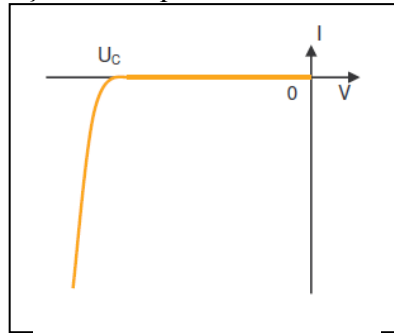


Figure 14 : Claquage inverse

La tension de polarisation inverse plus élevée augmente l'énergie cinétique des électrons minoritaires qui, à mesure qu'ils accélèrent vers la région P, entrent en collision avec des atomes pour pousser des électrons de valence hors de leur orbite vers la bande de conduction. Ces nouveaux électrons de conduction, de niveau d'énergie élevé répètent le processus. Cette multiplication rapide des électrons de conduction est connue sous le nom **d'avalanche** et produit un courant inverse très élevé qui peut endommager la jonction PN dû à la dissipation de chaleur excessive.

4. Caractéristique du Courant–Tension $I=f(V)$

La caractéristique courant-tension offre la propriété intéressante de lier les phénomènes qui se produisent dans le voisinage de la jonction aux grandeurs accessibles aux bornes externes. Elle peut s'écrire :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{eV}{\eta kT}\right) - 1 \right]$$

I_s : courant de saturation

k : constant de Boltzman

T : température absolue

η : facteur technologique dépendant du type de diode et de la manière dont elle est fabriquée ($1 < \eta < 2$)

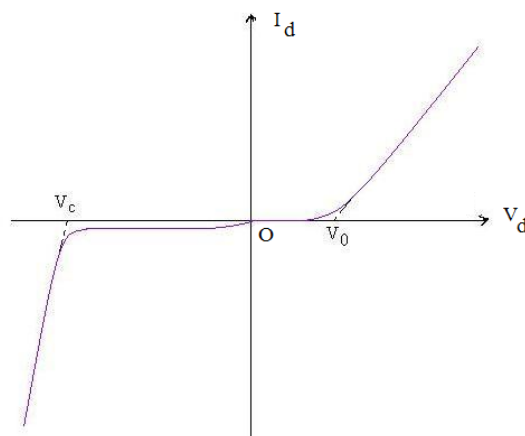


Figure 15 : Caractéristique Courant -Tension