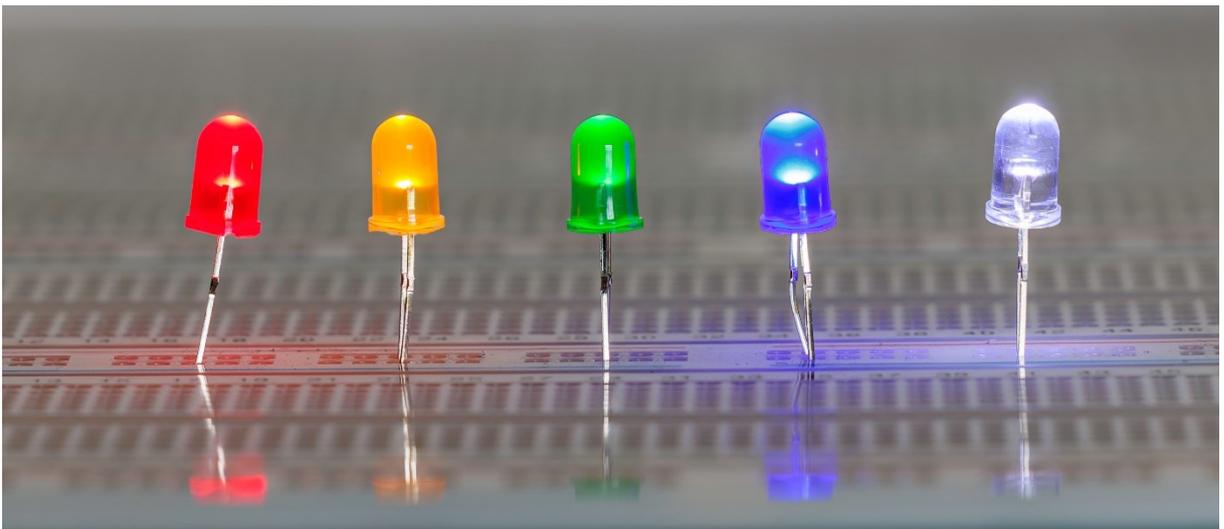


6.

Semi-conducteurs



© Henri Weyer

Sommaire

1	Semi-conducteurs	1
1.1	Résistivité d'un matériau	1
1.2	Conducteurs, semi-conducteurs et isolants.....	1
1.3	Électrons de valence et électrons libres.....	1
1.4	Bandes d'énergie.....	2
2	Semi-conducteur intrinsèque.....	3
2.1	Définition.....	3
2.2	Structure cristalline	3
2.3	Conduction	4
3	Semi-conducteur extrinsèque	5
3.1	Définition.....	5
3.2	Dopage de type N.....	5
3.3	Dopage de type P	6
4	Jonction PN.....	7
4.1	Définition.....	7
4.2	Jonction PN non polarisée.....	7
4.3	Jonction PN polarisée	8
4.3.1	Polarisation dans le sens direct.....	8
4.3.2	Polarisation dans le sens inverse.....	8
5	Diode à jonction	9
5.1	Constitution.....	9
5.2	Symbole.....	9
5.3	Caractéristique d'une diode à jonction	10
5.4	Modélisation	12
5.5	Étude d'une diode dans un circuit simple	13
6	LED.....	17
6.1	Introduction	17
6.2	Structure.....	17
6.3	Principe de fonctionnement	17
6.4	Caractéristiques électriques.....	18
7	Exercices.....	19

1 Semi-conducteurs

1.1 Résistivité d'un matériau

La résistance d'un tronçon de matériau donné dépend du matériau utilisé. C'est la résistivité ρ du matériau qui représente sa capacité à s'opposer au passage du courant électrique.

La résistivité ρ dépend du matériau et de la température et est numériquement égale à la résistance d'un matériau de longueur 1 m et de section 1mm^2 (respectivement 1m^2 suivant l'unité utilisée).

Formule :
$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{S}$$

1.2 Conducteurs, semi-conducteurs et isolants

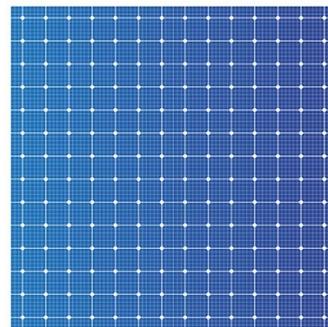
On peut classer les matériaux solides selon leur résistivité électrique en trois groupes ; à savoir les conducteurs, les semi-conducteurs et les isolants. Les trois groupes se distinguent par leurs différentes résistivités électriques. En effet les conducteurs possèdent une très petite résistivité ($\rho < 1 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$), tandis que les isolants possèdent une très grande résistivité ($\rho > 10^{12} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$). Les semi-conducteurs possèdent une résistivité intermédiaire aux valeurs des conducteurs et isolants.

Au groupe des semi-conducteurs appartiennent des éléments tels que le silicium et le germanium ou des alliages tels que l'arséniure de gallium (GaAs) et le nitrure d'indium (InN).

Les semi-conducteurs sont entre autres utilisés en électronique (diodes, diodes électroluminescentes communément appelées LED, transistors, ...) et dans la construction des cellules photovoltaïques.



Lampes LED pour l'éclairage résidentiel



Cellules photovoltaïques

1.3 Électrons de valence et électrons libres

Le courant électrique dans un métal correspond à un mouvement d'électrons libres (cf. classe de 4^e) du conducteur. Ces électrons étaient à l'origine des électrons de valence, qui faiblement liés au noyau atomique, ont pu facilement quitter le noyau atomique, et peuvent se déplacer librement dans le conducteur. Les électrons de valence sont des électrons de la couche externe de l'atome, moins liés à l'atome que les électrons des couches internes, qui ne participent pas au courant électrique. Les électrons de valence qui se sont échappés de l'atome sont alors libres de se déplacer et peuvent participer au courant électrique. Les ions positifs restants sont par contre emprisonnés dans le réseau métallique et ne peuvent donc pas participer au courant.

Dans un isolant par contre les électrons de valence sont solidement liés à leur atome et n'ont pas assez d'énergie pour le quitter dans des conditions normales. Ainsi, à moins d'un apport d'énergie considérable, il n'y a pas ou peu d'électrons libres dans un isolant.

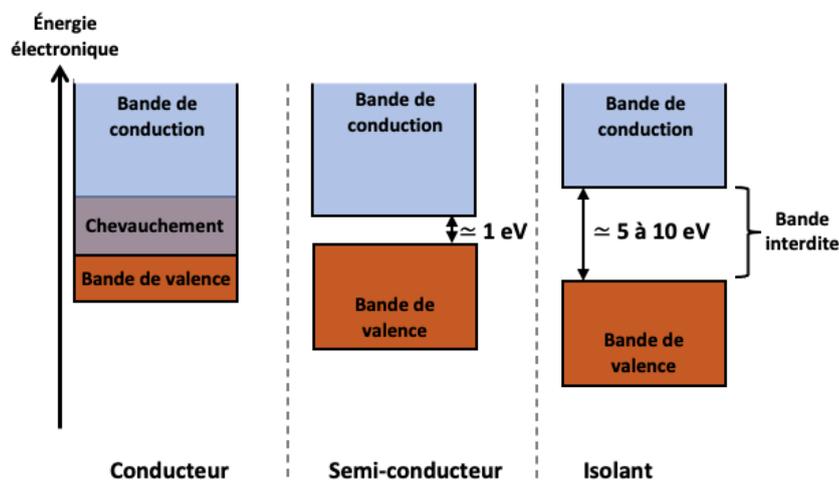
Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la résistivité se situe entre celle des conducteurs et des isolants. Les électrons de valence sont plus liés aux atomes que ceux des conducteurs et ne peuvent pas quitter d'eux-mêmes leurs atomes. Cependant ils ont seulement besoin d'un petit apport énergétique, qui est plus petit que pour les isolants, pour se transformer en électrons libres et faire en sorte que les semi-conducteurs conduisent le courant électrique.

1.4 Bandes d'énergie

Les électrons de valence, liés à l'atome, sont confinés dans une bande d'énergie délimitée, appelée **bande de valence**. Un électron de valence ayant reçu assez d'énergie peut quitter la bande de valence et devenir un électron libre. Il se retrouve alors dans une bande d'énergie supérieure, la **bande de conduction**. L'électron est alors libre de se déplacer dans tout le matériau, n'étant lié à aucun atome.

Entre les deux bandes d'énergie se trouve une bande d'énergie interdite pour les électrons, dont la largeur est appelée **gap d'énergie**. Il faut donc apporter aux électrons une énergie supérieure au gap d'énergie, afin qu'ils puissent quitter la bande de valence et traverser la bande interdite pour se placer dans la bande de conduction.

La figure ci-dessous indique les diagrammes des bandes d'énergie avec l'écart énergétique pour un conducteur, un semi-conducteur et isolant.



Bandes d'énergie et bande interdite pour les conducteurs, semi-conducteurs et isolants

La figure nous permet de conclure que :

- dans un conducteur il y a chevauchement des bandes de valence et de conduction, expliquant le grand nombre d'électrons libres. Les électrons peuvent en effet passer librement de la bande de valence à la bande de conduction.
- dans un semi-conducteur le gap d'énergie est assez faible, de l'ordre de 1 eV (électronvolt). Si on apporte aux électrons de valence cette faible quantité d'énergie (ou plus), alors ces électrons sont capables de « sauter » vers la bande de conduction et donc de se transformer en électrons libres. On peut apporter cette quantité d'énergie en chauffant le matériau ou en lui appliquant un champ électrique ou suivant le matériau en l'illuminant avec de la lumière.

- dans un isolant la largeur de la bande interdite est si grande, de l'ordre de 5 à 10 eV, qu'elle est quasiment infranchissable et ainsi les électrons ne peuvent pas passer dans la bande de conduction, à moins d'appliquer une tension élevée au matériau pouvant en provoquer sa détérioration.

■ As-tu compris ?

Déterminer pour chacun des éléments suivants s'il se comporte comme un conducteur, un semi-conducteur ou un isolant.

Elément	Gap d'énergie en eV	Type de matériau
Silicium	1,1	
Diamant	5,5	
Germanium	0,7	
Cuivre	0	

2 Semi-conducteur intrinsèque

2.1 Définition

Un **semi-conducteur** est dit **intrinsèque** s'il est pur, c.-à-d. s'il ne possède aucune impureté (ou atome étranger). Son comportement électrique, ne dépendant que de la structure du matériau, correspond à celui d'un semi-conducteur parfait.

2.2 Structure cristalline

Les éléments les plus utilisés pour les semi-conducteurs sont le silicium et le germanium. Ils appartiennent à la colonne IV du tableau périodique et possèdent 4 électrons dans la bande de valence (voir figures 1 et 2).

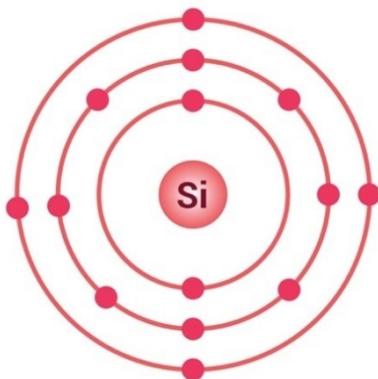


Fig. 1 : Configuration électronique du silicium

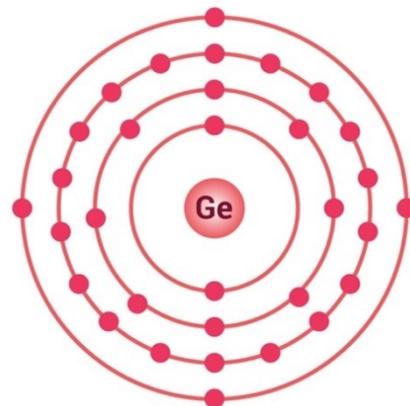
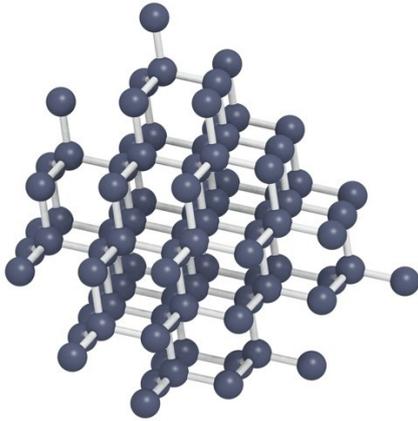
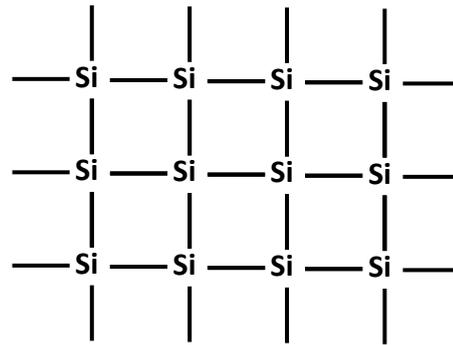


Fig. 2 : Configuration électronique du germanium

Ainsi chaque atome de silicium ou de germanium possède 4 atomes voisins et ils possèdent une structure cristalline analogue à celle du diamant, appelée structure cubique. Ci-dessous est représentée la structure cristalline du silicium.



Structure cristalline du silicium (en 3 dimensions)



Structure cristalline du silicium (en 2 dimensions)

■ As-tu compris ?

Explique pourquoi la valeur de la bande d'énergie interdite est plus petite pour le germanium que pour le silicium.

2.3 Conduction

Suite à une excitation thermique, des électrons de valence peuvent acquérir une énergie suffisante pour passer de la bande de valence dans la bande de conduction (voir fig. 3). Chaque électron, chargé négativement, passant dans la bande de conduction, laisse derrière lui, après avoir quitté l'atome, une charge positive appelée **trou**. Ceci entraîne que la **résistivité** d'un semi-conducteur intrinsèque **diminue** avec la température, contrairement au conducteur métallique où la résistivité augmente généralement avec la température (dû à l'agitation des ions du réseau métallique).

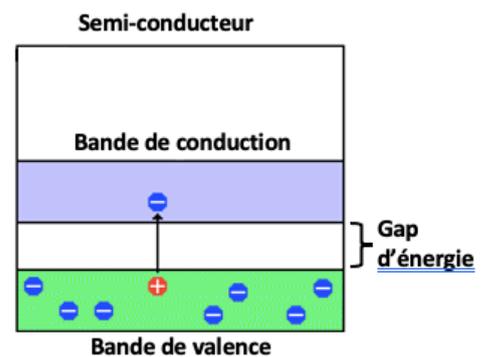


Fig. 3 : Excitation d'un semi-conducteur

Cependant il faut savoir qu'un semi-conducteur intrinsèque est un mauvais conducteur, à moins de l'amener à température élevée.

Remarque :

Chaque électron libre peut ainsi participer à la conduction en tant que porteur de charge négative. On peut en outre considérer le trou positif laissé par l'électron comme un porteur de charge positive participant également à la conduction. Dans un semi-conducteur intrinsèque, le nombre de trous positifs est toujours égal au nombre d'électrons libres.

Considérons que dans un semi-conducteur les électrons libres se déplacent vers la gauche. L'atome initial, ayant perdu un électron est alors chargé positivement. Or un électron libre voisin a, quant à lui, tendance à neutraliser le trou positif. On parle alors de **recombinaison**. Cet électron libre rend alors cet atome de nouveau neutre, mais laisse à son tour derrière-lui un nouveau trou positif. Les trous positifs, quant à eux, ont l'air de se déplacer vers la droite.

Le courant électrique peut de ce fait être considéré comme :

- un mouvement de charges négatives : les électrons libres de la bande de conduction
- un mouvement de charges positives : les trous de la bande de valence se déplaçant dans le sens opposé à celui des électrons

Animation :

<https://www.leifiphysik.de/elektronik/einfuehrung-die-elektronik/downloads/eigenleitung-im-siliziumkristall-halbleitereigenschaften-animation>

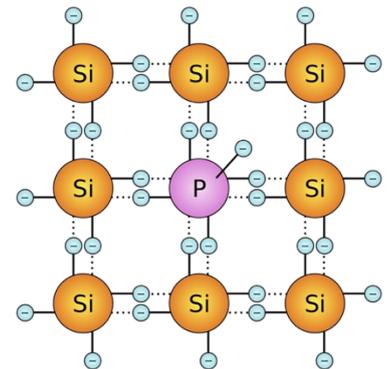
3 Semi-conducteur extrinsèque

3.1 Définition

Un **semi-conducteur** est dit **extrinsèque**, lorsqu'on introduit des impuretés spécifiques dans un semi-conducteur intrinsèque, afin d'en modifier la conductivité, qui est l'inverse de la résistivité. L'introduction de ces impuretés est appelée **dopage** du semi-conducteur.

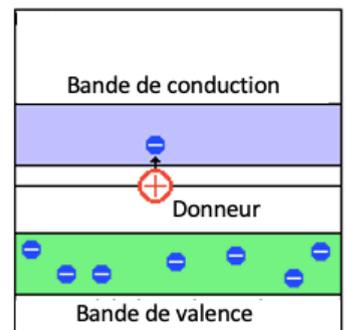
3.2 Dopage de type N

Le **dopage de type N** consiste à introduire des impuretés qui sont des atomes donneurs d'électrons. Ces impuretés sont des atomes de valence V (p.ex. phosphore ou arsenic) où un **électron** faiblement lié à l'atome est en excédent dans les liaisons covalentes avec les atomes de valence IV du réseau cristallin (p.ex. silicium). Cet électron excédentaire non utilisé dans ces liaisons peut facilement passer dans la bande de conduction. L'élément servant au dopage est ainsi dit **donneur** (d'électrons).



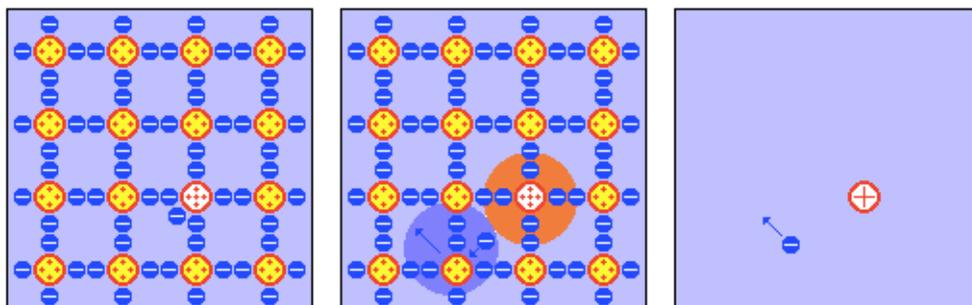
Le taux de dopage des impuretés est de l'ordre de 10^{-10} . Ceci veut dire que dans un **semi-conducteur de type N**, on a 1 atome p.ex. de phosphore pour 10^{10} atomes de silicium.

Le donneur, p.ex. le phosphore, possède en effet une bande d'énergie intercalée entre les bandes de valence et de conduction du semi-conducteur. Cette bande d'énergie est très proche du niveau d'énergie de la bande de conduction du semi-conducteur et un faible apport d'énergie (de l'ordre de 0,04 eV), nettement inférieur au gap d'énergie entre bande de valence et de conduction, suffit à faire passer un électron de cette bande d'énergie vers la bande de conduction.



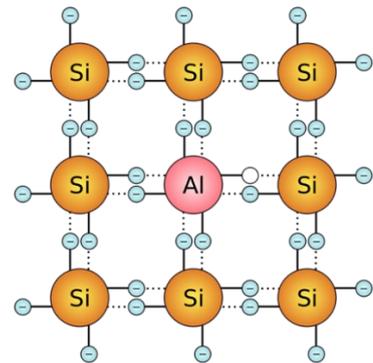
De cette façon le cinquième électron de l'atome donneur peut passer plus facilement dans la bande de conduction et devenir un électron libre. L'atome donneur, de charge positive, reste immobile. Ainsi dans un semi-conducteur de type N, le courant électrique est constitué principalement par le mouvement d'électrons libres.

Mouvement d'électrons libres dans un semi-conducteur de type N

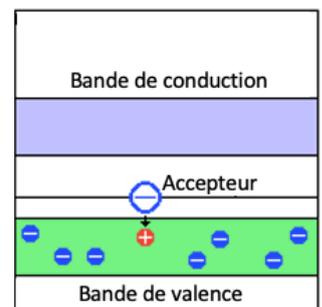


3.3 Dopage de type P

Le **dopage de type P** consiste à introduire des impuretés qui sont des atomes accepteurs d'électrons. Ces impuretés sont des atomes de valence III (p.ex. bore ou aluminium) où il manque un électron, afin que cet atome établisse quatre liaisons covalentes avec les atomes de valence IV du réseau cristallin (p.ex. silicium). Ce quatrième électron manquant laisse ainsi un trou qui peut facilement recevoir un électron supplémentaire issu de la bande de valence d'un atome voisin. De ce fait il y apparaît alors un trou, chargé positivement. L'élément servant au dopage est ainsi dit **accepteur** (d'électrons).

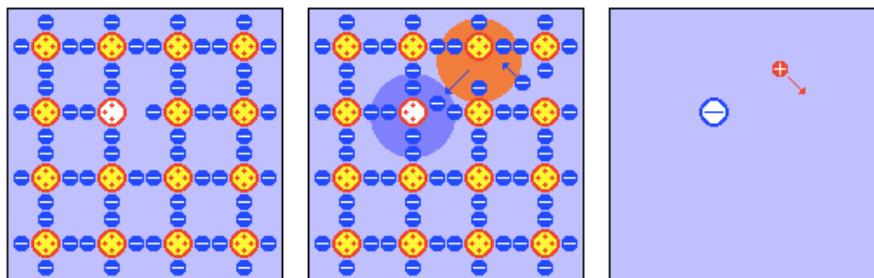


L'accepteur, p.ex. le bore ou l'aluminium, possède en effet une bande d'énergie intercalée entre les bandes de valence et de conduction du semi-conducteur. Cette bande d'énergie est très proche du niveau d'énergie de la bande de valence du semi-conducteur et cette faible différence d'énergie (de l'ordre de 0,04 eV), nettement inférieur au gap d'énergie entre bande de valence et de conduction, permet à un électron de passer facilement d'une bande d'énergie vers l'autre.



Grâce à l'électron supplémentaire, l'atome accepteur réalise une liaison covalente avec un quatrième atome du cristal semi-conducteur. L'atome accepteur est maintenant chargé négativement, alors que l'atome du semi-conducteur voisin possède un trou chargé positivement. On obtient ainsi une charge négative fixe, l'atome accepteur, et une charge positive mobile en mouvement ; le trou positif. Dans un **semi-conducteur de type P**, le courant électrique est ainsi principalement constitué par le mouvement de trous.

Mouvement de trous positifs dans un semi-conducteur de type P



■ As-tu compris ?

Explique ce qu'on entend par donneur ou accepteur lors du dopage d'un semi-conducteur. Quelle est leur valence respective ?

4 Jonction PN

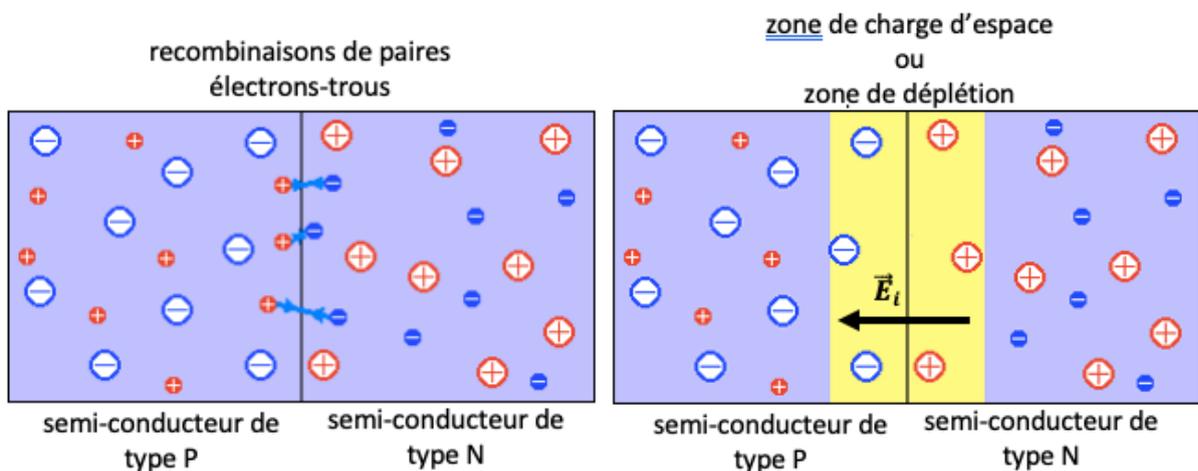
Un semi-conducteur dopé seul de type N ou P ne présente que peu d'intérêt. C'est l'association de plusieurs semi-conducteurs dopés qui est intéressante et permet de créer des composants semi-conducteurs. L'exemple le plus simple est la **jonction PN** utilisée pour les diodes.

4.1 Définition

Une jonction PN est la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N issu d'un même cristal.

4.2 Jonction PN non polarisée

Lorsqu'un semi-conducteur de type P est mis en contact avec un semi-conducteur de type N, des électrons libres du semi-conducteur de type N vont diffuser vers le semi-conducteur de type P en laissant derrière eux des charges positives immobiles. Ils vont se recombinier avec les trous positifs du semi-conducteur de type P, de sorte que seules des charges négatives immobiles y persistent.



Animation :

<https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/downloads/p-n-uebergang-halbleiterdiode-raumladungszone-animation>

Il se crée alors de part et d'autre de la zone de contact une zone dépourvue de charges mobiles avec :

- du côté du semi-conducteur de type P un espace contenant des charges négatives immobiles, p.ex. des ions négatifs de bore
- du côté du semi-conducteur de type N un espace contenant des charges positives immobiles, p.ex. des ions positifs de phosphore

Cette zone, chargée électriquement, ne possédant plus de charges mobiles est appelée **zone de charge d'espace** ou **zone de déplétion**.

Les charges électriques présentes dans la zone de déplétion sont à l'origine de la création d'un champ électrique interne \vec{E}_i dans la zone de déplétion et d'une différence de potentiel entre les semi-conducteurs de type N et P. Cette différence de potentiel, appelée **tension de diffusion U_d** , joue le rôle d'une barrière qui empêche des charges libres de migrer d'une zone vers l'autre ou plus précisément le passage des électrons libres vers le semi-conducteur de type P, respectivement le passage des trous mobiles positifs vers celui de type N.

Afin de permettre le passage des charges mobiles à travers la zone de déplétion, il faut apporter de l'énergie externe, sous forme d'énergie thermique ou électrique, aux charges mobiles, afin de leur permettre de vaincre cette barrière et de pouvoir traverser la zone de déplétion.

4.3 Jonction PN polarisée

4.3.1 Polarisation dans le sens direct

La jonction PN est alimentée par un générateur de tension variable U_0 , la borne « + » du générateur étant reliée à la région « P » de la jonction PN et la borne « - » du générateur à la région « N ».

La tension externe U_0 va agir sur cette barrière de la zone de déplétion en créant un champ électrique externe \vec{E}_{ext} opposé au champ électrique interne \vec{E}_i . De cette façon des charges mobiles vont recevoir de l'énergie électrique et pouvoir pénétrer dans la zone de déplétion et se recombiner de façon continue, réduisant la taille de la zone de déplétion et la valeur de la différence de potentiel entre les régions P et N.

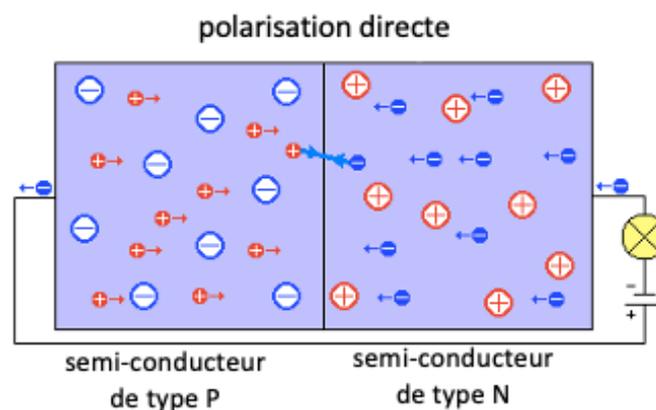
On doit distinguer deux cas :

1) Tension externe inférieure à la tension de diffusion $U_0 < U_d$

L'énergie externe fournie n'est pas suffisante et ne n'arrive pas à faire complètement disparaître la zone de déplétion. Cette « barrière » n'étant pas entièrement éliminée, il ne peut s'établir une véritable conduction.

2) Tension externe supérieure à la tension de diffusion $U_0 > U_d$

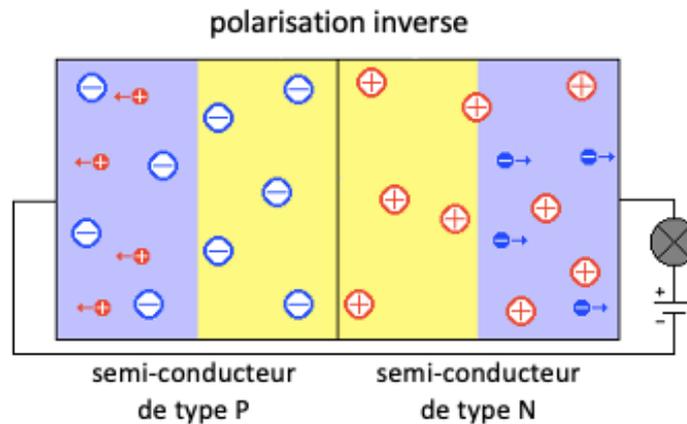
Le champ électrique externe \vec{E}_{ext} arrive à compenser le champ électrique interne \vec{E}_i , faisant disparaître la zone de déplétion entre les régions P et N de la jonction PN. Ceci permet alors la diffusion des électrons libres de la région N vers P, respectivement des trous de la région P vers N. Il y a alors apparition d'un courant électrique dans la jonction PN polarisée en direct.



4.3.2 Polarisation dans le sens inverse

La jonction PN est alimentée par un générateur de tension variable U_0 , la borne « + » du générateur étant reliée à la région « N » de la jonction PN et la borne « - » du générateur à la région « P ».

La tension externe U_0 crée un champ électrique externe \vec{E}_{ext} qui a le même sens que le champ électrique interne \vec{E}_i et augmente ainsi la taille de la zone de déplétion. De ce fait **aucun courant** ne circule à travers la jonction PN.



Remarque :

En réalité, on a un courant très faible intensité de l'ordre du nanoampère à travers la jonction PN lorsqu'elle est polarisée en inverse.

Animation 1 :

<https://www.leifiphysik.de/elektronik/halbleiterdiode/downloads/p-n-uebergang-halbleiterdiode-beschaltung-animation>

Animation 2 :

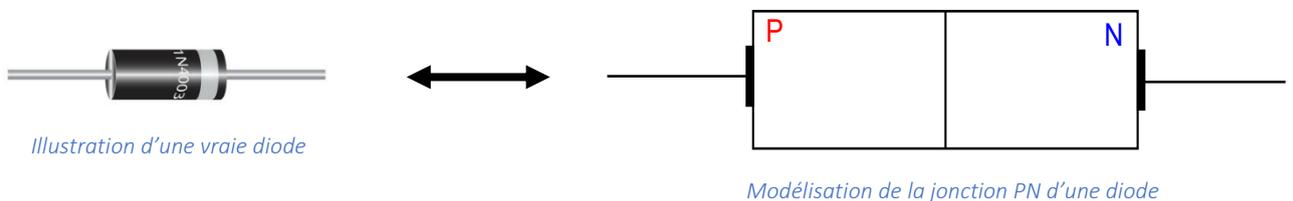
https://javalab.org/en/diode_en/

5 Diode à jonction

5.1 Constitution

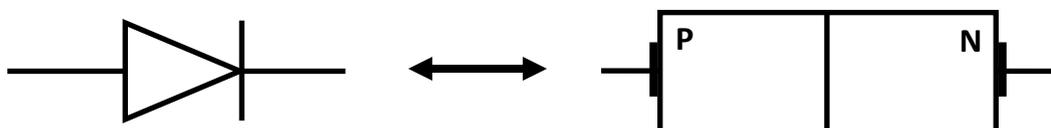
La **diode à jonction** est un élément électronique important. La diode à jonction est un dipôle passif non linéaire qui peut être assimilé à un interrupteur ne laissant passer le courant électrique que dans un seul sens, à l'instar d'une soupape.

Elle est souvent constituée des semi-conducteurs silicium et germanium. Une diode à jonction est constituée par la jonction de deux semi-conducteurs, un semi-conducteur dopé P, où les trous positifs sont majoritaires, et l'autre dopé N, où les électrons libres sont majoritaires. L'anneau de repérage se situant sur les diodes indique le semi-conducteur de type N.

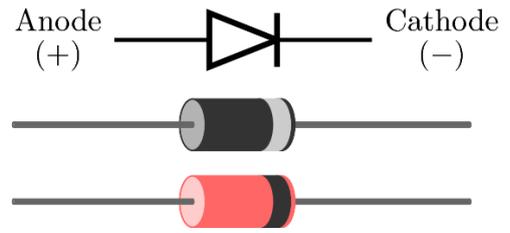


5.2 Symbole

La diode à jonction PN est symbolisée de la façon suivante :



Dans le symbole de la diode, le triangle, c.-à-d. l'anode, représente le semi-conducteur de type P et le trait, c.à.d. la cathode, représente le semi-conducteur de type N (représenté par l'anneau de repérage sur la diode).

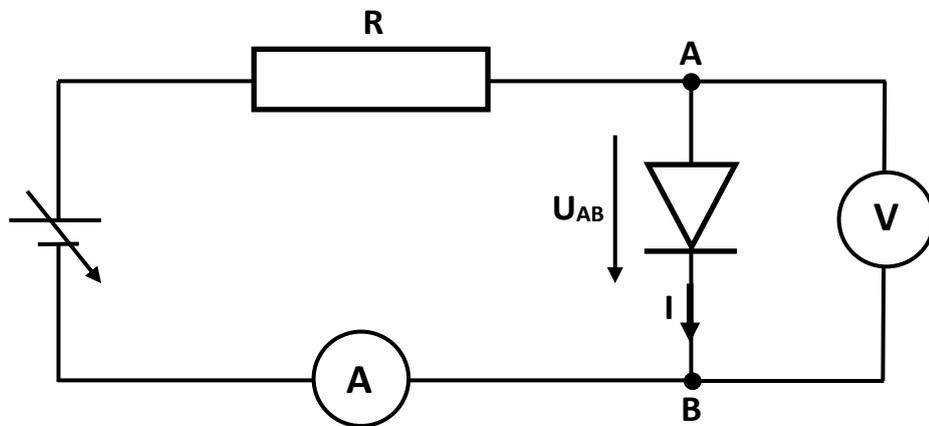


5.3 Caractéristique d'une diode à jonction

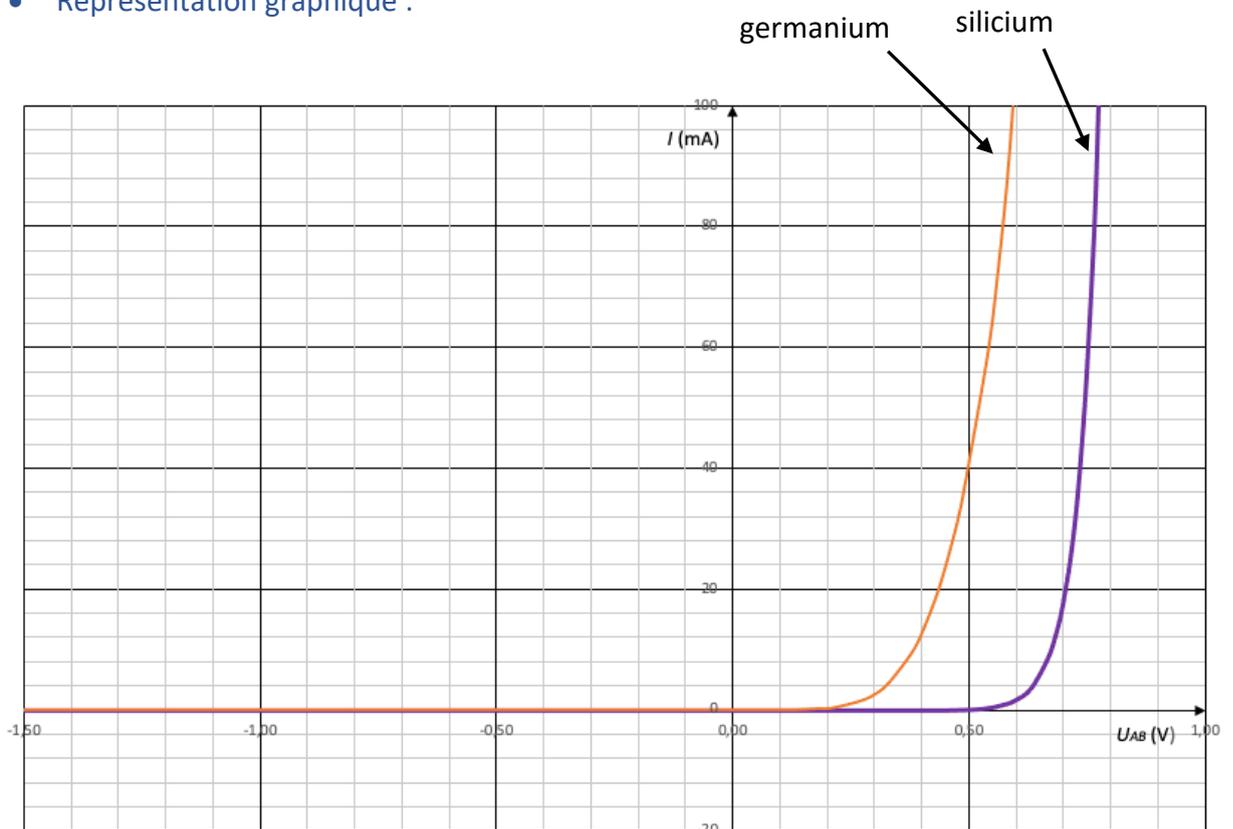
On soumet d'une diode à jonction à une tension extérieure variable U_{AB} et on mesure l'intensité du courant I traversant la diode en fonction de la tension extérieure appliquée U_{AB} pour une polarisation directe ($U_{AB} > 0$) et une polarisation inverse ($U_{AB} < 0$) de la diode.

Remarque : Une **résistance** doit en outre être branchée **en série** avec la diode afin de la **protéger**.

- Circuit électrique



- Représentation graphique :



- **Interprétation :**

Polarisation directe ($U_{AB} > 0$)

La diode ne laisse passer le courant électrique qu'en polarisation directe à partir d'une certaine valeur de la tension extérieure appliquée appelée **tension de seuil** U_S . Aucun courant électrique ne traverse la diode tant que la tension aux bornes de la diode est inférieure à U_S , car la tension aux bornes de la diode n'est pas suffisante pour « débloquer » la diode. Au-delà de U_S et de la zone du « coude », la variation d'intensité du courant I en fonction de la tension aux bornes de la diode est une fonction linéaire.

En effet à partir de la tension de seuil, le champ électrique extérieur parvient à compenser le champ électrique interne dans la zone de déplétion. Ainsi la barrière de potentiel s'opposant au passage des électrons libres est annulée, ce qui permet le passage d'un courant électrique à travers la diode.

On obtient deux représentations graphiques différentes pour les diodes au silicium et celles au germanium. Ainsi la valeur de la tension seuil U_S dépend du type semi-conducteur utilisée. On obtient comme valeur typique pour la tension seuil :

- Diode au silicium : $U_S = 0,6 - 0,7 \text{ V}$
- Diode au germanium : $U_S = 0,3 - 0,4 \text{ V}$

Au-delà de la tension de seuil, l'intensité du courant I augmente rapidement. On peut donc conclure que la résistance dynamique (cf. chapitre 4) de la diode est petite à partir du moment où un courant électrique la traverse.

Polarisation inverse ($U_{AB} < 0$)

Aucun courant électrique ne circule à travers la diode. En effet la zone de déplétion de la jonction PN de la diode empêche le passage des électrons libres.

Résumé :

- **Polarisation inverse ($U_{AB} < 0$) :** La diode n'est pas conductrice
- **Polarisation directe ($U_{AB} > 0$) :**
 - $U_{AB} < U_S$: la diode n'est pas conductrice
 - $U_{AB} > U_S$: la diode est conductrice

avec U_S : tension de seuil dépendant du semi-conducteur utilisée ; c'est la valeur minimale de la tension U_{AB} aux bornes de la diode à partir de laquelle la diode devient conductrice

Remarques :

- Comme l'intensité du courant augmente rapidement quand la tension seuil est atteinte, il faut faire attention à ne pas dépasser l'intensité de courant maximale I_{\max} de la diode afin de ne pas la détruire.
- Il faut faire attention en polarisation inverse à ne pas dépasser une tension appelée **tension de claquage**. En effet au-delà de cette tension l'intensité du courant électrique traversant la diode augmente de façon exponentielle provoquant la destruction de la diode.

■ **As-tu compris ?**

1. La diode est-elle un dipôle linéaire ? Expliquer.
2. Dans quelles conditions une diode est-elle conductrice, respectivement non conductrice ?

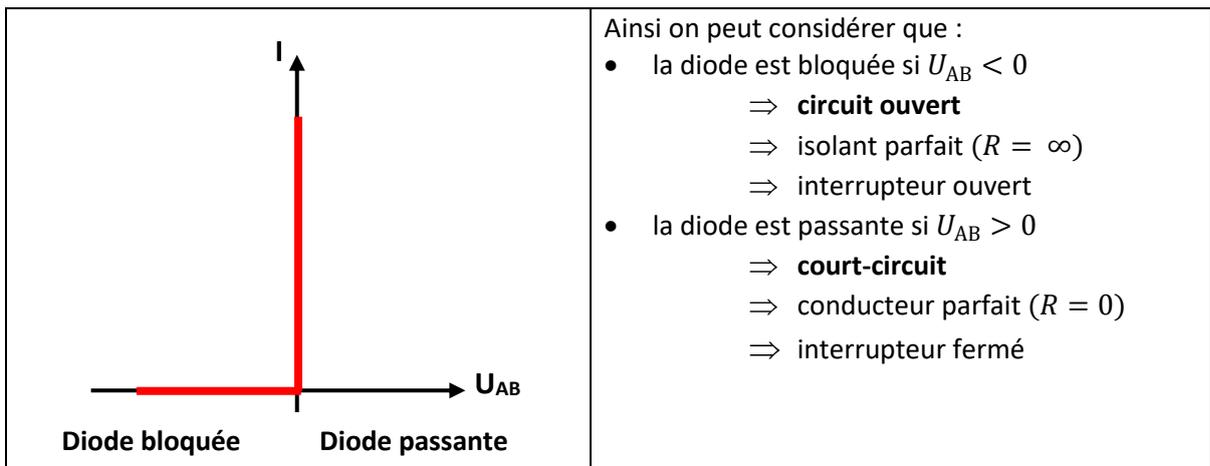
5.4 Modélisation

- Diode idéale

Une diode dite idéale est un modèle théorique d'une diode « parfaite ». Comme la tension de seuil et la résistance dynamique de la diode sont des valeurs très petites, on peut en première approximation supposer que ces deux valeurs sont égales à zéro, lorsque l'on idéalise une diode à jonction.

La diode idéale agit alors comme un conducteur parfait en polarisation directe et ce à partir d'une tension de 0 V. En polarisation inverse, elle agit comme un isolant parfait.

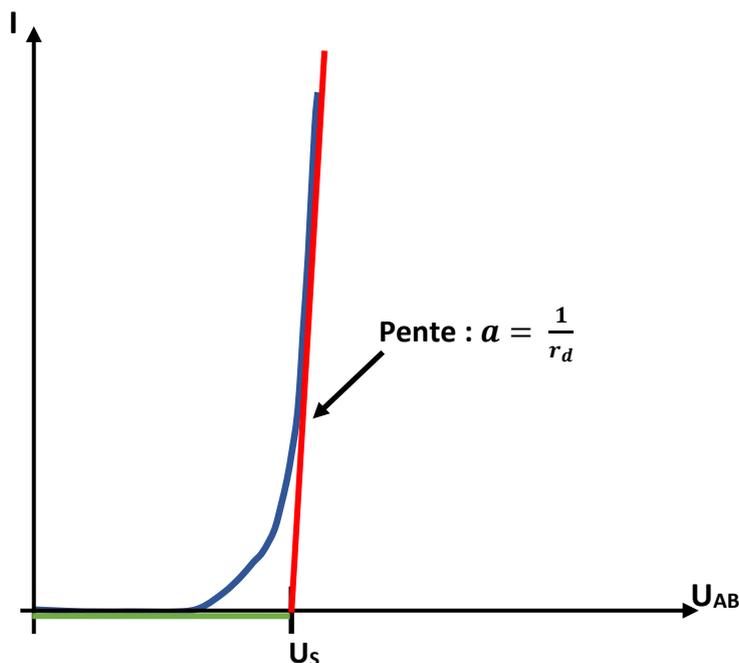
La **diode idéale** peut ainsi être considérée comme un **interrupteur** et sa caractéristique $I = f(U)$ est donc la suivante :



- Diode réelle

La caractéristique non linéaire d'une diode à jonction peut être modélisée par deux segments de droite ce qui permet d'obtenir une caractéristique linéarisée de la diode.

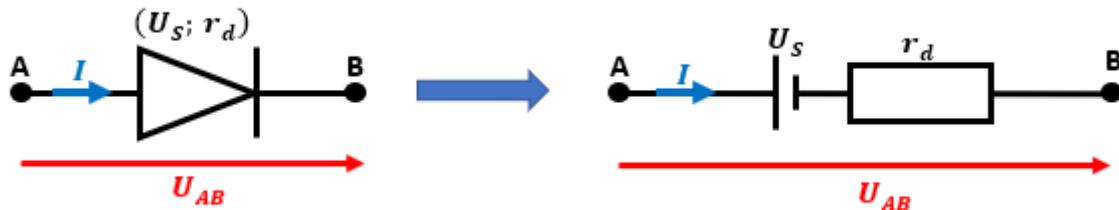
La caractéristique linéarisée d'une diode est la suivante :



À partir de la représentation graphique, on peut déterminer :

- la tension de seuil U_s
- la résistance dynamique de la diode : $r_d = \frac{1}{a} = \frac{\Delta U_{AB}}{\Delta I}$

La diode peut ainsi être considérée comme le branchement en série d'un générateur « branché à contre-sens » de tension U_S et d'une résistance ohmique r_d .

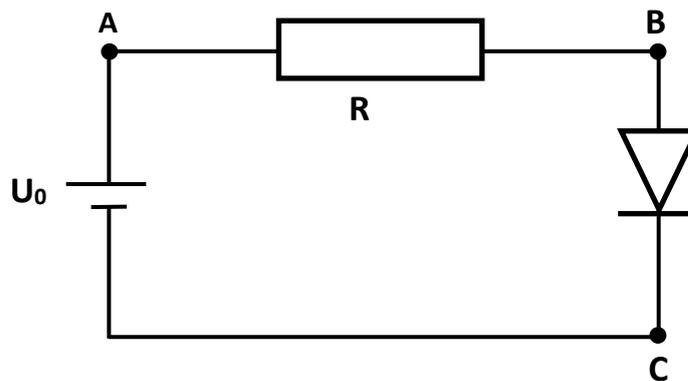


La tension aux bornes de la diode s'écrit alors :

$$U_{AB} = U_S + r_d \cdot I$$

5.5 Étude d'une diode dans un circuit simple

On considère le circuit électrique suivant contenant, un générateur idéal de tension U_0 une diode, ainsi qu'une résistance de protection R.



Le but est d'établir le **point de fonctionnement** de la diode, c.à.d. la tension U_{BC} aux bornes de la diode, ainsi que l'intensité de courant I traversant la diode.

- Résolution analytique

Il faut établir l'équation de la caractéristique linéarisée de la diode et déterminer le point de fonctionnement à partir de la loi des mailles de Kirchhoff.

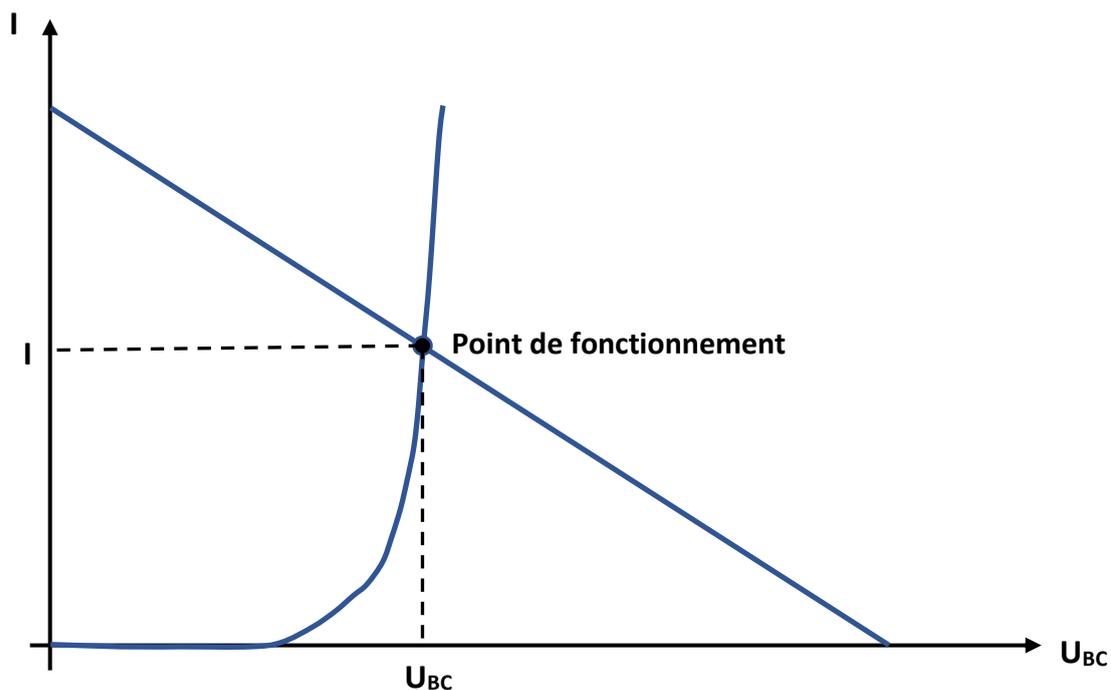
- Résolution graphique

Il faut représenter sur un même graphique :

- la caractéristique $I = f(U_{BC})$ de la diode
- la caractéristique linéaire $I = f(U_{BC})$ de la résistance, c.-à-d. la droite d'équation

suivante :

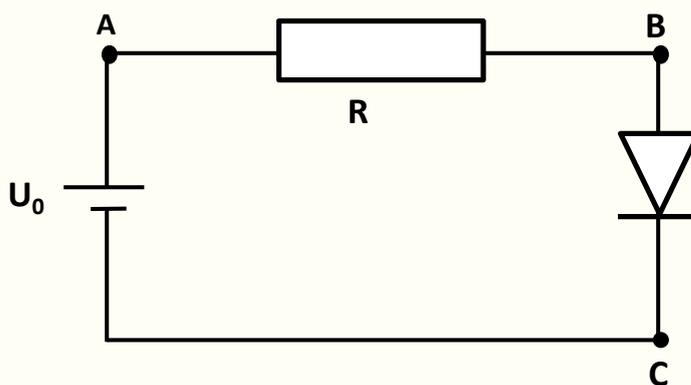
$$I = \frac{U_{AB}}{R} = \frac{U_{AC} - U_{BC}}{R} = \frac{U_0 - U_{BC}}{R}$$

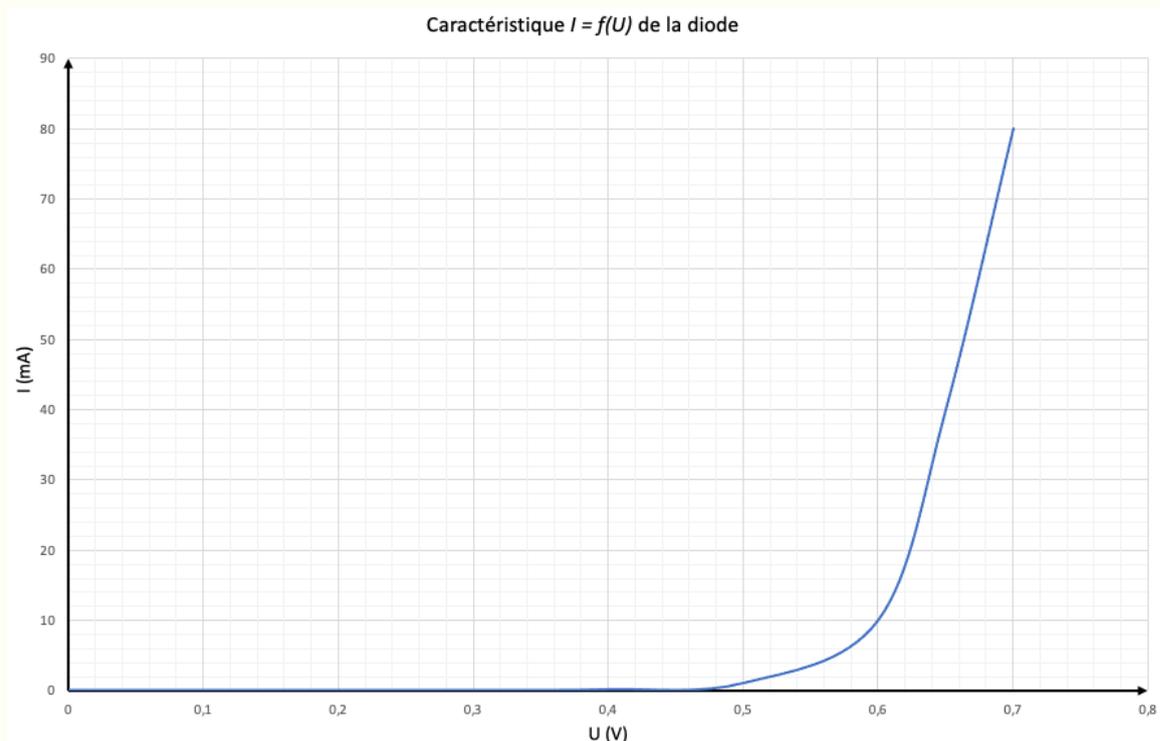


Le point de fonctionnement de la diode s'établit à l'intersection des deux représentations graphiques $I = f(U_{BC})$. Bien sûr, la résolution graphique ne donne qu'une valeur approximative pour I et U_{BC} .

Exercice résolu

On considère le circuit électrique suivant contenant, un générateur idéal de tension $U_0 = 3,0\text{ V}$, une diode dont la représentation graphique $I = f(U)$ est indiquée ci-dessous, ainsi qu'une résistance ohmique de valeur $R = 30\ \Omega$.





Déterminer le point de fonctionnement de la diode.

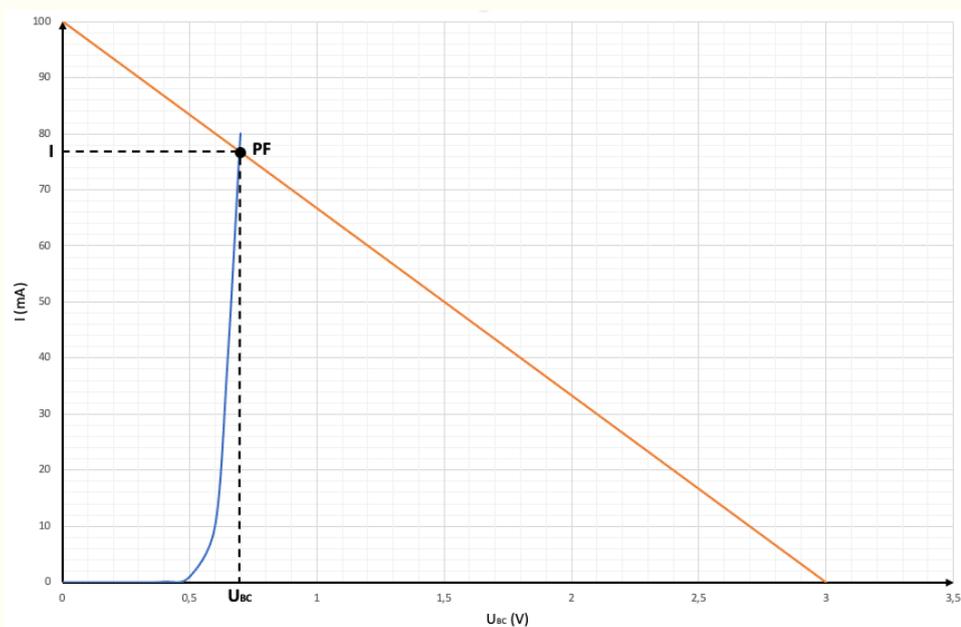
Résolution graphique :

Pour la résistance on obtient :

$$U_{BC} = 0 \text{ V} \rightarrow I = 100 \text{ mA}$$

$$U_{BC} = 3,0 \text{ V} \rightarrow I = 0 \text{ mA}$$

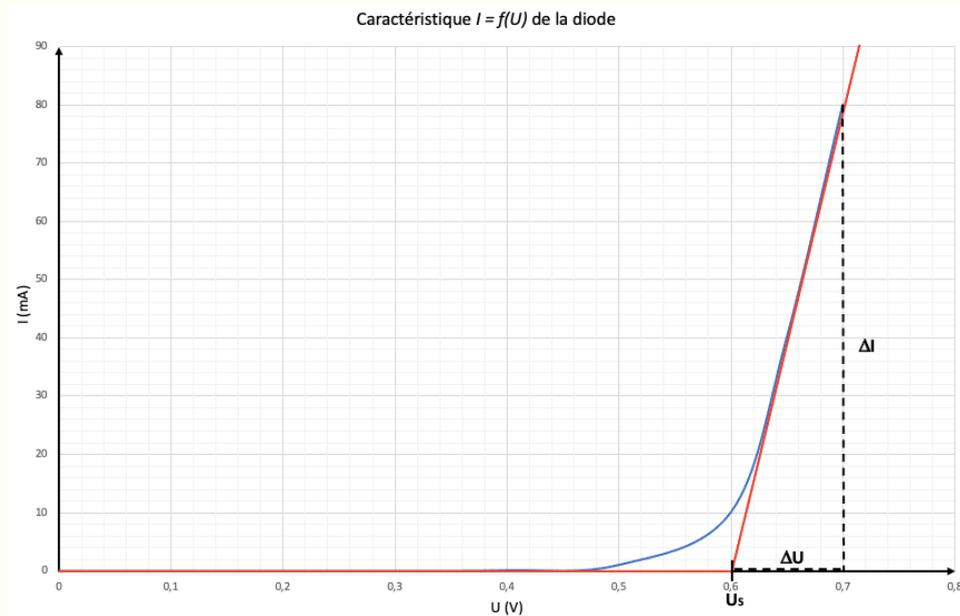
On obtient :



Point de fonctionnement : $I = 77 \text{ mA}$; $U_{BC} = 0,70 \text{ V}$

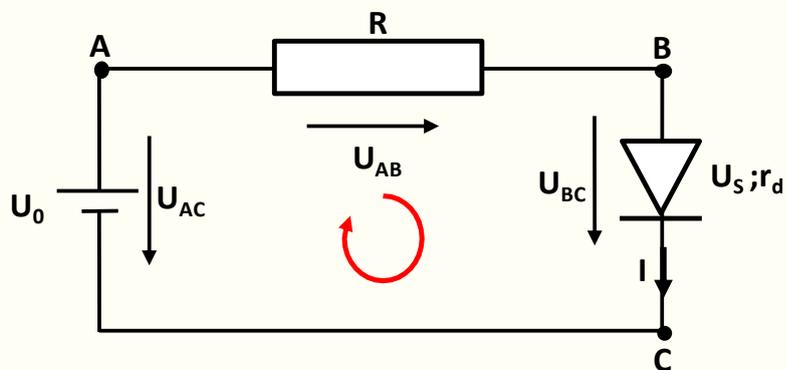
Résolution analytique :

On détermine en premier lieu la tension de seuil U_S , ainsi que la résistance dynamique r_d de la diode, à partir de la représentation graphique $I = f(U)$ de la diode.



On obtient : $U_S = 0,60 \text{ V}$ et $r_d = \frac{1}{a} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0,10 \text{ V}}{0,080 \text{ A}} = 1,25 \Omega$

On a le circuit suivant :



La loi des mailles s'écrit :

$$U_{AB} + U_{BC} + U_{CA} = 0$$

$$R \cdot I + (U_S + r_d \cdot I) - U_0 = 0$$

$$I = \frac{U_0 - U_S}{R + r_d} = \frac{3,0 \text{ V} - 0,60 \text{ V}}{30 \Omega + 1,25 \Omega}$$

$$I = 0,0768 \text{ A} = 76,8 \text{ mA}$$

La tension aux bornes de la diode vaut :

$$U_{BC} = U_S + r_d \cdot I$$

$$U_{BC} = 0,60 \text{ V} + 1,25 \Omega \cdot 0,0768 \text{ A} = 0,696 \text{ V}$$

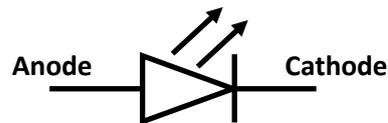
6 LED

6.1 Introduction

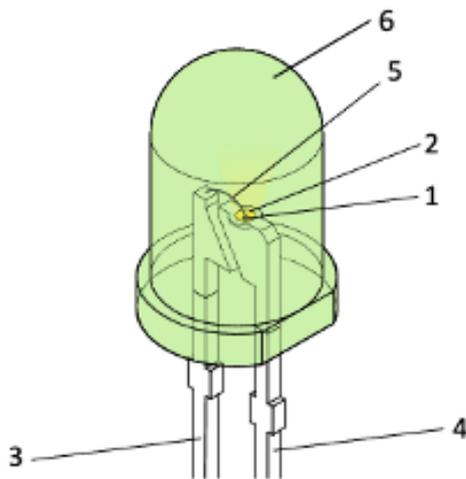
L'abréviation **LED** est issue de l'anglais et signifie « **light-emitting diode** » et est appelé en français diode électroluminescente (aussi abrégé en français par DEL). Une LED est une diode qui émet de la lumière quand elle est polarisée en direct sous condition que la tension aux bornes de la LED dépasse une valeur seuil et qu'elle soit donc parcourue par un courant électrique. Comme les LED ne produisent presque exclusivement que de l'énergie lumineuse, elles ne consomment que peu d'énergie électrique.

Les LED sont donc économes en énergie et respectueuse de l'environnement, puisqu'elles ne contiennent pas de mercure à l'instar des tubes fluorescents.

Symbole d'une LED :



6.2 Structure



1. Puce semi-conductrice

Elle émet de la lumière lors qu'elle est parcourue par un courant électrique

2. Cavité réfléchissante

Elle augmente par réflexion d'intensité lumineuse de la LED

3. Anode

Elle est reliée à la borne + du générateur (patte la plus longue)

4. Cathode

Elle est reliée à la cavité réfléchissante

5. Fil de connexion

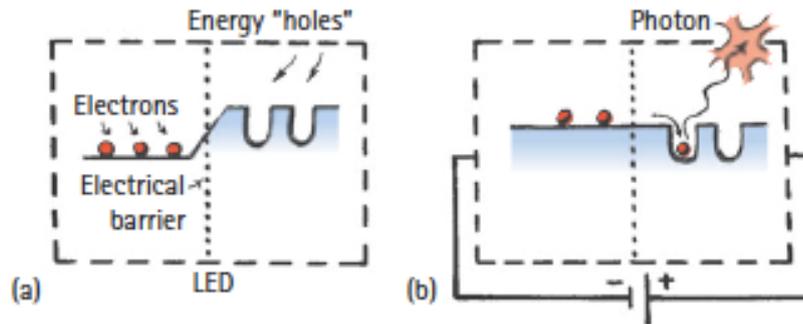
Il relie la puce semi-conductrice à l'anode

6. Lentille en résine

Elle permet la transmission de la lumière et protège la puce

6.3 Principe de fonctionnement

C'est la recombinaison entre un électron de la bande de conduction et d'un trou positif, situé dans la bande de valence, qui conduit à l'émission de lumière. En effet un électron ayant reçu assez d'énergie peut passer dans la bande de conduction. Cet électron libère alors une quantité d'énergie égale au gap d'énergie quand il se recombine (ou « tombe ») avec un trou positif. Cette énergie est émise sous forme de lumière (photons : cf 1^{ère}).



C'est l'effet d'**électroluminescence** qui est un phénomène au cours duquel un corps parcouru par un courant électrique ou soumis à un champ électrique intense émet de la lumière ne résultant pas de la chaleur (\neq incandescence).

Animation : https://javalab.org/en/led_en/

6.4 Caractéristiques électriques

Une LED, comme toute diode classique, ne conduit le courant électrique que si elle est polarisée en direct. Dans l'autre sens, c.-à-d. en polarisation inverse, elle est bloquée et ne laisse passer aucun courant. Cependant elle ne supporte pas des tensions inverses élevées (souvent 5V max). Au-delà de cette tension la LED est détruite.

Lorsqu'une LED est polarisée en direct, elle ne conduit le courant électrique qu'à partir d'une certaine tension, la tension de seuil U_S . La valeur de la tension de seuil dépend du matériau utilisé dans la LED, et donc en premier lieu de la **couleur** de la LED, ensuite pour une couleur donnée de la longueur d'onde précise qui est émise.

Cependant, il faut faire attention que la tension aux bornes d'une LED ne soit pas trop grande. En effet le courant maximal supporté par une LED est de l'ordre de 20 mA à 30 mA.

Il faut donc la protéger par une résistance de protection branchée en série dont il faut déterminer la valeur suivant la tension du générateur ou de l'accumulateur utilisé, afin de ne pas dépasser la tension maximale supportée par la LED.

Les **valeurs usuelles** pour les différentes couleurs des LED sont :

Couleur	Tension de seuil U_S
Rouge	de 1,6 V à 2,0 V
Orange	de 2,0 V à 2,1 V
Jaune	de 2,1 V à 2,2 V
Vert	de 2,2 V à 2,5 V
Bleu	de 2,5 V à 2,8 V
Violet	de 2,8 V à 3,1 V
Blanc	de 3,4 V à 3,8 V

7 Exercices

Semi-conducteurs

1. Expliquer pourquoi on a des électrons libres qui peuvent se déplacer dans un conducteur, alors qu'il n'y a pas d'électron libre dans un isolant sans apport extérieur d'énergie.
2. Dessiner le réseau cristallin du silicium et expliquer l'apparition d'électrons libres et de trous positifs dans un semi-conducteur intrinsèque.
3. Représenter schématiquement la structure d'un semi-conducteur à base de silicium dopé une fois au gallium, puis une fois à l'arsenic.
4. Un électron passe, à température ambiante, de la bande de valence dans la bande de conduction sans apport d'énergie extérieure.
Laquelle des affirmations est correcte ?
 - A. Il s'agit d'un conducteur
 - B. Il s'agit d'un semi-conducteur
 - C. Il s'agit d'un isolant
 - D. Il s'agit d'un conducteur ou d'un semi-conducteur
 - E. Il s'agit d'un semi-conducteur ou d'un isolant
5. Laquelle des affirmations est correcte ?
 - A. Un semi-conducteur est conducteur à basse température
 - B. Un semi-conducteur est isolant à température élevée
 - C. Un semi-conducteur possède généralement 4 électrons sur la couche externe de ses atomes
 - D. Un semi-conducteur conduit toujours le courant électrique quand la tension à ses bornes est supérieure à sa tension de seuil indépendamment du sens de branchement
6. La résistivité d'un semi-conducteur...
 - A. augmente avec la température
 - B. diminue avec la température
 - C. est indépendante de la température
 - D. est nulle
7. Quelle impureté peut-on avoir dans un semi-conducteur de type N ? Indiquer la bonne réponse.
 - A. Silicium
 - B. Arsenic
 - C. Bore
 - D. Fer
8. Quelle impureté peut-on avoir dans un semi-conducteur de type P ? Indiquer la bonne réponse.
 - A. Silicium
 - B. Arsenic
 - C. Bore
 - D. Fer
9. Quand on ajoute une impureté, de type N ou P, à un semi-conducteur, alors la conductivité du semi-conducteur...
 - A. augmente
 - B. diminue
 - C. reste constante
 - D. aucune des réponses

Jonction PN

10. Dessiner la jonction PN d'un semi-conducteur avant et après la recombinaison des électrons libres et des trous positifs. Expliquer ce qu'on entend par « zone de déplétion », ainsi que la création d'un champ électrique interne dans la zone de déplétion.
11. Expliquer pourquoi on doit appliquer, en polarisation directe, une certaine tension extérieure minimale, afin que la jonction PN ne devienne conductrice.
12. Expliquer pourquoi, en polarisation inverse, une jonction PN ne peut pas devenir conductrice.

Diodes à jonction PN

13. Pourquoi une diode à jonction n'est-elle pas conductrice en polarisation inverse ou si la tension directe appliquée est inférieure à la tension de seuil ?
14. Comment varie la résistance d'une diode lorsqu'on augmente la tension aux bornes de la diode :
 - en polarisation directe
 - en polarisation inverse
15. La résistance d'une diode en polarisation directe est, lorsque la tension aux bornes de la diode réelle est supérieure à la tension seuil, ...
 - A. nulle
 - B. faible
 - C. élevée
 - D. très élevée
16. La résistance d'une diode en polarisation inverse est, lorsque la tension aux bornes de la diode réelle est supérieure à la tension seuil, ...
 - A. Nulle
 - B. Faible
 - C. Élevée
 - D. très élevée
17. Une diode de tension de seuil égale à 0,60 V et de résistance dynamique $2,5 \Omega$ est branchée en série avec une résistance $R = 20 \Omega$ à un générateur idéal de tension $U_0 = 1,5 \text{ V}$.
 - a) Dessiner le circuit électrique.
 - b) Déterminer, graphiquement et analytiquement, l'intensité de courant traversant la diode, ainsi que la tension aux bornes de la diode.
18. Une diode de tension de seuil égale à 0,60 V et de résistance dynamique $r_d = 20 \Omega$ est branchée en série avec une résistance $R = 33 \Omega$ à un générateur de f.é.m. $E = 1,6 \text{ V}$ et de courant de court-circuit $I_{cc} = 80 \text{ mA}$.

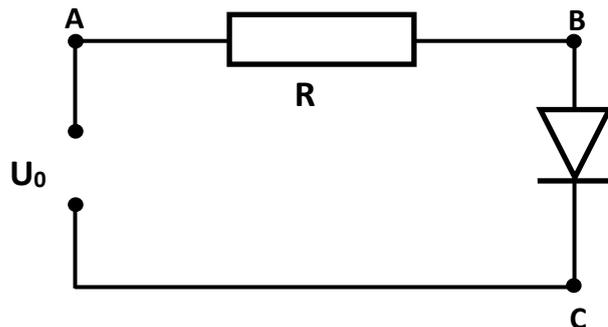
Calculer le courant circulant dans le circuit électrique.
19. Une diode est branchée en série avec une résistance $R = 40 \Omega$ à un générateur idéal de tension $U = 3,6 \text{ V}$.

On obtient les valeurs suivantes pour l'intensité du courant I traversant la diode en fonction de la tension U aux bornes de la diode :

U (V)	0	0,20	0,40	0,60	0,65	0,70
I (mA)	0	0	1	10	40	80

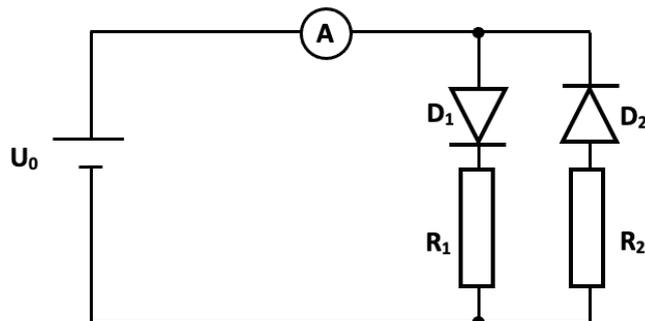
- Déterminer graphiquement l'intensité de courant traversant la diode, ainsi que la tension aux bornes de la diode.
- Déterminer, à l'aide du graphique précédant, l'intensité de courant traversant la diode, ainsi que la tension aux bornes de la diode, si la tension aux bornes du générateur vaut 3,0 V.
- Déterminer, à l'aide du même graphique, l'intensité de courant traversant la diode, ainsi que la tension aux bornes de la diode, si la résistance de protection a une valeur $R = 30 \Omega$; la tension aux bornes du générateur valant toujours 3,0 V.

20. Une diode idéalisée de tension de seuil égale à $U_S = 0,60 \text{ V}$ et de résistance dynamique $r_d = 0 \Omega$ est branchée en série avec une résistance $R = 20 \Omega$ à un générateur idéal de tension $U_0 = 1,5 \text{ V}$.



- Dessiner la caractéristique $I = f(U_{BC})$ de la diode.
- La diode est d'abord branchée en polarisation directe. Déterminer :
 - la tension U_{BC}
 - la tension U_{AB}
 - l'intensité du courant I
- La diode est ensuite branchée en polarisation inverse. Déterminer :
 - la tension U_{BC}
 - la tension U_{AB}
 - l'intensité du courant I

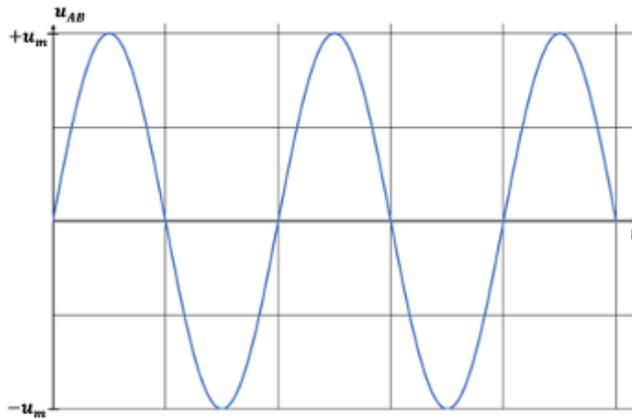
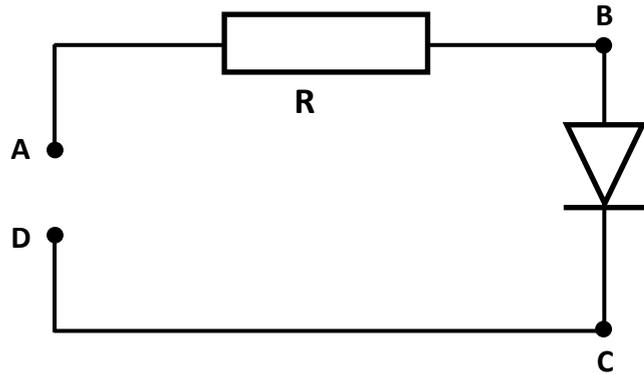
21. On a le circuit suivant qui contient 2 diodes idéalisées de tension de seuil égale à $U_S = 0,70 \text{ V}$ et de résistance dynamique $r_d = 0 \Omega$, deux résistances de protection. Ces dipôles sont reliés à un générateur idéal de tension $U_0 = 4,5 \text{ V}$. L'ampèremètre indique un courant de 30 mA.



- Déterminer le courant traversant chaque diode.
- Déterminer la tension aux bornes de chaque diode.
- Calculer les valeurs minimales des 2 résistances.

22. Une diode idéale de tension ($U_S = 0\text{ V}; r = 0\ \Omega$) est branchée en série avec une résistance R à un générateur idéal de tension variable.

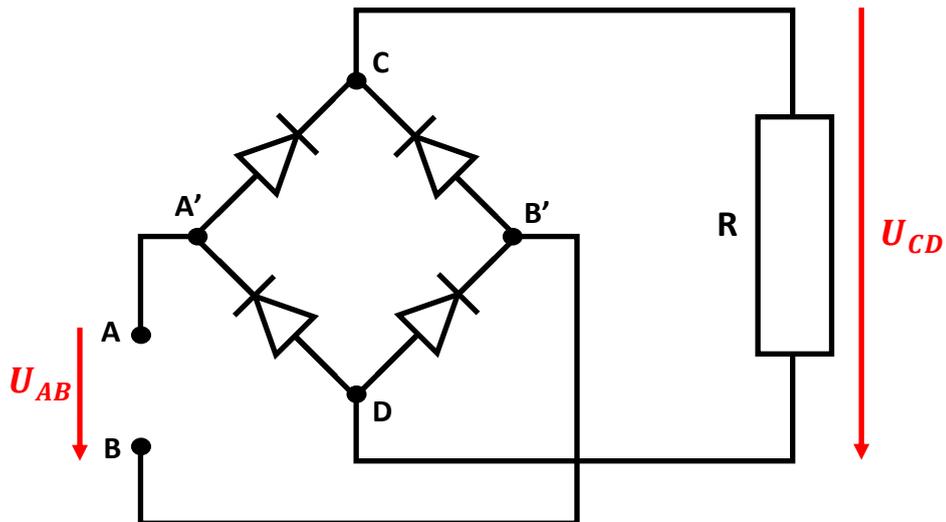
La variation de tension aux bornes du générateur $u_{AD}(t)$ est sinusoïdale et est représentée par la courbe ci-dessous :



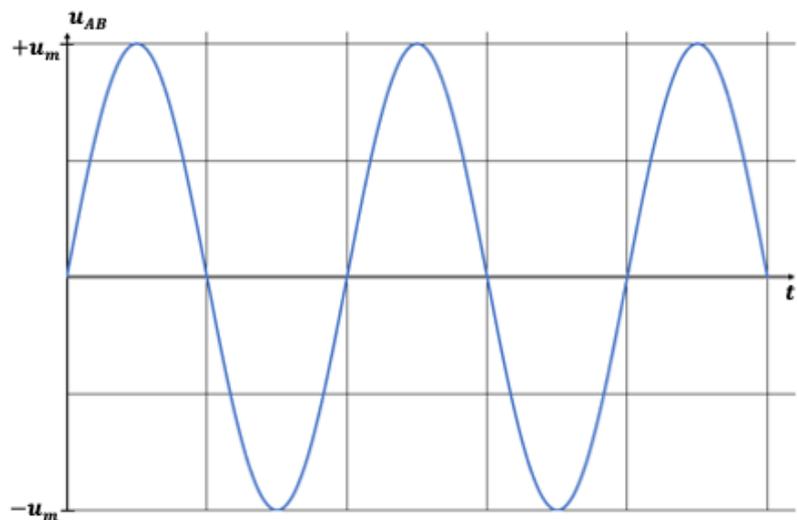
- Déterminer quand la diode est bloquée et quand elle est passant.
 - Déterminer pour les deux cas :
 - la tension aux bornes de la diode
 - la tension aux bornes de la résistance
 - Donner l'allure de la courbe de la tension $u_{AB}(t)$ aux bornes de la résistance. Indiquer dans la courbe les intervalles où la diode est bloquée, respectivement passante.
23. **Circuit redresseur de tension**

On a le pont de diodes suivant dans lequel toutes les diodes sont des **diodes idéales** ($U_S = 0\text{ V}; r = 0\ \Omega$).

On établit à l'aide d'un générateur une tension constante U_{AB} aux bornes AB du pont de diodes. Une tension U_{CD} apparaît aux bornes de la résistance R , lorsqu'un courant électrique circule dans le circuit.



- Un courant électrique peut-il circuler à travers le circuit électrique lorsque la tension aux bornes du générateur $U_{AB} > 0$?
Indiquer le cas échéant le chemin suivi par le courant électrique entre A et B. Motiver votre réponse.
Que vaut alors la tension U_{CD} ?
- Un courant électrique peut-il circuler à travers le circuit électrique lorsque la tension aux bornes du générateur $U_{AB} < 0$?
Indiquer le cas échéant le chemin suivi par le courant électrique entre B et A. Motiver votre réponse.
Que vaut alors la tension U_{CD} ?
- La tension aux bornes du générateur u_{AB} est à présent variable. Sa variation $u_{AB}(t)$ est sinusoïdale et est représentée par la courbe ci-dessous.
Donner l'allure de la courbe de la tension $u_{CD}(t)$ aux bornes de la résistance.



LED

24. Comparer le gap d'énergie d'une LED rouge à celui d'une LED bleue. Expliquer.
25. Que peut-on dire des pertes d'énergie d'une LED dans les cas suivants. Expliquer
- la tension de l'alimentation est inférieure à la tension de seuil de la LED en polarisation directe
 - la LED, allumée, est supposée idéale, c.à.d. la résistance dynamique est nulle
 - la LED, allumée, est supposée réelle, c.à.d. la résistance dynamique a une valeur très petite
 - la LED est branchée en polarisation inverse
26. On sait que chaque LED a une tension de seuil déterminée et une résistance dynamique dont la valeur est très petite. Expliquer pourquoi on ne doit pas brancher directement une LED à une source d'alimentation dont la tension peut être réglée à la valeur de la tension de seuil de la LED.
27. On désire alimenter une LED idéale bleue de tension de seuil 2,60 V avec une batterie de voiture de tension 12 V. On insère une résistance de protection $R_p = 470 \Omega$ dans le circuit.
- Dessiner le schéma du circuit électrique.
 - La valeur de la résistance de protection est-elle suffisante, si le courant maximale supportée par la LED vaut 20 mA ?
 - On remplace la LED bleue par une LED rouge. La résistance de protection est-elle encore suffisante ? Expliquer.
28. On branche une LED rouge dont la tension de seuil est de 1,80 V et dont la résistance dynamique est négligeable aux bornes d'une alimentation de 12 V. La LED est protégée par une résistance de protection et l'intensité de courant maximale supportée par la LED est de 20 mA.
- Dessiner le schéma du circuit électrique.
 - Déterminer la valeur minimale de la résistance de protection à apporter.
 - On décide de remplacer la LED rouge par une LED verte. Peut-on encore utiliser cette résistance de protection, si l'intensité de courant maximale supportée par la LED verte est aussi de 20 mA. ? Expliquer.
 - Déterminer la valeur minimale de la résistance de protection à apporter, si on décide de brancher une deuxième LED en série avec la première.
 - Déterminer la valeur minimale de la résistance de protection à apporter, si on décide de brancher une deuxième LED en parallèle avec la première.

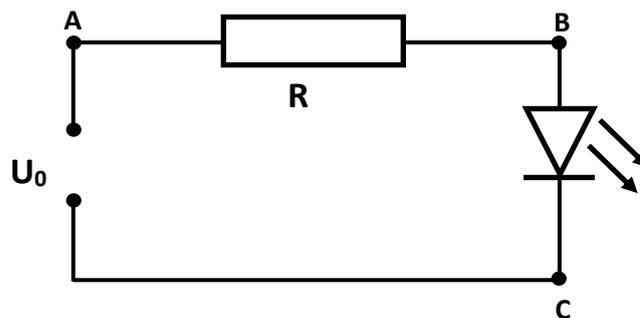
Révision

A. Répondre par vrai ou faux.

	Affirmation	Vrai	Faux
1	La résistivité d'un semi-conducteur diminue avec la température.		
2	Dans un conducteur, des électrons de valence peuvent passer dans la bande de conduction sans apport d'énergie.		
3	Dans un semi-conducteur, des électrons de valence peuvent passer dans la bande de conduction sans apport d'énergie.		
4	Dans un semi-conducteur de type N, les « impuretés » ont tendance à céder un électron de valence.		
5	Dans un semi-conducteur de type P, les « impuretés » ont tendance à céder un électron de valence.		
6	La caractéristique d'une diode à jonction est linéaire.		
7	La tension de seuil est la même pour toutes les diodes.		
8	Une diode idéale peut être considérée comme un conducteur parfait dès qu'elle est traversée par un courant électrique.		
9	Une diode est traversée par un courant électrique si la tension aux bornes de la diode est supérieure à la tension de seuil.		
10	La tension de seuil d'une LED dépend de la couleur de la LED.		

B. Une LED rouge de tension de seuil égale à $U_S = 1,80 \text{ V}$ et de résistance dynamique $r_d = 2,0 \Omega$ est branchée en série avec une résistance R à un générateur idéal de tension $U_0 = 9,0 \text{ V}$. Le courant maximal supporté par la LED est $I_{max} = 20 \text{ mA}$.

a. Afin que la LED puisse briller, il faut que :



A. $U_{AC} = -U_0$ B. $U_{AC} = U_0$ C. $U_{AC} = U_0$ ou $U_{AC} = -U_0$

b. La valeur de la résistance nécessaire dans le cas où l'intensité du courant est égale à I_{max} est égale à :

A. 34Ω B. 43Ω C. 358Ω D. 448Ω E. 3600Ω

c. La puissance électrique reçue par la LED est égale à :

A. $36,0 \text{ mW}$ B. $36,8 \text{ mW}$ C. 360 mW D. 368 mW E. Aucune des réponses

d. La puissance perdue dans la LED par effet Joule vaut :

A. 0 W B. $0,4 \text{ mW}$ C. $0,8 \text{ mW}$ D. 8 mW E. 40 mW

- e. Malheureusement on n'a pas la résistance voulue et on a deux résistances dont la résistance est plus grande et une dont la résistance est plus petite.

Laquelle des affirmations est correcte ?

- A. On doit prendre la résistance dont la valeur est plus petite
 - B. On doit prendre la résistance dont la valeur est plus grande
 - C. On peut prendre les deux résistances
 - D. On ne doit prendre aucune des deux résistances
- f. On remplace la LED rouge par une LED verte.
- Laquelle des affirmations est correcte ?
- A. On doit remplacer la résistance de protection par une résistance dont la valeur est plus petite
 - B. On doit remplacer la résistance de protection par une résistance dont la valeur est plus grande
 - C. On ne doit pas remplacer la résistance de protection
 - D. On doit absolument garder la même résistance de protection

Crédits Photos

© Henri Weyer – **p.0** (page titre)

© Wikimedia Commons / National Institute of Standards and Technology – **p.1** (lampes LED ; domaine public)

Crédits Illustrations

© ngaga / Shutterstock.com (407040679) – **p.1** (motif de cellules photovoltaïques)

© zizou7 / Shutterstock.com (1933410161) – **p.3** (modèle de l'atome de silicium)

© zizou7 / Shutterstock.com (1953292255) – **p.3** (modèle de l'atome de germanium)

© StudioMolekuul / Shutterstock.com (124138447) – **p.4** (Structure cristalline du silicium 3 dimensions)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.4** (Bändermodell (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Markus A. Henning – **p.5** (n-dotiertes Silizium; sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.5** (Halbleiter1 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.5** (Halbleiter1 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Markus A. Henning – **p.6** (p-dotiertes Silizium; sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.6** (Halbleiter1 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.6** (Halbleiter1 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.7** (Halbleiter2 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.8** (Halbleiter3 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Honina – **p.9** (Halbleiter3 (figure modifiée); sous licence CC BY-SA 3.0)

© Serorion / Shutterstock.com (1114403456) – **p.9** (modèle d'une diode)

© Wikimedia Commons / TedPavlic – **p.10** (diode 3D; sous licence CC BY-SA 3.0)

© Wikimedia Commons / Inductiveload – **p.17** (modèle lampe LED ; domaine public)

Des remerciements particuliers sont adressés à Paul G. HEWITT. Les illustrations sont, sauf indication contraire, l'œuvre de Paul G. Hewitt et des auteurs du cours.

© HEWITT, Paul G., *Conceptual physics*, 2015, Pearson