

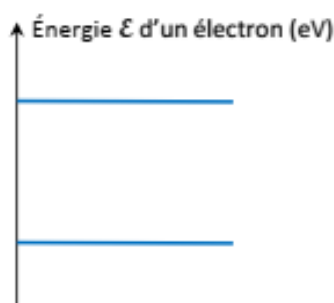


A – ASDS - CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES MATÉRIAUX (Durée conseillée : 1 h)

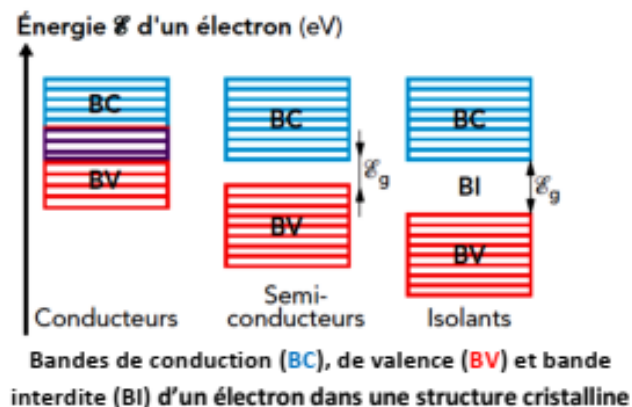
Les semi-conducteurs sont des matériaux qui ont une conductivité électrique intermédiaire entre celle des isolants et celle des conducteurs. Les matériaux supraconducteurs ont une résistance électrique nulle dans certaines conditions. Comment expliquer ces différences de conductivité entre conducteurs, semi-conducteurs et supraconducteurs ?

Document 1 : Bandes d'énergie

Dans un atome, l'énergie d'un électron est quantifiée : elle ne peut prendre que des valeurs déterminées appelées **niveaux d'énergie**. Dans un solide, les niveaux d'énergie relatifs à chacun des atomes qui le constituent, sont proches les uns des autres et forment des **bandes d'énergie**. À l'intérieur des bandes d'énergie, la différence entre des niveaux successifs est si faible que l'on peut considérer que l'énergie varie de façon continue.



Niveaux d'énergie dans un atome



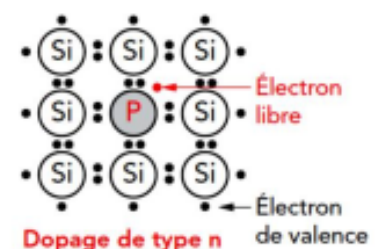
Le comportement électrique des conducteurs, des semi-conducteurs et des isolants est modélisé par la théorie des bandes énergétiques. Selon ce modèle, les niveaux d'énergie des électrons des atomes d'une structure cristalline forment des bandes d'énergie appelées bandes permises. Les bandes responsables des propriétés conductrices sont la **bande de valence (BV)** et la **bande de conduction (BC)**. Les énergies comprises entre deux bandes permises constituent une **bande interdite (BI)**. Seuls les électrons de plus hautes énergies, présents dans la bande de conduction, peuvent se détacher de la structure cristalline et participer à la conduction du courant électrique. Pour les conducteurs, les bandes de valence et de conduction se chevauchent. Ainsi, certains électrons sont libres d'évoluer dans la structure cristalline (cas des métaux). En revanche, pour les semi-conducteurs et les isolants, les bandes de valence et de conduction sont séparées par une bande interdite. La différence entre semi-conducteur et isolant est due à la valeur ϵ_g de cette bande interdite, $\epsilon_g \approx 1$ eV pour les semi-conducteurs et $\epsilon_g \approx 6$ eV pour les isolants.

D'après J.-P. PEREZ et coll., « Électromagnétisme – Vide et milieux matériels », Masson, 1991.

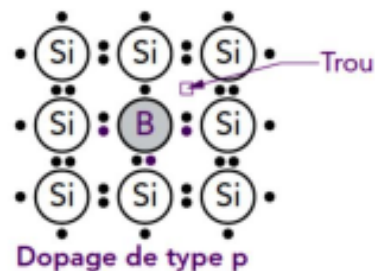
Document 2 : Dopage d'un semi-conducteur

Un réseau monocristallin d'atomes de silicium, Si, est un semi-conducteur. L'atome de silicium ayant quatre électrons de valence, il établit quatre liaisons covalentes avec quatre atomes voisins. Un semi-conducteur au silicium a une conductivité quasi nulle. Afin d'augmenter sa conductivité, on insère dans la structure cristalline des atomes d'autres éléments, appelés **dopants**.

Pour un semi-conducteur au silicium dopé au phosphore, un atome de phosphore, P, remplace un atome de silicium dans le réseau. L'atome P ayant cinq électrons de valence, il forme quatre liaisons covalentes avec des atomes de silicium voisins ; il reste un **électron libre** qui peut participer à la conduction électrique. L'atome de phosphore étant donneur d'électron, on parle de **dopage de type n** (n pour négatif).



Par un raisonnement analogue, un atome dopant possédant trois électrons de valence, comme le bore, B, conduit à un déficit d'électron de valence dans le réseau, appelé trou. Ce trou peut être comblé par un électron de valence d'un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. L'atome de bore étant accepteur d'électron, on parle de **dopage de type p** (p pour positif).



Les éléments dopants génèrent des niveaux d'énergies dans la bande interdite. Ces niveaux sont proches des bandes de valence ou de conduction.



D'après J.-P. PEREZ et coll., « Électromagnétisme – Vide et milieux matériels », Masson, 1991.

Document 3 : Des matériaux sans résistance électrique

Les électrons sont responsables de la circulation du courant électrique dans les matériaux conducteurs. Lors de leurs déplacements, les électrons subissent de nombreux chocs qui les ralentissent. On appelle résistance électrique la propriété d'un matériau à ralentir le passage du courant électrique. Cette résistance provoque un échauffement du matériau par effet Joule (grille-pain, ampoule électrique à filament, etc.).

En 1911, H. KAMERLINGH ONNES étudie la résistance électrique du mercure à très basse température. Il découvre qu'en dessous d'une certaine température, appelée température critique, T_C , la résistance du mercure s'annule (schéma ci-contre). Il nomme ce phénomène « supraconductivité ».

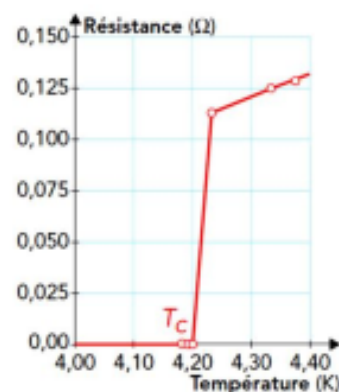
L'absence totale de résistance électrique d'un supraconducteur parcouru par un courant est la propriété la plus connue. La réalisation d'électro-aimants supraconducteurs constitue l'application la plus courante de la supraconductivité. On la retrouve notamment en imagerie médicale dans les appareils à IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) pour lesquels des champs magnétiques de plusieurs teslas sont produits grâce à des solénoïdes supraconducteurs. Les appareils à RMN utilisent aussi la supraconductivité.

Un aimant (le cube métallisé gris sur l'affiche ci-contre) crée autour de lui un champ magnétique qui traverse tout matériau non magnétique, comme la pastille circulaire. À basse température ($T < T_C$), la pastille, généralement une céramique, devient supraconductrice. Elle expulse alors le champ magnétique vers l'extérieur ce qui crée une force sur l'aimant et le fait léviter : c'est l'**effet Meissner**. Cet effet est utilisé, entre autres, dans le fonctionnement d'un train japonais.



Analyse et synthèse

1. En utilisant la théorie des bandes, expliquer la conductivité électrique élevée des métaux.
2. Dans la théorie des bandes, qu'est-ce qui différencie un semi-conducteur d'un isolant ?
3. Pourquoi un semi-conducteur constitué d'un monocristal de silicium a-t-il une conductivité quasi nulle ?
4. À température ambiante, l'énergie d'agitation thermique est d'environ 25 mV. Pourquoi, à température ambiante, un semi-conducteur dopé n peut-il conduire le courant électrique ?



Résistance du mercure.



1911-2011, cent ans de supraconductivité.

5. Comment justifier, d'un point de vue microscopique, que la résistance des métaux augmente lorsque la température croît ?
6. Exprimer, en degré Celsius, la valeur de la température critique T_c du mercure. Donnée: $T(K) = t(^{\circ}C) + 273,15$.
7. Pourquoi un matériau à basse température pour lequel $T < T_c$ devient-il supraconducteur ?
8. Bilan :
 - a. Pourquoi le dopage d'un semi-conducteur améliore-t-il sa conductivité électrique ?
 - b. Rappeler les principales propriétés d'un matériau supraconducteur et citer des applications.

B – CARACTÉRISTIQUE D'UNE DIODE (Durée conseillée : 1 h)

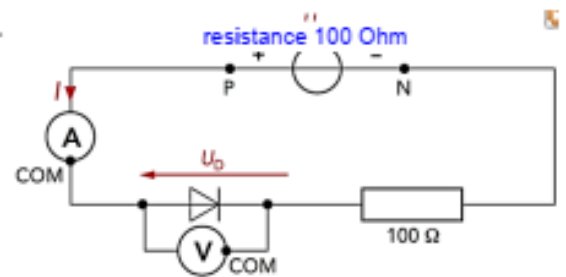
Une diode est un composant à semi-conducteurs très utilisé en électronique. **Quelle est la caractéristique d'une diode au silicium ? Comment relier ses propriétés à sa structure ?**

I - Caractéristique d'une diode au silicium

• Une diode est un composant dont le symbole est : 

Réaliser le montage du document 1.

- Régler l'ampèremètre pour qu'il mesure l'intensité I en milliampère (mA) puis le voltmètre pour qu'il mesure la tension U_D aux bornes de la diode, en volt (V)
- Faire varier la tension U_{PN} entre les valeurs $-3,0$ V et $+6,0$ V, et relever pour chaque tension les valeurs de la tension U_D aux bornes de la diode et de l'intensité I qui la traverse. Porter ces valeurs dans un tableau. Les valeurs négatives de la tension U_{PN} sont obtenues en inversant les branchements aux bornes du générateur.



Doc.1 Schématisation du montage

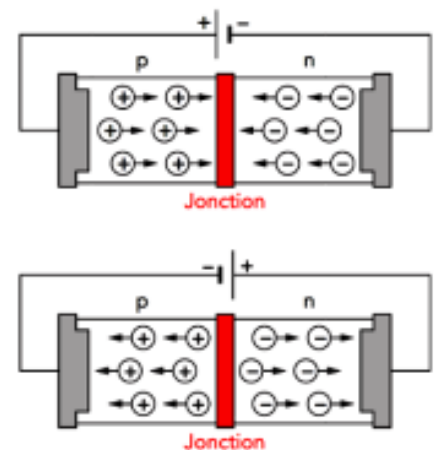
$U_{PN}(V)$	-3,0	-2,0	-1,0	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0
$U_D(V)$	-3,0	-2,0	-1,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
$I(mA)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,20	1,8	13,5	58,5

- Tracer le graphe $I = f(U_D)$ sur un tableur et l'imprimer.

1. Décrire l'allure du graphe $I = f(U_D)$. Indiquer sur quelle partie de la caractéristique, la diode :
 - a. conduit le courant électrique (diode passante)
 - b. bloque le courant électrique (diode bloquée).
2. Le graphe précédent peut être modélisé par deux droites perpendiculaires. Les représenter sur le graphe. A partir de cette modélisation, déterminer graphiquement la tension de seuil de la diode, notée U_s , tension pour laquelle la diode devient passante.
3. Choisir une valeur de U_{PN} pour laquelle la diode est passante. Inverser le sens de branchement de la diode. Qu'observe-t-on ?
4. La diode n'est pas un dipôle symétrique. Justifier cette affirmation.

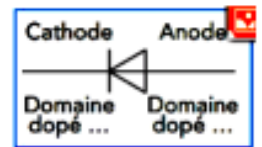
II - Fonctionnement interne d'une diode

Une diode est formée par la mise en contact de deux semi-conducteurs, l'un dopé n, l'autre dopé p. La zone de contact est appelée **jonction** (doc. 2). Le semi-conducteur dopé n conduit le courant par « saut d'électrons », les charges négatives sont schématisées par \ominus . Le semi-conducteur dopé p conduit le courant par « saut de trous ». Les trous sont assimilables à des charges positives schématisées par \oplus . Lorsqu'on applique une tension électrique aux bornes de la diode, les électrons et les trous migrent en sens inverses. Selon la polarisation choisie, les porteurs de charges migrent vers la jonction ou s'en éloignent. Dans le premier cas, soit un électron « comble » un trou, soit les porteurs de charges traversent l'autre semi-conducteur jusqu'à atteindre l'électrode opposée. Dans le second cas, la jonction est dépeuplée de porteurs de charges.



Doc.2 : déplacement des électrons et des trous.

1. Quel est le sens conventionnel de circulation du courant électrique I ? Quel est celui des électrons ?
2. Sur les schémas du doc. 2, justifier le sens de déplacement des porteurs de charges (trous et électrons).
3. Une diode peut être passante ou bloquée. Associer, à chacun des deux états de la diode, l'un des schémas.
4. Reproduire le schéma ci-contre ; indiquer le sens du courant électrique I pour que la diode soit passante et compléter les pointillés.
5. Justifier les termes anode et cathode par analogie avec l'oxydoréduction en chimie.

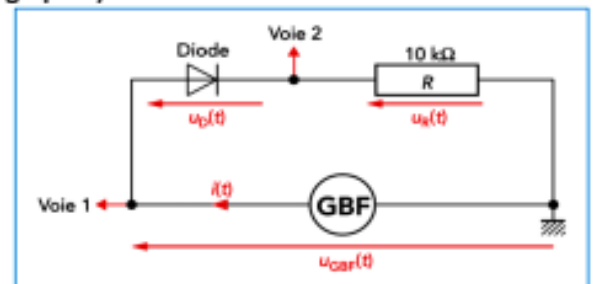


C – DU SEMI-CONDUCTEUR À LA TENSION CONTINUE (s'il reste du temps)

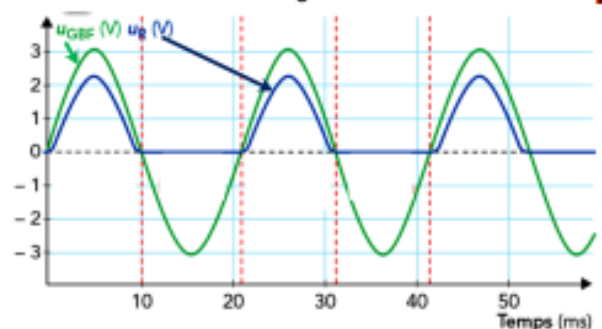
L'accumulateur (« la batterie ») d'un téléphone portable est rechargé à partir d'une prise secteur EDF délivrant une tension alternative sinusoïdale de 220 V. Comment transformer, avec des semi-conducteurs à diode, cette tension alternative en tension continue permettant la recharge du téléphone ?

I - Redressement mono-alternance avec une diode (Montage prof)

- On réalise le montage du document 3 en réglant le générateur basse fréquence (GBF) en tension sinusoïdale de fréquence $f = 500$ Hz et d'amplitude 3,0 V.
- La voie 1 mesure la tension la tension $u_{GBF}(t)$ aux bornes du générateur et la voie 2 mesure la tension $u_R(t) = R.i(t)$ aux bornes de la résistance.
- On paramètre le logiciel d'acquisition pour visualiser 3 ou 4 périodes.

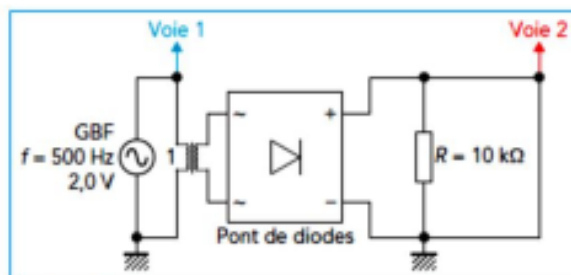


Doc. 3 Schéma du montage.



1. Indiquer, sur l'acquisition, les domaines pour lesquels la diode est passante, puis bloquée. Pourquoi parle-t-on de tension « redressée mono-alternance » ?

II- Redressement bi-alternance avec un pont de diodes (Montage prof)



Doc. 5 Schéma du montage.



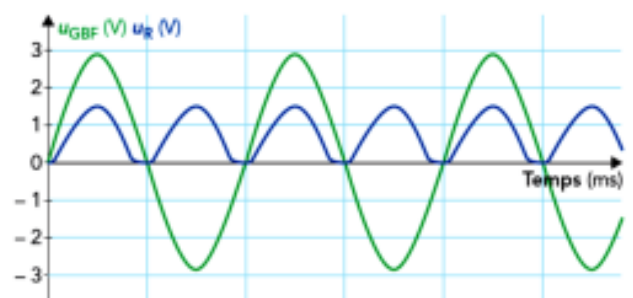
Schéma d'un pont de diodes

- On réalise le montage schématisé sur le doc.5. La voie 1 mesure la tension u_{GBF} et la voie 2 mesure la tension u_R . Le pont de diode est un ensemble de 4 diodes montées comme l'indique le schéma ci-dessus.

2. Comparer l'allure de la tension u_R à celle de l'acquisition précédente.

- On place un condensateur de capacité $C = 1 \mu\text{F}$ en parallèle avec la résistance R et on fait une acquisition.

3. Reproduire sur l'acquisition ci-contre l'allure du signal observé. Quel est le rôle du condensateur sur la tension redressée ?



4. On remplace le condensateur précédent par un autre de capacité $C = 10 \mu\text{F}$. Qu'observe-t-on ? Quelle est l'utilité de ce montage ?



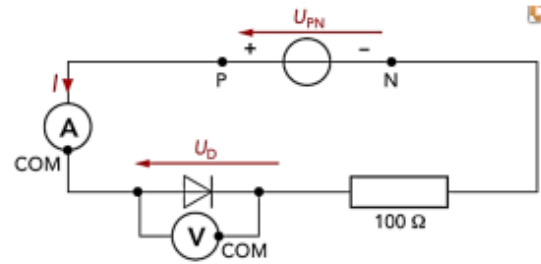
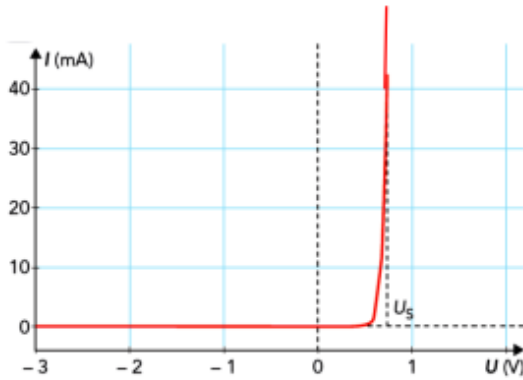
A – ASDS - CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DES MATÉRIAUX (Durée conseillée : 1 h)

Analyse et synthèse

1. Pour les métaux, les bandes de valence et de conduction se **chevauchent**. Ainsi, certains électrons sont libres de se déplacer dans la structure cristalline des métaux, ce qui explique leur **grande conductivité électrique**.
2. Le « hauteur » E_g de la bande interdite d'un isolant (1 eV) est plus grande que celle d'un semi-conducteur (6 eV). Cette différence permet de distinguer les isolants des semi-conducteurs.
3. L'atome de silicium a quatre électrons de valence : il établit quatre liaisons avec quatre atomes de silicium voisins. Tous les électrons de valence participant à des liaisons, **il n'existe pas d'électrons libres**. La conductivité d'un monocristal de silicium est donc quasi-nulle.
Remarque : de même, pour un semi-conducteur **dopé p**, les électrons de la bande de valence doivent franchir une barrière énergétique de l'ordre de **10 meV**, pour combler les trous de l'élément dopant.
5. La **résistance électrique** d'un matériau est liée **aux chocs** que les électrons subissent lors de leurs déplacements dans les matériaux conducteurs. Lorsque la **température croît**, la vitesse des électrons augmente. **Le nombre de chocs** des électrons par unité de temps **augmente**, ce qui accroît la résistance électrique du matériau.
6. Sur le graphe, on lit $T_c = 4,20$ K, soit $t_c = T_c - 273,15 = 4,20 - 273,15 = -268,95$ °C.
Remarque : au début du **xx^e** siècle, H. Kamerlingh Onnes a pu atteindre une température de 0,9 K, soit $-272,15$ °C, en liquéfiant de l'hélium, en juillet 1908.
7. Pour $T < T_c$, la résistance du matériau est **nulle**. Le matériau n'oppose plus de résistance au passage du courant électrique, il est devenu **supraconducteur**.
8. **Bilan**
 - a : Le dopage d'un semi-conducteur génère des niveaux d'énergie, dans la bande interdite, proches de ceux des bandes de valence et de conduction. Cela améliore ainsi la conductivité électrique du semi-conducteur.
 - b : Un matériau supraconducteur a une résistance électrique nulle en dessous d'une certaine température critique T_c . Le courant électrique peut donc y circuler sans aucune résistance et il ne provoque aucun échauffement.
Les appareils de RMN et d'IRM ont besoin de très forts champs magnétiques pour fonctionner. En faisant circuler un courant intense dans une bobine supraconductrice, on peut générer de tels champs magnétiques. Le train japonais utilise l'effet Meissner afin de léviter au-dessus d'un rail de circulation et ainsi se déplacer à grande vitesse sans frottement sur le rail.

B – CARACTÉRISTIQUE D'UNE DIODE (Durée conseillée : 1 h)

I - Caractéristique d'une diode au silicium



Doc.1 Schématisation du montage

$U_{PN}(V)$	-3,0	-2,0	-1,0	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0
$U_D(V)$	-3,0	-2,0	-1,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
$I(mA)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,20	1,8	13,5	58,5

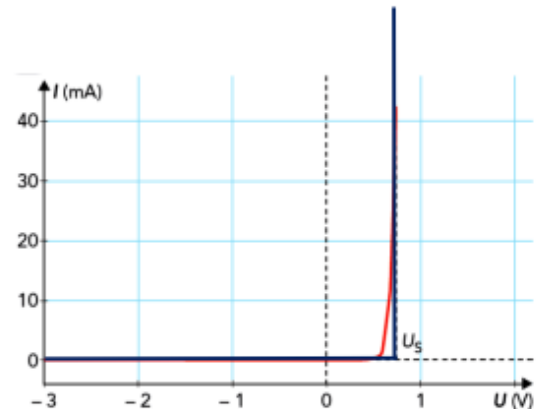
- 1.a. Pour $U_D < 0,5$ V environ, $I = 0$ mA ; la diode ne conduit pas le courant électrique (diode bloquée).
- 1.b. Pour $U_D > 0,5$ V environ, I est non nulle ; la diode conduit le courant électrique (diode passante).

2. Modélisation du graphe par deux droites perpendiculaires.

Graphiquement : $U_s = 0,75$ V

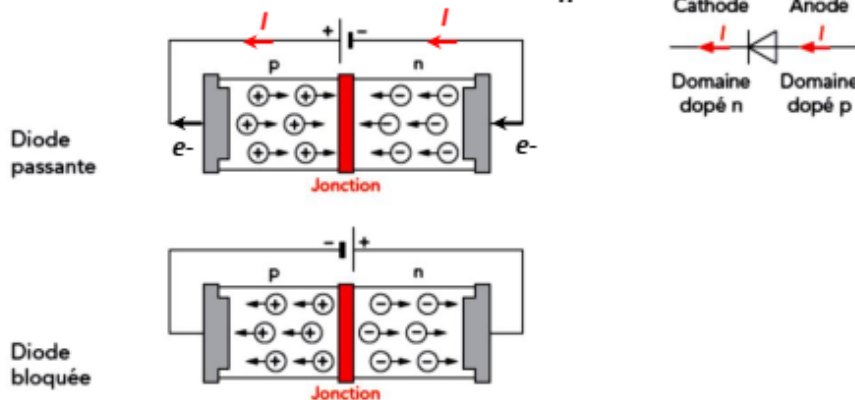
3. Lorsque la diode est passante (pour $U_{PN} = 4,0$ V et $I = 13,5$ mA par exemple) on inverse son sens de branchement. La diode devient bloquée le courant ne passe plus $I = 0$ mA.

4. Une diode n'est pas un dipôle symétrique car son comportement dépend de son sens de branchement.



II - Fonctionnement interne d'une diode

1. À l'extérieur d'un générateur, le courant circule conventionnellement de la borne positive vers la borne négative du générateur. Les électrons circulent dans le sens opposé.
2. Les électrons, chargés négativement, se déplacent vers la borne positive du générateur et les trous, chargés positivement, se déplacent vers la borne négative du générateur.
- 3.
- 4.



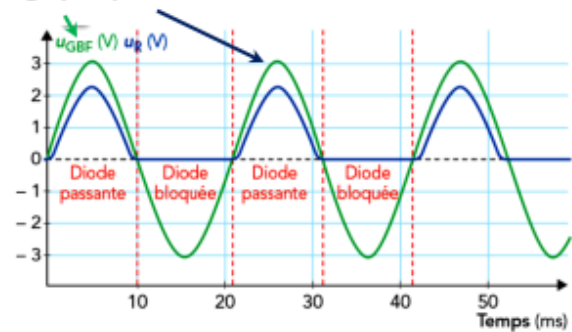
5. En chimie : à l'anode se produit une oxydation soit une libération d'électrons ;
à la cathode se produit une réduction soit une consommation d'électrons.

Pour la diode : les électrons quittent le domaine dopé p, qui est donc l'anode ; les électrons arrivent sur le domaine dopé n, qui constitue donc la cathode.

C – DU SEMI-CONDUCTEUR A LA TENSION CONTINUE (s'il reste du temps)

I - Redressement mono-alternance avec une diode (Montage prof)

1. On parle de « redressement mono-alternance », car lors de l'alternance pour laquelle la tension u_{GBF} est négative (diode bloquée), la tension u_R est redressée d'une valeur négative à une valeur nulle.



II- Redressement bi-alternance avec un pont de diodes (Montage prof)

2. Avec le pont de diodes, lors de l'alternance pour laquelle la tension u_{GBF} est négative, la tension u_R n'est plus nulle ; elle a la même allure que celle lorsque la tension u_{GBF} est positive.

• On place un condensateur de capacité $C = 1 \mu\text{F}$ en parallèle avec la résistance R et on fait une acquisition.

3. Le condensateur permet de lisser la tension redressée.

4. Avec le condensateur par celui de capacité $C = 10 \mu\text{F}$ le lissage de la tension redressée est meilleur. On obtient une tension quasi-constante.

Le montage à pont de diodes permet donc transformer une tension sinusoïdale en tension continue.

