

4. DIODES À JONCTION PN

JEAN-MICHEL SALLESE

DIODE À JONCTION P-N

Modèles simplifiés de la diode

Applications de la diode:

Redresseurs de courant alternatif
Diode en commutation d'une charge inductive

La diode Zener

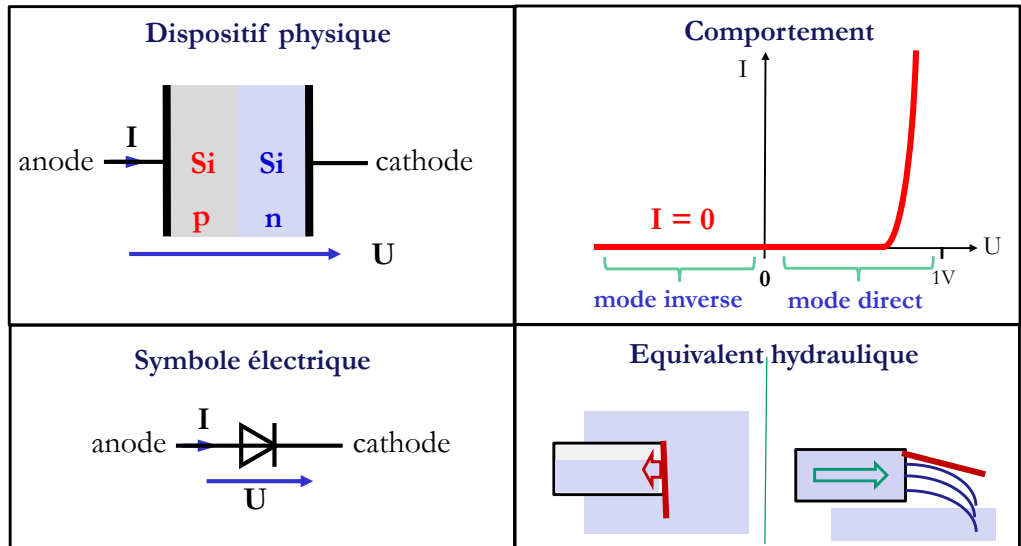
Les diodes Electroluminescentes (LED)

La Photodiode

Annexe: Dopage et Jonction p-n

DIODE À JONCTION P-N : GÉNÉRALITÉS

La diode à jonction PN est un dipôle non-symétrique et non-linéaire.



Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 3

La diode à jonction pn est obtenue en alternant le type de dopage dans le semiconducteur, voir annexe.

Dans une jonction pn, le courant ne peut s'écouler que dans une direction, c'est-à-dire de la zone dite dopée P vers la zone dite dopée N.

Notons que les électrons font le chemin inverse.

Le symbole électrique indique le sens 'passant' de la diode.

L'image hydraulique de la diode est celui d'un clapet anti-retour.

Lorsque l'eau submerge le tuyau (dessin de gauche), le clapet se ferme et aucun courant ne peut passer dans le tuyau. Par contre, il existe bien une pression sur le clapet. Cette pression serait l'équivalent de la tension inverse aux bornes de la diode.

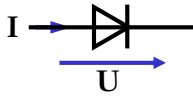
Si le niveau de l'eau passe en dessous du clapet, l'eau contenue dans le tuyau va repousser le clapet et s'écouler vers l'extérieur. Le courant passe.

Dans ce cas, on comprend que la pression exercée sur le clapet sera bien plus faible, et ceci quelque soit le débit d'eau.

Cette pression représente la tension aux bornes de la diode en mode direct.

DIODE À JONCTION P-N : MODÈLE NON-LINÉAIRE

La relation entre le courant et la tension est de nature **exponentielle**.
Elle est donc fortement non-linéaire.



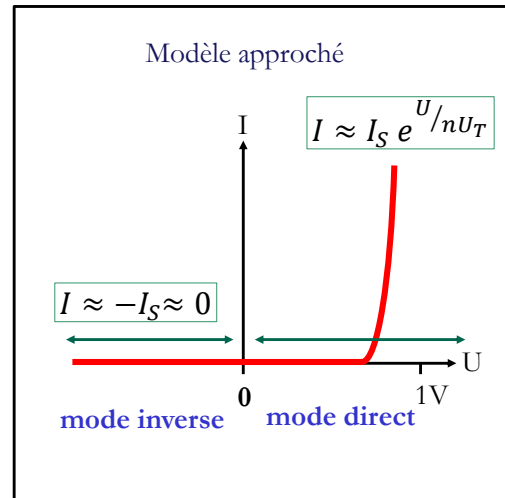
$$I = I_S (e^{U/nU_T} - 1)$$

$$10^{-15} < I_S < 10^{-9} \text{ [A]} \quad \text{et} \quad 1 < n < 2$$

I_S et n sont des paramètres propres au dispositif, tels que le dopage.

Le facteur n dépend de la pureté du semiconducteur.

$U_T = kT/q = 26 \text{ mV}$ à 300K (25° C)
Potentiel thermodynamique



En plus d'avoir une caractéristique non symétrique, qui est d'ailleurs le but recherché lorsqu'on utilise une diode, la dépendance entre le courant et la tension est fortement non-linéaire $I = I_S (e^{U/nU_T} - 1)$.

I_S et n sont des paramètres qui dépendent de la technologie de fabrication de la diode, principalement des densités et profils des dopages, ainsi que de la surface de la jonction.

Dans la pratique I_S étant très petit, la relation $I = I_S (e^{U/nU_T} - 1)$ peut se réduire à deux expressions :

- en mode direct : $I = I_S e^{U/nU_T}$ dès que $U >$ quelques centaines de millivolts
- en mode inverse : $I \approx -I_S \approx 0$ pour $U < 0$ car I_S est très faible

$U_T = kT/q$ est le potentiel thermodynamique

$k = 1.381 \cdot 10^{-23} \text{ [J/K]}$ la constante de Boltzmann

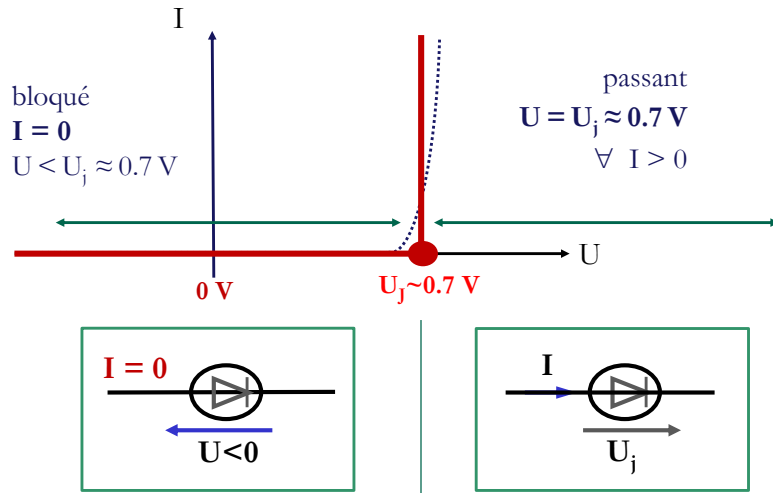
T la température absolue en ° K

$q = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ [C]}$ la charge de l'électron

Généralement, on considère $T = 300 \text{ ° K}$ ($\approx 25 \text{ ° C}$) et alors $U_T = kT/q = 26 \text{ mV}$.

DIODE À JONCTION P-N : MODÈLE SIMPLIFIÉ

Le modèle très simplifié



Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 5

La caractéristique $I = I_S e^{U/nU_T}$ est suffisamment abrupte pour en faire un modèle très simple où l'on approxime la caractéristique de la diode par une demi-droite verticale, c'est-à-dire une tension constante U_j quel que soit la valeur du courant I .

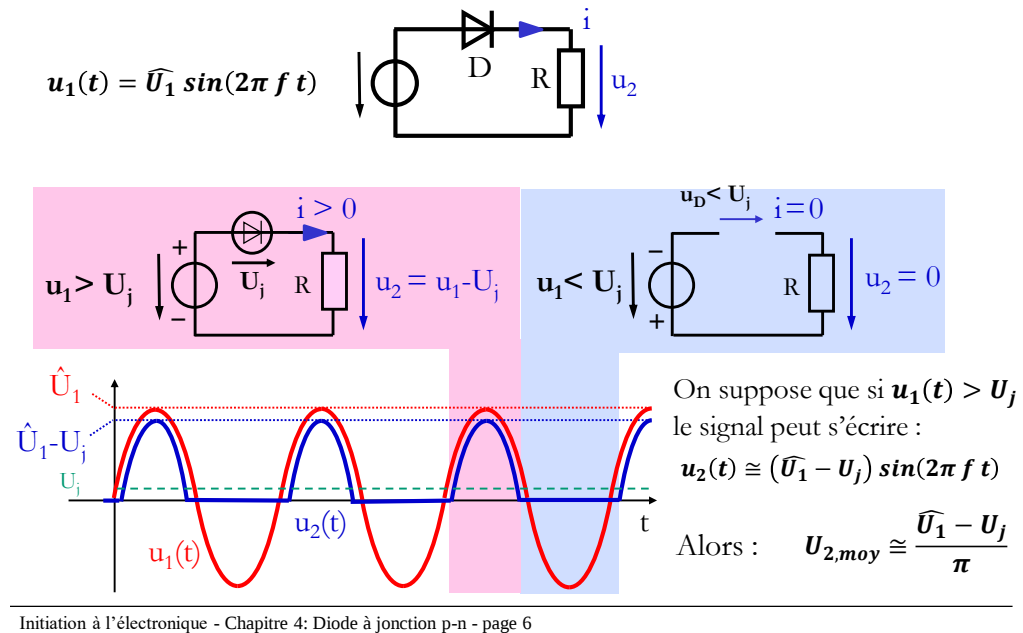
Ce comportement correspond à celui d'une source de tension constante qui vaut environ 0.7 V pour les diodes au silicium (attention, la diode ne fournit aucune énergie, contrairement à une source de tension).

Pour toute tension $U < U_j$ (et donc à fortiori $U < 0$), la caractéristique est approximée par une demi-droite horizontale avec $I = 0$.

Ce comportement correspond à un circuit ouvert.

Ce modèle élémentaire est suffisant pour analyser la majorité des circuits où il y a des diodes.

APPLICATION : REDRESSEUR SIMPLE ALTERNANCE



Le redresseur simple alternance est une application directe de l'effet diode.

Un redresseur transforme un signal alternatif (périodiquement positif puis négatif) en un signal toujours positif, ou toujours négatif (selon le sens de branchement de la diode). La tension de sortie $u_2(t)$ est donc nulle pendant la moitié d'une période.

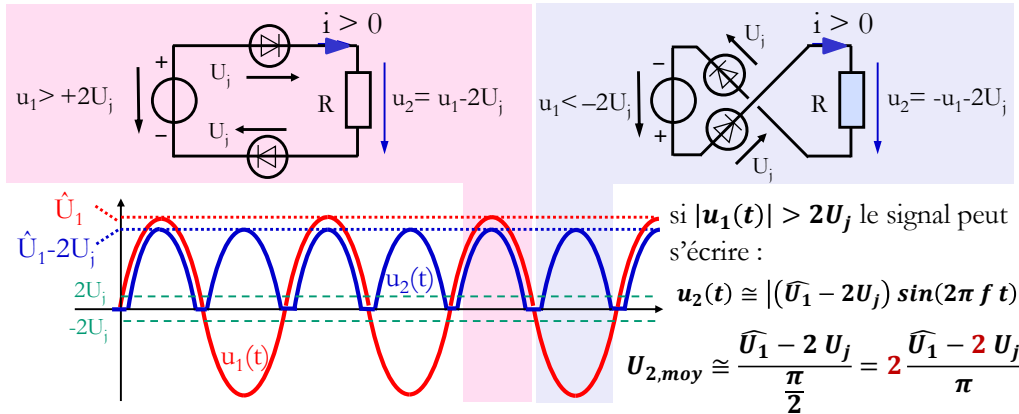
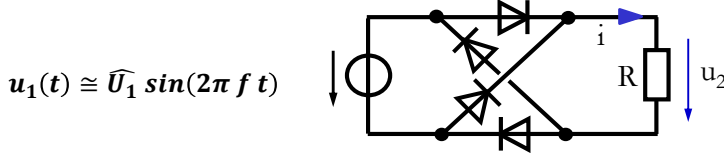
On va perdre U_j vis-à-vis de la tension $u_1(t)$ car on doit traverser 1 diode.

La valeur moyenne de la tension $u_2(t)$ sur la période devient $U_{2,moy} \cong \frac{\widehat{U}_1 - U_j}{\pi}$

Les applications d'un tel circuit qui donne une tension et un courant toujours positifs (ou toujours négatifs selon le sens de branchement de la diode), mais pas continus, sont assez limitées.

Notons qu'en retournant la diode, on obtient le même comportement avec une tension $u_2(t)$ qui ne comporte que les alternances négatives.

APPLICATION : REDRESSEUR DOUBLE ALTERNANCE EN PONT



Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 7

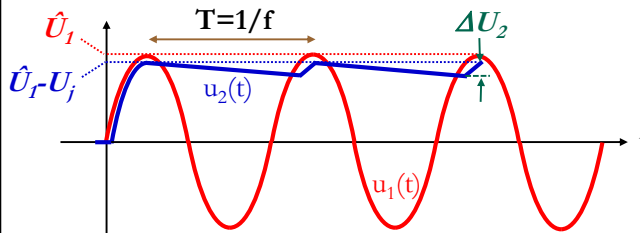
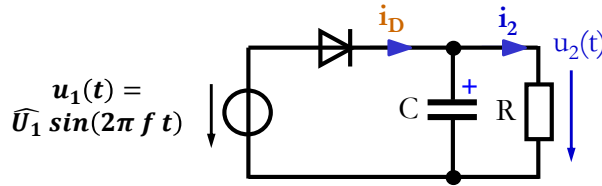
En créant un pont de diodes comme décrit sur le schéma, on peut transformer un signal alternatif (périodiquement positif puis négatif) en un signal toujours positif, sans que la tension s'annule pendant une demi-période. On profite ainsi de la tension pendant toute la durée de la période.

Cette fois-ci, on va perdre $2 U_j$ vis-à-vis de la tension $u_1(t)$ car on doit traverser 2 diodes.

En retournant toutes les diodes, on obtient le même comportement avec une tension $u_2(t)$ uniquement négative et on a $U_{2,moy} \cong 2 \frac{\widehat{U}_1 - 2U_j}{\pi}$

Le courant est redressé, mais il varie encore périodiquement entre 0 et $\widehat{U}_1 - 2 U_j$. Ces oscillations limitent son utilisation dans les circuits où il faut une tension stable (par ex. en audio).

APPLICATION: REDRESSEUR SIMPLE ALTERNANCE



Si la variation de $u_2(t)$ est ΔU_2 , alors:

Après avoir atteint la tension maximal de charge $U_{2\max}$, la décharge s'écrit :

$$u_2(t) = U_{2\max} e^{\frac{-t}{RC}}$$

Avec $U_{2,\max} \cong (\widehat{U}_1 - U_j)$

Puis, si $T \ll RC$

$$u_2(t) \cong U_{2\max} \left(1 - \frac{t}{RC}\right)$$

$$\Delta U_2 \cong \frac{T}{RC} (\widehat{U}_1 - U_j)$$

En supposant la capacité initialement déchargée, la diode va conduire durant la première montée de u_1 et la capacité va se charger jusqu'à une valeur maximale $U_{2,\max} \cong (\widehat{U}_1 - U_j)$. Passé ce maximum de l'alternance, u_1 diminue tandis que u_2 va varier selon la loi $u_2(t) = U_{2\max} e^{\frac{-t}{RC}}$. En effet, la capacité ne peut pas se décharger à travers la diode qui se comporte comme une valve, mais uniquement à travers R, d'où la loi exponentielle.

Si maintenant $T \ll RC$, cette décharge peut être relativement lente et la variation de $u_2(t)$ quasi-linéaire: $u_2(t) \cong U_{2\max} \left(1 - \frac{t}{RC}\right)$.

La variation de la tension $u_2(t)$ sur une période, que l'on note ΔU_2 , est alors donnée par $\Delta U_2 \cong \frac{T}{RC} (\widehat{U}_1 - U_j)$.

Notons qu'en ayant $T \ll RC$, on aura bien $\Delta U_2 \ll (\widehat{U}_1 - U_j)$, ce qui réduira les fluctuations de la tension de sortie.

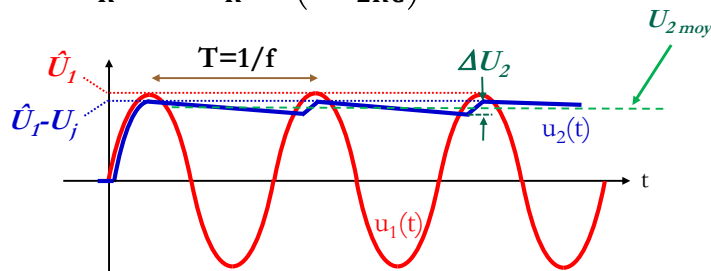
APPLICATION : REDRESSEUR SIMPLE ALTERNANCE

On en déduit la composante moyenne de la tension de sortie :

$$U_{2,moy} \cong U_{2,max} - \frac{\Delta U_2}{2} \cong (\widehat{U}_1 - U_j) \left(1 - \frac{T}{2RC} \right)$$

Et le courant moyen de sortie :

$$I_{2,moy} = \frac{U_{2,moy}}{R} \cong \frac{(\widehat{U}_1 - U_j)}{R} \left(1 - \frac{T}{2RC} \right)$$



Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 9

Dans ce cas, la valeur moyenne de la tension u_2 sur une période sera :

$$U_{2,moy} \cong U_{2,max} - \frac{\Delta U_2}{2} \cong (\widehat{U}_1 - U_j) \left(1 - \frac{T}{2RC} \right)$$

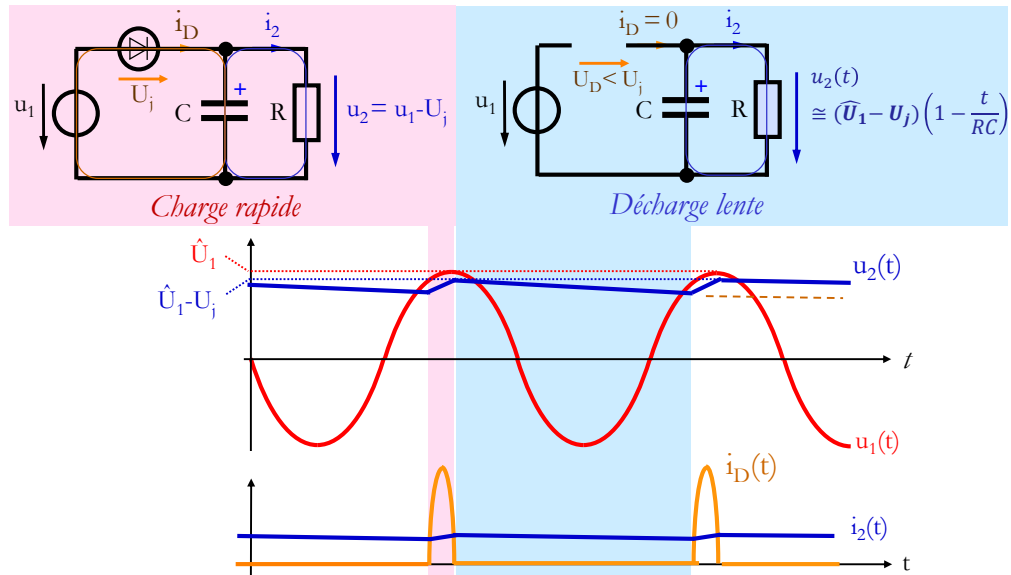
De la même manière, on peut calculer un courant de sortie moyen:

$$I_{2,moy} = \frac{U_{2,moy}}{R} \cong \frac{(\widehat{U}_1 - U_j)}{R} \left(1 - \frac{T}{2RC} \right)$$

On remarque que si la capacité était 'infinie', il n'y aurait aucune fluctuation de tension ou de courant.

En effet, une capacité 'infinie' se comporte comme une source de tension.

APPLICATION : REDRESSEUR SIMPLE ALTERNANCE



Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 10

La valeur moyenne du courant qui traverse la capacité est nulle, car sur un cycle la charge ne change pas dans la capacité.

Le courant moyen dans la diode, et à travers la source de tension, se résume donc au courant moyen dans la résistance R :

$$I_{D,moy} = I_{2,moy} = \frac{U_{R,moy}}{R}$$

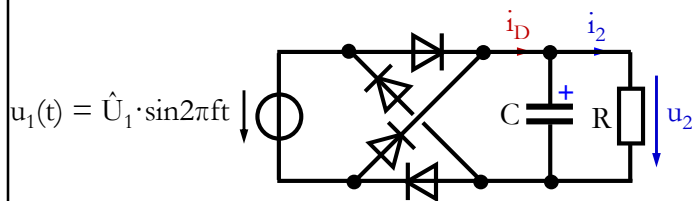
Or, ce courant dépend de la tension moyenne aux bornes de la capacité $U_{2,moy}$.

Le phénomène de charge de la capacité est rapide, car il n'y a que la diode 'sur son chemin'. Le courant de 'recharge' peut donc être relativement élevé, ce qui explique les pics de courant de $i_D(t)$ sur des temps assez brefs, $\ll T$.

On peut montrer (un calcul précis est relativement complexe) que la valeur crête du courant dans la diode est très supérieur à la valeur moyenne de courant.

Notons que la diode devra supporter ces pics de courants.

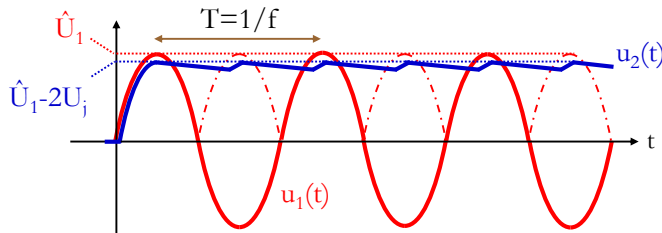
APPLICATION : REDRESSEUR DOUBLE ALTERNANCE EN PONT



$$RC \gg T = 1/f$$

La fluctuation de tension de sortie est

$$\Delta U_2 \cong \frac{T}{2RC} (\widehat{U}_1 - 2U_j)$$



Les valeurs moyennes de tension et courant de sortie sont:

$$U_{2,moy} \cong (\widehat{U}_1 - 2U_j) \left(1 - \frac{T}{4RC}\right) \quad \text{et} \quad I_{2,moy} = \frac{(\widehat{U}_1 - 2U_j)}{R} \left(1 - \frac{T}{4RC}\right)$$

Nous avons vu que le pont de diodes permettait de profiter des 2 alternances.

On peut donc appliquer la même analyse que dans le cas précédent, en remplaçant T par $T/2$, et U_j par $2U_j$.

La capacité va toujours se charger à travers 2 diodes jusqu'à $(\widehat{U}_1 - 2U_j)$. Passé le maximum de l'alternance, la capacité va se décharger à travers R selon pendant $T/2$.

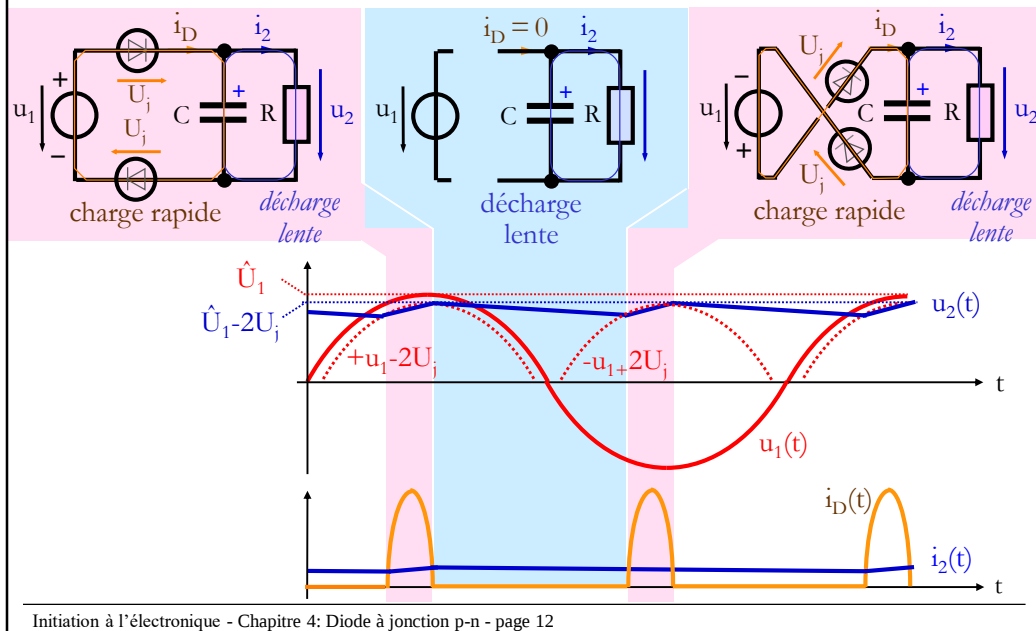
On obtient:

$$U_{2,moy} \cong (\widehat{U}_1 - 2U_j) \left(1 - \frac{T}{4RC}\right)$$

De même

$$I_{2,moy} = \frac{U_{2,moy}}{R} = \frac{(\widehat{U}_1 - 2U_j)}{R} \left(1 - \frac{T}{4RC}\right)$$

APPLICATION : REDRESSEUR DOUBLE ALTERNANCE EN PONT



La valeur moyenne du courant dans la diode est la somme des valeurs moyennes des courants dans la résistance et dans la capacité: $I_{D,moy} = I_{2,moy} + I_{C,moy}$

Comme précédemment, il n'y a pas de courant moyen à travers la capacité C , $I_{C,moy} = 0$:

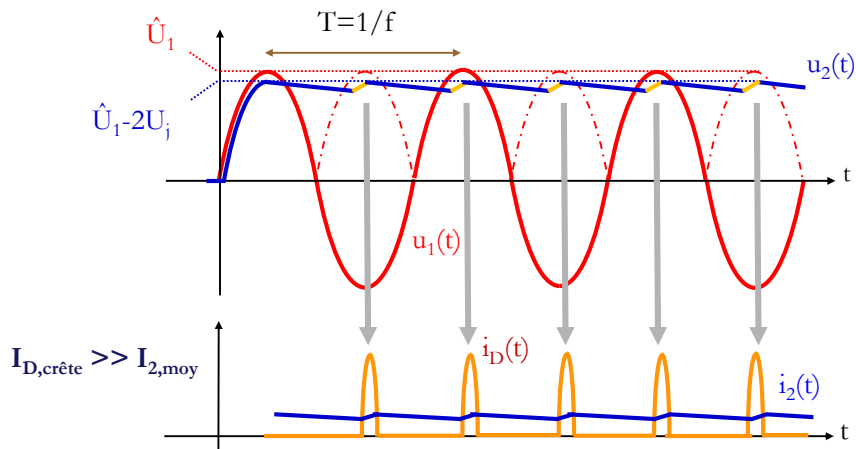
$$I_{D,moy} = I_{2,moy} + I_{C,moy} = I_{2,moy} = U_{2,moy}/R$$

Comme $i_D(t)$ est formé de "pointes de charge" de durée très brèves par rapport à T , la valeur $\hat{I}$ crête du courant de charge doit être très supérieure à sa valeur moyenne. Les diodes devront donc supporter cette valeur de courant crête. Si en pratique la source u_1 est le secondaire d'un transformateur, il devra être dimensionné pour atteindre la valeur efficace $\hat{I}/\sqrt{2}$.

Par rapport au redresseur à simple alternance, on pourra utiliser une capacité deux fois plus faible. La source doit également fournir un courant moins important, tant en valeur de crête qu'en valeur efficace, d'où un transformateur réduit (mais par contre on perd $2U_j$ en terme de tension, ce qui dans la pratique n'est pas un problème car il suffira de choisir le transformateur adapté).

APPLICATION : REDRESSEUR DOUBLE ALTERNANCE EN PONT

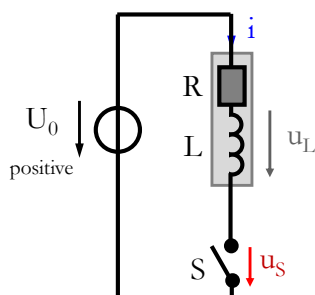
Allures générales des tensions et des courants.



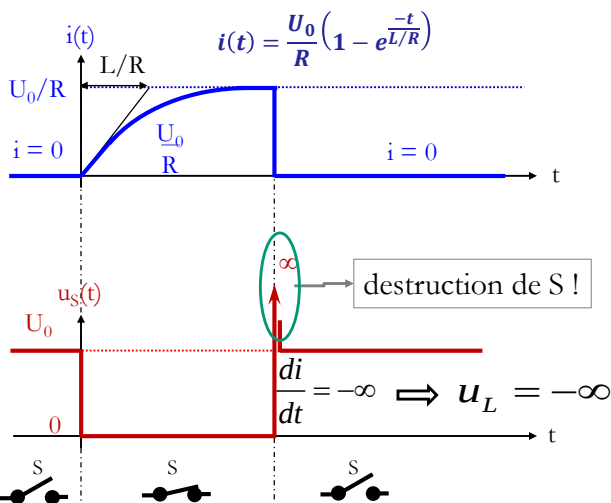
APPLICATION : "ROUE LIBRE" LORS DE COMMUTATION D'UN CIRCUIT INDUCTIF

Sur tension lors d'une coupure de courant dans un circuit inductif

$$u_s = U_0 - Ri - u_L = U_0 - Ri - L \frac{di}{dt}$$



$\text{S} \text{ --- } \text{fermé} \Rightarrow u_s = 0$
 $\text{S} \text{ --- } \text{ouvert} \Rightarrow i = 0$



Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 14

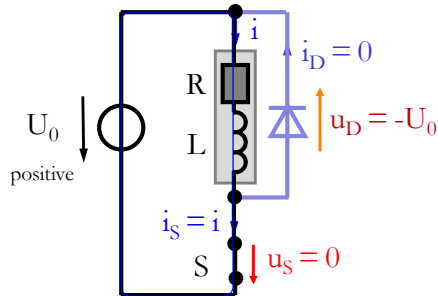
L'enclenchement d'un circuit série R-L sur une source de tension constante U_0 génère un courant qui tend vers U_0/R selon la loi:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{L/R}} \right)$$

Au moment où l'interrupteur S s'ouvre, le courant est théoriquement contraint de s'annuler instantanément, d'où $di/dt = -\infty$, ce qui provoquera une surtension aux bornes de l'inductance L, et donc aux bornes de S. En pratique cette surtension va générer un arc électrique aux bornes d'un interrupteur mécanique, ou la destruction d'un composant électronique tel que transistor bipolaire ou MOS. Il faut donc trouver le moyen d'éviter ce comportement (notons que cette technique est utilisée pour générer l'étincelle électrique via les bougies dans les moteurs à essence.

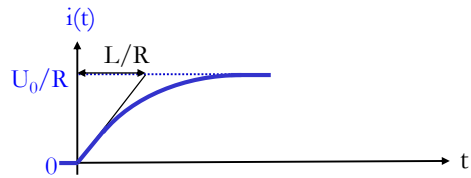
APPLICATION : "ROUE LIBRE" LORS DE COMMUTATION D'UN CIRCUIT INDUCTIF

Phase de fermeture de l'interrupteur (enclenchement) en présence de la diode.



À l'enclenchement la diode ne joue aucun rôle: solution 'habituelle'

$$\left. \begin{array}{l} R i + L \frac{di}{dt} = U_0 \\ i(0) = 0 \end{array} \right\} i(t) = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{L/R}} \right)$$



A l'enclenchement, $u_D < 0$, la diode est bloquée et ne joue aucun rôle.

L'enclenchement d'un circuit série R-L sur une source de tension constante U_0 donne un courant qui tend vers U_0/R selon la loi:

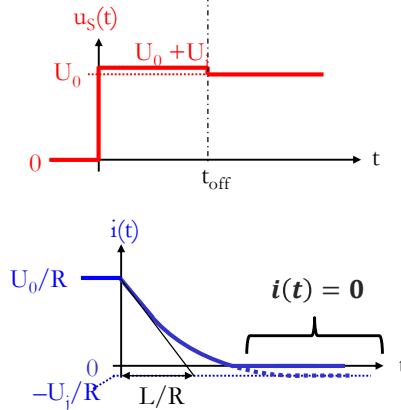
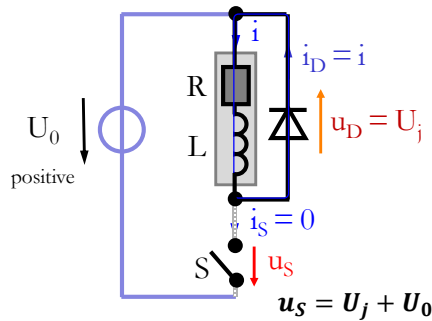
$$i(t) = \frac{U_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{L/R}} \right)$$

APPLICATION : "ROUE LIBRE" LORS DE COMMUTATION D'UN CIRCUIT INDUCTIF

Phase d'ouverture de l'interrupteur (déclenchement) avec la diode.

Au moment de l'ouverture on a : $R i + L \frac{di}{dt} = -U_j \Rightarrow i(t) = \frac{-U_j}{R} + \frac{U_0 + U_j}{R} e^{\frac{-t}{L/R}}$

Condition initiale : $i = \frac{U_0}{R}$



Au moment où l'interrupteur s'ouvre, le courant dans l'inductance vaut U_0/R et ne peut pas être discontinu, il trouve un chemin à travers la diode et il décroît selon la loi:

$$i(t) = \frac{-U_j}{R} + \frac{U_0 + U_j}{R} e^{\frac{-t}{L/R}}$$

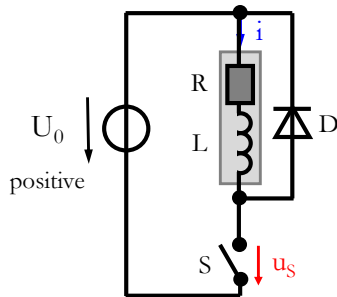
La diode en mode direct limite la tension U_s à $(U_0 + U_j)$.

La solution prédirait que le courant tendra vers $-U_j/R$, ce qui est faux car une diode n'est pas une source de tension réelle.

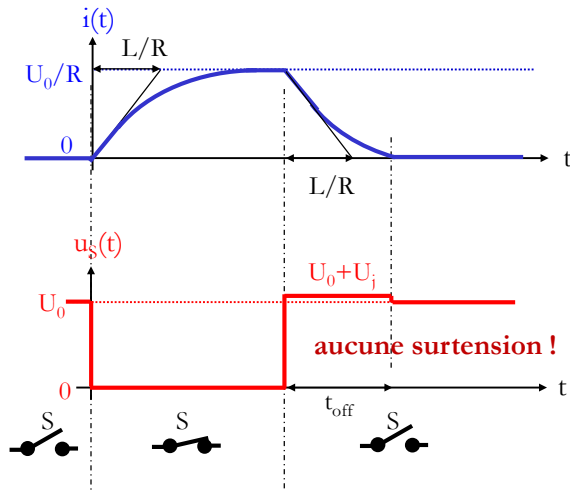
Ceci vient du fait que dans l'équation différentielle, la tension U_j n'a de sens que si la diode est passante, donc tant que le courant $i_D = i$ positif. A l'instant t_{off} où le courant s'annule, la diode passe en mode bloqué et tous les courants restent nuls: ils ne deviennent pas négatifs.

APPLICATION : "ROUE LIBRE" LORS DE COMMUTATION D'UN CIRCUIT INDUCTIF

Commutation avec diode de "roue libre"



Le courant s'établit dans la
boucle de la source et
"s'éteint" dans la diode

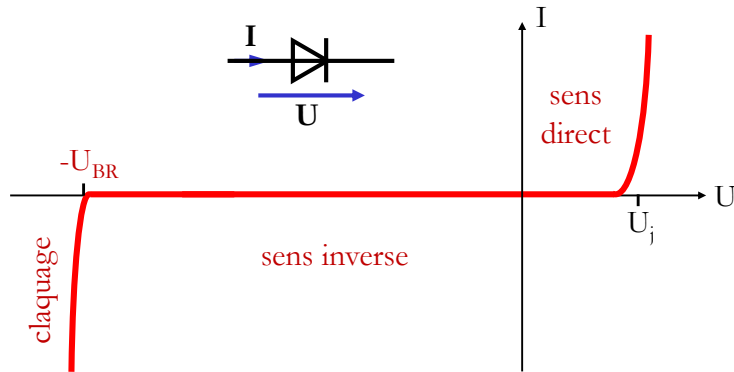


Cette technique est très répandue, par exemple dans les circuits de commande de relais, d'électroaimants, d'électrovannes, de moteurs, d'amplificateurs en classe D, d'alimentations à découpage etc, là où une inductance est commandée en mode On-Off.

DIODE À JONCTION : TENSION DE CLAQUAGE

Sous polarisation inverse une diode est bloquée.

Mais au delà d'une limite U_{BR} , il se produit un claquage (Breakdown) de la jonction et la diode laisse passer un courant inverse qui croît fortement pour une faible augmentation de la tension inverse.



Suivant le type de diode U_{BR} vaut d'une dizaine à plusieurs milliers de Volts.

Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 18

Le phénomène de claquage n'est pas destructif en lui-même, si le courant inverse et la puissance dissipée restent dans les limites fixées par le fabricant:

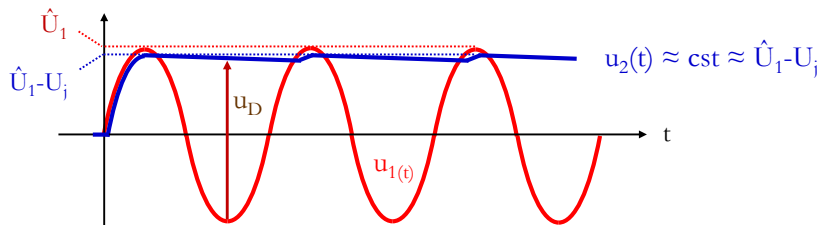
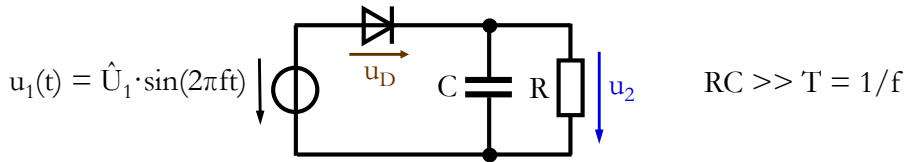
$$P = -U_{BR} I = U_{BR} I_{\text{inverse}} < P_{\text{max}}$$

Si ces conditions sont respectées, le phénomène de claquage est réversible, la diode revenant à l'état bloqué dès que la tension inverse redescend en dessous de U_{BR} .

Par contre si le courant n'est pas limité la diode est très vite détruite par un brusque échauffement de la jonction.

Dans une diode standard, U_{BR} n'est généralement pas connue avec précision. On sait seulement qu'elle est supérieure à la tension inverse maximum $U_{R,\text{max}}$ à ne pas dépasser, spécifiée par le fabricant. Celui-ci garantit que toutes les diodes du type donné de sa production résisteront à cette valeur.

REDRESSEUR ET TENSION DE CLAQUAGE, EXEMPLE



$$u_D(t) = u_1(t) - u_2(t) \approx u_1(t) - \hat{U}_1 + U_j$$

$$U_{BR} > u_{D,inv,max} \approx 2\hat{U}_1$$

réseau 230 V_{eff} :

$$u_{D,inv,max} = 2 \cdot 325 \text{ V} = 650 \text{ V}$$

Lorsque la diode est bloquée, la tension inverse peut atteindre $2\hat{U}_1$. Il faut donc garantir que la diode supporte cette valeur. Il vaut mieux prendre une diode avec une tension de claquage garantie nettement supérieure.

Exemple d'un redressement direct de la tension du réseau 230 V_{eff} :

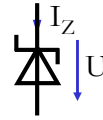
$$u_1(t) = 325 \sin(2\pi 50 t) \quad \Rightarrow \quad u_{D,inv,max} = 650 \text{ V}$$

Par prudence, on prend en général une diode garantie pour résister au minimum à 800 V ou même 1000 V.

DIODE ZENER

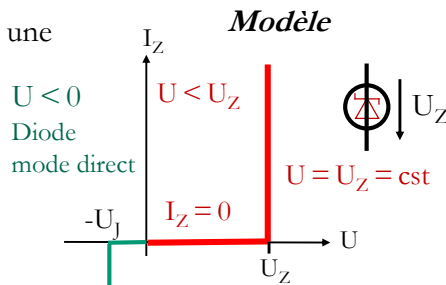
Les diodes Zener sont volontairement fabriquées pour présenter un claquage aussi abrupt que possible au-delà d'une tension donnée (quelques Volts à des dizaines de Volts) dite tension Zener.

Les diodes Zener étant conçues pour travailler en mode inverse, **U et I sont définis positifs en sens inverse.**



La croissance du courant étant très abrupte, elle peut être modélisée par une demi-droite verticale.

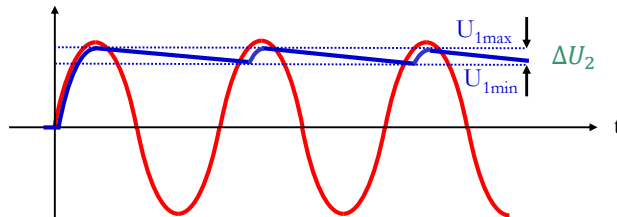
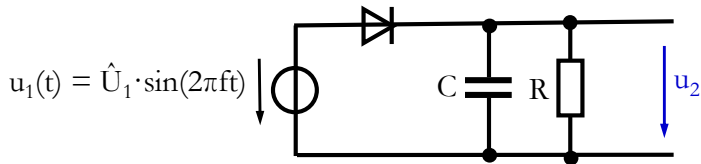
$U = U_Z$ pour tout $I_Z > 0$
 $I_Z = 0$ pour tout $0 < U < U_Z$
'Diode normale' si $U < 0$ (mode direct)



Les diodes Zener sont fabriquées de manière à obtenir une tension de claquage voulue, volontairement basse, avec une dispersion inférieure à $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale.

La diode Zener est conçue pour être utilisée en mode inverse. Toutefois, en mode direct, elle se comporte comme une diode classique, avec une tension de jonction $U_j \approx 0.7 \text{ V}$

REDRESSEUR ET DIODE ZENER

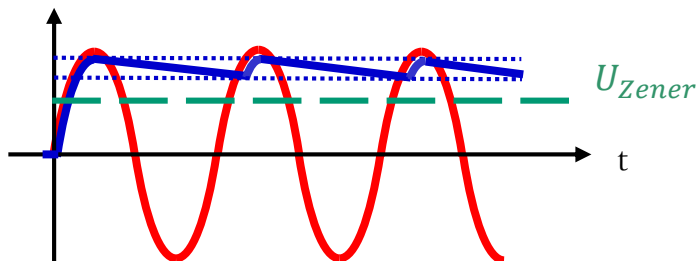


La tension de sortie aux bornes de R varie de ΔU_2 , entre U_{1min} et U_{1max}

En reprenant le circuit redresseur simple à une diode et une capacité (pour simplifier les schémas) , la variation de tension aux borne de R, qui représente en toute généralité une charge de sortie, fluctue entre 2 valeurs U_{1min} et U_{1max} . Cette variation peut devenir un problème si la tension doit rester stable (audio par exemple).

La diode Zener permettra de la stabiliser en 'coupant' les tensions supérieures.

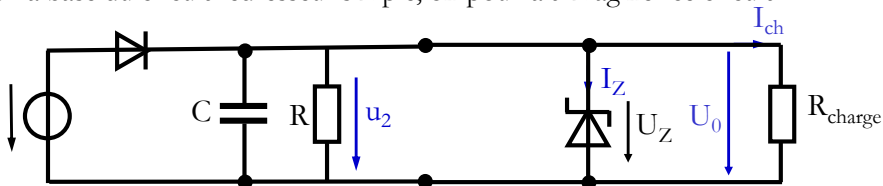
Exemple:



APPLICATION DE LA DIODE ZENER : STABILISATION DE TENSION

L'objectif est de maintenir une tension constante aux bornes d'une charge variable à partir d'une source variable.

Sur la base du circuit redresseur simple, on pourrait imaginer ce circuit:



Si $U_Z < U_{1min}$, alors le courant va s'écouler dans la diode Zener jusqu'à ce que la tension u_2 soit égale à U_Z ...tension stabilisée.

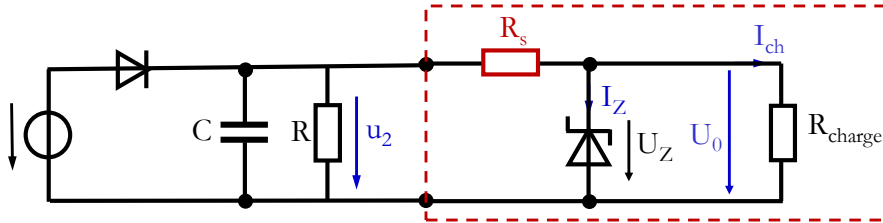
Mais dans ce cas, si le courant maximal que délivre la source de tension dépasse la valeur critique de la diode Zener, celle-ci sera détruite.

Dans ce schéma, le courant dans la diode Zener n'est pas limité ! ...

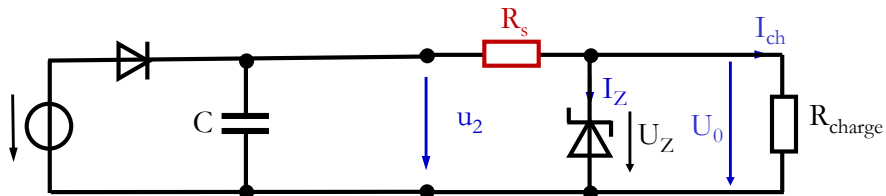
Ce schéma est uniquement didactique car le courant dans la diode Zener n'est pas limité sitôt que la tension u_2 dépasse U_Z .

APPLICATION DE LA DIODE ZENER : STABILISATION DE TENSION

La solution est d'introduire une résistance R_s en série avec la diode de redressement:



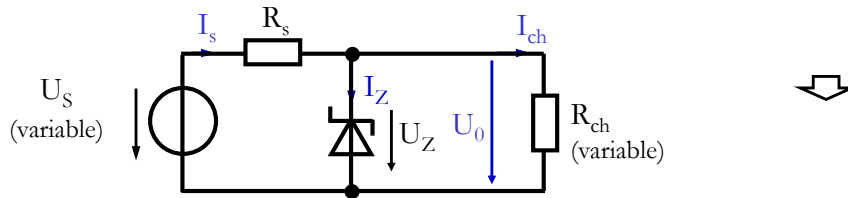
La résistance R_s va limiter le courant dans la diode Zener dès que celle-ci se mettra en conduction. De plus, dans l'exemple précédent, la résistance R avait un rôle didactique:



Une solution consiste à ajouter une résistance en série R_s pour limiter le courant maximal qui passera dans la diode Zener.

APPLICATION DE LA DIODE ZENER : STABILISATION DE TENSION

En toute généralité on a le schéma suivant avec une source de tension variable.



Lorsque $U_{\text{source}} > U_Z$ $I_{ch} = \frac{U_Z}{R_{ch}}$

On en déduit le courant qui va passer dans la diode Zener: $I_Z = \frac{U_s - U_Z}{R_s} - I_{ch}$

Conditions à respecter :

1. $I_Z > 0$ ou mieux $I_Z \geq I_{Z,\min}$ spécifié par le fabricant
2. $P_Z = U_Z \cdot I_Z < P_{Z,\max}$ spécifiée par le fabricant

La charge et la diode Zener étant en parallèle, la tension aux bornes de la charge est imposée par la diode Zener.

Lorsque $U_s > U_Z$, la propriété de la diode Zener impose:

$$U_0 = U_Z$$

De même son courant sera $I_{ch} = \frac{U_Z}{R_{ch}}$

L'équation du nœud donne:

$$I_s = I_Z + I_{ch}$$

L'équation de la maille de gauche donne:

$$R_s I_s + U_Z - U_s = 0$$

On en déduit:

$$I_s = (U_s - U_Z)/R_s$$

$$I_Z = (U_s - U_Z)/R_s - I_{ch}$$

Dans ce circuit, les valeurs de $U_{s,\min}$, $U_{s,\max}$, U_0 , et donc aussi U_Z , ainsi que $I_{ch,\min}$, $I_{ch,\max}$ sont en général imposées par les circonstances. Le concepteur doit alors choisir la puissance de la diode Zener et la valeur de R_s pour satisfaire les deux conditions:

$$I_Z \geq I_{Z,\min} \quad \text{et} \quad P_Z < P_{Z,\max}$$

Pour toutes les valeurs possibles de I_{ch} et de U_s qui sont compatibles avec l'application envisagée.

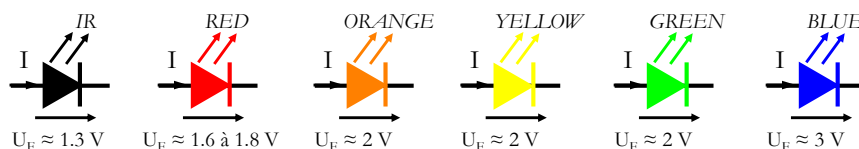
LIGHT EMITTING DIODE (LED)

Réalisées avec des semi-conducteurs comme le GaAs, le GaP, le GaN, et d'autres, les LEDs convertissent une partie de l'énergie électrique en photons. Leur longueur d'onde, donc la couleur, est propre au semiconducteur.

L'intensité lumineuse émise est proportionnelle au courant.

Ce courant est typiquement de 10 à 20 mA.

La tension U_F aux bornes d'une LED en mode direct (Forward) est fonction des semiconducteurs. Valeurs typiques :



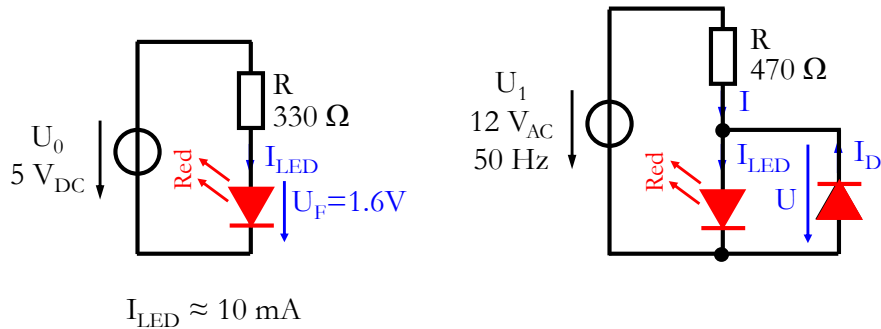
En mode inverse, la tension de claquage des LEDs est de quelques Volts seulement

Dans une diode au Silicium, la majorité de l'énergie électrique absorbée est dissipée sous forme de chaleur. Avec d'autres semiconducteurs tels que l'Arséniure ou le Phosphure de Gallium, ou encore le carbure de Silicium, une grande partie de l'énergie électrique absorbée est convertie en lumière dont la longueur d'onde dépend du matériau. Une partie de cette lumière parvient à sortir du dispositif, avec une certaine directivité qui peut encore être modifiée par la structure optique du boîtier (réflecteur, diffuseur ou lentille de concentration).

La tension directe U_F aux bornes d'une LED est très différente de la tension d'une jonction au silicium. Elle dépend de la couleur de la LED.

Une LED blanche est réalisée soit par assemblage de trois LEDs: rouge, verte et bleue, soit avec un dispositif à émission secondaire, utilisant une LED bleue pour exciter un phosphore qui réémet une lumière proche du blanc.

EXEMPLES D'UTILISATION DES LEDs EN INDICATEUR DE TENSION



A cause de la persistance rétinienne, l'œil voit une intensité lumineuse moyenne qui est proportionnelle au courant moyen dans la LED.
C'est donc $I_{\text{LED, moy}}$ qui importe.

Ce circuit permet de 'profiter' des 2 alternances du courant alternatif. Chaque demi-période va allumer une diode.

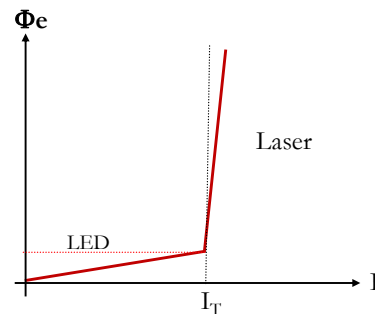
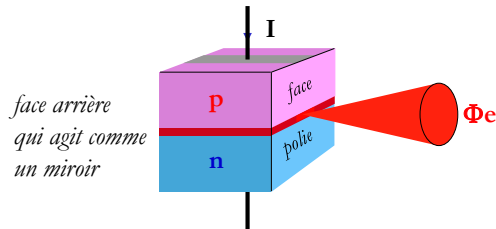
En régime sinusoïdal, il existera toujours une plage de tension où les diodes seront éteintes: lorsque $-U_F < U_1 < U_F$

Dans ce cas, aucun courant ne passera.

Un calcul plus détaillé est alors nécessaire pour estimer la valeur moyenne du courant sur une période.

DIODE LASER

Une diode laser est une LED avec une structure et une géométrie créant, dans la jonction, une cavité résonnante optique (Fabry-Pérot) apte à l'amplification optique et à la génération d'une lumière cohérente (tous les photons sont en phase).



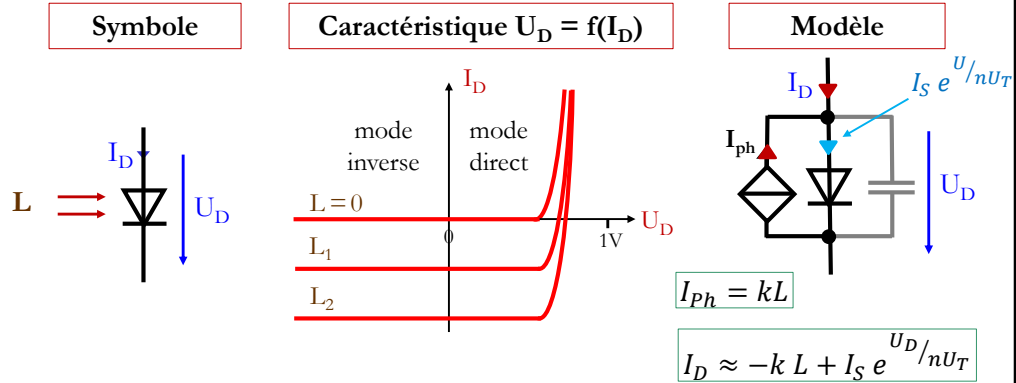
L'effet laser est caractérisé par une brusque augmentation de la puissance lumineuse générée qui apparaît à partir d'un courant seuil I_T .

Le seuil de courant I_T est fortement dépendant de la température et en mode laser la puissance lumineuse est très sensible au courant. En conséquence, celui-ci est généralement contrôlé par une boucle d'asservissement de l'intensité lumineuse émise, pour éviter de détruire la cavité résonnante par surcharge optique.

PHOTO-DIODE

Lorsque la zone de déplétion d'une diode est illuminée, une partie de l'énergie absorbée crée des paires électron-trou libres. Séparées par le champ électrique 'résidant', elles génèrent un courant inverse qui est proportionnel au flux de photons absorbés.

Une photodiode est une diode qui optimise la conversion lumière-courant.



Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 28

Une photodiode est une jonction p-n réalisée avec des semiconducteurs qui va absorber des photons.

Pour la modéliser, il faudra donc tenir compte de son comportement intrinsèque et extrinsèque.

Sa caractéristique intrinsèque relie le courant 'intrinsèque' I_{int} à la tension U_D aux bornes de la jonction pn : $I_{int} = I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}}$

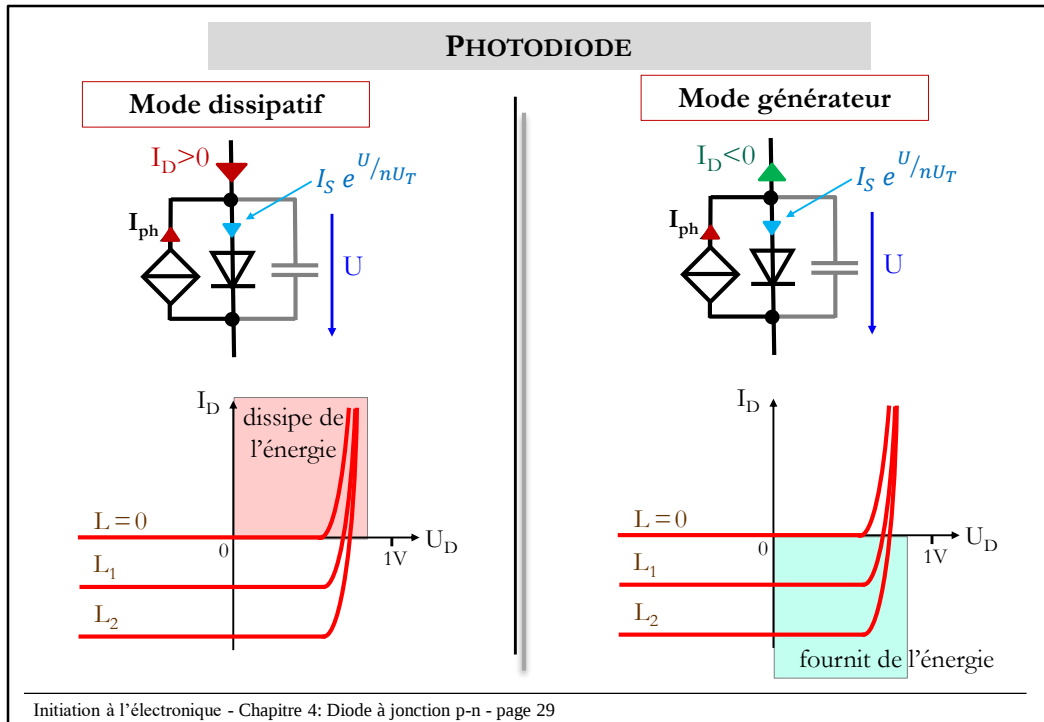
Sa caractéristique 'extrinsèque' résulte de l'effet photoélectrique qui génère un photocourant I_{ph} proportionnel au flux lumineux L , $I_{ph} = kL$.

Alors, si I_D est le courant 'vu' à l'extérieur de la photodiode, en appliquant la loi des nœuds, on obtient (selon le sens défini sur le schéma):

$$I_D \approx -kL + I_S e^{U_D/nU_T}$$

La capacité dessinée en gris dans le modèle représente la capacité de la jonction.

Cette capacité a un effet prépondérant lorsqu'il s'agit de traiter des signaux lumineux rapides.



Selon l'état de polarisation de la photodiode, celle-ci pourra dissiper ou générer de l'énergie.

En supposant qu'il n'y pas d'absorption de lumière ($L=0$), la photodiode ne peut que dissiper de l'énergie, le produit $I_D U_D$ sera toujours positif. C'est ce que l'on observe sur la figure de gauche.

De même, si il y absorption de lumière (L_1 et L_2) mais avec une tension U_D telle que I_D reste positif, la photodiode dissipera de l'énergie (bien qu'elle en reçoive par le biais de la lumière cette fois-ci). Pour obtenir cet effet, il faut une source de polarisation externe, ce qui ne sera pas le cas si on branche une impédance.

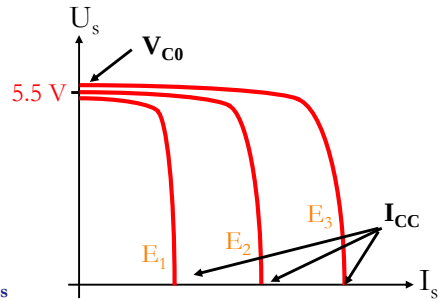
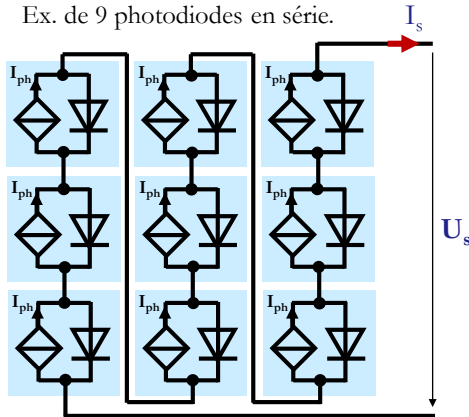
Ces situations correspondent au cas où le courant 'entre' dans la photodiode ($I_D > 0$).

A contrario, dans le cas où le courant 'ressort' de la photodiode, il devient négatif ($I_D < 0$) et le produit $I_D U_D$ devient également négatif. Il s'agit du cas où la photodiode alimente en courant une charge externe. Ce mode de fonctionnement correspond au quadrant inférieur droit de la caractéristique I_D - U_D sur la figure de droite: la photodiode fournit de l'énergie électrique à l'extérieur, elle agit comme un générateur.

PHOTO-DIODE, PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE

Les panneaux solaires photovoltaïques sont formés de photodiodes de grande surface, assemblées en série et/ou en parallèle pour obtenir une tension et un courant élevés.

Ex. de 9 photodiodes en série.



Caractéristiques I-V pour trois niveaux d'éclairage $E_1 < E_2 < E_3$.
Notez que la tension à vide V_{C0} n'est pas très sensible à la puissance lumineuse, contrairement au courant de court-circuit I_{CC} .

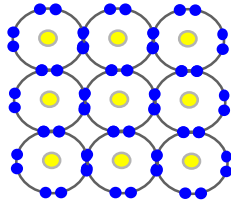
Les éléments photovoltaïques sont des photodiodes de très grande surface exclusivement utilisées comme sources d'énergie électrique.

Les plaquettes de Silicium monocristallin étant assez onéreuses, les panneaux sont souvent réalisés avec du silicium polycristallin, moins coûteux, mais ayant un moins bon rendement dans la conversion lumière - courant.

ANNEXE –LE DOPAGE, LA JONCTION PN

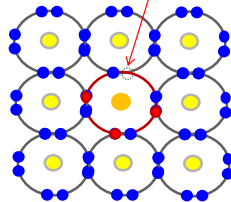
Le dopage dans un cristal de silicium

Silicium à l'**état pur**: tous les électrons de valence sont mobilisés (à 0K)



Electrons de valence
(liaisons entre atome)

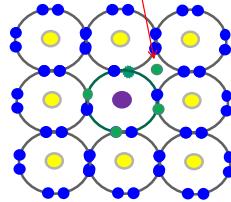
Un '**trou**': Particule virtuelle qui participe à la conduction



Atome de **Bore** en substitution du silicium: il manque 1 électron au cristal

Dopage de type P

Electron **supplémentaire** qui participe à la conduction



Atome de **Phosphore** en substitution du silicium: ajoute 1 électron au cristal

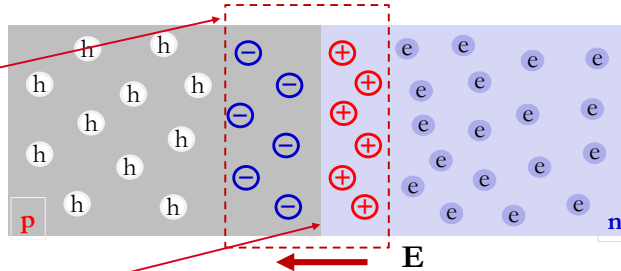
Dopage de type N

Initiation à l'électronique - Chapitre 4: Diode à jonction p-n - page 31

On peut modifier les propriétés d'un semiconducteur en insérant des atomes 'donneurs' ou 'accepteurs' d'électrons.

LA JONCTION P-N À L'ÉQUILIBRE

Zone de déplétion de charges libres (électrons, trous)



Au niveau de la **jonction pn**, le gradient de concentration fait que les électrons et les trous (holes) vont diffuser dans la zone adjacente, là où ils sont minoritaires.

Il existe donc une zone qui sera 'déplétée' de porteurs: les atomes donneurs et accepteurs perdront ou gagneront un électron.

Dans cette zone, les impuretés 'donneur' créeront une charge positive fixe. De même, les atomes 'accepteurs' créeront une charge négative fixe.

Ces charges fixes créent un champ électrique qui va s'opposer au phénomène de diffusion. L'équilibre sera atteint lorsque les 2 effets se compenseront.

Du côté n de la jonction il y a des électrons libres et du côté p des trous libres. Ces charges libres se comportent comme des molécules de gaz qui ont tendance à occuper tout l'espace disponible.

Ces charges vont donc diffuser à travers la jonction, là où elles sont minoritaires. Ce transfert va priver les atomes dopants de leur charge: ils seront ionisés (ce sont des ions chargés)

Un donneur dans la zone n qui perd son électron devient ainsi une charge positive fixe, un accepteur dans la zone p qui perd son trou (gagne un électron) devient une charge négative fixe.

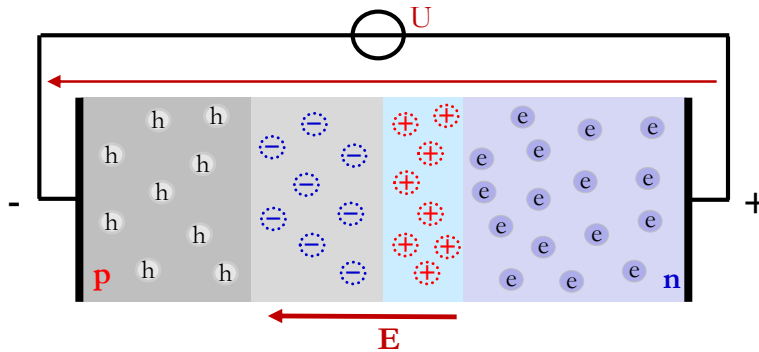
Ces charges fixes, de part et d'autre de la jonction, créent un champ électrique E dans une zone que l'on appelle la Zone de Déplétion (dans cette zone, il n'y a plus de charges mobiles).

On peut montrer que cet échange de charges électriques fini par atteindre un équilibre.

Cette zone de déplétion peut s'étendre de quelques nanomètres à quelques micromètres selon les valeurs des dopages.

Il s'agit donc d'une zone très localisée. De façon imagée, si aucun potentiel externe est appliqué entre les zones n et p, le nombre de charges qui diffusent du côté opposé est compensé par celle qui reviennent sous l'effet du champ électrique interne E. Par conséquent, à l'équilibre le courant est bien nul.

LA JONCTION P-N POLARISÉE EN INVERSE



Si on applique entre les zones **p** et **n** une tension qui renforce le champ électrique **E**, la zone de déplétion s'élargit et la barrière de potentiel augmente: aucune charge ne pourra traverser et le courant sera nul.

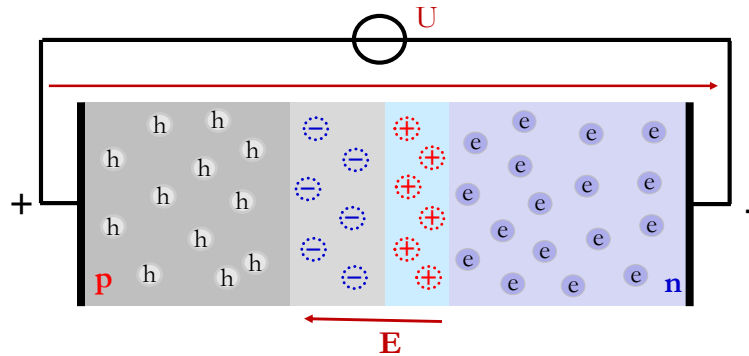
Polarisée en sens inverse, la jonction est bloquée

Si l'on applique entre les deux zones une tension de polarité + sur n, – sur p, elle va accroître la barrière de potentiel et les charges (électrons et trous) ne pourront plus la franchir pour rejoindre la zone opposée.

En même temps, le champ électrique est renforcé et la zone de déplétion augmente.

La jonction est dite en mode inverse, elle est bloquée, aucun courant ne pourra circuler (en réalité, il subsiste un courant 'inverse' extrêmement faible)

LA JONCTION P-N POLARISÉE EN DIRECT



Si on applique entre les zones p et n une tension qui réduit le champ électrique E , et donc également la barrière de potentiel, les porteurs pourront traverser la zone de déplétion et générer un courant I (ce courant est constitué d'un courant d'électrons et d'un courant de trous).

Polarisée en sens direct, la jonction est passante

Si on applique une tension de polarité + sur p et – sur n, on va diminuer la barrière de potentiel et permettre aux porteurs de charge d'être injectés dans la zone opposée.

La jonction est dite en mode directe, elle laisse passer le courant.