

Analyse de circuits à semi-conducteur

EL KACEM EL MOSTAFA

LES SEMI CONDUCTEURS

1- Introduction :

Les composants électroniques sont fabriqués avec des matériaux semi-conducteurs qui ne sont ni conducteurs, ni isolants.

2- Les semi-conducteurs

- Ils se placent entre les conducteurs et les isolants.

Classification en fonction de leur résistivité ρ [$\Omega.m$]

Isolant : $\rho > 10^6 \Omega.m$

Conducteurs : $\rho < 10^{-6} \Omega.m$

Semi-conducteur : intermédiaire

$$\left(R = \rho \cdot \frac{l}{S} \right)$$

- Ils possèdent une résistivité intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants :

Ils se comportent comme des isolants aux basses températures lorsque l'agitation thermique est faible et comme des conducteurs aux températures élevées.

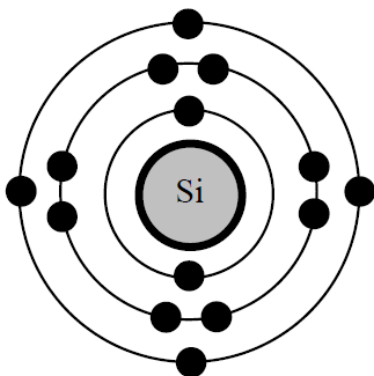
- La résistivité d'un semi-conducteur diminue quand la température augmente.

3- Les semi-conducteurs purs ou intrinsèques

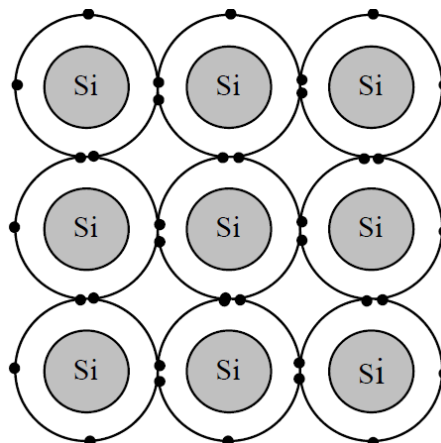
Lorsque le corps est parfaitement pur, il est qualifié d'intrinsèque.

Exemples : Silicium (Si), Germanium (Ge), Sélénium (Se)

Le Silicium est un atome tétravalent(4) : Il possède 4 électrons de valence qui vont se mettre en commun avec d'autres atomes de Silicium pour avoir la forme cristalline



Atome de Silicium



Cristal de Silicium

A la température 0 K ($1K= 1C^{\circ}+273$) toutes les liaisons covalentes sont maintenues.

C'est un bon isolant : pas d'électrons libres.

Lorsque la température du cristal augmente, certains électrons de valence quittent leurs places, certaines liaisons covalentes sont interrompues. On dit qu'il y a rupture de la liaison covalente et par conséquent :

- libération de certains électrons qui vont se déplacer librement, d'où conduction du courant électrique.
- il reste une liaison rompue (un ion Si +), d'où naissance d'une paire de charge : électron libre (charge négative) et trou (charge positive).

4- Les semi-conducteurs dopés ou extrinsèques

4-1- Dopage des semi-conducteurs

Le dopage est l'introduction dans un semi-conducteur intrinsèque une très faible quantité d'un corps étranger appelé dopeur.

Pour les semi-conducteurs usuels (Si, Ge), les dopeurs utilisés sont :

✚ soit des éléments pentavalents(5) : ayant 5 électrons périphériques.

Exemples : l'Arsenic (As), l'Antimoine (Sb), le Phosphore (P),...

✚ soit des éléments trivalents(3) : ayant 3 électrons périphériques.

Exemples : le Bore (B), le Gallium (Ga), l'Indium (In),...

Ces dopeurs sont introduits en très faible dose (de l'ordre de 1 atome du dopeur pour 10^6 atomes du semi-conducteur).

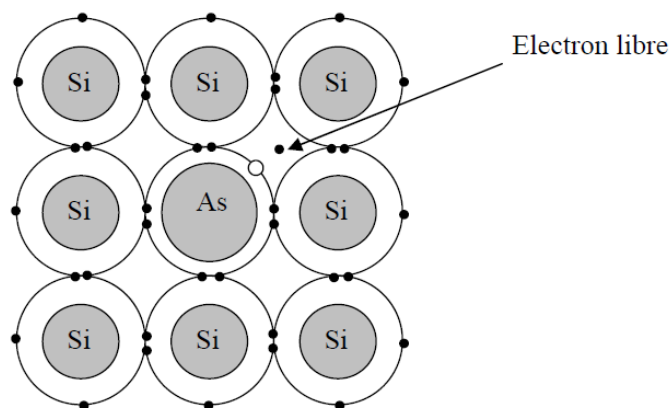
Après le dopage, le semi-conducteur n'est plus intrinsèque mais extrinsèque.

4-2- Semi-conducteur extrinsèque type N

Le dopeur utilisé appartient à la famille des **pentavalents** (As, Sb, P,...).

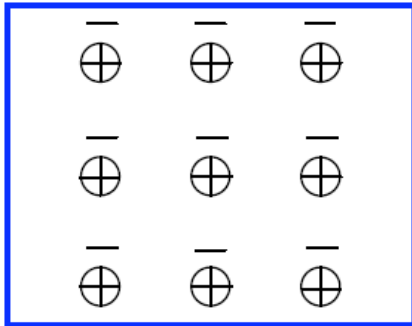
L'atome dopeur s'intègre dans le cristal de semi-conducteur, cependant, pour assurer les liaisons entre atomes voisins, 4 électrons sont nécessaires : le cinquième est donc en excès et n'a pas de place pour lui.

On dit que le dopeur est un donneur (**N**) d'électrons (porteurs de charge Négative). Il faut noter que cet électron lorsqu'il quitte son atome, il laisse à sa place un ion positif fixe.



Un atome d'Arsenic incorporé dans le cristal de semi-conducteur

Représentation simplifiée d'un semi-conducteur type N :



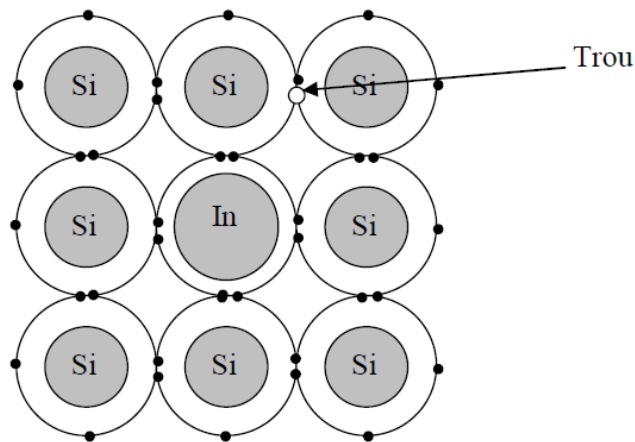
⊕ : ion positif fixe du dopeur.
− : électron libre (porteur de charge négative).

4-3- Semi-conducteur extrinsèque type P

Le dopeur utilisé appartient à la famille des **trivalents** (B, Ga, In,...).

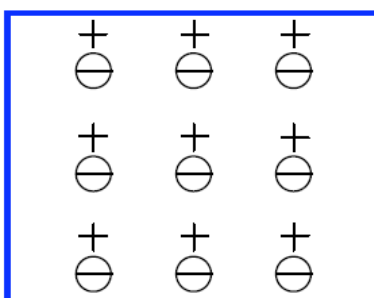
L'atome dopeur s'intègre dans le cristal de semi-conducteur, cependant, pour assurer les liaisons entre atomes voisins, 4 électrons sont nécessaires alors que le dopeur ne porte que 3, il y a donc un trou disponible susceptible de recevoir un électron. Un électron d'un atome voisin peut occuper ce trou.

L'atome du dopeur devient un ion négatif fixe. L'atome quitté aura un trou et une charge positive excédentaire. On dit que le dopeur est un **accepteur (P)** d'électrons.



Un atome d'Indium incorporé dans le cristal de semi-conducteur

Représentation simplifiée d'un semi-conducteur type P

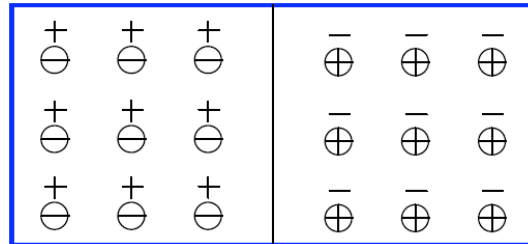


⊖ : ion négatif fixe du dopeur.
+ : trou disponible (porteur de charge positive).

5- Jonction P-N

5-1- Définition

L'union dans un même cristal d'un semi-conducteur type P et d'un semi-conducteur type N fait apparaître à la limite des zones P et N, une zone de transition appelée : Jonction P-N.



Jonction P-N

5-2- Jonction P-N non polarisée

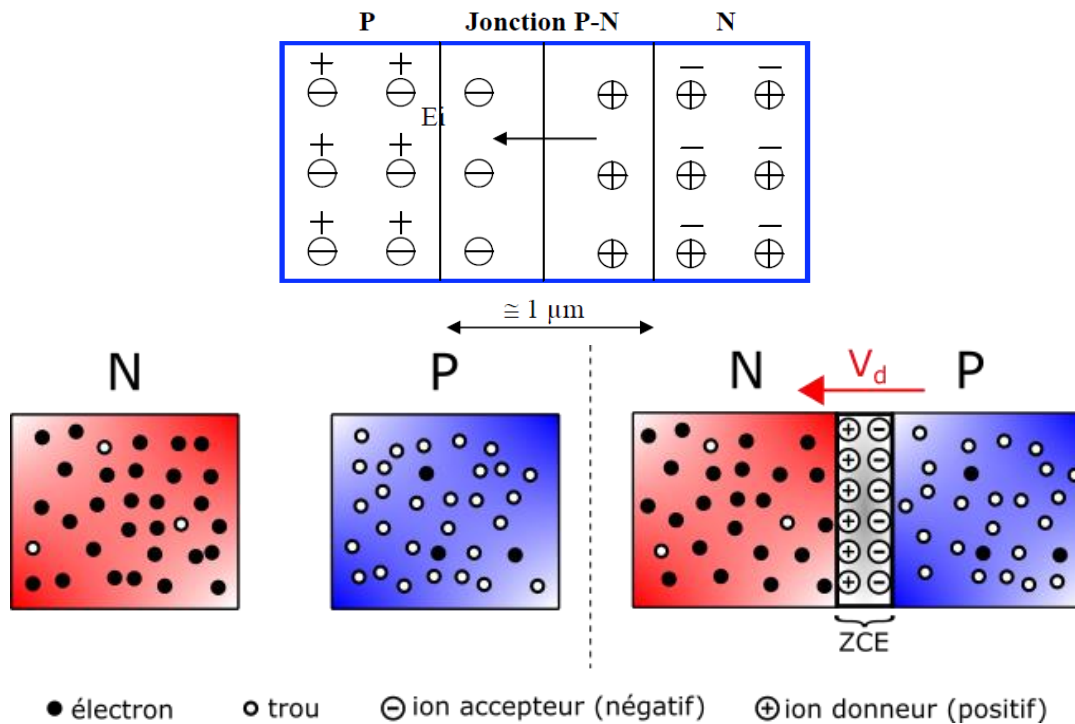
Au niveau de la jonction P-N :

- les électrons libres de la partie N diffusent vers les trous disponibles de la partie P
- les trous disponibles de la partie P diffusent vers la partie N et piègent des électrons.

Il y a recombinaison électron-trou.

Les parties P et N étant initialement neutres, la diffusion des électrons et des trous a pour effet de charger positivement la partie N, négativement la partie P d'où la création d'un champ électrique interne. Ce champ repousse les porteurs majoritaires de chaque partie et arrête la diffusion.

Entre les deux parties P et N apparaît alors une DDP appelée aussi barrière de potentiel de l'ordre de 0,7 V pour le Silicium, 0,3 V pour le Germanium.

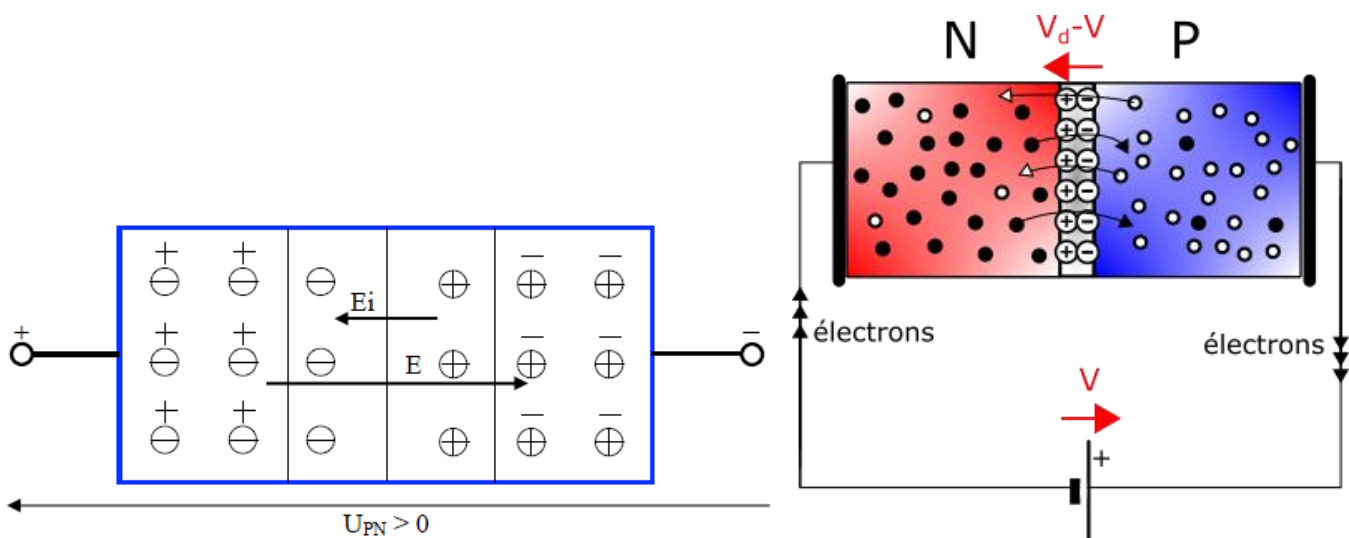


Jonction P-N non polarisée à l'équilibre

5-3- Jonction P-N polarisée

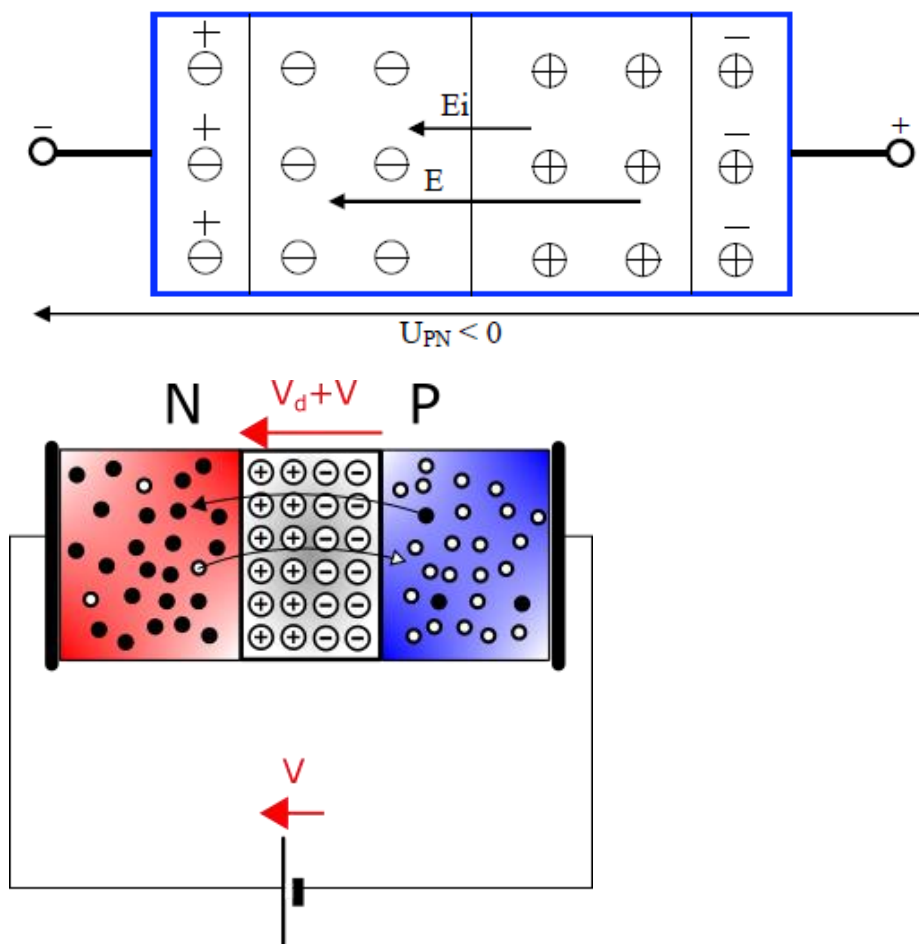
Polarisation en direct

Lorsqu'une tension positive est appliquée entre la partie P et la partie N ($U_{PN} > 0$), la jonction P-N est polarisée en direct. Cela revient à superposer au champ interne E_i , un champ externe E , le champ résultant a pour effet de diminuer la hauteur de la barrière de potentiel et par conséquent, les électrons franchissent la jonction par suite le courant passe de la jonction P vers la jonction N.



Polarisation en inverse

Lorsqu'une tension négative est appliquée entre la partie P et la partie N ($U_{PN} < 0$), la jonction P-N est polarisée en inverse. Le champ résultant a pour effet d'empêcher la circulation des électrons. La jonction est bloquée. Le courant inverse est pratiquement nul.



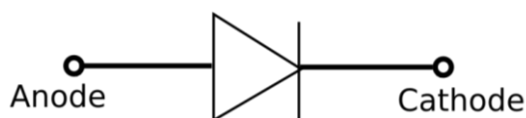
La diode à jonction

1-Définition :

Une diode est un dipôle à semi-conducteur (silicium) qui laisse passer le courant dans un sens (sens dit "passant") et pas dans l'autre (sens dit "bloqué").

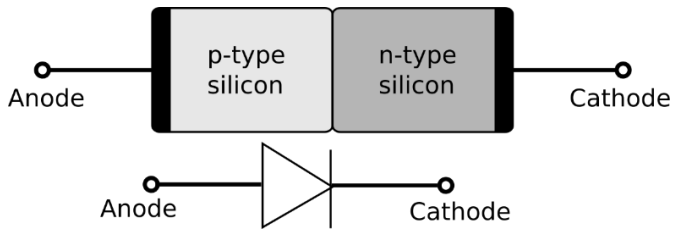
Pratiquement, le courant circule de l'anode (A) à la cathode (K) : dans le sens de la flèche du symbole.

2-Symbole :



3-Constitution :

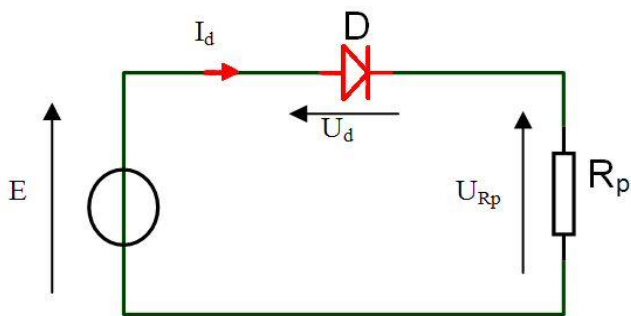
Une diode est un semi-conducteur formé par la juxtaposition de matériaux semi-conducteurs de types P et N



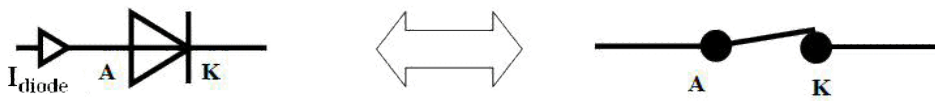
4-Polarisation d'une diode

4.1-Polarisation directe

La diode est conductrice, donc elle est passante, elle se comporte comme un interrupteur fermé



Le courant I_d est **dans le sens de la diode** ($V_{AK} > 0$).



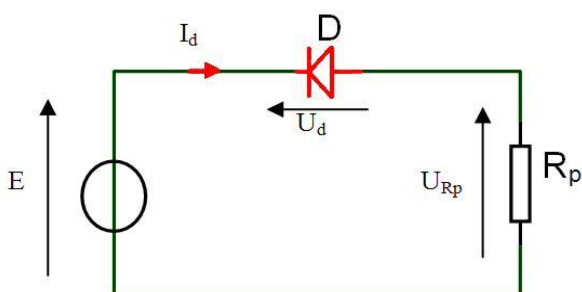
Il faudra qu'un seuil de **$U_d=0,6V$** aux bornes de la diode soit atteint pour que la diode soit **passante**. Alors, le courant traversera la diode de l'anode vers la cathode.

Si le seuil de $0,6V$ n'est pas atteint, la diode sera bloquée et le courant sera nul.

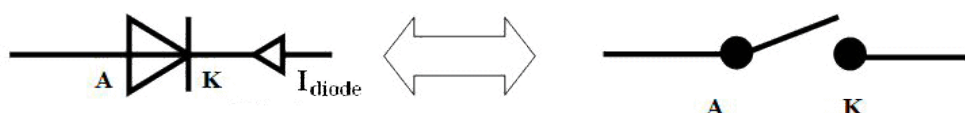
NB : Lorsque la diode est passante, la tension à ses bornes est égale à la tension de seuil.

4.2-Polarisation inverse

La diode n'est pas conductrice, donc elle est bloquée, elle se comporte comme un interrupteur ouvert.

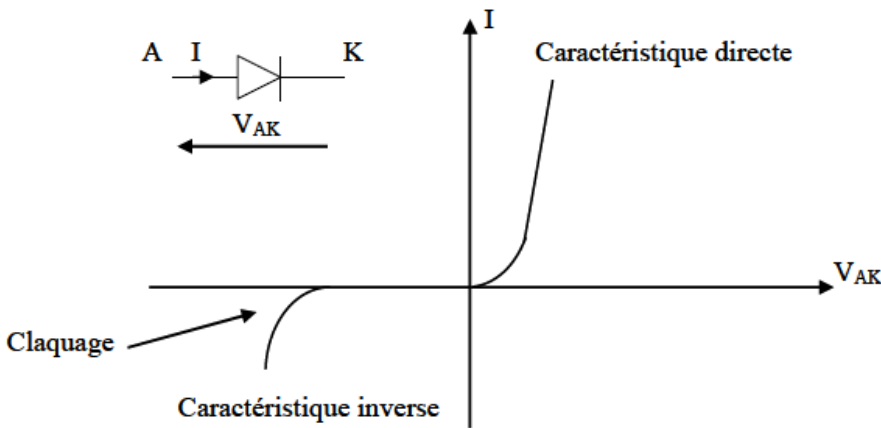
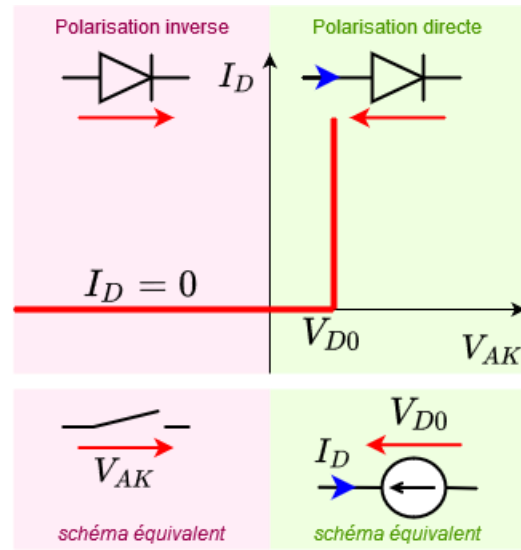
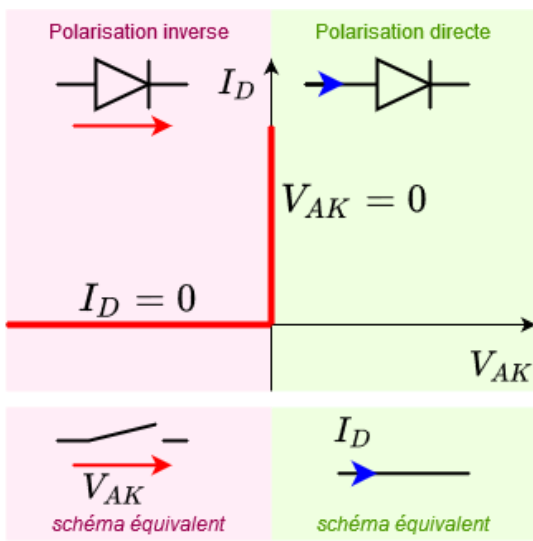


Le courant I_d est fléché dans le sens **inverse** de la diode ($V_{AK} < 0$).

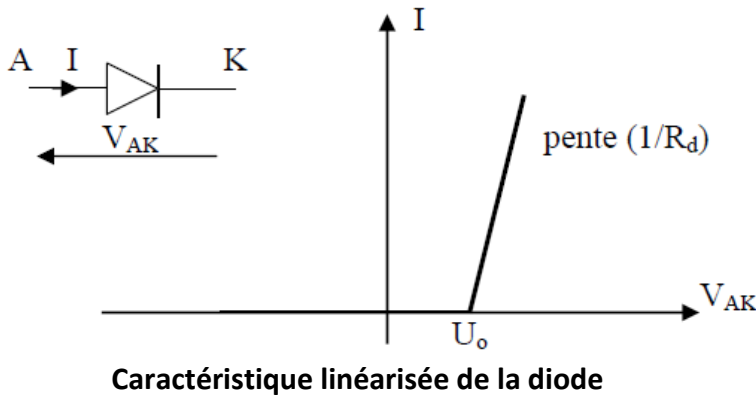


5- Caractéristique statique courant-tension de la diode

Cette caractéristique décrit l'évolution du courant traversant la diode en fonction de la tension à ses bornes en courant continu.



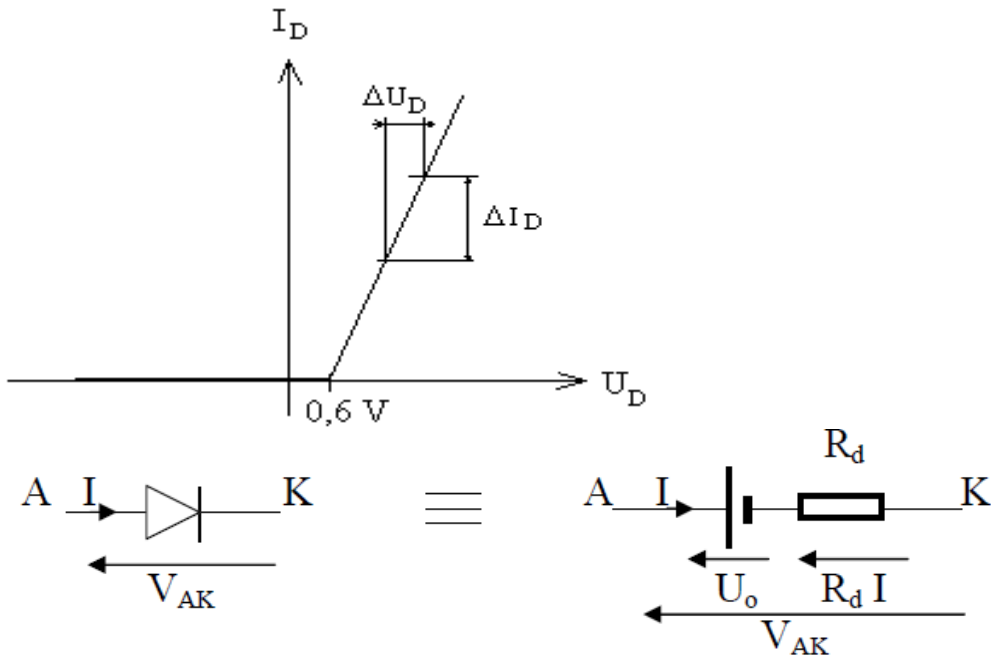
6- Schémas équivalents de la diode



La caractéristique de la diode peut se rapprocher par deux portions de droites :

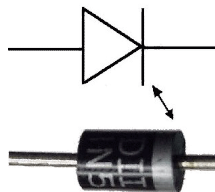
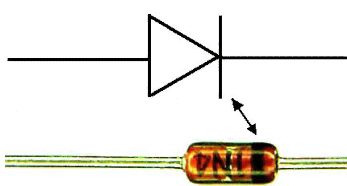
U_o et R_d : tension de seuil et résistance dynamique de la diode.

- **En polarisation directe** et pour $I > 0$, la diode est équivalente à un récepteur de f.c.é.m. U_o et de résistance interne ($R_d = \Delta V_{AK} / \Delta I$), avec $V_{AK} = U_D$ et $I = I_D$



$$V_{AK} = U_0 + (R_d \cdot I)$$

7-Aspect physique d'une diode



Diode électroluminescente

1- Définition :

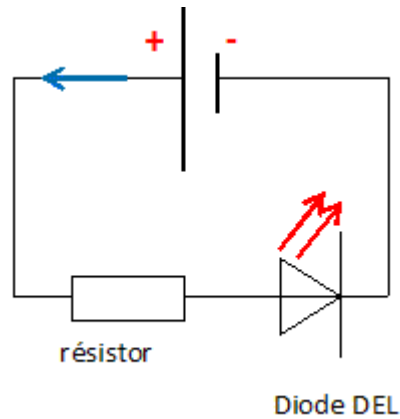
Une **diode électroluminescente**, appelée aussi **DEL** ou **LED** est une diode qui a la propriété d'émettre de la lumière lorsqu'elle est traversée par un courant ou autrement lorsque la tension à ses bornes atteint ou dépasse un certain seuil. La valeur de cette tension de seuil dépend de la couleur émise

2- Symbole :



3- calcul de la valeur de la résistance de protection

Couleurs	Tension de seuil ou Vf	If (mA)	Longueur d' onde
Rouge	1,6 V à 2 V	6à20	650 à 660 nm
Jaune	1,8 V à 2 V	6à20	565 à 570 nm
Vert	1,8 V à 2 V	6à20	585 à 590 nm
Bleu	2,7 V à 3,2 V	6à20	470 nm
blanc	3,5 v à 3,8 v	30	



Il faut donc ajouter une résistance en série pour utiliser un LED pour limiter le courant I_f .

Exemple de calcul de la résistance de limitation du courant pour une LED jaune.

$R = (V - V_f) / I_f$, On prend à partir du tableau pour une LED jaune : $V_f = 1,8 \text{ V}$, $I_f = 20 \text{ mA}$

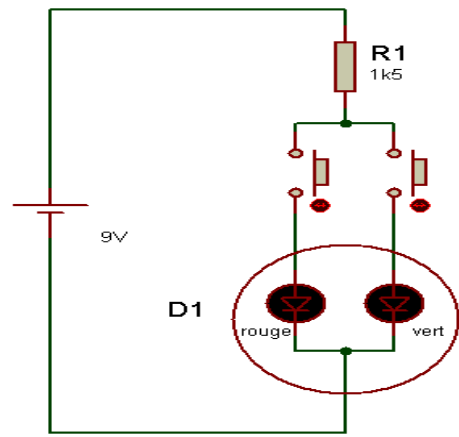
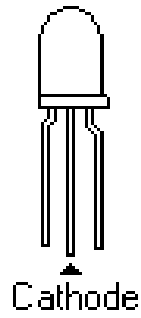
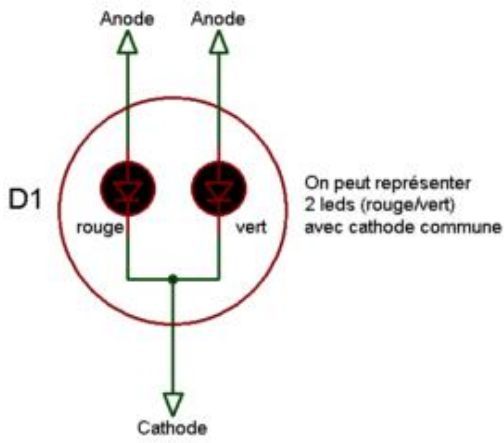
$$R = (12 - 1,8) / 0,02 = 510 \text{ ohms}$$

On va choisir une valeur de résistance normalisée égale ou supérieur à la valeur calculée.

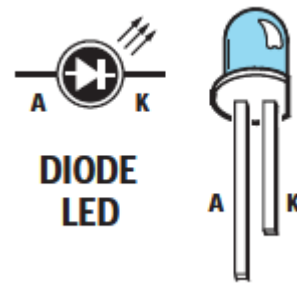
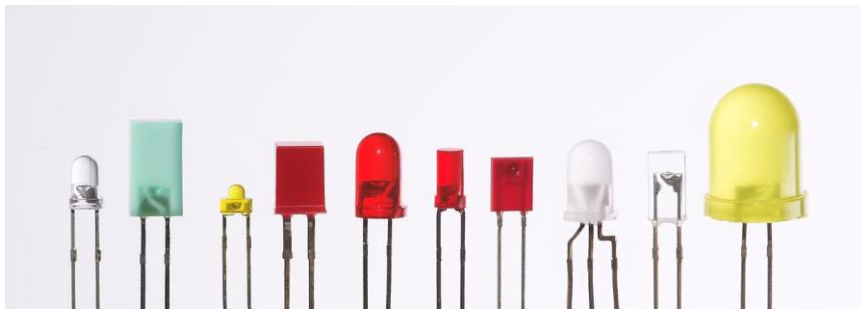
4- Leds bicolores :

Il existe des Leds bicolores à 2 ou 3 pattes, avec 2 pattes la couleur est différente suivant le sens du courant (rouge ou vert), et avec 3 pattes la cathode est la patte commune au centre ; la première patte est l'anode rouge et la 3ème l'anode verte ; si les deux anodes sont alimentées cela donne une troisième couleur orange.



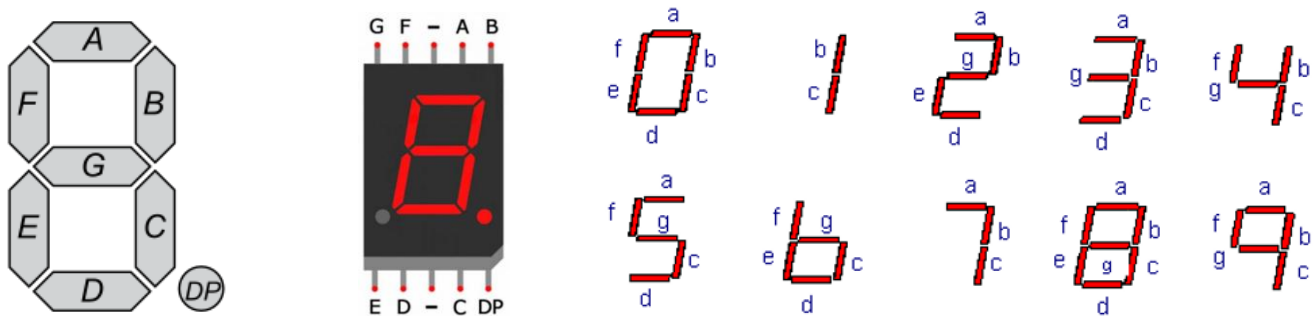


5- Aspect physique :

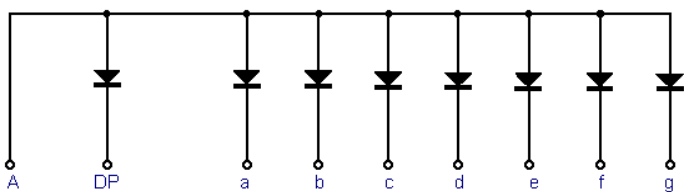


6- Afficheur à 7 segments :

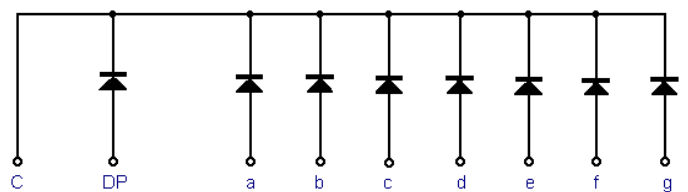
Un afficheur 7 segments permet l'affichage des nombres de 0 à 9 et les lettres de A à F, chaque segment est constitué d'une LED, on trouve les afficheurs à anodes communes ou à cathodes commune.



A B C D E F



Afficheur à Anode commune



Afficheur à Cathode commune

DIODE ZENER

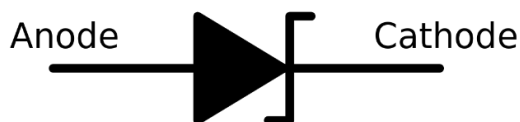
1- Définition :

La fonction principale d'une diode Zener est de maintenir une tension presque constante à ses bornes au-delà de certain seuil, Ce sont des diodes stabilisatrices de tension.

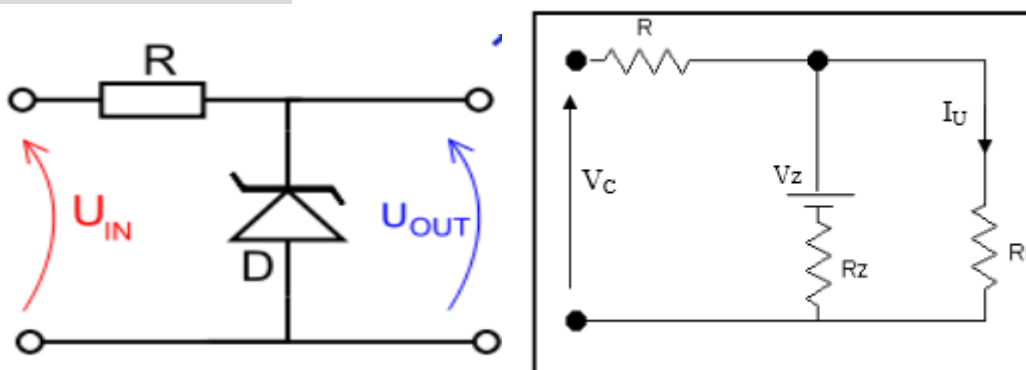
Dans le sens direct, son comportement est identique à une diode classique (tension de seuil de 0.6V environ)

Dans le sens inverse La diode Zener a la propriété de laisser passer le courant à partir d'une certaine tension inverse cette tension de seuil s'appelle la tension Zener

2- Symbole



3- Fonctionnement



$$\text{Si } U_{in} < V_z \text{ donc } U_{out} = U_{in} \quad I_z = 0A$$

$$\text{Si } U_{in} \geq V_z \text{ donc } U_{out} = V_z \quad I_z \geq 0A$$

4- Caractéristiques

Une diode Zener est caractérisé par :

- Sa Puissance nominale P_Z [W]
- Sa Tension Zener U_Z [V]
- Sa tolérance ± 5 ou 10%

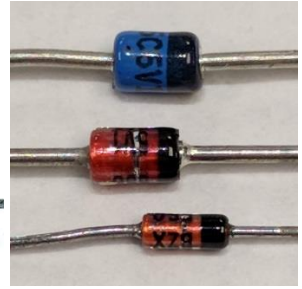
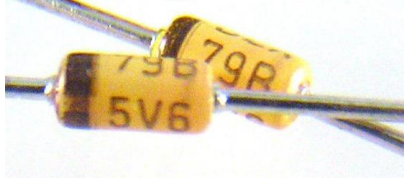
5- calcul de la valeur de R

$$R = (V_e - V_z) / I_z$$

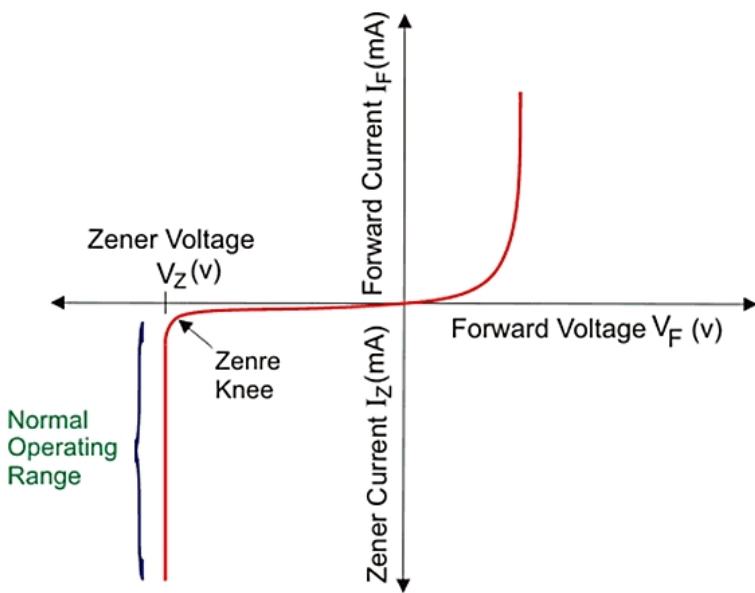
$$\text{avec } I_{z_{\max}} = P_z / V_z$$

$$\text{Avec } I_{z_{\min}} < I_z < I_{m_{\max}}$$

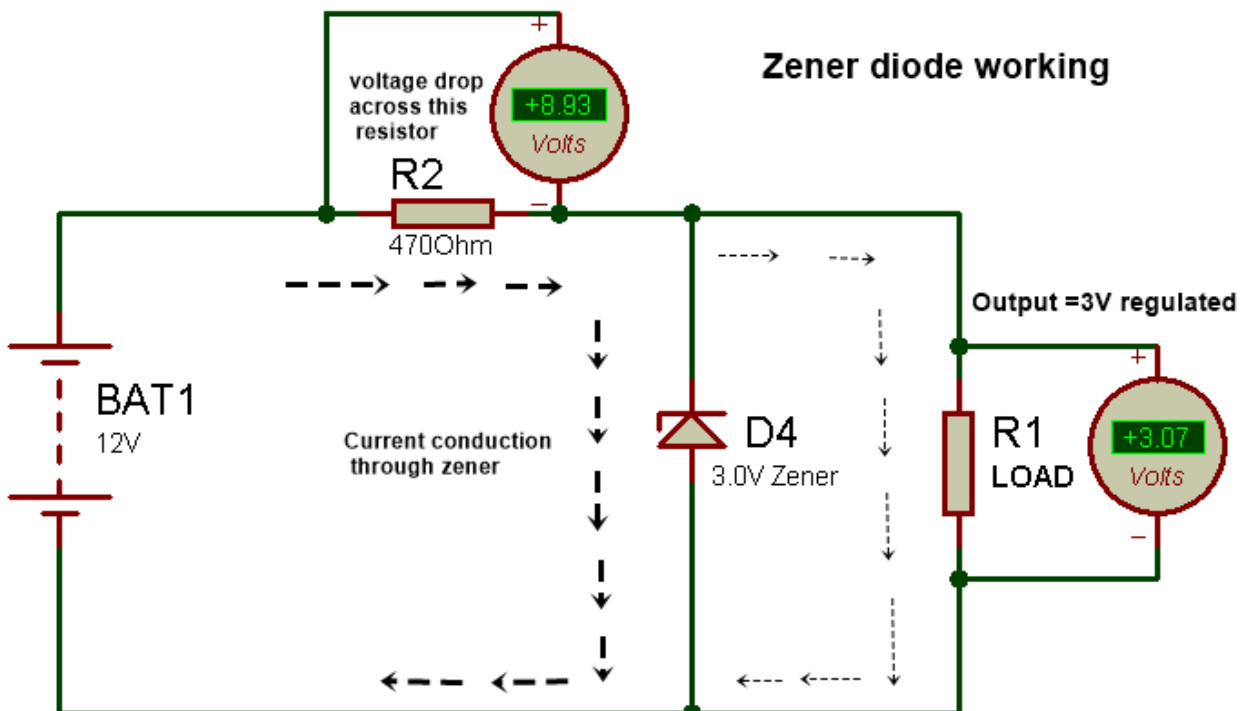
6- Aspect physique



7- Caractéristique d'une diode Zener



8- Exemple d'application :



Redressement

Définition :

Le redressement est une opération par laquelle on transforme une tension alternative qui fournit un courant bidirectionnel (2 sens) en une tension continue qui fournit un courant unidirectionnel (1 sens).

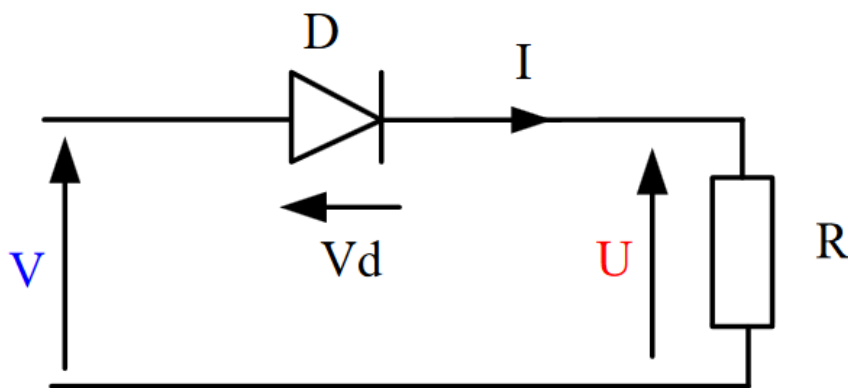
La charge elle peut être résistive, inductive ou capacitif ; elle est alimentée en courant continu à partir d'une source alternative.

Le redresseur est appelé aussi un convertisseur alternatif –continu



1- Redressement simple alternance ou mono alternance en monophasé

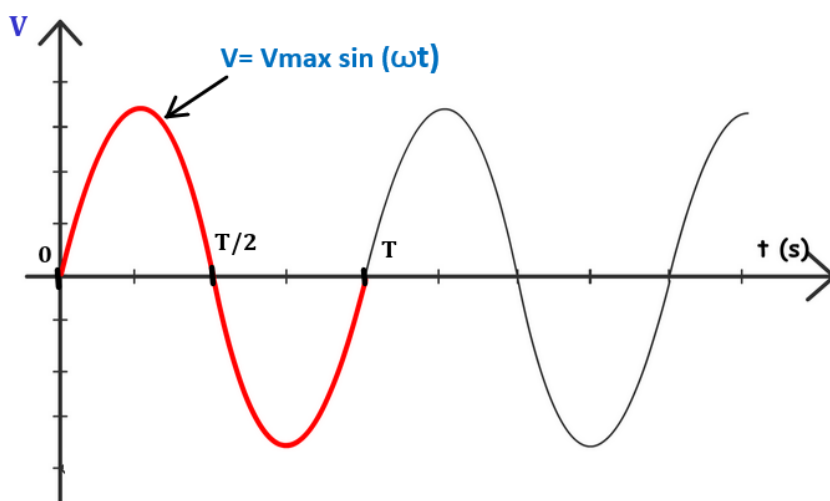
Schéma de montage :



$$V = V_{\max} \sin(\omega t)$$

Dans l'étude on suppose que la diode est parfaite ou idéale

$$V_d = 0 \text{ V (Diode réelle} = 0,6 \text{ V)}$$



Fonctionnement :

On étudie le comportement de la diode et le sens du courant dans les deux alternances pour le signal d'entrée V

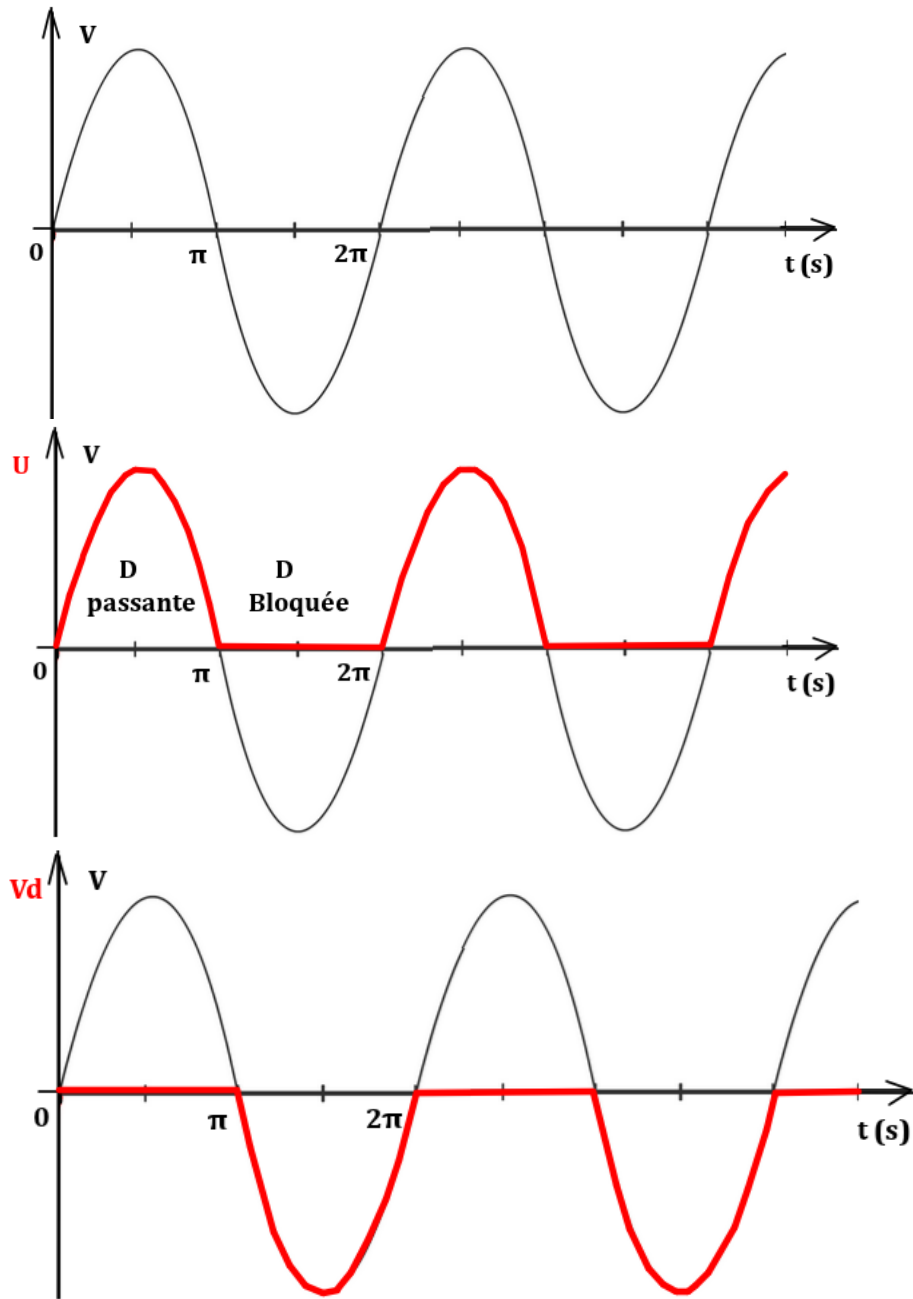
✚ Alternance positive ($0 < t < T/2$) ou ($0 < t < \pi$)

Pendant l'alternance positive de la tension V ($V > 0$), la diode D est polarisée en direct donc elle est passante ($V > 0$, $i > 0$ et $V_d = 0$) d'où $U = V - V_d = V$

✚ Alternance négative ($T/2 < t < T$) ou ($\pi < t < 2\pi$)

Pendant l'alternance négative de la tension V ($V < 0$), la diode D est polarisée en inverse donc elle est bloquée ($i = 0$ et $V_d < 0$) donc $U = R_i = 0$.

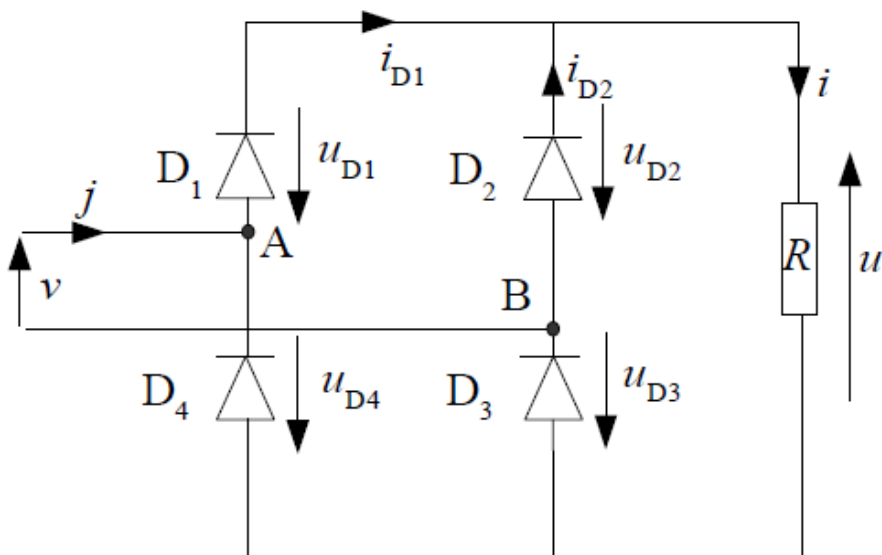
Oscillogramme :



2- Redressement double alternance ou Bi-Alternance en monophasé

2-1- Redressement double alternance à pont de Graëtz

Schéma de montage :



Fonctionnement :

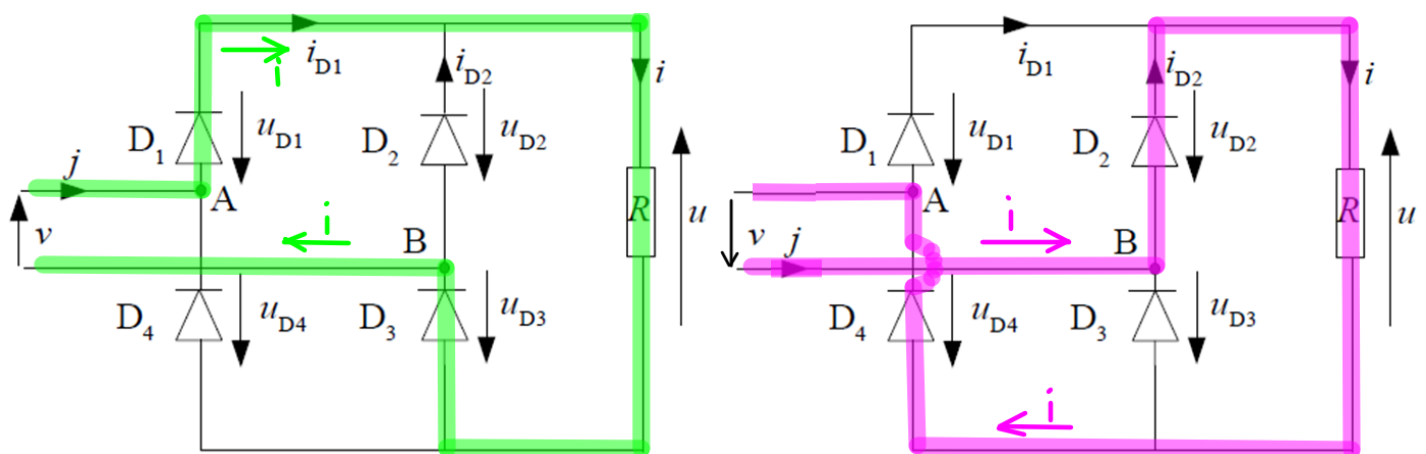
On étudie le comportement des diodes et le sens du courant dans les deux alternances pour le signal d'entrée V

⚡ Alternance positive ($0 < t < T/2$) ou ($0 < t < \pi$)

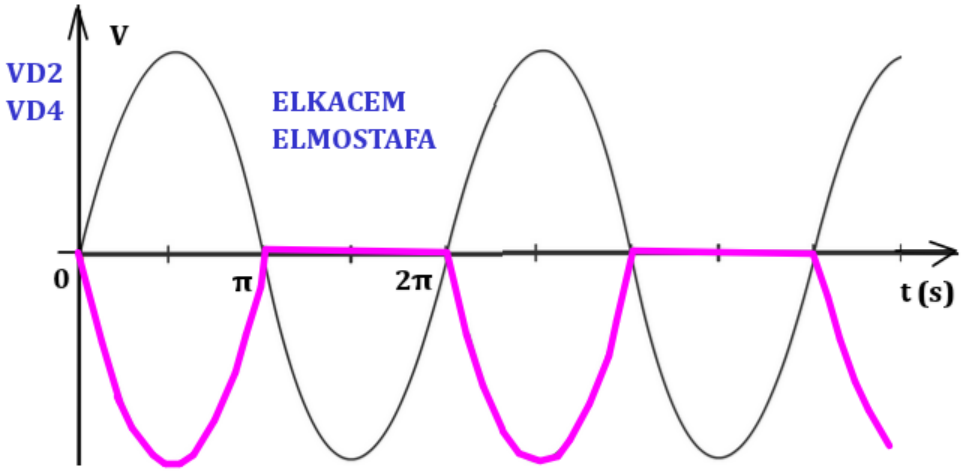
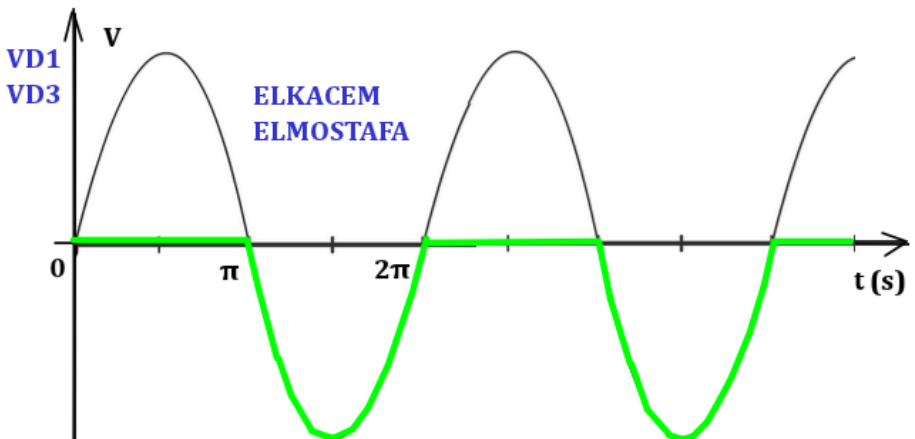
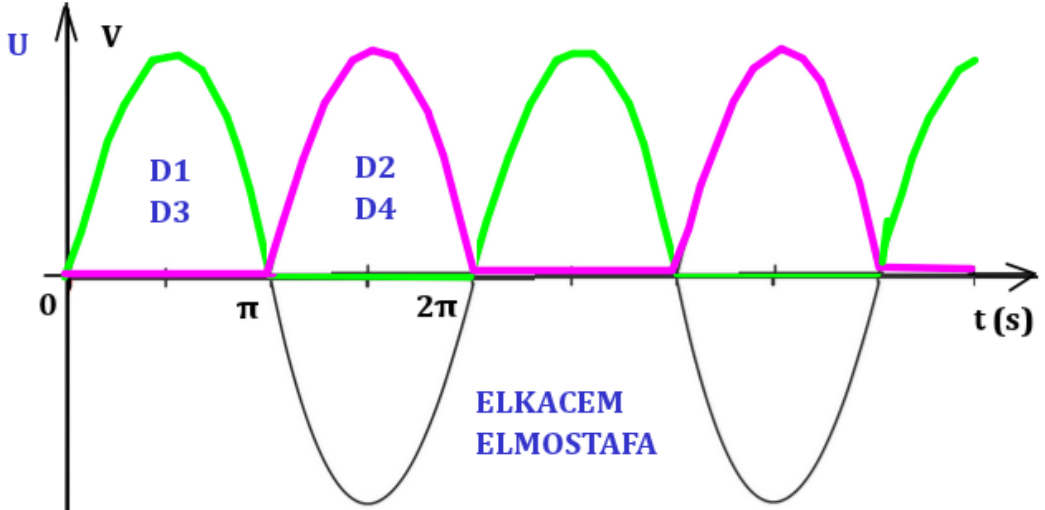
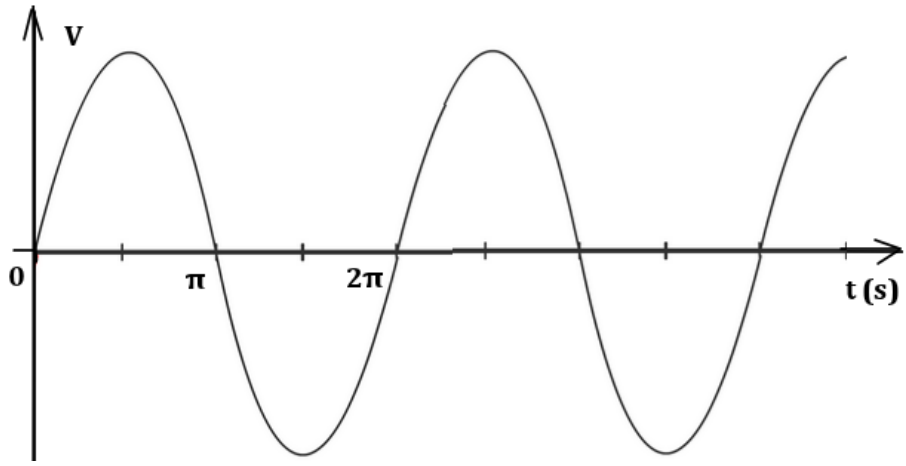
Pendant l'alternance positive de la tension V ($V > 0$), les diodes $D1$ et $D3$ sont polarisées en direct donc elles sont passantes ($V_{D1} = V_{D3} = 0$) d'où $U = V - V_{D1} - V_{D3} = V$; Pour les diodes $D2$ et $D4$ sont bloquées

⚡ Alternance négative ($T/2 < t < T$) ou ($\pi < t < 2\pi$)

Pendant l'alternance négative de la tension V ($V < 0$), les diodes $D2$ et $D4$ sont polarisées en direct donc elles sont passantes ($V_{D2} = V_{D4} = 0$) d'où $U = V - V_{D2} - V_{D4} = V$; Pour les diodes $D1$ et $D3$ sont bloquées

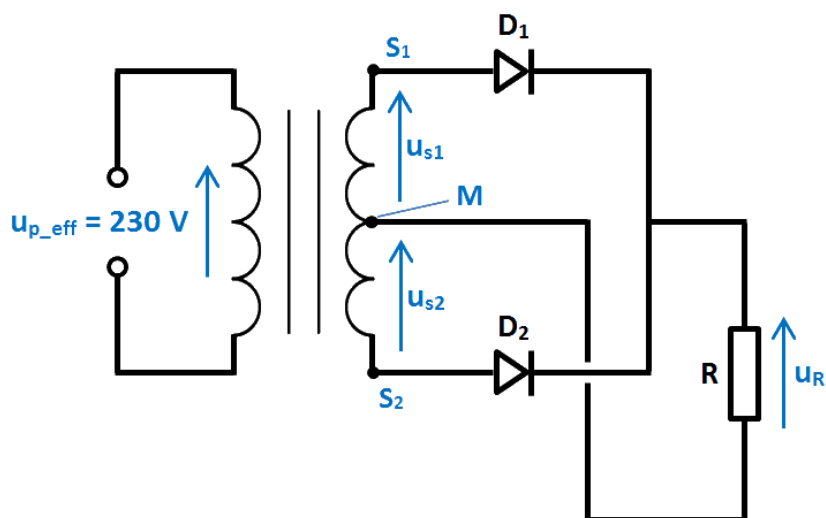


Oscillogramme :



2-2- Redressement double alternance à deux diodes et transformateur à point milieu

Schéma de montage :



Fonctionnement :

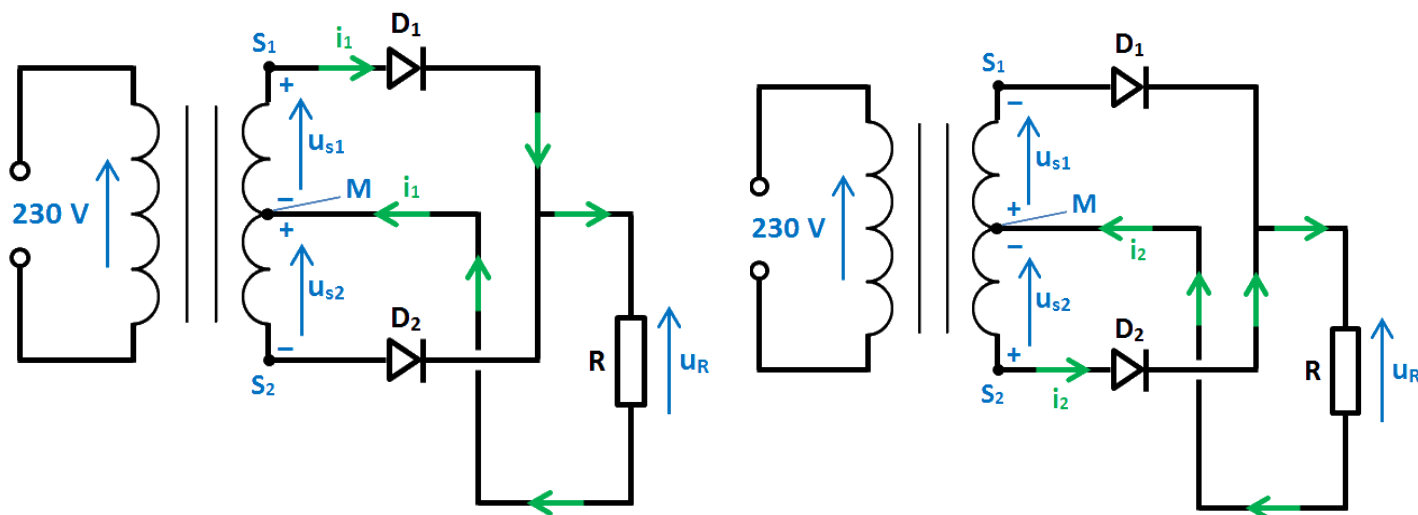
On étudie le comportement des diodes et le sens du courant dans les deux alternances pour le signal d'entrée $\mathbf{U}_{12} = \mathbf{U}_{S1} + \mathbf{U}_{S2}$ ($\mathbf{U}_{S1} = \mathbf{U}_{S2} = \frac{1}{2} \mathbf{U}_{12}$)

⚡ Alternance positive ($0 < t < T/2$) ou ($0 < t < \pi$)

Pendant l'alternance positive de la tension \mathbf{U}_{12} ($\mathbf{U}_{S1} > 0$), la diode D1 est polarisée en direct donc elle est passante ($V_{d1} = 0$) d'où $\mathbf{U}_R = \mathbf{U}_{S1} - V_{d1} = \mathbf{U}_{S1}$; Pour la diode D2 est bloquée

⚡ Alternance négative ($T/2 < t < T$) ou ($\pi < t < 2\pi$)

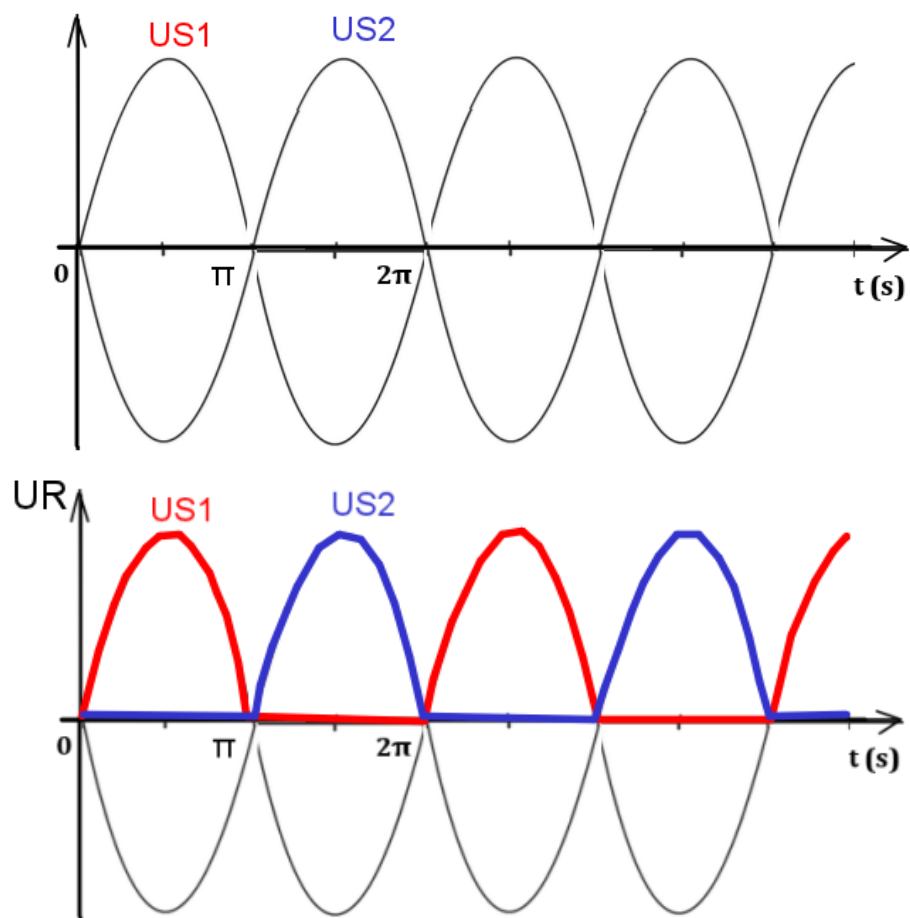
Pendant l'alternance négative de la tension \mathbf{U}_{12} ($\mathbf{U}_{S2} > 0$), la diode D2 est polarisée en direct donc elle est passante ($V_{d2} = 0$) d'où $\mathbf{U}_R = \mathbf{U}_{S2} - V_{d2} = \mathbf{U}_{S2}$; Pour la diode D1 est bloquée

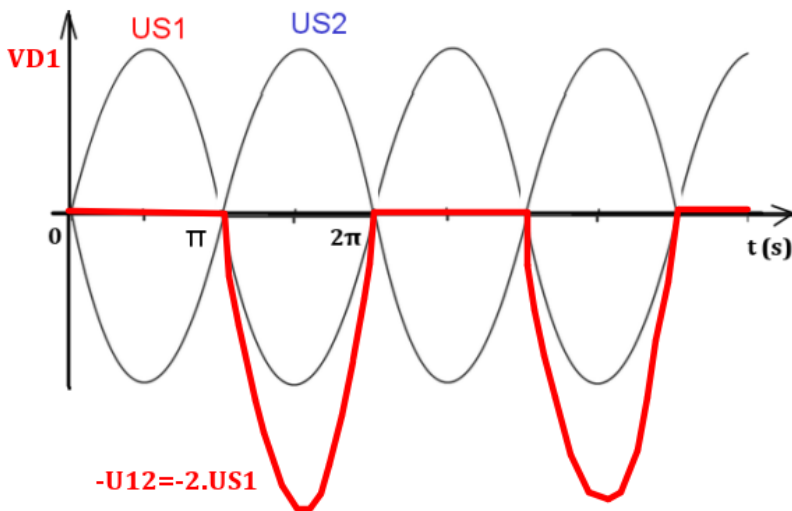
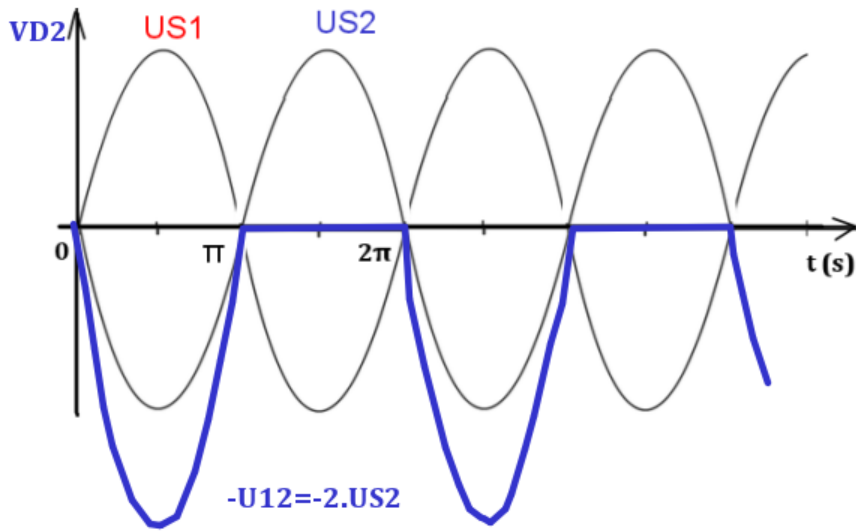


$$0 < t < \pi$$

$$\pi < t < 2\pi$$

Oscillogramme :

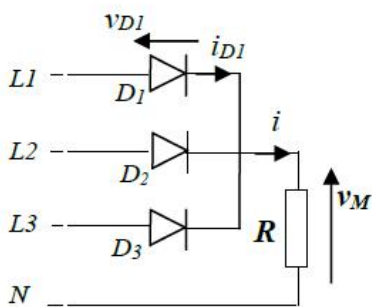




3- Redressement simple Alternance en triphasé

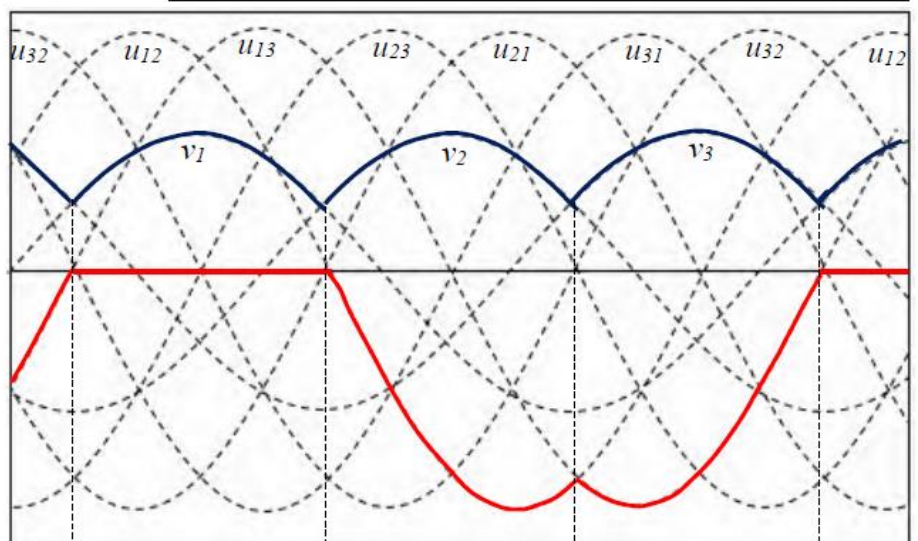
Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes

Dessiner les tensions $v_M(t)$ en bleu et $v_{D1}(t)$ en rouge



$v_M = v_1, v_2$ ou v_3 la plus positive à l'instant considéré :

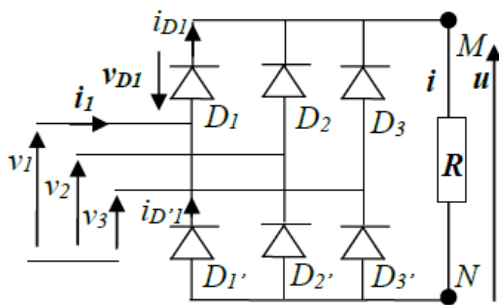
v_M est constituée donc par les «calottes supérieures» des sinusoïdes v_1, v_2, v_3 .



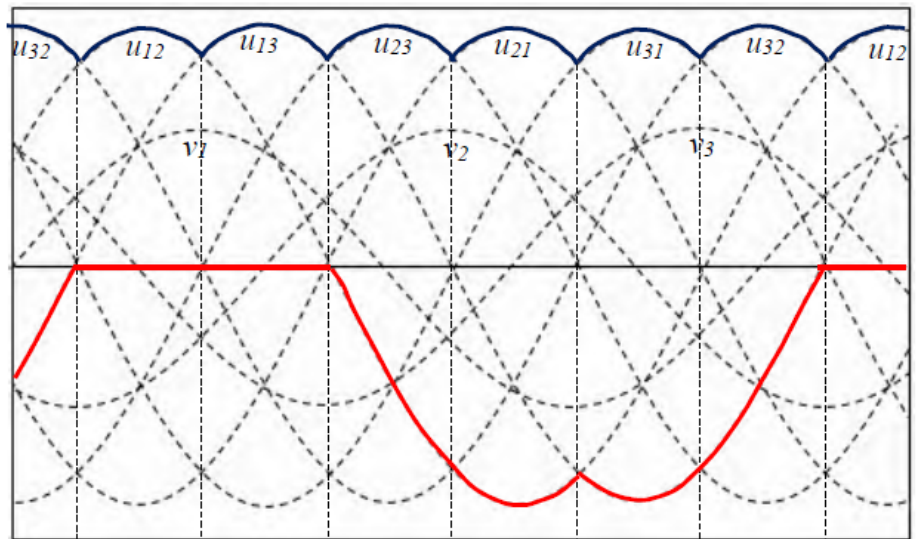
Tension v_M	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1
Diodes passant	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1
Tension v_{D1}	u_{13}	0	$v_1 - v_2 = u_{12}$	$v_1 - v_3 = u_{13}$	0

4- Redressement double Alternance en triphasé

Analyse du fonctionnement et les oscillogrammes



Dessiner les tensions $u(t)$ en bleu et $v_{D1}(t)$ en rouge



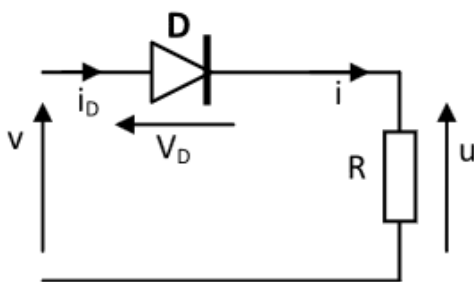
Le pont redresseur comporte:

- 3 diodes pour l'« aller »: D_1, D_2, D_3 ;
- 3 diodes pour le « retour »: D'_1, D'_2, D'_3 .

La tension $u = v_M - v_N$

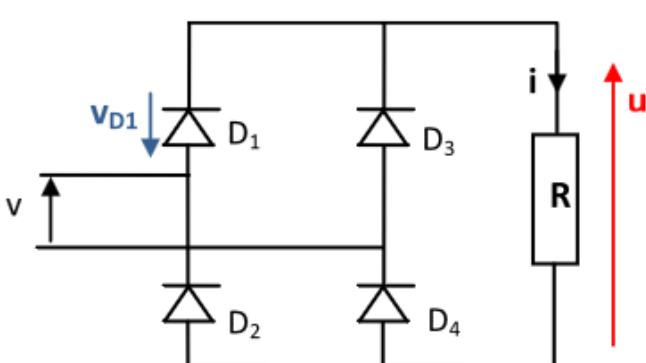
Tension v_M	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1			
Diodes « aller »	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1			
Tension v_N	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3			
Diodes « retour »	D'_2	D'_3	D'_1	D'_2	D'_3			
Tension u	u_{32}	u_{12}	u_{13}	u_{23}	u_{21}	u_{31}	u_{32}	u_{12}
Tension v_{D1}	u_{13}	0	$v_1 - v_2 = u_{12}$	$v_1 - v_3 = u_{13}$	0			

Schéma de montage

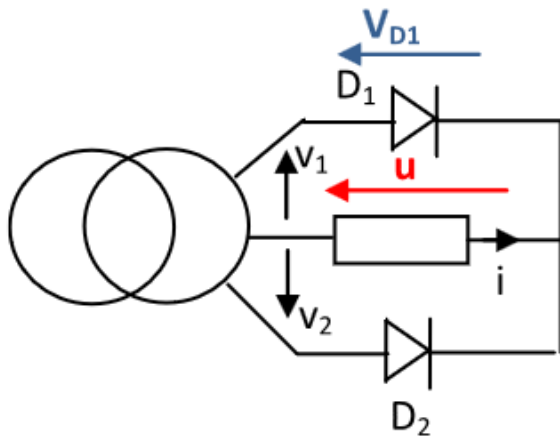


Grandeurs caractéristiques

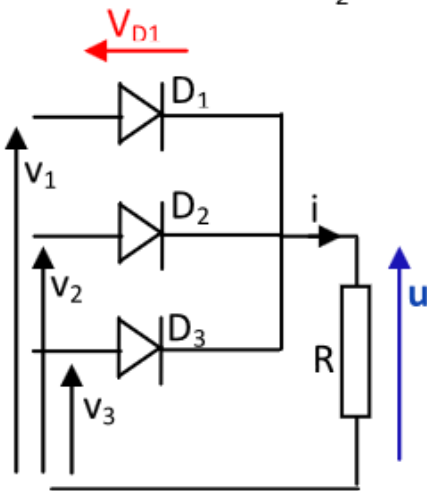
- Valeur moyenne de u $u_{\text{moy}} = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{\pi}$
- Valeur efficace de u : $U = \frac{V \cdot \sqrt{2}}{2}$
- Tension maximale supportée par la diode : $V_{D\text{max}} = V \cdot \sqrt{2}$



- Valeur moyenne de u : $u_{\text{moy}} = \frac{2 \cdot V \cdot \sqrt{2}}{\pi}$
- Valeur efficace de u : $U = V$
- Tension maximale supportée par la diode : $V_{D\text{max}} = V \cdot \sqrt{2}$

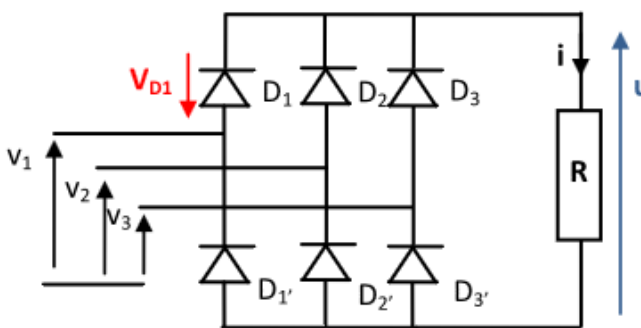


- Valeur moyenne de u : $u_{moy} = \frac{2.V.\sqrt{2}}{\pi}$
- Valeur efficace de u : $U = V$
- Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = 2.V.\sqrt{2}$



- Valeur moyenne de u :
- $$u_{moy} = \frac{3.\sqrt{3}.V.\sqrt{2}}{2.\pi}$$
- Tension maximale supportée par la diode :

$$V_{Dmax} = \sqrt{3}.V.\sqrt{2}$$



- Valeur moyenne de u :
- $$u_{moy} = \frac{3.\sqrt{3}.V.\sqrt{2}}{\pi}$$
- Tension maximale supportée par la diode :

$$v_{Dmax} = \sqrt{3}.V.\sqrt{2}$$

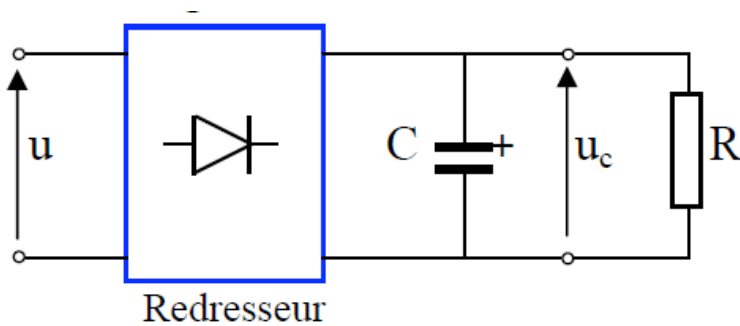
Filtrage d'une tension redressée

Définition :

Le filtrage transforme une tension redressée en une tension aussi constante que possible.

Le composant technique de filtrage le plus facile à mettre en œuvre est un condensateur branché aux bornes de la charge (en parallèle avec la charge), le condensateur est un réservoir à charges électriques. La caractéristique essentielle d'un condensateur (comme celle d'un réservoir) est sa capacité C .

Schéma du montage :



La charge du condensateur se fait à chaque fois que la tension pulsée devient supérieure à la tension aux bornes du condensateur. La constante de temps de charge dépend de la résistance directe de la diode ($T_c = R_D \cdot C$).

Allure de la tension filtrée

Le condensateur en se chargeant et en se déchargeant diminue l'ondulation du signal redressé.

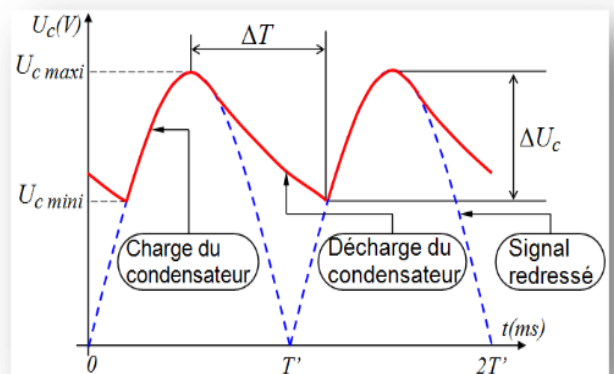
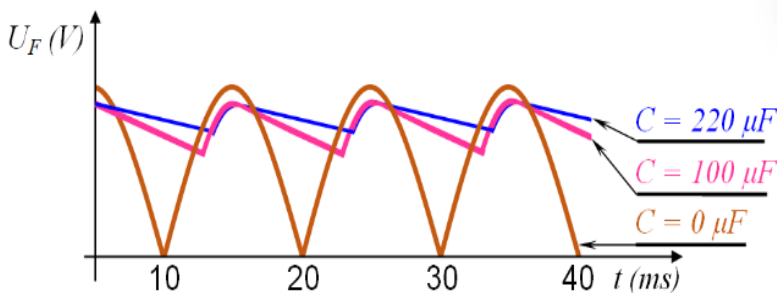
Capacité C pour un taux d'ondulation

La qualité du filtrage est définie par le taux d'ondulation $\Delta U_c / U_{cmax}$.

Le signal est meilleur si la valeur C est suffisamment grande.

$$C = \frac{I \cdot \Delta T}{\Delta U_c}$$

Influence de la capacité du condensateur



ΔU_c : Tension aux bornes du condensateur

ΔT : Temps de décharge (environ 8 ms)

I : Courant débité par le redresseur

C : Capacité du condensateur

$\Delta U_c / U_{cmax}$: Taux d'ondulation (en %)

$$C = I_{max} / f \cdot \Delta U_c \text{ avec } \Delta t = 1/f$$

Taux d'ondulation

$$\theta = \frac{\Delta U_c}{U_{c moy}}$$

avec

ΔU_c : ondulation de la tension filtrée u_c
 $2\Delta U_c = U_M - U_m$: ondulation crête à crête
 $U_{c moy}$: tension filtrée moyenne.

Pour les faibles ondulations

$$U_{c moy} \cong \frac{U_M + U_m}{2}$$

Stabilisation d'une tension

Malgré l'utilisation de la fonction filtrage, la tension obtenue n'est pas pratiquement continue.

En plus, elle varie en fonction de la charge. Pour éviter cela, on utilise une fonction régulation

(Par un régulateur) ou une fonction stabilisation (par une diode Zener).

Rôle :

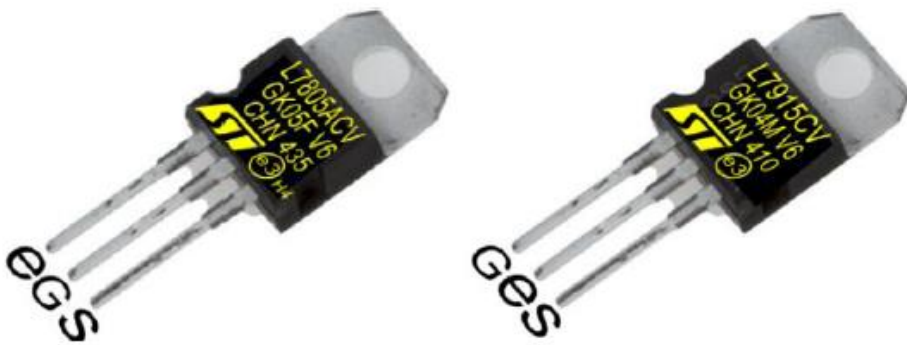
Les ondulations restantes après le filtrage produisent dans certains montages (exemple : poste radio) un ronflement ou un bruit de fond, parfois gênant.

Il faut éviter ces ondulations et assurer une tension parfaitement constante.

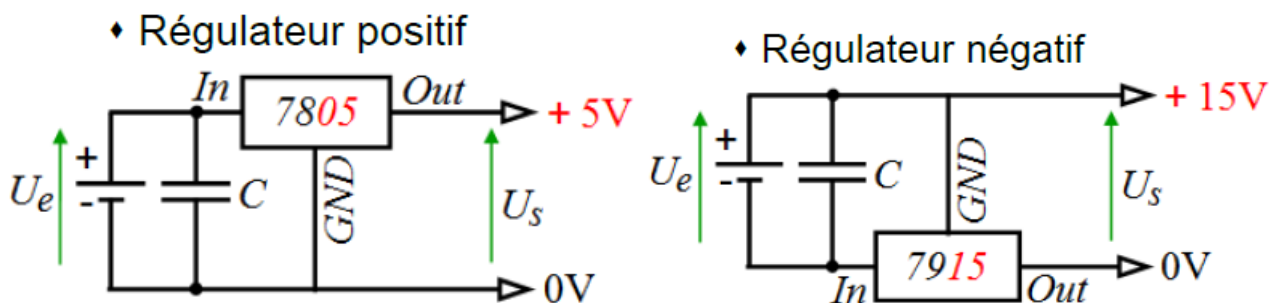
Cette opération s'appelle la stabilisation. Elle utilise : - Des régulateurs ou des diodes Zener

Régulation par régulateur :

Le régulateur est un circuit intégré de faible encombrement. Il nécessite dans certains cas, un radiateur pour le refroidissement appelé aussi un dissipateur de chaleur.



Symbole :



Utilisation :

Il permet d'obtenir une tension fixe (ou réglable) constante à partir d'une tension qui présente des fluctuations (variations ou changements).

Exemple de données de constructeur

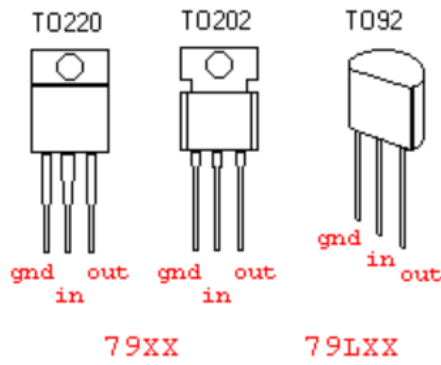
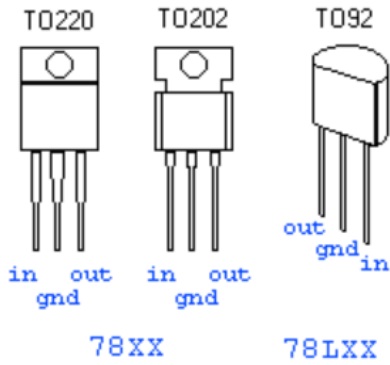
Il faudra simplement prévoir en entrée une tension U_e tel que :

$$U_e \geq U_{\text{régulateur}} + 2 \text{ à } 3V$$

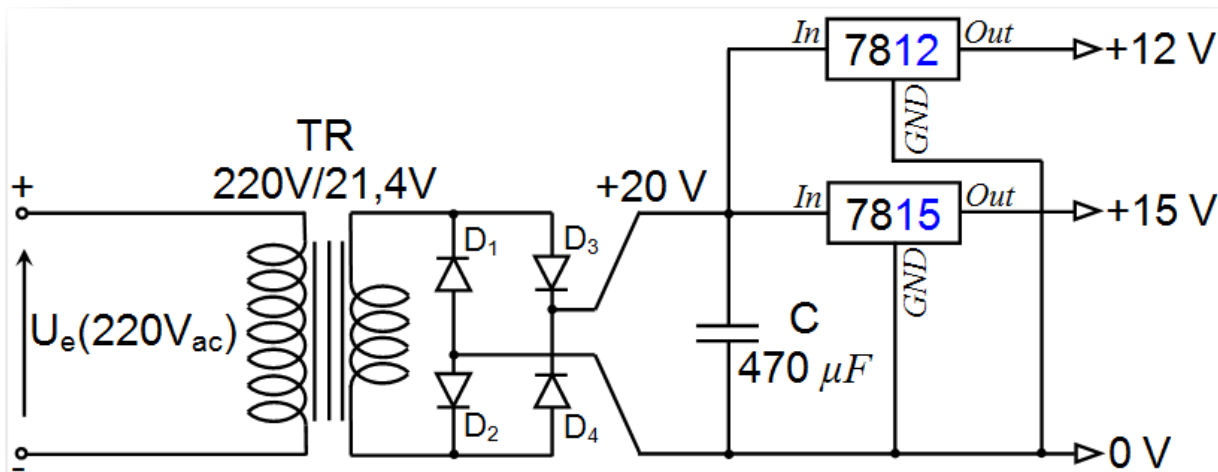
$V_{in\ max}$	30 V (40 V pour 7824)
V_{out}	XX = 05, 06, 08, 09, 10, 12, 15, 18, 24 V
$I_{out\ max}$	1 A (2 A en pointe); 100 mA pour 78LXX

REGULATEURS FIXES POSITIFS

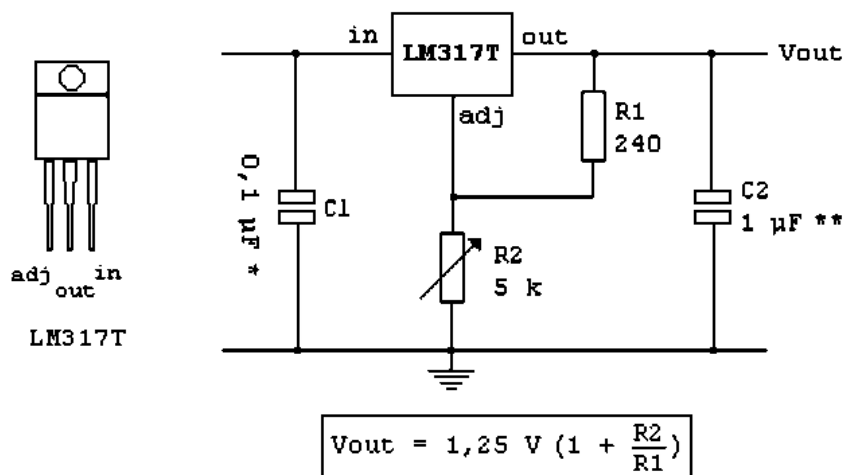
REGULATEURS FIXES NEGATIFS



Montage avec régulateur fixe



Montage avec régulateur variable :

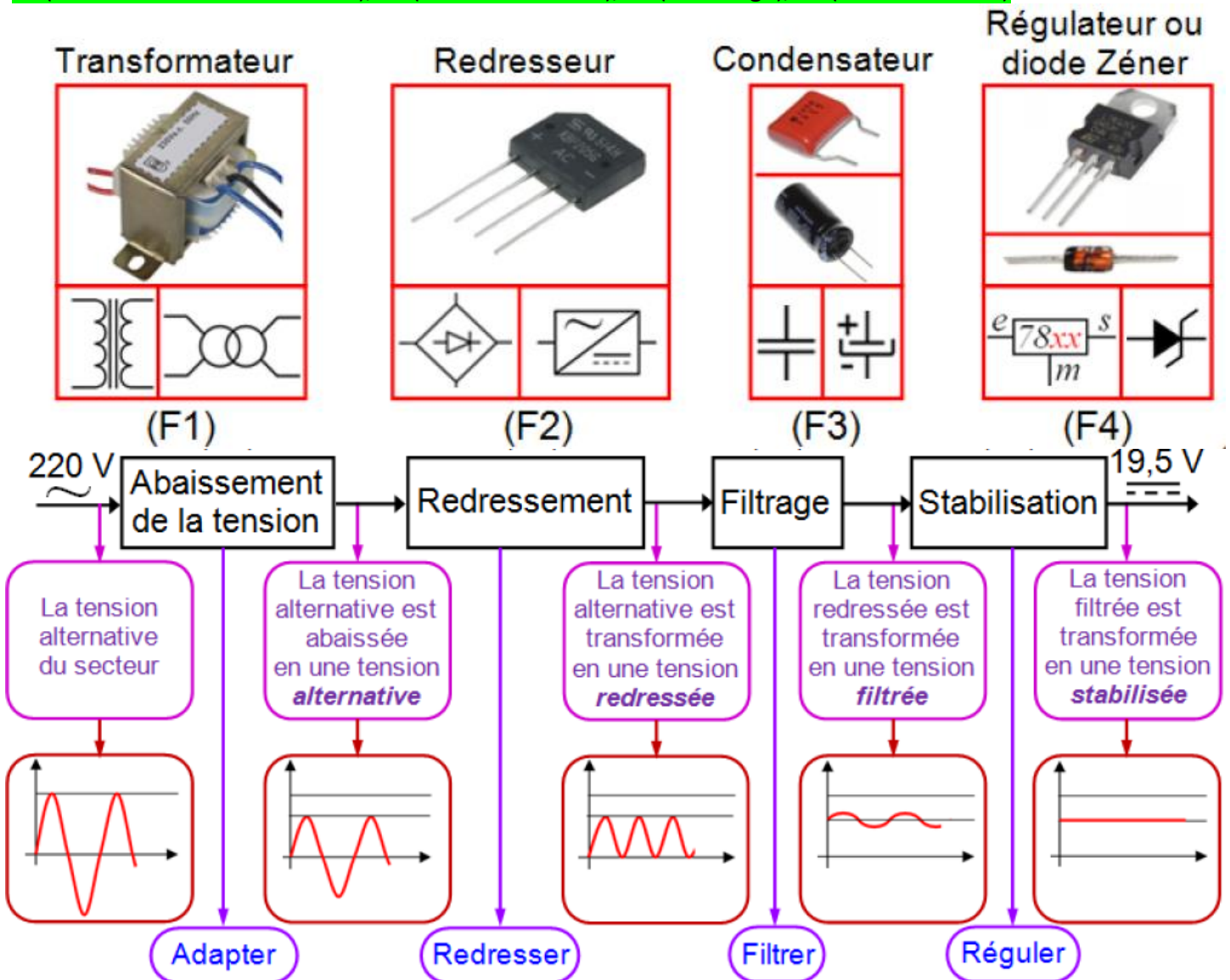


Alimentation stabilisée :

On désire obtenir une tension continue de +19,5 V à partir de la tension alternative du secteur 220V en vue d'alimenter un PC portable.

L'alimentation est réalisée par la succession des fonctions suivantes :

F1 (L'abaissement de la tension), F2 (Le redressement), F3 (Le filtrage), F4 (La stabilisation)



La transformation d'une tension *alternative* en une tension *continue* est assurée par :

- L'**adaptation** de la tension d'entrée à celle du récepteur ; utilisation du transformateur.
- Le **redressement** de cette tension ; utilisation du pont de diodes.
- Le **filtrage** de cette tension redressée pour en réduire les variations et obtenir une tension aussi constante que possible, se rapprochant ainsi d'une tension continue ; utilisation du condensateur.
- La **stabilité** de la tension filtrée par un régulateur ou diode Zener.

Le transistor

Transistor bipolaire

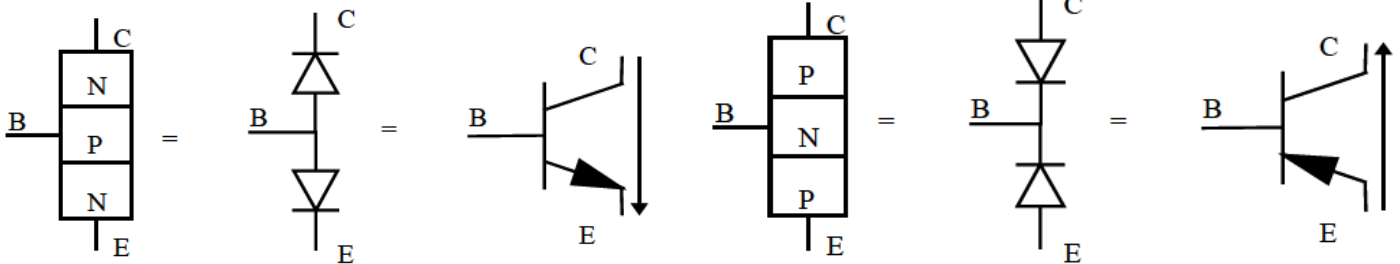
Le transistor est un composant semi-conducteur qui comporte trois électrodes :

La base (**B**), le collecteur (**C**) et l'émetteur (**E**).

Le collecteur et l'émetteur constituent le circuit principal, la base et l'émetteur constituent le circuit de commande.

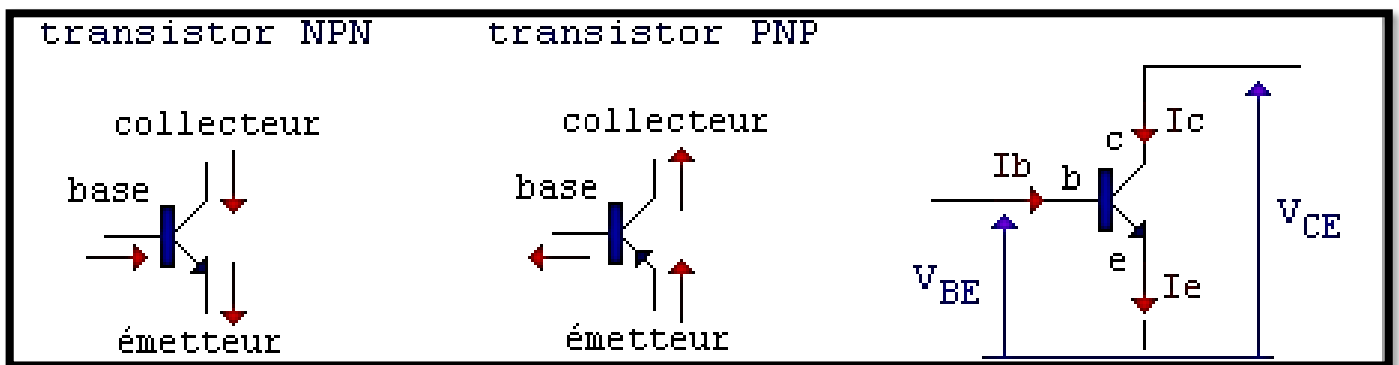
Il existe deux sortes de transistors : le transistor PNP et le transistor NPN

Constitution et symbole

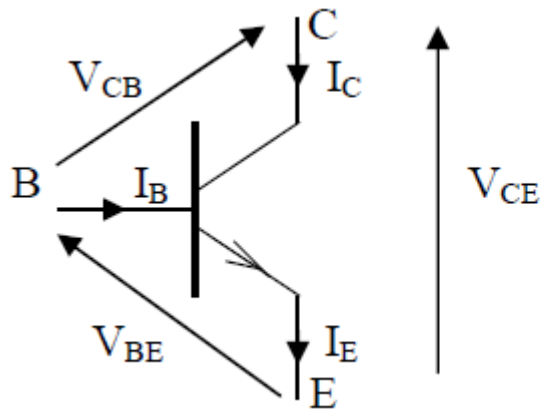


Transistor bipolaire NPN

Transistor bipolaire PNP



Grandeurs électriques d'un transistor bipolaire



I_C : courant Collecteur,
 I_B : courant de Base,
 I_E : courant Emetteur.

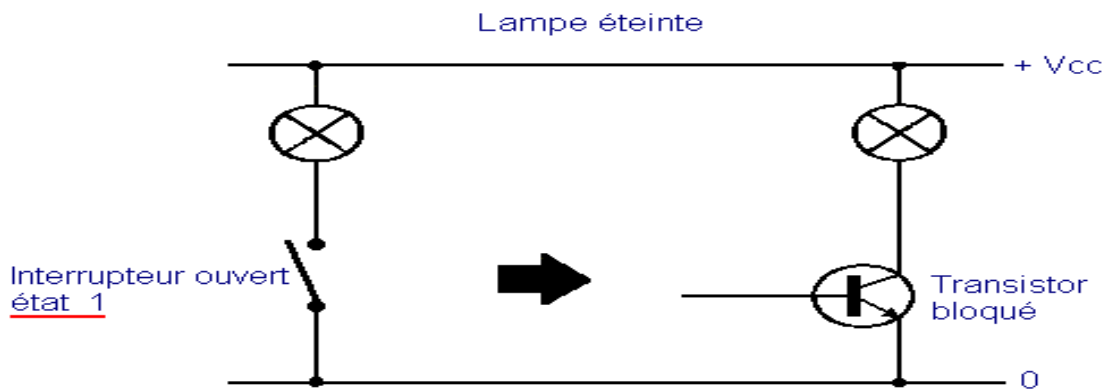
$$I_E = I_C + I_B$$

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

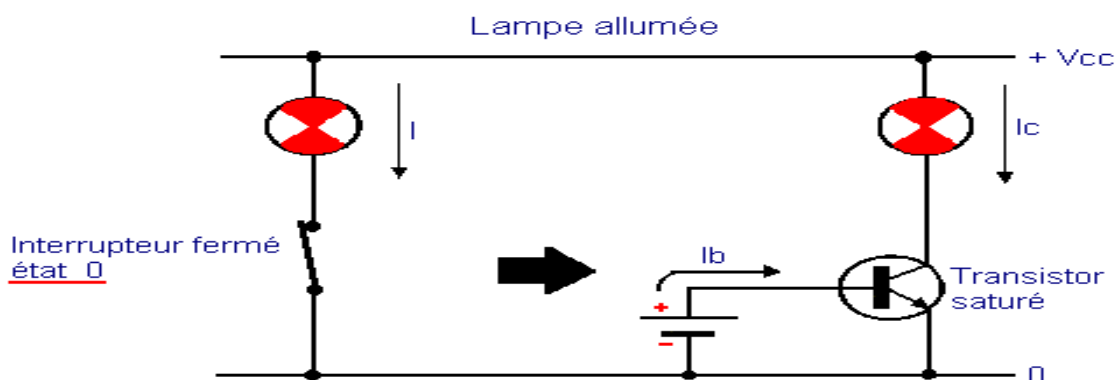
Modes de Fonctionnements d'un transistor

Mode commutation

Le transistor bloqué est comparable à un interrupteur ouvert ($I_B = 0$).

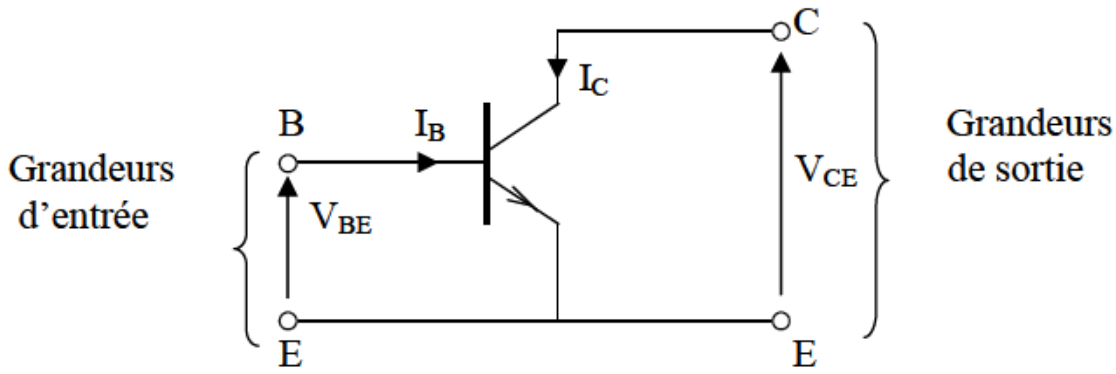


Le transistor saturé est comparable à un interrupteur fermé ($I_B = I_{Bsat}$).



Donc le transistor en mode commutation peut être comparé comme un commutateur commandé par le courant de base.

Mode amplification régime statique en CC

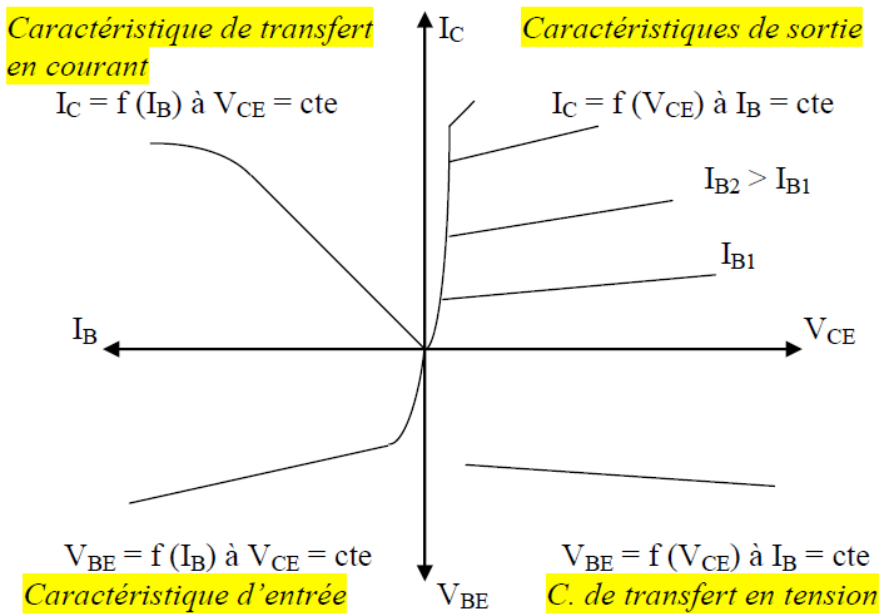


Le courant de collecteur I_C est proportionnel au courant de base I_B .

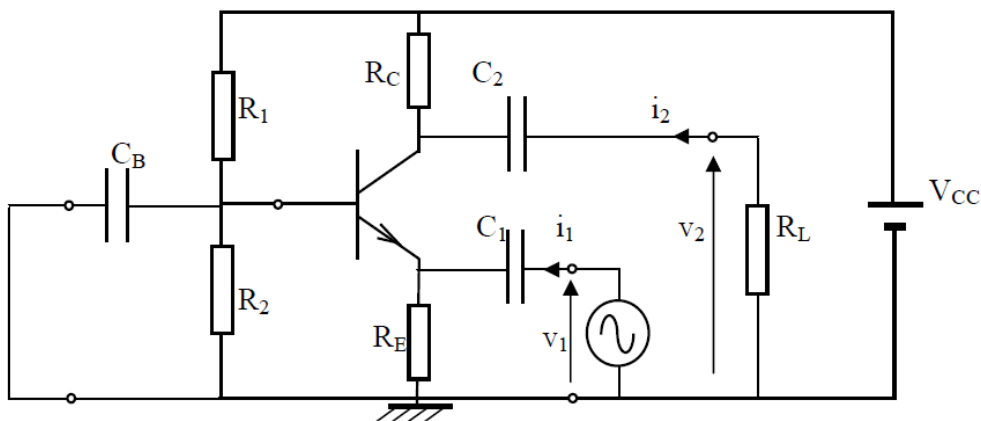
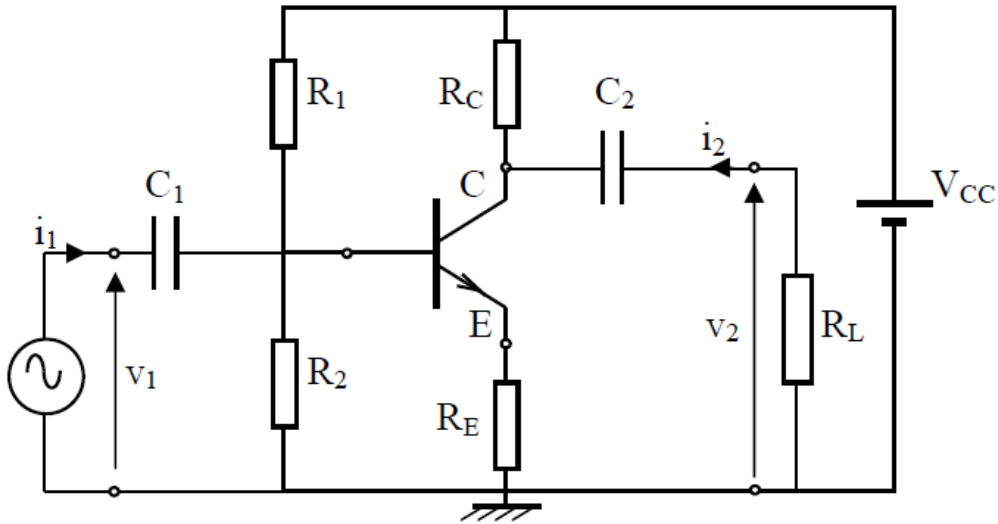
Le facteur β (béta) étant le gain en courant.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad I_C = \beta \cdot I_B \quad I_E = I_B + I_C \quad I_E = I_B + \beta \cdot I_B = I_B(1 + \beta)$$

En fonction des grandeurs électriques principales du transistor, on peut établir les caractéristiques statiques suivantes :



Le transistor bipolaire en régime dynamique



Puissance dissipé par le transistor :

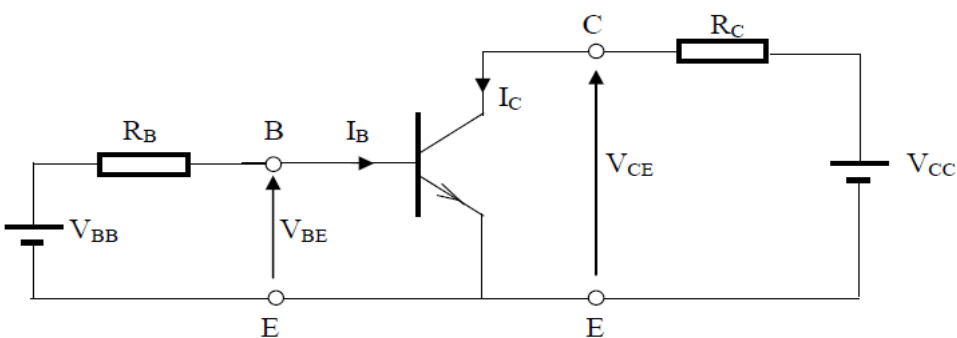
$$P \text{ dissipée} = (V_{CE} \cdot I_C) + (V_{BE} \cdot I_B)$$

Polarisation du transistor

La polarisation consiste à définir le point de fonctionnement statique (point de repos) du transistor caractérisé par les valeurs V_{BEo} , I_{Bo} , I_{Co} et V_{CEo} .

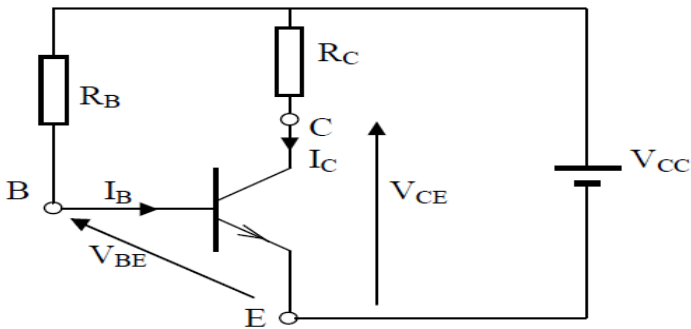
Il existe différents procédés de polarisation

Polarisation par deux sources de tension



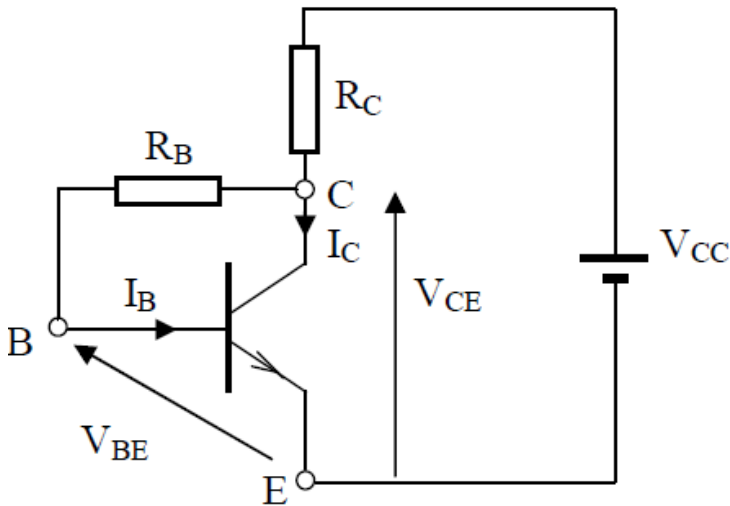
$$V_{BE} = V_{BB} - R_B I_B \quad I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

Polarisation directe par résistance de base



$$V_{BE} = V_{CC} - R_B I_B \quad I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

Polarisation par résistance entre base et collecteur



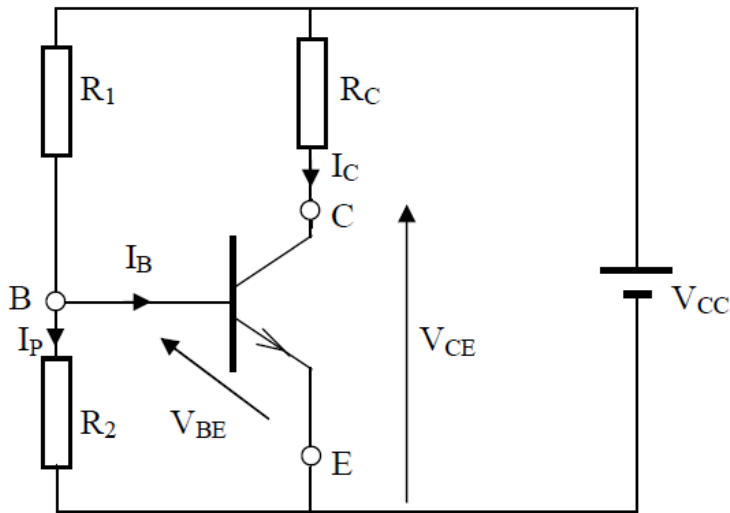
Droite d'attaque statique

Dans ce cas de polarisation, $V_{BE} = V_{CE} - R_B I_B$ et $V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$
avec $I_C = \beta I_B$, il vient : $V_{BE} = V_{CC} - (R_B + \beta R_C) I_B$: c'est l'équation de la droite d'attaque statique.

Droite de charge statique

C'est l'équation définie par: $I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$ si on néglige I_B devant I_C .

Polarisation par pont de résistances de base



Droite d'attaque statique

Dans ce cas de polarisation, on peut écrire:

$$I_P + I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_1} \text{ avec } I_P = \frac{V_{BE}}{R_2}$$

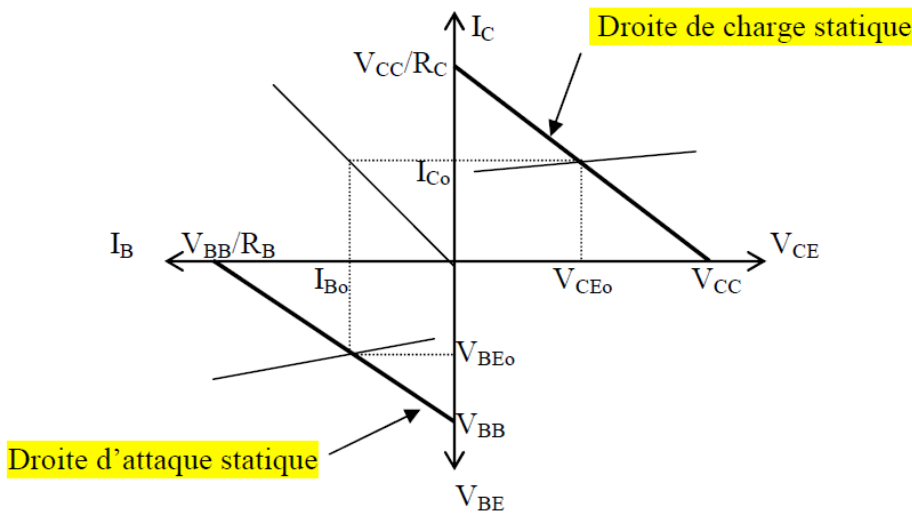
D'où l'équation de la droite d'attaque statique :

$$V_{BE} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} - \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_B$$

Générateur de Thévenin entre B et E

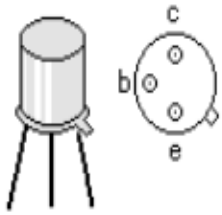
Droite de charge statique

C'est l'équation définie par: $I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$.



Aspect physique

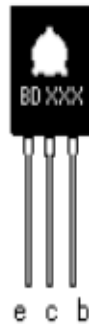
Boîtiers T05, T018, T039



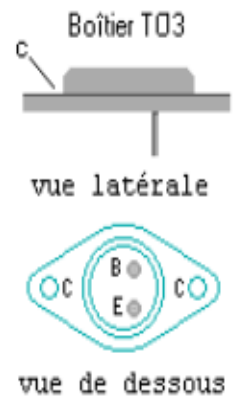
Boîtier T092



Boîtier T0126

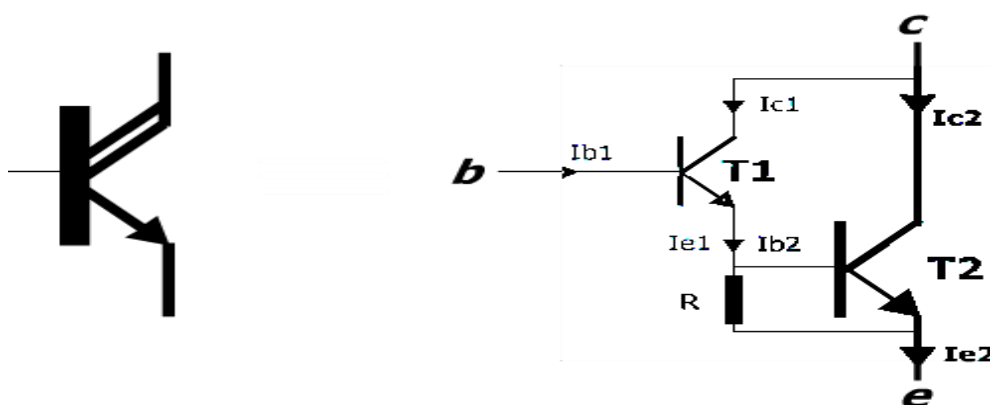
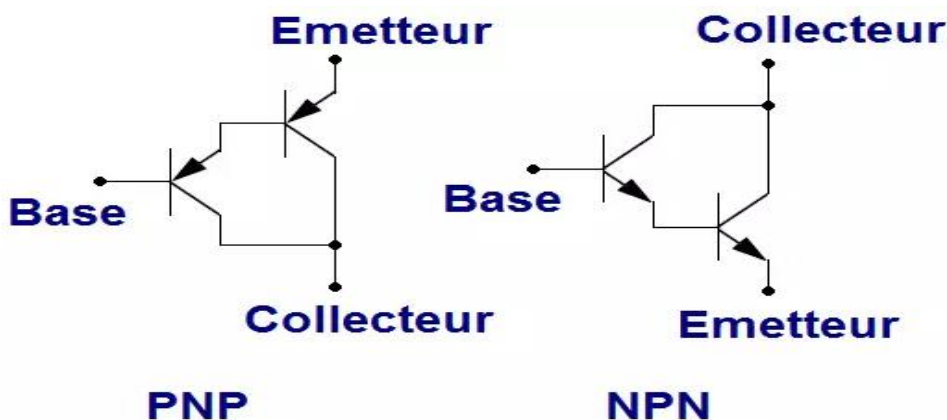


Boîtier T0202-T0220



Montage transistor Darlington

Le transistor Darlington contient deux transistors pour obtenir un plus grand gain en courant (au lieu de $30 < \beta < 300$). Pour réaliser un transistor à très grand gain On peut mettre 2 transistors NPN ou 2 transistors PNP l'un à la suite de l'autre. Voici le schéma du transistor Darlington, en version NPN et PNP.



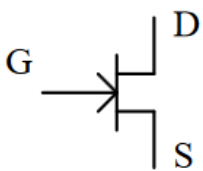
$$\beta = \frac{I_{C2}}{I_{B1}} = \frac{\beta_2 I_{B2}}{I_{B1}} = \frac{\beta_2 I_{E1}}{I_{B1}} = \frac{\beta_2 \beta_1 I_{B1}}{I_{B1}} = \beta_1 \beta_2$$

Les gains en courant vont de 1000 à 10000 environ. Il suffit de 1 mA pour piloter un courant jusqu'à 10 A !

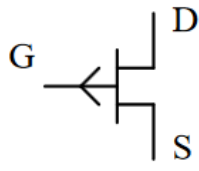
Transistors à Effet de Champ - T.E.C. ou F.E.T. :

Le transistor à effet de champ (TEC en Français) ou Field Effect Transistor (FET en Anglais) est comme le transistor bipolaire sauf que celui-ci comporte trois électrodes de noms différents : **la grille (G) ou Porte, le drain (D), la source (S)**, et Contrairement au transistor bipolaire qui est commandé par le courant de Base, le TEC est commandé par une tension, d'où son nom de Transistor à Effet de Champ

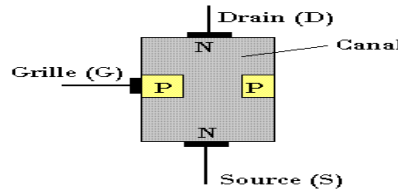
Constitution et symbole :



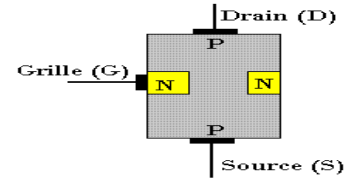
TEC canal N



TEC canal P



constitution



Il en existe 2 sortes (comme pour le transistor bipolaire) :

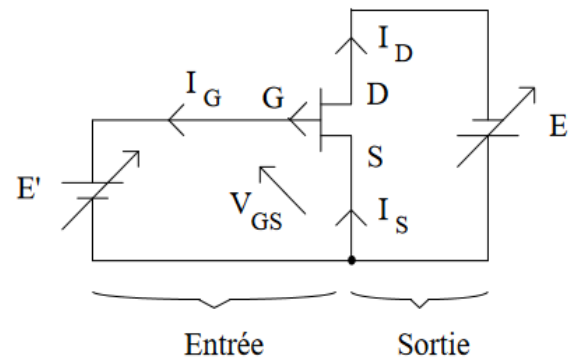
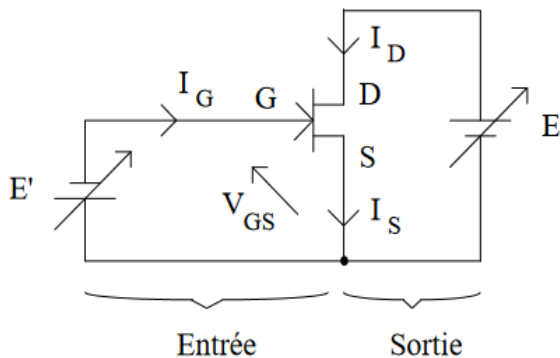
TEC à canal N comme un Transistor bipolaire NPN

TEC à canal P comme un Transistor bipolaire PNP

Où la grille **G** comme la base **B**, le drain **D** comme le collecteur **C**, et la source **S** comme l'émetteur **E**

Fonctionnement :

Interrupteur	JFET Canal N	JFET Canal P
Ouvert	<p>Conditions : $-V_{GS} > V_P$ (avec $V_{GS} < 0$) $-V_{DS} > 0$</p>	<p>Conditions : $-V_{GS} > V_P$ (avec $V_{GS} > 0$) $-V_{DS} < 0$</p>
Fermé	<p>Conditions : $-V_{GS} = 0V$ $-V_{DS} > 0$</p>	<p>Conditions : $-V_{GS} = 0V$ $-V_{DS} < 0$</p>



Le gain du TEC est : $S = I_D / V_{GS}$ C'est en fait une transconductance (car homogène à l'inverse d'une résistance).

NB : Autres types de TEC on trouve le MOSFET et JFET.

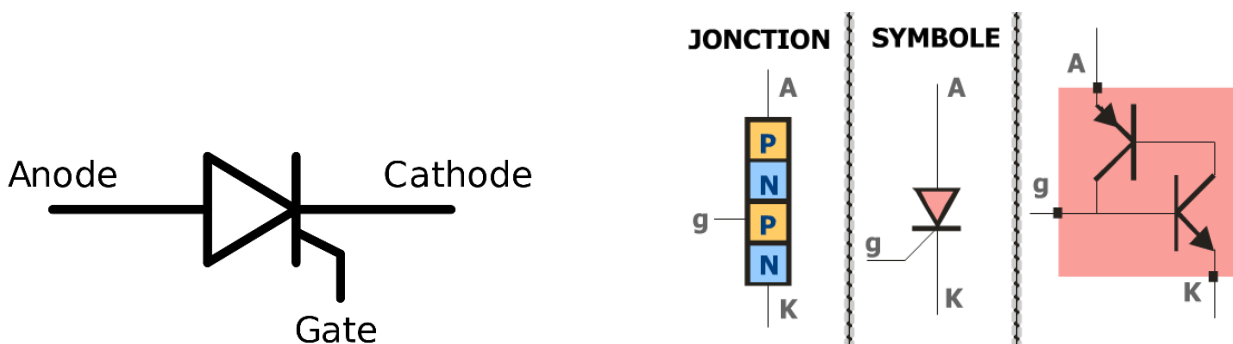
THYRISTOR

Définition

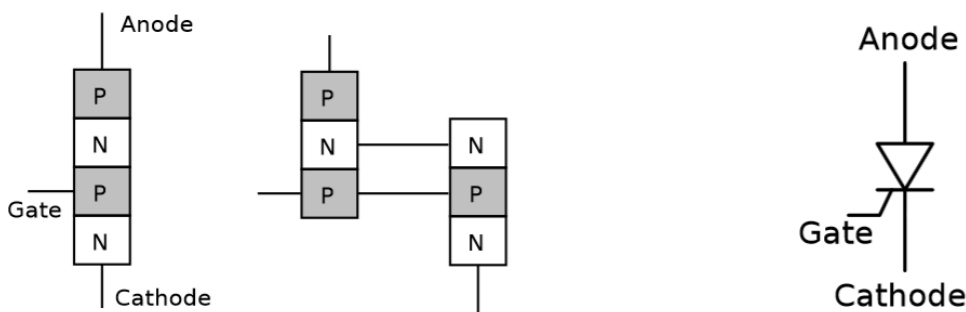
Le thyristor est un composant semi-conducteur. Comme la diode, il laisse passer le courant électrique dans un seul sens, de l'**anode (A)** à la **cathode (K)**. Cependant le thyristor possède une troisième électrode, la **gâchette (G)**. Le thyristor ne conduira que si un courant minimum et positif est fourni à la gâchette.

On pourrait résumer en disant que le thyristor est une diode commandée. Il est désigné par l'acronyme **SCR**, **Silicon Controlled Rectifier** (redresseur commandé au silicium).

Symbole

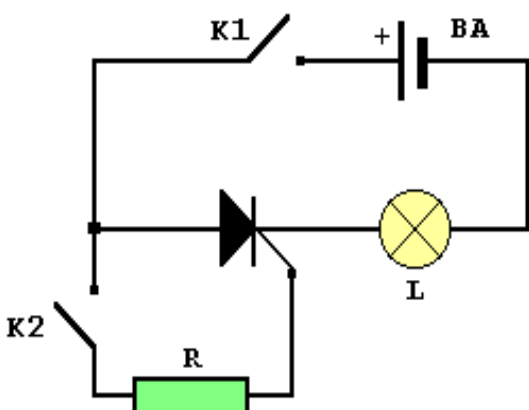


Constitution



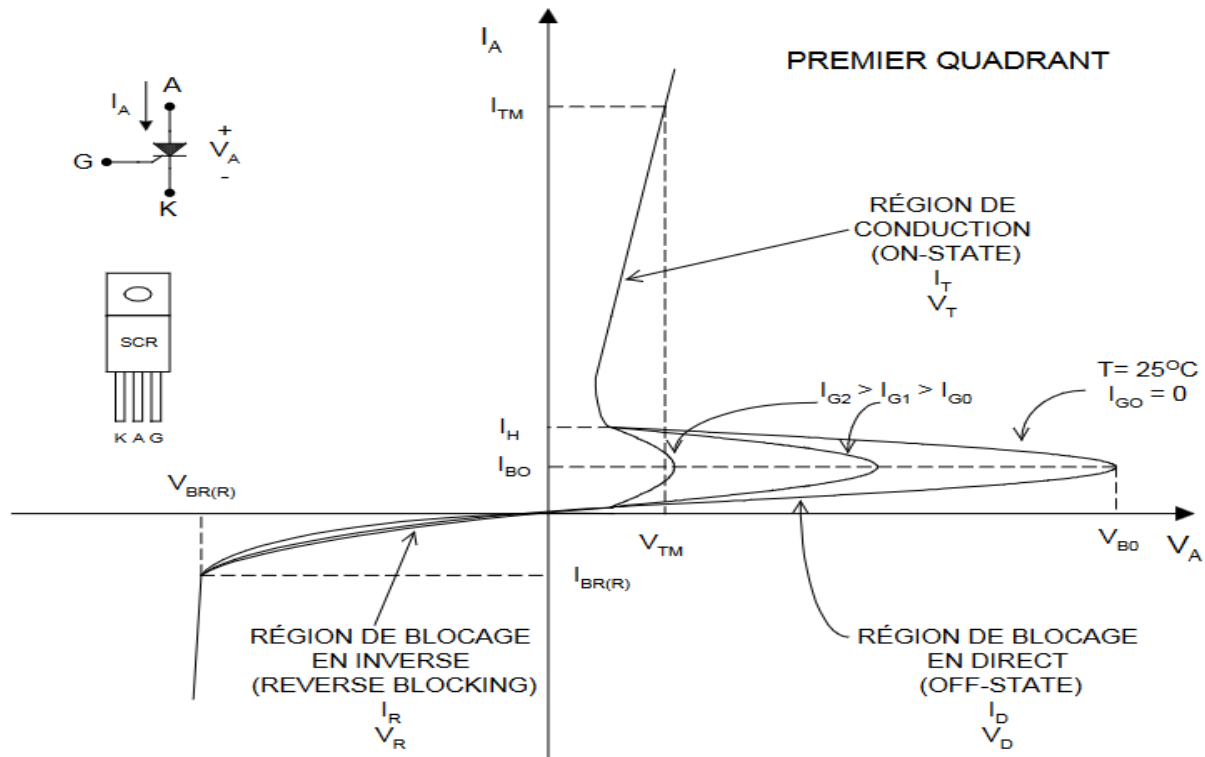
Fonctionnement

Si on ferme l'interrupteur K1, il ne se passe rien ! Pour amorcer le thyristor, il faut envoyer une impulsion de courant dans la gâchette du thyristor en fermant l'interrupteur K2 (K1 restant fermé) : la lampe L s'allume. Si maintenant on ouvre K2, la lampe reste



allumée. Pour l'éteindre, c'est-à-dire bloquer la conduction, il faut ouvrir K1

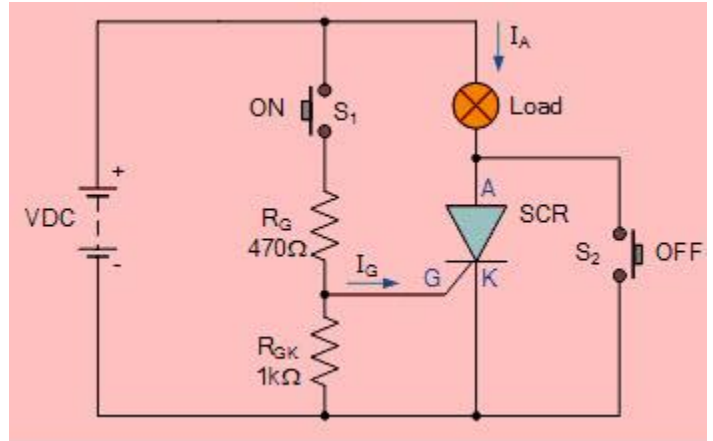
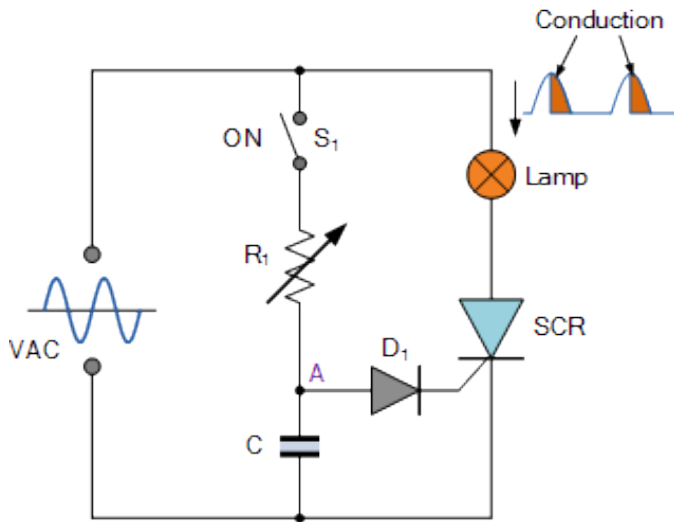
Caractéristique courant tension du thyristor



Aspect physique



Exemple d'application :



On peut mettre à la place de la lampe un moteur universel

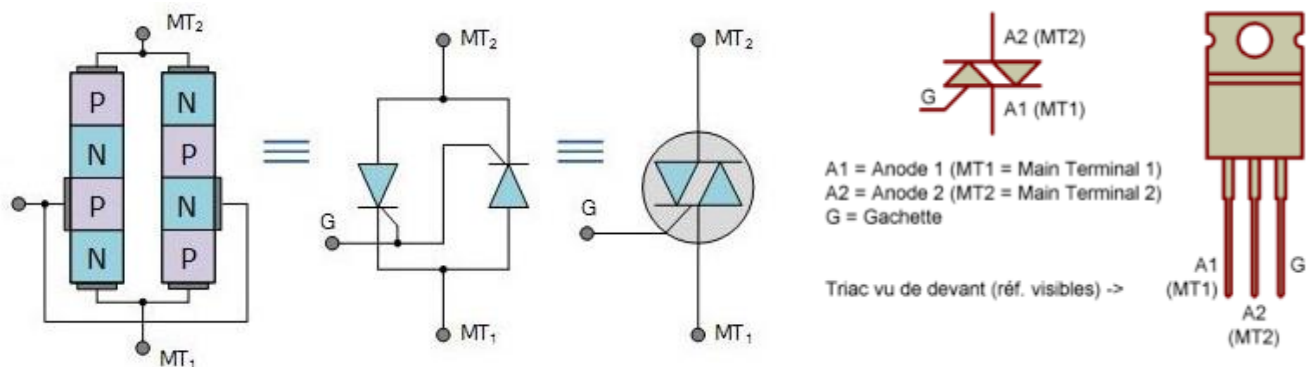
TRIAC

Définition

Le Triac est un composant semi-conducteur comme le thyristor sauf que celui-ci laisse passer le courant dans les deux sens si un courant de gâchettes lui est fourni donc il peut être utilisé en courant alternatif (2 sens) et continu (1 sens).

On pourrait dire qu'un triac est constitué de deux thyristors montés "tête-bêche", en antiparallèle.

Symbole et constitution :

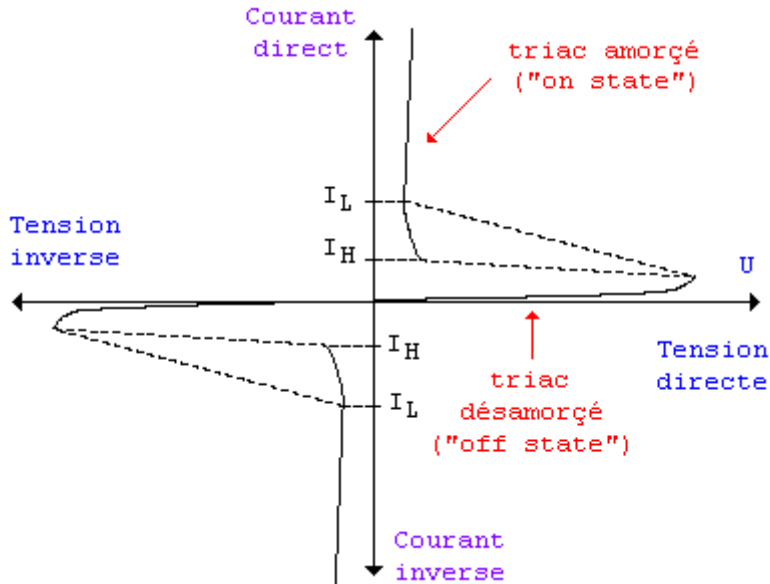


Fonctionnement :

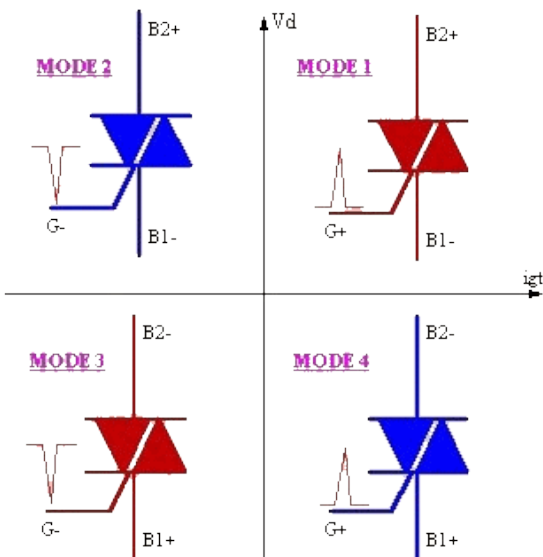
Une impulsion de courant de commande en gâchette très faible (environ 50 mA) déclenche le triac, qui reste amorcé jusqu'à ouverture du circuit pour le fonctionnement en CC et jusqu'au passage par zéro de la sinusoïde pour un fonctionnement en CA.

La puissance fournie à la charge est maximale lorsque le déclenchement a lieu juste après le passage par zéro de la tension alternative, mais en retardant l'impulsion de déclenchement, on peut faire varier à volonté l'intensité appliquée à la charge.

Caractéristique courant tension du triac



Mode d'amorçage d'un Triac



Mode 1 : 1° quadrant : B2=positif, B1=négatif, G=impulsion positive

Mode 2 : 2° quadrant : B2=positif, B1=négatif, G=impulsion négative

Mode 3 : 3° quadrant : B2=négatif, B1=positif, G=impulsion négative

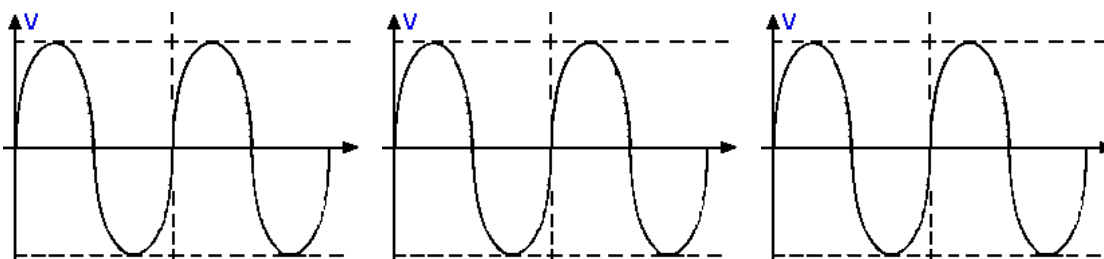
Mode 4 : 4° quadrant : B2=négatif, B1=positif, G=impulsion positive.

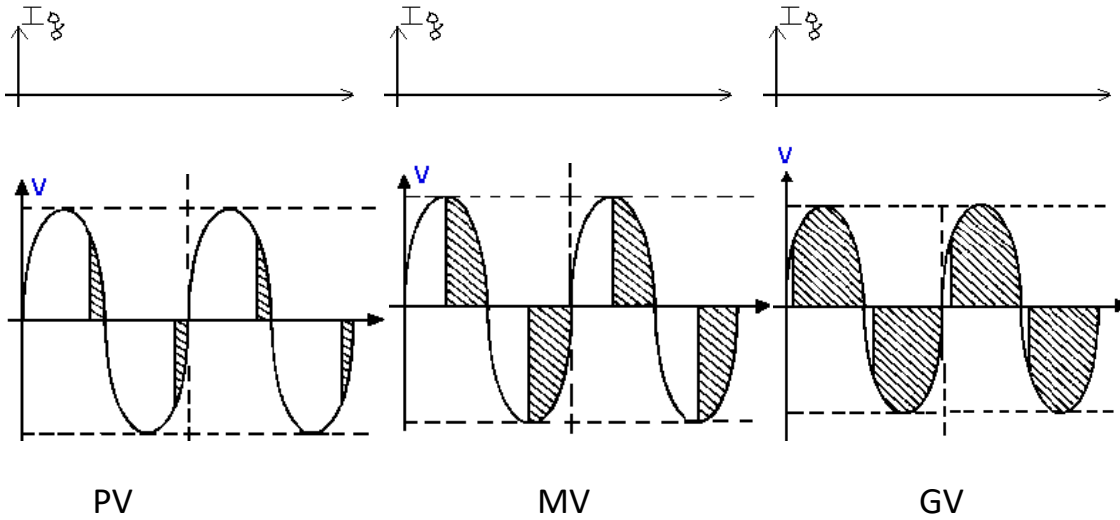
Étant donné que les triacs doivent fonctionner dans les deux sens en alternatif (alternance positive et négative), on doit utiliser deux de ces modes. **Le mode 1 est le plus sensible. Les modes 2 et 3 requièrent des courants de gâchette plus élevés. Le mode 4 est le moins sensible.**

Les modes 1 et 3 sont les plus intéressants car l'impulsion de déclenchement est du même sens que le courant principal.

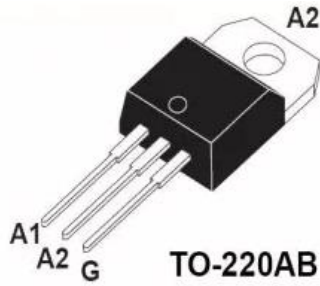
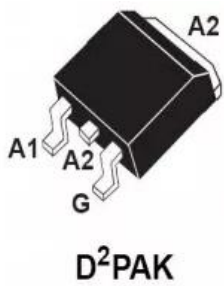
Application

On peut utiliser un triac comme gradateur (variateur) de lumière ou vitesse (PV, MV, et GV)





Aspect physique :



BT136 : 4A 600V ; BT137 : 8A 600V

BT138 : 12A 600V ; BTA16-600 : 16A 600V ;

BTA26-600 : 25A 600V

DIAC

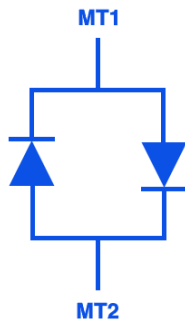
Définition

Le Diac est une diode bidirectionnelle : elle peut être bloquée ou passante dans les deux sens, selon le sens du courant ; Le Diac ne conduit pas le courant tant que sa tension nominale de seuil n'est pas atteinte. Cette tension se situe, suivant le modèle, vers 32 ou 40 V. alternatif

Rôle

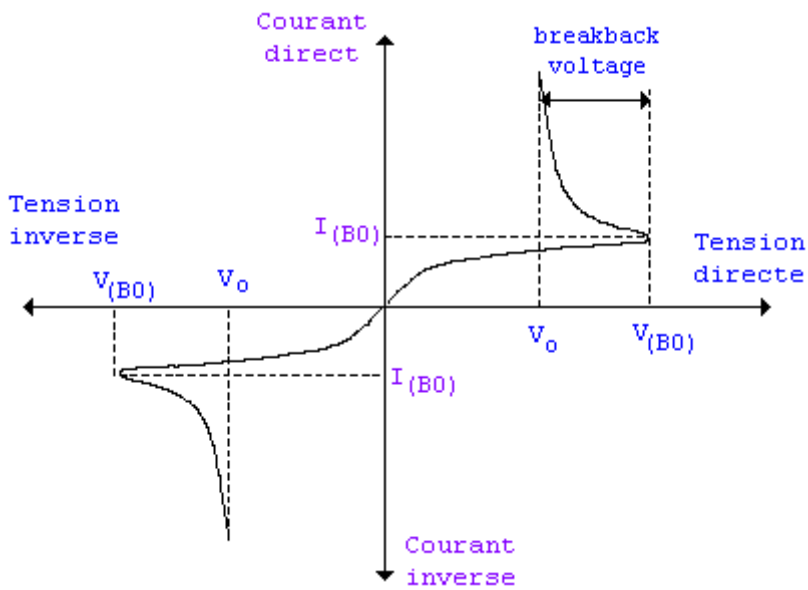
Son rôle essentiel est de servir au déclenchement d'un triac. Lorsque cette tension est atteinte, il se produit un phénomène de conduction en avalanche et la tension de seuil du composant chute aux alentours de 5 V Le courant qui traverse le Diac est alors suffisant pour déclencher un triac.

Symbole



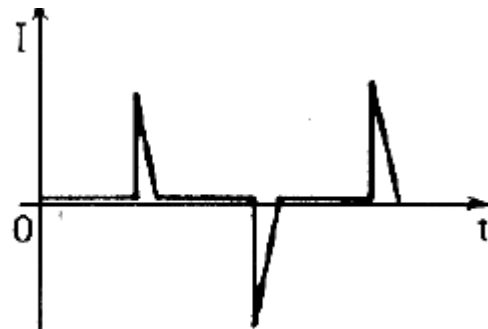
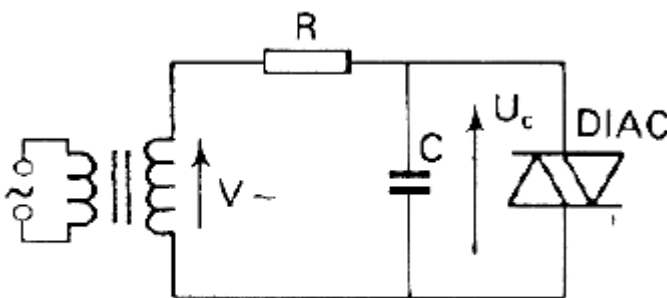
MT1= A1 ; MT2=A2

Caractéristique courant tension du Diac

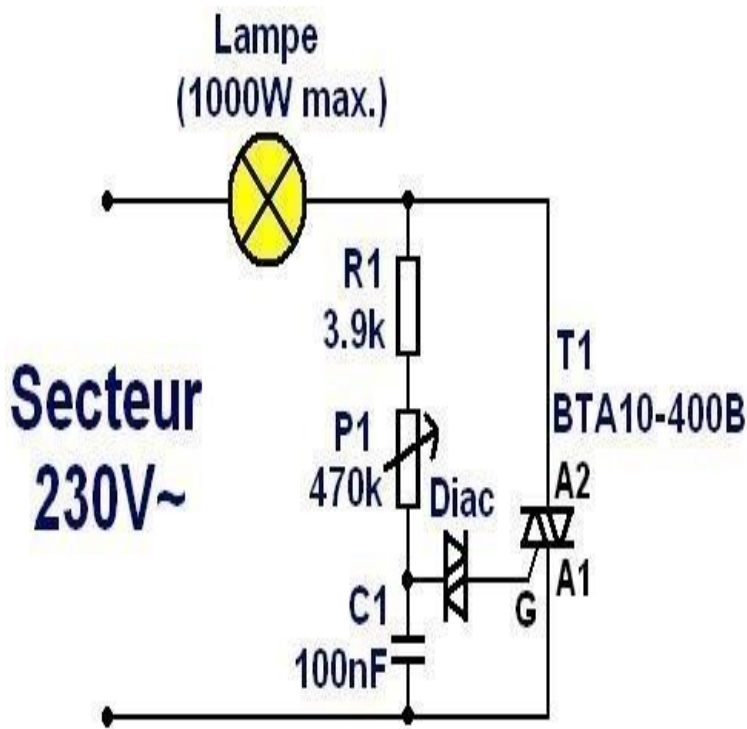


Application

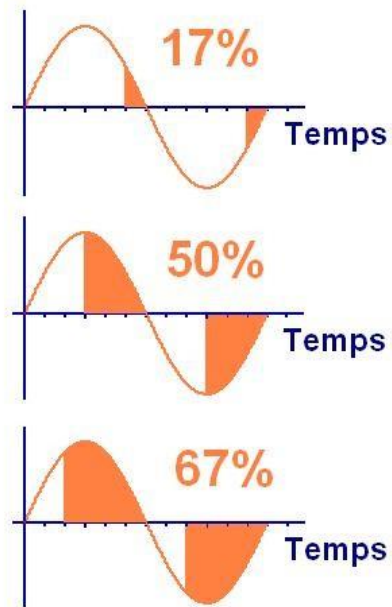
Le DIAC est surtout employé pour fournir des impulsions tantôt positives, tantôt négatives



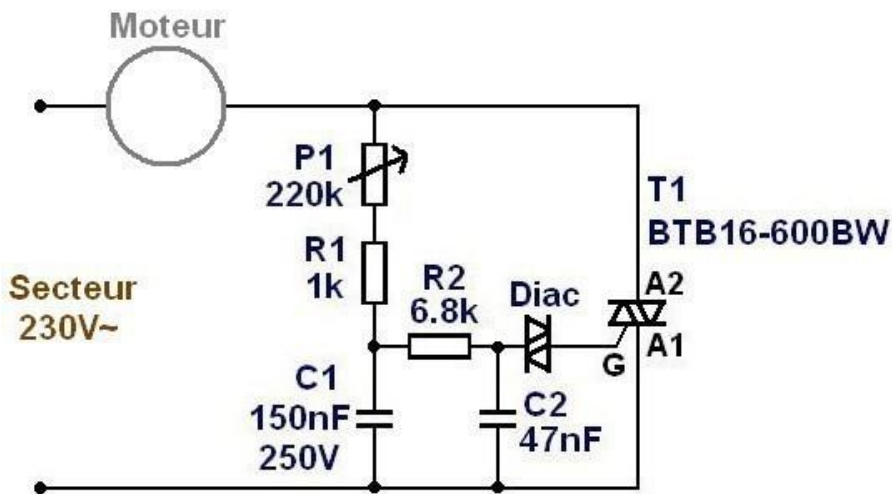
Exemple d'application :



Tension aux bornes de l'ampoule



Tensions aux bornes de l'ampoule pour 3 positions de variateur



Variateur de vitesse 2000W

LES OPTOCOUPLEURS

Définition

Un opto-coupleur est un dispositif composé de deux éléments électriquement indépendants, mais optiquement couplés, à l'intérieur d'une enveloppe, parfaitement étanche.

Le rôle d'un opto-coupleur est soit d'assurer une isolation galvanique (aucune liaison électrique) entre deux systèmes électriques pour des utilisations diverses comme :

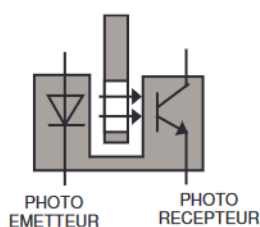
- Interface pour la transmission de données.
- Commande de structures Basse Tension (Secteur ONEE).
- Variation de puissance.
- Soit de capter une information par le biais de la lumière :
- Présence d'obstacles.

Les deux éléments constitutifs de ce dispositif sont à l'entrée, un photoémetteur, dans le visible ou l'infrarouge, et à la sortie un photorécepteur, photodiode, phototransistor, et optotriac.

Type de liaison

Liaison directe interrompible

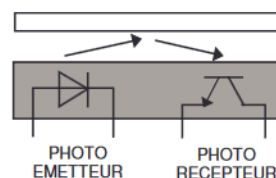
L'opto-interrupteur



La transmission de la lumière s'effectue dans l'air tant que le faisceau lumineux n'est pas interrompu.

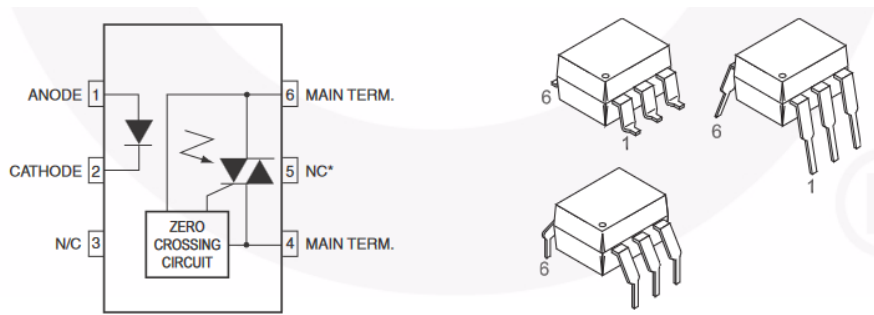
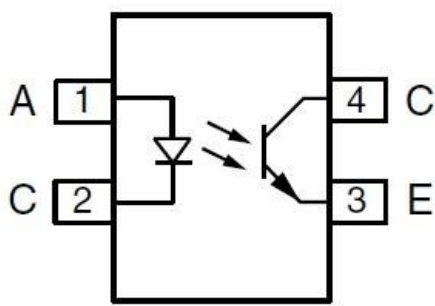
Liaison par réflexion

L'opto-rélecteur



La transmission s'effectue dans l'air par réflexion du faisceau lumineux émis par le photoémetteur.

Symbole :



Circuit intégré (CI)

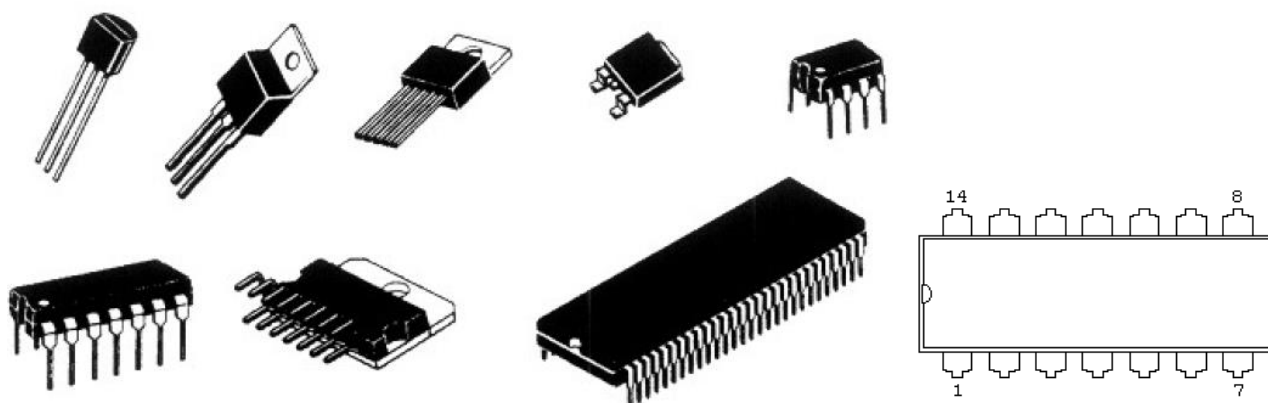
Définition

Le circuit intégré (CI), aussi appelé puce électronique, est un composant électronique permettant de réaliser plusieurs fonctions électroniques plus ou moins complexes. Il intègre souvent plusieurs types de composants électroniques de base dans un volume réduit, rendant le circuit facile à mettre en œuvre.

L'avantage de cette intégration poussée est triple : **gain de place sur la carte**, **gain de temps lors du montage**, et surtout, **performances optimisées**

Types de CI

Il existe une très grande variété de ces composants divisés en deux grandes catégories : **analogique** et **numérique**.

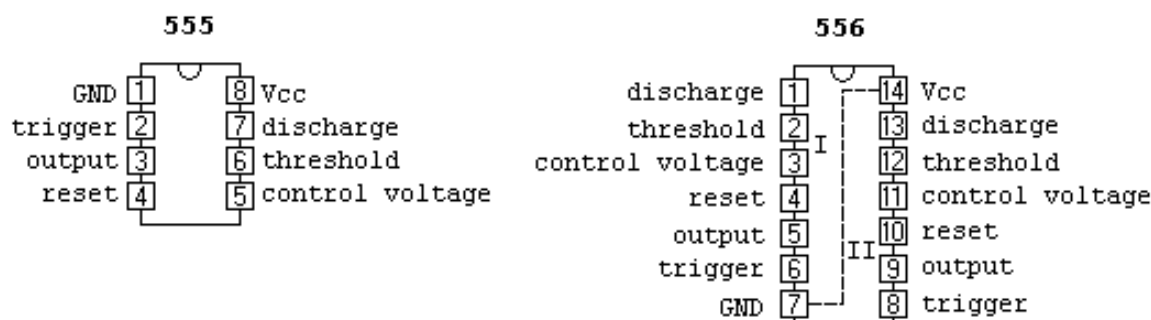


Il existe deux grandes familles technologiques :

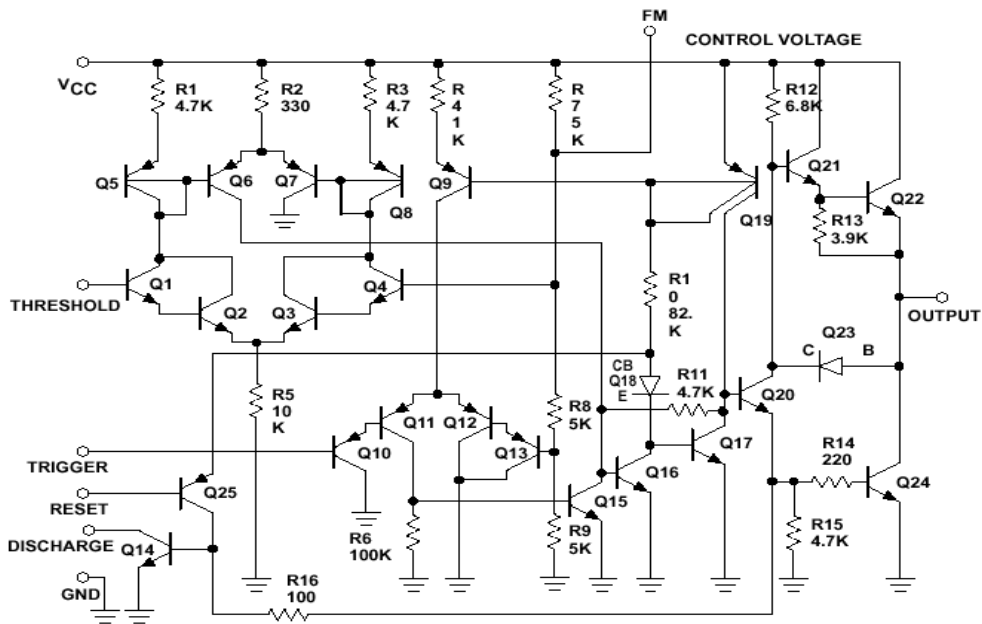
- ✓ La famille TTL (Transistor-Transistor Logic), qui fonctionne avec une tension d'alimentation de 5 volts exactement
- ✓ La famille CMOS (Complementary Metal-Oxid-Semiconductor) qui fonctionne avec une tension d'alimentation généralement comprise entre 3 et 18 volts

Exemple de circuit intégré numérique (NE 555) :

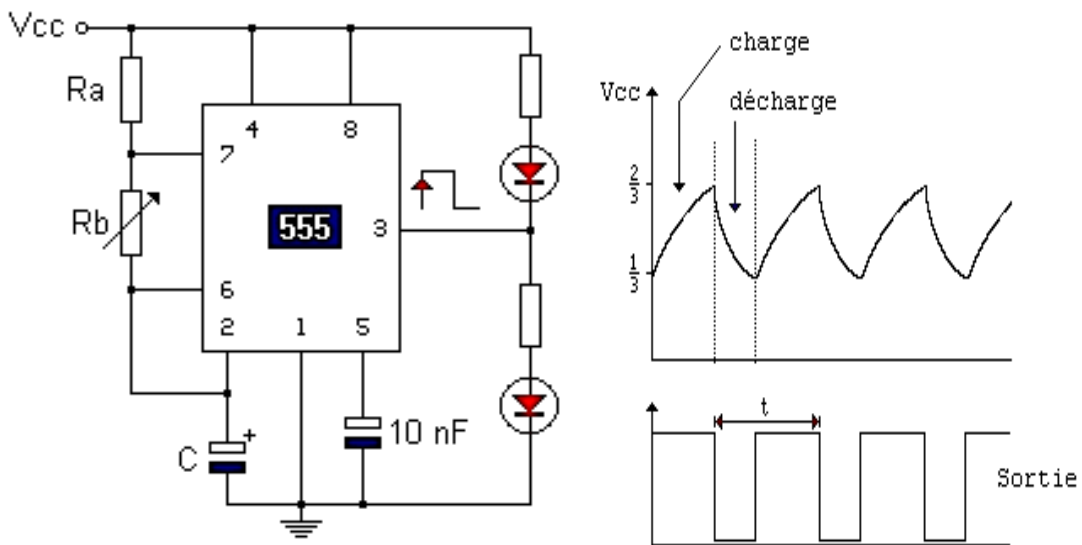
Le NE 555 est un circuit intégré à la fois très connu et très simple, il s'agit d'un timer en boîtier DIL 8 : il comporte donc deux rangées de 4 pattes. Le 555 fonctionne aussi bien en **mode astable** ou **monostable** et ne requiert que trois composants périphériques, deux résistances et un condensateur.



Voyons tout d'abord, par curiosité, ce qui se cache dans les entrailles de ce minuscule circuit intégré :



Fonctionnement du 555 en mode astable

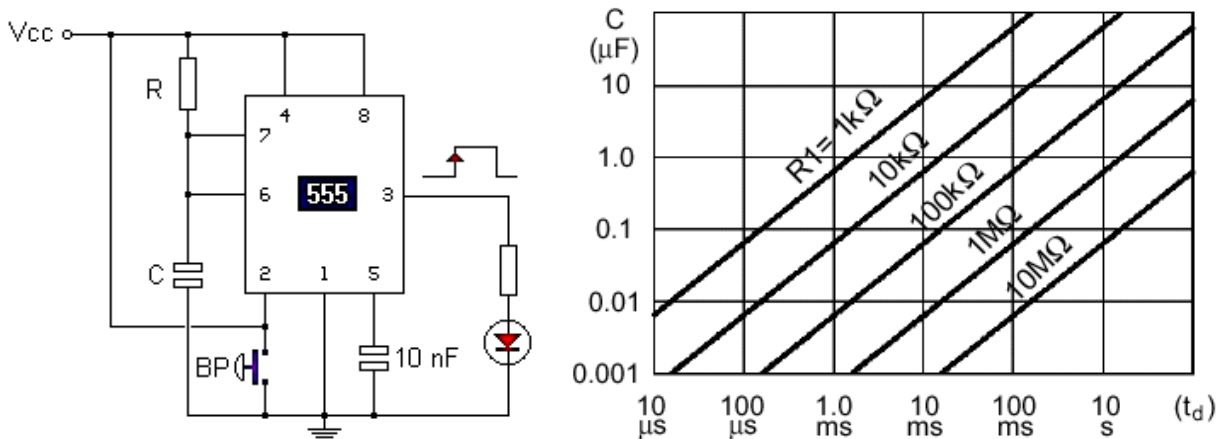


$$t = 0,7 (R_A + 2R_B) C$$

$$H_i = 0,7 (R_A + R_B) C$$

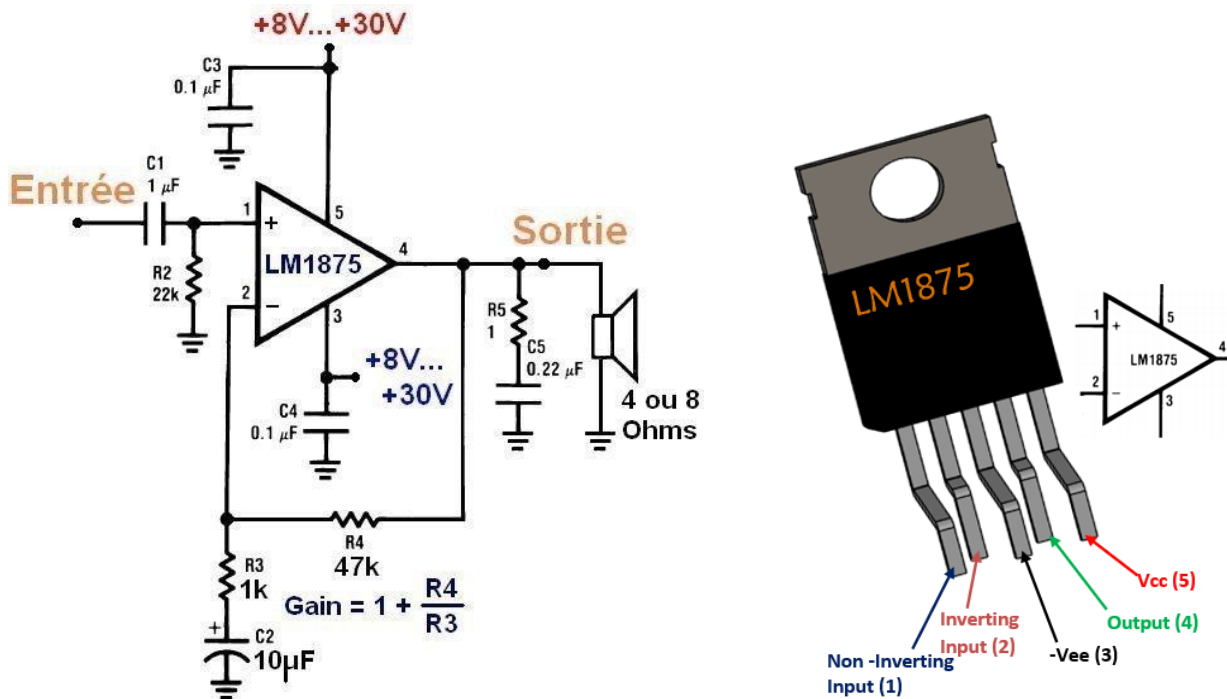
$$L_o = 0,7 (R_B) C$$

Fonctionnement du 555 en mode monostable



Exemple de circuit intégré analogique (Amplificateur audio) :

Le LM1875 est un ampli intégré facile d'utilisation qui fournit 20W RMS à 4 Ohms ou à 8 Ohms en fonction de la tension d'alimentation.

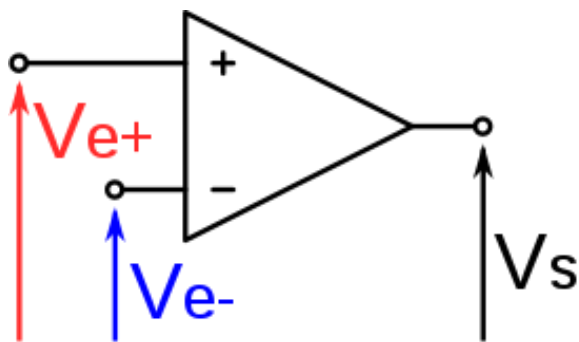


Amplificateur Opérationnel (AOP)

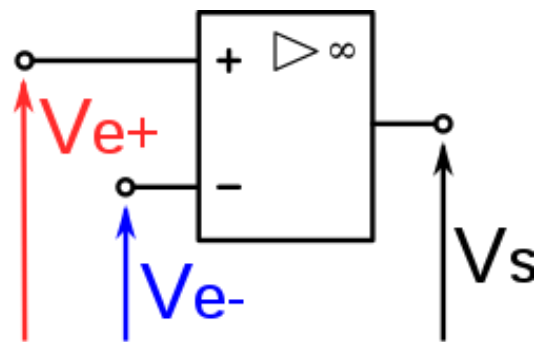
Définition :

Un amplificateur opérationnel (AOP) est un circuit intégré dont la fonction de base est, comme son nom le suggère, l'amplification. Il est en outre "opérationnel" en ce sens qu'il permet de réaliser des fonctions de type "arithmétique" (inversion, addition, soustraction, comparaison...).

Symbole :

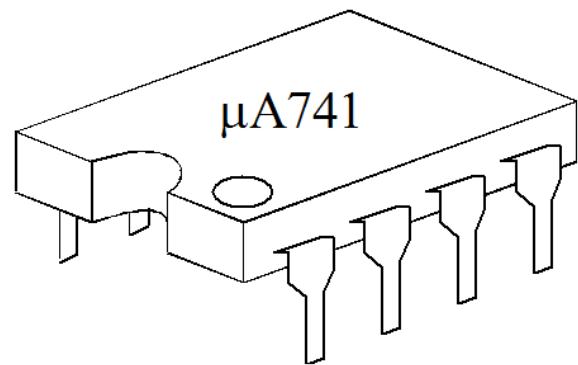
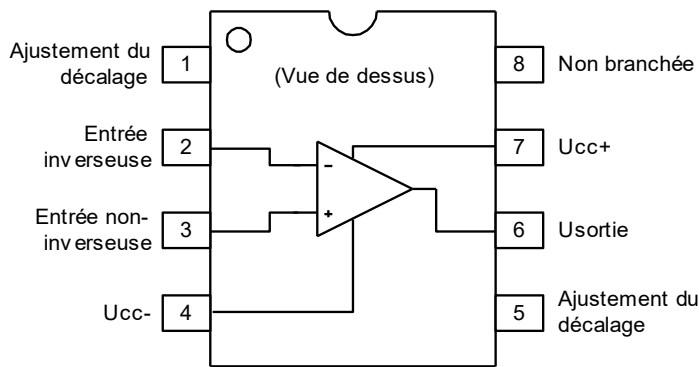


Notation américaine



Notation européenne

Aspect physique et brochage :

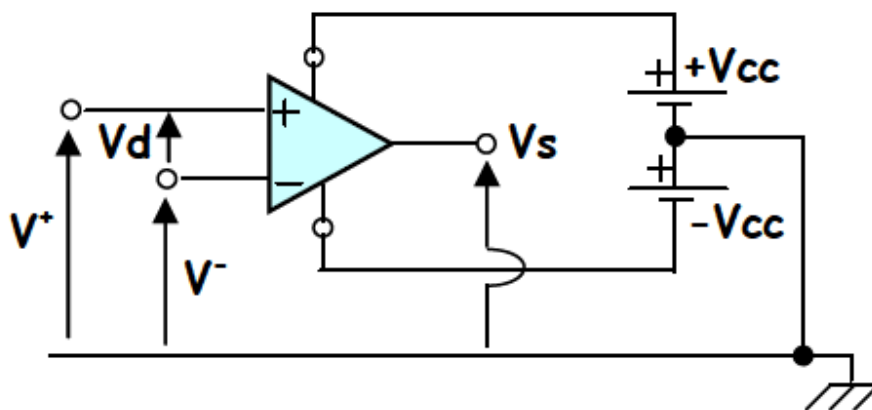


Fonctionnement :

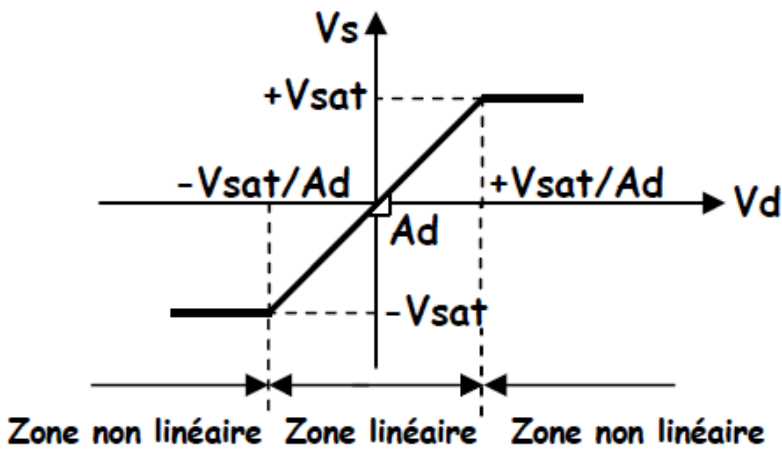
Un AOP est caractérisé par :

- Une entrée non inverseuse V^+ ou e^+ .
- Une entrée inverseuse V^- ou e^- .
- Une sortie V_s .

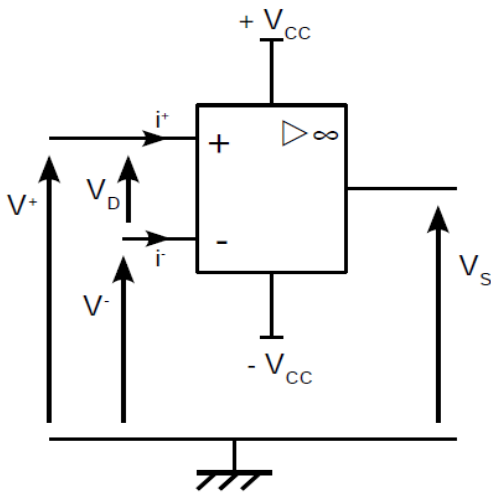
Le fonctionnement de l'AOP nécessite souvent deux tensions d'alimentation symétriques $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$.



Fonctionnement en régime non linéaire ou de commutation (boucle ouverte)



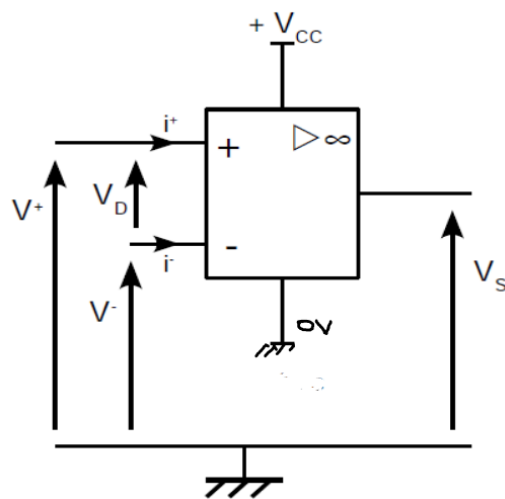
Montage comparateur : zone non linéaire



Alimentation symétrique

Si $V+ > V-$ donc $Vs = +Vcc$

Si $V+ < V-$ donc $Vs = -Vcc$



Alimentation non symétrique

Si $V+ > V-$ donc $Vs = +Vcc$

Si $V+ < V-$ donc $Vs = 0\text{ v}$

Fonctionnement en régime linéaire ou d'amplification

Ce mode de fonctionnement s'effectue avec un bouclage (contre réaction) de la sortie Vs sur l'entrée inverseuse $V-$. Ce bouclage est réalisé soit par un composant (R, C,...), soit par une liaison directe.

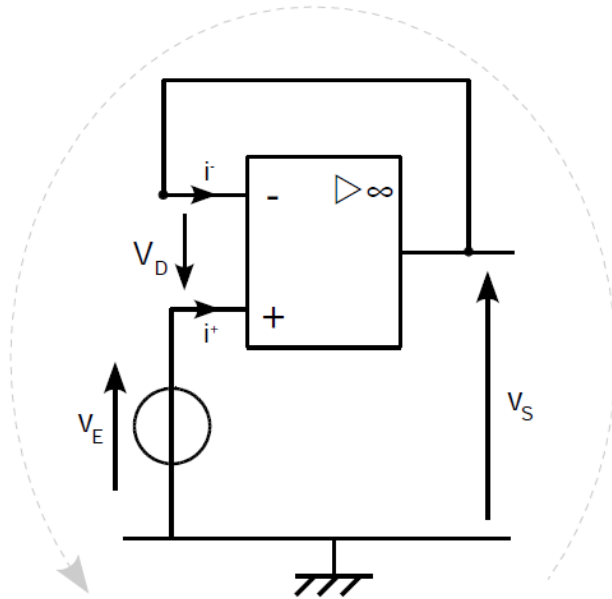
On définit la tension différentielle $V_D = V+ - V-$ et la tension de sortie $V_S = AD \cdot V_D$

AD est l'amplification différentielle propre de l'AOP et est de l'ordre de 10^5 . Cependant, même si AD est très élevée, la tension de sortie ne peut dépasser $\pm VCC$.

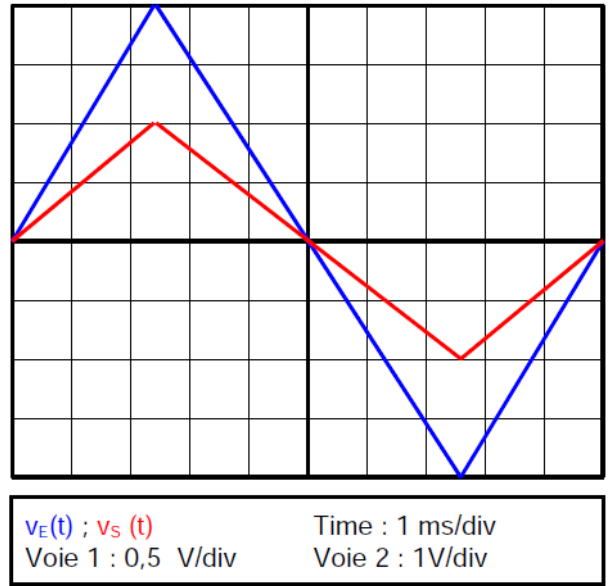
L'impédance d'entrée est très élevée et les courants d'entrée $i+$ et $i-$ sont considérés comme nuls. L'impédance de sortie est très faible.

En considérant l'AOP parfait, les relations à tenir en compte sont $V+ = V-$ et $I+ = I- = 0$.

LE MONTAGE SUIVEUR :

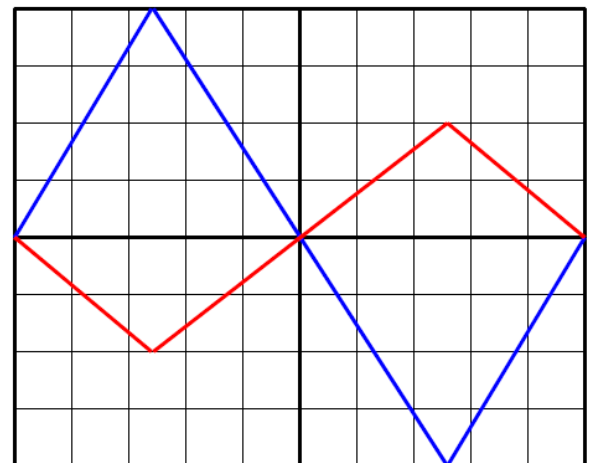
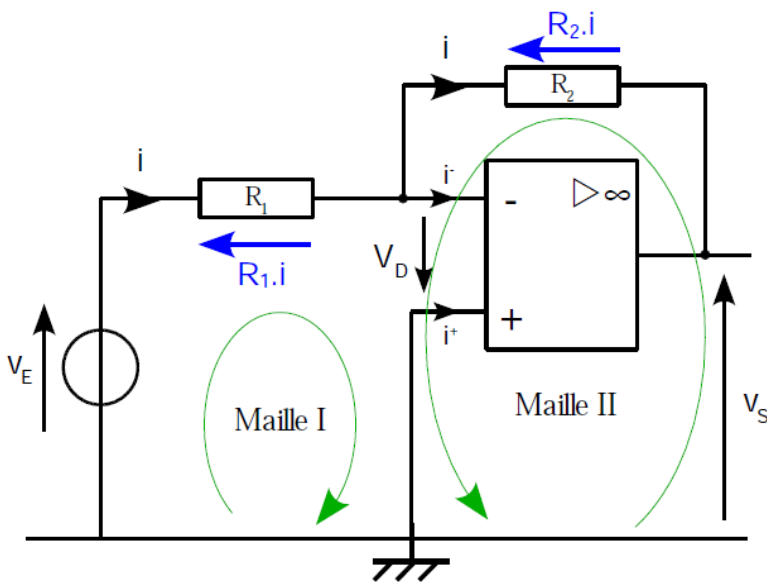


VS = VE



Le montage permet de réaliser une isolation galvanique entre le signal d'entrée et celui de sortie.

LE MONTAGE AMPLIFICATEUR INVERSEUR :



$$V_S = - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_E$$

Démonstration :

.....

.....

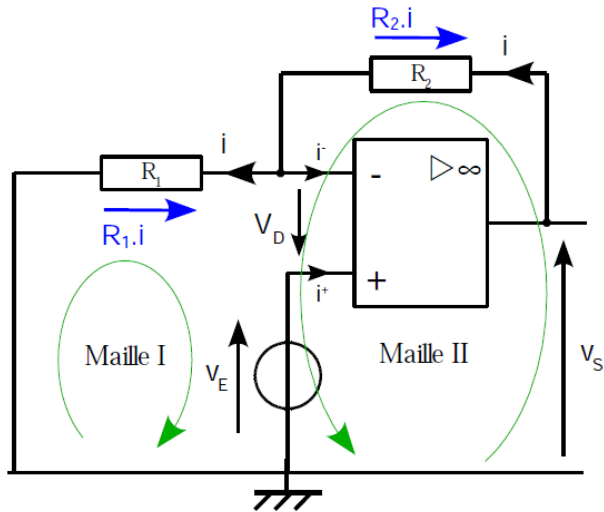
.....

.....

.....

.....

LE MONTAGE AMPLIFICATEUR NON - INVERSEUR :



$$V_S = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot V_E$$

Démonstration :

.....

.....

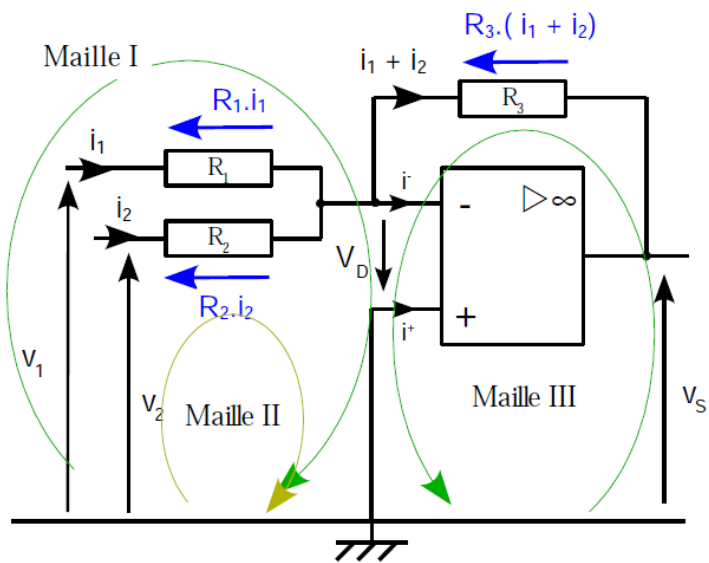
.....

.....

.....

.....

LE MONTAGE SOMMATEUR INVERSEUR :



$$V_S = - R_3 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} \right)$$

Démonstration :

.....

.....

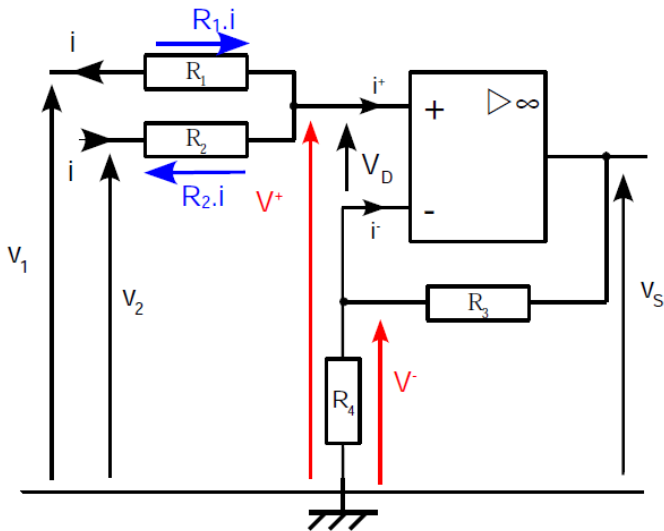
.....

.....

.....

.....

LE MONTAGE SOMMATEUR NON - INVERSEUR :



$$V_S = \frac{R_3 + R_4}{R_4} \cdot \frac{R_2 \cdot V_1 + R_1 \cdot V_2}{R_1 + R_2}$$

Démonstration :

.....

.....

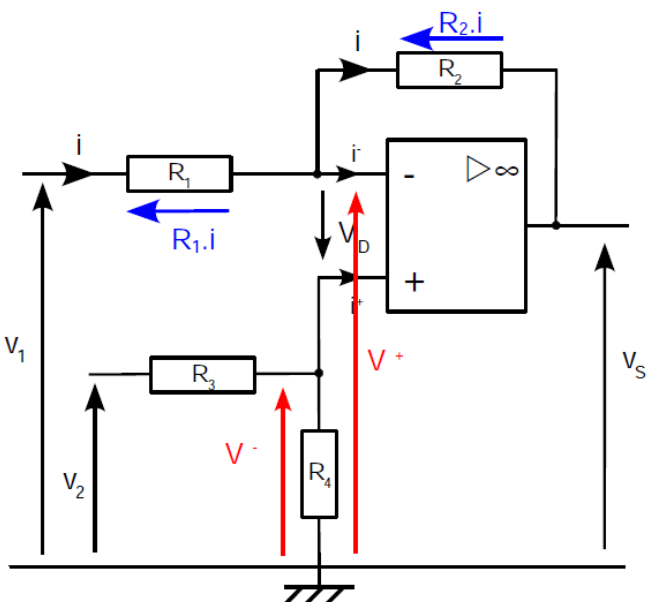
.....

.....

.....

.....

LE MONTAGE AMPLIFICATEUR DE DIFFÉRENCE OU DIFFÉRENTIEL :



$$V_S = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \times \frac{R_4}{R_1} \times V_2 - V_1 \frac{R_2}{R_1}$$

Si : $R_1=R_2=R_3=R_4=R$

$$V_S = V_2 - V_1$$

Démonstration :

.....

.....

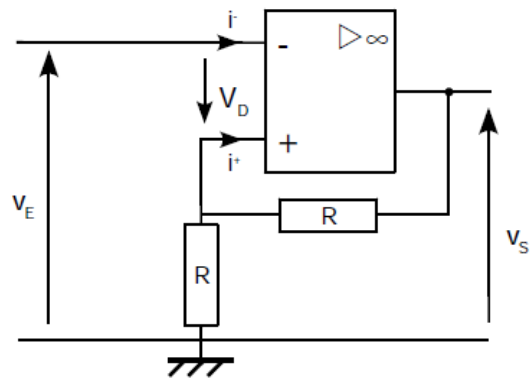
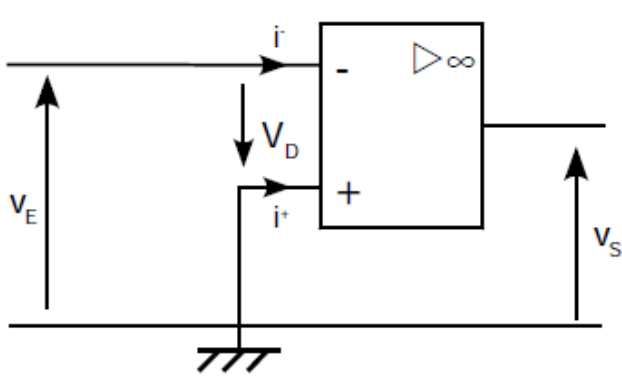
.....

.....

.....

⚡ FONCTIONNEMENT EN RÉGIME DE SATURATION

Lorsqu'il n'y a pas de contre-réaction négative ou une réaction « positive »



L'amplificateur fonctionne en régime de saturation c'est-à-dire que la tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs $+V_{SAT}$ ou $-V_{SAT}$.

On admet que les tensions de saturation $\pm V_{SAT} = \pm V_{CC}$

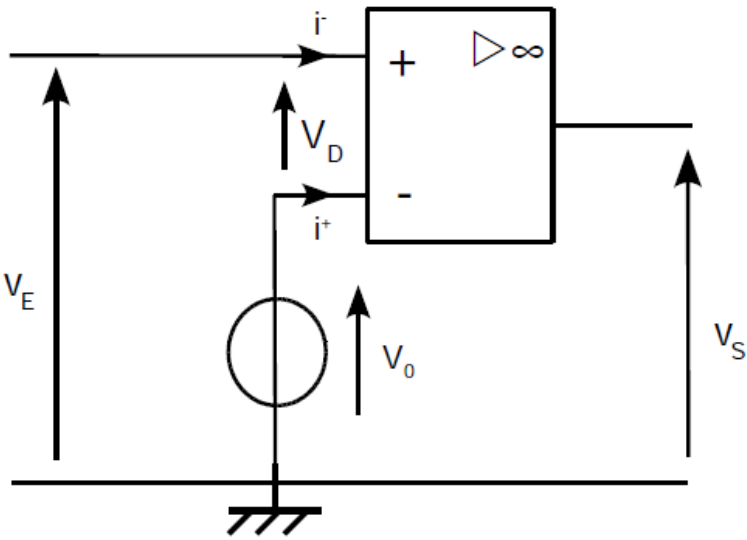
Pour ce mode de fonctionnement, la tension de sortie ne dépend que du signe de V_D tel que :

$V_D = V^+ - V^-$

Si $V_D > 0 \Leftrightarrow V^+ - V^- > 0 \Leftrightarrow V^+ > V^-$ alors $v_S = +V_{sat}$

Si $V_D < 0 \Leftrightarrow V^+ - V^- < 0 \Leftrightarrow V^- > V^+$ alors $v_S = -V_{sat}$

⚡ LE COMPAREUR À UN SEUIL :

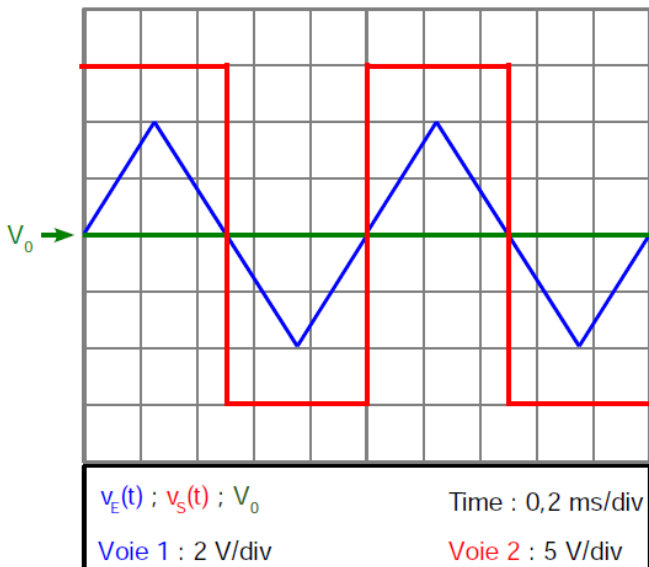


Hypothèses :

Les courants d'entrée $i^+ = i^- = 0$

V_0 est une tension continue.

Comparateur à 0 ($V_0 = 0\text{ V}$) :



Comparateur à V_0 :

