

I. INTRODUCTION

1. Nécessité de la conversion d'énergie

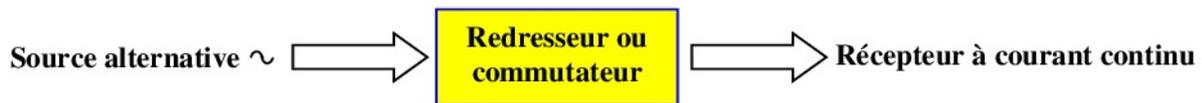
Les différents réseaux électriques industriels alimentent de nombreux actionneurs. Cette énergie apparaît sous deux formes : **alternative** (tensions ou courants sinusoïdaux à *valeur moyenne nulle*) ou **continue**.
Suivant le type d'actionneur, il est nécessaire d'adapter la forme de l'énergie fournie par le réseau. Les différentes possibilités apparaissent comme ci-dessous :

2. Classification des convertisseurs statiques

Type de convertisseur	Energie en entrée	Energie en sortie	Réglage de la puissance
Redresseur à diodes	Alternatif	Continu	Non
Redresseur à thyristors	Alternatif	Continu	Oui
Hacheur	Continu	Continu	Oui
Onduleur	Continu	Alternatif	Oui
Gradateur	Alternatif	Alternatif	Oui

II. Redresseurs

Les redresseurs assurent la conversion d'une tension alternative en une tension continue. Ils servent à alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif.



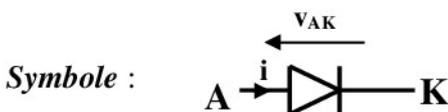
II.1. Redresseurs à diodes (non commandés)

Dans ses redresseurs, l'élément commutateur utilisé est la diode.

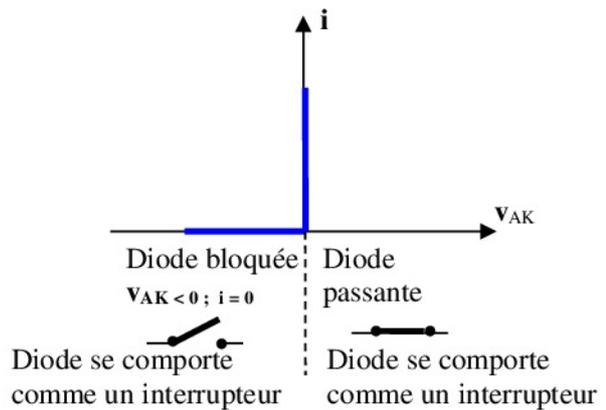
1. Diode

La diode est un dipôle passif polarisé.

En électrotechnique, la diode est équivalente à un interrupteur unidirectionnel non commandé.



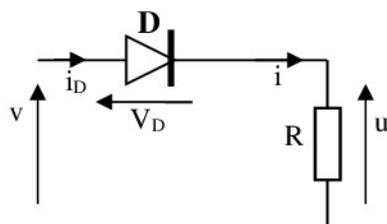
Caractéristique d'une diode parfaite



2. Redressement monophasé

2.1. Redressement simple alternance (charge résistive)

Schéma :



v est la tension d'entrée du pont.
u est la tension de sortie.
R est la charge résistive.

Analyse du fonctionnement :

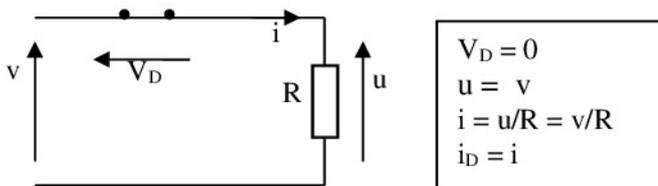
La diode est parfaite
 $v(\theta) = V\sqrt{2} \sin \theta$

$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$ alternance positive

D est passante (interrupteur fermé) $v_D = 0$

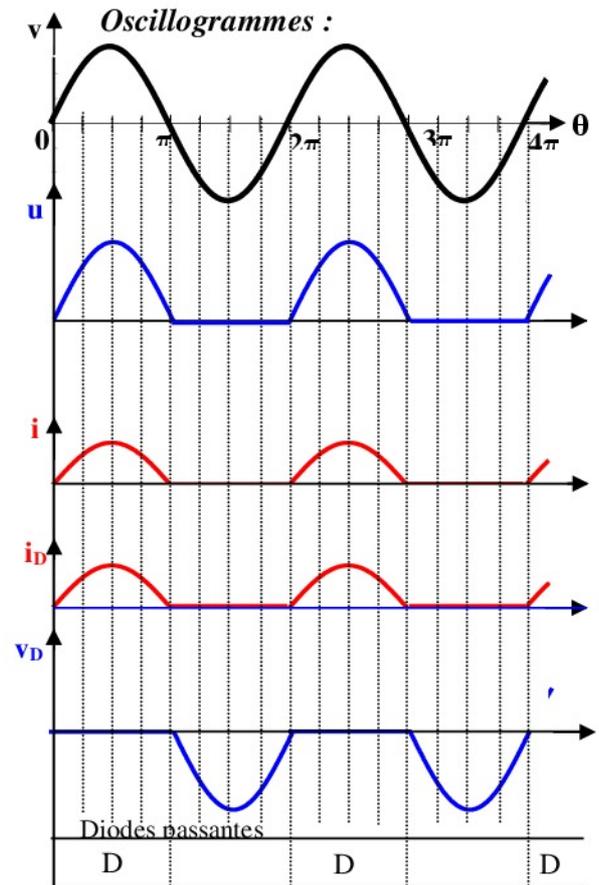
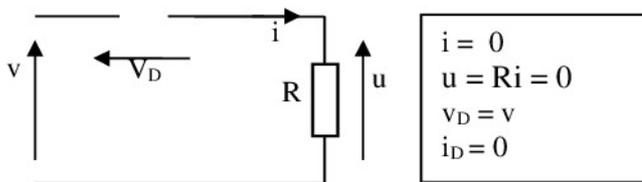
Loi des mailles donne : $v - v_D - u = 0$

Donc : $u = v > 0$



$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$ alternance négative

D se bloque (interrupteur ouvert) $i = 0$

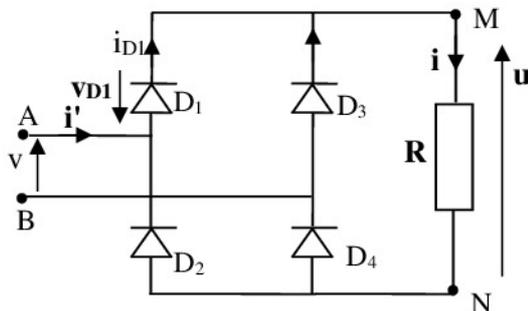


Grandeurs caractéristiques :

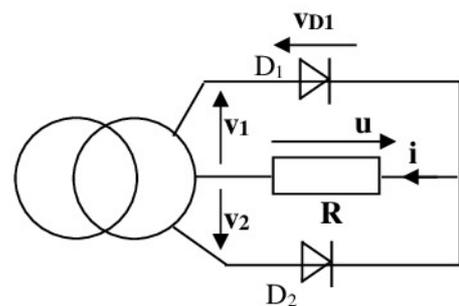
- Valeur moyenne de la tension u : $\bar{u} = V\sqrt{2}/\pi$
- Valeur efficace de la tension u : $U = V\sqrt{2}/2$
- Pour la diode : - Courant moyen : $\bar{i}_D = \bar{i}$
- Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = V\sqrt{2}$

2.2. Redressement double alternance (charge résistive)

Montage PD2 (Pont de Graëtz)



Montage P2 (transformateur à point milieu)



Analyse du fonctionnement (montage P2) :

$v_1(\theta) = -v_2(\theta) = V\sqrt{2} \sin \theta$

$0 < \theta < \pi$ $v_1 > 0$ et $v_2 < 0$
 D₁ est passante et D₂ est bloquée
 $v_{D1} = 0$
 $u = v_1$

$\pi < \theta < 2\pi$ $v_2 > 0$ et $v_1 < 0$
 D₂ est passante et D₁ est bloquée
 $v_{D1} = -2v_1$
 $u = -v_1 = v_2$

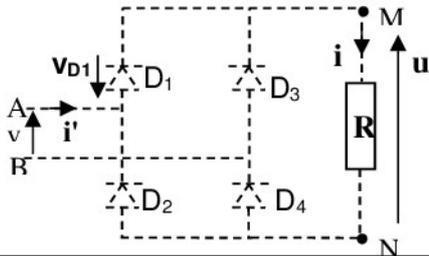
Analyse du fonctionnement (montage PD2) :

$0 < \theta < \pi \quad v > 0 \rightarrow v_A > v_B$

D₁ et D₄ sont passantes $\Rightarrow v_{D1} = 0$ et $v_{D4} = 0$
(Interrupteurs fermés)

Le courant i circule la maille suivante :

$A \rightarrow D_1 \rightarrow R \rightarrow D_4 \rightarrow B$



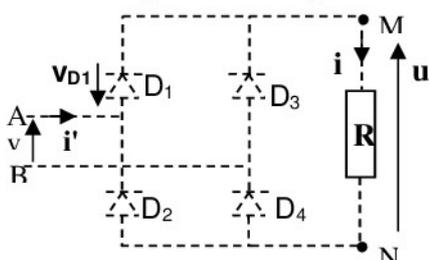
$u = v_M - v_N = v_A - v_B = v$
 $i = u / R = v / R \quad \text{et} \quad i' = i$
 $v_{D1} = v_{D4} = 0 \quad \text{et} \quad v_{D3} = v_{D2} = -v$

$\pi < \theta < 2\pi \quad v < 0 \rightarrow v_B > v_A$

D₂ et D₃ sont passantes $\Rightarrow v_{D2} = 0$ et $v_{D3} = 0$
(Interrupteurs fermés)

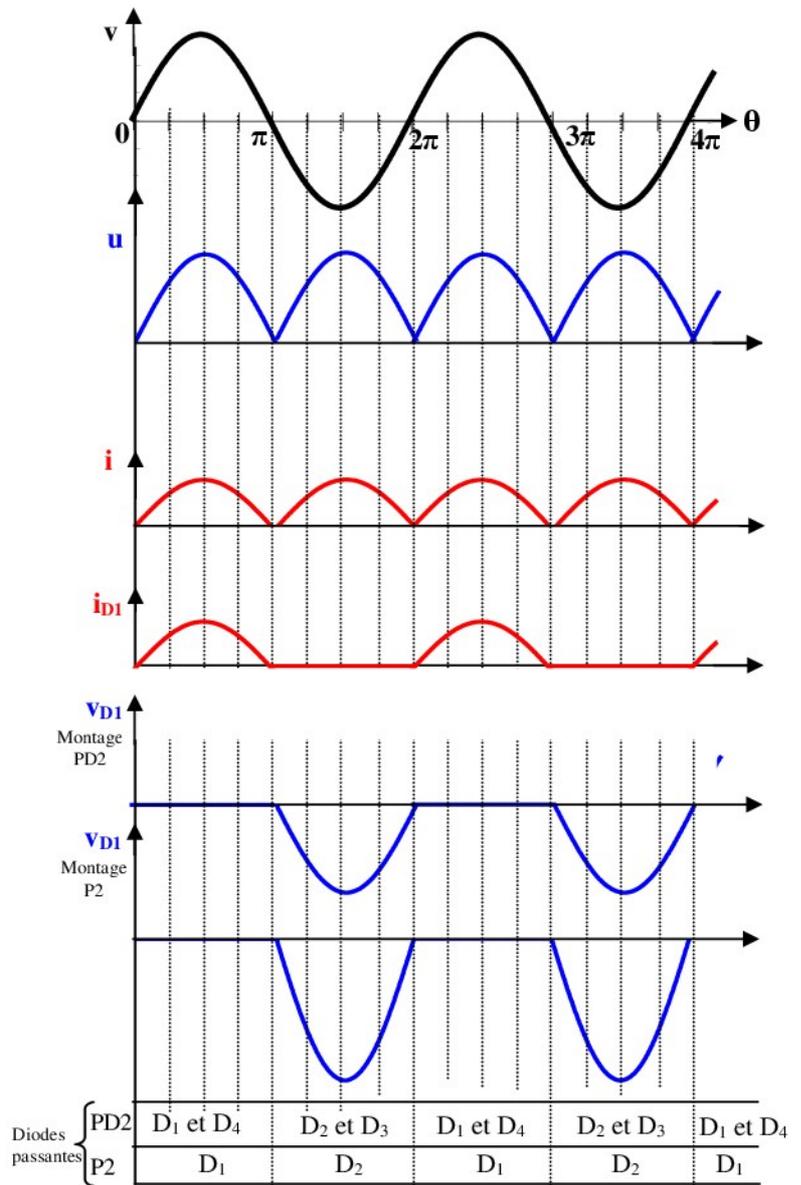
Le courant i circule la maille suivante :

$B \rightarrow D_3 \rightarrow R \rightarrow D_2 \rightarrow A$



$u = v_M - v_N = v_B - v_A = -v$
 $i = u / R = -v / R \quad \text{et} \quad i' = -i$
 $v_{D2} = v_{D3} = 0 \quad \text{et} \quad v_{D1} = v_{D4} = v$

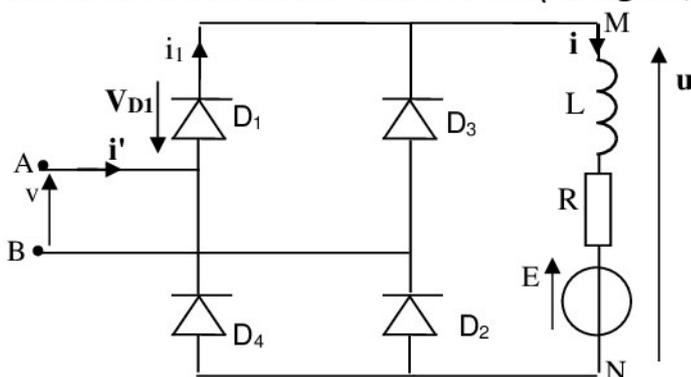
Oscillogrammes :



Grandeurs caractéristiques

- Valeur moyenne de la tension u : $\bar{u} = 2V\sqrt{2}/\pi$
- Valeur efficace de la tension u : $U = V$
- Pour la diode : - Courant moyen : $\bar{i}_D = \bar{i} / 2$
- Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = V\sqrt{2}$ (Montage PD2)
 $V_{Dmax} = 2V\sqrt{2}$ (Montage P2)

2.3. Redressement double alternance (charge R,L,E)



v est la tension d'entrée du montage.
 u est la tension de sortie.
 v_{D1} est la tension aux bornes de la diode D₁.
 R est la résistance de la charge.
 L est l'inductance de la charge.
 E est la f.é.m. de la charge

Analyse du fonctionnement :

En électronique de puissance, pour de forts débits du courant, le lissage se fait par une inductance. L'ondulation du courant alors diminue. Le courant ne passe plus par zéro. C'est le régime de *conduction ininterrompue ou continue*.

Si l'inductance est assez grande, on peut considérer le lissage comme parfait : le courant i est constant.

La tension u est imposée par le réseau, à travers le transformateur et le pont de Graëtz. Le courant i est lissé par la bobine d'inductance L . Son intensité est imposée par la charge R, E .

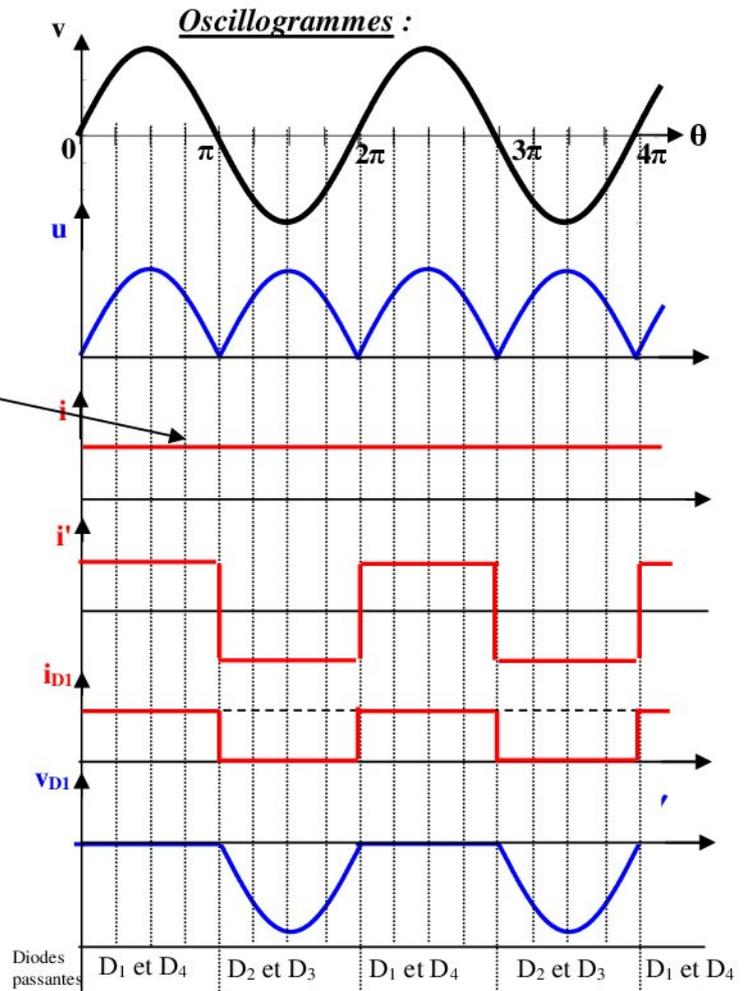
Pour les autres grandeurs :

Alternance positive

$$\begin{aligned} i_{D1} &= i \\ i' &= i \\ v_{D1} &= 0 \end{aligned}$$

Alternance négative

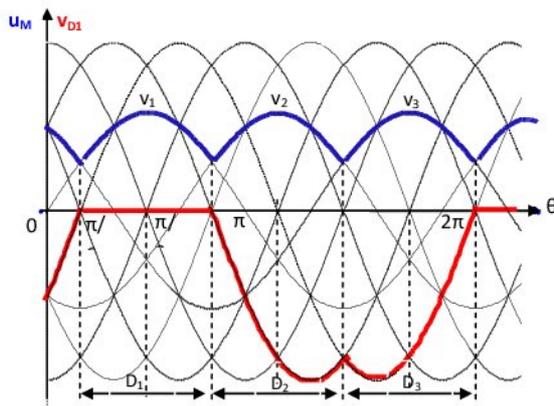
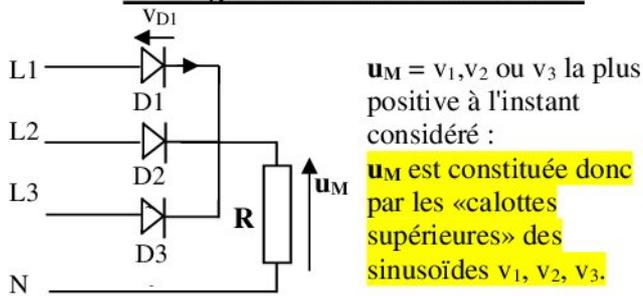
$$\begin{aligned} i_{D1} &= 0 \\ v_{D1} &= -u = -v \\ i' &= -i \end{aligned}$$



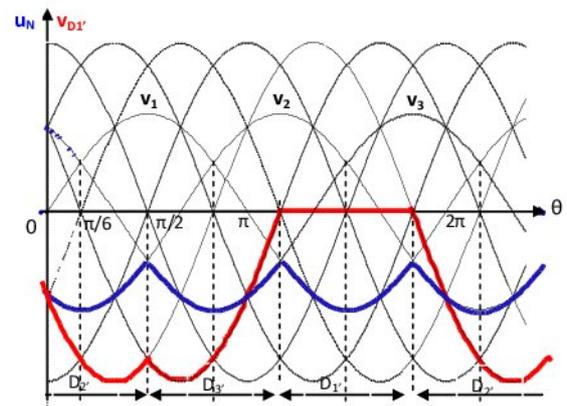
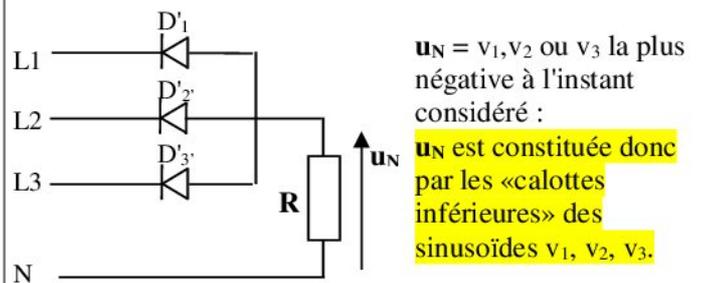
3. Redressement triphasé (charge résistive)

Lorsque la puissance demandée par le récepteur atteint une certaine valeur (> 10 KW), il est intéressant de l'alimenter à partir du réseau triphasé.

Montage P3 à cathodes communes



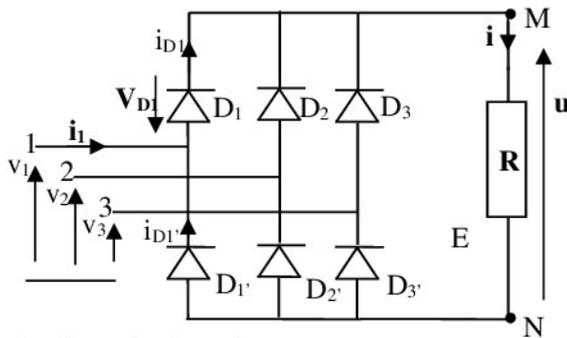
Montage P3 à anodes communes



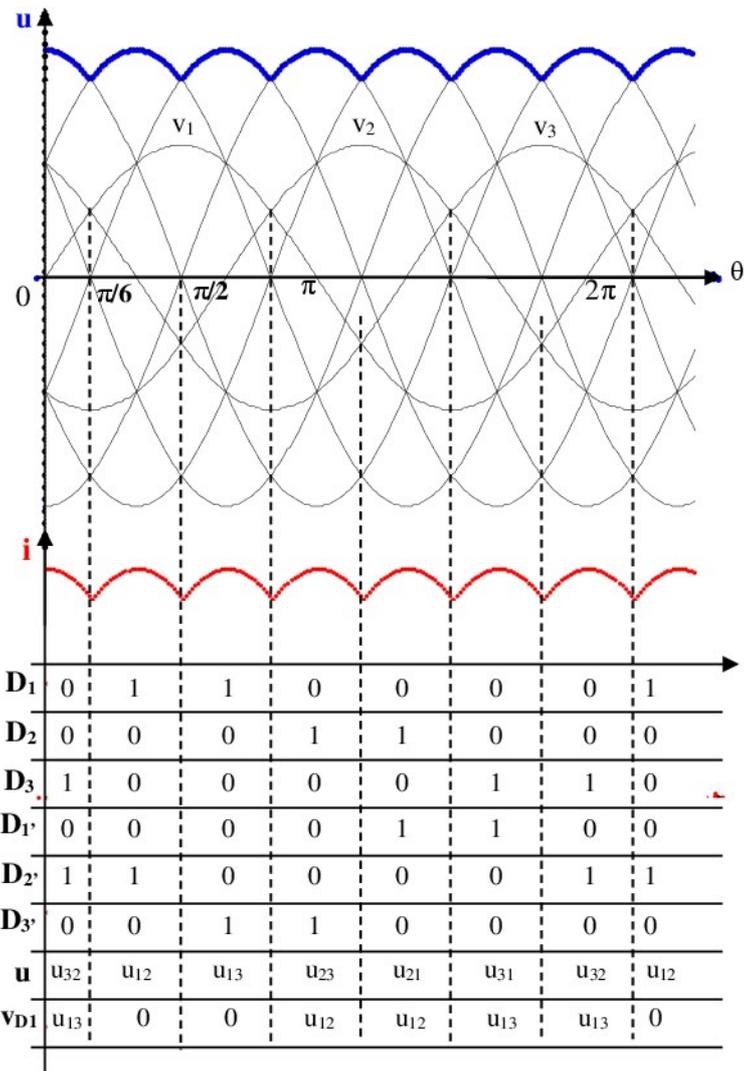
Grandeurs caractéristiques :

	Montage P3 à cathodes communes	Montage P3 à anodes communes
Valeur moyenne de la tension u	$\bar{u} = 3\sqrt{3}V\sqrt{2}/2\pi$	$\bar{u} = -3\sqrt{3}V\sqrt{2}/2\pi$
Courant moyen dans une diode	$\bar{i}_D = \bar{i}/3$	
Tension maximale supportée par la diode	$V_{Dmax} = \sqrt{3} V\sqrt{2}$	

Montage PD3 (Pont de Graëtz triphasé)



Oscillogrammes



Analyse du fonctionnement :

Le pont redresseur comporte:

- 3 diodes pour l'« aller »: $D_1; D_2; D_3;$
- 3 diodes pour le « retour »: $D_{1'}; D_{2'}; D_{3'};$

Les diodes sont parfaites

La tension $u = v_M - v_N$.

Elle est périodique, de période $\pi/3$ en θ .

Soit de fréquence : $f' = 6 \times 50 = 300$ Hz.

(Si la fréquence du réseau est 50 Hz)

$\pi/6 < \theta < \pi/2$

$$v_M = v_1 = V\sqrt{2} \sin \theta$$

$$v_N = v_2 = V\sqrt{2} \sin (\theta - 2\pi/3)$$

Le courant i circule la maille suivante :

$$1 \rightarrow D_1 \rightarrow R \rightarrow D_{2'} \rightarrow 2$$

$$D'où : u = v_M - v_N = u_{12} = V\sqrt{2}\sqrt{3} \sin (\theta + \pi/6)$$

Le courant dans la charge : $i = u/R$

Le courant dans une diode :

Le courant dans les diodes est égal à :

- i lorsque la diode considérée est passante
- 0 si la diode est bloquée.

$$i_{D1} = i \text{ lorsque } D_1 \text{ conduit}$$

Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\bar{u} = 3\sqrt{3}V\sqrt{2}/\pi$
- Pour la diode : - Courant moyen : $\bar{i}_D = \bar{i}/3$
- Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = \sqrt{3}V\sqrt{2}$

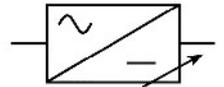
Remarque :

Pour une charge R, L, E , dont l'inductance L est suffisante, le courant i est considéré constant.

La tension u a la même forme que le montage précédent (c.à.d. charge résistive).

II.2. Redresseurs à thyristors (commandés)

L'intérêt du redressement commandé est qu'il permette de faire varier la tension moyenne en sortie du pont et donc de faire varier par exemple la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu.



I. Thyristor

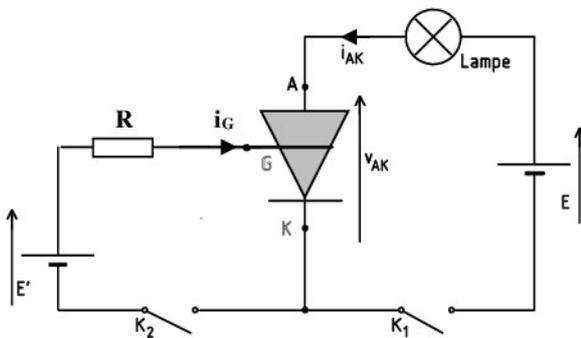
Aspect :

Il comporte 3 broches. Il faut se référer à un catalogue pour connaître l'ordre du brochage.

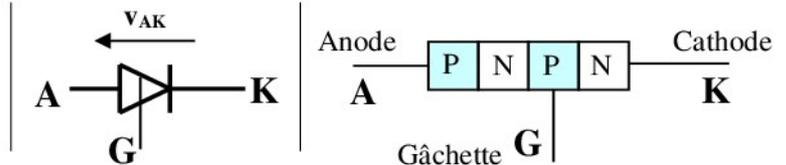
Description et symbole :

- 2 électrodes principales : anode et cathode
- 1 électrode de commande : gâchette

Amorçage d'un thyristor



TO5 TO92 TO48 TO220 DPACK



- 1 On ferme K_1 : lampe est éteinte donc Th est bloqué.
- 2 On ferme K_2 : lampe s'allume donc Th est passant.
- 3 On ouvre K_2 : lampe reste allumée donc Th est passant.
- 4 On ouvre K_1 : lampe s'éteint donc Th se bloque.
- 5 On ferme K_1 : lampe reste éteinte donc Th est bloqué.

Conclusion :

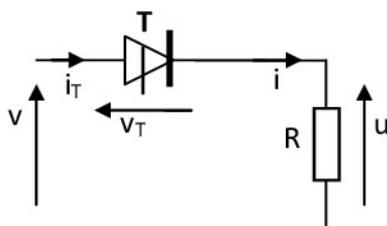
Pour amorcer un thyristor : il faut que la tension v_{AK} soit positive et un courant de gâchette suffisant le temps que i_{AK} s'établisse. Le thyristor se comporte alors comme un interrupteur fermé.

Pour bloquer le thyristor : il faut annuler le courant i_{AK} ou appliquer une tension v_{AK} négative. Le thyristor se comporte alors comme un interrupteur ouvert.

2. Redresseur monophasé à thyristors (Charge résistive)

Redresseur simple alternance

Schéma du montage :



- v : est la tension d'entrée du montage.
- u : est la tension de sortie.
- v_T : est la tension aux bornes du thyristor
- R : est la charge résistive.

Analyse du fonctionnement :

Le thyristor est supposé parfait.

$$v(\theta) = V\sqrt{2} \sin \theta$$

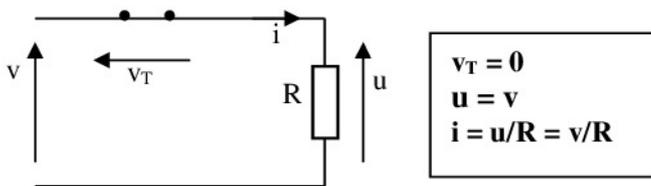
$$0 < \theta < \pi \rightarrow v > 0$$

- Pas d'impulsion sur la gâchette : $u = 0$ et $i = 0$
- Loi des mailles donne : $v - v_{AK} - u = 0 \rightarrow v_{AK} = v - u = v > 0$

Donc le thyristor est susceptible d'être amorcé.

L'amorçage s'effectue avec le retard t_0 , qui correspond à l'angle $\alpha = \omega \cdot t_0$ appelé *l'angle de retard à l'amorçage*, après chaque début de période T.

à $\theta = \alpha$ le thyristor est amorcé

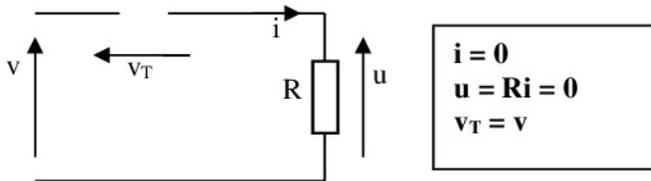


à $\theta = \pi$

Le courant i s'annule ce qui bloque le thyristor.

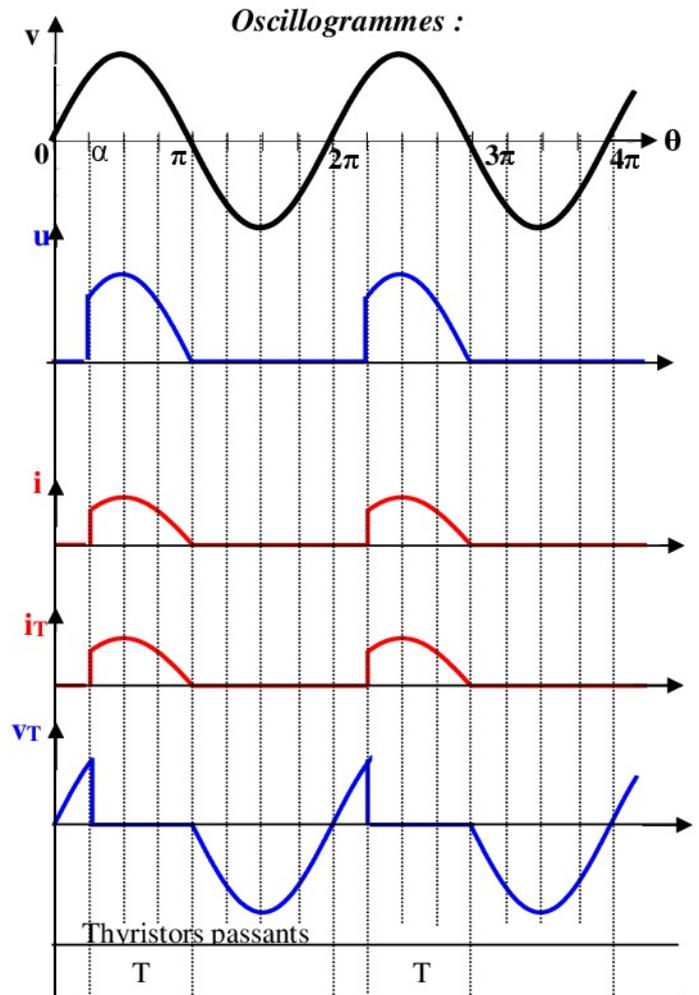
$\pi < \theta < 2\pi \rightarrow v < 0$

Si l'on envoie un courant de gâchette alors que la tension est négative, le thyristor reste bloqué



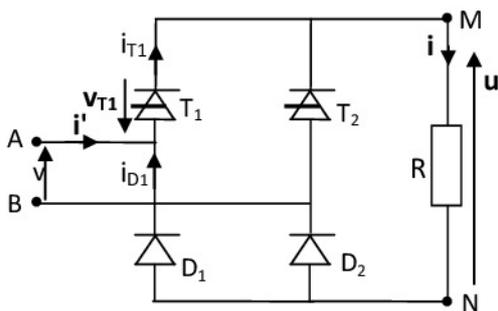
Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u
 $\bar{u} = V\sqrt{2}/\pi \cdot (1 + \cos \alpha)/2$
- Valeur efficace de la tension u
 $U = V\sqrt{2}/2 \cdot \sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$
- Tension maximale supportée par le thyristor :
 $V_{Tmax} = V\sqrt{2}$



Redresseur mixte double alternance PD2 (Pont de Graëtz)

Schéma du montage



v est la tension d'entrée du montage.
 u est la tension de sortie.
 v_{T1} est la tension aux bornes du thyristor T_1
 R est la charge résistive.

Analyse du fonctionnement

$\theta = \alpha : v > 0 \rightarrow v_A > v_B$

Le thyristor T_1 est susceptible d'être amorcé.

Il est amorcé, le courant i circule la maille : $A \rightarrow T_1 \rightarrow \text{charge} \rightarrow D_2 \rightarrow B$

On en déduit que :

$$\begin{aligned}
 u &= v_M - v_N = v_A - v_B = v \\
 i &= u / R = v / R \\
 i' &= i \\
 v_{T1} &= v_{D2} = 0 \\
 v_{T2} &= v_{D1} = -v
 \end{aligned}$$

Lorsque θ franchit π $v < 0 \rightarrow v_B > v_A$

Le thyristor T_2 est susceptible d'être amorcé mais il ne sera amorcé que lorsque $\theta = \pi + \alpha$. Par contre D_2 se met à conduire dès que $\theta > \pi$. Ainsi ($\pi < \theta < \pi + \alpha$), la charge est court-circuitée par T_1 et D_2 d'où $u = 0$

$\theta = \pi + \alpha$: $v < 0 \rightarrow v_B > v_A$

T_2 est amorcé, le courant i circule la maille :

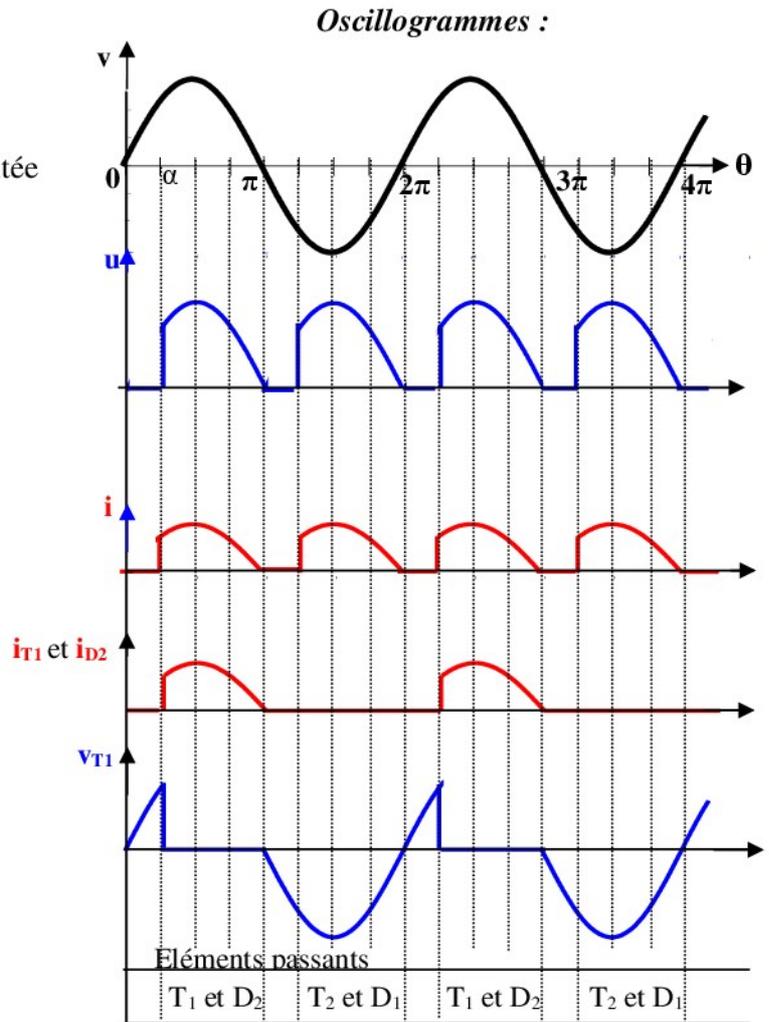
$B \rightarrow T_2 \rightarrow \text{charge} \rightarrow D_1 \rightarrow A$

On en déduit que :

$u = v_M - v_N = v_B - v_A = -v$
 $i = u / R = -v / R$
 $i' = -i$
 $v_{T2} = v_{D1} = 0$
 $v_{T1} = v_{D2} = v$

Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u
 $\bar{u} = 2V\sqrt{2}/\pi \cdot (1 + \cos \alpha)/2$
- Valeur efficace de la tension u
 $U = V \cdot \sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$
- Tension maximale supportée par les éléments:
 $v_{Tmax} = v_{Dmax} = V\sqrt{2}$



III. Onduleur autonome

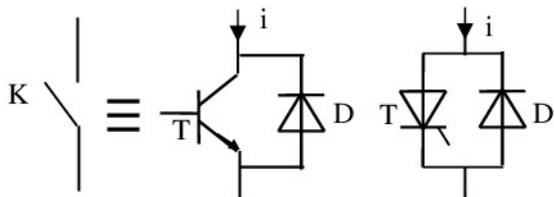
Un onduleur est un convertisseur continu - alternatif

Il est autonome lorsqu'il impose sa propre fréquence à la charge.



1. Interrupteurs électroniques

L'interrupteur peut être à transistor (ou thyristor si grande puissance), plus une diode de récupération (indispensable si la charge est inductive).



- **K** ouvert \leftrightarrow **T** bloqué et **D** en inverse
- **K** fermé \leftrightarrow **T** commandé :
 - si $i > 0$: **T** conduit
 - si $i < 0$: **D** conduit

2. Commandes

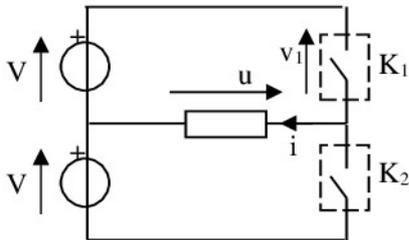
La commande dans un onduleur peut être : symétrique, décalé ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

2.1. Commande symétrique

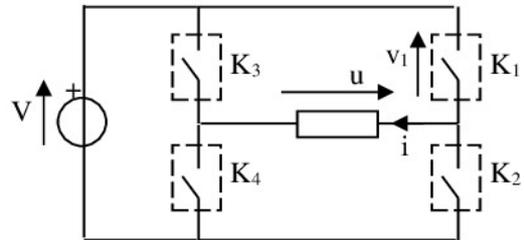
Il s'agit d'actionner alternativement les interrupteurs K_1 et K_2 ou (K_1, K_4 et K_2, K_3) durant des intervalles de temps réguliers.

Montages :

Onduleur en demi-pont à deux interrupteurs



Onduleur en pont à quatre interrupteurs



Analyse du fonctionnement :

Montage en demi-pont

$0 < t < T/2$

K_1 est fermé
 K_2 est ouvert
 $\Rightarrow v_1 = 0$
 $u = V$
 $i = V/R$

$T/2 < t < T$

K_1 est ouvert
 K_2 est fermé
 $\Rightarrow u = -V$
 $i = -V/R$
 $v_1 = V - u = 2.V$

Montage en pont

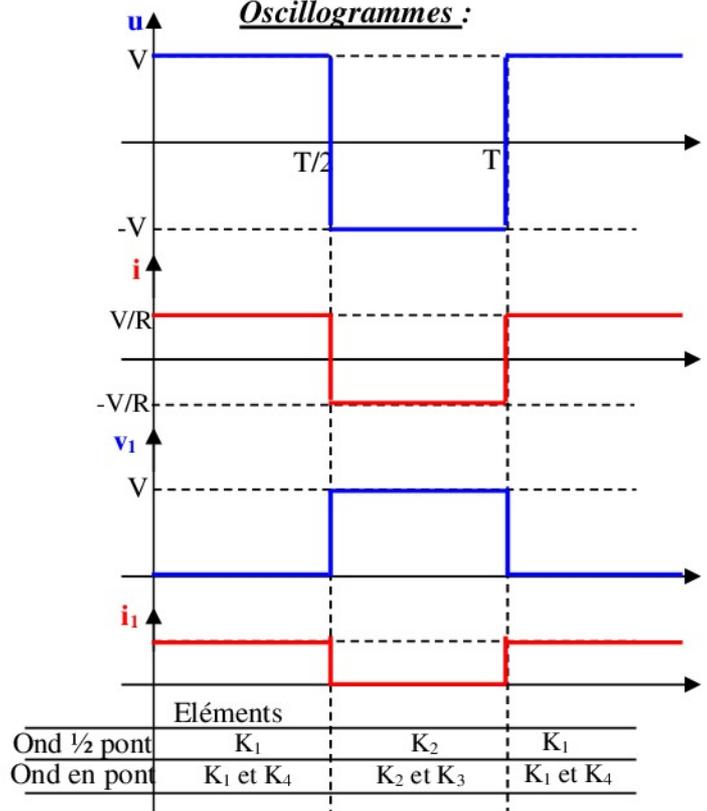
$0 < t < T/2$

K_1 et K_4 sont fermés
 K_2 et K_3 sont ouverts
 $\Rightarrow v_1 = 0$
 $u = V$
 $i = V/R$

$T/2 < t < T$

K_1 et K_4 sont ouverts
 K_2 et K_3 sont fermés
 $\Rightarrow u = -V$
 $i = -V/R$
 $v_1 = -u = -(-V) = V$

Oscillogrammes :



Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension u : $\bar{u} = 0$.

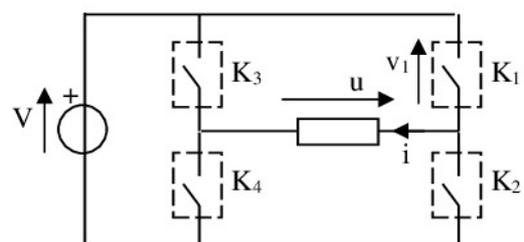
Valeur efficace de la tension u : $U = V$.

Tension maximale supportée par les interrupteurs : V (en pont) et $2V$ (en demi-pont).

2.2. Commande décalée (onduleur en pont)

Dans la commande précédente la tension, ainsi que le courant, sont riches en harmoniques ce qui pose des problèmes pour une utilisation avec des moteurs (pertes joules, couples pulsatoires ...).

La commande décalée permet d'éliminer en partie ces harmoniques et améliore donc le convertisseur.



Analyse du fonctionnement :

La fermeture des interrupteurs d'un bras est décalée de l'angle α .

$0 < t < \alpha$

K_1 et K_3 sont fermés $\Rightarrow u = 0$

$\alpha < t < T/2$

K_1 et K_4 sont fermés $\Rightarrow u = V$

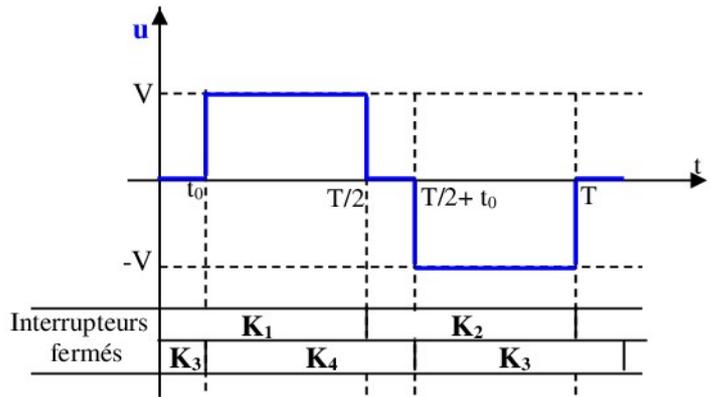
$T/2 < t < T/2 + \alpha$

K_2 et K_4 sont fermés $\Rightarrow u = 0$

$T/2 + \alpha < t < T$

K_2 et K_3 sont fermés $\Rightarrow u = -V$

Oscillogrammes :



Grandeurs caractéristiques :

Valeur moyenne de la tension u : $\bar{u} = 0$.

Valeur efficace de la tension u : $U = V\sqrt{(1 - 2t_0/T)}$ ou $U = V\sqrt{(1 - \alpha/\pi)}$.

Tension maximale supportée par les interrupteurs : V .

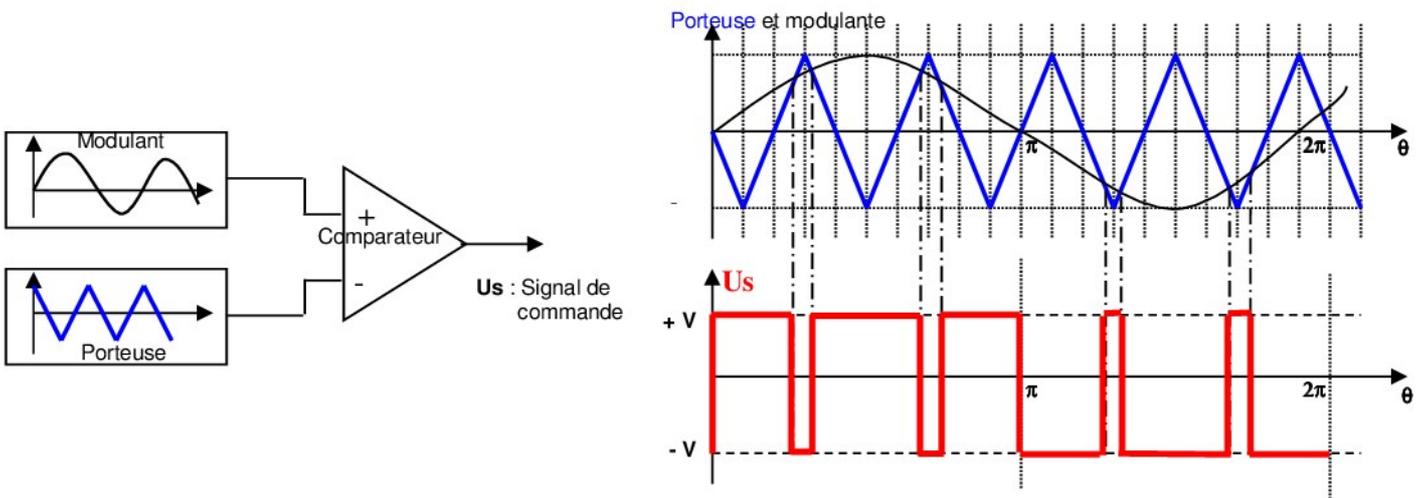
2.3. Commande par Modulation de Largeur d'Impulsion MLI ou PWM (Pulse Width Modulation) en anglais

Ici, il y a modulation par un signal modulant sinusoïdal. Pour obtenir la tension de commande des transistors, on compare un signal triangulaire appelé porteuse au signal modulant sinusoïdal de fréquence beaucoup plus faible.

La tension aux bornes de la charge est fragmentée en plusieurs impulsions de tension (négative et positive). Cette fragmentation permet si elle est savamment calculée d'éliminer les harmoniques gênants. L'allure de la tension MLI permet de se rendre compte du principe de cette commande.

Principe de commande MLI du bras $K_1 - K_2$:

L'onde modulante, est comparée à l'onde porteuse et à la sortie du comparateur on obtient la tension de commande U_s .



IV. Gradateur

Le gradateur est un convertisseur alternatif - alternatif, capable de faire varier la tension efficace aux bornes d'une charge.

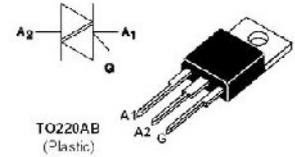
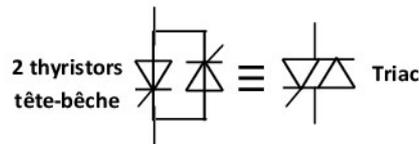


I. Gradateur monophasé (débit sur charge résistive)

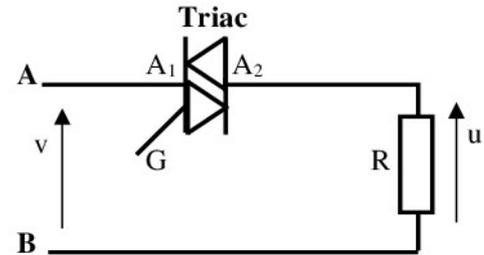
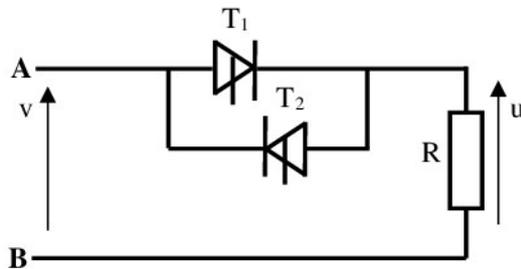
I.1. Interrupteurs électroniques

L'interrupteur est constitué par deux thyristors tête-bêche.

Pour les faibles puissances, les deux thyristors sont remplacés par un triac.



I.2. Montage



I.3. Commandes

Les deux thyristors doivent être commandés avec le même angle de retard α pour obtenir une tension u alternative (valeur moyenne nulle).

Deux modes de commande de l'énergie transférée à la source sont possibles :

- **commande par la phase** : la variation de la valeur efficace U est obtenue en agissant sur l'angle de retard α .
- **commande par train d'ondes** : les deux thyristors sont commandés plein onde pendant le temps T_{on} (période de conduction) puis sont bloqués jusqu'à la fin de la période de modulation. La variation de T_{on}/T_c permet de commander la tension efficace U .

Commande par la phase

Analyse du fonctionnement :

$0 < \theta < \pi : v > 0 \rightarrow v_A > v_B$

Le thyristor T_1 est susceptible d'être amorcé.

A $\theta = \alpha$ T_1 est amorcé, le courant i circule la maille :

$A \rightarrow T_1 \rightarrow R \rightarrow B$

On en déduit que :

$u = v$

$i = u / R = v / R$

T_1 se bloque naturellement en $\theta = \pi$ ($i = 0$).

$\pi < \theta < 2\pi : v < 0 \rightarrow v_B > v_A$

Le thyristor T_2 est susceptible d'être amorcé.

A $\theta = \pi + \alpha$ T_2 est amorcé, le courant i circule la maille :

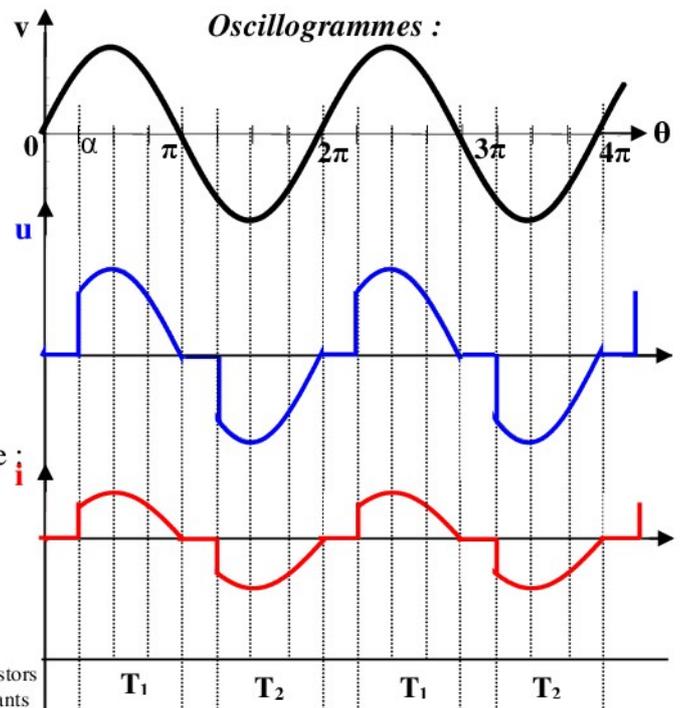
$B \rightarrow R \rightarrow T_2 \rightarrow A$

On en déduit que :

$u = v$

$i = u / R = v / R$

T_2 se bloque naturellement en $\theta = 2\pi$ ($i = 0$).



Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\bar{u} = 0$ (tension alternative)
- Valeur efficace de la tension u : $U = V \cdot \sqrt{1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi}$
- Tension maximale supportée par les éléments : $v_{Tmax} = V\sqrt{2}$

Commande par train d'ondes

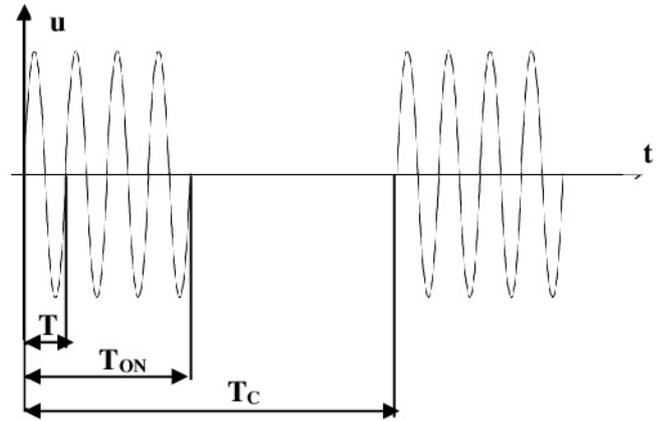
Dans ce type de gradateur, le signal envoyé sur l'entrée de commande du gradateur est de type TOR.

Avec :

T : période du réseau

T_{ON} : Durée du train d'ondes,
(Temps de conduction)

T_c: Temps de cycle du gradateur



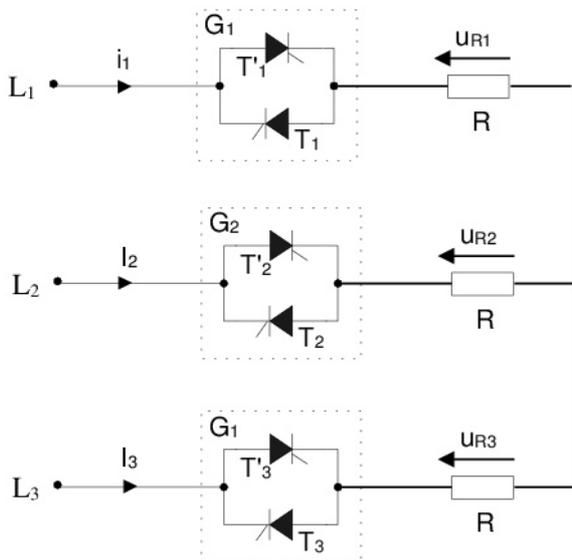
Grandeurs caractéristiques :

- Valeur moyenne de la tension u : $\bar{u} = 0$ (tension alternative)
- Valeur efficace de la tension u : $U = V \cdot \sqrt{\alpha}$ avec α (rapport cyclique) = T_{ON}/T_C
- Tension maximale supportée par les éléments : $V_{Tmax} = V\sqrt{2}$

2. Gradateur triphasé

Il existe deux montages de gradateur triphasé :

Montage étoile



Montage triangle

