

Chapitre 1: Description de conducteurs de puissance (Diodes, Transistors, thyristors, Triac...)

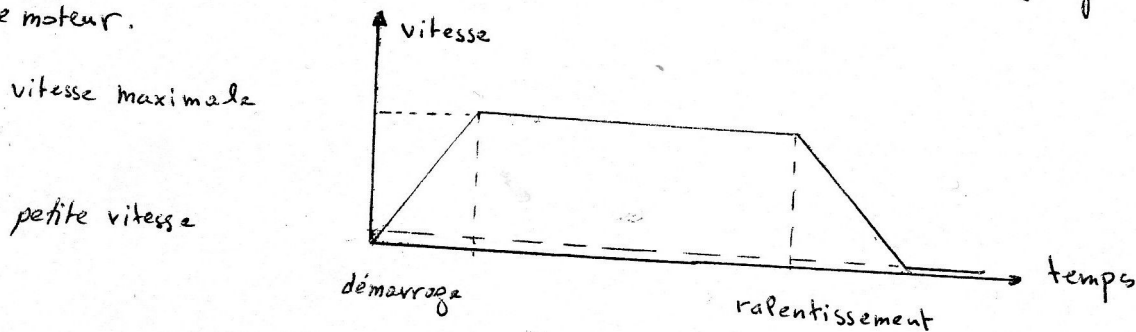
I.1 Introduction:

L'électronique de puissance a pour objet l'étude de la variation de la puissance en variant la tension ou le courant de la source et en utilisant les semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs sont utilisés en électronique de puissance comme des contacteurs statiques (élément de commutation) \Rightarrow (état de ouverture - état de fermeture).

Applications:

En générale, nous sommes intéressés à la commande (régulation) de la vitesse de moteur.



I.2. Semi-conducteurs:

Il existe des matériaux conducteurs (cuivre - aluminium, ...) et des matériaux isolants (plastique - bois, ...), entre ces deux matériaux on trouve les semi-conducteurs.

I.2.1 Semi conducteurs purs: Si, Ge

Le silicium est un corps pur très répandu dans la nature et qui joue un rôle très important dans l'électronique.

Il comprend 14 électrons, seuls les quatre électrons sur la couche extérieure nous intéressent. (Figure 1).

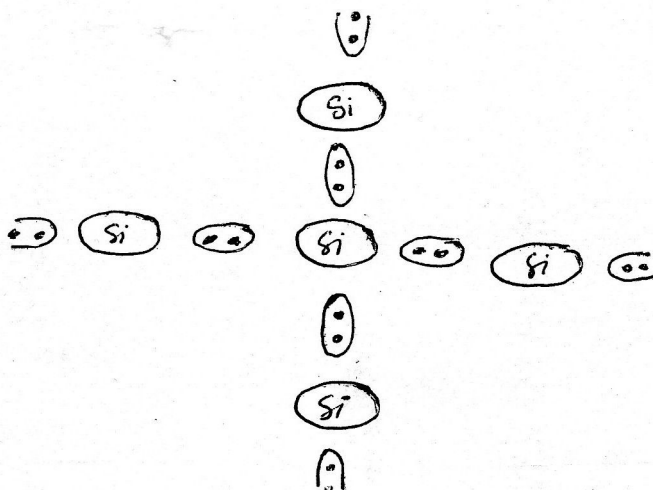


Figure 1.

A basses températures, le semi-conducteurs se comporte comme un isolant parce que l'électron de valence est lié à son environnement (Figure 1).

L'augmentation de la température rompe les liaisons ce qui permet de libérer des électrons de valence. (Figure 2).

Le mouvement de ces électrons est aléatoire (état de conductibilité électrique σ_{AS}).

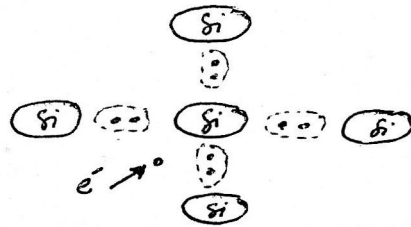


Figure 2.

I. 2. 2. Semi-conducteurs de type N :

Il existe dans la nature des corps qui possèdent cinq électrons de valence (P: phosphore, Ar: Arsenic, ...).

si l'on place un de ces corps en proportions très infime dans un cristal de silicium on constate que celui-ci devient conducteurs (il en résulte un électron de liaison supplémentaire). Figure 3.

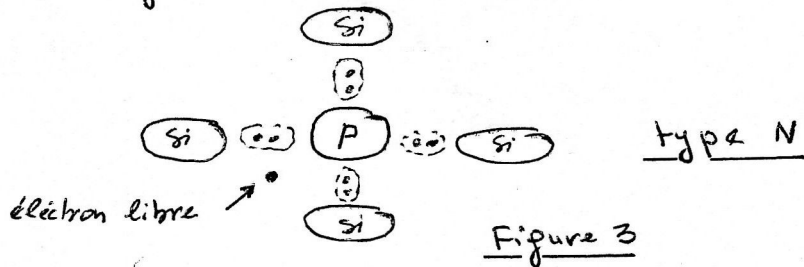


Figure 3

I. 2. 3. Semi-conducteurs de type P :

Il existe aussi des corps qui possèdent 3 électrons de valence (B: bore, Al: Aluminium, ...). L'ajout au silicium des atomes de B, ou Al, résulte un déficit d'un électron de valence, ou un trou associé à l'atome de (B ou Al)

On constate également que le cristal (Si) devient conducteur de l'électricité Figure 4.

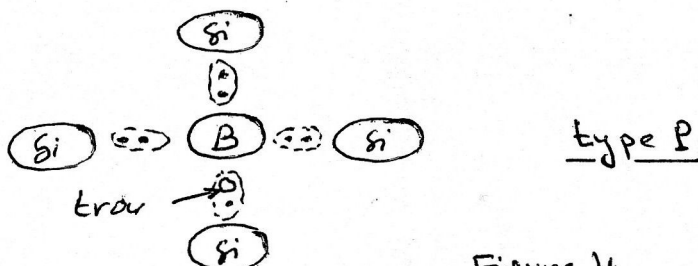


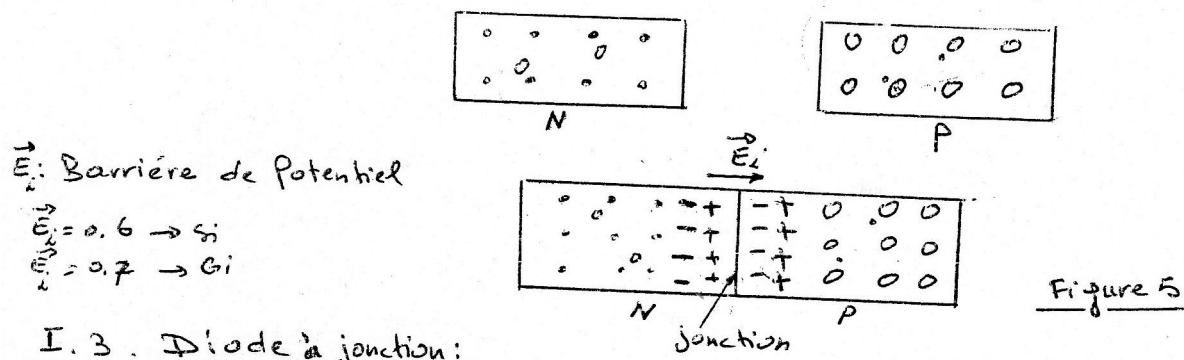
Figure 4

Remarque :

on introduit un atome d'impureté pour 10 millions environ d'atomes de silicium. Ce procédé est appelé 'dopage'.

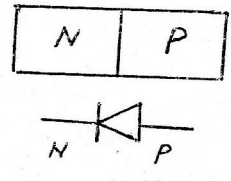
I.2.4. Etude de la jonction PN :

On mis en contact un semi conducteur de type P et un semi-conducteur de type N, donc il y'a formation d'une jonction PN. (Figure 5).



I.3. Diode à jonction :

La diode est un composant électronique qui comprend un semi conducteur P et un semi-conducteur N.



I.3.1. polarisation d'une diode :

a/ polarisation directe :

Lorsque la borne ⊕ du générateur est reliée à l'extrémité P de la diode, et la borne ⊖ est reliée à la partie N, on dit que la diode est polarisée en directe (Figure 6). Tant que E n'a pas dépassé un certain seuil de tension ⇒ la diode est bloquée $I_d = 0$.

Lorsque $E > E_i$ ⇒ la diode est passante.

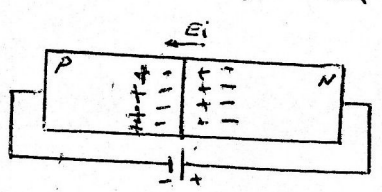
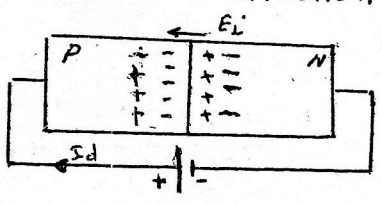
b/ polarisation inverse :

Lorsque on inverse la polarité du générateur donc la tension E a la même sens que E_i (Barrière de potentiel) ⇒ la diode est bloquée (Figure 7). $I_{inv} \approx 0 = I_0 \cdot \exp\left(\frac{V}{n \cdot V_T}\right)$

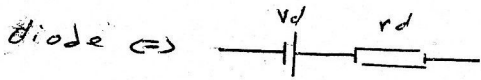
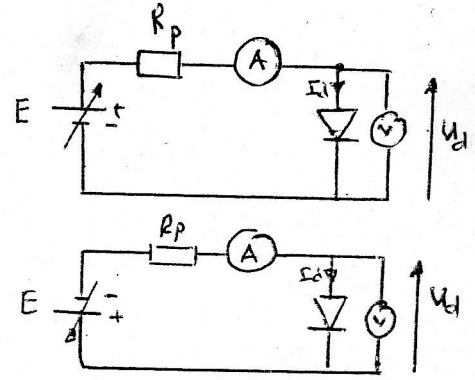
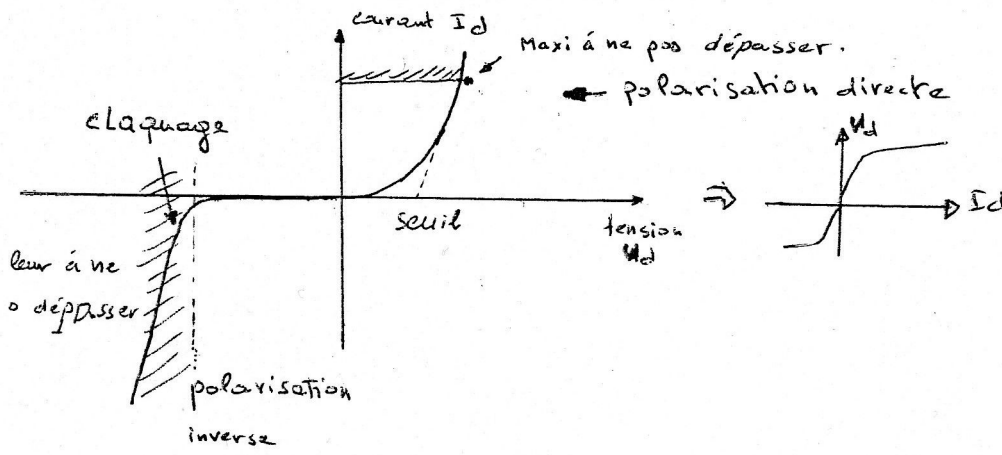
Si $E < E_i$ ⇒ un courant inverse apparaît. ↑

Si $E \gg E_i$ ⇒ la destruction de la diode. (claquage)

$V_T = 25 \text{ mV} \rightarrow 27^\circ \text{C}$
 I_0 : تيار الأقلية
 n: coeff
 V: tension de la diode
 I_0 : courant minoritaire



I.3.2. Caractéristique d'une diode:



• état bloqué: \rightarrow R $R \rightarrow \infty$

• état passante: \rightarrow v_d r_d

Remarque:

- la diode idéal $v_d = 0 \Rightarrow$ tension de seuil = 0
- diode normale, diode de puissance

I.3.3. Les paramètres de performances:

- Température (t° de jonction, t° stockage --)
- Résistance \uparrow (résistance thermique).
- Le courant (I_{MAX} moyen direct, I_{MAX} I_{eff} --)
- La tension (Max de tension inverse, chute de tension, MAX de tension direct --)

I.3.4. Avantages et Inconvénient:

Avantages de diode:

- Isolation galvanique
- Moins chère
- Circuit de commande simple.
- Faible chute de tension.

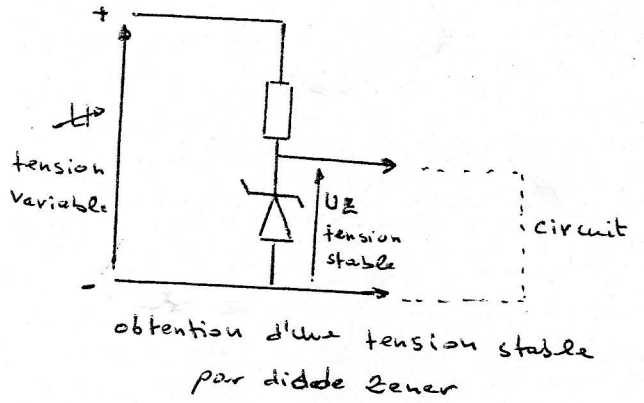
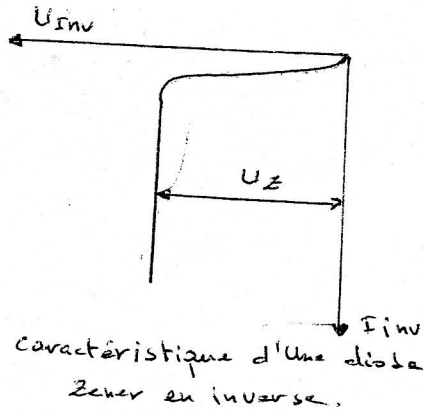
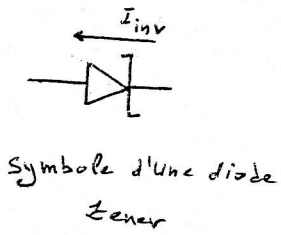
Inconvénient

- courant quelques centaines de Ampères
- tension 50V \rightarrow 3KV.

I.3.5. Diode Zener:

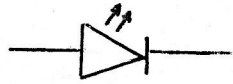
La diode Zener est une diode un peu particulière. Elle peut fonctionner en direct, comme une diode normale, Elle peut fonctionner aussi en inverse (La tension U_Z est une caractéristique droite, parallèle à l'axe des courant).

La diode Zener est utilisée pour les courants faibles, et ce composant permet de réaliser des tensions stables ou de limiter de tension aux bornes d'un circuit.



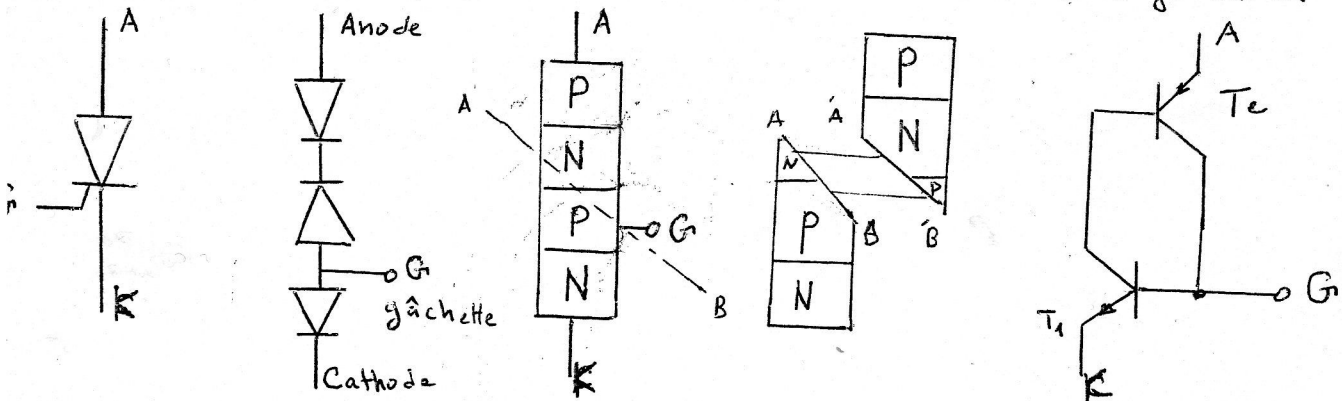
I.3.6 Diode électroluminescentes: (DEL)

Il s'agit d'une diode qui a la propriété d'émettre une lumière rouge, verte ou jaune lorsqu'elle est parcourue par un courant. il est à noter que la tension inverse est souvent très faible.



I.4. Thyristor:

Le thyristor est un semi-conducteur à 4 éléments et 3 jonction.



a/ polarisation directe:

En l'absence de commande, ne l'aisse pas passer le courant I_{AK} . ($I_G = 0 \Rightarrow I_{AK} = 0$)
 - Si l'on envoie sur la porte G une tension positive par rapport à la cathode, le Thyristor devient conducteur + $V_{AK} > 0$, et reste conducteur après suppression de la commande. (Le courant est toujours dans le sens Anode - cathode.)

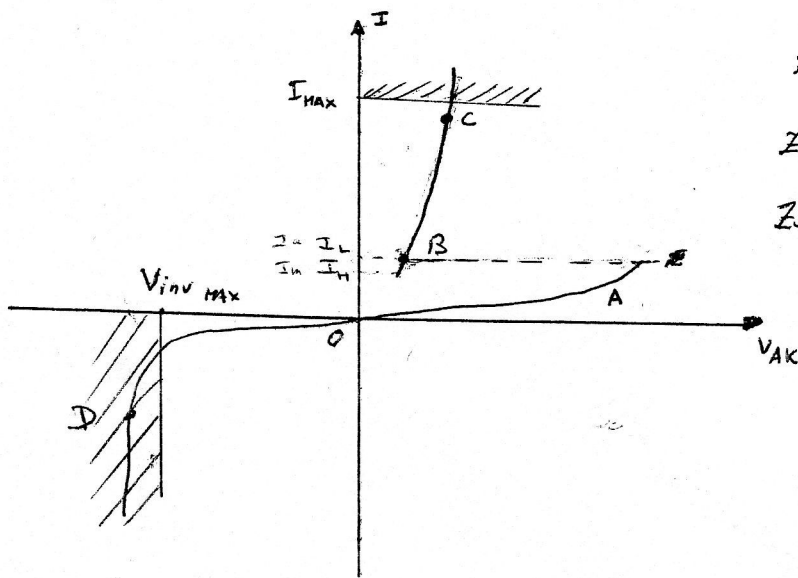
b/ polarisation inverse:

Le blocage du thyristor s'effectue si l'on inverse la tension entre Anode et cathode ou si le courant $I = 0$ ($I < I_{maintien}$)

$$\begin{cases} V_{AK} < 0 \\ I = 0 \text{ (} I < I_m \text{)} \end{cases} \Rightarrow \text{bloqué}$$

d/ Caractéristique d'un thyristor :

on trouve une zone OA dans laquelle le thyristor est bloqué, une zone BC dans laquelle le thyristor est conducteur et qui ressemble à celle d'une diode, enfin, une zone OD caractéristique dite en inverse qui ~~se~~ ressemble elle aussi à celle d'une diode. il est à noter que si l'on dépasse la tension $V_{i, \max}$ en inverse, on risque de destruction du thyristor, de même que si le courant en direct dépasse une certaine limite. (les valeurs limites sont indiquées par le constructeur).



Zone OA: thyristor bloqué en direct
Zone BC: " conducteur
Zone OD: " en inverse.

Caractéristique du thyristor

e/ Les avantages et l'inconvénients du thyristor :

Les Avantages du thyristor sont :

- La commande par impulsion
- L'isolement galvanique de la commande facilement réalisable.
- La protection possible par des fusibles adaptés aux semi-conducteurs.
- plus robuste.

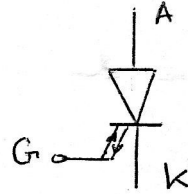
Les inconvénients du thyristor sont :

- Les pertes de conduction supérieures à celles du transistor.
- Les pertes de commutation plus élevées
- la fréquence de commutation fonctionnellement limitée.

I-5. Thyristor GTO: "the Gate Turn-off thyristor"
 "Un thyristor blocable par la gâchette".

Un thyristor GTO est symbolisé par une double gâchette.

- Si l'on envoie sur la gâchette une impulsion de courant positive et suffisante
 → Le thyristor GTO devient conducteur (même ^{fonctionnement} comparé de celui du thyristor classique)
- Le blocage du thyristor GTO s'effectue si ~~on~~ on envoie sur la gâchette une impulsion de courant négative.



Les avantages du thyristor GTO sont:

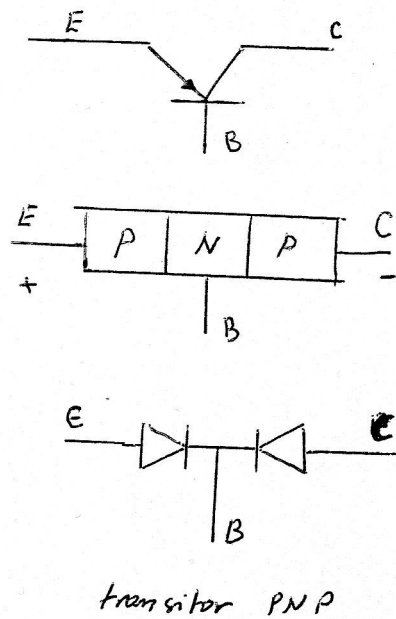
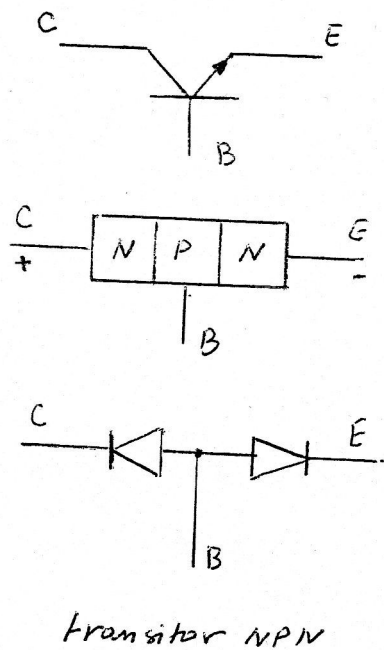
- La commande du courant principal par la gâchette.
- Le circuit de puissance simple.

Les inconvénients du thyristor GTO sont:

- Les circuits de commande compliqués.
- La chute de tension à l'état passant plus élevée que pour les thyristor.

I.6. Transistors bipolaires:

Ce sont les plus anciens. ils sont encore très utilisés pour les puissance relativement élevées. la figure suivante donne le symbole des deux types de transistor NPN et PNP. Ces composants comprennent 3 bornes: l'émetteur, le collecteur et la base, et sont constitués de semi-conducteurs N et P.

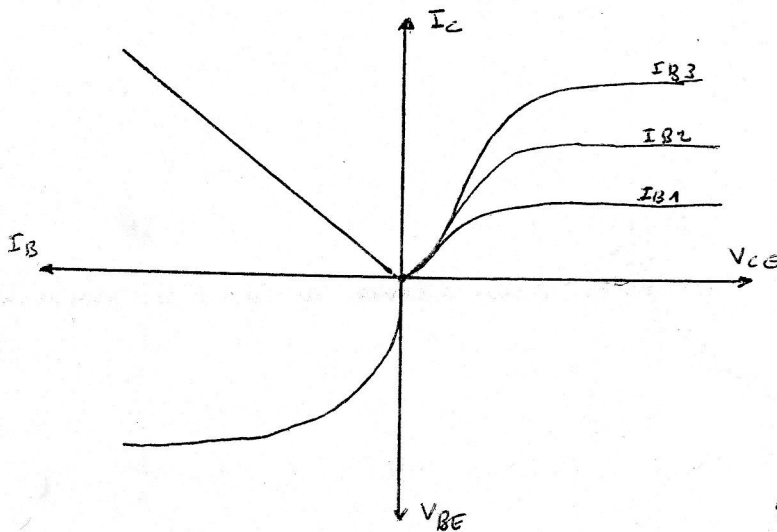


- Si $i_B < 0 \Rightarrow$ Le transistor est bloqué
- Si $i_B > 0 \Rightarrow$ Le transistor est conducteur.

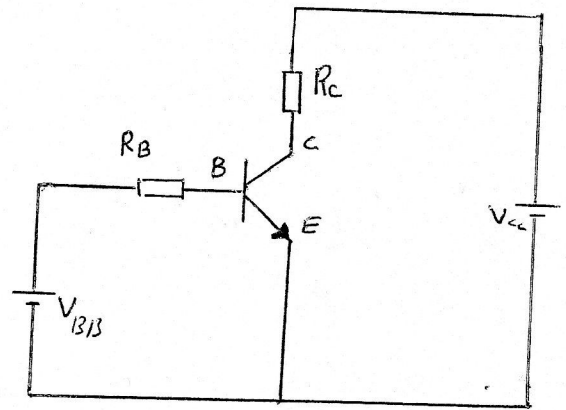
- Les transistors sont utilisés généralement comme des amplificateurs de puissance mais dans notre applications le transistor est considéré comme une contacteur statique (état de ouverture - état de fermeture)

- L'équation de courant: $I_E = I_C + I_B$
- L'équation de tension: $V_{EC} = V_{BE} + V_{BC}$
- Le coefficient d'amplification en courant est: $\beta = \frac{I_C}{I_B}$

a/ Caractéristique d'un transistor:



Caractéristique d'un transistor



Montage pour l'étude d'un transistor NPN

b/ Les avantages et l'inconvénients du transistor:

• Les avantages sont:

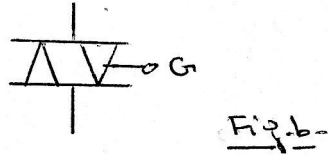
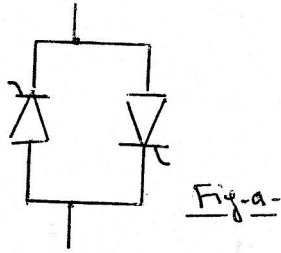
- La faible chute de tension à l'état passant.
- Les faibles pertes de commutation.
- Le temps de réaction faible.

• Les inconvénients sont:

- Le prix élevé.
- La commande continue de la base.
- Les difficultés d'isolement galvanique de la commande.

I.7. Triac :

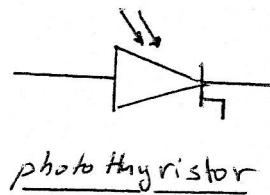
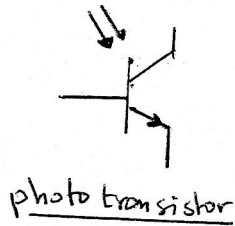
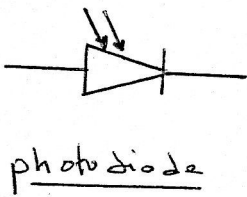
Le thyristor ne laisse passer le courant que dans un sens. Si l'on désire faire passer un courant alternatif, il faut soit mettre deux thyristors tête-bêche (fig a), soit utiliser un composant électronique appelé 'triac', équivalent à ce dernier schéma. Le symbole est donné à la (figure b). Actuellement, le triac est limité en tension et en intensité. il sert donc pour les variateurs de petite puissance ou pour commander des contacteurs et des relais à partir de l'électronique bas-niveau.



I.8. Composants opto-électroniques :

Ces composants électroniques ont des caractéristiques variables en fonction de l'éclairement.

Nous avons déjà vu les diodes électroluminescentes (DEL). Certains composants ont un fonctionnement inverse, par exemple la photodiode dont le courant varie en fonction de la lumière reçue, le photodiode transistor ou le photothyristor, sensibles eux aussi à l'éclairement reçu.

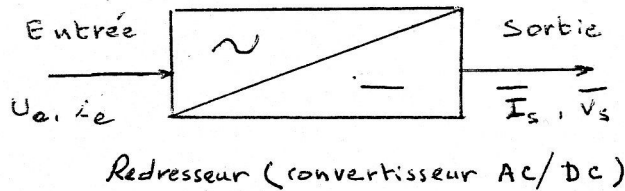


Chapitre 2: Les Montages Redresseurs

II.1. Définition:

Le redresseur est un dispositif électronique, il convertit une tension alternative en une tension continue d'utilisation.

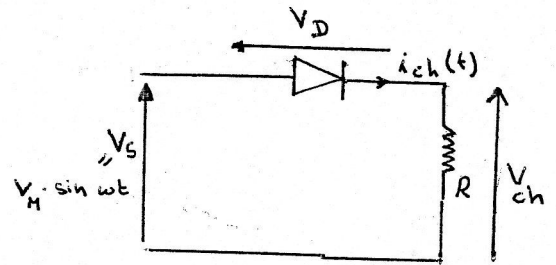
Cette tension continue n'est pas constante comme celle d'une batterie, elle contient des ripples superposés au niveau moyen.



II.2. Les paramètres de performances:

• La valeur moyenne de la tension de sortie: $\omega t = \theta$

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V_m \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$



• La valeur moyenne de courant de sortie:

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{ch}(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{V_{ch}}{R} \cdot d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{V_m}{R} \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$

• La valeur efficace de courant de sortie:

$$I_{eff} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T i_{ch}^2(t) \cdot dt \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{V_m^2}{R^2} \sin^2 \theta \cdot d\theta \right)^{1/2}$$

• La valeur efficace de la tension de sortie:

$$V_{eff} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}^2(t) \cdot dt \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot d\theta \right)^{1/2}$$

• La puissance a.c de sortie entrée:

$$P_{ac} = V_{eff} \cdot I_{eff}$$

• La puissance d.c de sortie:

$$P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{dc}$$

• Le rendement de redresseurs:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

• La valeur efficace effective de la composante ac de la tension de la sortie:

$$V_{ac} = \sqrt{V_{eff}^2 - V_{dc}^2}$$

• Facteur de forme:

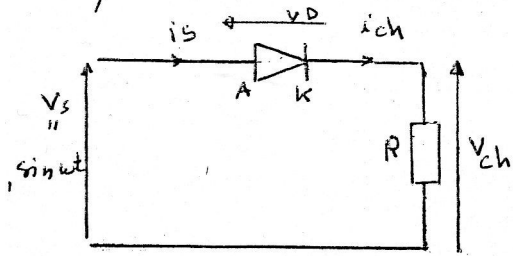
$$FF = \frac{V_{eff}}{V_{ac}}$$

• Facteur d'onduation:

$$FO = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \sqrt{\frac{V_{eff}^2 - V_{dc}^2}{V_{dc}^2}} = \sqrt{FF^2 - 1}$$

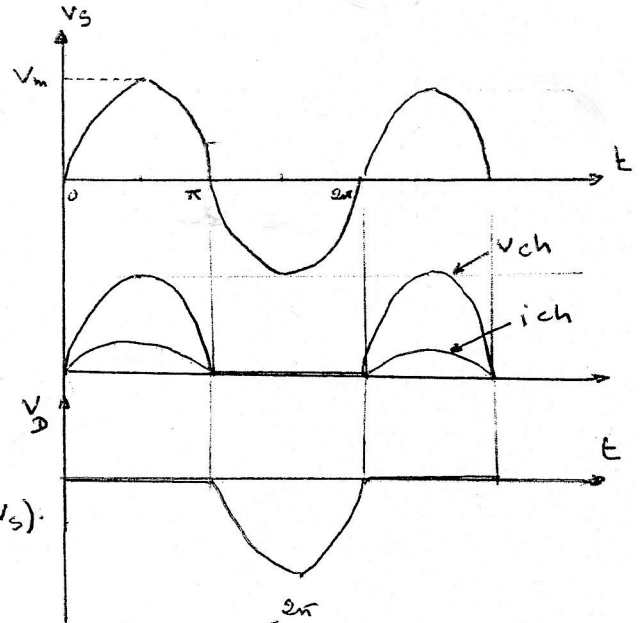
II.3. Les redresseurs mono-phasé simple:

a/ à l'aide de diode (charge R):



$$V_s = V_m \sin \omega t$$

$$V_m = \sqrt{2} V_s$$



$$V_s - V_D - V_{ch} = 0 \Rightarrow V_{ch} = V_s - V_D$$

- $V_s > 0 \Rightarrow$ Diode passante $\Rightarrow V_D = 0 \Rightarrow V_{ch} = V_s$
- $V_s < 0 \Rightarrow$ Diode bloquée $\Rightarrow V_{ch} = 0$ ($V_D = V_s$).

- Valeur efficace $V_{ch\text{eff}}$, $I_{Ch\text{eff}}$

$$V_{ch\text{eff}} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}^2(t) dt \right)^{1/2} = \left(\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m^2 \sin^2 \theta d\theta \right)^{1/2} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \left[\frac{\omega \sin^2 \theta}{2} \right]_0^{2\pi} \Rightarrow$$

$$V_{ch\text{eff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \left[\int_0^{2\pi} d\theta - \int_0^{2\pi} \cos 2\theta d\theta \right] = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{2\pi} \Rightarrow V_{ch\text{eff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{Ch\text{eff}} = \frac{V_{ch\text{eff}}}{R} = \frac{V_m}{\sqrt{2} R} = I_{Ch\text{eff}}$$

Remarque:

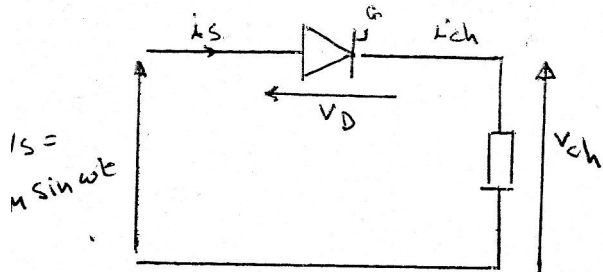
$$\cos^2 \theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \quad ; \quad \sin^2 \theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$$

- Valeur moyenne:

$$\bar{V}_{ch} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \theta d\theta = \frac{V_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin \theta d\theta = -\frac{V_m}{2\pi} (\cos \theta) \Big|_0^{\pi} = -\frac{V_m}{2\pi} (-1 - 1) \Rightarrow \frac{V_m}{\pi} = \bar{V}_{ch}$$

$$\bar{I}_{ch} = \frac{\bar{V}_{ch}}{R} \Rightarrow \frac{V_m}{R \cdot \pi} = \bar{I}_{ch}$$

b/ à l'aide de thyristor (charge R):



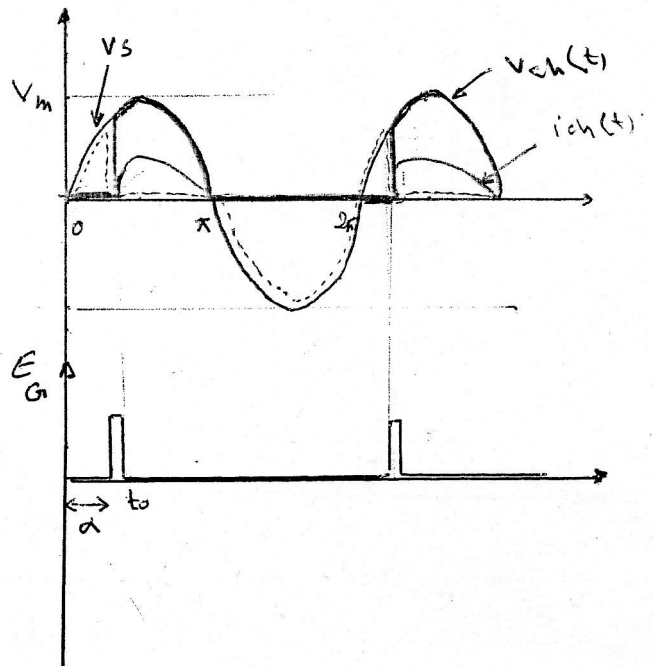
$$V_s - V_{Dthy} - V_{ch} = 0$$

à l'instant $t=0$ $v_{ch}=0 \Rightarrow V_s = V_{thy}$

• $V_s > 0 \Rightarrow V_{thy} > 0$

à l'instant t_0 ($V_{AK} > 0$ et $i_G \neq 0$)

\Rightarrow Le thyristor conduit $\Rightarrow V_s - V_{thy} = V_{ch} = 0$



angle d'amorçage: α

$0 < \omega t < \alpha$	thy OFF	$i_{ch}(t) = 0$	$v_{ch} = 0$
$\alpha < \omega t < \pi$	thy ON	$i_{ch}(t) = \frac{v_{ch}(t)}{R}$	$v_s = v_{ch}, v_{thy} = 0$
$\pi < \omega t < 2\pi$	thy OFF	$i_{ch}(t) = 0$	$v_{thy} = v_{ch}, v_{ch} = 0$

Remarque:

à l'instant $t = \pi \Rightarrow [V_{AK} < 0 \text{ et } i_{ch} = 0] \Rightarrow \text{thyristor bloqué}$
 $\Rightarrow v_{ch} = 0, v_{thy} = v_s$

- Valeur moyenne:

$$\begin{aligned} \bullet \bar{v}_{ch} &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{ch}(t) \cdot dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_{ch}(\theta) \cdot d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v_m \cdot \sin \theta \cdot d\theta = \frac{-v_m}{2\pi} \cdot \cos \theta \Big|_{\alpha}^{\pi} = \frac{-v_m}{2\pi} (\cos \pi - \cos \alpha) \end{aligned}$$

$$\boxed{\bar{v}_{ch} = \frac{v_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha)}$$

$$\bullet \bar{i}_{ch} = \frac{\bar{v}_{ch}}{R}$$

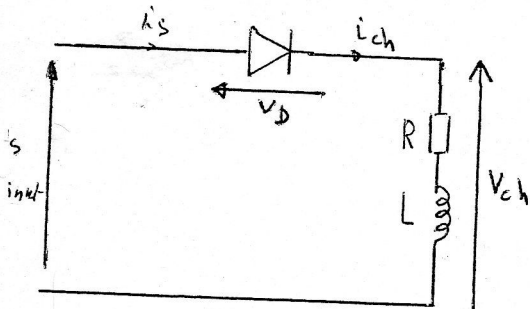
- Valeur efficace:

$$\bullet v_{ch\text{eff}}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v_m^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot d\theta$$

$$\boxed{v_{ch\text{eff}} = \frac{v_m}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)}$$

$$\bullet i_{ch\text{eff}} = v_{ch\text{eff}} / R$$

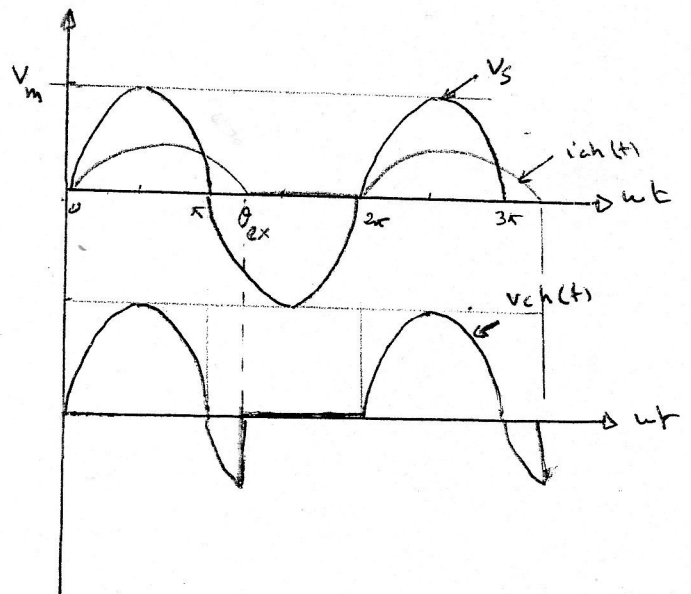
c/à l'aide de diode (charge RL):



$$[0 \rightarrow \pi] \text{ D (ON), } v_D = 0 \Rightarrow v_{ch} = v_s$$

$$[\pi \rightarrow \theta_{ex}] \text{ D (ON), } v_D = 0 \Rightarrow v_{ch} = v_s$$

$$[\theta_{ex} \rightarrow 2\pi] \begin{aligned} v_{ch}(t) &= 0 & (V_{AK} < 0 \text{ et } I = 0) \\ i_{ch}(t) &= 0 \\ v_s(t) &= v_D \end{aligned}$$



$i_{ch}(t) = ?$

$$v_{ch} = R \cdot i_{ch} + L \cdot \frac{di_{ch}}{dt} = v_s = v_m \sin \omega t$$

$$\Rightarrow v_m \sin \omega t = R \cdot i_{ch}(t) + L \frac{di_{ch}(t)}{dt} \quad (\text{E.d})$$

$$i_{ch}(t) = \underbrace{A \cdot e^{-t/\tau}}_{i_L} + \underbrace{\frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\omega t - \varphi)}_{i_p}$$

avec:

$$\text{arc tg } \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}$$

$$\tau = L/R$$

A=?

$$i_{ch}(0) = 0 \Rightarrow A + \frac{V_m}{Z} \sin(-\varphi) = 0 \Rightarrow A = \frac{V_m}{Z} \sin \varphi$$

$$\Rightarrow i_{ch}(t) = \frac{V_m}{Z} \sin \varphi \cdot e^{-t/\tau} + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$

A) > (purement inductive L) φ (avance)
retard

$$v_s = v_{ch} \Leftrightarrow Ri + L \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t$$

$$\begin{cases} Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \rightarrow \textcircled{1} & i_L: \text{homogène} \\ Ri + L \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t \rightarrow \textcircled{2} & i_p: \text{particulier} \end{cases}$$

$$\textcircled{1} \Rightarrow Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{di}{i} = -\frac{R}{L} dt$$

$$\Rightarrow \int \frac{di}{i} = -\frac{R}{L} \int dt$$

$$\Rightarrow \ln i = -\frac{R}{L} t + C$$

$$\Rightarrow e^{\ln i} = e^{-R/L t + C}$$

$$\Rightarrow i = e^{-R/L t} \cdot A \quad \text{avec } A = e^C$$

$$\Rightarrow i_L = A \cdot e^{-t/\tau} \quad \tau = \frac{L}{R}$$

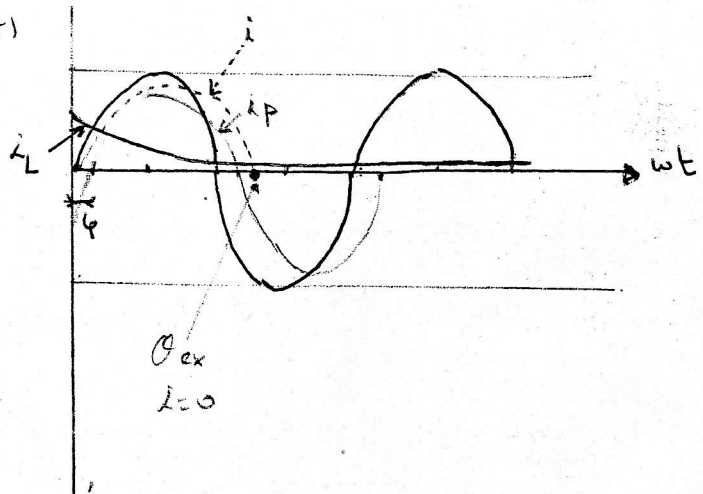
$$\textcircled{2} \Rightarrow Ri + L \frac{di}{dt} = V_m \sin \omega t \Rightarrow Z \cdot i = V_m \sin \omega t$$

$$\Rightarrow i = \frac{V_m \sin \omega t}{Z}$$

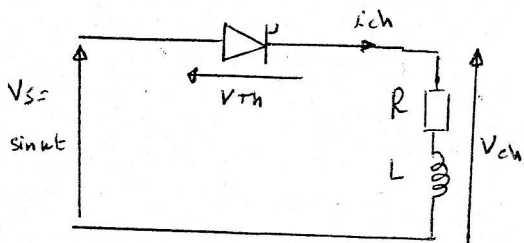
$$\Rightarrow i_p = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$

Solution générale $i_{ch}(t) = i_L(t) + i_p(t)$

$$\Rightarrow i_{ch}(t) = A \cdot e^{-t/\tau} + \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi)$$



α / a l'aide de thyristor (charge RL):



- L'amorçage de thyristor s'effectue à l'instant $\omega t = \alpha$ avec une période de 2π

$\Rightarrow V_{AK} > 0$
 $i_g \neq 0 \Rightarrow$ thyristor conduit.

$$V_s = v_{ch} = R i_{ch}(t) + L \frac{d i_{ch}(t)}{dt} = V_m \sin \omega t$$

$$i_{ch}(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + A \cdot e^{-t/\tau}$$

$A = ? \quad \omega t = \alpha \Rightarrow t = \frac{\alpha}{\omega}$

$$i_{ch}\left(\frac{\alpha}{\omega}\right) = 0 \Rightarrow \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + A \cdot e^{-\frac{\alpha}{\omega \tau}}$$

$$\Rightarrow A = -\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) / e^{-\frac{\alpha}{\omega \tau}}$$

$$\Rightarrow A = \frac{V_m}{Z} \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{\frac{\alpha}{\omega \tau}}$$

donc:

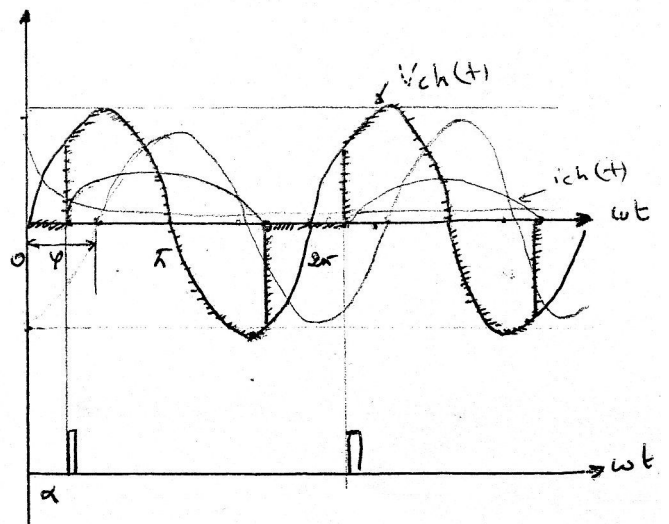
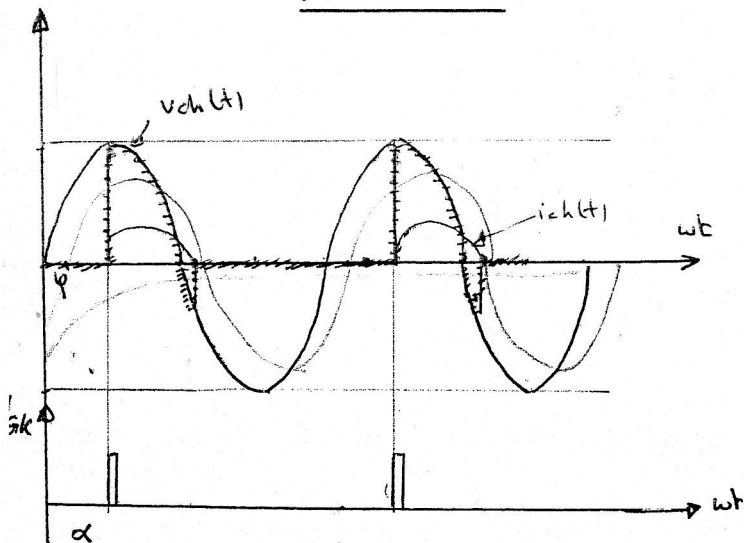
$$i_{ch}(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\varphi - \alpha) \cdot e^{\frac{\alpha}{\omega \tau} - t/\tau}$$

si $\varphi > \alpha \Rightarrow \varphi - \alpha > 0 \Rightarrow A > 0$

si $\varphi < \alpha \Rightarrow \varphi - \alpha < 0 \Rightarrow A < 0$

$\varphi < \alpha \Rightarrow A < 0$

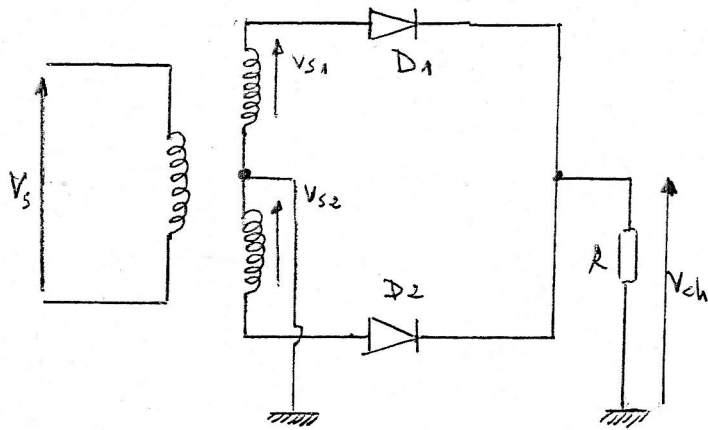
$\varphi > \alpha \Rightarrow A > 0$



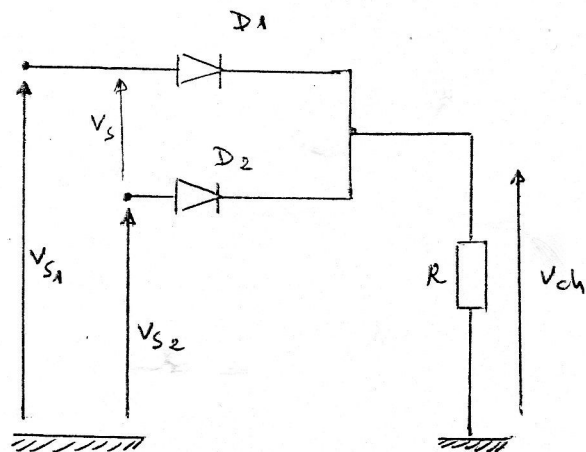
$$\bar{V}_{ch} = \frac{V_m}{2\pi} (\cos \alpha - \cos \varphi_{2\pi})$$

II. 4. Les redresseurs biphasé :

a/ à l'aide des diodes (charge R) :



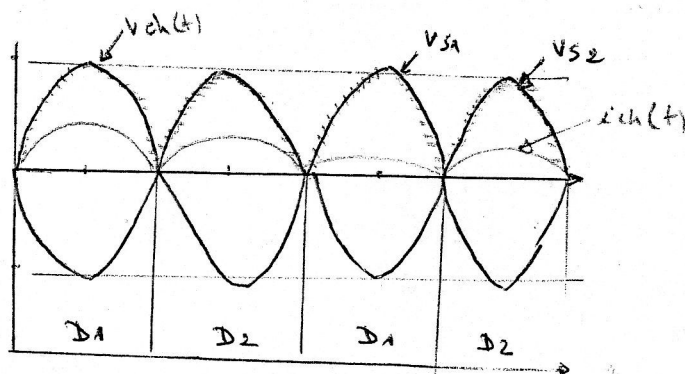
$$n_1 = n_2 \Rightarrow V_{s1} = 1/2 V_s$$



$$V_{s2} = -V_{s1}$$

• $[0 \rightarrow \pi]$: D_1 : passante $\Rightarrow V_{ch} = V_{s1}$
 D_2 : bloquée

• $[\pi \rightarrow 2\pi]$: D_2 : passante $\Rightarrow V_{ch} = V_{s2}$
 D_1 : bloquée



Valeur moyenne : ($V_{s1} = -V_{s2} = V_m \sin(\omega t)$)

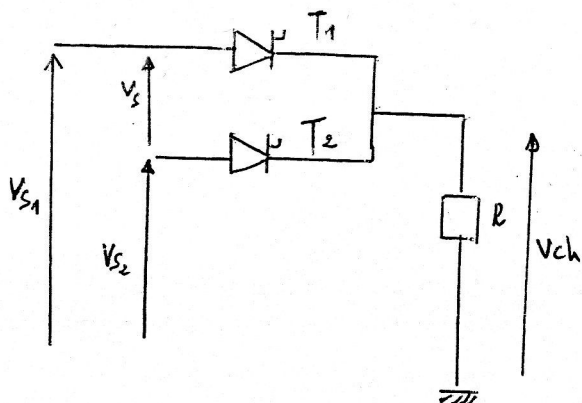
$$\bar{V}_{ch} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt$$

$$= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{1}{\pi} V_m [\cos \alpha]_0^{\pi} = \frac{V_m}{\pi} (-1 - 1)$$

$$\Rightarrow \bar{V}_{ch} = \frac{2V_m}{\pi}$$

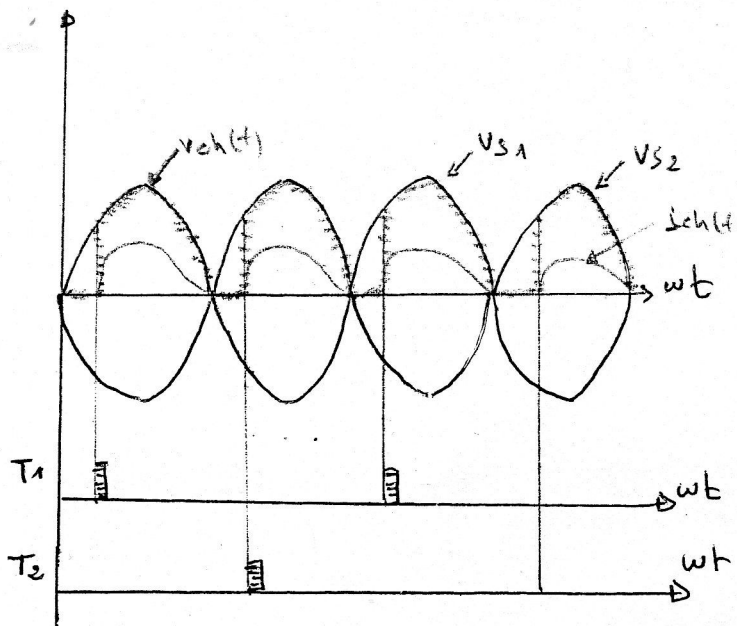
$$\bar{I}_{ch} = \frac{\bar{V}_{ch}}{R} = \frac{2V_m}{R \cdot \pi}$$

b/ à l'aide des thyristors (charge R) :



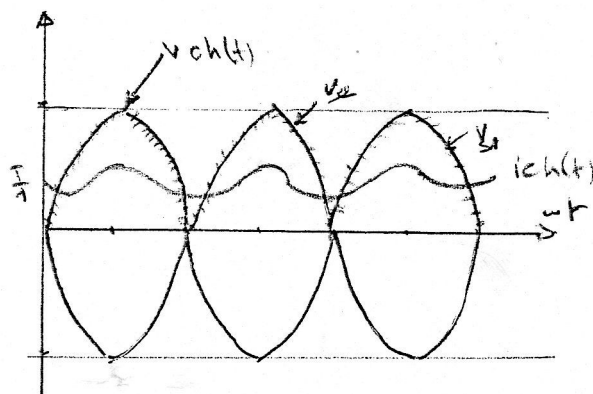
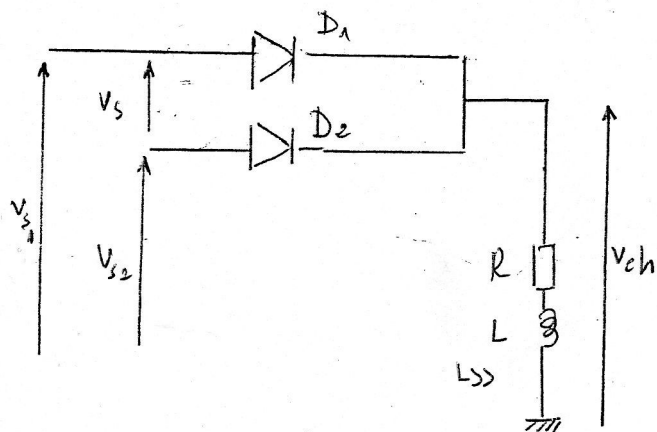
$$\bar{V}_{ch} = \frac{V_m}{\pi} (\cos \alpha + 1)$$

$$I_{ch} = \frac{\bar{V}_{ch}}{R}$$



c/ a' L'aide des diodes (charge RL):

$$V_{s1} = -V_{s2} = V_m \sin \omega t$$



• L'expression du courant:

Durant la conduction:

$$V_{ch} = V_{s1} = V_m \sin \omega t = R \cdot i_{ch}(t) + L \frac{di_{ch}(t)}{dt}$$

$$\Rightarrow i_{ch}(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + A \cdot e^{-t/\tau}$$

A = ? , I₁ = ?

$$\begin{cases} i_{ch}(0) = I_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(-\varphi) + A \\ i_{ch}(\frac{\pi}{\omega}) = I_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(\pi - \varphi) + A \cdot e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(-\varphi) + A \\ I_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(\pi - \varphi) + A \cdot e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}} \end{cases}$$

$$(1) - (2) \Rightarrow 0 = \frac{V_m}{Z} \sin \varphi + A - A e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}} \Rightarrow \frac{2V_m}{Z} \sin \varphi = A(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}})$$

$$\Rightarrow A = \frac{\frac{2V_m}{Z} \cdot \sin \varphi}{(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}})}$$

donc:

$$i_{ch}(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + \frac{eV_m}{Z} \left(\frac{\sin \varphi}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}} \right) \cdot e^{-t/\tau}$$

• calcul du courant I₁:

$$(1) \Rightarrow I_1 = -\frac{V_m}{Z} \sin \varphi + \frac{2V_m}{Z} \sin \varphi \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}}$$

$$= \frac{V_m}{Z} \sin \varphi \left(-1 + \frac{2}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}} \right)$$

$$= \frac{V_m}{Z} \sin \varphi \left(\frac{-(1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}) + 2}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}} \right)$$

$$I_1 = \frac{V_m}{Z} \sin \left(\frac{1 + e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}}{1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}} \right)$$

$$e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}} = \frac{1}{e^{\frac{\pi}{\omega\tau}}}$$

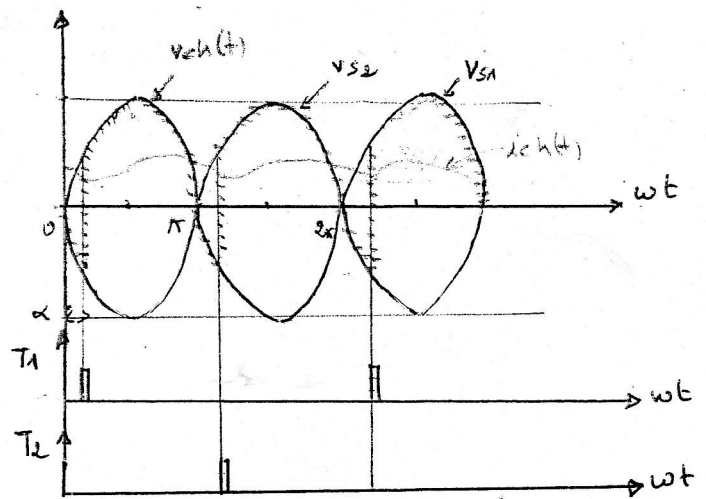
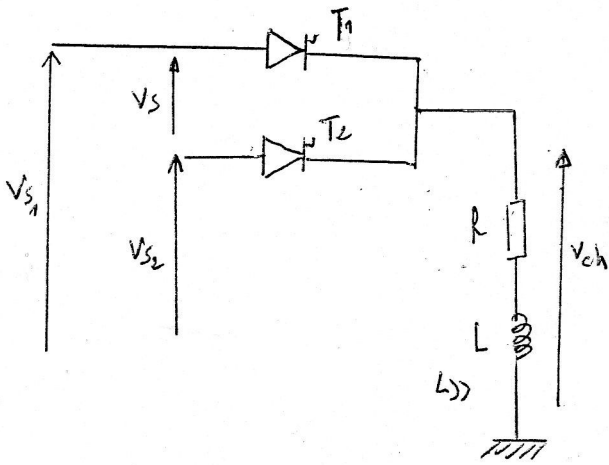
$$1 = \frac{1}{e^{\frac{\pi}{\omega\tau}}}$$

$$c = 2,73$$

I₁ est toujours positive. I > 0

d/ à l'aide de thyristors (charge RL):

$$v_{s1} = -v_{s2} = V_m \sin \omega t$$



- L'amorçage de thyristor s'effectue à l'instant $\omega t_1 = \alpha$, avec une période de 2π

$$\alpha < \omega t_1 < \pi + \alpha \Rightarrow T_1 \text{ ON}, T_2 \text{ OFF}$$

$$\Rightarrow v_{s1} = v_{ch} = V_m \sin \omega t = R i_{ch} + L \frac{d i_{ch}}{d t}$$

$$\Rightarrow i_{ch}(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + A e^{-t/\tau}$$

• Le deuxième thy est amorçé à l'instant

$$\omega t_2 = \alpha + \pi$$

$$\alpha + \pi < \omega t_2 < 2\pi + \alpha \Rightarrow T_2 \text{ ON}, T_1 \text{ OFF}$$

$$\Rightarrow v_{s2} = v_{ch}$$

• l'expression du courant:

$$A = ? , I_1 = ?$$

$$i_{ch}\left(\frac{\alpha}{\omega}\right) = \frac{I}{Z} \Rightarrow \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + A \cdot e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} = I_1 \quad \dots (1)$$

$$i_{ch}\left(\frac{\pi + \alpha}{\omega}\right) = I_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(\pi + \alpha - \varphi) + A \cdot e^{-\left(\frac{\pi + \alpha}{\omega\tau}\right)}$$

$$= -\frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + A e^{-\left(\frac{\pi + \alpha}{\omega\tau}\right)} \quad \dots (2)$$

$$(1) - (2) \Rightarrow 0 = \frac{2V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) + A \left(e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} - e^{-\left(\frac{\pi + \alpha}{\omega\tau}\right)} \right) ; e^{-\left(\frac{\pi + \alpha}{\omega\tau}\right)} = e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} \cdot e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}$$

$$\Rightarrow A = \frac{-\frac{2V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi)}{e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} (1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}})} \Rightarrow A = \frac{\frac{2V_m}{Z} \cdot \sin(\varphi - \alpha)}{e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} (1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}})}$$

• Si $\varphi > \alpha \Rightarrow A > 0$ (conduction continue) $L\omega \gg R$

• Si $\varphi < \alpha \Rightarrow A < 0$ (conduction descontinue) $L\omega \ll R$

$$A \rightarrow (1) \Rightarrow I_1 = \frac{V_m}{Z} \cdot \sin(\alpha - \varphi) + e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} \cdot \left(\frac{2V_m/2 \cdot \sin(\varphi - \alpha)}{e^{-\frac{\alpha}{\omega\tau}} (1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}})} \right)$$

$$\Rightarrow I_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \left[1 - \frac{e^{-\pi/\omega\tau}}{1 - e^{-\pi/\omega\tau}} \right]$$

$$= \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \varphi) \left(\frac{1 - e^{-\pi/\omega\tau} - 2}{1 - e^{-\pi/\omega\tau}} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{I_1 = \frac{V_m}{Z} \sin(\varphi - \alpha) \left[\frac{1 + e^{-\pi/\omega\tau}}{1 - e^{-\pi/\omega\tau}} \right]}$$

Dans notre étude on prend $\varphi > \alpha \Rightarrow I_1 > 0$ (conduction continue).

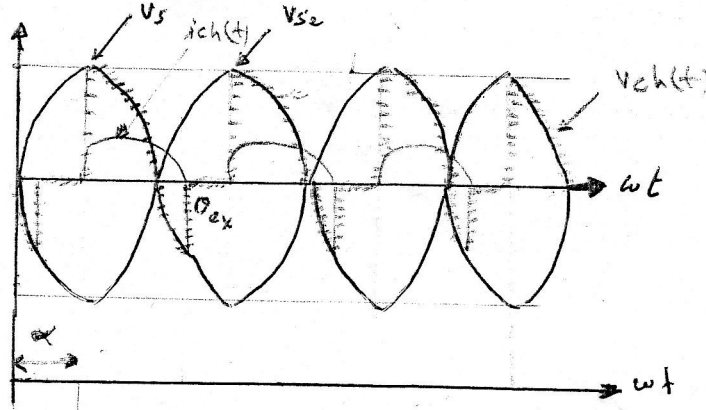
• la tension moyenne :

$$\overline{V_{ch}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{ch}(t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \alpha} V_m \cdot \sin \omega \cdot d\omega = \frac{V_m}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\pi + \alpha)]$$

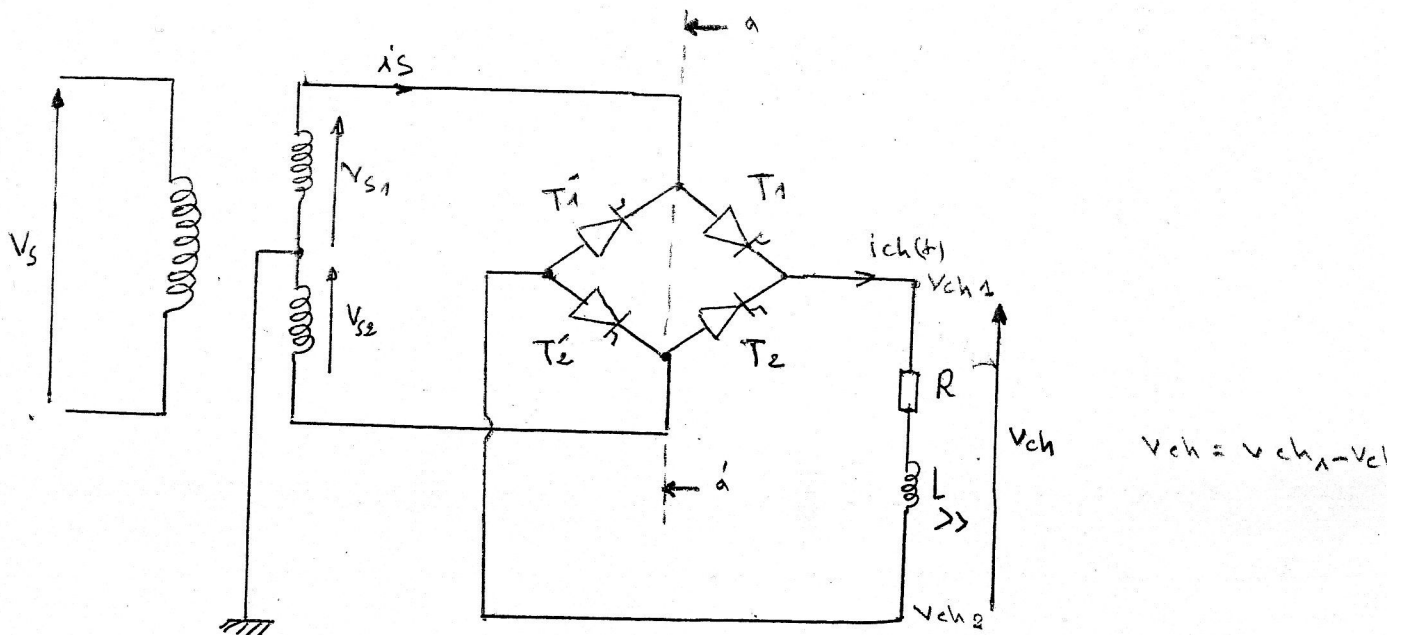
$$\Rightarrow \boxed{\overline{V_{ch}} = \frac{2V_m}{\pi} \cdot \cos \alpha}$$

• Remarque :

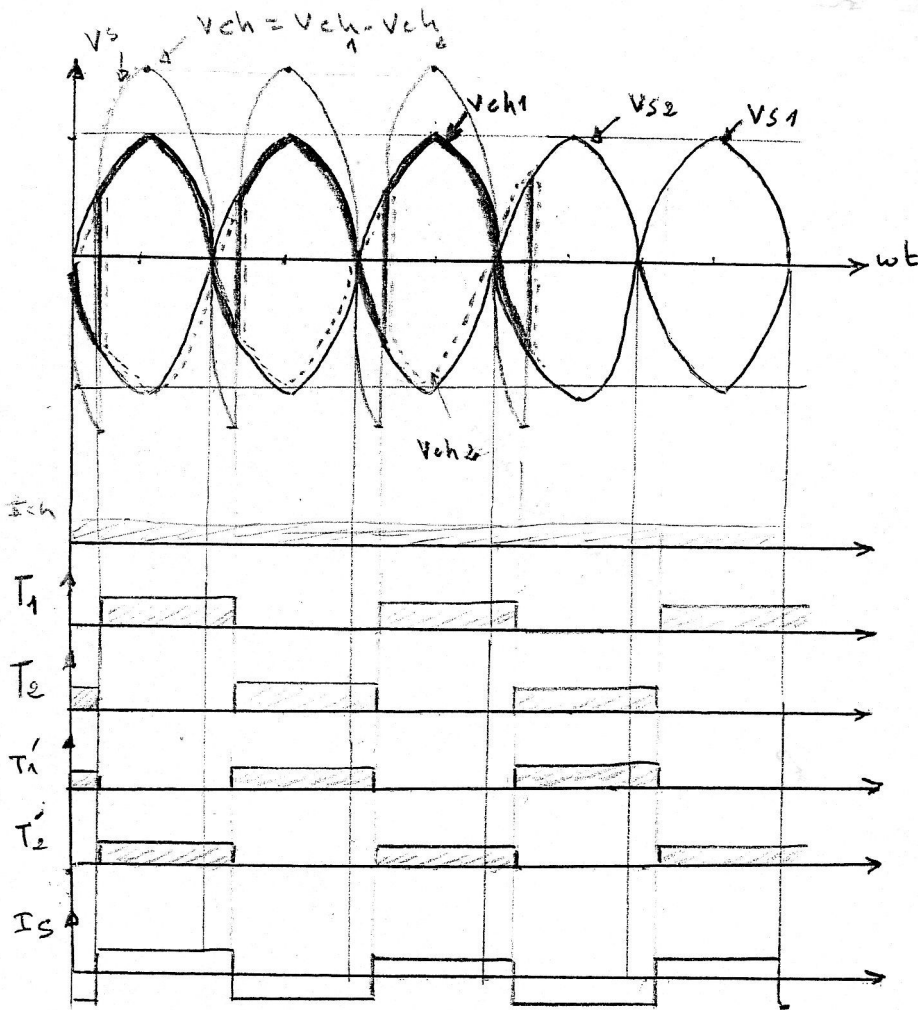
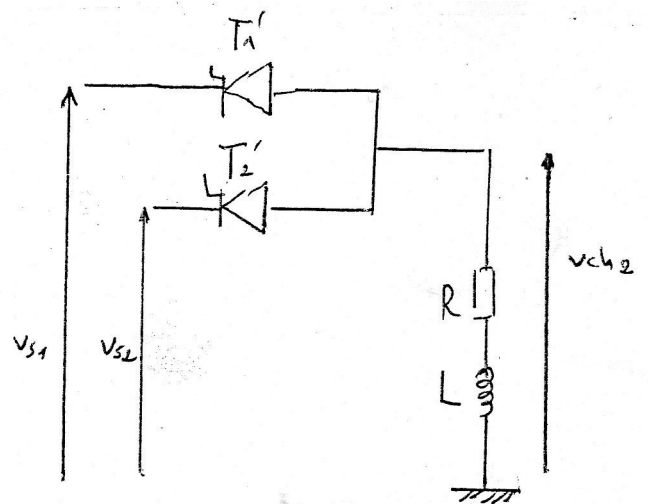
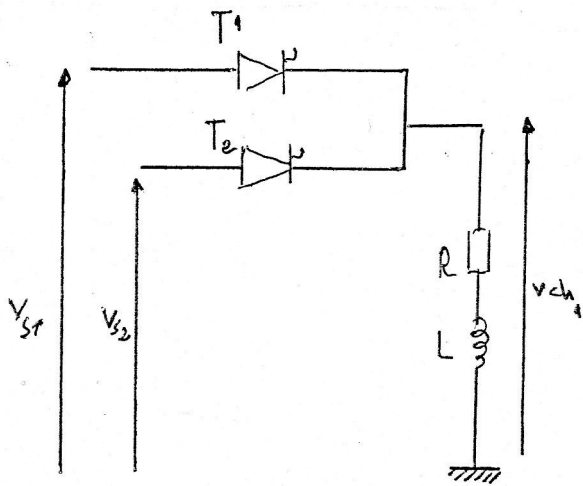
$\alpha > \varphi \Rightarrow$ conduction discontinue.



e/ en pont totalement commandé (tout-thyristors) :



L'observation de ce montage en deux angles donne les montages suivants :



La tension moyenne :

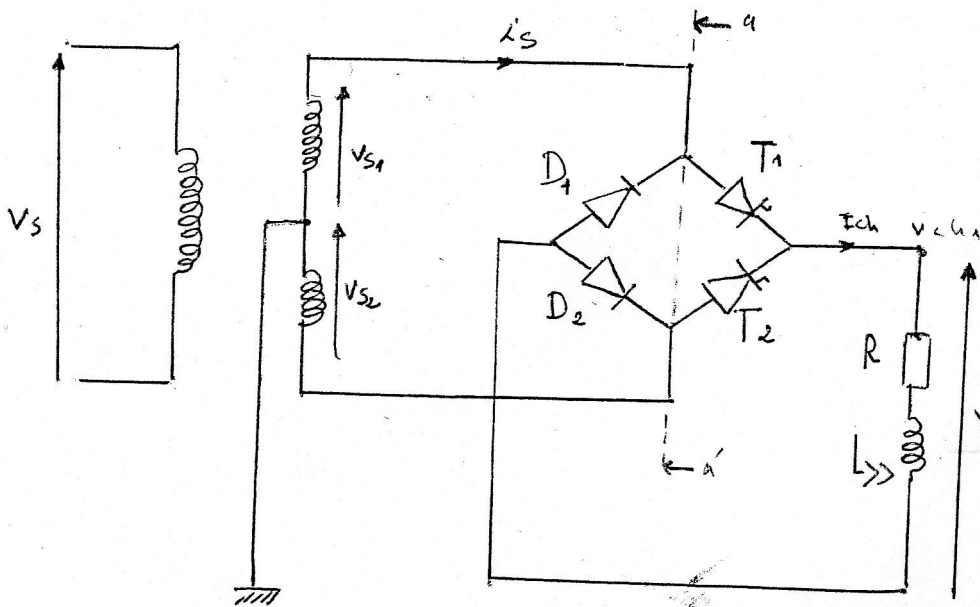
$$\begin{aligned} \bar{v}_{ch} &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{ch}(t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} v_m \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha \\ &= \frac{v_m}{\pi} [\cos \alpha - \cos(\pi + \alpha)] \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \bar{v}_{ch} = \frac{2v_m}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

remarque :

- $I_s = i_{T1} + i_{T2} \Rightarrow i_s = i_{T1} - i_{T2}$
- le courant de la charge est constante $\Rightarrow i_{ch} = cte$

f/ en pont semi-commandé (Mixte):



$$V_s = V_m \sin \omega t$$

$$V_{s1} = \frac{1}{2} V_m \sin \omega t$$

$$V_{s2} = -\frac{1}{2} V_m \sin \omega t$$

$$v_{ch} = v_{cha} - v_{che}$$

Fig 1

L'observation de ce montage en deux angles donne les montages suivants: (Fig 1.1-1.2)

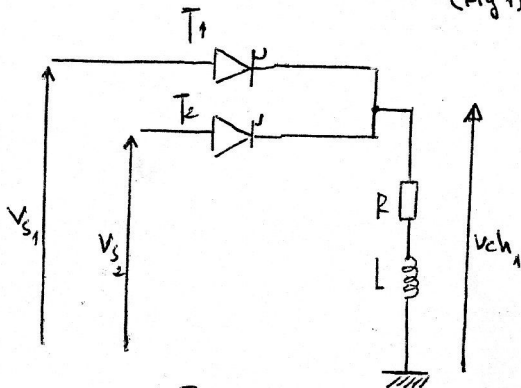


Fig 1.2

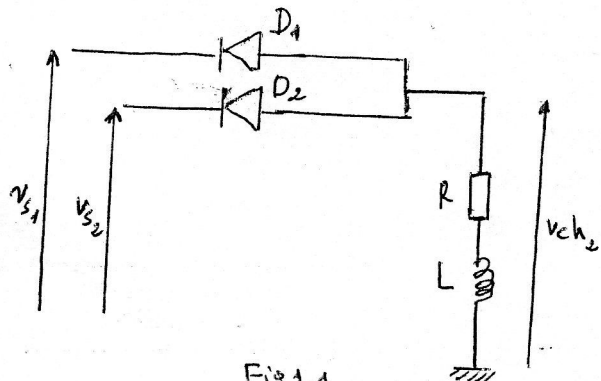


Fig 1.1

Fig 1 \$\Leftrightarrow\$ Fig 2.

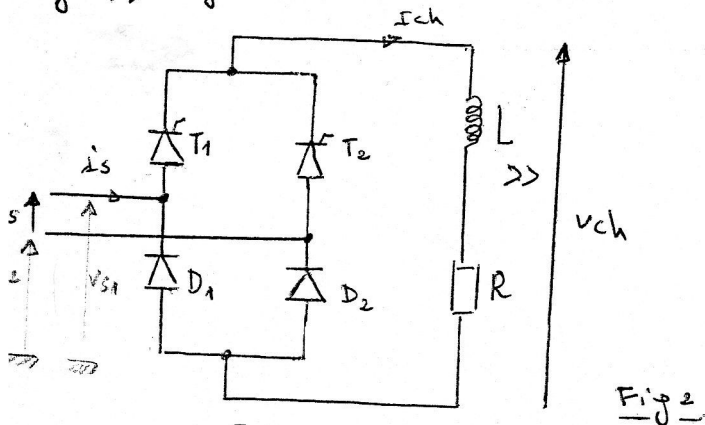


Fig 2

$$\bar{v}_{ch} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

$$P_s = v_{eff} \cdot i_{eff} \cdot \cos \varphi = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) I_{ch} \quad \text{avec } v_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$P_{ch} = \bar{v}_{ch} \cdot \bar{i}_{ch} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) I_{ch}$$

$$P_s = P_{ch} + \Delta P, \quad \Delta P \approx 0 \text{ (on néglige les pertes)}$$

$$P_{ch} \approx P_s \rightarrow (A)$$

$$\Rightarrow \cos \varphi = \frac{\sqrt{2} (1 + \cos \alpha) I_{ch}}{\pi \cdot i_{eff}}$$

$$i_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_{ch}^2 d\omega t = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i_{ch}^2 d\omega t \Rightarrow i_{eff}^2 = \frac{I_{ch}^2}{\pi} (\pi - \alpha) \Rightarrow i_{eff} = I_{ch} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

$$\Rightarrow i_{eff} = I_{ch} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

$$\Rightarrow \cos \varphi = \frac{\sqrt{2} (1 + \cos \alpha)}{\pi \cdot \frac{I_{ch} \sqrt{\pi - \alpha}}{I_{ch}}} = \frac{\sqrt{2} (1 + \cos \alpha) \sqrt{\pi}}{\pi \sqrt{\pi - \alpha}}$$

$$\cos \alpha \approx \cos \varphi$$