

# **CHAP I : LES REDRESSEURS**

## **1/ Introduction :**

Le développement des semi-conducteurs issu des progrès de la physique a permis l'avènement d'une nouvelle discipline de l'électrotechnique, sous l'appellation l'électronique de puissance.

Les systèmes chargés de manipuler l'énergie électrique sont les convertisseurs statiques qui permettent d'adapter de manière réversible ou non la forme alternative ou continue de l'énergie entre le réseau et la charge.

Ces transformations apparaissent sous quatre formes, pour les quelles sont associées quatre type de convertisseurs :

- Les redresseurs : pour la conversion alternative / continue
- Les hacheurs : pour la conversion continue / continue
- Les gradateurs : pour la conversion alternative / alternative
- Les onduleurs : pour la conversion continue / alternative

## **2/ Définition :**

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet l'étude de la conversion statique de l'énergie. En traitant l'énergie sous forme statique, l'électronique de puissance permet :

- une utilisation plus simple et plus adaptée de l'énergie électrique, conforme aux besoins de l'utilisateur.
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique pour le fournisseur de l'énergie.
- De concevoir et de mettre en œuvre des dispositifs de taille et de masse plus réduite permettant un fonctionnement plus silencieux.

La conversion statique est réalisée par un convertisseur statique soit un dispositif qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge.

### 3/ Fonction de base et terminologie de convertisseurs statiques :

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative par un réseau de distribution industriel ou un alternateur, soit sous forme continue par des batteries d'accumulateurs ou des génératrices à courant continu.

Quand a la charge, suivant sa nature, elle nécessite une énergie sous forme alternative ou continue.

Suivant la nature de l'énergie, on caractérise les grandeurs en continu par la valeur moyenne ( $\frac{1}{T} \int S(t)dt$ ) et les grandeurs alternatives par la valeur efficace ( $\sqrt{\frac{1}{T} \int S^2(t)dt}$ ).

### 4/ Constitution des convertisseurs statiques :

Vu le niveau des puissances mises en jeu, la conversion d'énergie doit être effectuée en recherchant le meilleur rendement. En voici les principales raisons:

- On ne peut pas évacuer ou dissiper les pertes (qui apparaissent sous forme de chaleur) si elles sont trop importantes.
- Le coût des dispositifs d'évacuation et de refroidissement (radiateurs, ventilateurs, ...etc.) devient très vite prohibitif.
- La fiabilité des composants diminue très rapidement quand la température augmente.

### 5/ Composants utilisables :

Le rendement maximum n'est obtenu qu'en utilisant des composants pas ou peu dissipatifs, absorbant une puissance minimale (idéalement nulle). Cette condition peut être réalisée de deux manières:

- Puissance instantanée nulle à tout instant.
- Valeur moyenne sur une période de fonctionnement de la puissance soit nulle.

Si à chaque instant, la tension  $u$  ou le courant  $i$  est nul, le dipôle associé est un interrupteur parfait. En effet, un interrupteur parfait fermé présente une chute de tension négligeable et les pertes  $y$  sont donc nulles quel que soit le courant qui le traverse. Un interrupteur parfait ouvert n'a pas de courant de fuite, les pertes  $y$  sont donc nulles quel que soit la tension qu'il supporte voir figure I.1.

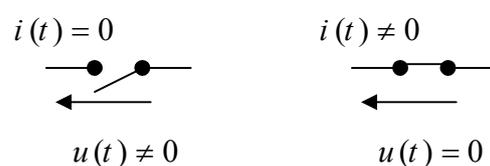


Figure I.1: interrupteur parfait

En pratique les interrupteurs seront réalisés à partir de semi-conducteurs fonctionnant en commutation. En électronique de puissance, ce sont les diodes, les thyristors, les triacs, les GTOs, les transistors (bipolaires, MOS, IGBTs, ....etc.); ils fonctionnent exclusivement en régime de commutation voir figure I.2.

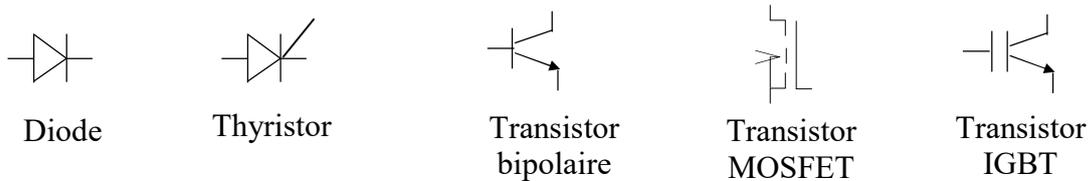


Figure I.2: interrupteur utilisés en électronique de puissance

## 6. Eléments semi-conducteurs en Electronique de Puissance

### 6.1. Diodes :

Une jonction PN peut être présentée comme le montre la figure I.3

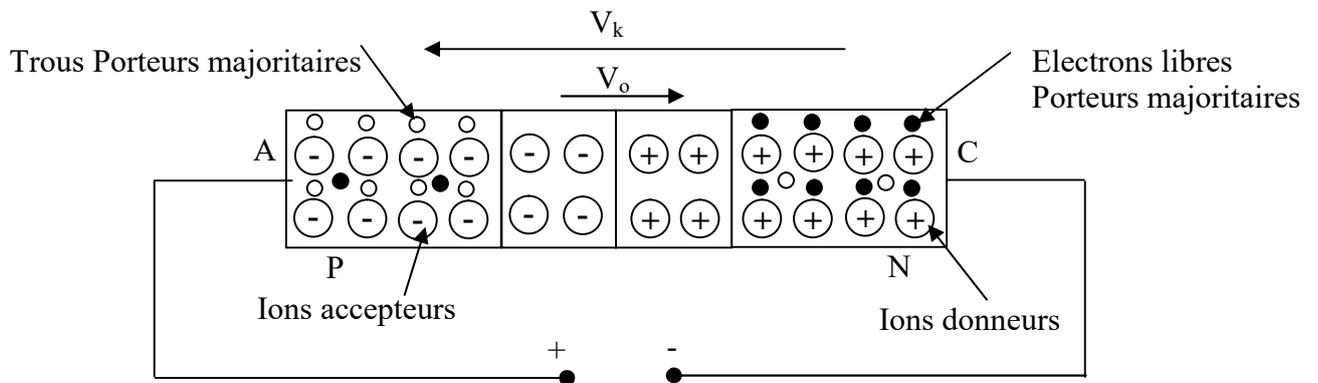


Figure I.3: jonction PN

diode est l'interrupteur électronique non commandé réalisant les fonctions suivantes :

- Fermé dans un sens (direct),
- Ouvert dans l'autre (inverse).

D'où les caractéristiques statiques idéales, figure I.4 :

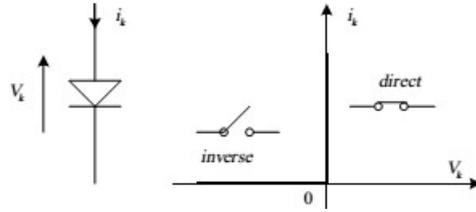


Figure I.4: caractéristiques statiques idéales

**Diode polarisé en inverse :  $V_k < 0$**

$V_C > V_A$  : circulation d'un courant de fuite  $I_s$  dû aux porteurs minoritaires voir figure I.5

**Diode polarisé en directe :  $V_k > 0$**

$V_A > V_C$  : la zone de déplétion est réduite et une circulation libre des charges majoritaires. On dit que la diode est passante. L'expression du courant direct peut être donné par:

$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1) \tag{II.1}$$

Où :

$I_D$  : Courant direct de la diode en A

$I_S$  : Courant de saturation inverse ( $10^{-6} - 10^{-15}$ ) A

$V_D$  : Tension aux bornes de la diode en V

$n$  : Coefficient d'émission (1-2) dépend du matériel et la construction physique de la diode

$V_T$  : Tension thermique en V ou  $V_T = \frac{KT}{q}$  Avec :

$q$  : Charge d'électron  $1.6022 \cdot 10^{-19} C$

$T$  : Température absolue en Kelvin

$K$  : Constante de Boltzman  $1.3806 \cdot 10^{-23} J/K$

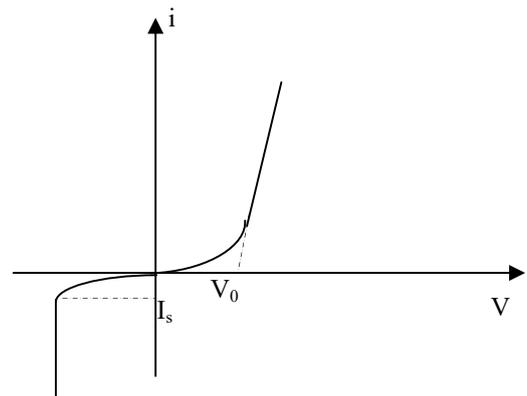


Figure I.5: caractéristiques statiques pratique

La caractéristique pratique d'une diode (figure I.3) peut être divisée en trois régions:

- Région de polarisation directe
- Région de polarisation inverse
- Région d'avalanche

**Région de polarisation directe:** dans cette région on a  $V_k > 0$ , le courant direct de la diode reste petit tant que  $V_k < V_0$ , ou  $V_0$  est la tension seuil de la diode (de l'ordre de 0.7 V généralement). Au delà de cette tension la diode est complètement conductrice. Considérons une diode tel que  $V_D = 0.1$  V,  $n=1$  et  $V_T = 25.8$  mV :

$$V_D = V_0, I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1) = I_S (48.23 - 1) \approx I_S 48.23$$

$$V_D > V_0, I_D \gg I_S \text{ et } I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1) \approx I_S e^{V_D/nV_T}$$

**Région d'avalanche:** dans cette région la tension inverse est élevée généralement plus de 1000 V. si la tension inverse dépasse la tension seuil d'avalanche le courant inverse croit rapidement avec une petite variation de la tension seuil d'avalanche  $V_{BR}$ .

Considérons une diode tel que  $V_D = 1.2$  V,  $I_D = 300$  A,  $n=2$  et  $V_T = 25.8$  mV. Calculer le courant de saturation  $I_S$ .

$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1), \text{ d'où } I_S = 2.383 \cdot 10^{-8} \text{ A}$$

Le courant de saturation  $I_S$  est très petit et du essentiellement aux porteurs minoritaires.

**Région de polarisation inverse:** dans cette région on a  $V_k < 0$ , si  $V_k < 0$  et  $|V_k| \gg V_T$  on peut négliger le terme exponentiel de l'expression du courant direct et on aura:

$$I_D = I_S (e^{V_D/nV_T} - 1) \approx -I_S$$

## 6.2. Thyristor :

Le thyristor est un semi conducteur à quatre couches à structure PNPN avec trois jonctions PN et à trois bornes : Anode, Cathode et Gâchette voir figure I.6.

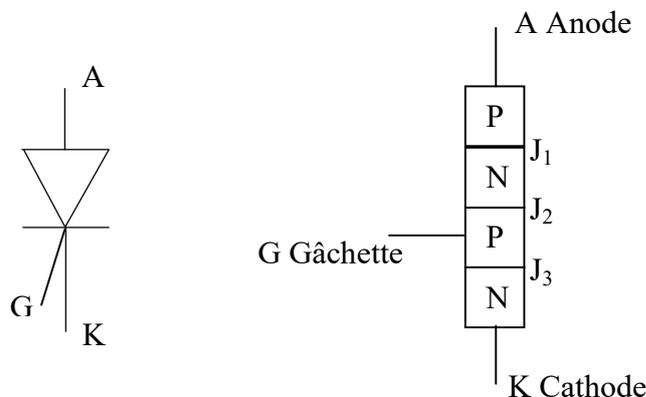


Figure I.6 : Symbole du thyristor avec trois jonctions PN

Si  $V_A > V_K$  : Les jonctions  $J_1$  et  $J_3$  sont polarisées en directe et  $J_2$  est polarisée en inverse, seulement un courant de fuite circule de l'anode vers la cathode. Le thyristor est dit à l'état bloqué direct.

Si  $V_{AK}$  est augmenté d'avantage à des grandes valeurs la jonction  $J_2$  sera claquée par avalanche, la tension correspondante au claquage est dite tension de claquage directe.

Comme les autres jonctions  $J_1$  et  $J_3$  sont polarisées en directes, il y aura un mouvement libre d'électron et en résulte un grand courant direct.

Le thyristor est à l'état passant. La chute de tension  $V_{AK}$  est dû à la chute ohmique dans les quatre couches (environ 1V), dans cet état le courant anodique n'est limité que par la résistance externe.

Une fois le thyristor est conducteur il se comporte comme une diode et on n'aura aucun contrôle sur cet élément qui continu à conduire car il n'y a pas de zone de déplétion au niveau de  $J_2$  à cause du mouvement libre des électrons.

Si le courant  $I_A$  est réduit au dessous du courant de maintien  $I_H$ , une zone de déplétion se formera sur  $J_2$  et le thyristor passe à l'état bloqué.

Si  $V_{AK} < 0$  :  $J_2$  est polarisé en directe par contre  $J_1$  et  $J_3$  en inverse, cela est équivalent à deux diodes séries polarisées en inverse. Le thyristor est dit à l'état bloqué inverse, un courant de fuite inverse circule à travers l'élément.

Si on continu à augmenter la tension inverse  $V_{AK}$ , il y a un risque de claquage des jonctions  $J_1$  et  $J_3$  (claquage destructif).

Malgré que le thyristor peut conduire en augmentant la tension directe au-delà de la tension  $V_{max}$ , une telle conduction peut être destructif et non pratique.

En pratique la tension directe est maintenue au dessous de  $V_{max}$  ( $V_{AK} < V_{max}$ ) et le thyristor peut être amorcé par l'application d'une impulsion positive sur la gâchette voir figure I.6.

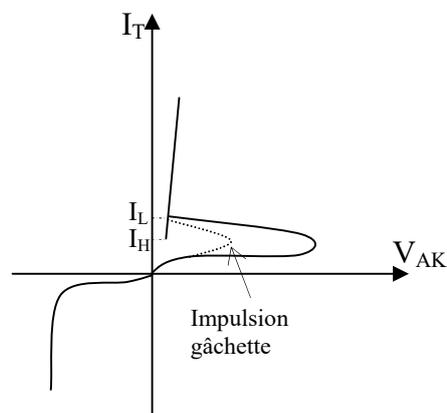


Figure I.6 : Caractéristique v-i du thyristor

Si une impulsion  $I_G$  est appliquée (le courant de gâchette augmente de 0 à 1mA), le gain en courant  $\alpha_2$  augmente, et le courant  $I_A$  augmente à son tour. L'augmentation de  $I_A$ , les gains  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  augmentent encore et le processus continue jusqu'à ce que le thyristor est complètement conducteur et le courant  $I_A$  n'est limité que par la charge externe.

Une fois le thyristor est amorcé l'impulsion  $I_G$  peut être éliminé et le système continue à conduire.

### a. Blocage d'un thyristor :

Il se fait généralement en réduisant le courant au dessous du courant de maintien. Plusieurs techniques existent dans lesquelles le courant  $i$  est maintenu au dessous de  $i_m$  (courant de maintien) pour un temps suffisant de manière que l'excès de porteurs de charges dans les quatre couches soit recombinaison. A cause de  $J_1$  et  $J_3$ , l'extinction est similaire à celle d'une diode.

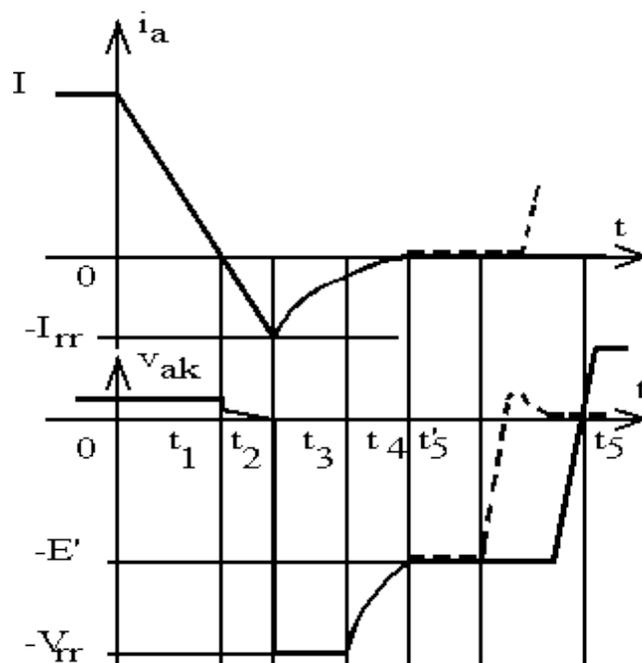


Figure I.6 : Caractéristique de blocage d'un thyristor

Pour  $t < 0$ , nous supposons que le thyristor est passant avec un courant de gâchette nul :  $v_{ak} = V_T \approx 1 \text{ V}$  ;  $I_A = I = \text{Cste}$  ;  $I_g = 0$ .

A partir de  $t = 0$ , nous faisons décroître le courant  $I_A$  avec une pente  $d(i_a)/dt$  imposée pour arriver au blocage confirmé par une tension  $V_{AK} = -E'$  négative. Le moyen utilisé pour faire diminuer le courant sera décrit dans la suite.

- de 0 à  $t_1$ , les jonctions  $J_1$  et  $J_3$  restent passantes, le courant  $I_A$  est positif et la tension  $v_{AK}$  reste constante.
- de  $t_1$  à  $t_2$ , la jonction  $J_2$  recouvre son pouvoir bloquant; le courant  $I_A$  devient négatif et atteint la valeur  $-I_{rr}$  ( Reverse Recovery). La tension  $V_{AK}$  s'annule progressivement. Les porteurs injectés dans  $J_3$  sont piégés dans le thyristor.
- de  $t_2$  à  $t_3$ , le courant  $I_A$  s'annule progressivement au fur et à mesure des recombinaisons des porteurs piégés. Le changement de pente de  $I_A$  crée une surtension négative  $V_{rr}$  aux bornes du thyristor.
- de  $t_3$  à  $t_4$ , le courant  $I_A$  finit de s'annuler et la tension  $V_{AK}$  revient au niveau imposé de blocage  $-E'$ . Le temps mis par  $I_A$  pour devenir nul est appelé temps de recouvrement inverse  $t_{rr}$ .
- de  $t_4$  à  $t_5$ , le courant  $I_A$  est nul mais il y a toujours des porteurs piégés dans la jonction de commande  $J_c$ ; celle-ci n'a pas recouvré son pouvoir bloquant. Il faut attendre la recombinaison complète de ces porteurs pour pouvoir appliquer une tension positive tout en gardant le thyristor bloqué. La valeur minimale de ce temps  $t_5 - t_2$  est appelée temps de désamorçage  $t_q$ . Ce temps varie de 2 à 100  $\mu s$  suivant la "rapidité" du thyristor.

Sur la figure II.13, les courbes en trait plein correspondent au fonctionnement correct avec  $t_5 - t_2 > t_q$ ; les courbes en pointillés correspondent à  $t_5 - t_2 < t_q$ ; dans ce cas, dès que  $V_{AK}$  redevient positive, le thyristor s'amorce spontanément et le courant  $I_A$  redevient positif.

Un autre phénomène peut provoquer l'amorçage spontané : lorsque la tension directe croît avec une pente  $dv/dt$  imposée, la jonction  $J_c$  bloquée supporte la tension; sa zone de transition s'élargit et il se crée un courant  $C_T \cdot dv / dt$  dans cette zone. Si la vitesse de croissance est trop grande, ce courant peut provoquer le claquage de la jonction, comme si on avait appliqué un courant de gâchette. Il faut donc rétablir la tension directe avec une pente limitée à une valeur  $(dv/dt)_{max}$  de l'ordre de 10 à 1000  $V / \mu s$  suivant la "rapidité" du thyristor.

Pour bloquer de façon sûre un thyristor, il faut :

- annuler le courant  $I_A$
- appliquer une polarisation inverse et la maintenir pendant un temps au moins égal au temps de désamorçage  $t_q$
- rétablir la tension directe avec une pente inférieure à  $(dv/dt)_{max}$

#### **b. Procédé de commutation d'un thyristor :**

La commutation est un procédé de blocage ou d'extinction d'un thyristor. Il y a plusieurs circuits de commutation qui sont classifiés en :

- commutation naturelle
- commutation forcée

**c. Commutation naturelle :**

Si la source est alternative, le courant du thyristor passe naturellement par zéro et une tension négative apparaît sur le thyristor. Ainsi l'élément est naturellement bloqué, grâce au comportement de la source.

**c. Commutation forcée :**

Dans certains circuits la source d'énergie est continue et le courant à travers le thyristor est forcé à zéro par des moyens axillaires d'où le nom de la commutation forcée. Cette technique peut être réalisé par les circuits suivants voir figure I.8.

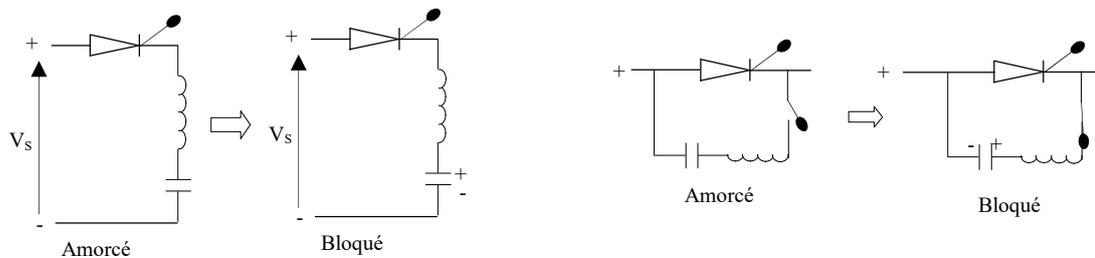


Figure I.8 : Circuits de commutation

## 7. Redressement non commandé

### 7-1/ Redressement monophasé mono alternance :

#### 7-1-1/ Charge résistive :

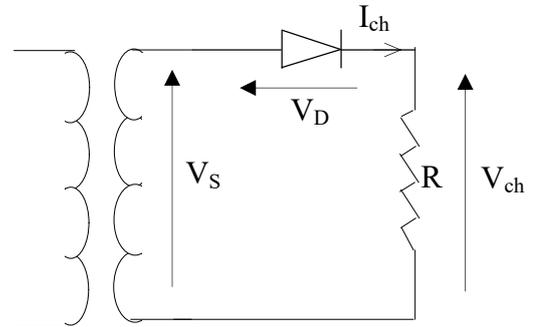
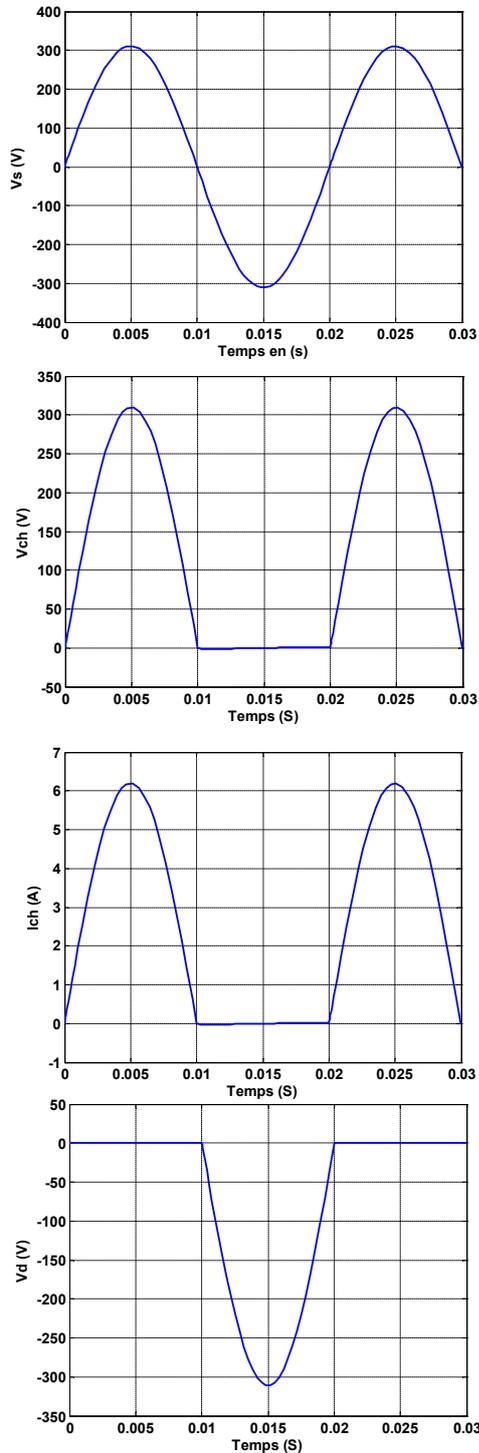


Figure I.9 : Circuit du montage

$$V_S = V_m \sin(\omega t) \text{ avec } \omega = 2\pi f \text{ rd/S et } f = 50\text{Hz}$$

$$R = 50\Omega$$

$$\begin{aligned} V_{moy} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{ch}(t) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{ch}(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{\pi} \text{ (V)} \end{aligned}$$

Figure I.9 : Formes d'ondes :  
Vs, Vch, Ich et Vd

### 7-1-1/ Charge R-L :

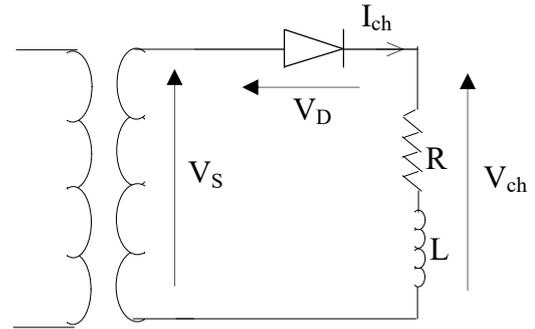
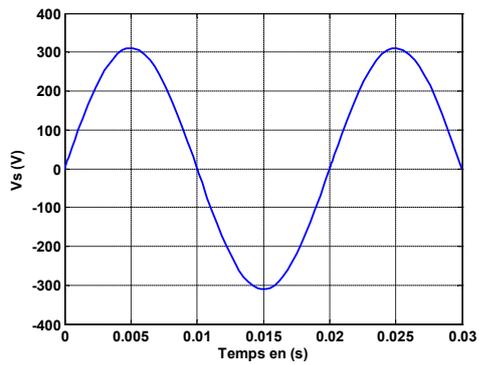


Figure I.10 : Circuit du montage

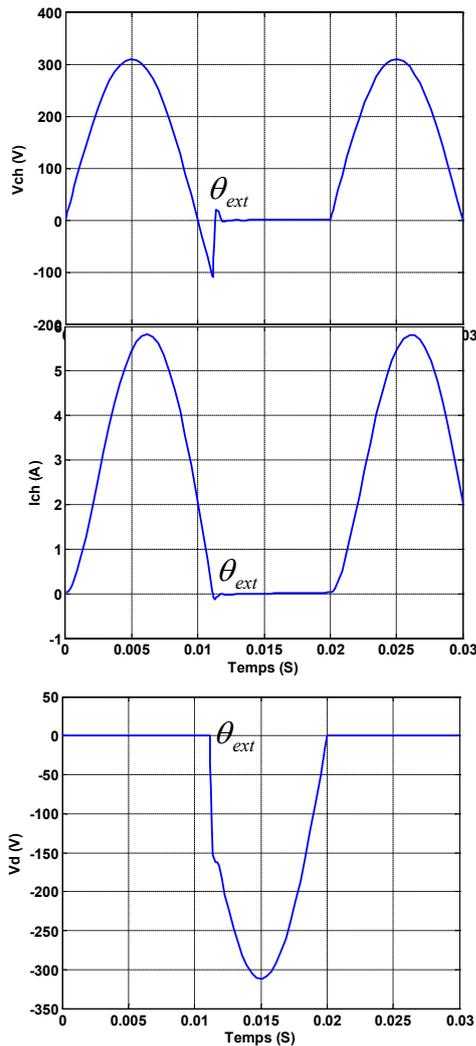


Figure I. 11 : Formes d'ondes :  
Vs, Vch, Ich et Vd

$$V_S = V_m \sin(\omega t) \text{ avec } \omega = 2\pi f \text{ rd/S et } f = 50\text{Hz}$$

$$R = 50\Omega \text{ et } L = 60\text{mH}$$

$$\begin{aligned} V_{moy} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta_{ext}} V_{ch}(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{2\pi} \int_0^{\theta_{ext}} \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{2\pi} (1 - \cos(\theta_{ext})) \text{ (V)} \end{aligned}$$

## 7-2/ Redressement monophasé double alternance :

### 7-2-1/ avec transformateur à point milieu :

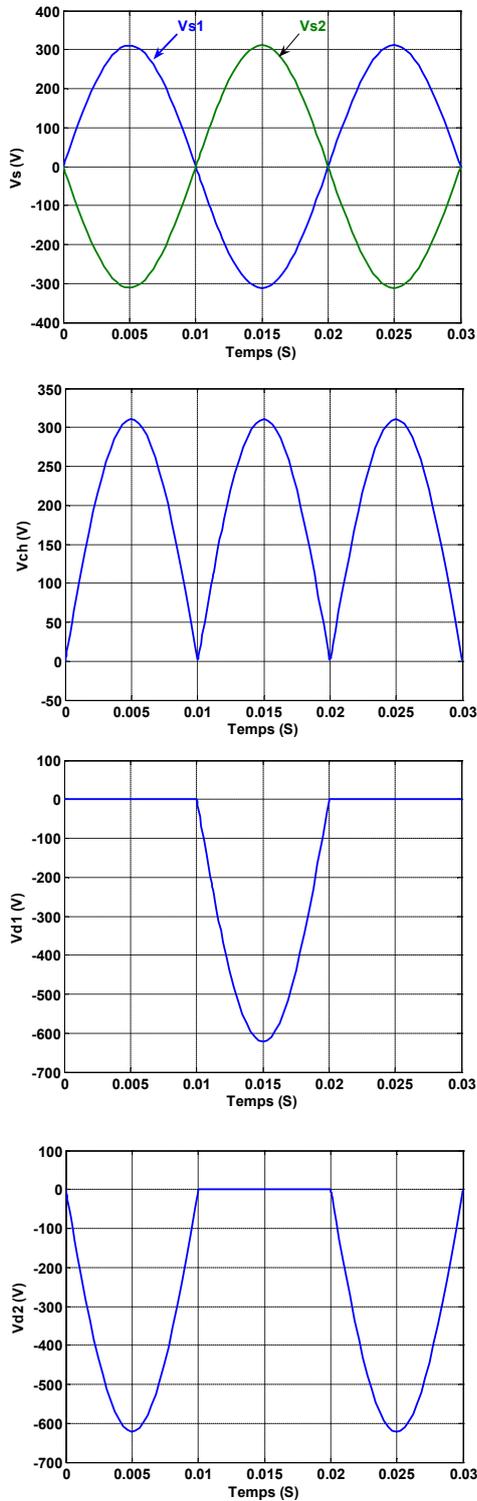


Figure I.13 : Formes d'ondes :  
 $V_{s12}$ ,  $V_{ch}$ ,  $V_{d1}$  et  $V_{d2}$

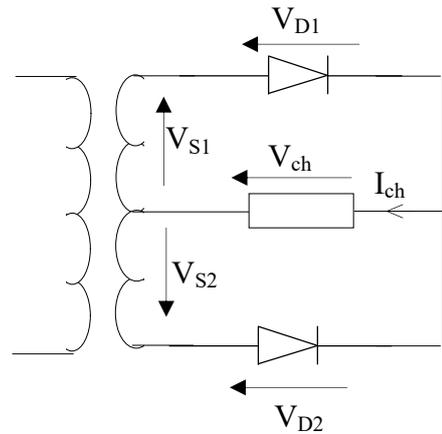


Figure I.12 : Circuit du montage

$$V_{S1} = V_m \sin(\omega t),$$

$$V_{S2} = V_m \sin(\omega t + \pi),$$

Avec  $\omega = 2\pi f$  rd/S et  $f = 50\text{Hz}$

$$R = 50\Omega$$

$$\begin{aligned} V_{moy} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{\pi} \int_0^{\pi} \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{2V_m}{\pi} \text{ (V)} \end{aligned}$$

### 7-2-1/ Montage en pont:

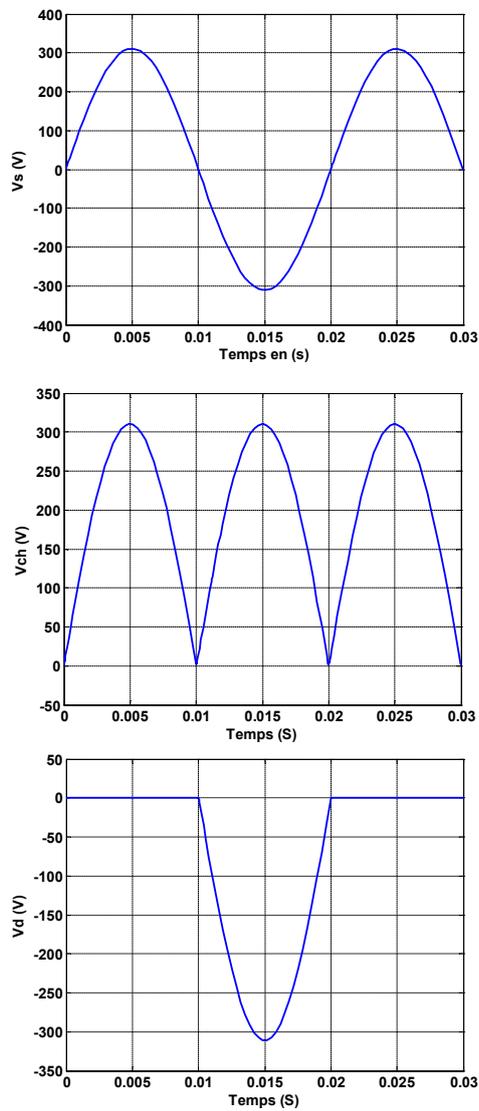


Figure I.15 : Formes d'ondes :  
 $V_s$ ,  $V_{ch}$ , et  $V_d$

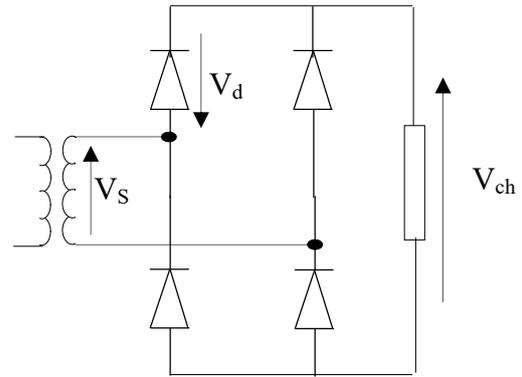


Figure I.14 : Circuit du montage

$$V_s = V_m \sin(\omega t),$$

Avec  $\omega = 2\pi f$  rd/S et  $f = 50\text{Hz}$

$$R = 50\Omega$$

$$\begin{aligned} V_{moy} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^\pi V_m \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{\pi} \int_0^\pi \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{2V_m}{\pi} \text{ (V)} \end{aligned}$$

### 7-3/ Redressement triphasé mono alternance :

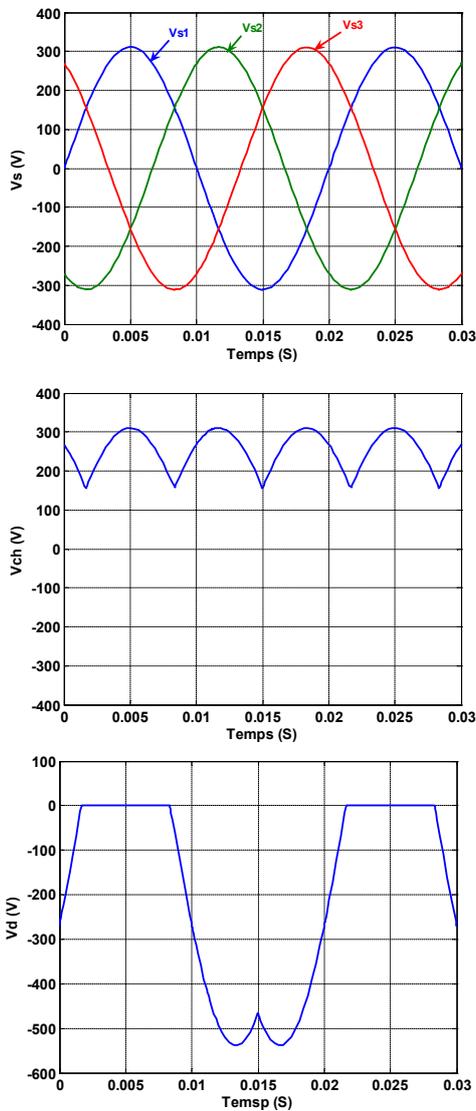


Figure I.17 : Formes d'ondes :  
 $V_{s123}$ ,  $V_{ch}$ , et  $V_d$

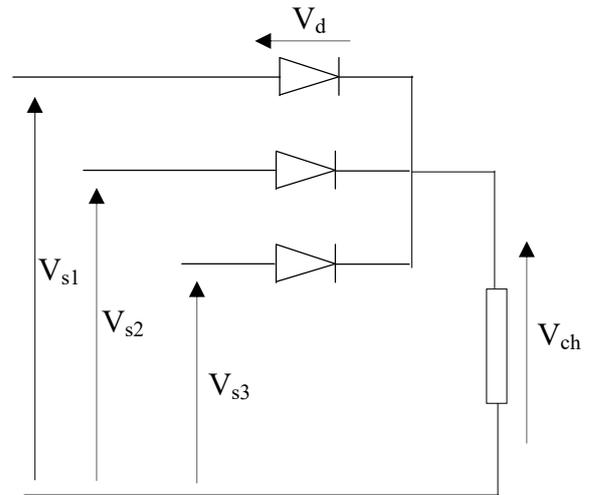


Figure I.16 : Circuit du montage

$$V_{S1} = V_m \sin(\theta),$$

$$V_{S2} = V_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$V_{S3} = V_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right),$$

Avec  $V_m = 220\sqrt{2}$ ,  $\theta = \omega t$  rd,  $\omega = 2\pi f$  rd/S et  $f = 50\text{Hz}$

$$R = 50\Omega$$

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

$$= \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_m \sin(\theta) d\theta$$

$$= \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \text{ (V)}$$

### 7-4/ Redressement triphasé double alternance :

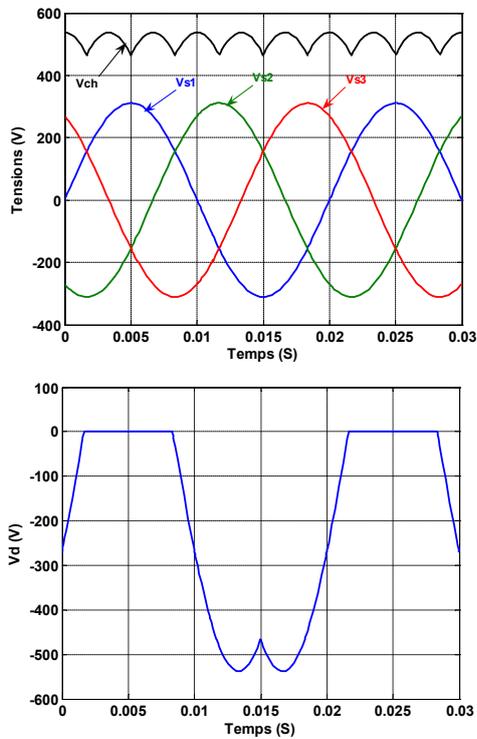


Figure I.19 : Formes d'ondes :  
 $V_{s123}$ ,  $V_{ch}$ , et  $V_d$

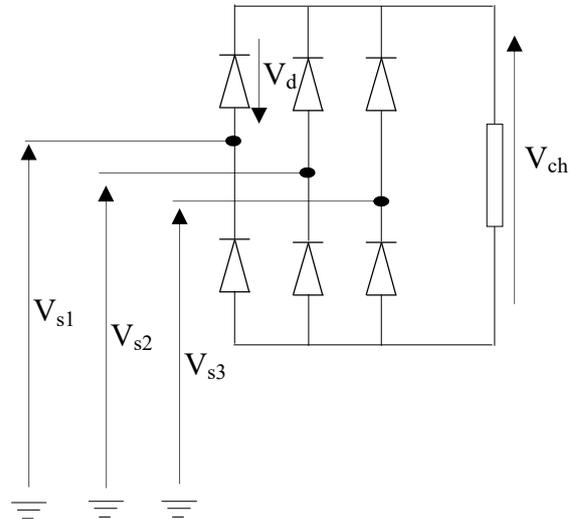


Figure I.18 : Circuit du montage

$$V_{s1} = V_m \sin(\theta),$$

$$V_{s2} = V_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$V_{s3} = V_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right),$$

Avec  $V_m = 220\sqrt{2}$ ,  $\theta = \omega t$  rd,  $\omega = 2\pi f$  rd/S et  $f = 50\text{Hz}$

$$R = 50\Omega$$

$$\begin{aligned} V_{moy} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt \\ &= \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{3} V_m \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta \\ &= \frac{3\sqrt{3} V_m}{\pi} \text{ (V)} \end{aligned}$$

### **7-5/ Paramètres de performances :**

#### **Facteur de forme (Form Factor) :**

Le facteur de forme exprime la teneur en composante alternative dans la tension de sortie

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

Où  $V_{eff}$  : exprime la valeur efficace de la tension de sortie

$V_{moy}$  : exprime la valeur moyenne de la tension de sortie

#### **Facteur d'ondulation (Ripple Factor) :**

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{moy}}$$

Où

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

Où  $V_{eff}$  : exprime la valeur efficace de la tension de sortie

$V_{moy}$  : exprime la valeur moyenne de la tension de sortie

#### **Facteur de déplacement DF (Displacement Factor) :**

$$DF = \cos \phi$$

Où

$\phi$  : exprime l'angle entre la composante fondamentale du courant d'entrée et la tension

#### **Facteur d'harmonique HF (Harmonic Factor) :**

Le facteur d'harmonique du courant d'entrée est donné par :

$$HF = \sqrt{\frac{I_s^2 - I_{s1}^2}{I_{s1}^2}} = \sqrt{\frac{I_s^2}{I_{s1}^2} - 1}$$

Où

$I_{s1}$  : exprime la valeur efficace de la composante fondamentale du courant d'entrée

$I_s$  : exprime la valeur efficace du courant d'entrée

#### **Facteur de puissance PF (Power Factor) :**

Le facteur de puissance est donné par :

$$PF = \frac{V_s I_{s1}}{V_s I_s} \cos \phi = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi$$

**Facteur d'utilisation :**

Le facteur d'utilisation est donné par :

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} = \frac{V_{moy} I_{moy}}{V_{eff} I_{eff}}$$

Où

$I_{moy}$  : La valeur moyenne du courant de sortie

$I_{eff}$  : La valeur efficace du courant de sortie

## 8. Redressement commandé

### 8-1/ Redressement monophasé mono alternance :

#### III-1-1/ Charge résistive :

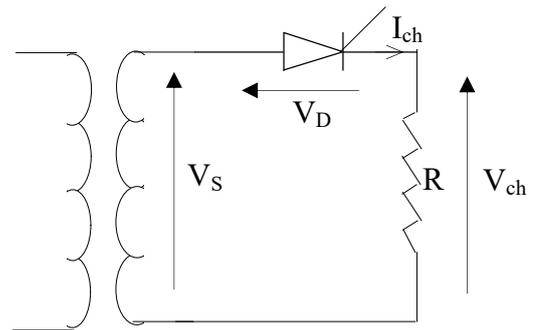
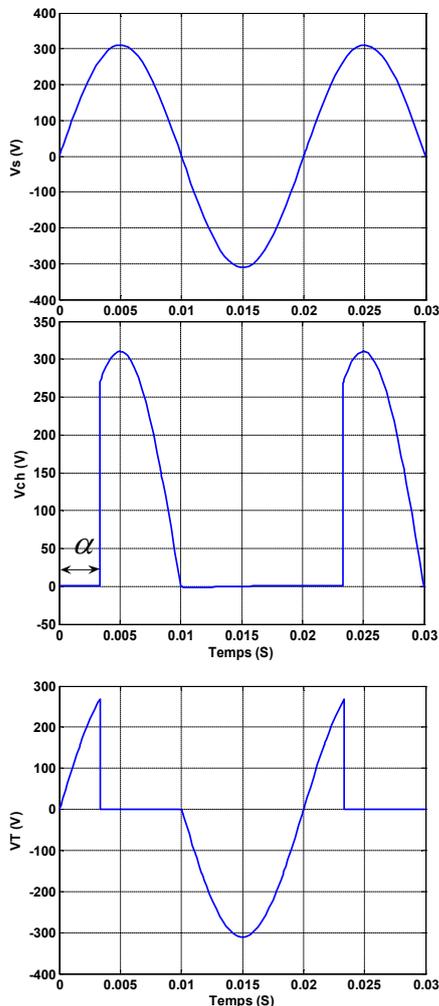


Figure I.20 : Circuit du montage

$$V_s = V_m \sin(\omega t) \text{ avec } \omega = 2\pi f \text{ rd/S et } f = 50\text{Hz}$$

$$R = 50\Omega$$

Le thyristor est amorcé avec un angle  $\alpha$

$$\begin{aligned} V_{moy} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{ch}(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos(\alpha)) \text{ (V)} \end{aligned}$$

Figure I.21 : Formes d'ondes :  
 $V_s$ ,  $V_{ch}$ , et  $V_T$

### 8.1-2/ Charge R-L :

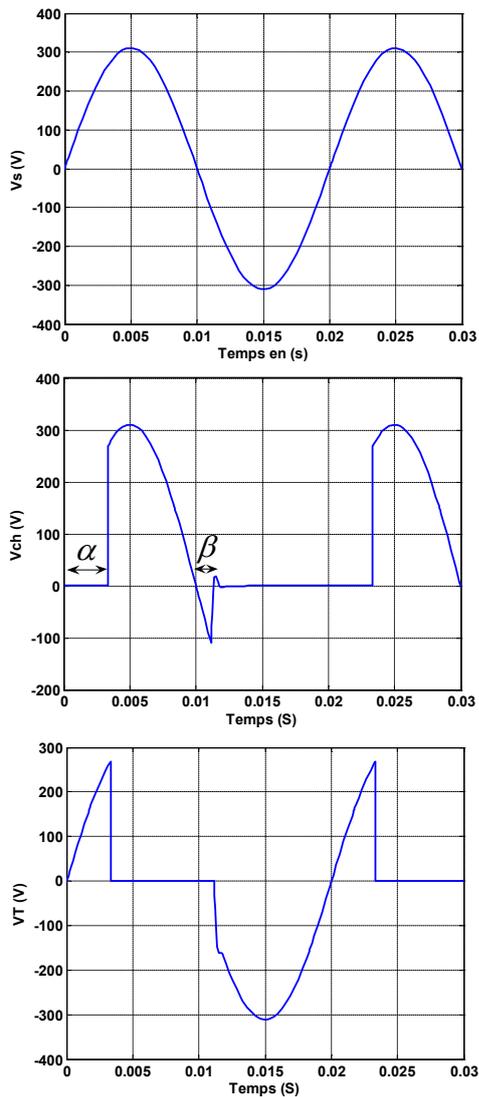


Figure I.23 : Formes d'ondes :  
 $V_s$ ,  $V_{ch}$ , et  $V_T$

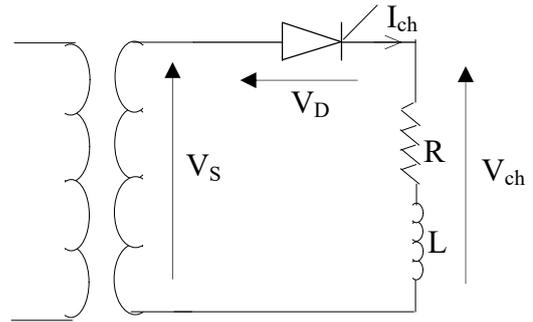


Figure I.22 : Circuit du montage

$$V_s = V_m \sin(\omega t) \text{ avec } \omega = 2\pi f \text{ rd/S et } f = 50\text{Hz}$$

$$R = 50\Omega \text{ et } L = 60\text{mH}$$

$\alpha$  : Angle d'amorçage

$\beta$  : Angle d'extinction

$$V_{moy} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\beta} V_{ch}(\theta) d\theta$$

$$= \frac{V_m}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\beta} \sin(\theta) d\theta$$

$$= \frac{V_m}{2\pi} (\cos(\beta) + \cos(\alpha)) \text{ (V)}$$

### 8.1-3/ Charge R-L avec diode de roue libre :

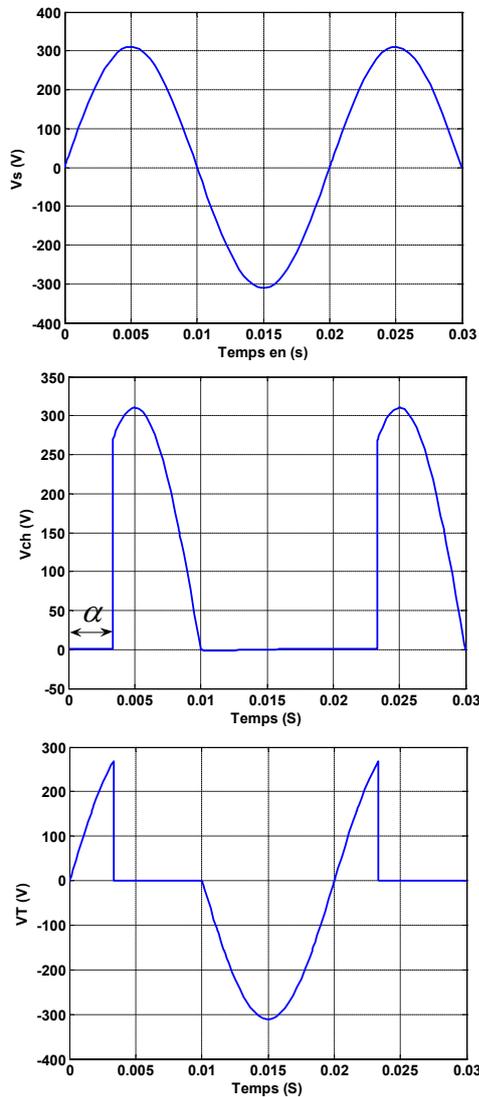


Figure I.25 : Formes d'ondes :  
 $V_s$ ,  $V_{ch}$ , et  $V_T$

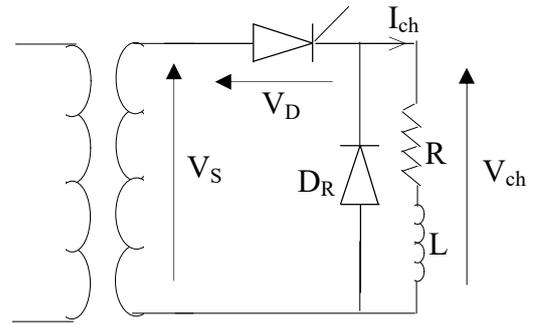


Figure I.24 : Circuit du montage

$$V_s = V_m \sin(\omega t) \text{ avec } \omega = 2\pi f \text{ rd/S et } f = 50 \text{ Hz}$$

$$R = 50 \Omega \text{ et } L = 60 \text{ mH}$$

$\alpha$  : Angle d'amorçage

$$\begin{aligned} V_{moy} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{ch}(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin(\theta) d\theta \\ &= \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos(\alpha)) \text{ (V)} \end{aligned}$$

Pour éviter la diminution de la valeur moyenne de  $V_{ch}$  on ajoute une diode de roue libre.

### 8-1-4/ Redressement commandé en pont :

Charge très inductive (cas de conduction continue)

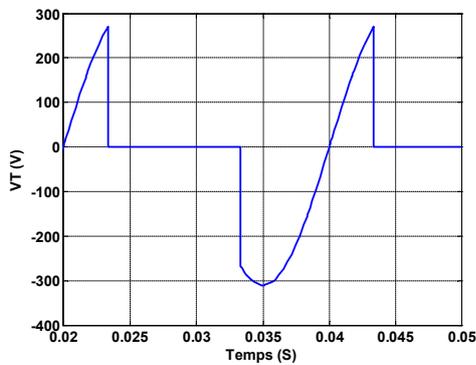
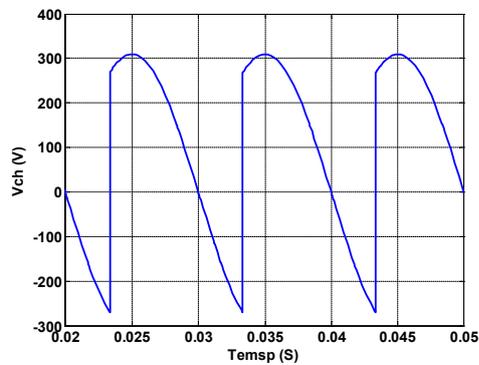
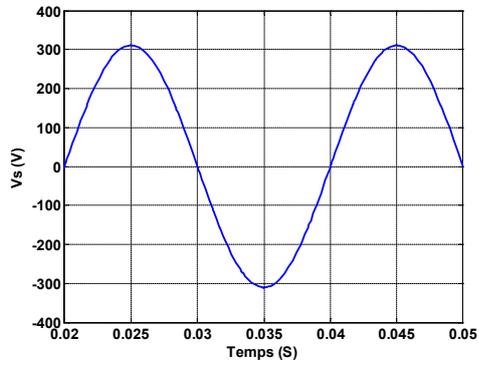


Figure I.27 : Formes d'ondes :  
Vs, Vch, et VT

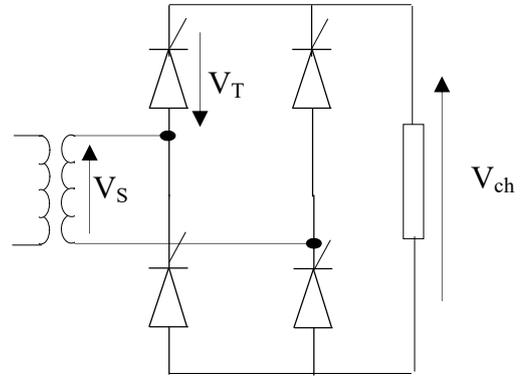


Figure I.26 : Circuit du montage

$$V_s = V_m \sin(\omega t) \text{ avec } \omega = 2\pi f \text{ rd/S et } f = 50\text{Hz}$$

$$L = 60\text{mH}$$

$\alpha$  : Angle d'amorçage

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_{\text{ch}}(\theta) d\theta$$

$$= \frac{V_m}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sin(\theta) d\theta$$

$$= \frac{2V_m}{\pi} \cos(\alpha) \text{ (V)}$$

## 8-2/ Redressement commandé triphasé mono alternance :

Cas d'une charge très inductive (conduction continue)

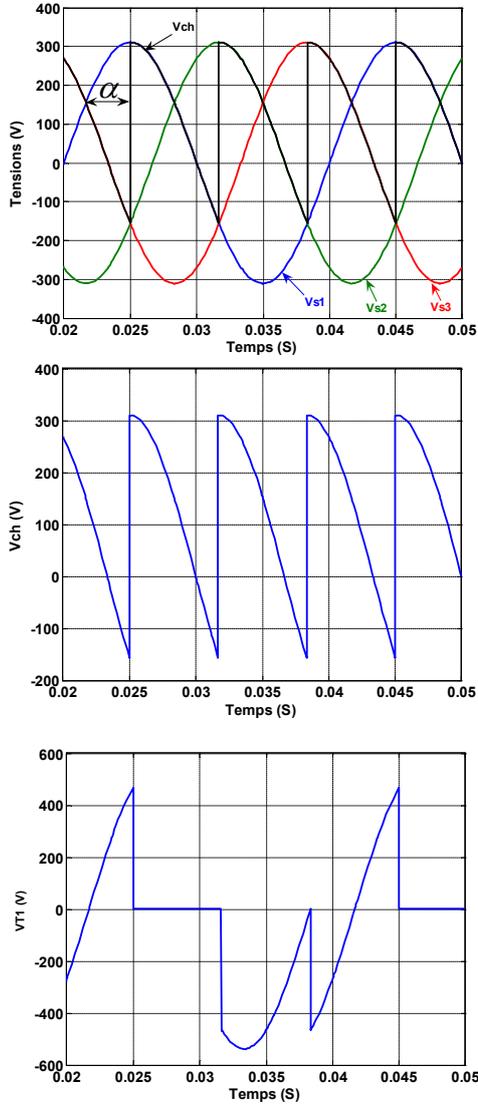


Figure I.29 : Formes d'ondes :  
 $V_{s123}$ ,  $V_{ch}$ , et  $V_T$

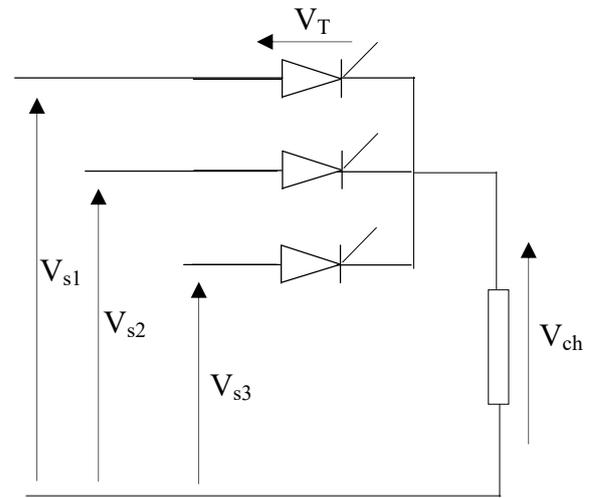


Figure I.28 : Circuit du montage

$$V_{S1} = V_m \sin(\theta),$$

$$V_{S2} = V_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$V_{S3} = V_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right),$$

Avec  $V_m = 220\sqrt{2}$ ,  $\theta = \omega t$  rd,  $\omega = 2\pi f$  rd/S et  $f = 50\text{Hz}$

$\alpha$  : Angle d'amorçage

$$\begin{aligned} V_{\text{moy}} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt \\ &= \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} V_m \sin(\theta) d\theta \end{aligned}$$

$$= \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\alpha) \text{ (V)}$$

### 8-3/ Redressement commandé triphasé double alternance :

Cas d'une charge très inductive (conduction continue)

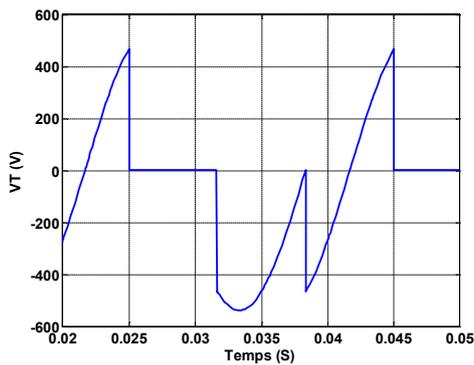
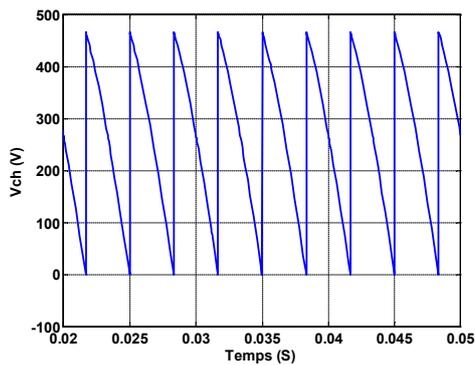
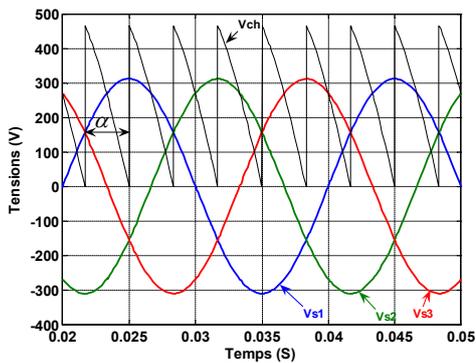


Figure I.31 : Formes d'ondes :  
 $V_{s123}$ ,  $V_{ch}$ , et  $V_T$

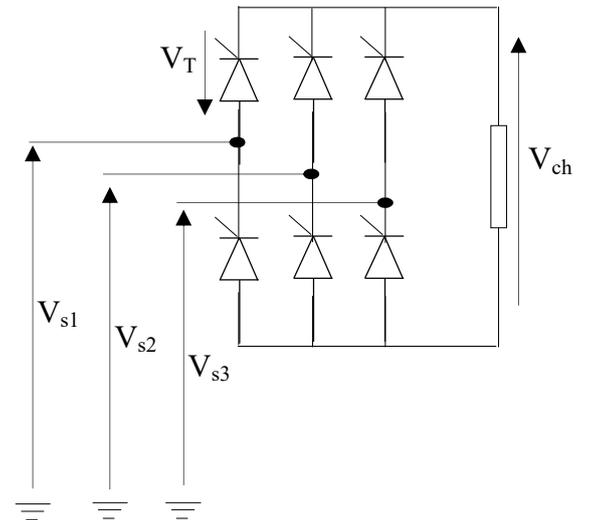


Figure I.30 : Circuit du montage

$$V_{s1} = V_m \sin(\theta),$$

$$V_{s2} = V_m \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$V_{s3} = V_m \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right),$$

Avec  $V_m = 220\sqrt{2}$ ,  $\theta = \omega t$  rd,  $\omega = 2\pi f$  rd/S et  $f = 50\text{Hz}$

$\alpha$  : Angle d'amorçage

$$\begin{aligned} V_{\text{moy}} &= \frac{1}{T} \int_0^T V_{ch}(t) dt \\ &= \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} V_m \sin\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) d\theta \end{aligned}$$

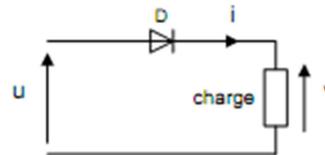
$$= \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\alpha) \text{ (V)}$$

## Série d'exercices N°01(résolue)

### EXO 01 :

La tension  $u$  est sinusoïdale alternative.  $D$  est une diode supposée parfaite (tension de seuil nulle). La charge est une résistance  $R$ .

- 1- Quel est l'état de la diode quand  $u > 0$  ?  
 En déduire la relation entre  $v$  et  $u$ .
- 2- Quel est l'état de la diode quand  $u < 0$  ?  
 En déduire la tension  $v$ .
- 3- Tracer  $u$  et  $v$  en fonction de temps sur une période.
- 4- Calculer  $V_{moy}$  et  $I_{moy}$ .
- 5- Calculer la valeur efficace de la tension  $v$ .
- 6- Application numérique  
 La valeur efficace de la tension  $u$  est de 10 V.  
 $R = 220 \Omega$ .

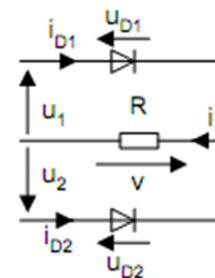
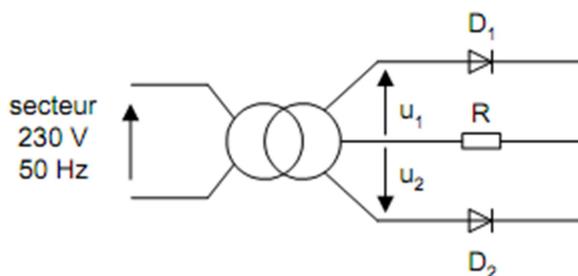


### EXO 02 :

On branche au secondaire du transformateur un pont redresseur constitué de deux diodes. La valeur efficace des tensions  $u_1(t)$  et  $u_2(t)$  est égale à 10 volts. La charge du redresseur est une résistance  $R$ .

On suppose que la tension de seuil des diodes est nulle (diodes parfaites).

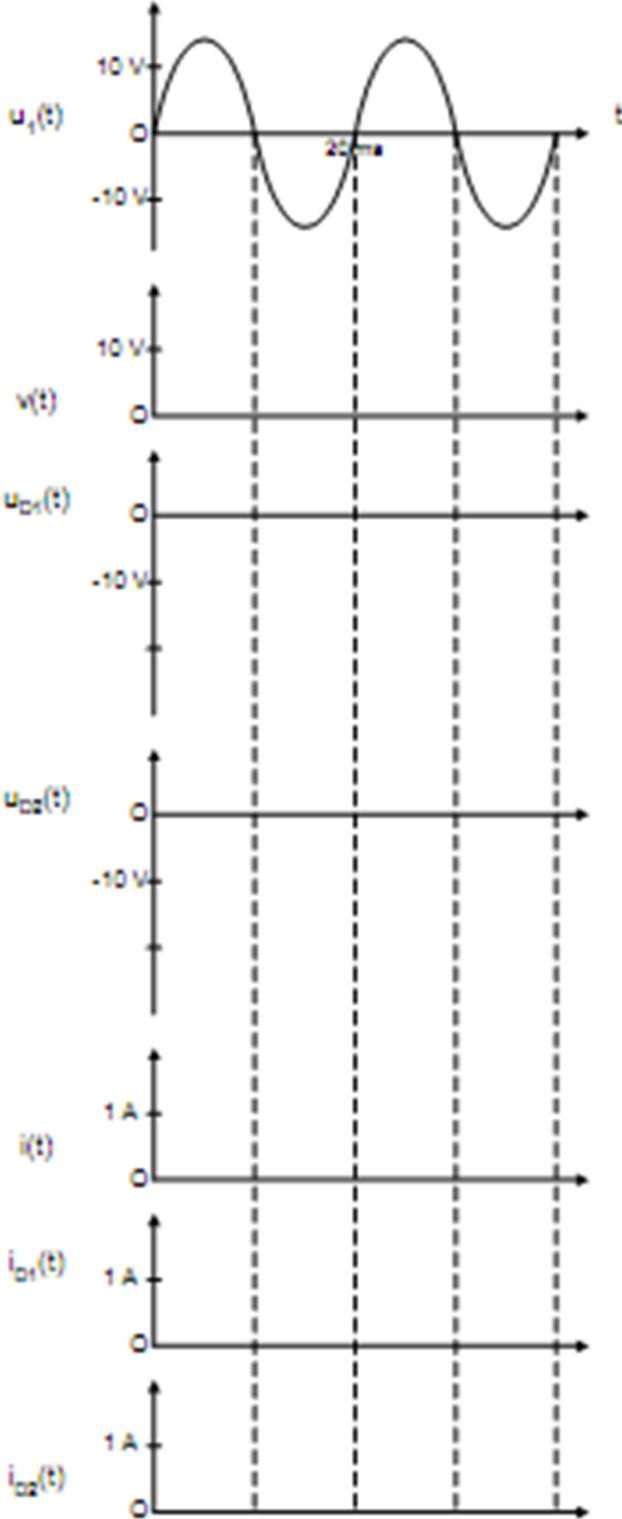
- 1- Quel est l'état des diodes quand  $u_1 > 0$  ?
- 2- Quel est l'état des diodes quand  $u_1 < 0$  ?
- 3- Compléter, en les justifiant, les chronogrammes de  $v$ ,  $u_{D1}$ ,  $u_{D2}$ ,  $i$ ,  $i_{D1}$  et  $i_{D2}$  (cf. document réponse).



On donne :  $R = 10 \Omega$ .

- 4- Calculer les valeurs moyennes suivantes :  $V_{moy}$ ,  $I_{moy}$ ,  $I_{D1moy}$  et  $I_{D2moy}$ .
- 5- Montrer que :  $V_{eff} = U_{1eff} (= 10 \text{ V})$ .
- 6- En déduire les valeurs efficaces des courants :  $I_{eff}$ ,  $I_{D1eff}$  et  $I_{D2eff}$ .
- 7- Calculer la puissance active consommée par la résistance.

DOCUMENT REPOSE



**EXO 03 :**

Une charge résistive  $R = 100 \Omega$  est alimentée à travers un thyristor Th (supposé parfait) par une source de tension sinusoïdale alternative  $u$  de valeur efficace  $U_{\text{eff}}=233\text{V}$ . Soit  $\theta$  l'angle de retard à l'amorçage de Th est égale à  $\pi/3$ .

On relève les chronogrammes de  $u$ ,  $i_G$  et  $v$  sur la figure 2 :

- 1- Donner l'expression et l'allure de la tension  $v$  sur une période.
- 2- Indiquer les intervalles de conduction et de blocage du thyristor.
- 3- Montrer que la valeur moyenne de la tension  $v$  est :

$$\langle v \rangle = \frac{\hat{v}}{2\pi} (1 + \cos \theta)$$

- 4- Faire l'application numérique.
- 5- Compléter les chronogrammes de  $u_{Th}$  et  $i$  :

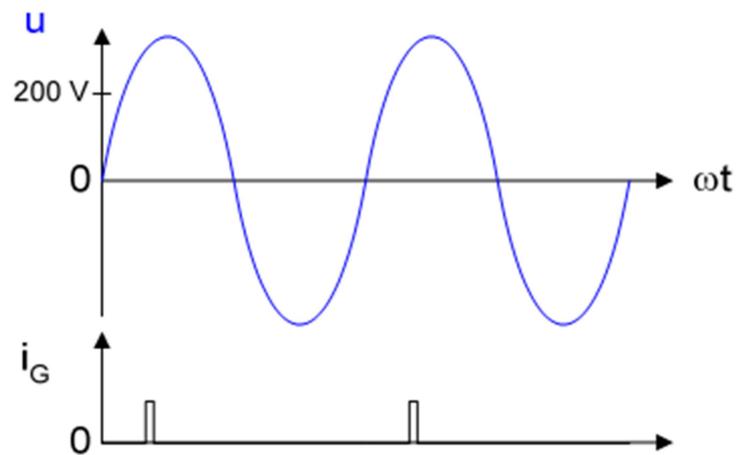
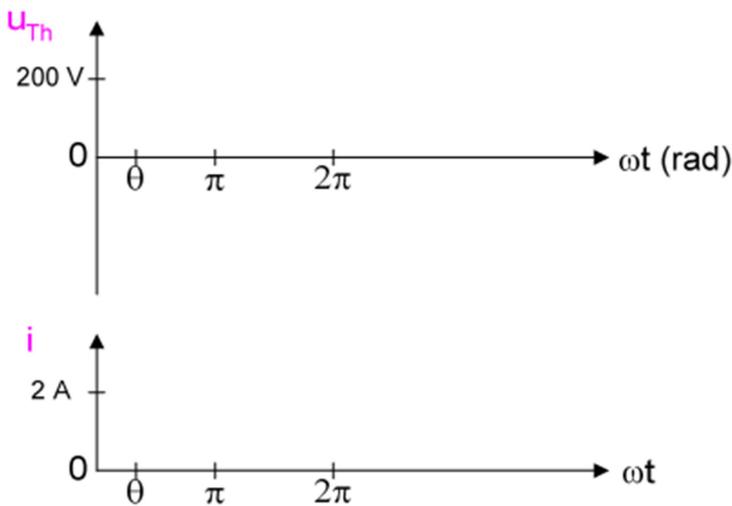
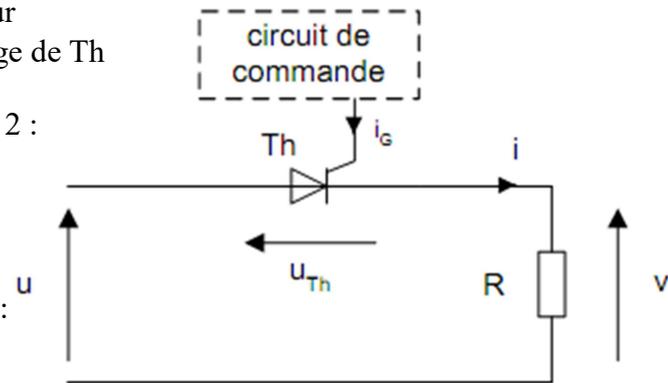


Figure 2

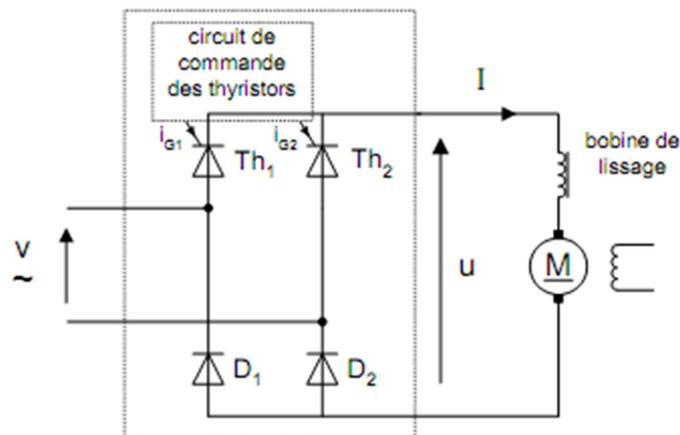
**EXO 04 :**

Un pont mixte monophasé alimente un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante. Il délivre une tension  $u$  de valeur moyenne  $\langle u \rangle = 169 \text{ V}$ , l'angle  $\theta$  de retard à l'amorçage des thyristors étant réglé à  $45^\circ$ . Le courant dans le moteur est parfaitement lissé par une bobine de résistance interne  $r = 0,1 \Omega$ . Son intensité  $I$  est égale à  $25 \text{ A}$ .

La vitesse de rotation du moteur est de  $1800 \text{ tr/min}$ .

Le pont est alimenté avec une tension sinusoïdale  $v$  de fréquence  $50 \text{ Hz}$ .

- 1- Représenter en fonction temps la tension  $u(t)$  et la tension  $v(t)$  en précisant les intervalles de conduction de chaque thyristor et de chaque diode sur une période.
- 2- Calculer la valeur efficace de  $v(t)$ .
- 3- La résistance de l'induit du moteur est  $R = 0,4 \Omega$ . Calculer la f.e.m. du moteur.
- 4- En déduire la puissance électromagnétique  $P_{\text{em}}$  du moteur.
- 5- Calculer la puissance absorbée par l'induit du moteur.



**EXO 05 :**

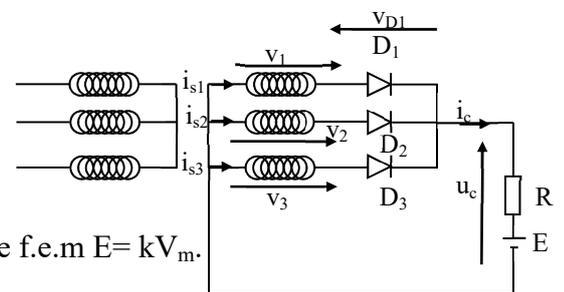
Soit le montage de la figure suivante :

Le secondaire du transformateur triphasé délivre un système de tensions équilibrées de valeur efficace 127V.

La charge est une résistance pure ( $R=10\Omega$ ) en série avec une f.e.m  $E= kV_m$ .

1. Donner la forme de la tension redressée, du courant redressé et de la tension inverse aux bornes d'une diode.
2. Calculer la valeur moyenne de la tension redressée et la valeur moyenne du courant redressé.
3. Tracer la forme des courants secondaires et calculer leurs valeurs moyennes.

(prendre  $k = \frac{1}{\sqrt{2}}$  et  $k = \frac{1}{4}$ ).



## Solutions des exercices

### EXO 01 :

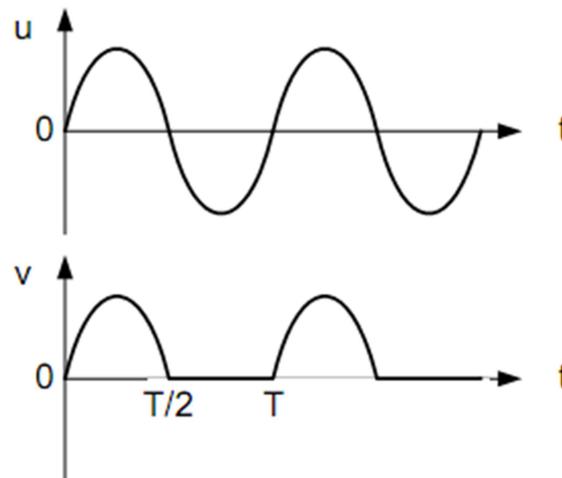
1- Quel est l'état de la diode quand  $u > 0$  ?  
 En déduire la relation entre  $v$  et  $u$ .

La diode conduit.  
 $v = u$

2- Quel est l'état de la diode quand  $u < 0$  ?  
 En déduire la tension  $v$ .

La diode est bloquée.  
 $i = 0$  donc  $v = 0$  V.

3- Tracer  $u$  et  $v$  en concordance de temps.



4- On rappelle que :

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

$$\begin{aligned} \langle v \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \hat{V} \sin(\omega t) dt + \frac{1}{T} \int_{T/2}^T 0 \cdot dt \\ &= \frac{\hat{V}}{T} \left[ \frac{-\cos(\omega t)}{\omega} \right]_0^{T/2} = \frac{\hat{V}}{T} \left( \frac{-\cos(\omega T/2)}{\omega} - \frac{-\cos(0)}{\omega} \right) = \frac{\hat{V}}{T} \left( \frac{-\cos(\pi)}{\omega} - \frac{-\cos(0)}{\omega} \right) = \frac{2\hat{V}}{\omega T} \\ &= \frac{\hat{V}}{\pi} \end{aligned}$$

$$\langle v \rangle = \frac{\hat{V}}{\pi} = \frac{\hat{U}}{\pi} = \frac{U_{eff} \sqrt{2}}{\pi} = \frac{10 \times \sqrt{2}}{\pi} = 4,5 \text{ V}$$

Remarque :  $\hat{V} = V_{max}$

$$\langle V \rangle = V_{moy}$$

$$\langle i \rangle = \frac{\langle v \rangle}{R} = \frac{4,5}{220} = 20,5 \text{ mA}$$

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} v^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2T} \int_0^T u^2(t) dt} = \frac{U_{eff}}{\sqrt{2}} = 7,1 \text{ V}$$

**EXO 02 :**

1- D1 conduit et D2 est bloquée.

2- D2 conduit et D1 est bloquée.

3-  $u_1 > 0 : u_{D1} = 0$  et  $v = u_1 ; u_{D2} = u_2 - v = -2u_1 < 0$

$u_1 < 0 : u_{D2} = 0$  et  $v = u_2 = -u_1 > 0 ; u_{D1} = u_1 - v = 2u_1 < 0$

Loi d'Ohm :  $i = v/R$

$i_{D1} = i$  quand D1 conduit ;  $i_{D1} = 0$  quand D1 est bloquée

$i_{D2} = i$  quand D2 conduit ;  $i_{D2} = 0$  quand D2 est bloquée

(cf. document réponse).

4-

$$\langle v \rangle = \frac{2\hat{v}}{\pi} = \frac{2 \times 10 \sqrt{2}}{\pi} = 9,0 \text{ V}$$

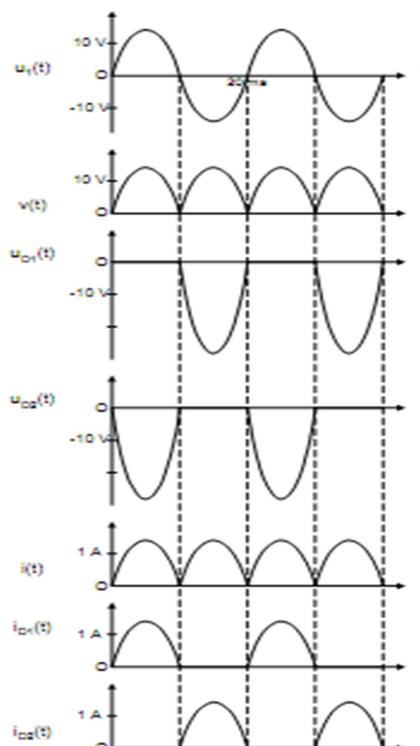
$$\langle i \rangle = \langle v \rangle / R = 0,90 \text{ A}$$

$$\langle i_{D1} \rangle = \langle i \rangle / 2 = 0,45 \text{ A}$$

$$\langle i_{D2} \rangle = \langle i_{D1} \rangle = 0,45 \text{ A}$$

5-

Document réponse



6-

$$v = |u_1| \quad v^2 = u_1^2 \quad \text{donc : } v_{\text{eff}} = \sqrt{\langle u_1(t)^2 \rangle} = u_{1\text{eff}}$$

Loi d'Ohm :  $i_{\text{eff}} = v_{\text{eff}} / R = 1 \text{ A}$

$$i_{D1\text{ eff}} = \sqrt{\langle i_{D1}(t)^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\langle i(t)^2 \rangle}{2}} = \frac{i_{\text{eff}}}{\sqrt{2}} = 0,71 \text{ A}$$

$$i_{D2\text{ eff}} = i_{D1\text{ eff}} = 0,71 \text{ A}$$

7- Calcul de la puissance active consommée par la résistance

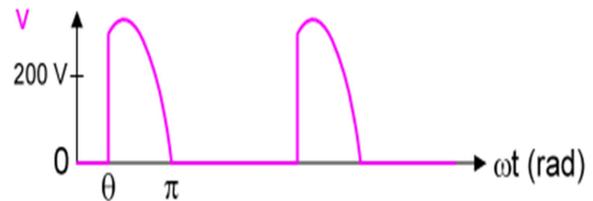
$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T Ri(t)^2 dt = \frac{R}{T} \int_0^T i(t)^2 dt = RI_{\text{eff}}^2$$

$$P = 10 \text{ Watts}$$

### EXO 03 :

1- L'expression de la tension  $v(t)$  :

$v = u$  quand le thyristor est conducteur.  
 $v = Ri = 0$  quand le thyristor est bloqué.



2- Les intervalles de conduction du Th/

$[\pi/3, \pi]$  Th est passant

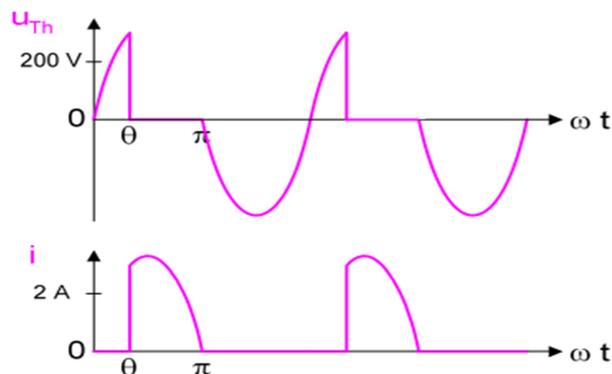
$[0, \pi/3] \cup [\pi, 2\pi]$  Th est bloqué

3-

$$\langle V \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{T} \int_{\theta}^{\pi} v(t) dt = \frac{\hat{V}}{2\pi} (1 + \cos\theta) = \frac{330}{2\pi} (1 + \cos 60) = 80V$$

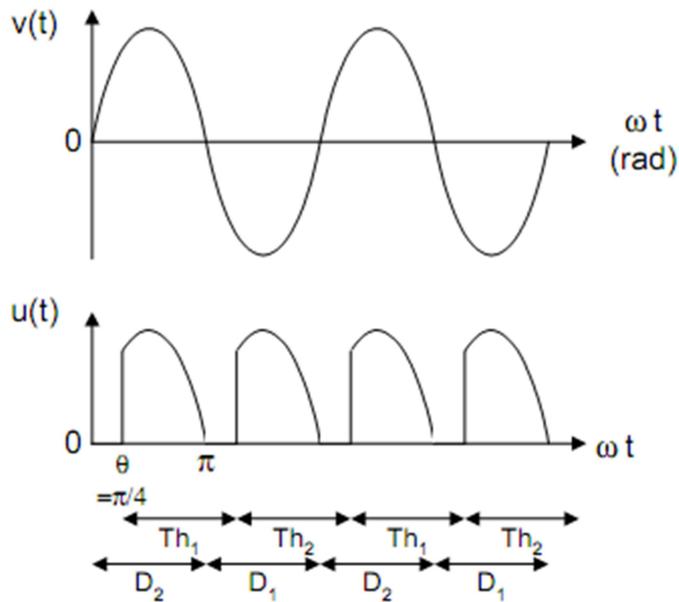
4- Les chronogrammes de  $u_{Th}$  et  $i$  :

Loi des branches :  $u_{Th} = u - v$   
 Loi d'Ohm :  $i = v/R$



**EXO 04 :**

1- L'allure de  $v(t)$  et  $u(t)$  :



2- Valeur efficace de  $v(t)$

$$\langle u \rangle = \frac{\hat{u}}{\pi} (1 + \cos\theta)$$

$$\text{d'où } \hat{u} = \frac{\pi \times 169}{1 + \cos 45^\circ} = 311 \text{ V}$$

$$\text{Valeur efficace : } V = \frac{\hat{v}}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} = \frac{311}{\sqrt{2}} = 220 \text{ V}$$

3- La f.e.m du moteur

$$E = \langle u \rangle - (r + R)I = 169 - (0,1 + 0,4) \times 25 = 156,5 \text{ V}$$

4- La puissance électromagnétique du moteur

$$EI = 156,5 \times 25 = 3,91 \text{ kW}$$

5- La puissance absorbée par l'induit du moteur

$$\langle u \rangle I - rI^2 = 4,16 \text{ kW}$$

$$\text{Autre méthode : } P_{em} + RI^2 = 4,16 \text{ kW}$$

**EXO 05 :**

I-  $k = 1/\sqrt{2}$

$$V_{max} \sin(\theta_0) = E \Rightarrow \sin(\theta_0) = \frac{E}{V_{max}} = \frac{kV_{max}}{V_{max}} = k = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \theta_0 = \frac{\pi}{4} \text{ et } \theta_1 = \frac{3\pi}{4}$$

1- La forme de la tension redressée, du courant redressé et de la tension inverse  $V_{D1}$

$$u_c(t) = \begin{cases} v_1(t) & \text{si } D1 \text{ passante} \\ v_2(t) & \text{si } D2 \text{ passante} \\ v_3(t) & \text{si } D3 \text{ passante} \\ E & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$$i_c(t) = \frac{u_c(t) - E}{R} = \begin{cases} \frac{v_1(t) - E}{R} & \text{si } D1 \text{ passante} \\ \frac{v_2(t) - E}{R} & \text{si } D2 \text{ passante} \\ \frac{v_3(t) - E}{R} & \text{si } D3 \text{ passante} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$$v_{D1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } D1 \text{ passante} \\ v_1(t) - v_2(t) & \text{si } D2 \text{ passante} \\ v_1(t) - v_3(t) & \text{si } D3 \text{ passante} \\ v_1(t) - E & \text{ailleurs} \end{cases}$$

2- La valeur moyenne de  $u_c(t)$  et  $i_c(t)$  :

$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) dt = \frac{3}{2\pi} \left[ \int_{\pi/6}^{\pi/4} E dt + \int_{\pi/4}^{3\pi/4} v_1(t) dt + \int_{3\pi/4}^{5\pi/6} E dt \right] = V \left( \frac{1}{4} + \frac{3}{\pi} \right) = 153V$$

$$I_{cmoy} = \frac{U_{cmoy} - E}{R} = \frac{153 - 127}{10} = 2,6A$$

3- Les formes et les chronogrammes des courants  $i_{sj} (j=1,3)$

$$i_{s1}(t) = \begin{cases} i_c(t) & \text{si } D_1 \text{ est passante} \\ 0 & \text{si } D_1 \text{ est bloquée} \end{cases}$$

$$i_{s2}(t) = \begin{cases} i_c(t) & \text{si } D_2 \text{ est passante} \\ 0 & \text{si } D_2 \text{ est bloquée} \end{cases}$$

$$i_{s3}(t) = \begin{cases} i_c(t) & \text{si } D_3 \text{ est passante} \\ 0 & \text{si } D_3 \text{ est bloquée} \end{cases}$$

$$I_{smoy} = ?$$

$$I_{smoy} = I_{cmoy}/3 = 0,87A$$

II-  $k = 1/4$

$$V_{max} \sin(\theta_0) = E \Rightarrow \sin(\theta_0) = \frac{E}{V_{max}} = \frac{kV_{max}}{V_{max}} = k = \frac{1}{4} \Rightarrow \theta_0 = 14,48^\circ \text{ et } \theta_1 = 165,52^\circ$$

On remarque que  $\theta_0$  est inférieur à  $\pi/6$  donc la présence de E n'influe pas sur la forme de la tension  $u_c(t)$  et on obtient les résultats suivants :

4- La forme de la tension redressée, du courant redressé et de la tension inverse  $V_{D1}$

$$u_c(t) = \begin{cases} v_1(t) & \text{si } D1 \text{ passante} \\ v_2(t) & \text{si } D2 \text{ passante} \\ v_3(t) & \text{si } D3 \text{ passante} \end{cases}$$

$$i_c(t) = \frac{u_c(t) - E}{R} = \begin{cases} \frac{v_1(t) - E}{R} & \text{si } D1 \text{ passante} \\ \frac{v_2(t) - E}{R} & \text{si } D2 \text{ passante} \\ \frac{v_3(t) - E}{R} & \text{si } D3 \text{ passante} \end{cases}$$

$$v_{D1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } D1 \text{ passante} \\ v_1(t) - v_2(t) & \text{si } D2 \text{ passante} \\ v_1(t) - v_3(t) & \text{si } D3 \text{ passante} \end{cases}$$

5- La valeur moyenne de  $u_c(t)$  et  $i_c(t)$  :

$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) dt = \frac{3}{2\pi} \left[ \int_{\pi/6}^{5\pi/6} v_1(t) dt \right] = \frac{3}{2\pi} \left[ \int_{\pi/6}^{5\pi/6} V_{max} \sin \omega t dt \right] = \frac{3V_{max}}{\pi} \cos \frac{\pi}{6}$$

$$= 148,53V$$

$$I_{cmoy} = \frac{U_{cmoy}}{R} = 14,85A$$

6- Les formes et les chronogrammes des courants  $i_{sj} (j=1,3)$

$$i_{s1}(t) = \begin{cases} i_c(t) & \text{si } D_1 \text{ est passante} \\ 0 & \text{si } D_1 \text{ est bloquée} \end{cases}$$

$$i_{s2}(t) = \begin{cases} i_c(t) & \text{si } D_2 \text{ est passante} \\ 0 & \text{si } D_2 \text{ est bloquée} \end{cases}$$

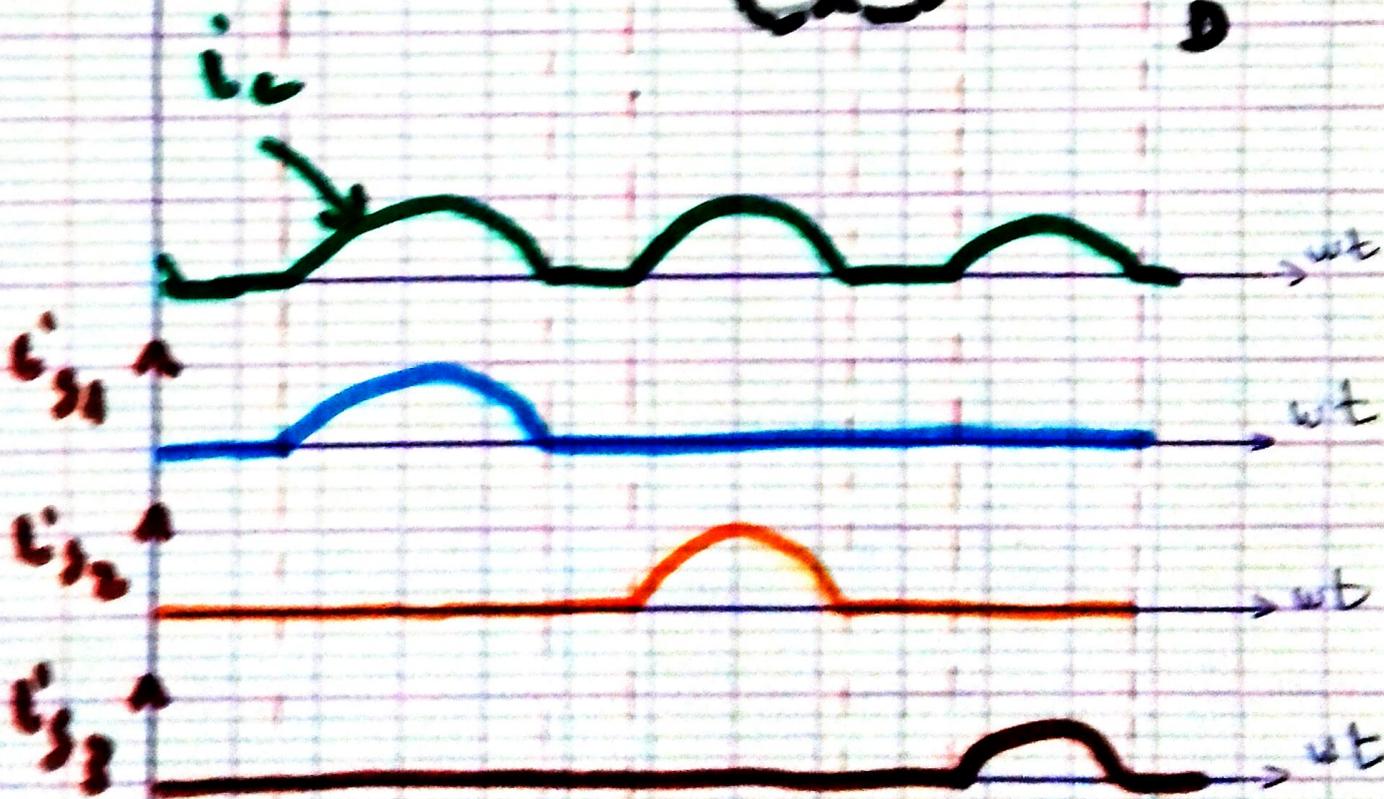
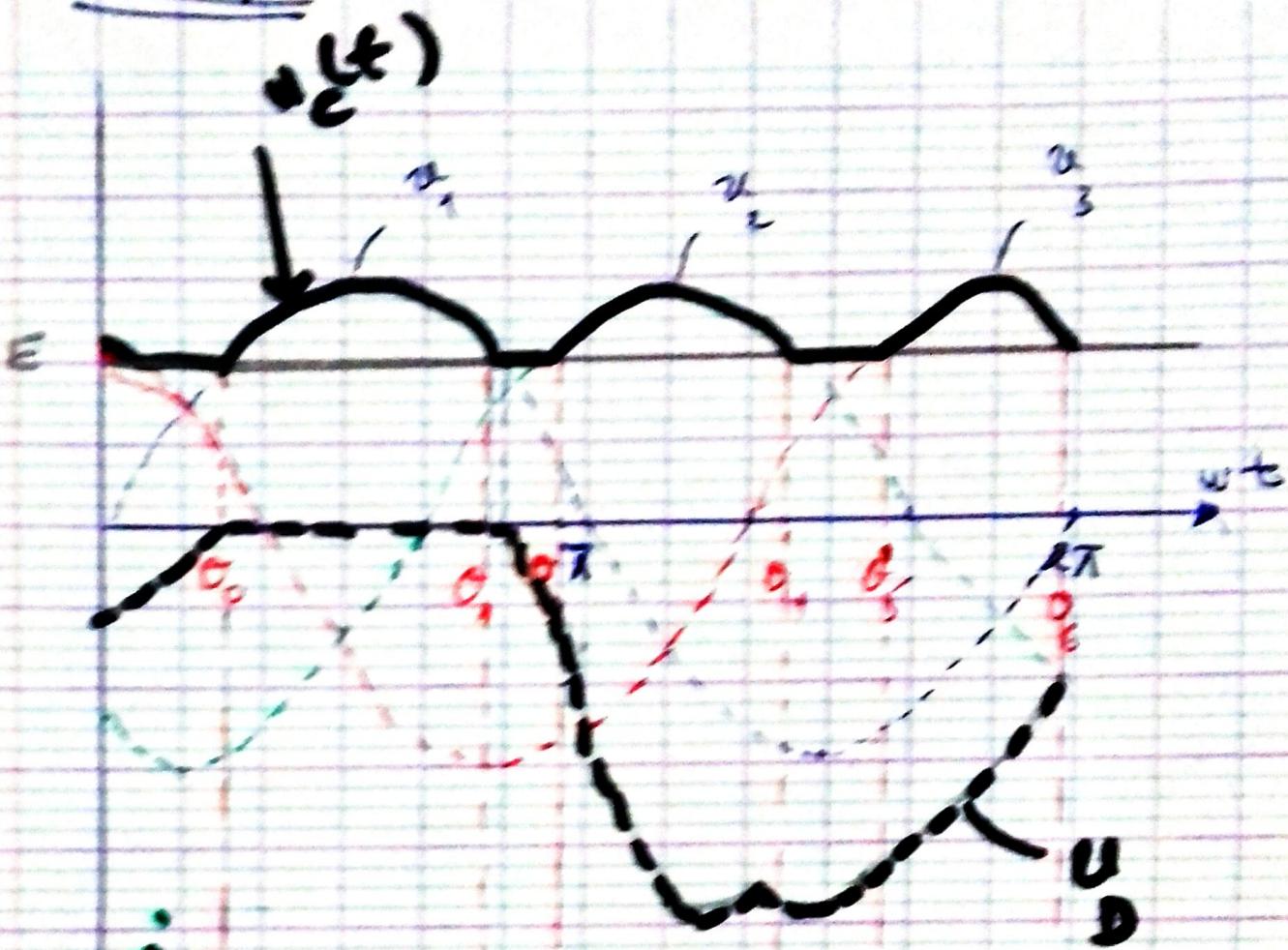
$$i_{s3}(t) = \begin{cases} i_c(t) & \text{si } D_3 \text{ est passante} \\ 0 & \text{si } D_3 \text{ est bloquée} \end{cases}$$

$$I_{\text{smoy}} = ?$$

$$I_{\text{smoy}} = I_{\text{cmoy}}/3 = 4,95\text{A}$$

### Les chronogrammes

$k = 1/\sqrt{2}$



$r = 1/4$

