



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العلوم والتكنولوجيا محمد بوضيافة، وهران

Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran

Faculté de Génie Electrique

Département d'Automatique

---

**Polycopié de Travaux Pratiques**  
**Electronique de Puissance**  
**Avec PowerSim**

---

Réalisé par :

**Dr.Bendaha Yesma**

Février 2016

# **Avant-Propos**

Ce polycopié de travaux pratiques intitulé Electronique de puissance avec Power Sim a été réalisé au sein du département d'automatique, et est destiné aux étudiants de Master1, Automatique.

Le logiciel graphique Power Sim est téléchargeable gratuitement en version Démo, qui est largement suffisante pour permettre la réalisation de la majorité des travaux pratiques proposés ici.

La première séance des travaux pratiques sera consacrée à une prise en main du logiciel PSIM.

En annexe on trouvera des rappels de cours qui aideront au bon déroulement du TP.

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier chaleureusement :*

*Monsieur Mohamed Bourahla professeur au département d'Electrotechnique de l'Université, USTO.M.B – Oran,*

*Monsieur Nadir Bouchetata, maitre de conférences au département d'Electrotechnique USTO M.B – Oran,*

*Monsieur Benghanem Mustapha maitre de conférences au département d'Automatique de l'Université USTO.MB– Oran,*

*Qu'ils soient remerciés de la confiance qu'ils m'ont témoignée, de leurs disponibilités, de leurs suggestions pertinentes, de leurs précieux commentaires, et leurs grandes qualités pédagogiques.*

# Sommaire

<b>Prise en main du logiciel PSIM</b>	<b>1</b>
<a href="http://www.powersimtech.com/">(http://www.powersimtech.com/)</a>	
<b>TP1 ○ Redresseur Monophasé Simple Alternance</b>	
1-1. P2 non commandé	<b>6</b>
1-2. P2 commandé	<b>13</b>
<b>TP2 ○ Redresseur Monophasé Double Alternance</b>	
2-1.Redresseur double alternance PD2 à diodes	<b>17</b>
2-2.Redressement monophasé commandé : pont mixte	<b>22</b>
<b>TP3 ● Redresseur Triphasé Simple Alternance P3</b>	
3-1. P3 tout diodes	<b>25</b>
3-2. P3 Commandé	<b>27</b>
<b>TP4 ● Redresseur Triphasé Double Alternance PD3</b>	
4-1. Association transformateur triphasé et redresseur PD3 à diodes	<b>31</b>
4-2. Redresseur triphasé tout thyristors PD3T	<b>36</b>
<b>TP5 ● Hacheurs</b>	
5-1. Définition et symbole Hacheur série	<b>40</b>
5-2. Principe du hacheur dévolteur	<b>40</b>
5-2.1. Débit sur une charge résistive	<b>40</b>
5-2.2. Variateur de vitesse	<b>41</b>
<b>TP6 ● Onduleur monophasé en pont</b>	
6-1. Définition et symbole	<b>44</b>
6-2. Commande symétrique-Fréquence constante	<b>44</b>
<b>TP7 ● Onduleur triphasé</b>	
7-1. Principe de fonctionnement de l'onduleur	<b>47</b>
7-1.1 Commande pleine onde	<b>47</b>
7-1.2.Commande MLI	<b>48</b>
<b>TP8 ○ Gradateur monophasé</b>	
8-1. Schéma de principe Débit sur charge résistive	<b>53</b>
8-2. Etude du fonctionnement	
8-2.1 Débit sur charge inductive	<b>53</b>
8-2.2 Charge inductive	<b>54</b>

## Annexes

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

# **SIMULATION AVEC PSIM**

---

**PRISE EN MAIN DU  
LOGICIEL GRAPHIQUE  
POWERSIM**

(<http://www.powersimtech.com/>)

**Objectif** L'apprentissage d'un logiciel de simulation d'électronique de puissance, outil qui va par la suite être utilisé régulièrement dans l'ensemble des autres T.P. d'électronique de puissance.

## Présentation du logiciel PSIM

La simulation avec Psim est une représentation artificielle de la réalité, paramétrable et basée sur un modèle, exploitée à des fins de compréhension et d'étude, de démonstration ou d'explication

## Introduction

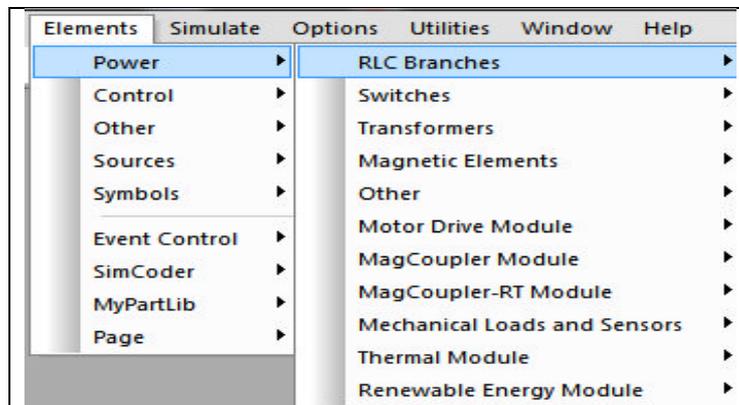
Le logiciel **PSIM**, est conçu tout particulièrement pour les de circuits d'électrotechnique et d'électronique de puissance.

Il s'agit d'un ensemble logiciel formé de trois modules liés :

- Un éditeur de schéma, **SIMCAD**, servant à décrire l'ensemble du système à simuler.
- Le simulateur électrique proprement dit, **PSIM**.
- Un programme d'affichage graphique des résultats de simulation, **SIMVIEW**.

Ce logiciel considère les semi-conducteurs de puissance comme des interrupteurs, ouverts ou fermés. Les diodes, transistors ou thyristors ne présentent donc pas de chute de tension aux bornes lorsqu'ils sont en conduction.

Le logiciel permet de dessiner le schéma du montage, à partir des éléments de la bibliothèque (éléments de commande et de contrôle, machines, transformateurs, interrupteurs électroniques,...).



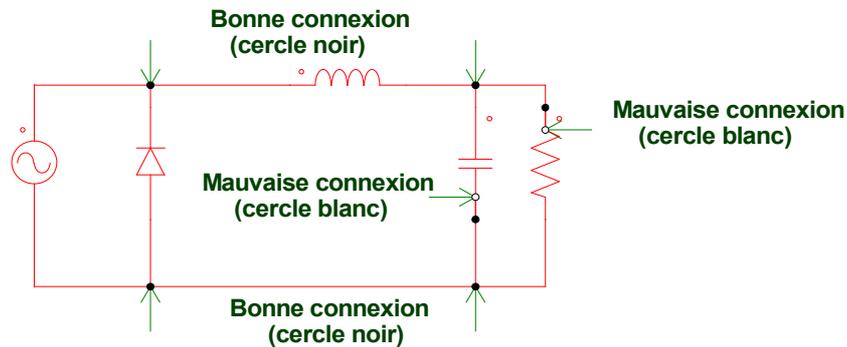
## Description du système à simuler

La description du système à simuler est réalisée graphiquement sous forme de schéma électrique. Une barre d'outils, en bas de l'écran permet d'accéder rapidement à la plupart des éléments nécessaires.

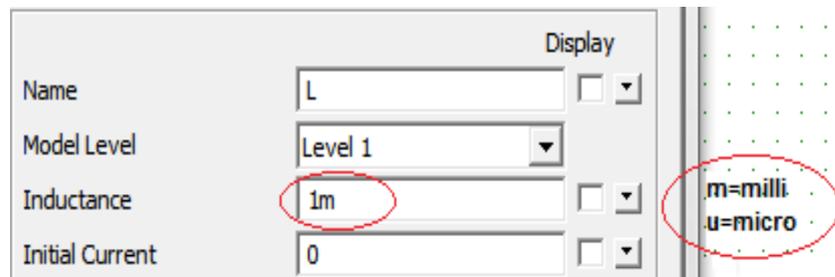


- Les liaisons électriques entre les composants s'effectuent également à la souris après avoir choisi l'outil de connexion  **Wire**
- Une mauvaise connexion se traduit par un petit cercle au lieu d'un point, vous

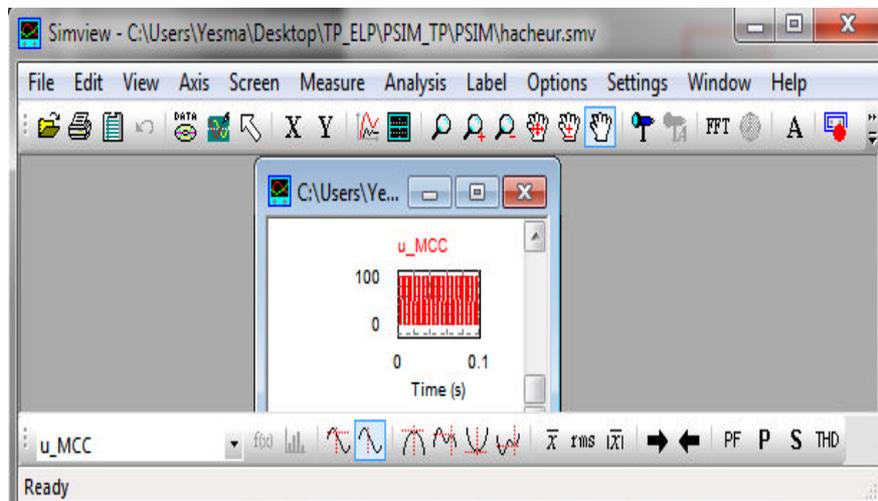
aurez alors un message d'erreur.



Pour affecter une valeur à une inductance par exemple ( $L=1\text{mH}$ ), il faut cliquer sur l'élément et remplir le tableau comme indiqué ci-dessous :



Après l'exécution du programme et pour l'observation des signaux on exécute la commande Run Simview, la fenêtre ci-dessous va s'afficher :



## Étapes à suivre pour exécuter une simulation avec PSIM

Vous devez impérativement avant d'exécuter une simulation réaliser les points suivants

1. Etudier préalablement le fonctionnement théorique des montages étudiés, et faire les calculs demandés.

2. Construire le schéma électrique du circuit de commande (lorsqu'il existe),
3. Définir les valeurs des paramètres des éléments du circuit de commande,
4. Etablir le schéma électrique du circuit de puissance,
5. Définir les valeurs des paramètres des éléments du circuit de puissance,
6. Placer les sondes de mesures courant, tension-, afin de pouvoir accéder sous SIMVIEW, aux résultats de simulation souhaités,
7. Les interrupteurs (thyristor, transistor,...) doivent être obligatoirement contrôlés par un module **Gating Bloc**  ou par un **Alpha controller (ACTRL)**
8. Placer le Simulate control et définir les paramètres de simulation.
9. On lance la simulation en utilisant la touche  **Run Simulation (F8)**
10. Observation des signaux :  (Run simview)
11. Toute courbe tracée, et tout résultat trouvé devront être analysés et commentés.

TP1

**REDRESEMENT MONOPHASE SIMPLE ALTERNANCE**

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

**SIMULATION AVEC PSIM**

---

**TP N°1**

**REDRESSEMENT MONOPHASE  
SIMPLE ALTERNANCE**

**Objectif**

Il s'agit dans ce TP

D'apprendre à distinguer deux types de convertisseur : Un convertisseur où l'opérateur n'a pas la possibilité de régler la valeur moyenne de la tension de sortie, et un convertisseur où l'opérateur a la possibilité de régler la valeur moyenne de cette tension.

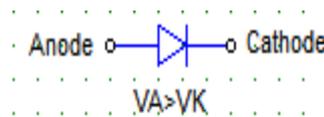
De faire l'étude et la simulation du redressement et du filtrage d'un signal alternatif, de réaliser des circuits de redressement en simple alternance, d'observer par **simview** le signal redressé et filtré, puis le comparer au modèle théorique.

**I. Redresseurs :**

Le redressement est la conversion d'une tension alternative en une tension continue. On utilise un convertisseur alternatif/continu pour alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif. Nous étudierons les redresseurs monophasés non commandés et commandés, constitués respectivement de diodes et de thyristors

**I.1. Redresseur mono alternance à diodes :**

Le redressement simple alternance n'est généralement utilisé que pour les applications à faibles puissance, comme par exemple les appareils électroménagers, ainsi que les simples appareils de chargement.



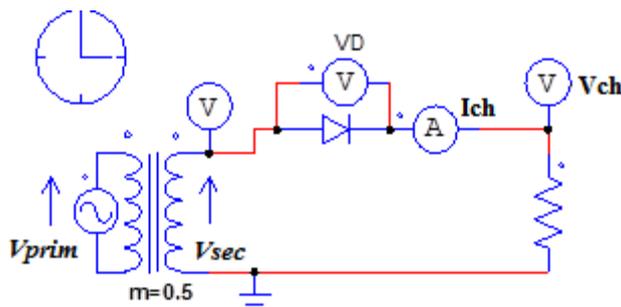
Le principe du redressement simple alternance non commandé est basé sur les propriétés des diodes. En effet, la diode se bloquant lorsque la tension à ses bornes est négative, elle supprime les alternances négatives du signal d'entrée.

Pendant les alternances positives, elle se comporte comme un court-circuit et n'altère donc pas le signal d'entrée. La diode joue ainsi le rôle de coupure qui laisse passer les tensions positives et coupe les tensions négatives.

**1. Manipulation n°1 : débit sur une charge résistive**

- Régler les paramètres suivants : Time step (pas de calcul=100µs). Total time (temps de simulation=60ms). Print time (origine des courbes tracées:0)
- Simuler le câblage pour un redresseur monophasé non commandé, débit sur une charge résistive  $R_L = 50\Omega$ . (Source monophasée :  $f=50\text{Hz}$  ;  $V_e=45\text{V}$  efficace)

Transformateur monophasé idéal :  $\frac{V_{sec}}{V_{prim}} = \frac{N_{sec}}{N_{prim}}$  et  $\frac{i_{sec}}{i_{prim}} = \frac{N_{prim}}{N_{sec}}$



<b>Diode voltage drop</b>	<b>Tension seuil</b>
<b>Initial position</b>	<b>0 pour passant 1 pour bloqué</b>

**2. Travail à effectuer**

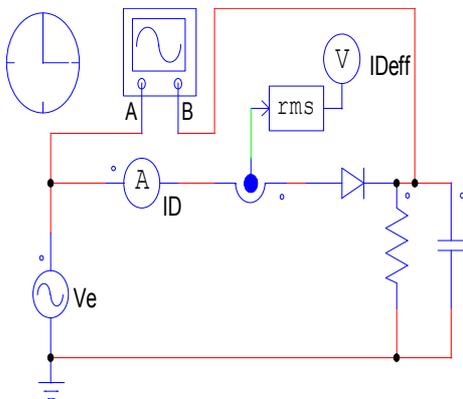
- 1- Visualiser les tensions  $V_{sec}(t)$ ,  $V_{ch}(t)$ ,  $V_D(t)$ , et le courant de charge  $i_{ch}(t)$ .
- 2- Calculer les valeurs moyennes et efficaces et le taux d'ondulation  $\tau$  de la tension redressée avec PSIM
- 3- Vérification théoriques des résultats obtenus
- 4- Réalisez un chargeur de batteries ( $E=40V$ , et  $R=50\Omega$ )
- 5- Analysez vos résultats, interprétez.

**On rappelle que :** Facteur de forme  $F = \frac{V_{ch}(eff)}{\langle V_{ch} \rangle}$  et le taux d'ondulation  $\tau = \sqrt{F^2 - 1}$

Sur Psim, on écrit, Peak Amplitude :  $V_{max}=45*\text{sqrt}(2)$

**3. Manipulation n°2 : débit sur une charge capacitive RC**

Réaliser le montage ci-dessous où le filtre passe-bas est un filtre RC, avec  $f = 1 \text{ kHz}$  ;  $U_{max} = 10 \text{ V}$  (pour minimiser l'effet de seuil) :



USTO		
Title	REDRESSEMENT	
Designed by	BENDAHA	
TRAVAUX	PRATIQUES	PSIM

- $C = 100 \mu F$  et R boîte de résistance variable.

R ( $\Omega$ )	1	10	50	100	200
$V_{ch_{mov}}$ (V)					
$V_{ch_{eff}}$ (V)					
$I_{ch_{mov}}$ (mA)					
$I_{ch_{eff}}$ (IFAV)					
$\Delta V$					
<b>F</b>					
<b><math>\tau</math></b>					
$V_{ch_{max}}$ (V)					
$V_{ch_{min}}$ (V)					

**Tableau1**

- Pour R fixé à 100Ω, on fait varier la capacité du condensateur selon le tableau2

C (μF)	0	10	50	100	2000
V <sub>ch_moy</sub> (V)					
V <sub>ch_eff</sub> (V)					
I <sub>ch_moy</sub> (mA)					
I <sub>ch_eff</sub> (IFAV)					
ΔV					
<b>F</b>					
<b>τ</b>					
V <sub>ch_max</sub> (V)					
V <sub>ch_min</sub> (V)					

Tableau2

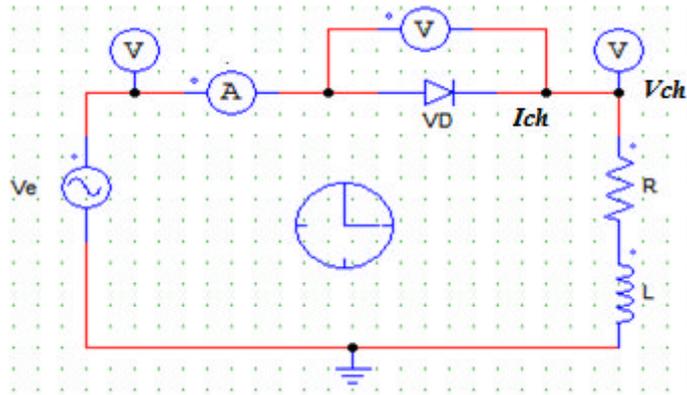
#### 4. Travail à effectuer

1. Pour C fixé à 100μF, faites varier R= 100Ω, 50Ω, 10Ω, 1Ω. Visualisez vos courbes, et remplir tableau1.
2. Pour R fixé à 100Ω, faites varier la capacité C= 100μF, 50μF, 10μF, 1μF. Visualisez vos courbes, et remplir tableau2.
3. Calculer l'expression analytique de :
  - La valeur moyenne du courant et de la tension dans la charge,
  - La valeur efficace du courant et de la tension dans la charge,
4. Avec PSIM sur le même graphique :
  - Tracer la tension d'entrée, la tension de la charge et la tension aux bornes des différents éléments -R, ou C.
  - Tracer le courant d'entrée, le courant dans la charge et le courant dans les différents éléments -R, ou C,
  - Donner l'expression calculée par le logiciel de la valeur moyenne de la tension et du courant dans la charge.
5. Expliquer les différences obtenues entre les courbes sur charge « capacitive » et sur charge résistive.
6. Calculer la capacité du condensateur qu'il faut placer dans ce montage pour avoir un taux d'ondulation  $\tau < 5\%$

**Remarque :** le travail se fera pour R=100Ω, et la valeur de la capacité sera celle qui donnera  $\tau = 5\%$

**5. Manipulation n°3: débit sur une charge inductive (RL)**

Simuler le cas d'une charge constituée d'une résistance  $R_L$  en série avec une inductance



Régler les paramètres suivants : Time step : 100µs, Total time : 20ms, Print time : 0

- Pour L fixé à 100mH, faites varier R, selon tableau 3 :

R (Ω)	1	10	50	100	500
$V_{ch_{mov}}$ (V)					
$V_{ch_{eff}}$ (V)					
$I_{ch_{mov}}$ (mA)					
$I_{ch_{eff}}$ (IFAV)					
$\Delta V$					
<b>F</b>					
<b><math>\tau</math></b>					
$V_{ch_{max}}$ (V)					
$V_{ch_{min}}$ (V)					

**Tableau3**

- Pour R fixé à 100Ω, faites varier L, selon tableau 4 :

L (mH)	1	10	50	100	200
$V_{ch_{mov}}$ (V)					
$V_{ch_{eff}}$ (V)					
$I_{ch_{mov}}$ (mA)					
$I_{ch_{eff}}$ (IFAV)					
$\Delta V$					
<b>F</b>					
<b><math>\tau</math></b>					
$V_{ch_{max}}$ (V)					
$V_{ch_{min}}$ (V)					

**Tableau4**

## 6. Travail à effectuer

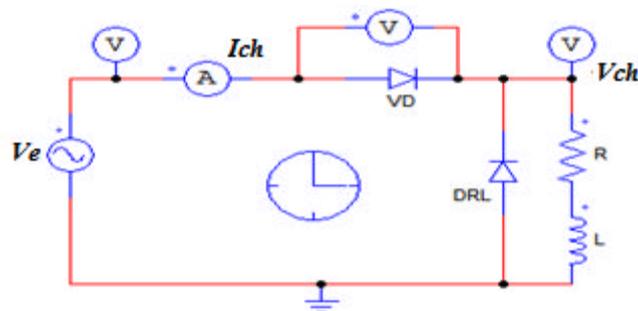
1. Pour L fixé et R variable, Visualisez et relevez vos courbes. (tableau 3)
2. Pour R fixé et L variable, Visualisez et relevez vos courbes. (tableau 4)
3. Expliquer les différences obtenues entre les courbes sur charge « inductive » et sur charge

résistive.

4. Justifier théoriquement les formes d'ondes, de  $i_{ch}(t)$ .
5. Que remarquez-vous, lorsqu'on augmente la valeur de l'inductance de 10mH à 100mH ?
6. Calculer théoriquement la tension moyenne redressée et le courant moyen redressé, pour  $R=10\Omega$ , et  $L=100mH$ , comparez les avec les valeurs obtenues par Psim.
7. Voyez-vous certaines similitudes entre le redressement mono-alternance sur charge capacitive et sur charge inductive ? Si oui les quelles ?

## 7. Manipulation n°4: Charge RL avec diode de roue libre DRL

Simuler le cas d'une charge constituée d'une résistance  $R_L = 10\Omega$  en série avec une inductance  $L = 100mH$ . Placer une diode de roue libre en anti parallèle avec la diode de redressement.

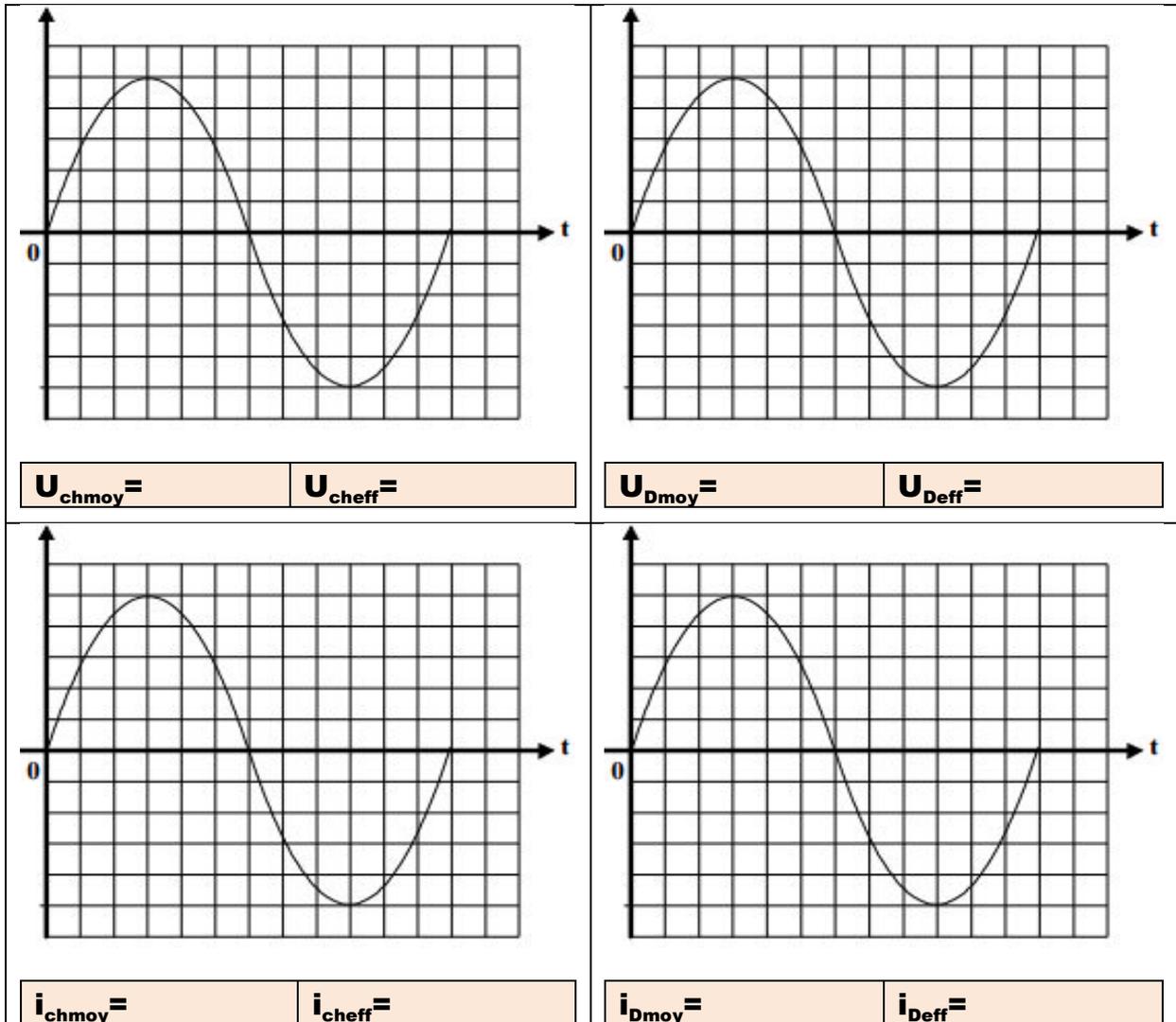


## 8. Travail à effectuer

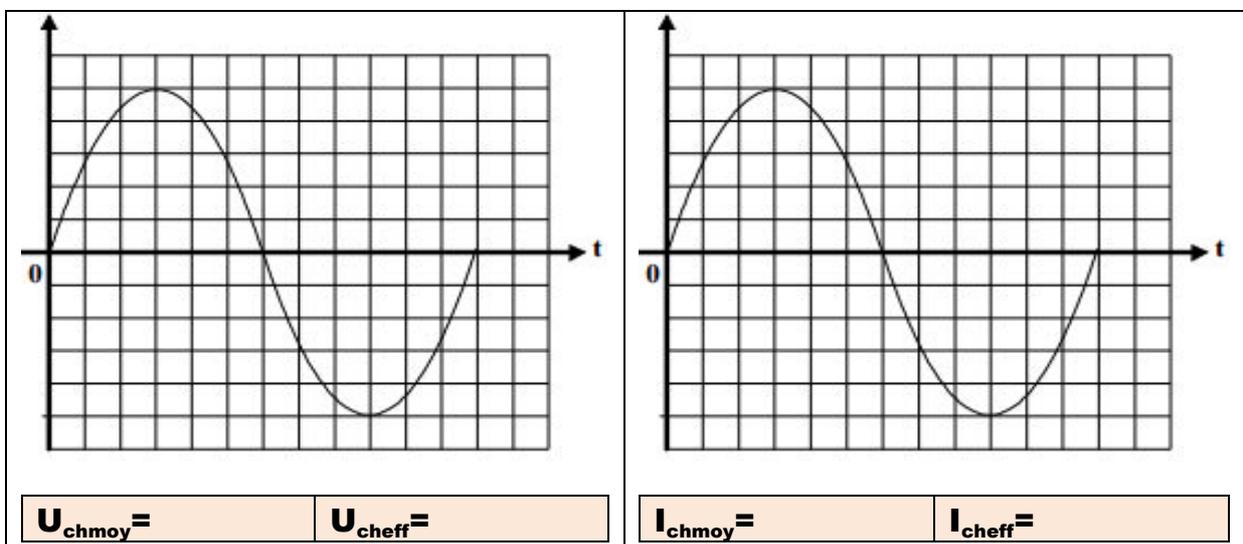
Garder le même réglage des paramètres

- 1- Visualiser et relever la tension et le courant au niveau de la charge.
- 2- Par un calcul analytique, justifier les formes d'ondes de la tension de charge
- 3- Quelles différences, remarquez-vous sur l'allure de la tension de charge entre la manipulation 3 et la manipulation 4 :
- 4- Quelles différences, remarquez-vous sur l'allure du courant de charge entre la manipulation 3 et la manipulation 4 :
- 5- D'après les résultats obtenus, Quel est selon vous le rôle de la diode de roue libre (DRL).

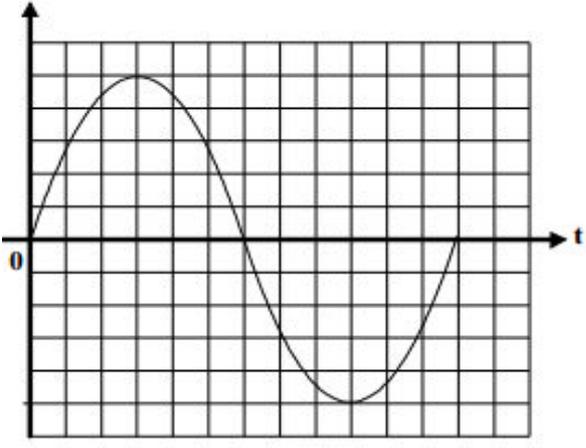
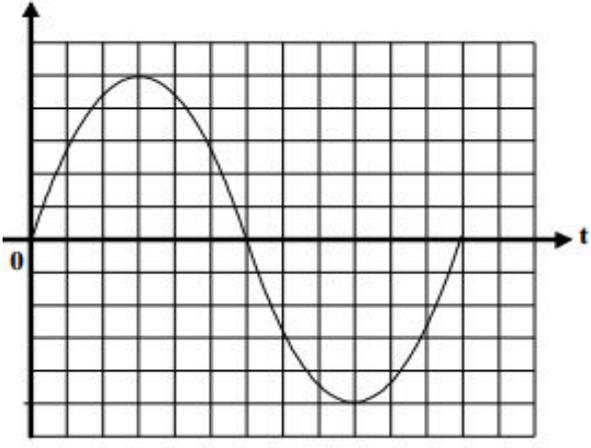
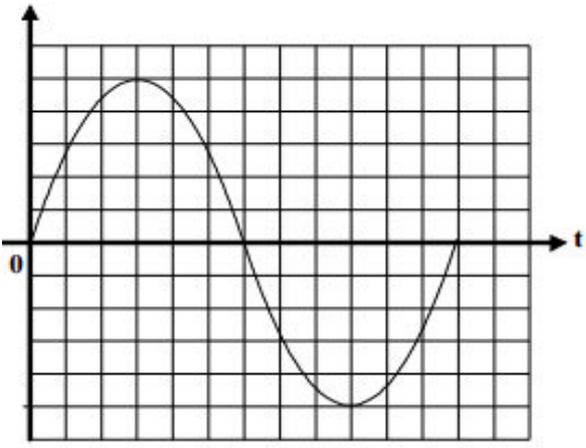
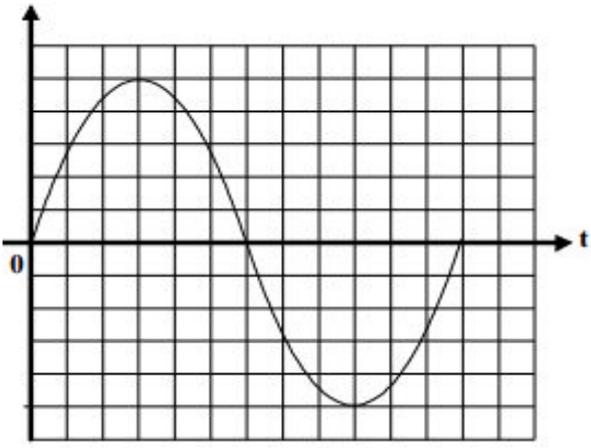
Document réponse TP1/(charge résistive)



Document réponse TP1/(charge inductive RL)



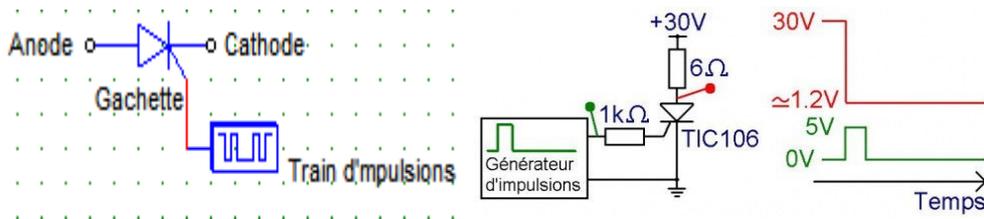
Document réponse TP1/(charge RL avec diode de roue libre)

					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><math>U_{chmoy} =</math></td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><math>U_{cheff} =</math></td> </tr> </table>	$U_{chmoy} =$	$U_{cheff} =$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><math>U_{DRlmoy} =</math></td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><math>U_{DRLeff} =</math></td> </tr> </table>	$U_{DRlmoy} =$	$U_{DRLeff} =$
$U_{chmoy} =$	$U_{cheff} =$				
$U_{DRlmoy} =$	$U_{DRLeff} =$				
					
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><math>i_{chmoy} =</math></td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><math>i_{cheff} =</math></td> </tr> </table>	$i_{chmoy} =$	$i_{cheff} =$	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><math>i_{DRlmoy} =</math></td> <td style="width: 50%; padding: 5px;"><math>i_{DRLeff} =</math></td> </tr> </table>	$i_{DRlmoy} =$	$i_{DRLeff} =$
$i_{chmoy} =$	$i_{cheff} =$				
$i_{DRlmoy} =$	$i_{DRLeff} =$				

**I.2. Redresseur commandé mono alternance :**

Un montage redresseur commandé permet d'obtenir une tension continue réglable à partir d'une tension alternative sinusoïdale. L'utilisation de composants tels que les thyristors permet de réaliser des redresseurs dont la tension moyenne de sortie peut varier en fonction de l'angle de retard à l'amorçage.

Le thyristor comporte une électrode de commande G (gâchette).



Pour amorcer, un thyristor on doit appliquer :

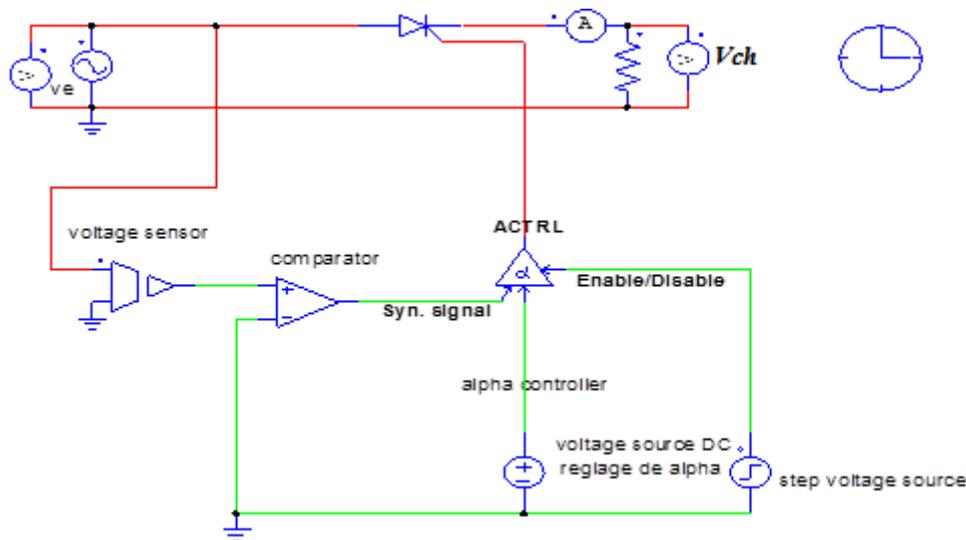
- Une tension plus positive à l'anode qu'à la cathode.
- Un train d'impulsions sur la gâchette

Si l'une des conditions n'est pas satisfaite le thyristor est bloqué.

Le thyristor a donc un amorçage commandé, et un blocage spontané

**1. Manipulation n°1**

Simuler une source monophasée ( $f=50\text{Hz}$  ;  $V_e=45\text{V}$  efficace) avec en série un thyristor et une charge résistive  $R_L=50\Omega$ .



**Montage1**

**La commande de la gachette pour le montage 1 comprend :**

- Un capteur de tension :
- Un comparateur :
- Une source continue :
- Générateur en crénaux :

## 2. Travail à effectuer

1. Régler l'angle d'amorçage du thyristor ( $\alpha=45^\circ$ ) en agissant sur la source de courant continu si vous utilisez le montage1, ou en agissant sur « switching points » si vous utilisez le montage2
2. Visualisez et relevez, la tension à l'entrée du redresseur, la tension de sortie  $v_{ch}(t)$ , et la tension aux bornes du thyristor pour ( $\alpha=45^\circ$ )
3. Faites varier l'angle d'amorçage du thyristor  $\alpha$ , et remplir Tableau1.
4. Que remarquez-vous sur l'allure de la tension de charge ?
5. Calculer la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge, théoriquement. Comparer, avec celle trouvée, en utilisant simview de PSIM.
6. Remplir la feuille de réponse/TP1

**Notez que :** la feuille de réponse/TP1 concerne le redressement commandé simple alternance

Angle d'amorçage $\alpha$ (en degrés)	$\langle V_{ch} \rangle$ (volts)	(volts)
0		
0		
0		
0		

**1. Synchronisation :**

Le signal de synchronisation permet de déclencher le thyristor lorsque  $u > 0$  et avec la même fréquence : *inverser* le signal de synchronisation et observer la tension et le courant de charge. Conclure

**2. Générateurs d'impulsions GI :**

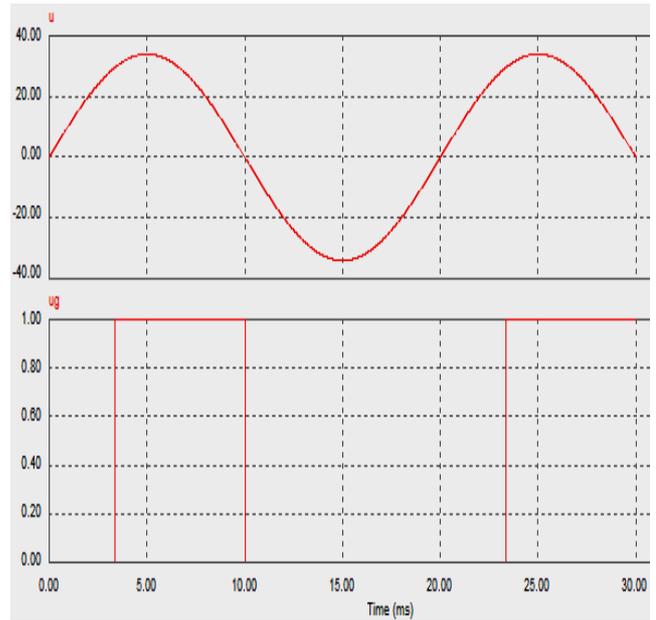
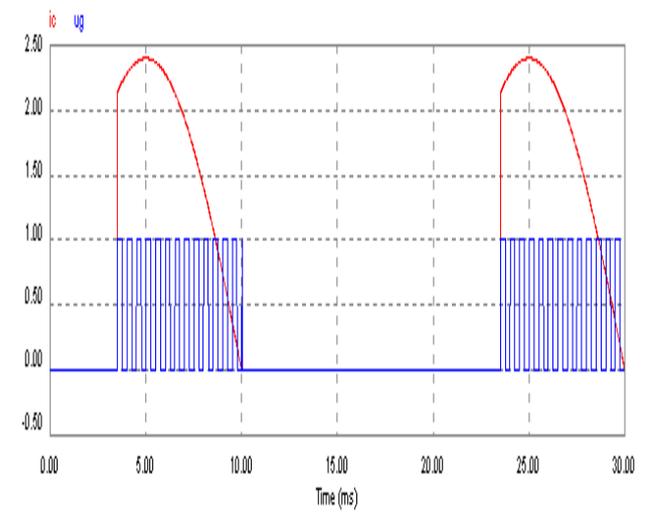
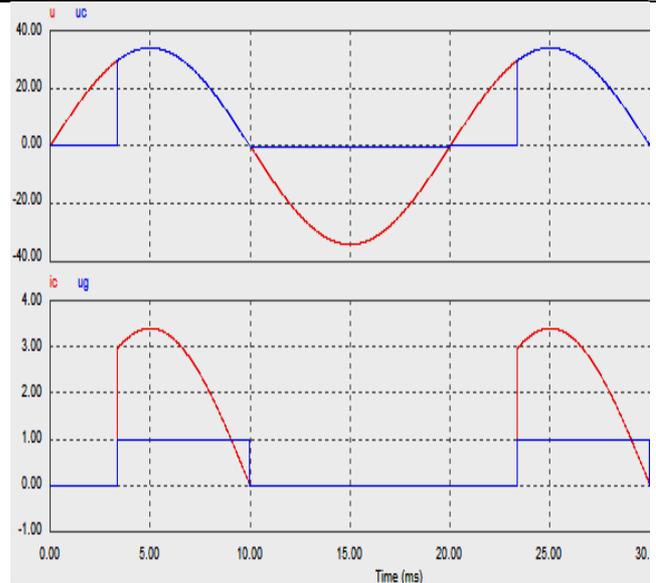
Diminuer la durée du signal de la tension de gâchette  $u_g$  (GI pulse width en degrés) et conclure.

Remplacer la validation du signal par un générateur en créneaux (1V,  $\alpha=0,5$ ,  $f=1200\text{Hz}$ )

**3. Blocage du thyristor :**

Ajouter une inductance  $L=0,25\text{H}$  en série avec la résistance de charge R.

Relever ci-contre la tension et le courant de charge et conclure sur le blocage du thyristor



# **SIMULATION AVEC PSIM**

---

**TP N°2**

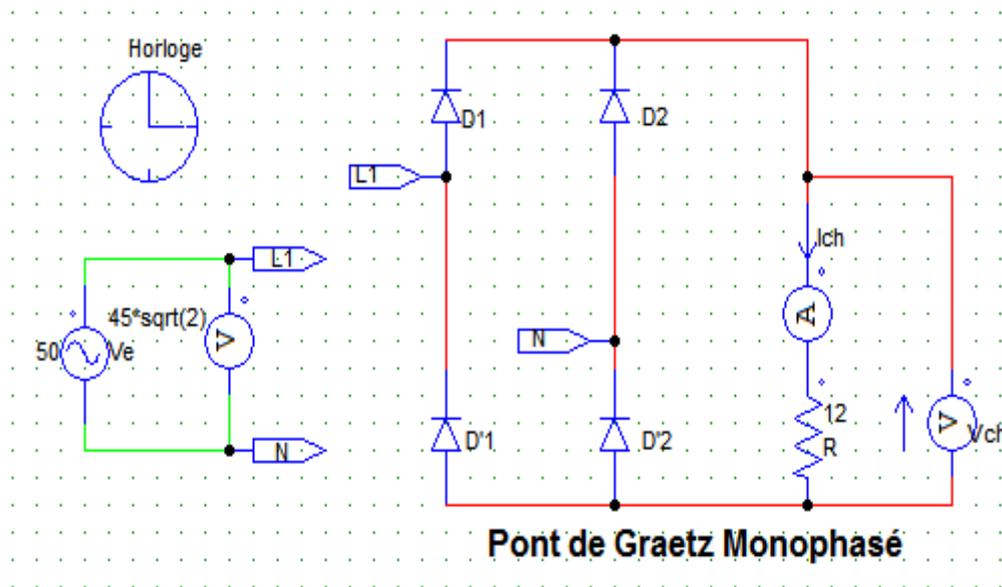
## **REDRESSEMENT MONOPHASE DOUBLE ALTERNANCE**

**Objectif** Il s'agit dans ce TP, de faire l'étude et la simulation du redressement et du filtrage d'un signal alternatif, de réaliser des circuits de redressement en double alternance, et d'analyser l'évolution de la tension et du courant de sortie du convertisseur avec charges résistives et inductives.

## II.1. Redresseur double alternance à diodes

### 1. Manipulation n°1 : Débit sur une charge résistive

Simuler un redresseur PD2 à diode sur charge résistive, on donne  $R = 12\Omega$



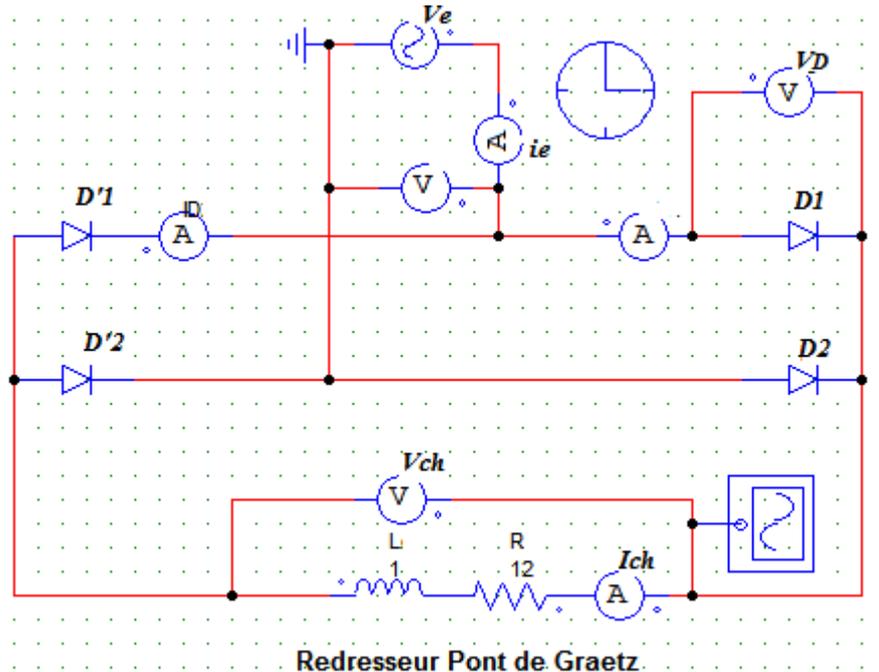
### 2. Travail à effectuer

Régler les paramètres suivants : Time step :  $100\mu\text{s}$ , Total time :  $20\text{ms}$ , Print time : 0.

1. Visualisez et relevez, la tension à l'entrée du redresseur, la tension de sortie, et la tension aux bornes d'une des 4 diodes du pont.
2. Calculer théoriquement et par **Simview** en utilisant  $\bar{x}$ ; la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge.
3. Calculer théoriquement et par **Simview** en utilisant  $x_{\text{rms}}$ ; la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge.
4. Visualisez et relevez, le courant à l'entrée du redresseur, le courant qui circule dans les diodes, et le courant de charge.

### 3. Manipulation n°2 : Débit sur une bobine

Simuler un redresseur PD2 à diode sur charge résistive en série avec une inductance, on donne  $R = 12\Omega$ ,  $L=100\text{mH}$ .

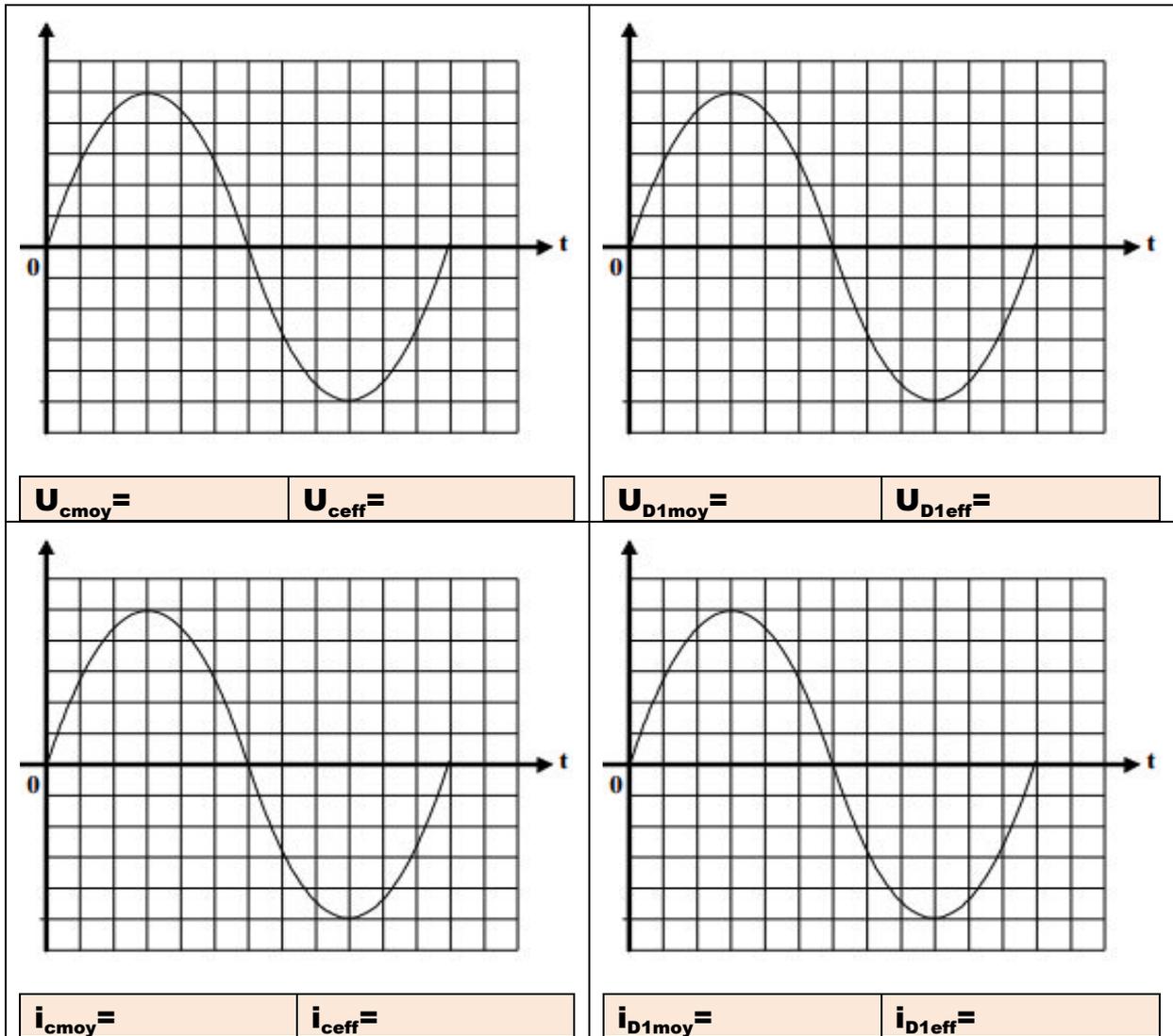


#### 4. Travail à effectuer

Une bobine d'inductance L permet le lissage du courant, c'est-à-dire une conduction continue pour une constante de temps (L/R), très grande.

#### Partie A

1. Visualisez et relevez, la forme d'onde du courant de charge et vérifiez son lissage
  2. Augmenter progressivement la valeur de l'inductance jusqu'à obtenir un taux d'ondulation inférieur à 5%
- On rappelle que le taux d'ondulation**  $\tau = \frac{\hat{V}_S - V_S(\min)}{\langle V_S \rangle}$
3. Relevez la valeur de L nécessaire à obtenir  $\tau < 5\%$
  4. Visualisez et relevez, la forme d'onde de la tension de charge
  5. Calculer par **Simview** en utilisant respectivement les touches  $\bar{x}$ , et  $rms$ ; la valeur moyenne et la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge. Comparez-les aux valeurs théoriques.
  6. Visualisez et relevez, le courant  $i_{ch}(t)$  à l'entrée du redresseur, le courant qui circule dans les diodes  $D_1$  et  $D'1$ , et le courant de charge.
  7. Visualiser et relever la tension aux bornes de la diode  $D_1$  et le courant la traversant. Evaluer la tension inverse maximale subie par la diode.
  8. Mesurer la puissance active  $P_c$  dans la charge.
  9. Calculer  $P_s$  la puissance active côté source. Comparer  $P_s$  et  $P_c$ .



Document réponse 1/TP2

### Partie B

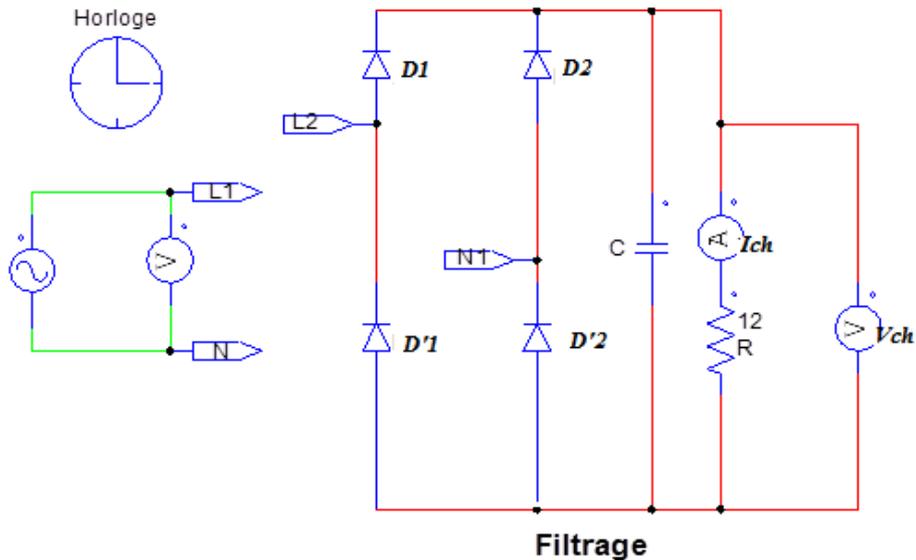
Dans cette partie on va supposer que les diodes du pont PD2 débitant sur une charge résistive ne sont plus dans leurs configurations idéales

La tension seuil (Threshold voltage = 0,7V), la résistance à l'état passant des diodes (diode résistance = 0.1Ω)

1. On étudiera l'impact de la tension seuil et de la résistance interne sur la valeur moyenne de la tension de charge
2. Etudier enfin le phénomène d'empiètement en plaçant une bobine d'inductance  $L = 250\mu\text{H}$  entre la source et le redresseur, simulant l'inductance de fuite du secondaire d'un transformateur.

### 5. Manipulation n°3 : Débit sur une charge RC (Filtrage)

Réalisez le montage ci-dessous :



**Remarque :** Lorsque la tension augmente, le condensateur se charge, et lorsque la tension à la sortie du redresseur tend à diminuer, le condensateur se décharge ce qui réduit fortement la chute de la tension.

Si le condensateur à une capacité suffisante, les variations de la tension de sortie peuvent être négligeables, la tension est quasiment continue.

### 6. Travail à effectuer

1. Pour C fixée à 100 $\mu$ F, faites varier, R= 100 $\Omega$ , 50 $\Omega$ , 10 $\Omega$ , 1 $\Omega$ . Visualisez et relevez vos courbes.
2. Pour R fixée à 100 $\Omega$ , faites varier,  $\tau = R C = T / 10$  ;  $\tau = R C = T$  ;  $\tau = R C = 10 T$ , où T est la période en seconde Visualisez et relevez vos courbes.
3. Remplir les tableaux 1 et 2
4. Expliquer les différences obtenues entre les courbes sur charge capacitive et sur charge résistive.
5. Ya-t-il des améliorations apportées par ce type de redressement ? (par rapport au redressement simple alternance), si oui lesquelles ?
6. Relevez la valeur de C nécessaire à obtenir  $\tau < 5\%$

- Pour C fixe, et R variable :

R ( $\Omega$ )	1	10	50	100
V <sub>ch moy</sub> (V)				
V <sub>ch eff</sub> (V)				
I <sub>ch moy</sub> (mA)				
I <sub>ch eff</sub> (IFAV)				
$\Delta V$				
<b>F</b>				
<b><math>\tau</math></b>				
V <sub>ch max</sub> (V)				
V <sub>ch min</sub> (V)				

Tableau1

- Pour R fixe, et C variable :

$\tau$ (s)	T/10	T	10T
V <sub>ch moy</sub> (V)			
V <sub>ch eff</sub> (V)			
I <sub>ch moy</sub> (mA)			
I <sub>ch eff</sub> (IFAV)			
$\Delta V$			
<b>F</b>			
<b><math>\tau</math></b>			
V <sub>ch max</sub> (V)			
V <sub>ch min</sub> (V)			

Tableau2

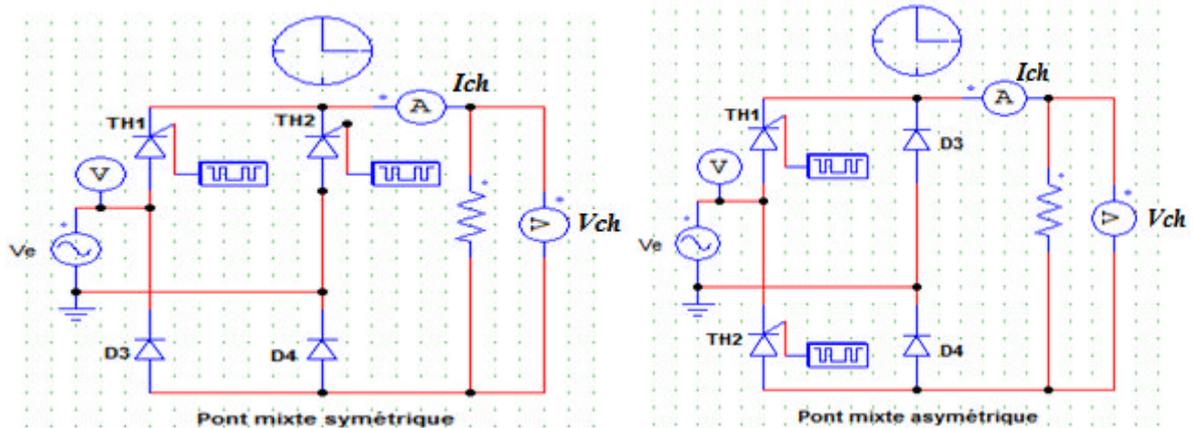
## II.2. Redressement monophasé commandé : Cas d'un pont mixte

$V_e(t)$  est une tension sinusoïdale, de valeur efficace 45V, et de fréquence  $f=50\text{Hz}$ .

### 1. Manipulation n°1 : Débit sur une charge résistive

Simuler le pont de redressement PD2 mixte **symétrique**, débitant sur une charge résistive.

On donne  $R = 10\Omega$



**On rappelle** que l'angle de retard à l'amorçage des thyristors doit être  $0 < \alpha < \pi$ , et que pendant l'alternance positive, le thyristor **TH1** reçoit une impulsion sur sa gâchette à  $\alpha$ , et il ne se bloquera que lorsque le thyristor **TH2** (qui était bloqué) reçoit une impulsion à  $\alpha + \pi$  (conduction continue).

Si  $V_{ch_{moy}} > 0$ , alors fonctionnement en redresseur

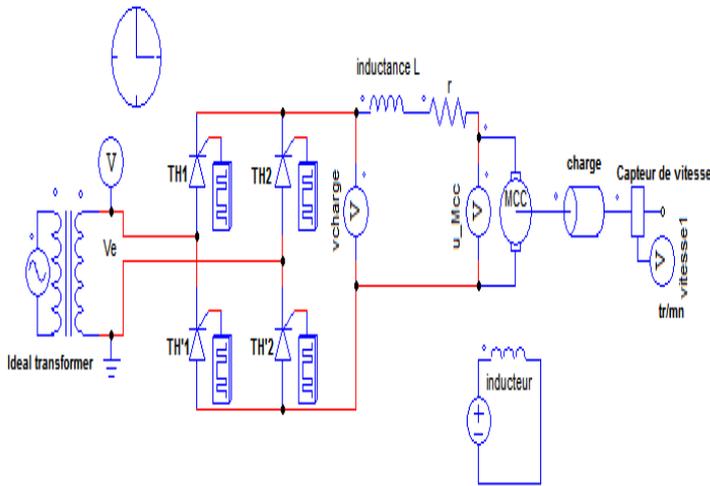
Si  $V_{ch_{moy}} < 0$ , alors fonctionnement en onduleur

Si l'angle de garde (appelé angle de garde pour  $\alpha = 30^\circ$ ) n'est pas atteint, l'amorçage des thyristors risque d'être impossible

### 2. Travail à effectuer

1. Indiquez sur deux périodes les intervalles de conduction de chaque élément pour  $\alpha = \frac{\pi}{4}$
2. - A quel instant chaque interrupteur est-il mis en conduction ?
3. Visualisez et relevez la tension et le courant de charge
4. Calculer par Simview en utilisant respectivement les touches  $\bar{x}$ , et  $r_{ms}$ ; la valeur moyenne et la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge
5. Exprimez théoriquement  $\langle V_{ch} \rangle$  en fonction de  $\alpha$ ; quelle est la plage de variation de la tension ?
6. Refaire le même travail pour un pont mixte **asymétrique**.
7. Comparez les résultats obtenus des 2 ponts
8. Remplir les feuilles de réponse3/TP2

**1. Schéma du montage**



**Pont tout thyristor-lissage de courant**

A la sortie du transformateur, on recueille une tension de 24V.

Th<sub>1</sub>, Th'<sub>2</sub> ← Impulsions à  $\gamma = \omega t_0$   
 Th<sub>2</sub>, Th'<sub>1</sub> ← Impulsions à  $\gamma + \pi$  soit à  $t_0 + T/2$ , avec  $\gamma = 60^\circ$

La self de lissage présente une inductance  $L=1H$  et une résistance  $r=12,5\Omega$ .

La charge est un moteur à courant continu de  $f_{cem} = 24V$  et de résistance  $R=0.5\Omega$ .

Compléter le schéma du montage pour observer la tension et le courant de charge, et relever  $\langle u_{charge} \rangle$

1. Préciser les intervalles de conduction des thyristors

.....  
 .....

2. Relever la tension et le courant de charge

.....  
 .....

3. Relever les courants  $i_{Th1}$ ,  $i_{Th'2}$ ,  $i_{Th2}$ ,  $i_{Th'1}$

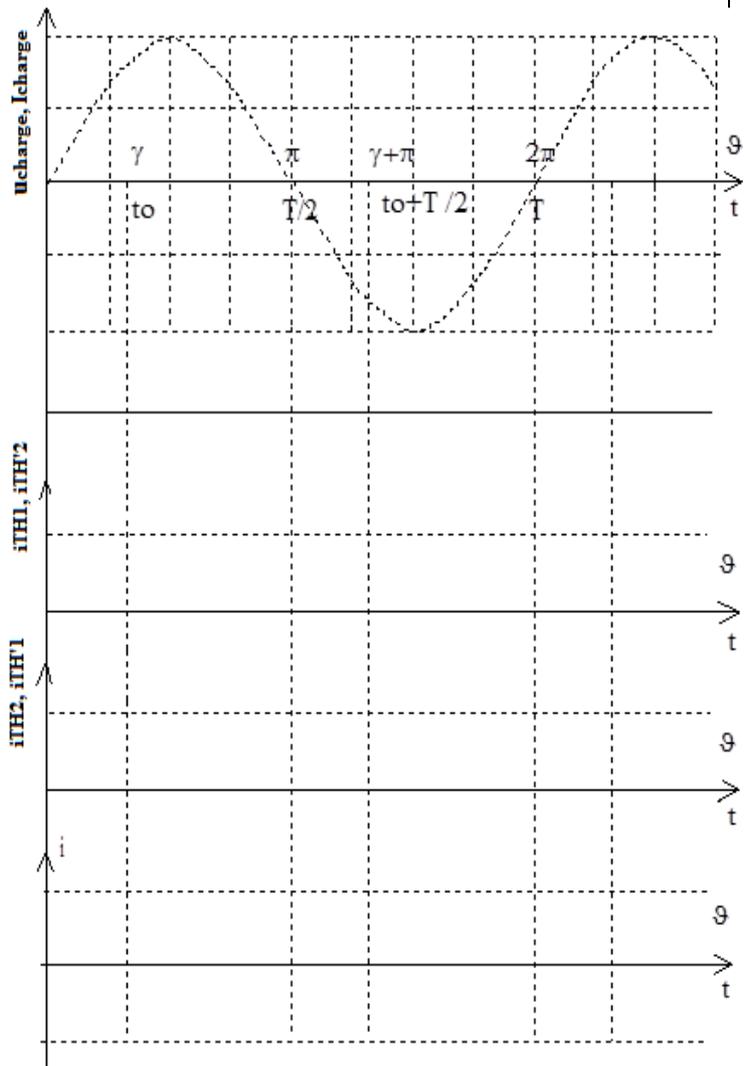
.....  
 .....

4. Relever le courant  $i(t)$  à l'entrée du redresseur.

.....  
 .....

5. trouver l'expression de  $\langle u_{charge} \rangle$  en fonction de  $\gamma$ .

.....  
 .....



# **SIMULATION AVEC PSIM**

---

**TP N°3**

## **REDRESSEMENT TRIPHASE MONO ALTERNANCE**

**Objectif** Il s'agit d'analyser l'évolution de la tension et du courant de sortie du convertisseur avec charges résistives et inductives.

**Prés requis :** Notions sur les transformateurs, et sur les systèmes triphasés

### III.1. Redresseur triphasé P3 simple voie tout diodes

Un redresseur triphasé simple alternance est un redresseur permettant de redresser une source triphasée. Le signal redressé a alors une fréquence trois fois supérieure au signal d'entrée.

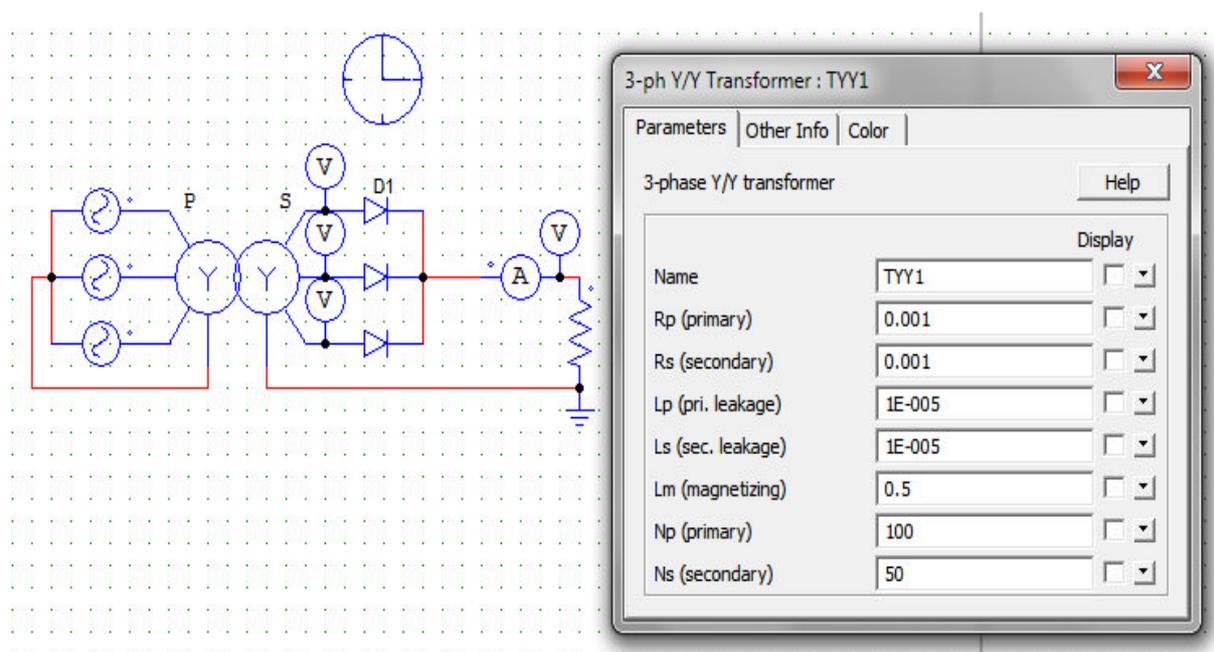
#### 1. Manipulation n°1 : Débit sur une charge résistive

Réaliser le montage suivant sur PSIM, sachant que :

Dans un montage à cathode commune, la diode passante est celle qui possède la tension la plus positive.

Dans un montage à anode commune la diode passante est celle qui possède la tension la plus négative.

Les diodes sont supposées idéales.



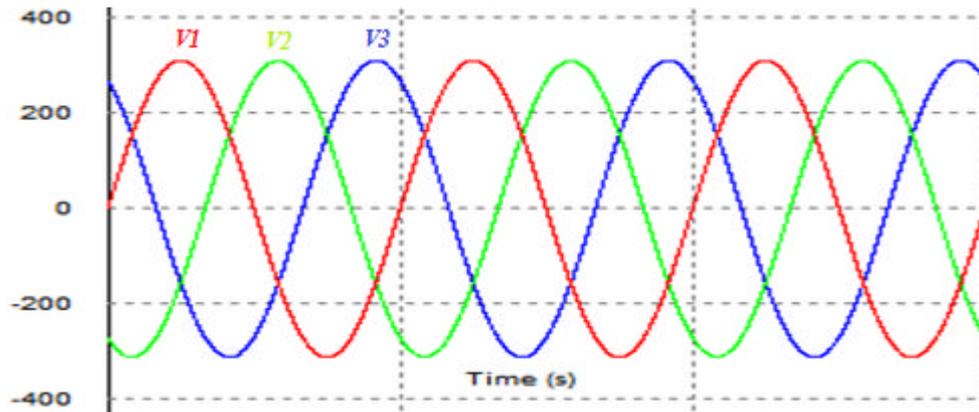
Un réseau de tensions triphasées (220V/380V,  $f=50\text{Hz}$ ), alimente le primaire d'un transformateur Y-Y (primaire et secondaire sont couplés en étoile), dont le rapport de transformation  $m=0.5$ .

Les tensions au primaire, déphasées entre elles de  $120^\circ$  sont données par :

$$v_1(t) = 220 \sqrt{2} \sin \omega t$$

$$v_2(t) = 220 \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_3(t) = 220 \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$



Visualisation des tensions du réseau

Les tensions au secondaire seront données d'après la formule suivante :

$$v_{\text{sec}}(t) = \frac{N_2}{N_1} v_{\text{prim}}(t) = m v_{\text{prim}}(t)$$

Où,  $N_1$ , et  $N_2$ , sont respectivement le nombre de spires au primaire et au secondaire.

Le pont **P3** va débiter sur une charge résistive  $R=100\Omega$ .

## 2. Travail à effectuer

Garder le même réglage des paramètres

### Partie A

1. Donnez les intervalles de conduction des diodes.
2. Visualiser et relever l'évolution de la tension de charge et de  $V_{D1}$
3. Visualiser et relever l'évolution du courant de charge et du courant qui circule dans la diode D1
4. Analyser le fonctionnement du montage, et exprimer la valeur moyenne de la tension de charge, la comparer avec la valeur donnée par PSIM.
5. Calculer le taux d'ondulation  $\tau$
6. Réalisez un montage P3, à anodes communes. Visualisez la tension de charge, quelles différences enregistrez-vous par rapport au P3 à cathodes communes ?
7. Conclure.

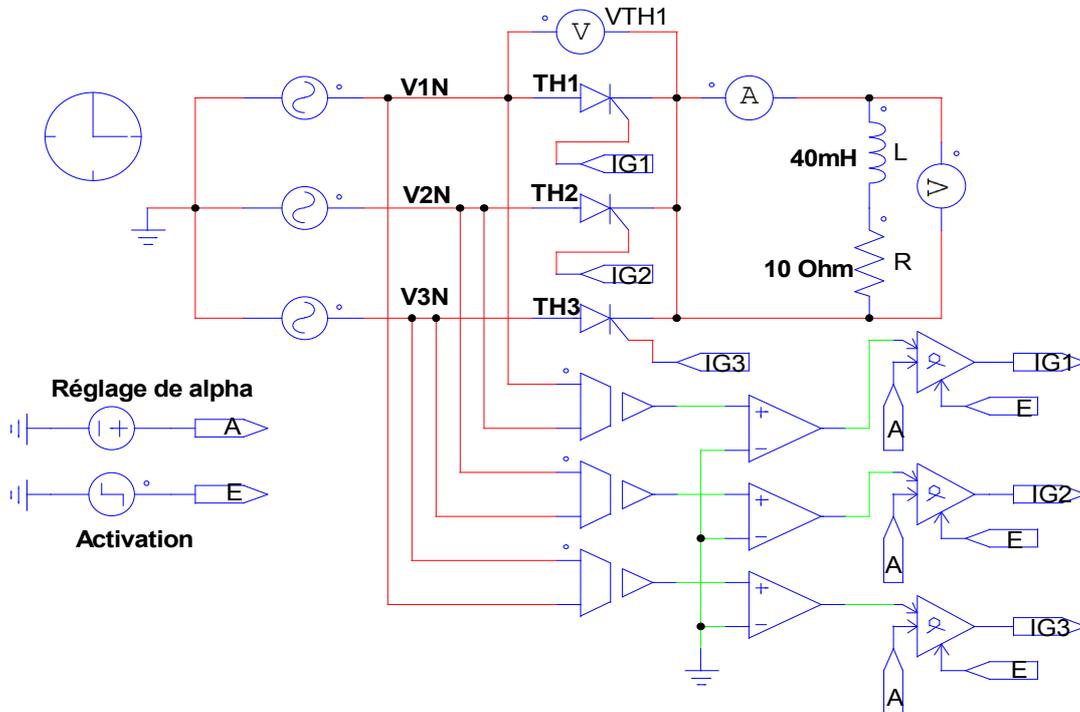
### Partie B

1. Réalisez un montage P3, à anodes communes, débitant sur une charge RL en parallèle avec un condensateur (on donne :  $R=50\Omega$ ,  $L=100\text{mH}$ ,  $c=100\mu\text{F}^\circ$ )
2. Analyser le fonctionnement du montage et visualiser et relever l'évolution de la tension de charge et de  $V_{D1}$
3. Conclure.

### III.2. Redresseur triphasé simple P3 commandé

#### 1. Manipulation n°1 : Débit sur une charge inductive RL

Ce type de redresseur est réalisé en mettant un thyristor sur chaque phase, les thyristors étant placés en cathode commune, comme le montre le schéma suivant :



#### 2. Analyse de fonctionnement :

Le thyristor **Th1** est susceptible de conduire à l'instant  $\pi/6$  (instant de conduction naturelle des diodes) où la tension  $v_1(t)$  devient la plus positive.

Contrairement à une diode, le thyristor ne pourra conduire que lorsqu'une impulsion de gâchette lui est délivrée.

A l'instant  $\alpha$  (retard par rapport à la conduction naturelle des diodes), on amorce **Th1**, et  $u_{ch} = v_1(t)$ .

En supposant que la charge est telle que le courant de charge,  $I_s$  ne s'annule jamais au cours de la période (conduction continue), le thyristor **Th1** restera conducteur tant que **Th2** n'est pas amorcé.

A l'amorçage de **Th2**, le thyristor **Th1** voit une tension  $v_{TH1} = v_1(t) - v_2(t) = U_{12}$ , négative et se bloque. Dans ces conditions, on a  $u_{ch} = v_2(t)$ .

Lorsqu'on amorce **Th3**, le thyristor **Th2** se bloque puisque sa tension anode cathode  $v_{TH2} = v_2(t) - v_3(t) = U_{23}$  est devenue négative ; et l'on aura  $u_{ch} = v_3(t)$ .

Ainsi, le courant de sortie  $I_s$  se trouve commuté à tour de rôle par l'un des trois thyristors.

En agissant sur la valeur de l'angle de retard à l'amorçage  $\alpha$ , on pourra varier la valeur moyenne de tension délivrée à la charge ou encore le mode de marche de l'ensemble : Redresseur ou onduleur assisté.

Le pont **P3** va débiter sur une charge inductive.

### 3. Travail à effectuer

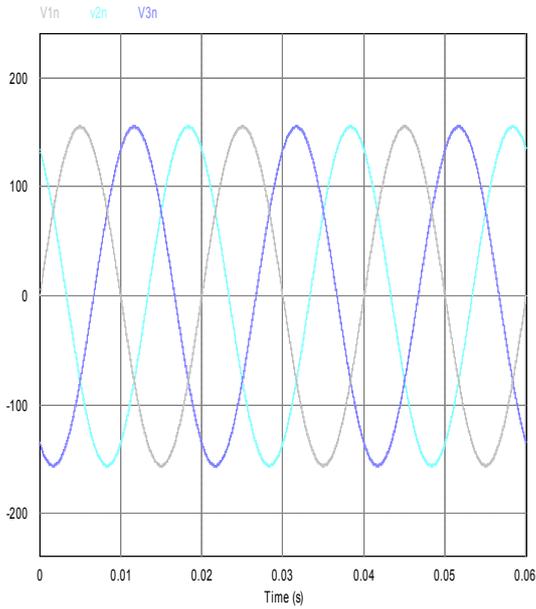
Garder le même réglage des paramètres

#### **Tout en se référant à la feuille réponse/TP3**

1. Donnez les intervalles de conduction des thyristors.
2. Visualiser et relever l'évolution de la tension de charge et de  $V_{TH1}$
3. Visualiser et relever l'évolution du courant de charge et du courant qui circule dans le thyristor TH1
4. Analyser le fonctionnement du montage, et exprimer la valeur moyenne de la tension de charge, la comparer avec la valeur donnée par PSIM.
5. Calculer le taux d'ondulation  $\tau$
6. Conclure.

Pour  $\alpha=90^\circ$

Tracez l'allure de la tension redressée  $U_c(t)$



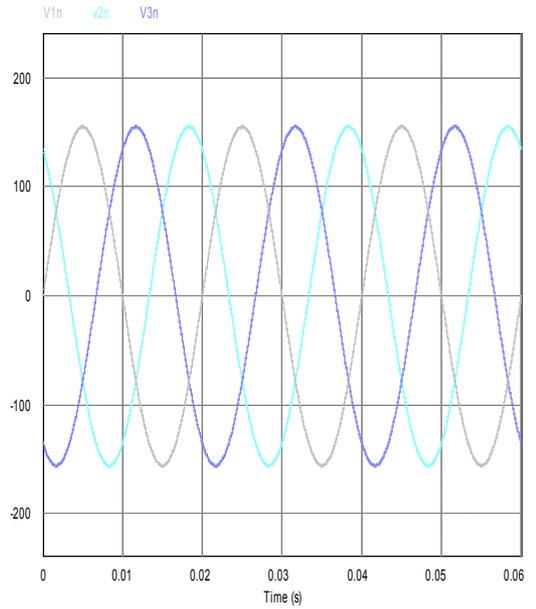
.....

.....

.....

Pour  $\alpha=45^\circ$

Tracez l'allure de la tension redressée  $U_c(t)$

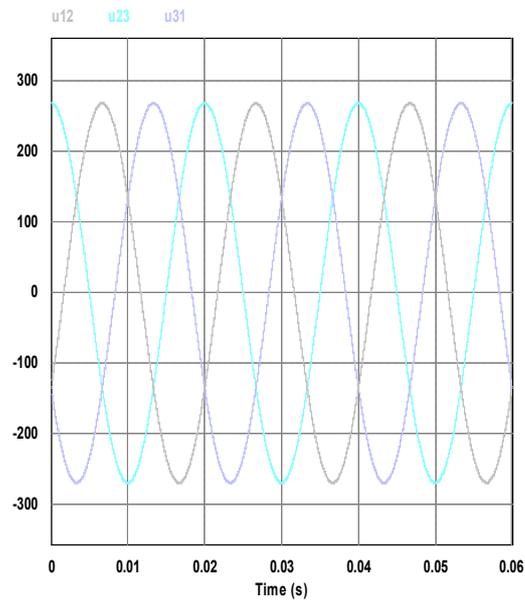


.....

.....

.....

Tracez la tension aux bornes du thyristor TH1

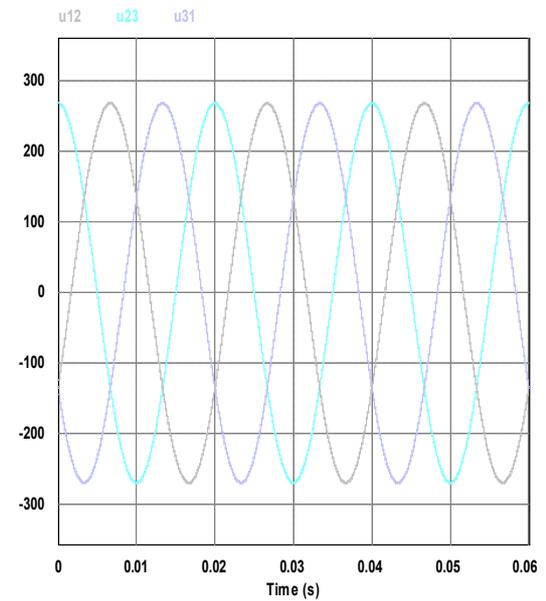


.....

.....

.....

Tracez la tension aux bornes du thyristor TH1



.....

.....

.....

**SIMULATION AVEC PSIM**

---

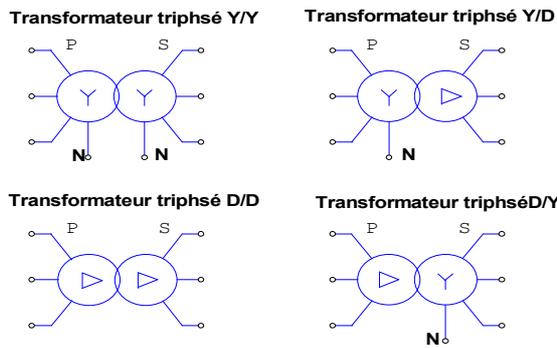
**TP N°4**

**REDRESSEMENT TRIPHASE  
DOUBLE ALTERNANCE**

**Objectif :** Montrer que, l'ondulation en sortie est très faible par rapport à ce que produit un pont redresseur monophasé. L'inductance de lissage à prévoir dans la charge pour que le courant redressé  $I_0$  soit faiblement ondulé est donc nettement plus économique en triphasé.

**IV.1 Association transformateur triphasé et redresseur PD3 à diodes**

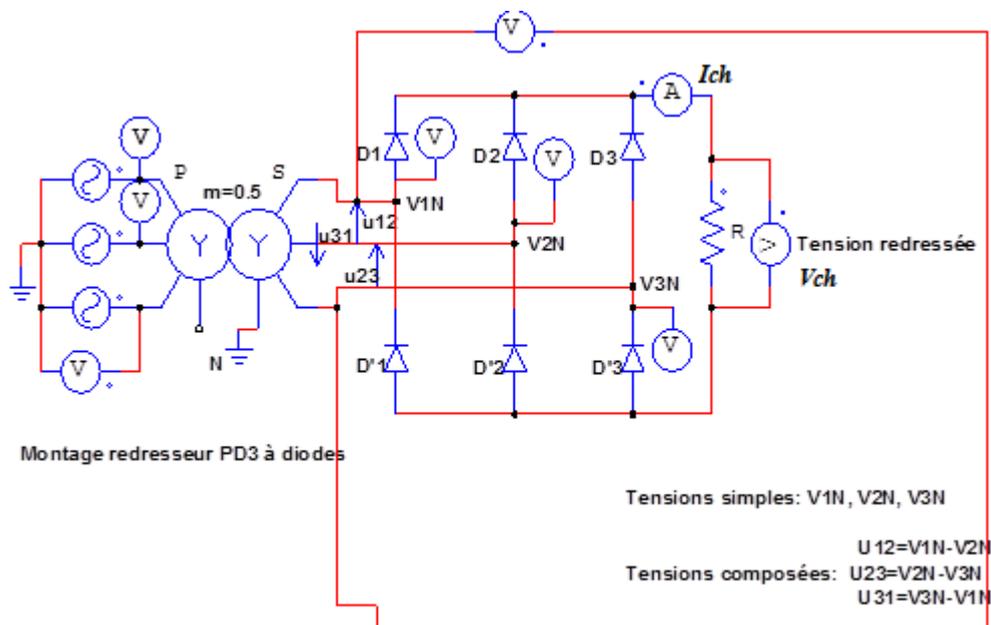
Les transformateurs triphasés qu'on trouve dans la bibliothèque de Psim sont :



- Donner brièvement un aperçu sur chaque type de transformateurs cités
- Définir brièvement les tensions triphasées simples et composées

**1. Manipulation : Débit sur une charge résistive**

Réaliser le montage de la figure ci-dessous sur Psim



Ce montage comporte six diodes supposées idéales. Il est alimenté par un réseau de tensions triphasées (220V/380V,  $f=50\text{Hz}$ ), dont les tensions simples forment un système triphasé équilibré direct de valeur efficace  $V = 220 \text{ V}$ .

Le réseau alimente le primaire d'un transformateur Y-Y, dont le rapport de transformation  $m=0.5$ .

Résumons les valeurs de la tension de sortie en fonction des diodes qui conduisent :

Couple de diodes	D1,D'2	D1,D'3	D2,D'3	D2,D'1	D3,D'1	D3,D'2
Tension de sortie	$U_{12}$	$U_{13}$	$U_{23}$	$U_{21}$	$U_{31}$	$U_{32}$

**On rappelle que :**

La tension  $V=220V$  signifie la tension simple ou encore la tension entre une phase et le neutre

La tension  $U=380V$  signifie la tension composée ou encore la tension entre deux phases.

Les tensions au primaire, déphasées entre elles de  $120^\circ$  sont données par :

$$v_1(t) = 220\sqrt{2} \sin \omega t$$

$$v_2(t) = 220\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_3(t) = 220\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$\omega=2\pi f$  : vitesse angulaire électrique en radian/seconde,

$f=50Hz$ , est la fréquence du réseau

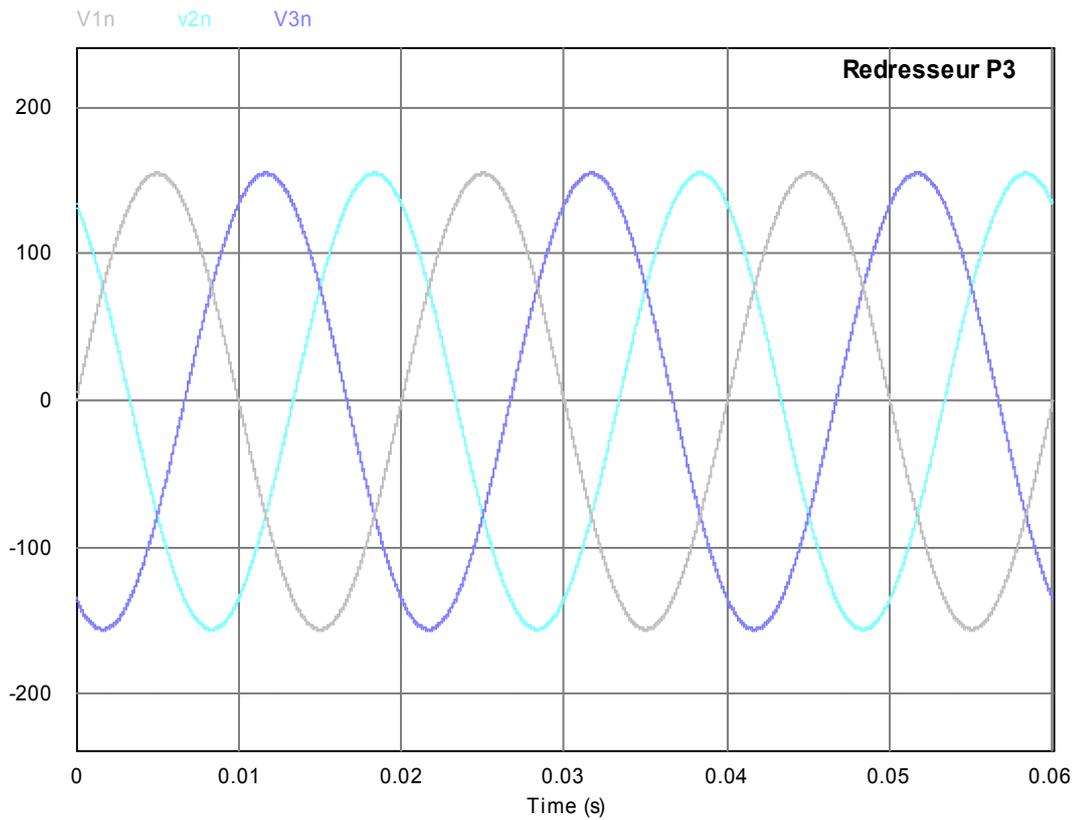
## 2. Travail à effectuer

Garder le même réglage des paramètres

1. Visualiser, et relever les tensions simples  $V_{1N}$ ,  $V_{N2}$ ,  $V_{N3}$ .
2. Visualiser et relever les tensions composées  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$ .
3. Visualiser et relever l'évolution des tensions  $U_{ch}$ ,  $U_{D1}$  et  $U_{D'1}$ ;
4. Visualiser et relever l'évolution des courants  $i_{ch}$  et  $i_{D1}$
5. Décrire le fonctionnement de ce montage
6. Exprimez théoriquement  $\langle U_{ch} \rangle$  et comparer le résultat avec celui donné par **Psim**
7. Comparer les performances des redresseurs P3 à diodes et PD3 à diodes débitant sur une charge résistive, en se basant sur les critères ; facteur de puissance **k** et facteur de forme **F**.

**On rappelle que :**  $k = \frac{\langle U_{ch} \rangle I_{ch}}{\sqrt{3}UI}$  et  $F = \frac{U_{ch}}{\langle U_{ch} \rangle}$ .

8. Remplir les feuilles de réponse/TP4
9. Analyser et interpréter vos résultats.



**1. Justifier l'allure des différentes tensions représentées sur le graphe**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**2. Tracer sur ce graphe l'allure de la tension redressée**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**3. Déterminer graphiquement le taux d'ondulation**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

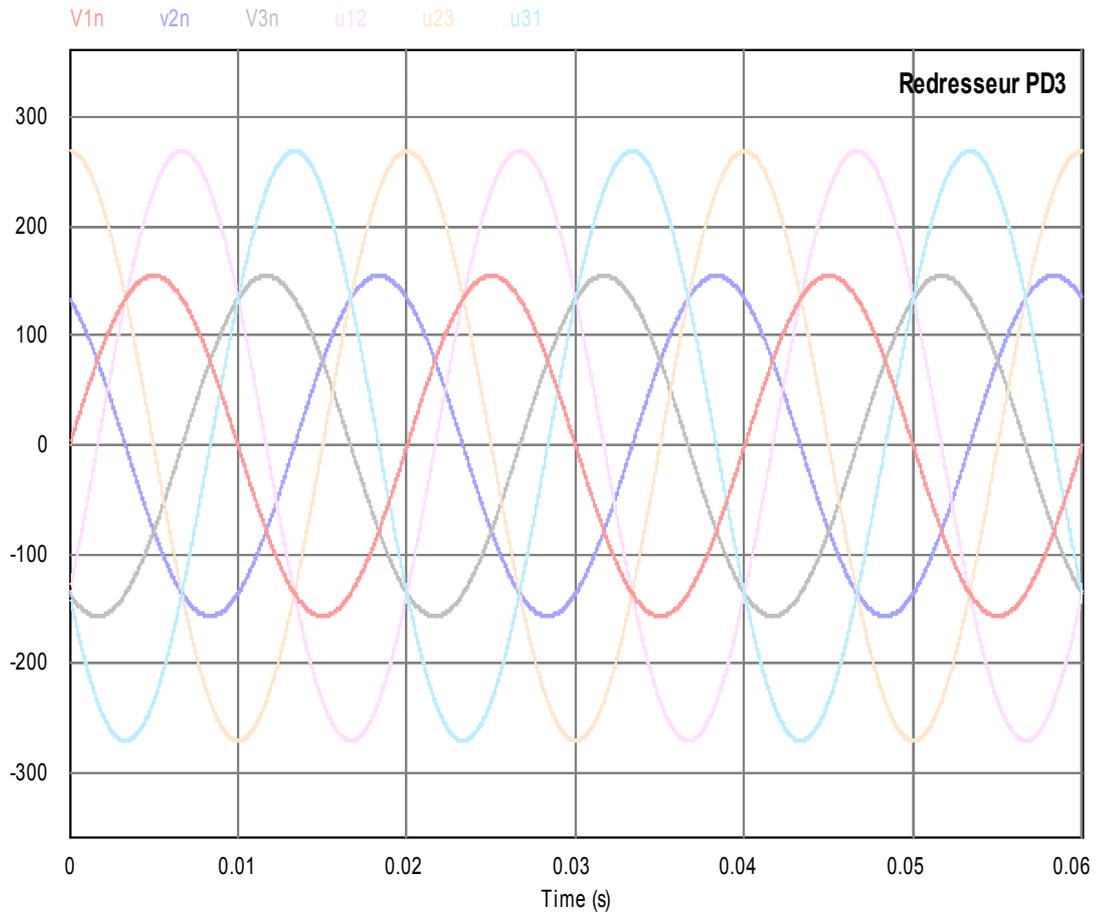
.....

.....

.....

.....

.....



**1. Justifier l'allure des différentes tensions représentées sur le graphe**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**2. Tracer sur ce graphe l'allure de la tension redressée**

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

**3. Déterminer graphiquement le taux d'ondulation**

.....

.....

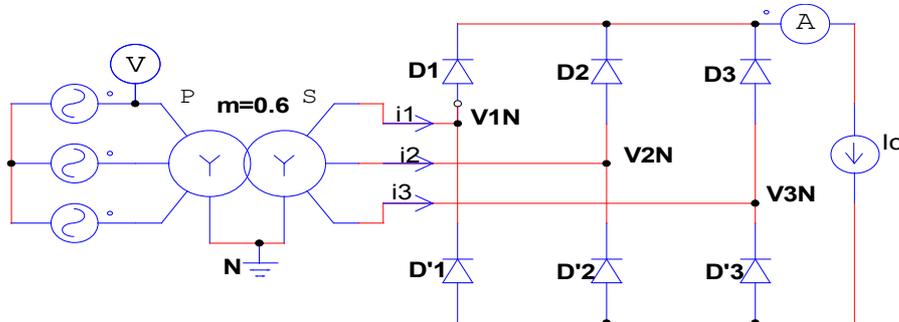
.....

.....

.....

## 1. Manipulation : Débit sur une charge inductive RL

La sortie du pont PD3 est branchée sur un récepteur dont l'inductance est suffisamment élevée pour que la charge puisse être assimilée à une source de courant continu  $I_0 = 7,20 \text{ A}$ .



## 2. Travail à effectuer

### A. Étude des tensions

**A.1** Tracer la courbe de la tension redressée  $u_{ch}$  aux bornes du récepteur en fonction de l'angle  $\theta$ . Indiquer les intervalles de conduction de chacune des diodes.

**A.2** Quel est l'indice de pulsation  $p$  de la tension redressée ?

**A.3** Exprimer la valeur moyenne  $U_{ch}$  de la tension redressée en fonction de  $V$  puis effectuer l'application numérique.

### B. Étude des courants

**B.1** Tracer la courbe de l'intensité  $i_{D1}$  du courant dans la diode D1 en fonction de l'angle  $\theta$ .

**B.2** Exprimer l'intensité moyenne  $I_D$  du courant dans une diode en fonction de  $I_0$  puis effectuer l'application numérique.

**B.3** Établir l'expression de l'intensité efficace  $I_D$  du courant dans une diode en fonction de  $I_0$  et calculer sa valeur.

**B.4** Tracer la courbe de l'intensité  $i_1$  du courant dans le fil de ligne 1 en fonction de l'angle  $\theta$ .

**B.5** Exprimer l'intensité efficace  $I$  des courants en ligne en fonction de  $I_0$  et calculer sa valeur.

### C. Étude des puissances

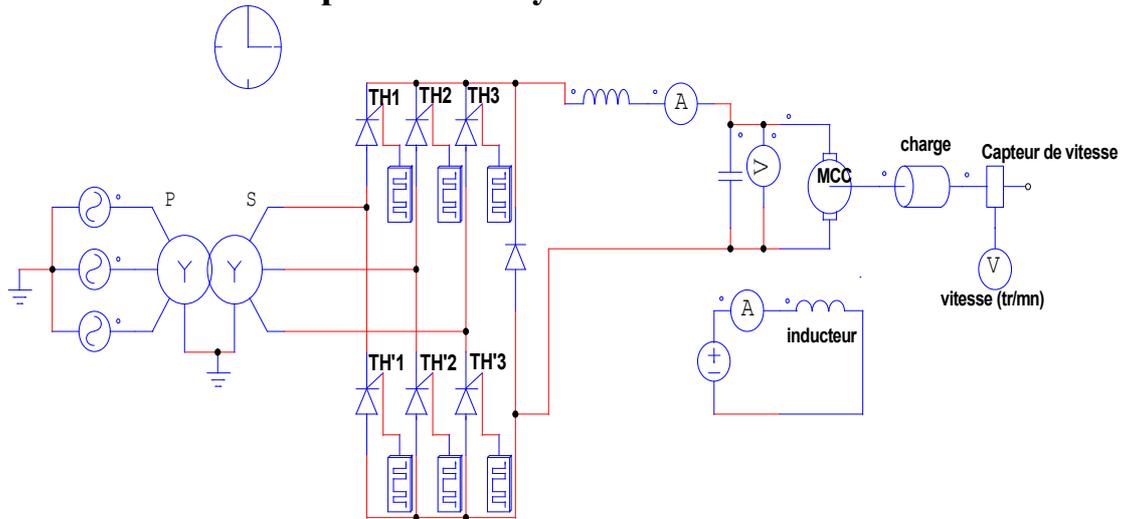
**C.1** Déterminer la puissance apparente  $S$  à l'entrée du redresseur

**C.2** Calculer la puissance active  $P$  appelée par le redresseur.

**C.3** Calculer le facteur de puissance  $f_p$  à l'entrée du montage.

**C.4** Que peut-on dire de la puissance réactive  $Q$  appelée par le redresseur ?

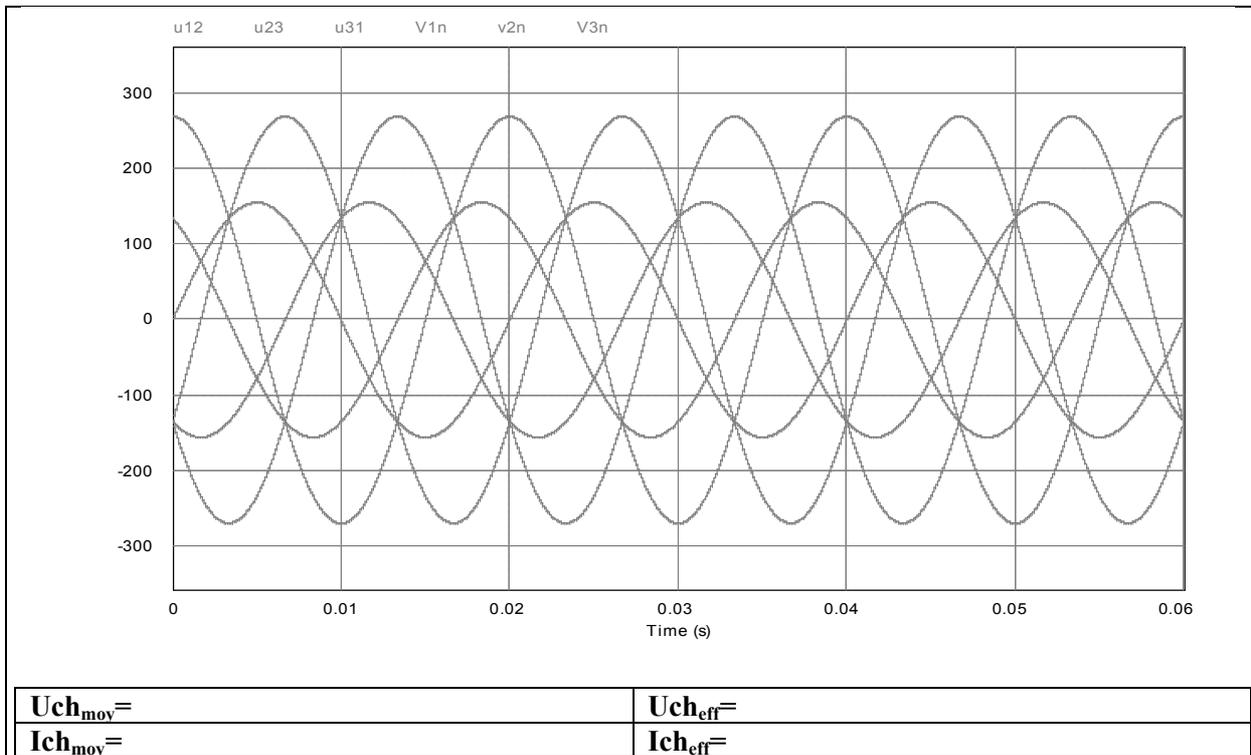
IV.2 Redresseur triphasé tout thyristors PD3T



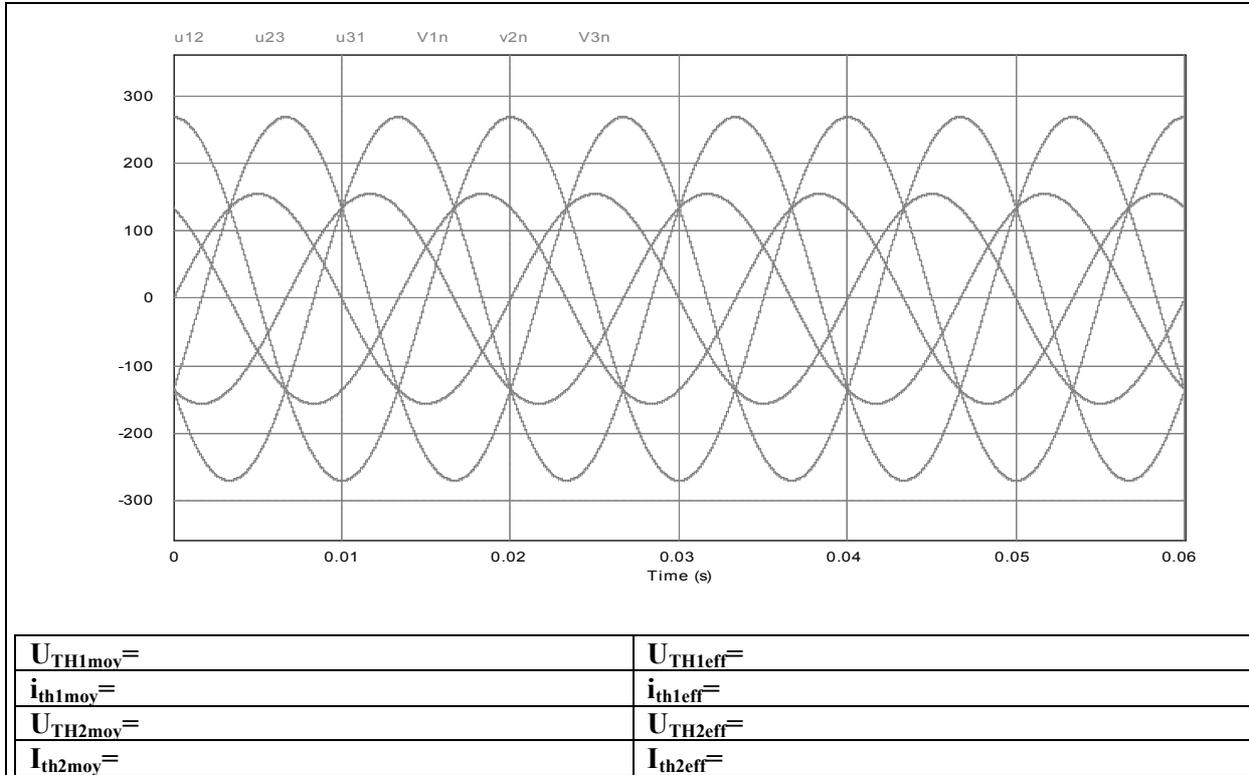
Résumons les valeurs de la tension de sortie en fonction des thyristors qui conduisent :

Couple de thyristors	TH1, TH 2'	TH 1, TH 3'	TH 2, TH3'	TH 2, TH 1'	TH 3, TH1'	TH 3, TH 2'
Tension de sortie	$U_{12}$	$U_{13}$	$U_{23}$	$U_{21}$	$U_{31}$	$U_{32}$

- Visualiser et relever l'évolution temporelle de  $u_c$  et  $i_c$ , pour un angle de commande  $\psi = 120^\circ$  : en précisant Intervalles de conduction

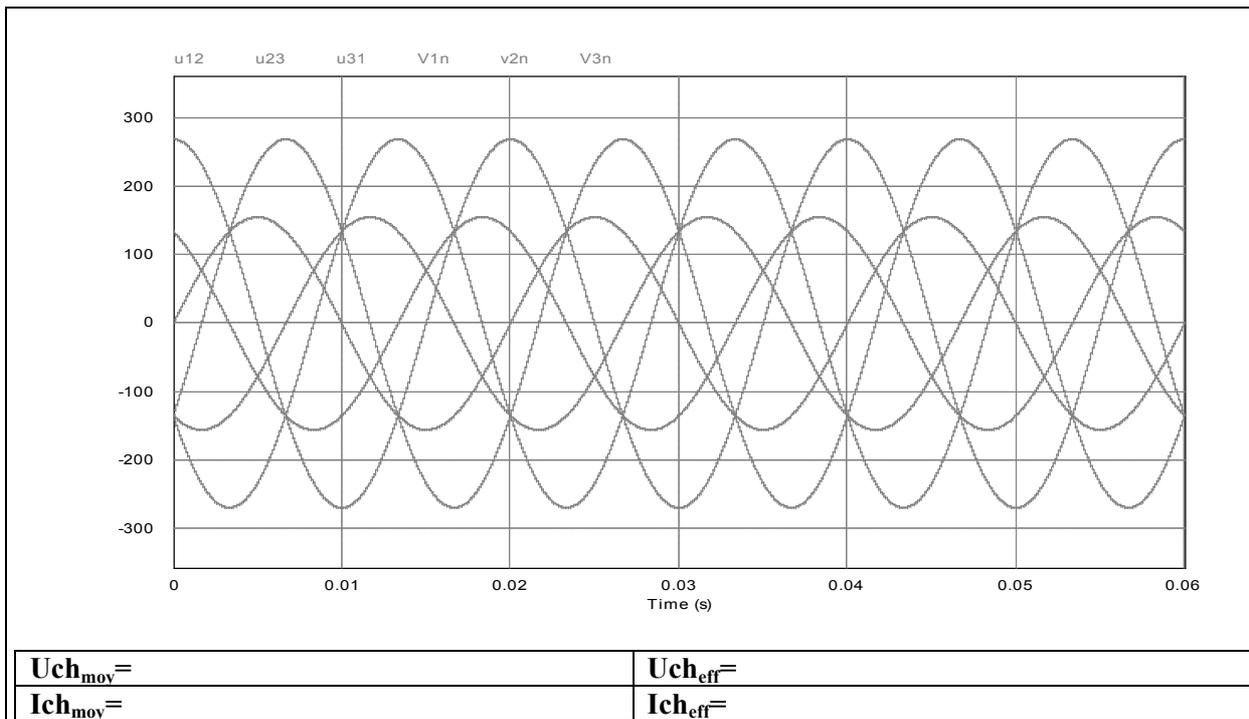


- Visualiser sur l'oscilloscope et relever l'évolution temporelle du courant et de la tension dans TH1 et TH2 pour un angle de commande  $\psi = 120^\circ$  : en précisant Intervalles de conduction



**Document réponse4/TP4**

- Visualiser sur l'oscilloscope et relever l'évolution temporelle de  $u_c$  et  $i_c$ , pour un angle de commande  $\psi = 45^\circ$  : en précisant Intervalles de conduction



**Document réponse5/TP4**



## **SIMULATION AVEC PSIM**

---

**TP N°4**

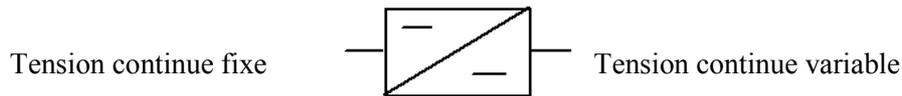
## **HACHEUR DEVOLTEUR**

**VARIATEUR DE VITESSE POUR MACHINE A  
COURANT CONTINU**

**Objectif** Il s'agit essentiellement de relever et analyser les formes d'ondes et les caractéristiques d'un hacheur série alimentant une machine à courant continu à flux constant.

**V.1. Définition et symbole**

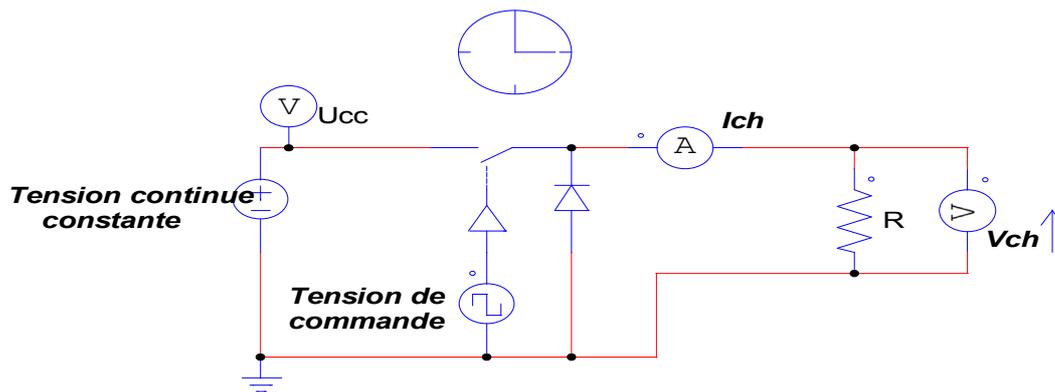
Le hacheur est un convertisseur statique permettant d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe



**V.2. Principe du hacheur dévolteur**

**V.2.1 Débit sur une charge résistive**

Pour faire varier la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge, on réalise le montage ci-dessous sur Psim



La charge est une résistance de 10Ω. Ucc=100V. Les transistors sont équivalents à des interrupteurs

Quand le signal de commande du générateur carré sera à l'état haut, l'interrupteur bidirectionnel k1 se ferme, par conséquent la diode se bloque, en raison de l'application d'un potentiel plus élevé à sa cathode. La commande des 2 interrupteurs est donc complémentaire

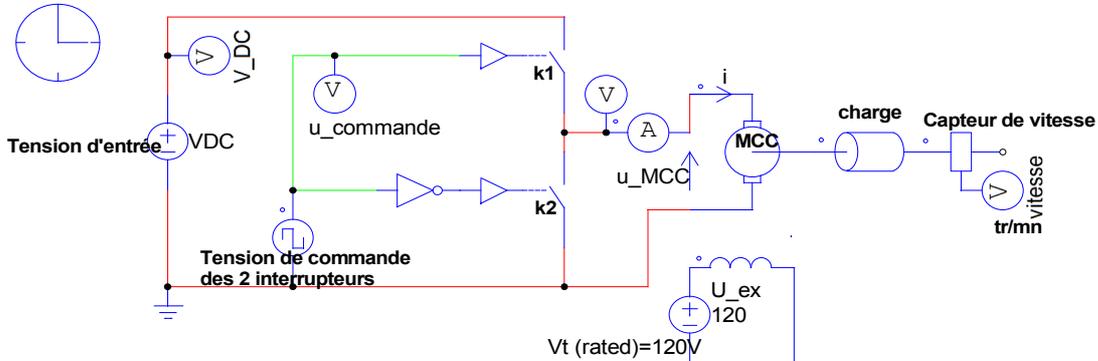
Il s'agit d'un hacheur série car l'interrupteur K1 est monté en série entre la source V<sub>DC</sub> et la charge.

**1. Travail à effectuer**

2. Afficher les chronogrammes de  $V_{ch}(t)$  et  $i_{ch}(t)$ , pour  $\alpha=0.7$
3. Donner les intervalles de conduction des interrupteurs
4. La tension  $u_{ch}$  est-elle sinusoïdale ? Alternative ?
5. Quelle est sa période?, sa fréquence ?
6. Calculer la valeur moyenne  $\langle u_{ch} \rangle$  de  $u_{ch}$ .
7. Calculer la valeur efficace de  $u_{ch}$ .

## V.2.2 Variateur de vitesse

Dans cette partie nous allons étudier le principe d'un hacheur série, dévolteur ou abaisseur de tension servant de variateur de vitesse pour machine à courant continu de fem  $E$ .



Il s'agit d'un hacheur série car l'interrupteur  $K1$  est monté en série entre la source  $V_{DC}$  et la charge.

Pour que la commande des 2 interrupteurs soit complémentaire on doit ajouter une porte non à l'un des 2 interrupteurs, par conséquent quand le signal de commande du générateur carré sera à l'état haut, l'interrupteur  $k1$  sera fermé et l'interrupteur  $k2$  sera ouvert en raison de la porte non.

La tension d'alimentation du hacheur série est constante et vaut  $V_{DC}=100V$

Tension à la sortie du hacheur =  $u_{MCC}$

On choisit une période  $T$  et une fraction de cette période notée  $\alpha$ , le rapport cyclique de commande de ce hacheur (duty cycle), on le règle dans la tension carré de commande des interrupteurs.

- $T$ , la période, de fonctionnement.

- Pour  $t \in [0 ; \alpha T]$ ,  $K1$  est fermé
- Pour  $t \in [\alpha T ; T]$ ,  $K1$  est ouvert

- On donne  $T=0,1ms$ , et  $\alpha=0.5$

## 1. Travail à effectuer

1) Tracer l'allure de la tension de charge  $u_{MCC}$ .

**K1 passant** :  $u_{MCC}=E =V_{DC}1$

**K2 passant** :  $u_{MCC}=0$

2) Déterminer l'expression de la valeur moyenne de la tension de charge.

3) En déduire la relation liant  $V_{DC}$ ,  $E$  et  $\alpha$ .

4) Tracer l'allure de la vitesse du moteur et relever sa valeur en régime permanent.

5) Si  $k=2.25$ , déterminer la valeur du rapport cyclique me permettant d'avoir une vitesse de 1000tr/mn

6) Représenter l'allure du courant  $i(t)$  sur une durée de  $2T$

**On rappelle que :**

- La valeur moyenne :  $\langle u_{MCC} \rangle = \alpha V_{DC}$
- La f.c.e.m du moteur :  $E = KN$

N étant la vitesse du moteur en tr/mn, et k la constante du moteur

- Dans le tableau de paramétrage les paramètres du moteur DC sont :

Ra = résistance de l'induit,

La = inductance de l'induit,

Rf = résistance de l'inducteur,

Lf = inductance de l'inducteur,

Vt = tension nominale,

Ia = courant nominal,

n = vitesse nominale,

If = courant d'excitation, il est réglé à sa valeur nominale (0,6A).

Ce moteur entraîne une charge d'inertie nulle et de couple résistant  $T_c = 5 \text{ Nm}$ .

## **SIMULATION AVEC PSIM**

---

**TP N°6**

# **ONDULEUR MONOPHASE EN PONT** *Commande Symétrique* *et* *Fréquence Constante*

## ONDULEUR MONOPHASE EN PONT

### Commande symétrique et fréquence constante

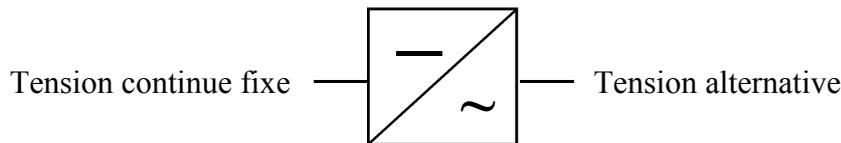
**Objectif** Apprendre, comment peut-on réaliser une alimentation de type alternative, la plus sinusoïdale possible, à partir d'une tension continue

Comprendre le principe de fonctionnement de l'onduleur avec une charge résistive. Puis analyser son fonctionnement lorsque la charge est inductive

Contrôler la vitesse d'un moteur asynchrone.

### VI.1 Définition et symbole

Un onduleur est un convertisseur statique qui, à partir d'une source de tension continue constante, permet le transfert et le contrôle de l'énergie vers une charge, en transformant la tension aux bornes de celle-ci en tension alternative.



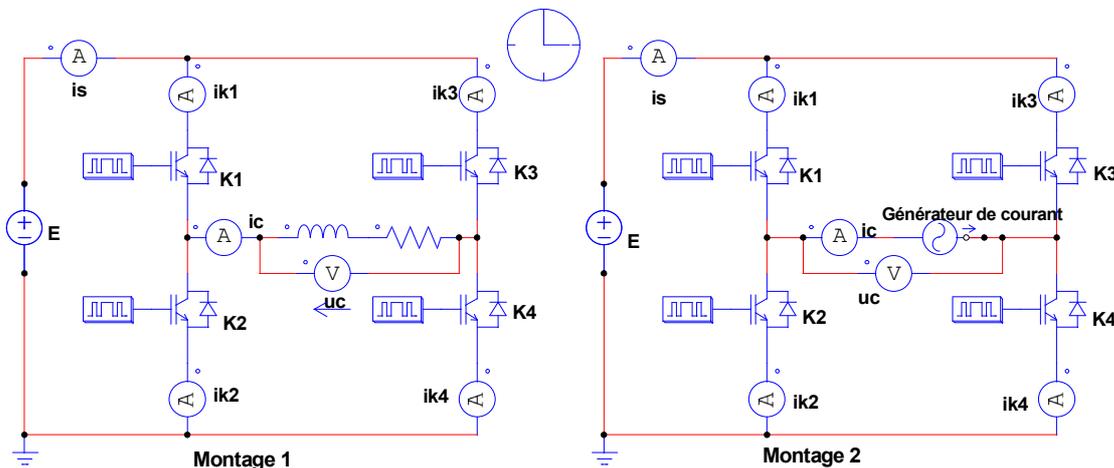
### VI.2 Commande symétrique. Fréquence constante

On appelle ce type de commande la commande simultanée, car les interrupteurs k1 et k3 sont commandés simultanément ; de même pour les interrupteurs k2 et k4. On l'appelle également commande symétrique car la tension de charge vaut +E ou -E.

#### VI.2.1 Manipulation1

Réaliser le **montage 1**. L'onduleur alimente une charge RL, tel que :  $R=10\Omega$  et  $L=40mH$ .

La tension continue d'alimentation  $E=90V$ .



On ferme k1 et k4 simultanément de 0 à  $\alpha T$ , puis k2 et k3 de  $\alpha T$  à T. La fréquence de commande des interrupteurs est  $f=50Hz$ .

Sur **Psim**, la commande des transistors est effectuée par les modules de commande **gating bloc** : Avec un double clic sur ce module, on ajuste la fréquence à 50Hz, 2 points de commutation,  $0^\circ$  et  $180^\circ$  pour les transistors 1 et 4,  $180^\circ$  et  $360^\circ$  pour les transistors 2 et 3

Chaque interrupteur est formé d'un transistor et d'une diode en parallèle, afin de permettre la visualisation du courant dans chaque semi-conducteur (**flag=1**)

**ONDULEUR MONOPHASE EN PONT**  
*Commande symétrique et fréquence constante*

On ferme k1 et k4 simultanément de 0 à  $\alpha T$ , puis k2 et k3 de  $\alpha T$  à T. La fréquence de commande des interrupteurs est  $f=50\text{Hz}$ .

Sur **Psim**, la commande des transistors est effectuée par les modules de commande **gating bloc** : Avec un double clic sur ce module, on ajuste la fréquence à 50Hz, 2 points de commutation,  $0^\circ$  et  $180^\circ$  pour les transistors **1** et **4**,  $180^\circ$  et  $360^\circ$  pour les transistors **2** et **3**

Chaque interrupteur est formé d'un transistor et d'une diode en parallèle, afin de permettre la visualisation du courant dans chaque semi-conducteur (**flag=1**)

**1. Travail à effectuer**

2. Relever les formes d'ondes de  $u_{ch}(t)$ ,  $i_{ch}(t)$ ,  $i_{eh}(t)$ ,  $i_{k1}(t)$ ,  $i_{k2}(t)$ ,  $i_{k3}(t)$ , et  $i_{k4}(t)$ , pour un fonctionnement sur charge RL.
3. Préciser les intervalles de conduction, en remplissant le **tableau 1**
4. Mesurer  $U_{ch,eff}$ ,  $I_{ch,eff}$ , la puissance  $P_s$  fournie par la source, la puissance  $P_c$  reçue par la charge.
5. Tracer les spectres de  $u_{ch}(t)$  et  $i_{ch}(t)$ , pour cela sur **Simview**, appuyer sur la touche **FTT** (pour calculer les harmoniques)

**On rappelle que :**

La puissance active  $P_c$ , dans le cas d'un courant sinusoïdal, s'exprime par  $P_c = U_c I_c \cos \varphi$ , où  $\varphi$  représente le déphasage entre la tension et le courant de charge.

Interrupteurs fermés	$i_{k1}$	$i_{k2}$	$u_{ch}$	$i_e$	Phase	Éléments conducteurs	$i_{D1}$	$i_{T1}$	$i_{D2}$	$i_{T2}$
<b>K1 - k4</b>	$i_c$	0	E	$i_c$	<b>1</b>	<b>D1-D4</b>	$-i_c$	0	0	0
					<b>2</b>	<b>T1-T4</b>	0	$i_c$	0	0
<b>K2 - k3</b>	0	$-i_c$	-E	$-i_c$	<b>2</b>	<b>D2-D3</b>	0	0	$i_c$	0
					<b>4</b>	<b>T2-T3</b>	0	0	0	$-i_c$

**Tableau1**

Si on suppose que la conduction est continue ( $L \gg R$ ), la charge peut être remplacée par un générateur de courant sinusoïdal correspondant au fondamental du courant de charge  $i_{ch}$ .

**VI.2.2. Manipulation2**

Réaliser le schéma du **montage 2**.

**On donne :** Amplitude de  $i_{ch}=7.13\text{A}$ , fréquence=**50Hz**, la phase=**-51.5°**.

**1. Travail à effectuer**

1. Relever les formes d'ondes de  $u_{ch}(t)$ ,  $i_{ch}(t)$ ,  $i_e(t)$
2. Relever les formes d'ondes de  $i_{k1}(t)$ ,  $i_{k2}(t)$ ,  $i_{k3}(t)$ , et  $i_{k4}(t)$

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

# **SIMULATION AVEC PSIM**

---

**TP N°7**

## **ONDULEUR TRIPHASE**

**Objectif.** Relever et analyser les formes d'onde à la sortie d'un onduleur triphasé pour deux types de commande ; une commande à pleine onde et une commande MLI.

### VII.1 Principe de fonctionnement de l'onduleur

La commande est complémentaire sur chaque bras et la commande de chaque bras est décalée de  $2\pi/3$ .

#### VII.1.1 Commande pleine onde

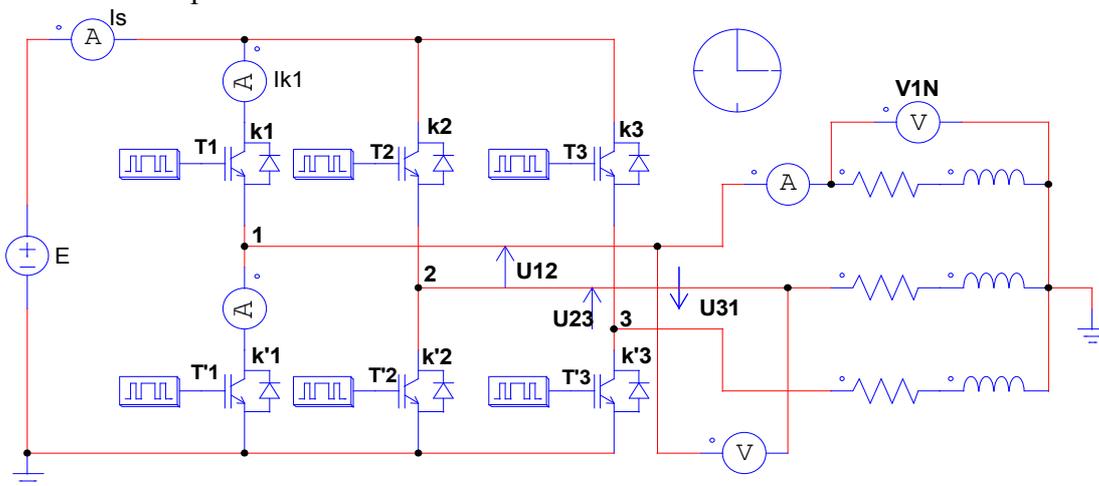
Chaque interrupteur est formé d'un transistor et d'une diode en parallèle, afin de permettre la visualisation du courant dans chaque semi-conducteur (**flag=1**)

Chaque interrupteur  $K_i$  et  $K'_i$   $i=1,..3$ , est fermé pendant  $T/2$ .

#### 1. Manipulation1 : Débit sur charge inductive

Réaliser le montage ci-dessous. L'onduleur alimente une charge triphasée équilibrée inductive couplée en étoile On donne  $E=180V$ .  $R=10\Omega$ , et  $L=40mH$ .

- période d'échantillonnage :  $10^{-5}$  s ,
- durée de simulation : 40 ms ,
- visualisation : à partir de 20 ms



La fréquence de commande des interrupteurs est  $f=50Hz$ .

La commande des transistors est effectuée par les modules de commande **gating bloc** : Avec un double clic sur ce module, on ajuste la fréquence à 50Hz, 2 points de commutation, t la séquence de commande des transistors :

<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>
<b>0°-180°</b>	<b>120°-300°</b>	<b>240°-420°</b>
<b>T'1</b>	<b>T'2</b>	<b>T'3</b>
<b>180° -360°</b>	<b>300°-400°</b>	<b>60°-240°</b>

2. Travail à effectuer

1. Préciser la séquence de commande des interrupteurs.
2. Relever les formes d'ondes des tensions composées,  $U_{12}(t)$ ,  $U_{23}(t)$ ,  $U_{31}(t)$ . Etablir l'expression de  $U_{ch,eff.}$ , en fonction de E.
3. Représenter les tensions simples  $V_{1N}$ ,  $V_{2N}$ ,  $V_{3N}$ . Etablir l'expression de  $V_{ch,eff.}$ , en fonction de E.
4. Donner l'expression du courant de ligne  $i_l(t)$
5. Calculer la puissance  $P_c$  reçue par la charge
6. Exprimer  $i_{Ti}$ , et  $i_{Di}$  en fonction de  $i_{ki}$  et du signe de  $i_{ki}$ .

VII.1.2 Commande MLI

Les signaux de commande des interrupteurs sont obtenus par comparaison d'un signal triangulaire de fréquence élevée (porteuse) et d'un signal sinusoïdal (modulante). La modulante définit la fréquence des grandeurs de sortie

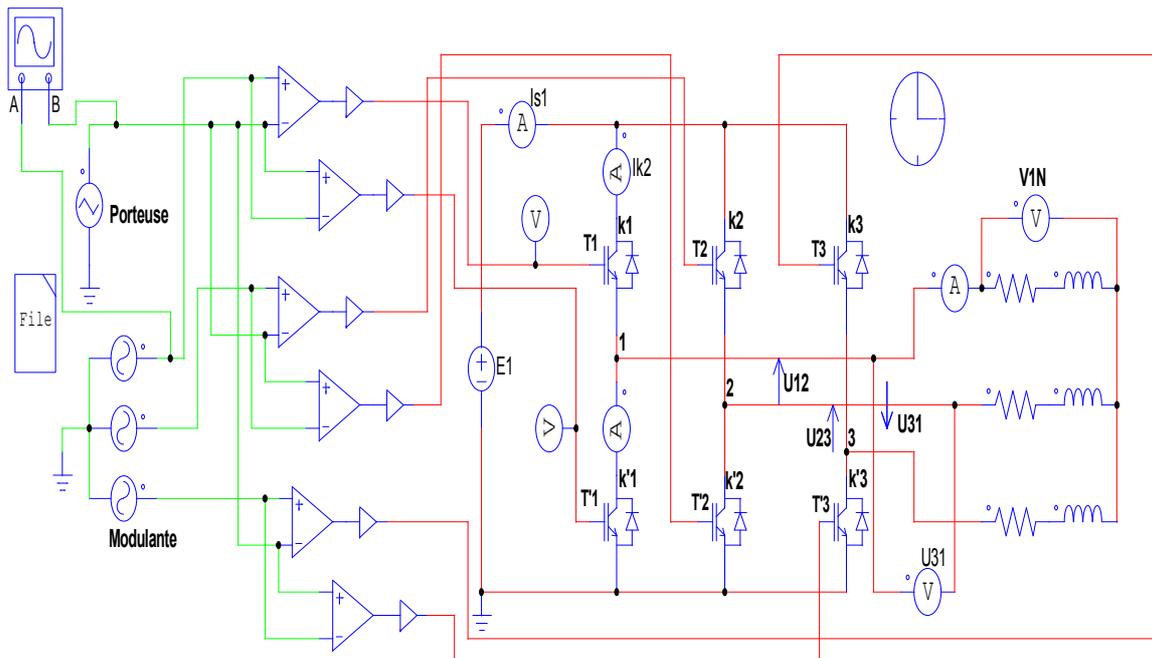
$$m = \frac{\text{Amplitude modulante}}{\text{Amplitude porteuse}}$$

On définit deux paramètres :

$$p = \frac{\text{Fréquence porteuse}}{\text{Fréquence modulante}}$$

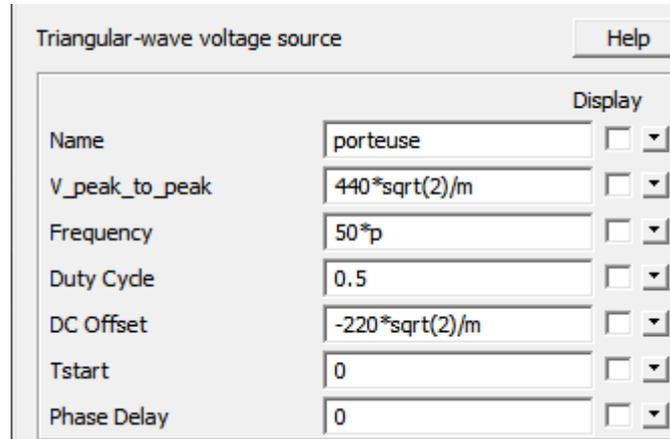
1. Manipulation1 : Débit sur charge inductive RL

La sortie d'une source d'alimentation ne doit jamais être connectée directement au transistor ou autre semi-conducteur mais doit être connecté à travers un **On-Off Switch Controller**.

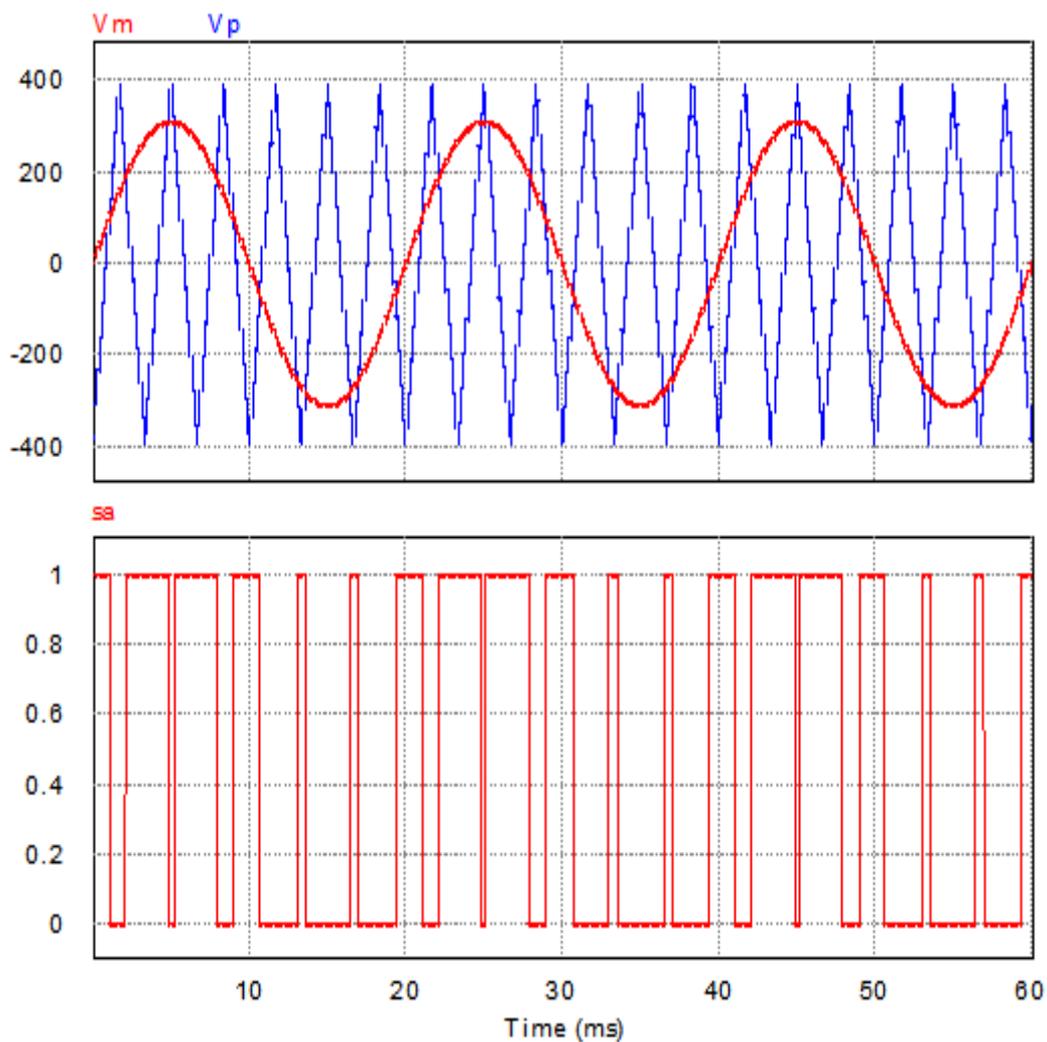


Sur le fichier file, on affecte les valeurs numériques à  $m=0.6$  et  $p=6$

Si la modulante est une tension sinusoïdale de valeur maximale,  $V_{max}=220*\sqrt{2}$ , et de fréquence  $f=50\text{Hz}$ , alors la porteuse est :



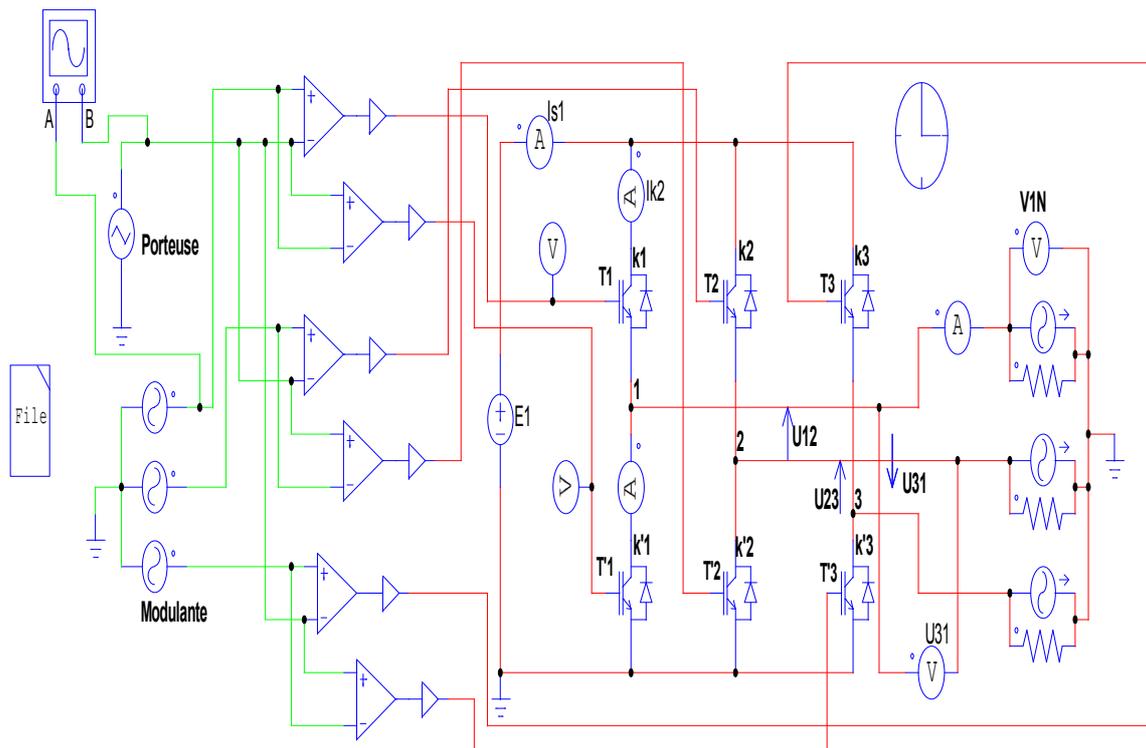
En variant les valeurs de  $m$ , et/ou  $p$ , on peut modifier la largeur du signal à la sortie du comparateur.



## 1. Manipulation2 :

La charge inductive est remplacée par trois générateurs de courants sinusoïdaux correspondant aux fondamentaux des courants  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ , d'amplitude  $I_0=5A$ , de fréquence 50Hz, et déphasés de  $120^\circ$ .

On ajoute des résistances de valeur importante  $10k\Omega$ , en parallèles sur chaque générateur de courant, afin de permettre le calcul des tensions simples par Psim



1. Travail à effectuer

2. Sur un même graphe relever les tensions de la source modulante et de la source porteuse

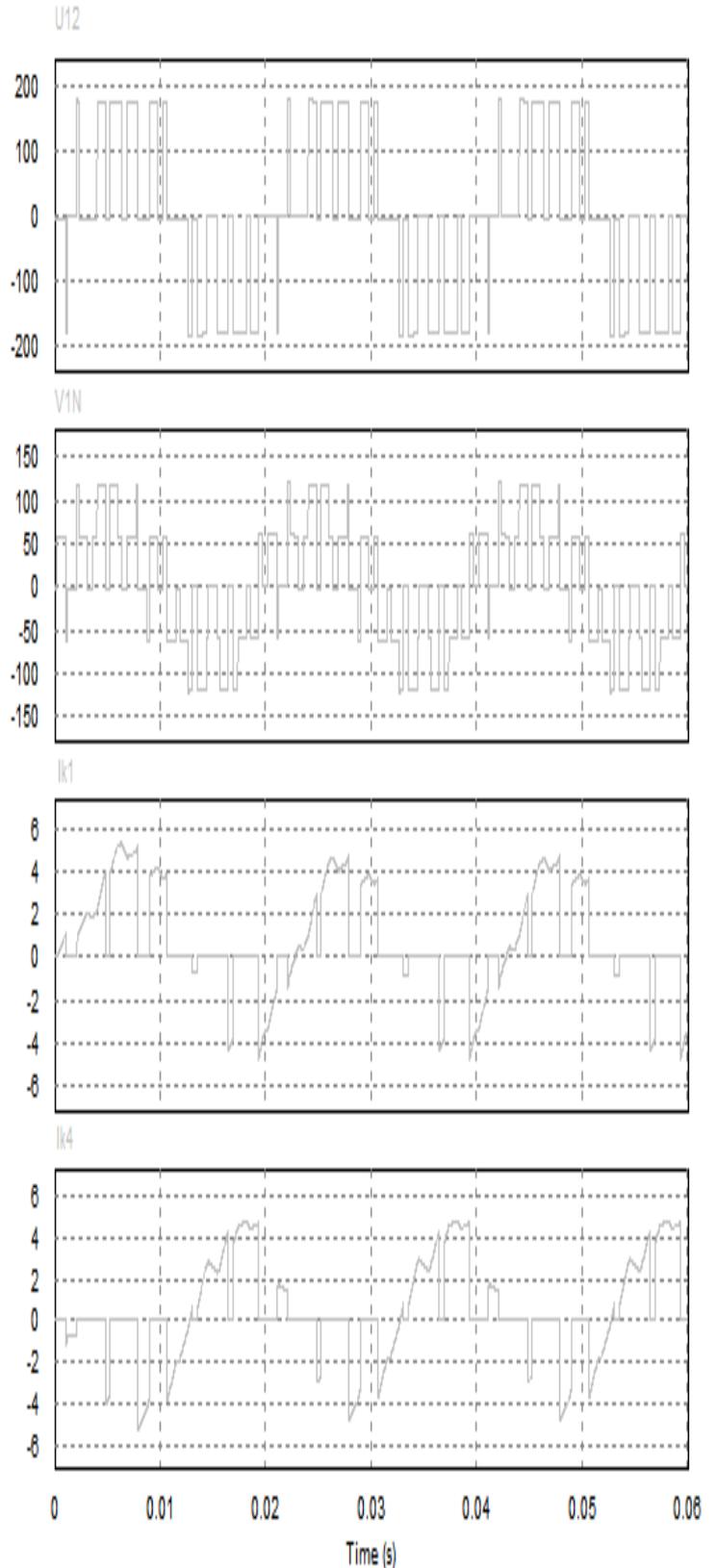
3. Relever les formes d'ondes de  $U_{12}(t)$ ,  $V_{1N}(t)$ ,  $i_1(t)$ ,  $i_{k1}(t)$ , et  $i_{k'1}(t)$  pour  $m=0.8$  et  $p=6$ .

Préciser les intervalles de conduction

4. Mesurer  $U_{eff}$ ,  $V_{eff}$ , et  $I_{eff}$ .

5. Mesurer la puissance  $P_s$  fournie par la source, et la puissance  $P_c$  reçue par la charge.

6. La tension de sortie est-elle sinusoïdale ?



TP N° 8

**GRADATEUR MONOPHASE**  
*Par Déphasage à Angle de Phase*

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

**SIMULATION AVEC PSIM**

---

**TP N°8**

**GRADATEUR MONOPHASE**

**PAR DEPHASAGE A ANGLE DE PHASE**

**Objectif.** Dans ce présent TP, nous nous proposons d'étudier le fonctionnement d'un gradateur monophasé débitant sur différents types de charges, et de confronter les différents résultats **Psim**, avec les résultats obtenus théoriquement en cours

**VIII.1- Schéma de principe**

L'élément de base est formé de triac ou de deux thyristors montés en têtes bêtes (ou en anti-parallèle) et placés entre la source et le récepteur. La source fournit une tension sinusoïdale.

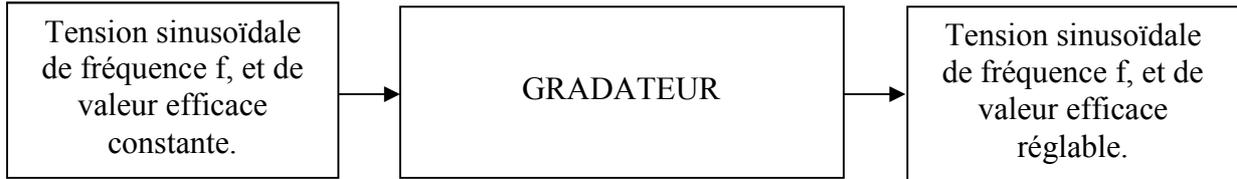


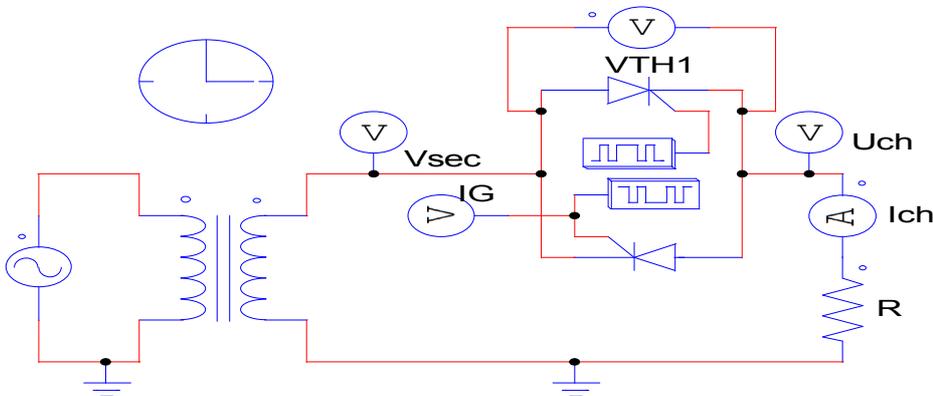
Figure.1.Schéma synoptique d'un gradateur.

**VIII.2- Etude du fonctionnement**

Le fonctionnement du gradateur monophasé doit être envisagé suivant la nature de la charge

**VIII.2.1- Charge résistive :**

Réaliser le montage d'un gradateur avec charge  $R=500\Omega$ . La tension d'alimentation, de valeur efficace 24V et de fréquence  $f=50\text{Hz}$



Les différentes phases de fonctionnement d'un gradateur sont décrites par le tableau suivant :

Intervalles	Thyristors passants	Tensions aux bornes des thyristors bloqués	Tension redressée
$0 \leq \omega t < \alpha$	Aucun	$V_{Th2} = V_2$	$U_c = V_1$
$\alpha \leq \omega t < \pi$	Th1	$V_{Th2} = V_1 - U_c$	$U_c = 0$
$\pi \leq \omega t < \pi + \alpha$	Aucun	$V_{Th2} = V_2 - U_c$	$U_c = V_1$
$\pi + \alpha \leq \omega t < 2\pi$	Th2	$V_{Th2} = 0$	$U_c = 0$

#### 1- Travail à effectuer

En prenant une tension à l'entrée du transformateur  $v_e(t)=24*\sqrt{2}*\sin\omega t$ , et un rapport de transformation  $m=0.5$

Pour  $\alpha=\pi/4$ , et  $\alpha=\pi/2$

1. Visualiser et relever les chronogrammes de la tension de sortie, et de la tension inverse aux bornes du thyristor 1
2. Visualiser et relever les chronogrammes du courant de charge, de  $i_{TH1}$ , et de  $i_{TH2}$
3. Visualiser les tensions de gâchette séparément pour chacun des thyristors.
4. Calculer la valeur moyenne et efficace de la tension de sortie

#### VIII.2.2- Charge inductive

Réaliser le montage d'un gradateur monophasé, constitué par deux thyristors, montés tête bêche avec charge  $R=500\Omega$  et  $L=100\text{mH}$ , alimenté par une tension, de valeur efficace 24V et de fréquence  $f=50\text{Hz}$

Le gradateur permet d'obtenir, aux bornes de la charge qui est symbolisée, une tension  $U_c$  périodique mais pas complètement sinusoïdale, elle sera sous forme de portion de sinusoïde.

La valeur efficace de la tension alternative aux bornes de la charge peut être réglée en agissant sur le retard angulaire de l'impulsion de commande de chaque thyristor.

#### 1- Travail à effectuer

En prenant une tension à l'entrée du transformateur  $v_e(t)=24*\sqrt{2}*\sin\omega t$ , et un rapport de transformation  $m=0.5$

**Fonctionnement à  $\Psi < \alpha < \pi$**

Ajouter l'inductance en série avec la résistance,  $\Psi$  représente l'argument de la charge. Ne connaissant pas à priori la valeur de  $\Psi$ , placez-vous à  $\alpha=\pi$ . Visualiser la tension et le courant de sortie du gradateur.

Expliquer le fonctionnement du gradateur. Visualiser également les impulsions de commande

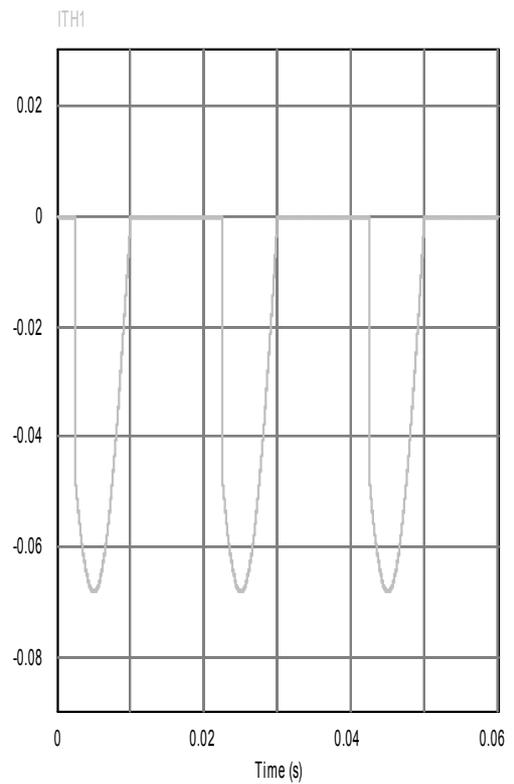
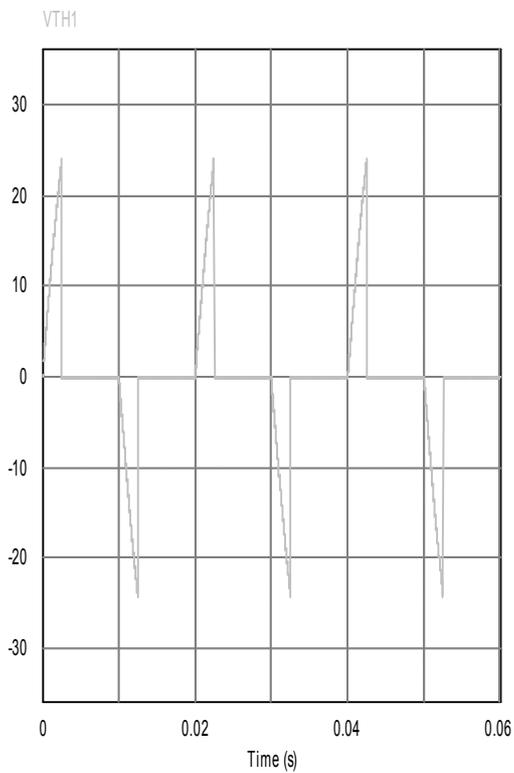
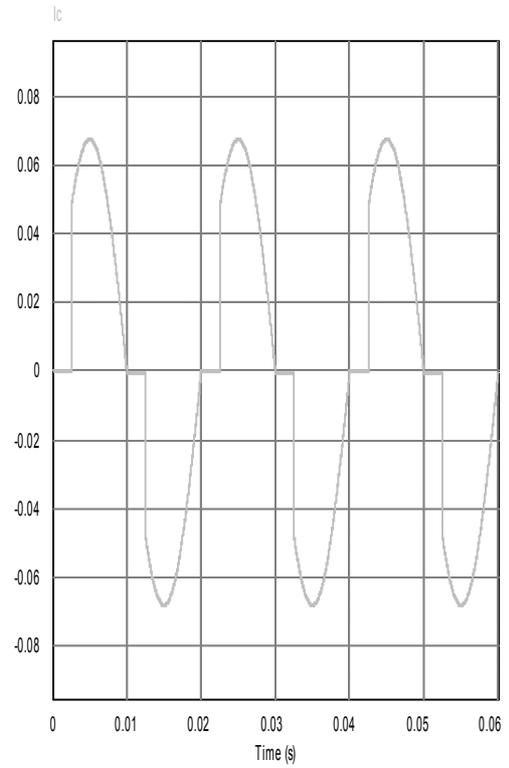
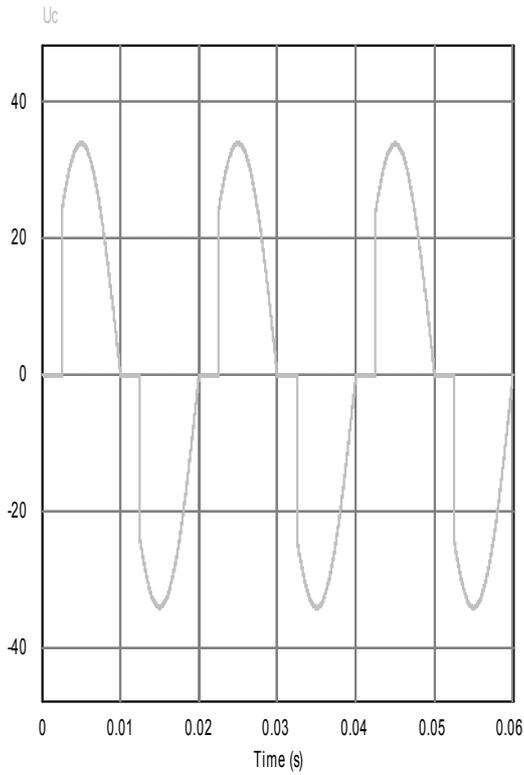
**Fonctionnement à  $\alpha < \Psi$**

En réduisant la valeur de  $\alpha$ , celle-ci devient inférieure à  $\Psi$ . Expliquer le comportement du gradateur à partir des formes d'ondes de la tension, du courant et des impulsions de gâchettes.

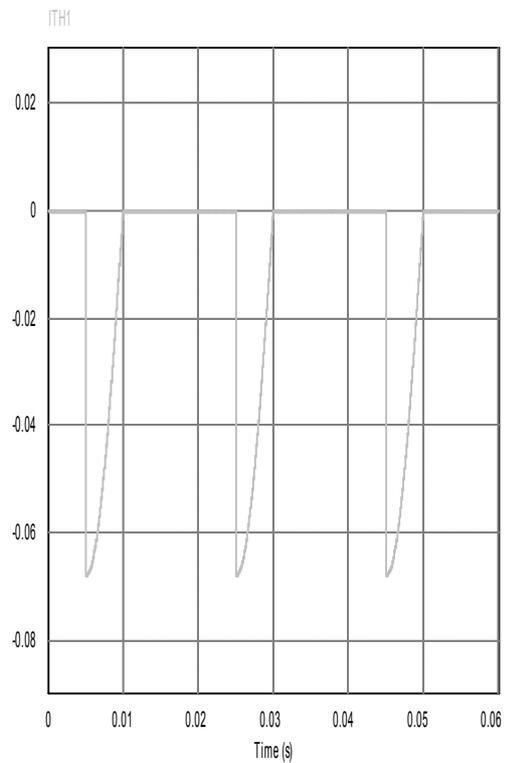
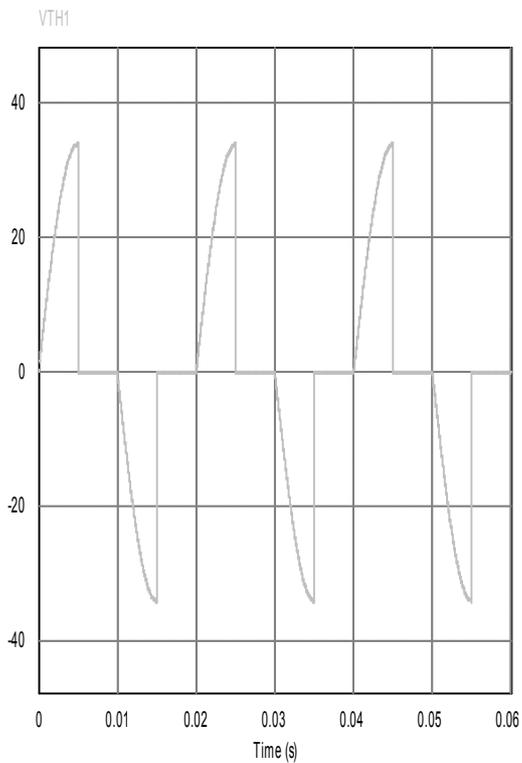
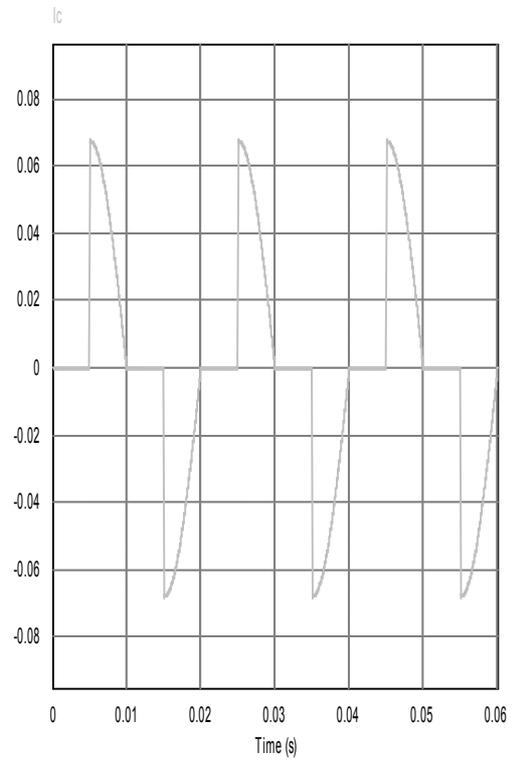
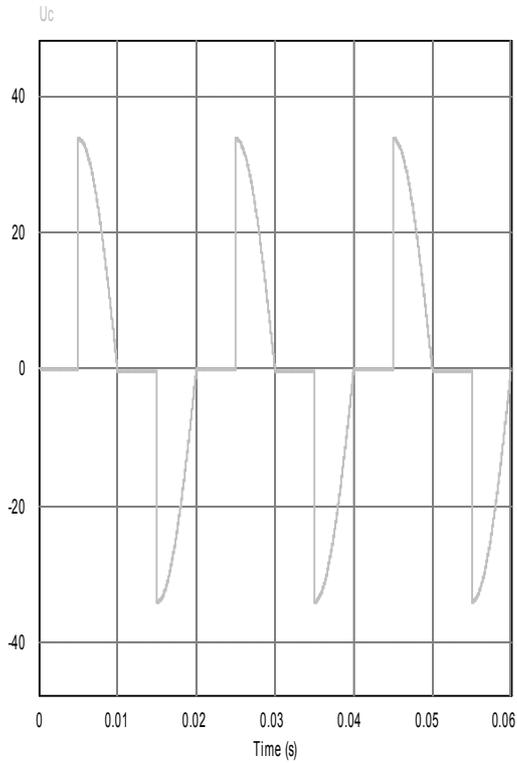
**Pour  $\alpha=\pi/6$ ,  $\alpha=\pi/3$ , et  $\alpha=2\pi/3$**

1. Visualiser et relever les chronogrammes de la tension de sortie, et de la tension inverse aux bornes du thyristor 1
2. Visualiser et relever les chronogrammes de la tension  $U_R$  aux bornes de R et de la tension  $U_L$ , aux bornes de L
3. Visualiser et relever les chronogrammes du courant de charge, de  $i_{TH1}$ , et de  $i_{TH2}$
4. Visualiser et relever les chronogrammes du courant circulant dans la résistance et du courant circulant dans la bobine

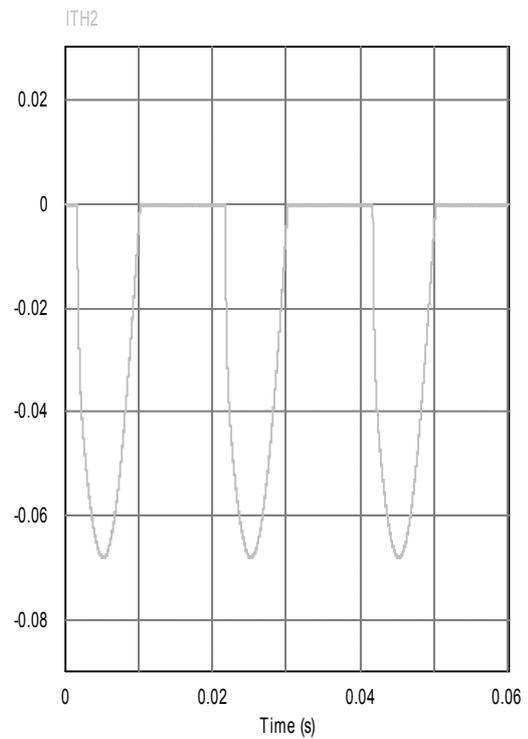
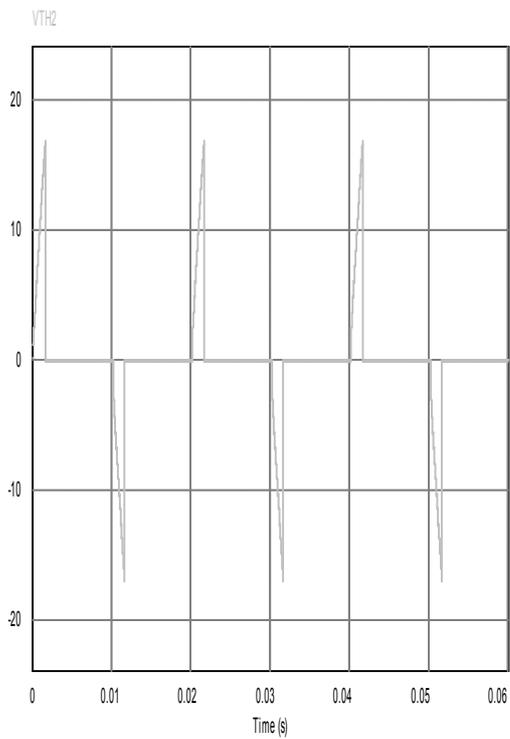
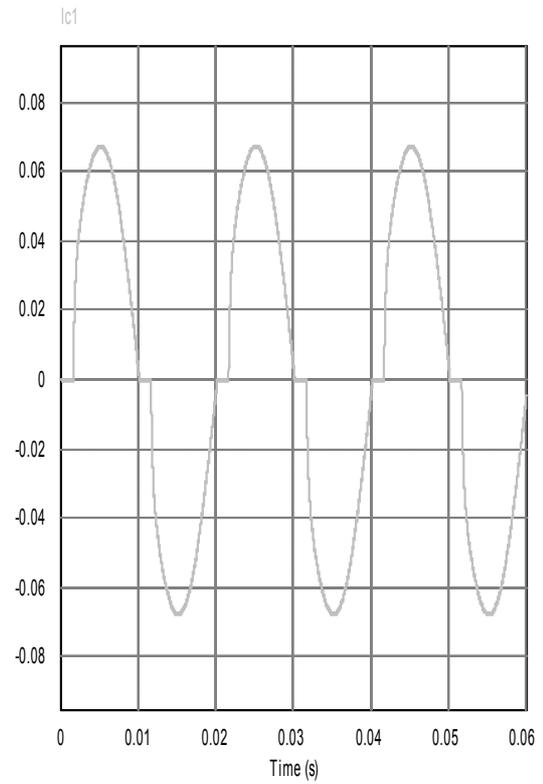
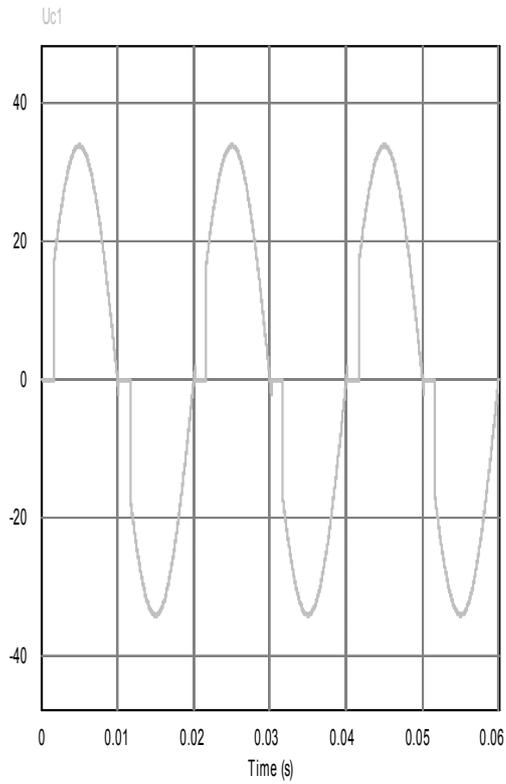
**Charge résistive /  $\alpha = \pi/4$**



**Charge résistive /  $\alpha = \pi/2$**



charge inductive /  $\alpha = \pi/6$



# Redressement monophasé simple alternance

## Redressement non commandé (à diodes)

<p><b>Schéma du montage</b></p>	<p><b>Valeur moyenne de Vs</b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi V_s \sqrt{2} \sin \theta d\theta = \frac{V_s \sqrt{2}}{\pi} \text{ (V)}$ <p><b>Valeur efficace de Vs</b></p> $V_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi 2V_s^2 \sin^2 \theta d\theta} = \frac{V_s \sqrt{2}}{2} \text{ (V)}$ <p><b>Taux d'ondulation</b></p> $\tau = \frac{V_s \sqrt{2}}{\langle V_s \rangle} = \pi$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{Dinv} = -V_s \sqrt{2} \text{ (V)}$	
---------------------------------	--	--

## Redressement commandé (à thyristors)

<p><b>Schéma du montage</b></p>	<p><b>Valeur moyenne de Vs</b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_\alpha^\pi V_s \sqrt{2} \sin \theta d\theta = \frac{V \sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$ <p><b>Valeur efficace de Vs</b></p> $V_s = \frac{V \sqrt{2}}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \text{ (V)}$ <p><b>Taux d'ondulation</b></p> $\tau = \frac{V \sqrt{2}}{\langle V_s \rangle}$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{Dinv} = -V \sqrt{2} \text{ (V)}$	
---------------------------------	---	--

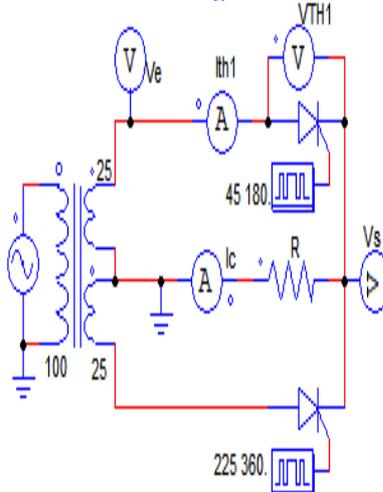
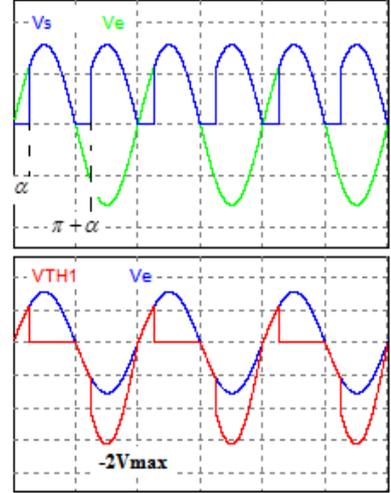
# Redressement monophasé double alternance

## Redressement non commandé (à diodes)

<p><b>Schéma du montage</b></p> <p style="text-align: center;">Transformateur monophasé point milieu</p>	<p><b>Valeur moyenne de Vs</b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi V_s \sqrt{2} \sin \theta d\theta = \frac{2V \sqrt{2}}{\pi} \text{ (V)}$ <p><b>Valeur efficace de Vs</b></p> $V_s = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^\pi 2V_s^2 \sin^2 \theta d\theta} = V \text{ (V)}$ <p><b>Taux d'ondulation</b></p> $\tau = \frac{V \sqrt{2}}{\langle V_s \rangle}$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{Dinv} = -2V \sqrt{2} \text{ (V)}$	
--	---	--

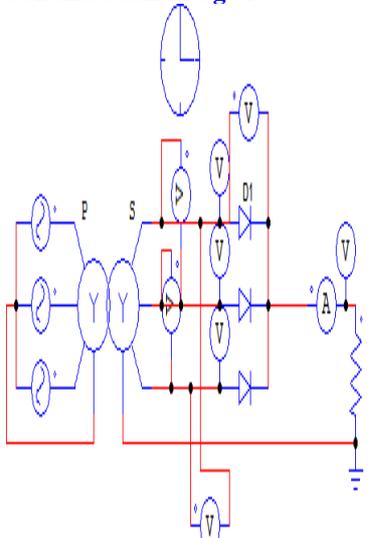
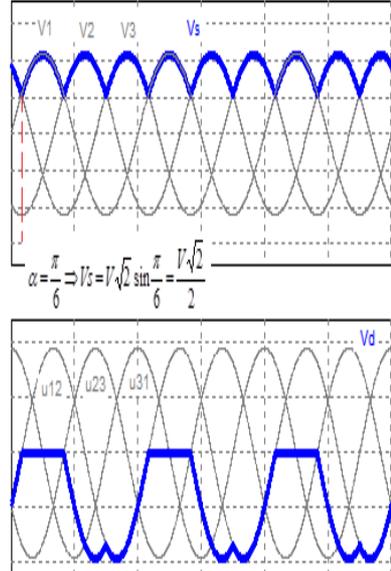
<p><b>Schéma du montage</b></p> <p style="text-align: center;">Redresseur Pont de Graetz</p>	<p><b>Valeur moyenne de Vs</b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi V_s \sqrt{2} \sin \theta d\theta = \frac{2V \sqrt{2}}{\pi} \text{ (V)}$ <p><b>Valeur efficace de Vs</b></p> $V_s = \sqrt{\frac{2}{\pi} \int_0^\pi 2V_s^2 \sin^2 \theta d\theta} = V \text{ (V)}$ <p><b>Taux d'ondulation</b></p> $\tau = \frac{V \sqrt{2}}{\langle V_s \rangle}$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{Dinv} = -V \sqrt{2} \text{ (V)}$	
--	--	--

## Redressement commandé (à thyristors)

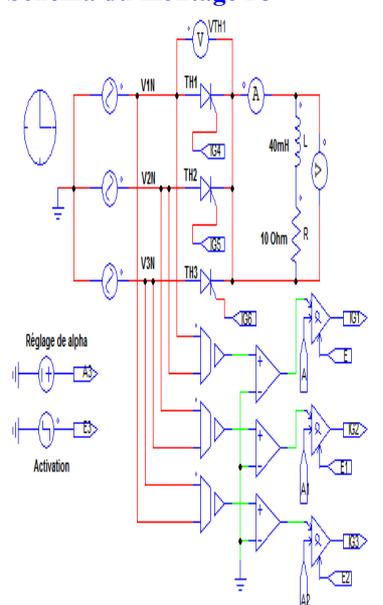
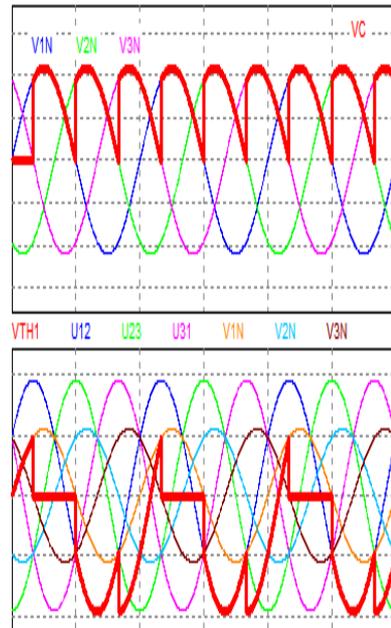
<p><b>Schéma du montage</b></p> 	<p><b>Valeur moyenne de <math>V_s</math></b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi} \frac{(1 + \cos\alpha)}{2} \text{ (V)}$ <p><b>Valeur efficace de <math>V_s</math></b></p> $V_s = V \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \text{ (V)}$ <p><b>Taux d'ondulation</b></p> $\tau = \frac{V\sqrt{2}}{\langle V_s \rangle}$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{Dinv} = -2V\sqrt{2} \text{ (V)}$	
---	--	---

## Redressement triphasé simple alternance

### Redressement non commandé (à diodes)

<p><b>Schéma du montage P3</b></p> 	<p><b>Valeur moyenne de <math>V_s</math></b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{3}{\pi} \int_0^\pi V_s \sqrt{2} \sin\theta d\theta = \frac{3\sqrt{3}V\sqrt{2}}{2\pi} \text{ (V)}$ <p><b>Valeur efficace de <math>V_s</math></b></p> $V_s = V \sqrt{1 + \frac{\sin \frac{2\pi}{3}}{\frac{2\pi}{3}}} \text{ (V)}$ <p><b>Taux d'ondulation</b></p> $\tau = \frac{V\sqrt{2}}{2\langle V_s \rangle}$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{Dinv} = -\sqrt{3}V\sqrt{2} \text{ (V)}$	
---	---	--

### Redressement commandé (à thyristors)

<p><b>Schéma du montage P3</b></p> 	<p><b>Valeur moyenne de <math>V_s</math></b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{3\sqrt{3}V\sqrt{2}}{2\pi} \cos\alpha \text{ (V)}$ <p><b>Valeur efficace de <math>V_s</math></b></p> $V_s = V \sqrt{1 + \frac{\sin \frac{2\pi}{3}}{\frac{2\pi}{3}}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \text{ (V)}$ <p><b>Facteur de puissance</b></p> $FP = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \cos\alpha \quad 1.22$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{Dinv} = -\sqrt{3}V\sqrt{2} \text{ (V)}$	
--	--	---

## Redressement triphasé double alternance

### Redressement non commandé (à diodes)

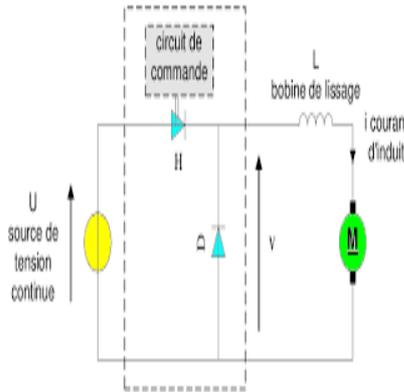
<p><b>Schéma du montage P3</b></p> <p><b>Tension crête</b> = <math>\sqrt{3} V_{\max}</math></p> <p><b>Tension moyenne</b> = <math>\frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{\max}</math></p> <p><b>Tension min.</b> = <math>1,5 V_{\max}</math></p> <p><b>Tension redressée</b></p>	<p><b>Les tensions composées sont données comme suit :</b></p> $U_{31} = -U_{13}$ $U_{23} = -U_{32}$ $U_{21} = -U_{12}$ <p><b>Valeur moyenne de <math>V_s</math></b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V \sqrt{2} \text{ (V)}$ <p><b>Valeur efficace de <math>V_s</math></b></p> $V_s = \sqrt{3} V \sqrt{1 + \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}}} \text{ (V)}$ <p><b>Taux d'ondulation</b></p> $\tau = \frac{V_{s\max} - V_{s\min}}{\langle V_s \rangle} = \frac{\sqrt{3} V \sqrt{2} - 1,5 V \sqrt{2}}{\langle V_s \rangle}$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{D\text{inv}} = -\sqrt{3} V \sqrt{2} \text{ (V)}$	
--	---	--

### Redressement commandé (à thyristors)

<p><b>Schéma du montage</b></p> <p><b>réseau</b></p> <p>1 2 3 N</p> <p><b>récepteur</b></p> <p><math>V_s</math> <math>i_c</math></p> <p><math>U_d</math> <math>i_d</math></p>	<p><b>Valeur moyenne de <math>V_s</math></b></p> $\langle V_s \rangle = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V \sqrt{2} \cos \alpha \text{ (V)}$ <p><b>Valeur efficace de <math>V_s</math></b></p> $V_s = \sqrt{3} V \sqrt{1 + \frac{\sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}}} \text{ (V)}$ <p><b>Taux d'ondulation</b></p> $\tau = \frac{\sqrt{3} V \sqrt{2}}{2 \langle V_s \rangle}$ <p><b>Tension inverse</b></p> $V_{D\text{inv}} = -\sqrt{3} V \sqrt{2} \text{ (V)}$	
---	--	--

## HACHEUR SERIE

### Schéma du montage



### Valeur moyenne de $V_s$

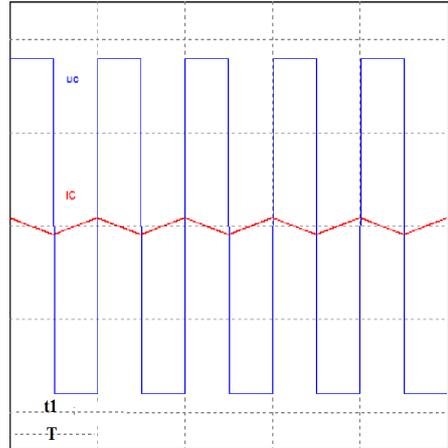
$$\langle V_s \rangle = \alpha E$$

$\alpha$ , étant le rapport cyclique, tel que ;

$$\alpha = \frac{t_1}{T}$$

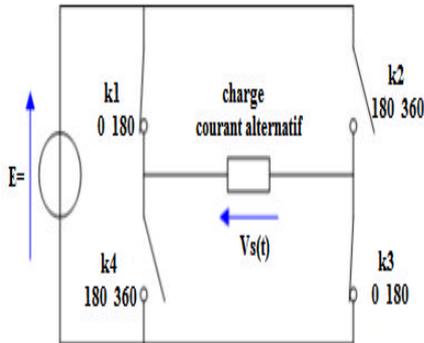
### Valeur efficace de $V_s$

$$V_s = E$$



## ONDULEUR monophasé en pont

### Schéma du montage

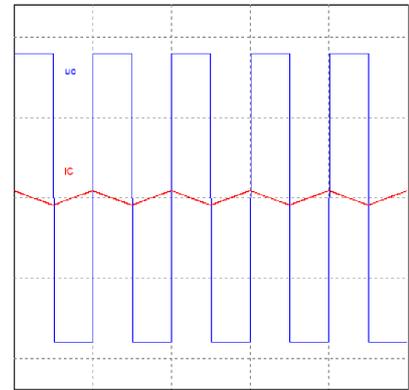


### Valeur moyenne de $V_s$

$$\langle V_s \rangle = 0$$

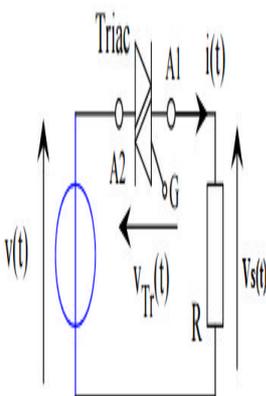
### Valeur efficace de $V_s$

$$V_s = E$$



## Gradateur monophasé

### Schéma du montage



### Valeur moyenne de $V_s$

$$\langle V_s \rangle = 0$$

### Valeur efficace de $V_s$

$$V_s = \frac{\sqrt{2}V}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha_1}{4\pi} + \frac{\sin 2\alpha_2}{4\pi}}$$

pour  $\alpha_1 = \alpha_2$

$$V_s = \frac{\sqrt{2}V}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

