

Mémoire du Projet Métier

En vue de l'obtention du diplôme

## INGÉNIEUR D'ÉTAT

Filière : Génie Électromécanique-Option : Énergie et  
Maintenance

---

### Conception et Simulation d'un Gradateur Monophasé

---

*Réalisé par :*

M. Abdelouahab ZENZER  
M. Walid LGHRISSI  
M. Oussama SOUABI

*Sous la direction de :*

Pr. Ahmed LAGRIQUI  
(ENSAM)

*Soutenu le Juin 2025, Devant le jury :*

Pr. Ahmed LAGRIQUI : ENSAM Meknès

**Année universitaire  
2024/2025**



## **Remerciements**

*Avant tout, nous tiens à remercier le Seigneur Dieu Tout Puissant de nous avoir donné la santé et la force pendant nos recherches et l'élaboration de ce présent projet.*

*Nous remercions le Professeur titulaire LAGRIQUI, ENSEIGNEMENT dans l'Ecole National Supérieure d'arts et métiers de Meknès qui nous a fait l'honneur de nous soutenir durant les années de formation au sein de l'Ecole.*

*Nous remercions aussi tous les professeurs de la filière Génie Electromécanique Option Energie et Maintenance, également notre encadreur pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils malgré ses énormes responsabilités.*

*Nous exprimons également nos sincères remerciements au Président du jury de notre soutenance, et tous les Enseignants à l'ENSA Meknès, qui nous a fait l'honneur de leur présence.*

*Nous remercions tout particulièrement nos parents qui ont toujours été là pour nous épauler, nos familles ainsi que tous nos amis pour leurs encouragements et leurs soutiens inconditionnels.*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce projet métier.*

**MERCI**

## **RESUME**

Avec les progrès technologiques récents, de nouveaux interrupteurs électroniques comme l'IGBT, le MOSFET et le GTO ont été développés. Ces interrupteurs offrent une plus grande rapidité, une plus grande puissance et moins de pertes. Ces améliorations ont contribué à l'essor de l'électronique de puissance, qui a donné naissance à de nombreux convertisseurs statiques qui exploitent les propriétés des commutateurs.

Ce projet porte principalement sur le gradateur monophasé. Il fait partie des convertisseurs statiques qui sont utilisés pour modifier la puissance dissipée dans un récepteur afin qu'il fonctionne dans les conditions souhaitées.

Le gradateur monophasé est un montage électronique qui permet de passer d'une tension alternative à une autre en changeant sa valeur efficace tout en gardant la fréquence initiale. Il a été utilisé pour contrôler la brillance d'une lampe à incandescence. Le circuit a à l'entrée la tension alternative sinusoïdale du secteur et la sortie peut recevoir un récepteur pouvant nécessiter un courant jusqu'à 25 A.

Ce convertisseur statique a été étudié et réalisé dans le cadre de notre projet métier, nous a permis d'élargir nos connaissances sur le sujet et de mettre en pratique les connaissances acquises lors des années d'étude antérieures.

# Table des matières

<i>Remerciements.....</i>	1
<i>RESUME .....</i>	2
<i>Table des matières.....</i>	3
<i>Liste des figures.....</i>	4
<i>Introduction générale.....</i>	5
<b>CHAPITRE I : GENERALITES .....</b>	<b>6</b>
I. Définition .....	6
II. Les types de montage des gradateurs .....	8
II-1. Les gradateurs monophasés .....	8
II-1-1. Si la charge est résistive .....	8
II-2. Les gradateurs triphasés .....	14
II-2-1. Si la charge est purement résistive .....	15
II-2-2. Si la charge est R-L .....	16
III. Conclusion .....	18
<b>CHAPITRE II : CONCEPTION D'UN GRADATEUR MONOPHASE .....</b>	<b>19</b>
I. Présentation du circuit gradateur monophasé .....	19
<b>CHAPITRE III : REALISATION DU MONTAGE.....</b>	<b>32</b>
I. SIMULATION SUR LOGICIEL PROTEUS ISIS .....	32
II. LISTE DES COMPOSANTS .....	33
III. CODE SOURCE .....	34
Résultats sur l'oscilloscope .....	35
IV. SIMULATION PSIM .....	36
V. Réalisation du gradateur monophasé au laboratoire .....	38
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>40</b>

Références .....	41
------------------	----

## Liste des figures

Figure I-1 : Schéma général d'un gradateur.....	2
Figure I-2 : Constitution schématique d'un Thyristor .....	3
Figure I-3 : Décomposition d'un Thyristor .....	3
Figure I-4 : Caractéristiques statiques d'un Thyristor .....	4
Figure I-5 : Schéma d'un gradateur monophasé à charge résistive .....	4
Figure I-6 : Allure du fonctionnement d'un gradateur monophasé de charge résistive .....	5
Figure I-7 : Schéma d'un gradateur monophasé à charge inductive .....	6
Figure I-8 : Allure du fonctionnement d'un gradateur monophasé de charge inductive .....	7
Figure I-9 : Montage d'un gradateur triphasé .....	10
Figure II-1 : Schéma du gradateur sur Proteus ISIS.....	32
Figure II-2 : Résultat sur oscilloscope .....	35
Figure II-3 : Montage sur PSIM.....	37
Figure II-4 : Allure sur PSIM.....	37
Figure II-5 : Montage sur maquette .....	38
Figure II-6 : GBF.....	38
Figure II-7 : Allure sur oscilloscope.....	39
Figure II-9 : signal commande gâchette .....	39

## Introduction générale

Le secteur de l'approvisionnement en énergie électrique est confronté au problème de divergence entre l'énergie que l'on souhaite obtenir et celle à notre disposition. Ainsi, on peut recenser une multitude d'appareils qui nécessitent une alimentation électrique pour fonctionner correctement. Cependant, chaque appareil a ses propres spécifications d'alimentation qui peuvent varier considérablement. Par conséquent, il n'est pas possible de satisfaire toutes ces exigences. Si les caractéristiques de l'alimentation ne correspondent pas à celles requises par l'appareil, un dispositif intermédiaire doit être conçu pour convertir ces caractéristiques afin qu'elles soient compatibles avec l'appareil.

C'est le rôle de l'électronique de puissance, qui se charge de ces convertisseurs de caractéristiques d'énergie électrique. Parmi ces convertisseurs, on a le GRADATEUR, un convertisseur Alternatif - Alternatif qui est l'objet de notre étude.

Ce travail consiste à la réalisation d'un Gradateur Monophasé pour des expérimentations en banc de TP et l'objectif est de comprendre le principe de fonctionnement des commutations.

Pour ce faire, nous avons organisé nos travaux en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous verrons les généralités sur les Gradateurs. Le second chapitre consistera à la simulation d'un gradateur monophasé et finalement dans le dernier chapitre nous réaliserons le montage.

# CHAPITRE I : GENERALITES

Dans ce chapitre, nous allons voir globalement ce qu'est un Gradateur en commençant par les définir et après expliquer leurs fonctionnements

## I. Définition

Les gradateurs sont les convertisseurs alternatif-alternatif servant à commander le débit d'une source alternative dans un récepteur alternatif sans changer de fréquence.

Le fonctionnement des gradateurs consiste à varier le débit du courant alternatif qui circule dans le récepteur, ce qui permet de régler l'intensité du courant que la source débite dans le récepteur. C'est pourquoi on les appelle aussi variateurs de courant alternatif, car il n'y a pas de conversion.

Comme l'illustre la figure I-1, les gradateurs se composent de deux parties :

- Partie commande : c'est un circuit électronique qui permettant d'élaborer les signaux de commande des thyristors.
- Partie puissance :
  - ❖ Constitué de deux thyristors montés en « tête-bêche » pour les fortes puissances supérieures à 10 kW.
  - ❖ Constitué d'un TRIAC ou d'un thyristor combiné avec une diode montées en parallèle inverse ou en tête-bêche pour les puissances inférieures à 10KW.

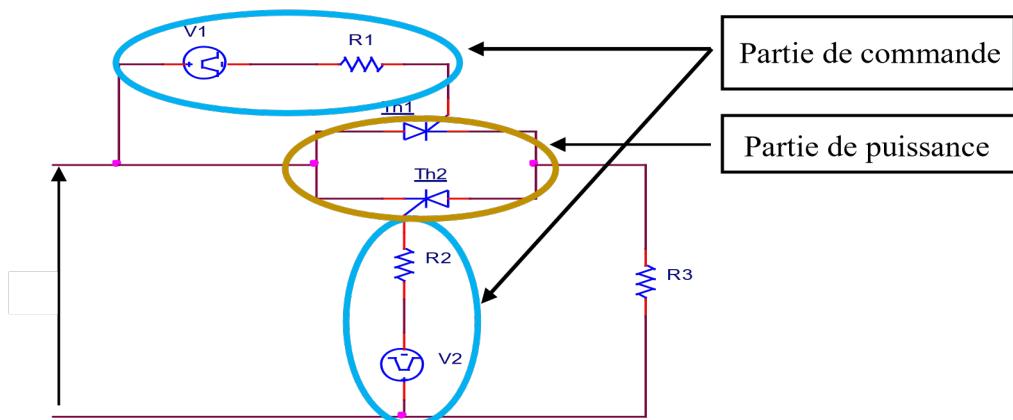
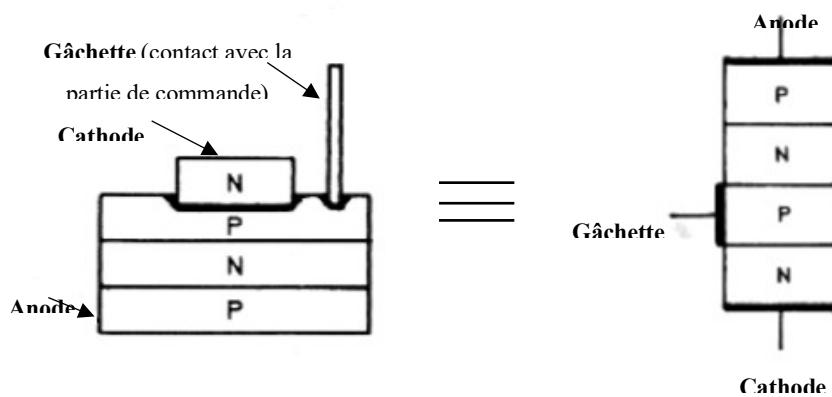


Figure I-1: Schéma général d'un gradateur

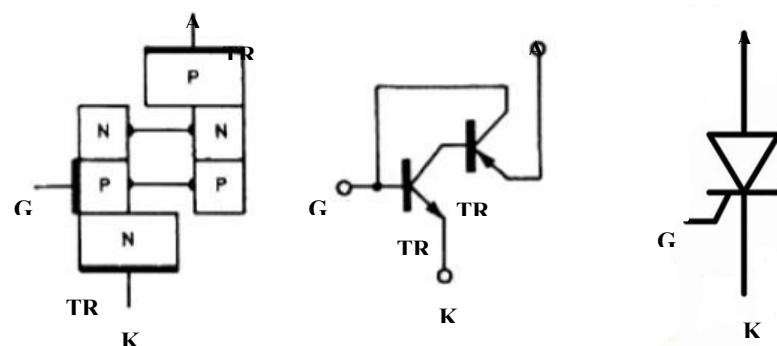
- **Le thyristor**

Le thyristor a un même comportement comme une diode au silicium. Selon la figure I-2, il comprend trois jonctions, constituées de deux zones N et deux zones P. La zone P la plus basse constitue l'Anode de la diode, alors que la Cathode est formée par la zone N la plus haute. La zone P se trouvant sous la cathode constitue la gâchette et comporte le contact pour la partie de commande.



*Fiaure I-2: Constitution schématiaue d'un Thvristor*

La figure I-3 montre qu'on peut assimiler le thyristor comme étant la combinaison de deux transistors bipolaires NPN et PNP connectés entre eux. Chaque transistor a sa base branchée directement au collecteur de l'autre comme on peut le voir sur fig. I-3.



*Figure I-3: Décomposition d'un Thyristor*

En inverse, ces caractéristiques sont identiques aux caractéristiques de la diode selon la fig. I-4 c'est-à-dire :

- Si le courant de la gâchette est  $I_g = 0$  et on applique certaine tension assez importante  $V_{ak0}$ , le thyristor s'amorce effectivement et on aura  $V_D = 0.8$  V en conduction.
- Pour  $I_g = I_{g1} > 0$ , le thyristor s'amorce pour une tension directe  $V_{ak1} < V_{ak0}$ .
- Pour  $I_g = I_{gn}$  suffisant,  $V_{akn}$  est très faible (conduction comme une diode) [3]

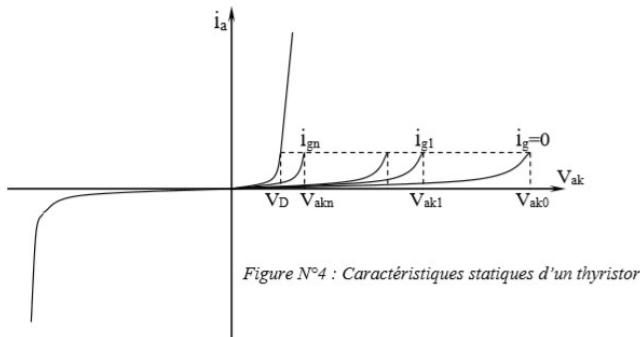


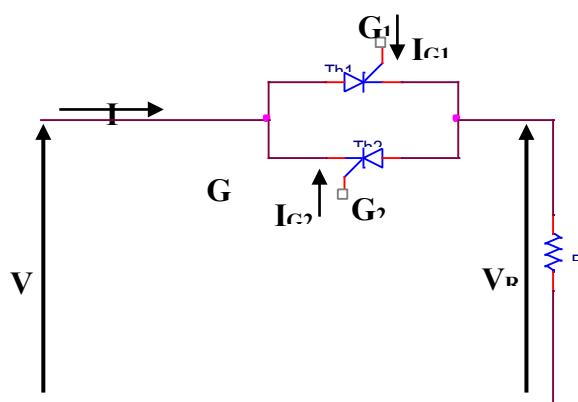
Figure I-4: Caractéristiques statiques d'un Thyristor

## II. Les types de montage des gradateurs

### H-1: Les gradateurs monophasés

Selon la façon dont on amorce les thyristors, on distingue deux types de gradateur : les gradateurs à train d'ondes et les gradateurs à commande par angle de phase. Mais ici on va se concentrer sur les gradateurs à commande par angle de phase

#### H-1-1: Si la charge est résistive



Fiaure I-5: Schéma d'un gradateur monophasé à charge résistive

D'après la figure I-5,  $V$  est une tension d'entrée généralement sinusoïdale et dont l'équation s'écrit :  $V = V_m \sin(\omega t)$ .

Les deux thyristors sont commandés par des signaux de commande  $I_{G2}$  et  $I_{G1}$  de la manière suivante :

- À l'instant  $t = 0$ , on a  $V = V_R = 0$ .
- En  $t_1$ ,  $I_{G1} > 0$  et  $I_{G2} = 0$  donc il y a passage de la tension en alternance positive dans la source et dans la charge ( $Th_1$  en conduction) d'après fig. I-5.
- En  $t_2$ ,  $I_{G1} = 0$  et  $I_{G2} > 0$  donc il y a passage de la tension en alternance négative dans la source et dans la charge ( $Th_2$  en conduction) toujours d'après fig. I-5.
- Or les gradateurs sont caractérisés par un fonctionnement sans commutation donc le courant dans le thyristor s'annule avant que la charge résistive soit en marche c'est pourquoi la courbe de la tension  $v_R$  n'est pas sinusoïdale mais plutôt composée de portions de sinusoïde selon la fig. I-6.
- Ceci correspond à une période mais le cycle recommence.

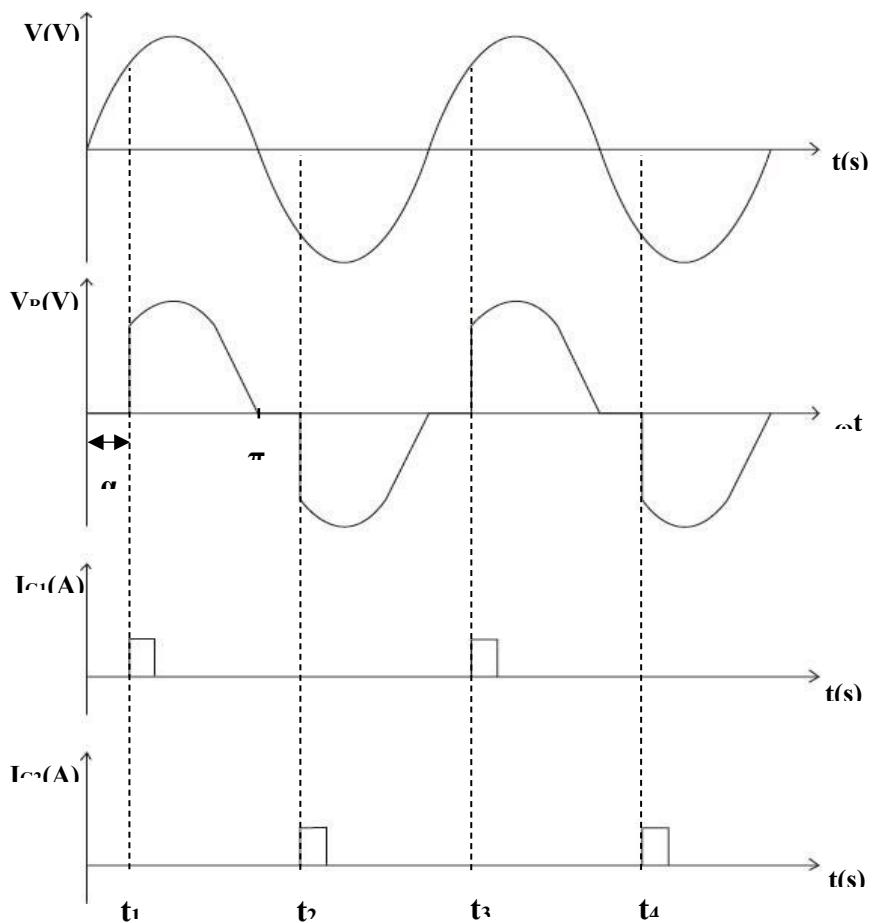


Figure I-6: Allure du fonctionnement d'un gradateur monophasé de charge résistive

Par action sur l'angle de retard d'allumage  $\alpha$ , on peut donc régler le temps de conduction des thyristors d'où la valeur efficace du courant alternatif qui circule dans la charge.

- Pour des intervalles :  $\alpha < \omega t < \pi$  et  $\pi + \alpha < \omega t < 2\pi$  on a :

$$I_R = \frac{V_m \cdot \sin(\omega t)}{R}$$

- Pour le reste de la période (en dehors de ces intervalles cités plus hauts), on a :  $I_R = 0$

## II-1-2. Si la charge est inductive

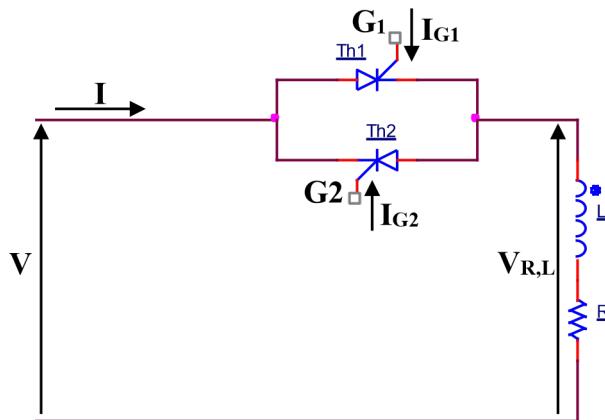


Figure I-7: Schéma d'un gradateur monophasé à charge inductive

D'après la figure I-7,  $V$  est une tension d'entrée généralement sinusoïdale et dont l'équation s'écrit :  $V = V_m \sin(\omega t)$ .

Les deux thyristors sont commandés par des signaux de commande  $I_{G2}$  et  $I_{G1}$  de la manière suivante :

- À l'instant  $t = 0$ ,  $V = V_{R,L} = 0$ .
- Supposons maintenant que  $t_0 \Rightarrow t=0$ .

À  $t \in [t_0 ; t_1]$ , vu que l'inductance  $L$  a emmagasinée de l'énergie, elle décharge cette énergie pendant un certain temps cela entraîne un angle de retard  $\psi$ . Ce qui explique l'allure de la courbe de la charge dans fig. I-8.

- En  $t_1$ ,  $I_{G1} > 0$  et  $I_{G2} = 0$  donc il y a passage de la tension en alternance positive dans la source et dans la charge ( $Th_1$  en conduction) d'après fig. I-8.
- En  $t_2$ ,  $I_{G1} = 0$  et  $I_{G2} > 0$  donc il y a passage de la tension en alternance négative dans la source et dans la charge ( $Th_2$  en conduction) toujours d'après fig. I-8.
- Or les gradateurs sont caractérisés par un fonctionnement sans commutation donc le courant dans le thyristor s'annule avant que la charge résistive et inductive soit en marche c'est pourquoi la courbe de la tension  $V_R$  n'est pas sinusoïdale mais plutôt composée de portions de sinusoïde selon la fig. I-8.
- Ceci correspond à une période mais le cycle recommence.

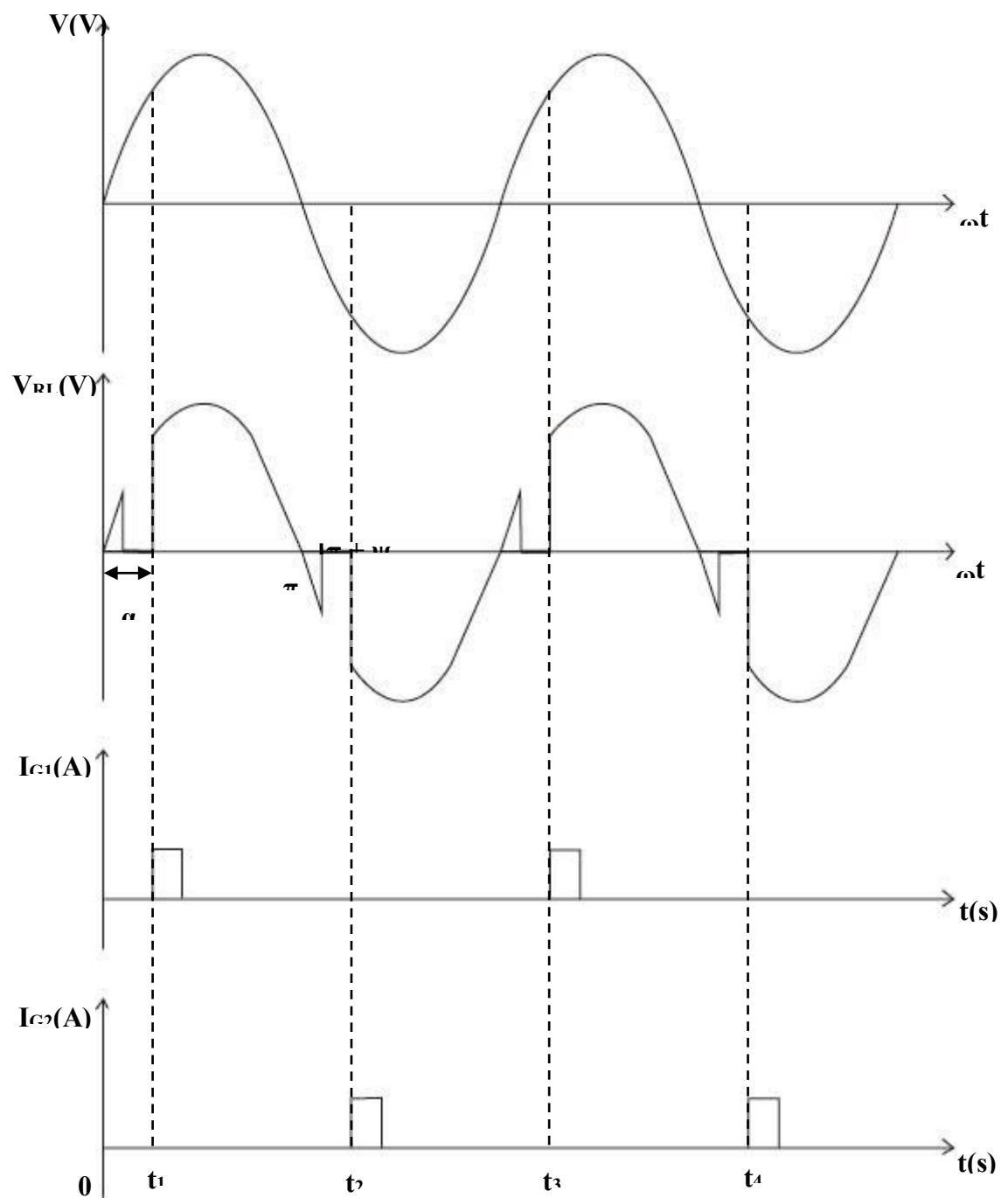


Figure I-8: Allure du fonctionnement d'un gradateur monophasé de charge inductive

- Fonctionnement pour  $\alpha < \psi$

Si le signal de commande est une impulsion de très courte durée, le thyristor Th<sub>1</sub> entre en conduction lorsqu'il reçoit une impulsion à l'angle  $\alpha$ . En revanche, lorsque l'impulsion est envoyée sur la gâchette du Th<sub>2</sub> à l'angle  $\alpha+\pi$ , celui-ci se trouve avec une tension aux bornes nulle, voire négative en raison de la chute de tension aux bornes de Th<sub>1</sub>. Par conséquent cette impulsion n'a aucun effet. Lorsque la tension aux bornes de Th<sub>2</sub> devient positive, le courant de sa gâchette cesse de circuler. Le montage se comporte alors comme un redresseur commandé en simple alternance.

En revanche si le signal de commande est une impulsion dont la durée dépasse le retard dû à la charge inductive, le gradateur fonctionne comme un interrupteur fermé en permanence.

- Fonctionnement pour  $\psi < \alpha < \pi$  :

C'est quand I<sub>G1</sub> ou I<sub>G2</sub> positive que l'équation différentielle suivante est valide :

$$L \frac{dI}{dt} + RI = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{I.2})$$

La solution de l'équation différentielle se compose : d'une composante permanente (terme de régime) et d'une composante transitoire (terme transitoire). Le courant I est donné par :

$$I = I_p + I_t \quad (\text{I.3})$$

- La composante permanente est déterminée par :

$$I_p = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 - (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \psi) \quad (\text{I.4})$$

Avec  $\psi = \arctg \frac{\omega L}{R}$

$\psi$ :est le déphasage provoqué par la charge R – L

- La composante transitoire est représentée par une fonction exponentielle décroissante de la forme :

$$I_t = I_0 \exp\left(\frac{-t}{T}\right) \quad (\text{I.5})$$

Avec la constante de temps :  $T = L/R \Rightarrow$

D'où la formule de l'équation (I.3) :

$$I_{R,L} = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 - (\omega L)^2}} [\sin(\omega t + \psi) - e^{-\frac{(\omega t - \alpha)R}{\omega L}} \sin(\alpha - \psi)] \quad (\text{I.6})$$

Pour le fonctionnement d'un gradateur monophasé,

- Avec une charge purement R, la valeur maximale du courant efficace est atteinte pour  $\alpha = 0^\circ$ .

D'où la formule suivante :

$$I_{eff\ max} = \frac{V_m}{\sqrt{2}R} \quad (\text{I.7})$$

- Avec une charge R-L, cette valeur maximale est atteinte pour  $\alpha = 90^\circ$ . [2]

$$I_{eff\ max} = \frac{V_m}{\sqrt{2} \omega L} \quad (\text{I.8})$$

## II-2. Les gradateurs triphasés

Le gradateur triphasé normal est formé de trois groupes de deux thyristors en antiparallèle (Tête-bêche), Th1 et Th1', Th2 et Th2', Th3 et Th3', montés entre les trois bornes de la source et celles du récepteur selon le fig. I-9. Les trois charges triphasées doivent être symétriques, elles sont reliées en un point neutre n, différent du point neutre N du réseau d'alimentation.

Le réseau d'alimentation alternatif est représenté par les trois phases R, S et T. On désigne par  $v_R$ ,  $v_S$ ,  $v_T$  les tensions simples d'alimentation sinusoïdales, de pulsation  $\omega$ , comptées par rapport au point neutre de la source :  $V_R = V_m \sin \theta$ ,  $V_S = V_m \sin (\theta - 2\pi/3)$ ,  $V_T = V_m \sin (\theta - 4\pi/3)$ . Après le Gradateur triphasé, nous obtenons un système triphasé formé par trois autres tensions et représentées par r, s et t.

L'angle de retard d'allumage  $\alpha$  des thyristors est mesuré à partir du passage par zéro de chaque tension simple ( $v_r$ ,  $v_s$ ,  $v_t$ ). La limite supérieure de  $\alpha$  est de  $150^\circ$ , sinon les thyristors ne s'allument pas ; pour des charges purement R, le courant est déjà nul, et pour des charges R-L la tension  $V_{AK}$  aux bornes du thyristor à allumer est négative.

Pour démarrer le Gradateur, il est nécessaire d'appliquer au même instant une impulsion au thyristor de la phase R (sens de conduction du courant positif) et à celui de la phase S (sens de conduction du courant négatif) pour que le circuit soit fermé ; à défaut de cette impulsion supplémentaire, le courant ne peut pas circuler

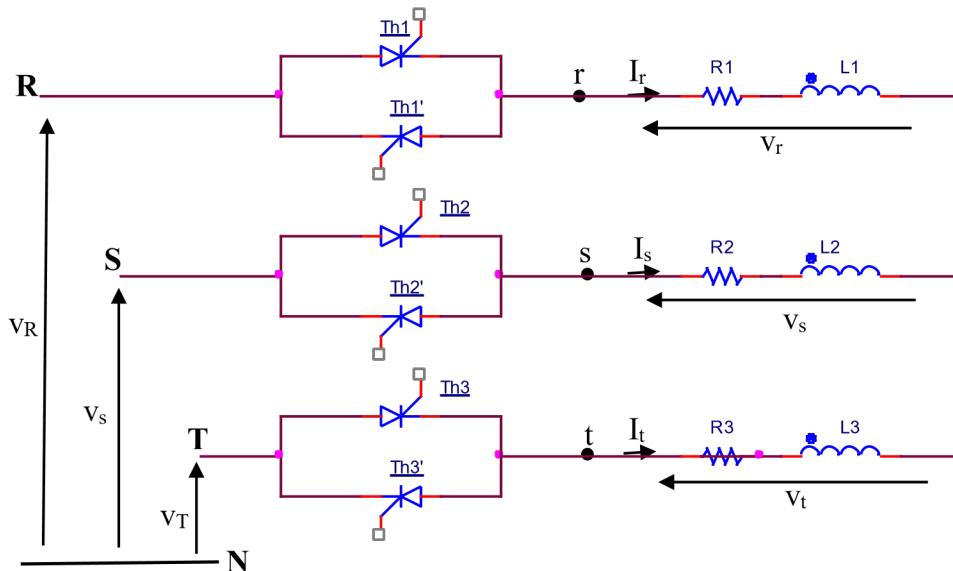


Figure I-9: Montage d'un gradateur triphasé

## II-2-1. Si la charge est purement résistive

Le récepteur est formé de trois résistances R égales qui forment un système triphasé symétrique. L'angle de retard d'allumage  $\alpha$  varie de  $0$  à  $5\pi/6$ . On a 3 modes de fonctionnement :

- 1er mode :  $0 < \alpha < \pi/3$ , conduction de trois ou deux thyristors : lorsque  $\alpha$  est inférieur à  $\pi/3$ , l'angle de fin de conduction de Th3 est supérieur à  $\alpha$ . Il y a tantôt trois thyristors conducteurs, tantôt deux.
- 2ème mode :  $\pi/3 < \alpha < \pi/2$ , toujours deux thyristors passants : quand  $\alpha$  varie de  $\pi/3$  à  $\pi/2$ , l'intervalle de débit des thyristors reste constant et égal à un tiers de période mais il se décale progressivement.
- 3ème mode :  $\pi/2 < \alpha < 5\pi/6$ , conduction de deux thyristors ou aucun : l'existence d'intervalles de conduction après des intervalles où tous les courants sont nuls nécessite le déblocage de deux thyristors à la fois. [2] [1] [5]

## II-2-2. Si la charge est R-L

Le récepteur triphasé formé par R-L symétriques est caractérisé par le module Z et l'argument  $\varphi$  de l'impédance de chaque phase à la pulsation  $\omega$  des tensions d'alimentation.

$$Z = \sqrt{R^2 - (\omega L)^2} \quad \text{Et} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L}{R}$$

A cause des inductances L, les courants dans les branches ne peuvent plus présenter de discontinuité (il y a des instants où ils diminuent progressivement et passent par zéro, mais ils ne peuvent plus s'annuler brusquement)

Dès que le récepteur est inductif, le 2ème mode de fonctionnement disparaît. On passe directement du 1er au 3ème mode pour une valeur limite  $\alpha_1$  de l'angle de retard d'allumage  $\alpha$  qui est fonction de l'angle  $\varphi$ .

- 1er mode de fonctionnement :  $\varphi < \alpha < \alpha_1$

Il y a conduction de 3 ou 2 thyristors : lorsqu'on allume Th1, les deux thyristors Th2' et Th3, conduisent déjà.

- 3ème mode de fonctionnement :  $\alpha_1 < \alpha < 5\pi/6$

Il y a conduction de 2 thyristors ou aucun : quand  $\alpha$  devient supérieur à  $\alpha_1$ , il faut allumer simultanément deux thyristors à la fin de chaque intervalle où les trois courants sont nuls. [2] [1] [5]

### Caractéristiques de commande :

Des calculs laborieux ont été effectués à l'aide d'un ordinateur par simulation. La valeur efficace du courant  $I_{eff}$  rapporté à sa valeur maximale  $I_{eff\ max}$  est fonction de l'angle de retard d'allumage  $\alpha$ . Le paramètre est :  $\psi = \arctg(\omega L/R)$ . La valeur maximale du courant efficace est donnée par la relation de l'équation (I.11)

$$I_{eff\ max} = \frac{V_{ph}}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 - (\omega L)^2}} \quad (I.11)$$

$V_{ph}$  : valeur de la tension simple (tension de phase) du réseau d'alimentation.

### Valeurs efficaces des tensions de sortie :

- Pour le 1er mode de fonctionnement (Charges R pures et R-L) :

$$V_{sortie\ eff} = V_{entrée\ eff} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3}{2\pi}(\theta_1 - \alpha) + \frac{3}{4\pi} [\sin 2\alpha + \sin(2\theta_1 + \frac{\pi}{3})]} \quad (I.12)$$

- Pour le 2ème mode de fonctionnement (cas des charges purement R) :

$$V_{sortie\ eff} = V_{entrée\ eff} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \sin(2\alpha + \frac{\pi}{6})} \quad (I.13)$$

- Pour le 3ème mode de fonctionnement (Charges R pures et R-L) :

$$V_{sortie\ eff} = V_{entrée\ eff} \sqrt{\frac{3}{2\pi}(\theta_2 - \alpha) + \frac{3}{4\pi} [\sin(2\alpha + \frac{\pi}{3}) - \sin(2\theta_2 + \frac{\pi}{3})]} \quad (I.14)$$

Avec  $\theta_1$  : fin de conduction du dernier thyristor Th3 (alternance positive de la 3<sup>ème</sup> phase)

$\theta_2$  : fin de conduction du 2ème intervalle de conduction Th'2 (alternance négative de la 2<sup>ème</sup> phase) [2] [1]

### **III. Conclusion**

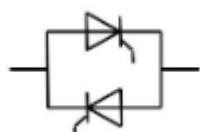
Ce chapitre nous a permis de comprendre théoriquement les gradateurs. Nous avons vu les gradateurs monophasés, les gradateurs triphasés et les différences entre une charge purement résistive et une charge R-L. Voyons maintenant dans le prochain chapitre la conception d'un gradateur monophasé.

# CHAPITRE II : CONCEPTION D'UN GRADATEUR MONOPHASÉ

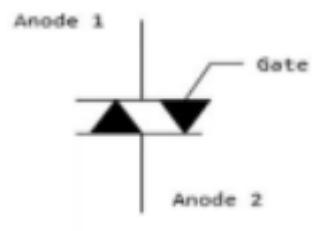
Voyons dans ce chapitre comment concevoir un gradateur monophasé. Nous allons commencer par présenter notre circuit gradateur monophasé puis nous allons enchaîner sur des analyses temporelles du circuit et nous terminerons par l'interprétation des résultats obtenus.

## I. Présentation du circuit gradateur monophasé

On désigne sous le nom de gradateurs tous les convertisseurs statiques qui, alimentés par un réseau alternatif, fournissent une ou plusieurs tensions à valeur moyenne nulle, de même fréquence que celle du réseau d'alimentation, mais de valeur efficace différente, celle-ci étant habituellement réglable. Bien que cela ne soit pas la seule technique possible, tous les gradateurs fonctionnent actuellement sur le principe de la commande de phase, déjà vu en redressement commandé, et qui rappelons le consiste à amorcer les thyristors avec un retard réglable, par exemple par rapport au passage par zéro d'une tension d'alimentation , et à laisser le blocage s'effectuer en commutation naturelle , Ceci permet l'emploi de composants de type thyristors, le fonctionnement bidirectionnel étant obtenu grâce à l'association tête-bêche de deux éléments comme indiqué sur la figure 1.



Tant que les puissances mises en jeu le permettent, on peut évidemment remplacer cette structure par un triac, ce qui simplifie en particulier la conception des circuits de commande.



Le principe employé dans les réalisations des gradateurs ne permettant pas une grande diversité de montages, il est inutile d'envisager une quelconque classification. On distinguera donc simplement les cas du monophasé.

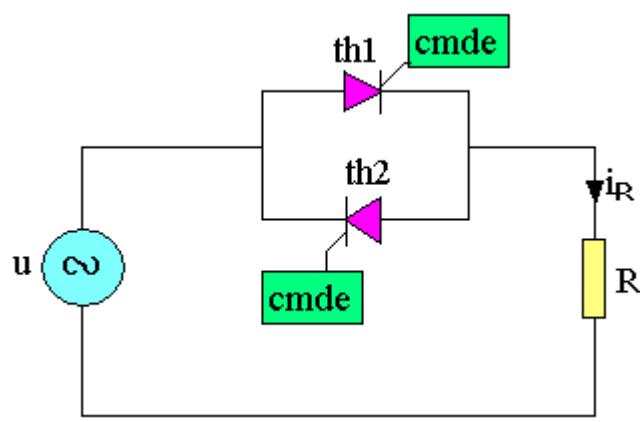
A propos de celle-ci, signalons d'entrée que, contrairement aux autres cas d'étude de convertisseurs, on ne pourra pas supposer que le courant débité est interrompu. En effet, comme on le verra plus loin, un gradateur comporte simplement, par phase, un interrupteur placé en série avec la charge. L'hypothèse du courant ininterrompu entraînerait donc une conduction en permanence de l'ensemble [T;T'], d'où une disparition totale du fonctionnement recherché.

Il s'ensuit que l'on ne pourra pas faire abstraction de la nature de la charge et que, comme pour toute étude en courant discontinu, il faudra raisonner sur une succession de cas particuliers.

Pour ne pas alourdir la description, nous nous limiterons cependant aux cas les plus usuels de débit sur circuit résistif et sur circuit inductif.

## **Gradateur monophasé sur charge R**

Schéma de principe :



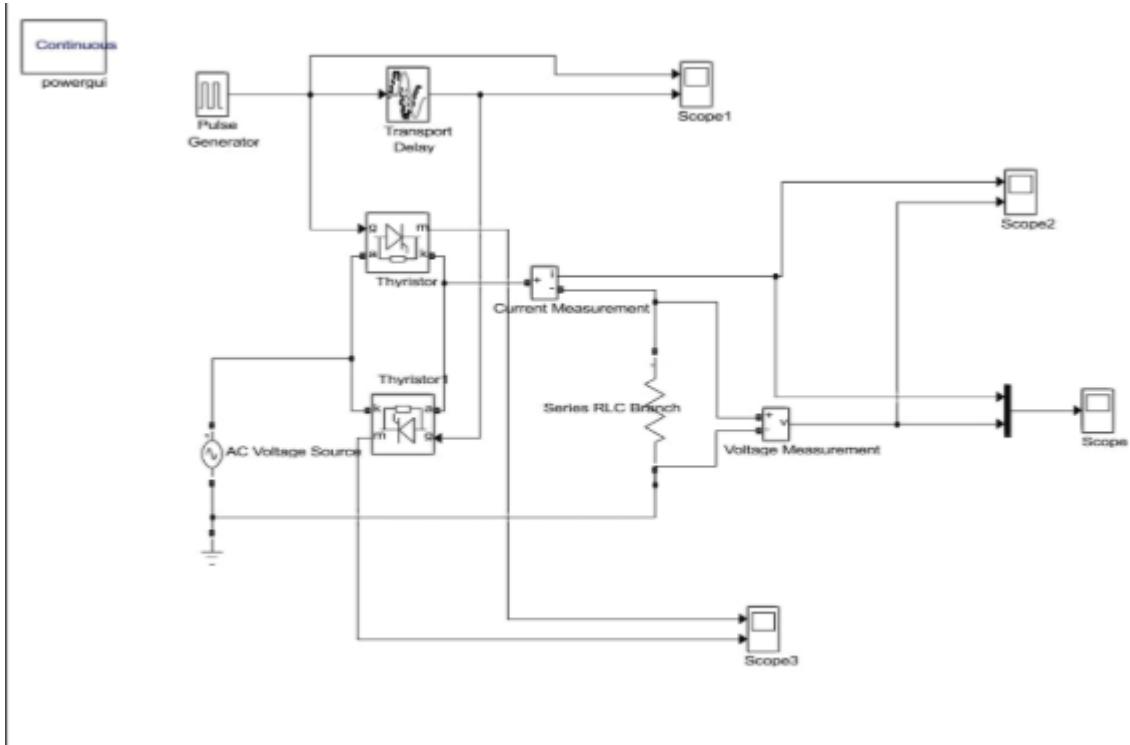
$$U(t) = V_{max} \sqrt{2} \times \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi \times f$$

Exemples de réalisations de gradateur :

## Exemples de simulation de gradateur :

### 1- Sur charge résistive :



### Description :

\*Pour paramètre de Puls generator :

L'amplitude de pulsation c'est (10)

La période de pulsation c'est (0.02sec)

La largeur de la pulsation est (50%) du temp du période

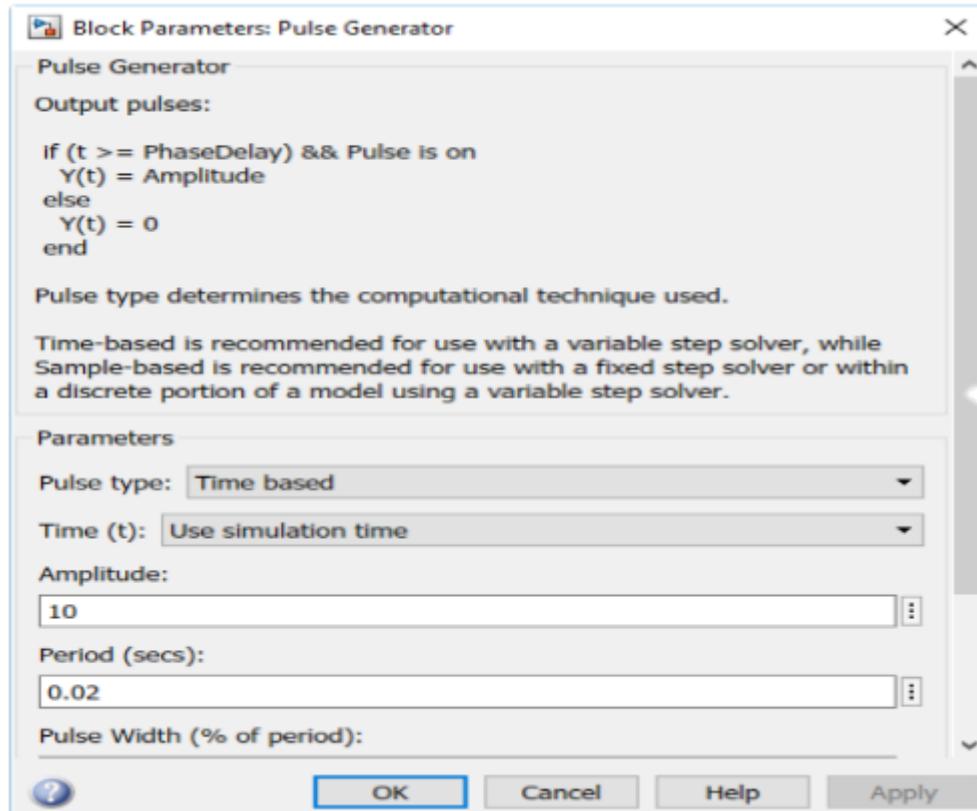
Pour l'angle on a choisi (0.004sec) comme phase Delay.

### Remarque

L'angle : doit être entre  $0 < \alpha < \pi$

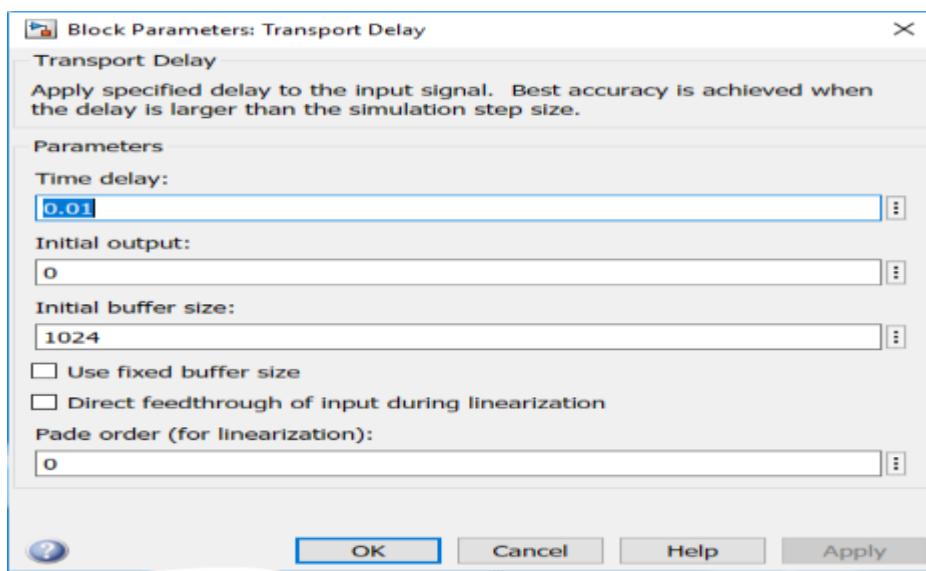
On a  $2\pi = 0.02\text{sec} \Rightarrow \pi = 0.01\text{sec}$

Alors  $0 < \alpha < 0.01$

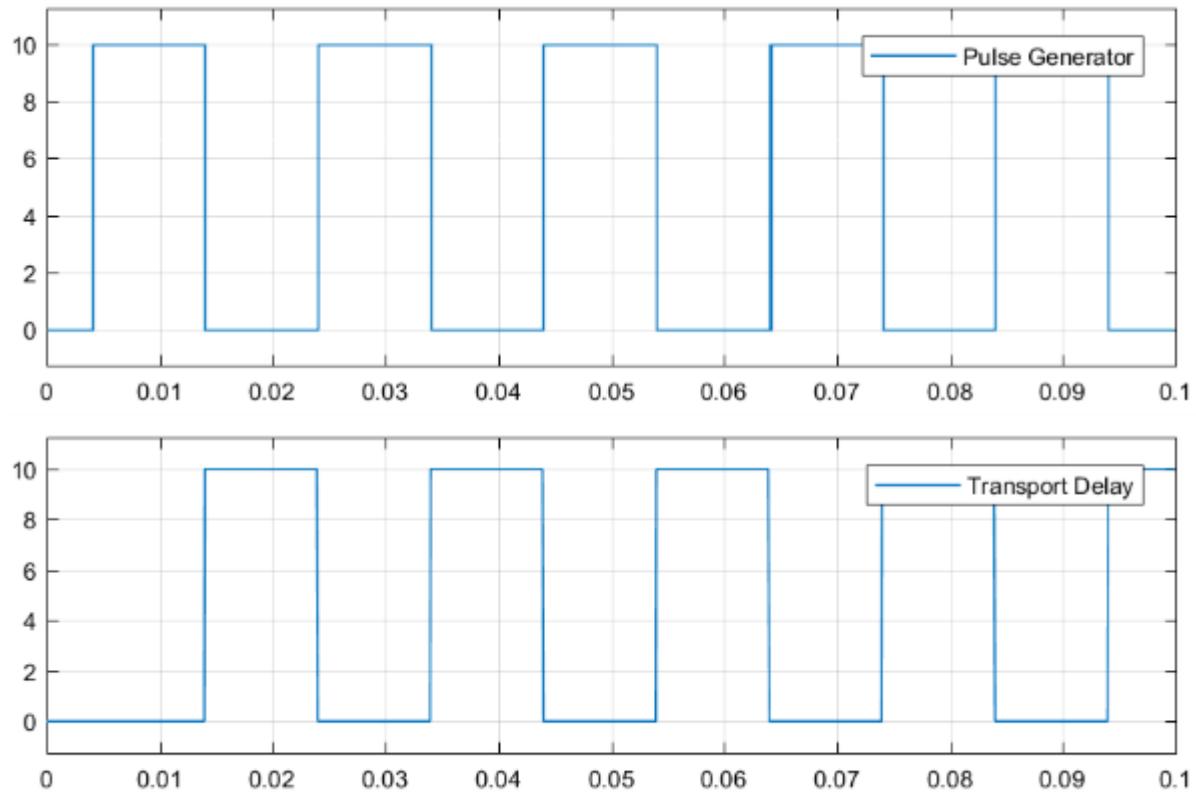


\*pour parameter de transport delay :

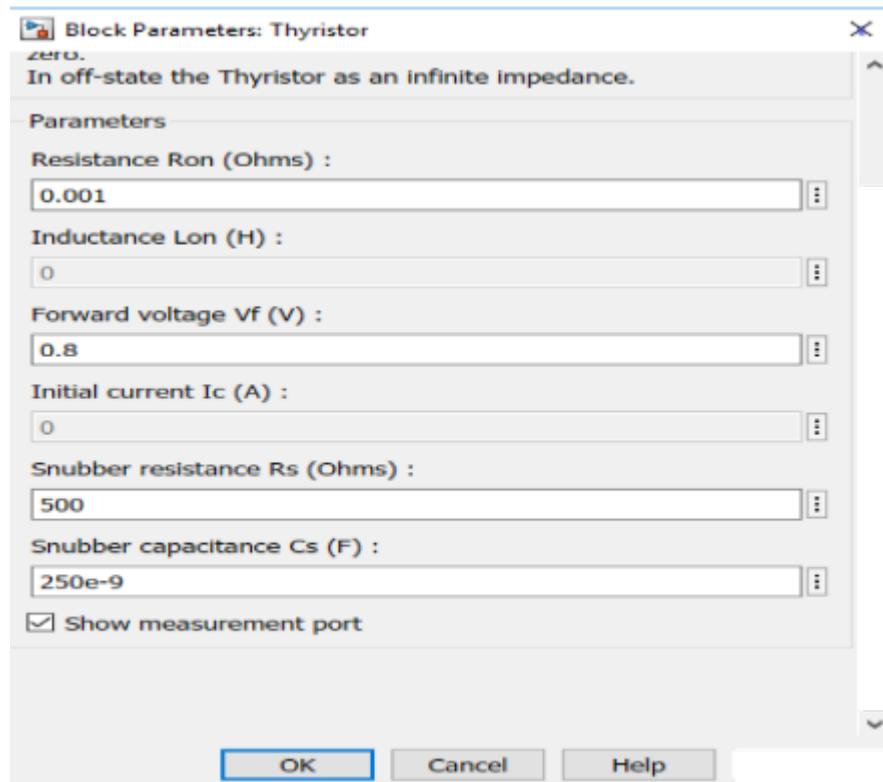
On choisit (0.01) comme time Delay



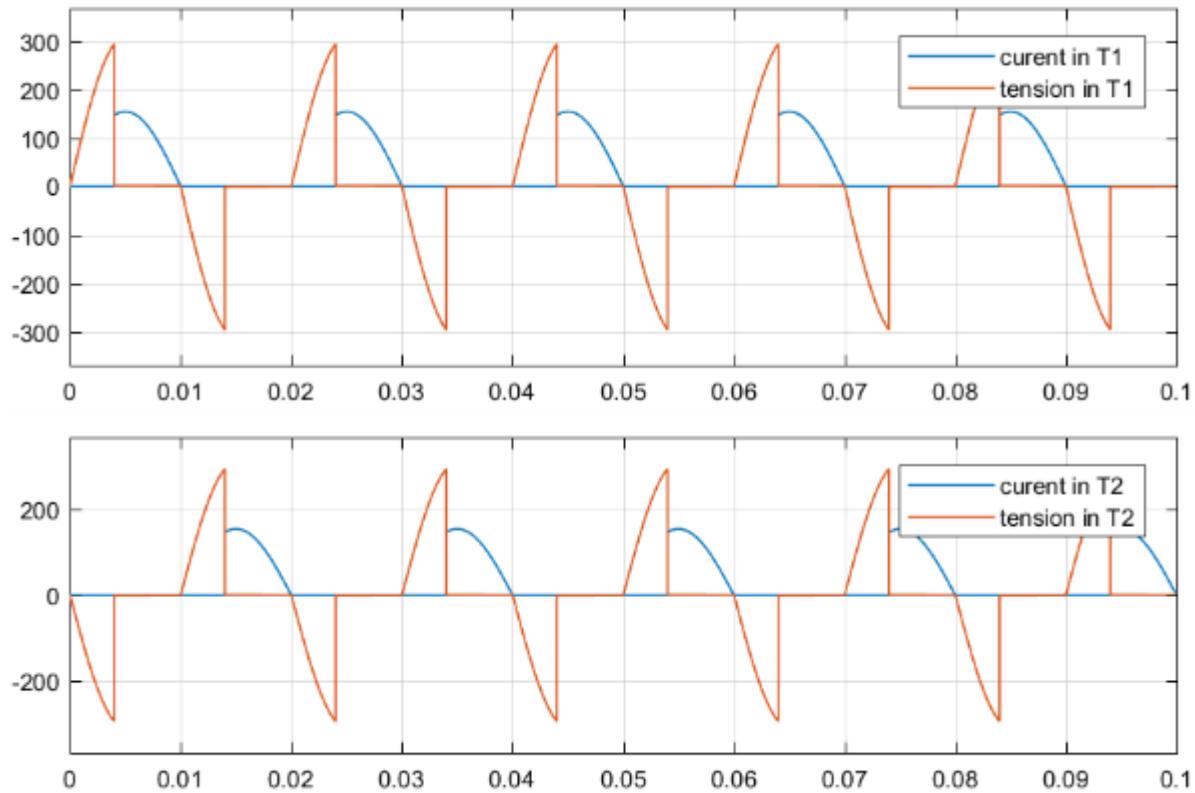
Les graphes de Puls generator et transport delay :



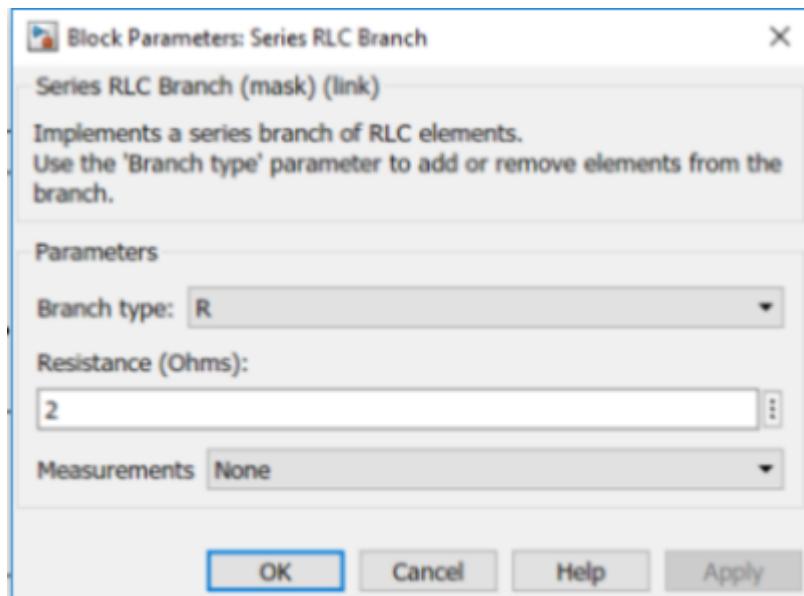
\*pour paramètre de thyristor :



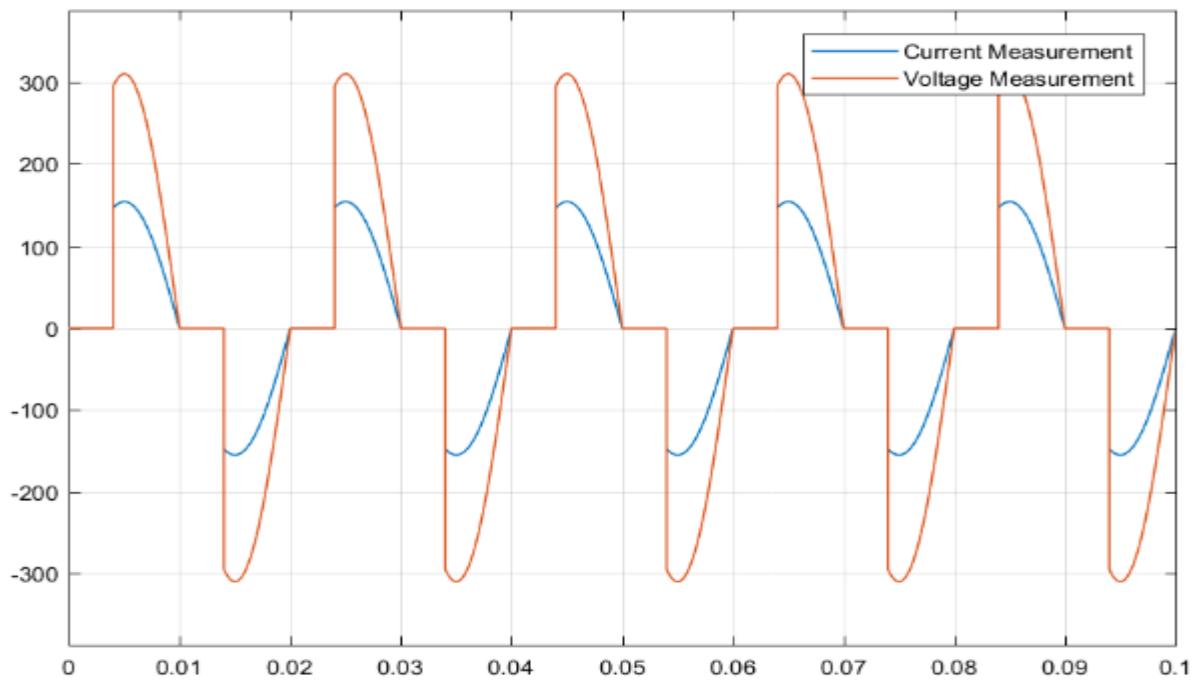
## Les graphes des thyristor :



## \*pour paramètre de charge (resistor) :

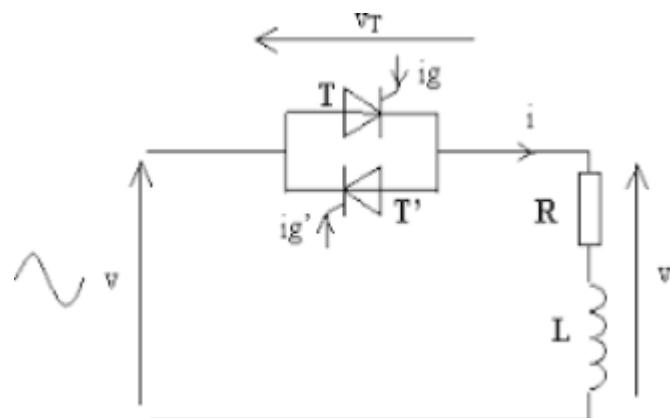


## Les graphes de charge (resistor) :



### Gradateur monophasé sur charge RL :

Schéma de principe :



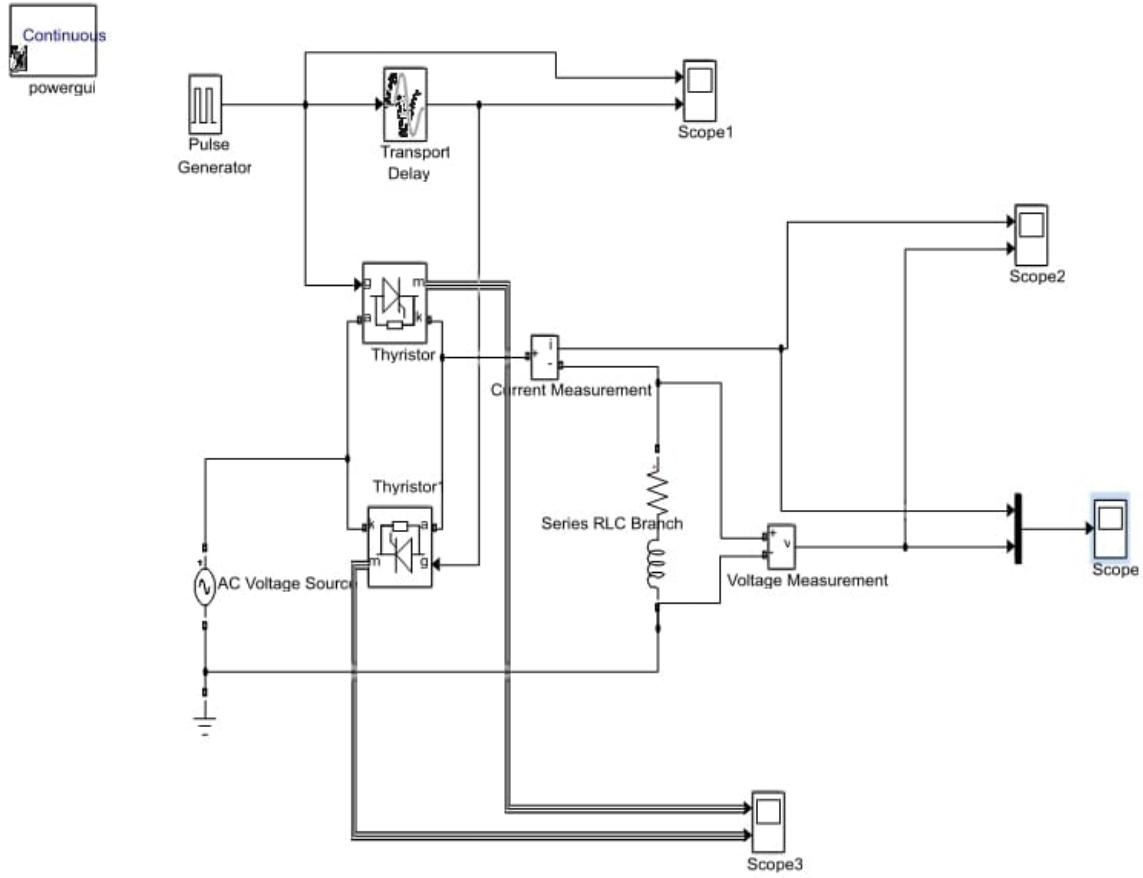
$$V(t) = V_{\max} \sqrt{2} \times \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi \times f$$

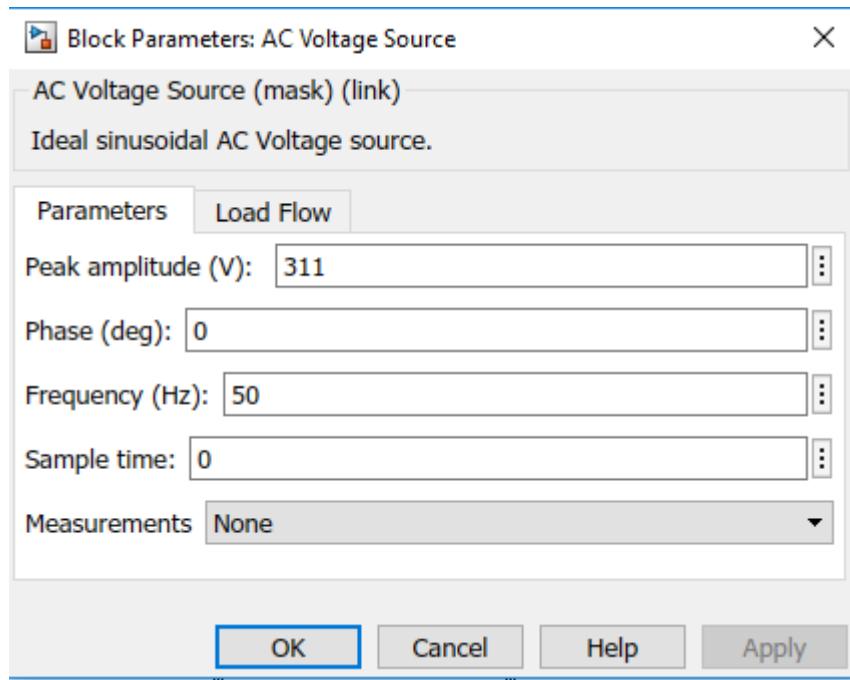
### Gradateur monophasé sur charge RL :

## Exemples de simulation de gradateur :

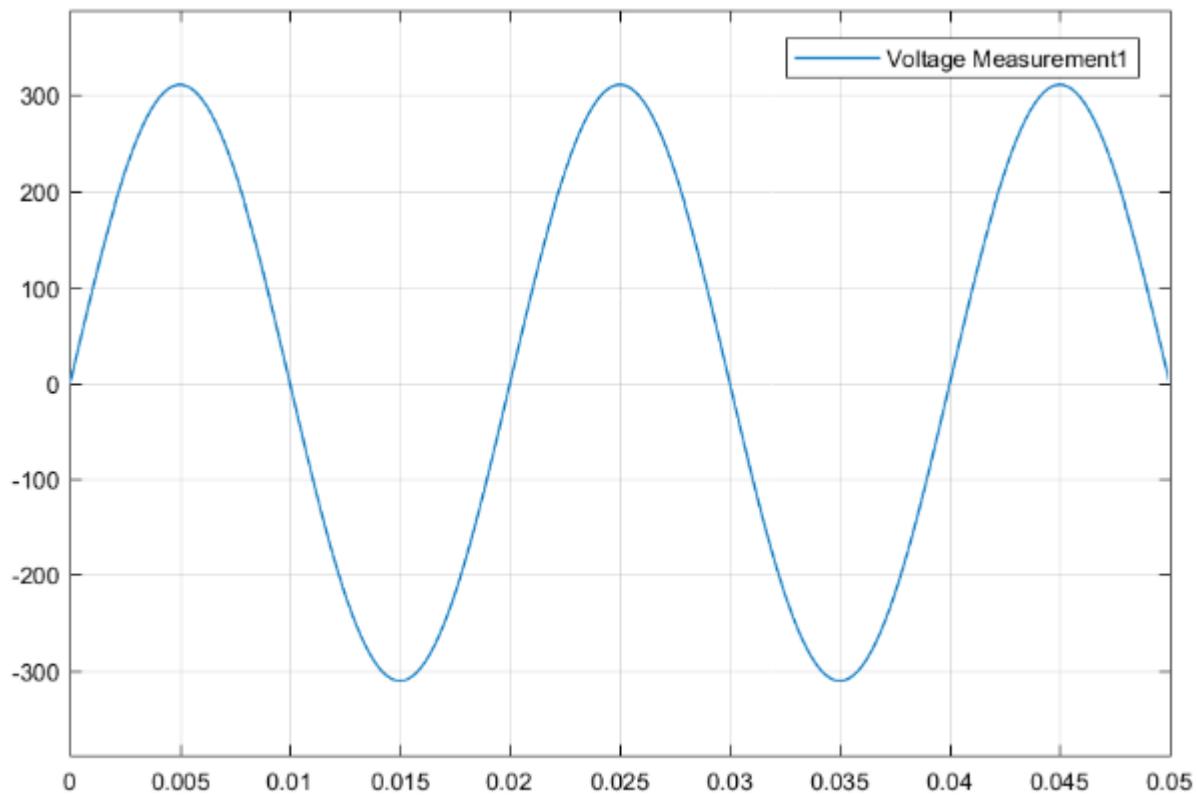
### 1- Sur charge résistive et inductive :



**\*Pour paramètre de source de tension :**



### Le graphe de source :



## \*Pour parametre de Puls generator :

L'amplitude de pulsation c'est (10)

La période de pulsation c'est (0.02sec)

La largeur de la pulsation est (50%) du temp du période

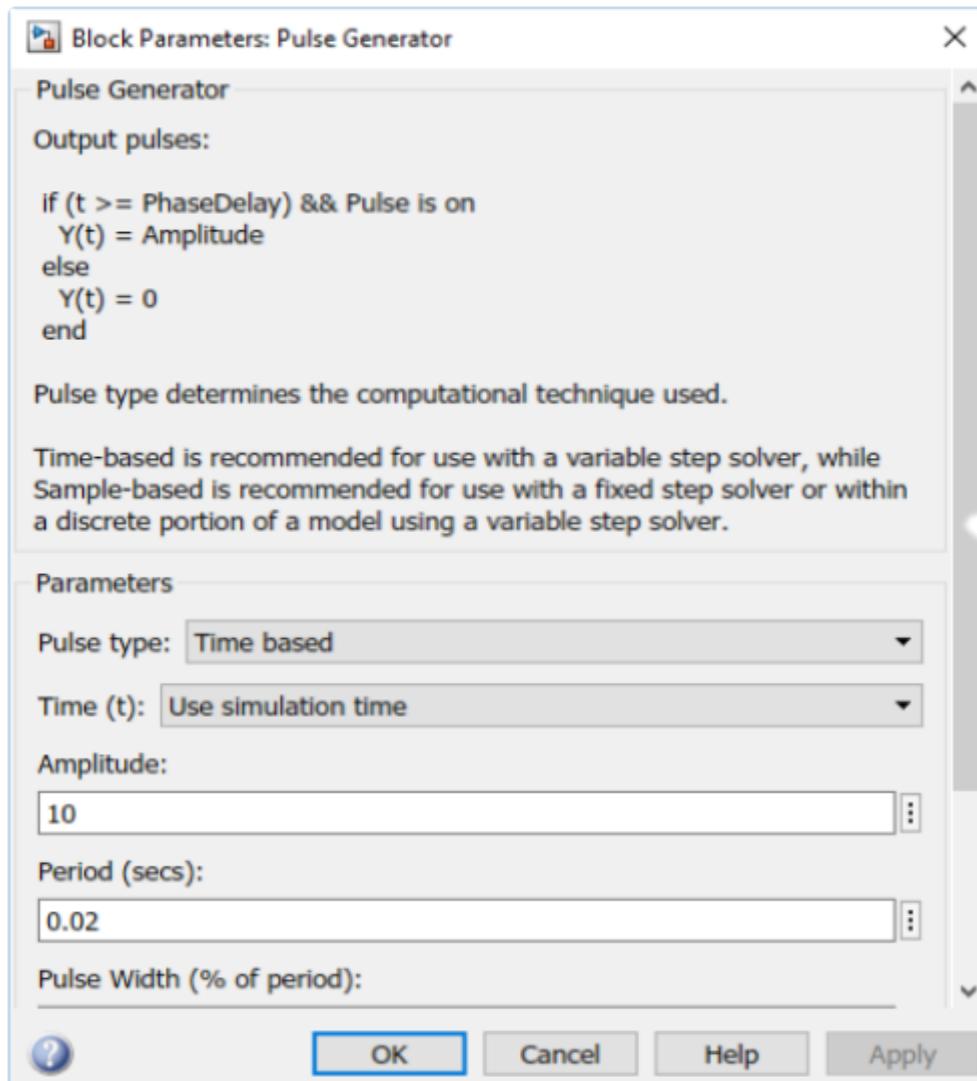
Pour l'angle on a choisi (0.004sec) comme phase Delay

### Remarque

L'angle : doit être entre  $0 < \alpha < \pi$

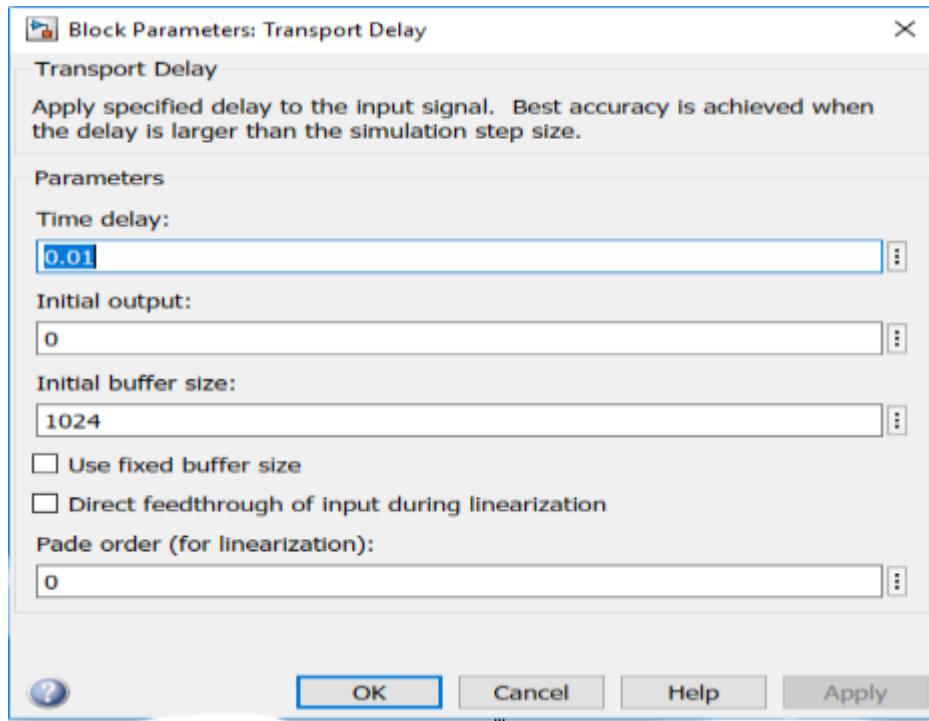
On a  $2\pi = 0.02\text{sec} \Rightarrow \pi = 0.01\text{sec}$

Alors  $0 < \alpha < 0.01$

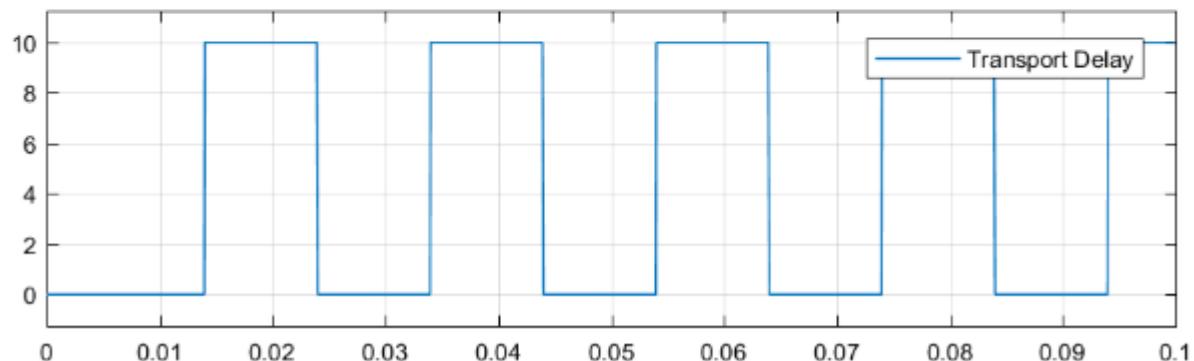
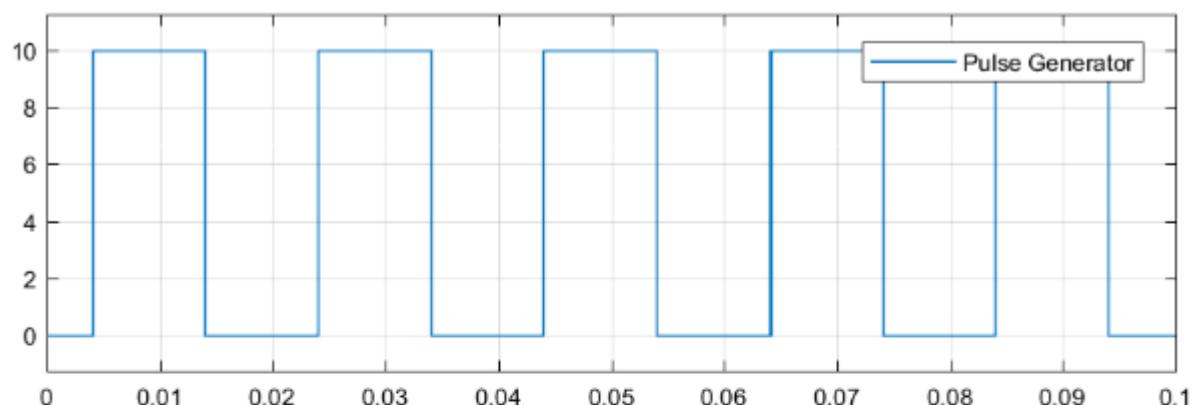


## \*pour parameter de transport delay :

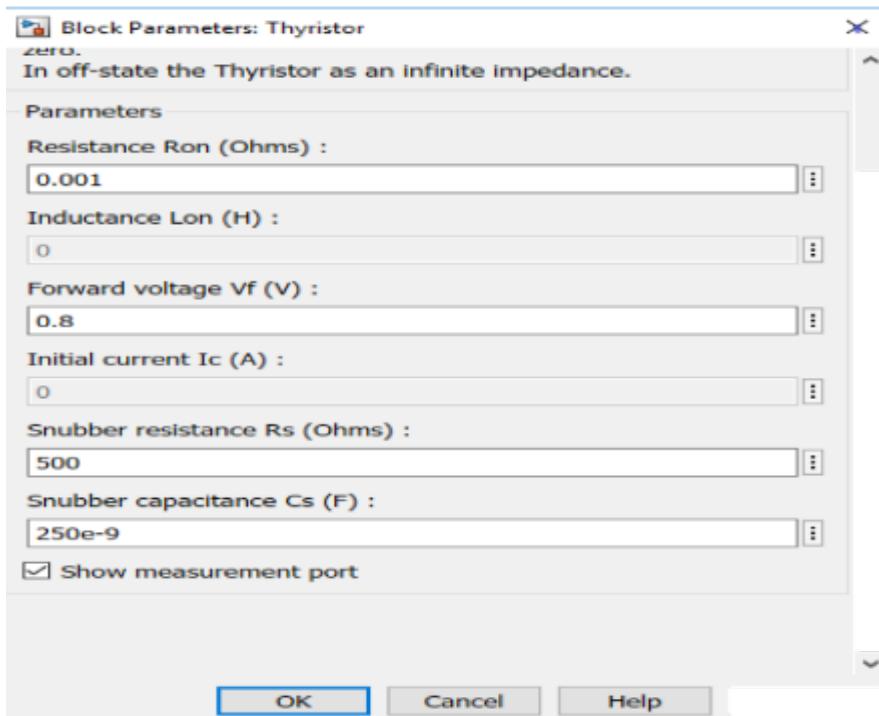
On choisit (0.01) comme time Delay



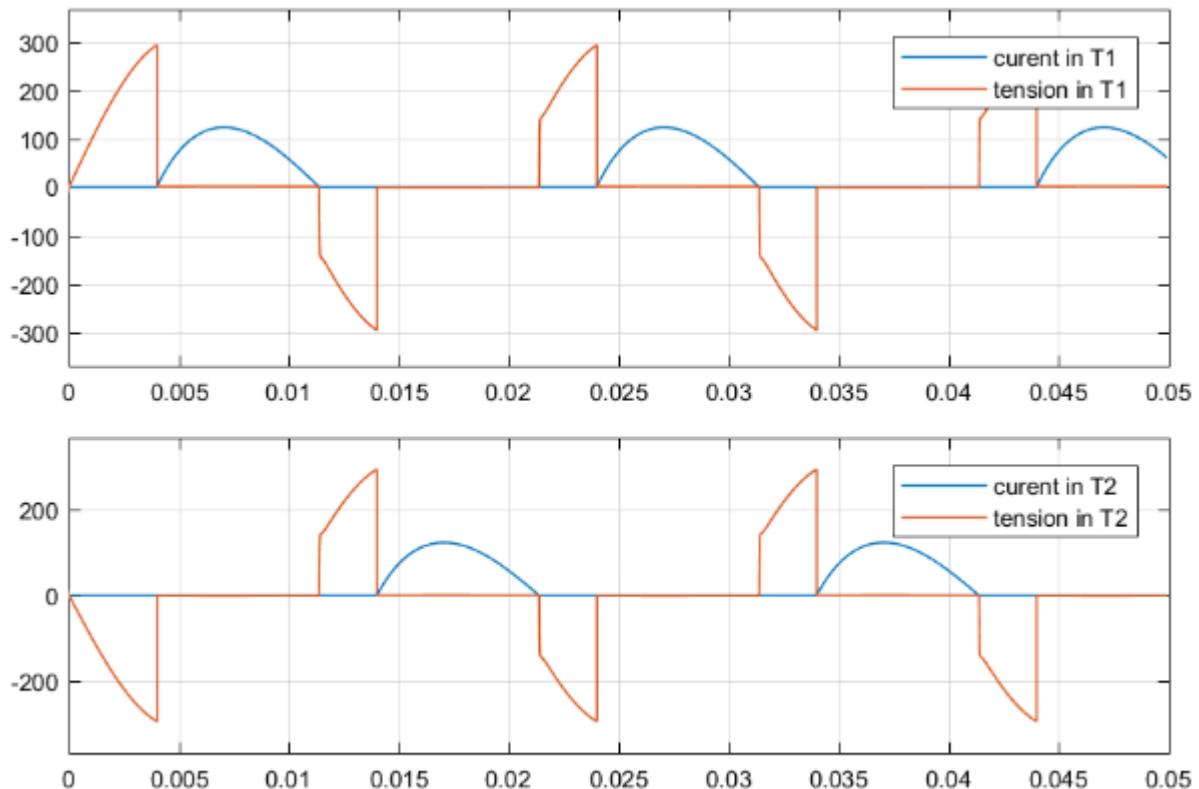
### Les graphes de Pulse generator et transport delay :



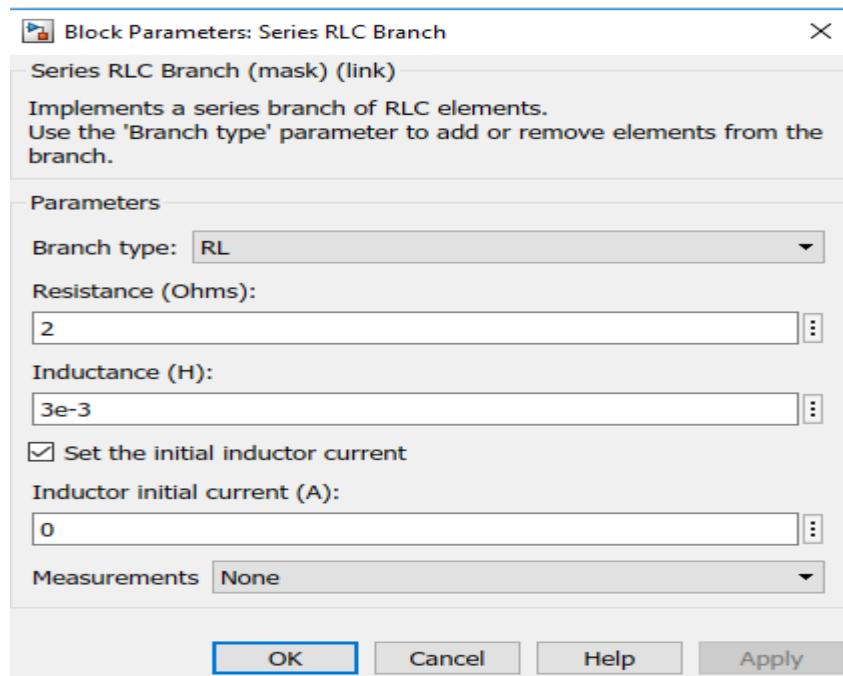
\*pour paramètre de thyristor :



### Les graphes des thyristors :



## \*pour paramètre de charge (RL) :



Remarque :

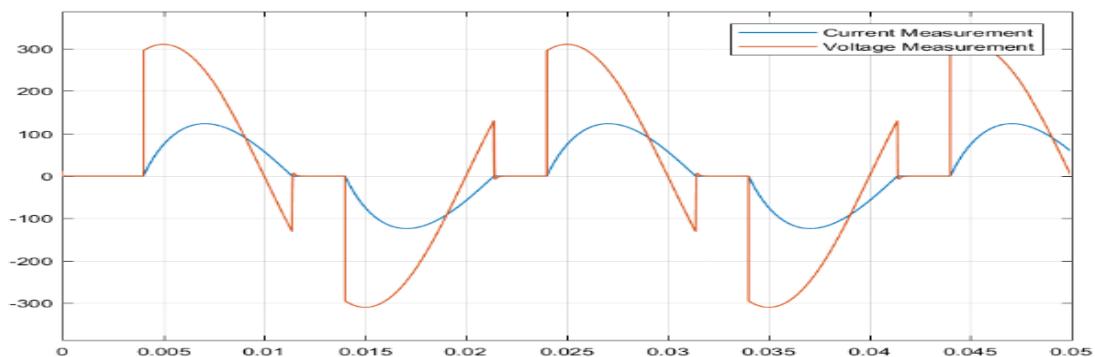
Il faut bien calculer la valeur de l'inductance pour que le Gradateur soit resté fonctionnelle

On applique la formule

$$\text{Arctg}\left(\frac{\omega L}{R}\right) = \text{arctg}(180^\circ) \text{ pour trouver la valeur de } L.$$

Dans notre cas la valeur de L ne déplace pas 0.571 H.

## Les graphes de charge (RL) :



# CHAPITRE III : REALISATION DU MONTAGE

Voyons dans ce chapitre la Simulation du circuit Gradateur monophasé. Pour ce faire, nous commencerons par créer le montage sous le logiciel ISIS PROTEUS puis nous observons les courbes sur l'oscilloscope ensuite faire varier l'angle d'amorçage des gâchettes à l'aide d'une résistance variable afin d'avoir l'effet de variation de cet angle sur la tension de sortie du montage.

## I. SIMULATION SUR LOGICIEL PROTEUS ISIS

### 1-SCHEMA DU MONTAGE

Comme nous l'avons déjà expliqué dans les chapitres précédents, ISIS PROTEUS est un logiciel conçu pour la conception électronique. Sa fonction principale est de simuler le fonctionnement des circuits et d'effectuer diverses analyses, notamment temporelles, fréquentielles ou paramétriques. Il est composé de trois modules logiciels qui sont le Capture pour la conception des schémas, Simulation des différents montages Création des Projets basé sur des Microprocesseur ou microcontrôleur Codage des Circuits intégré etc. ...

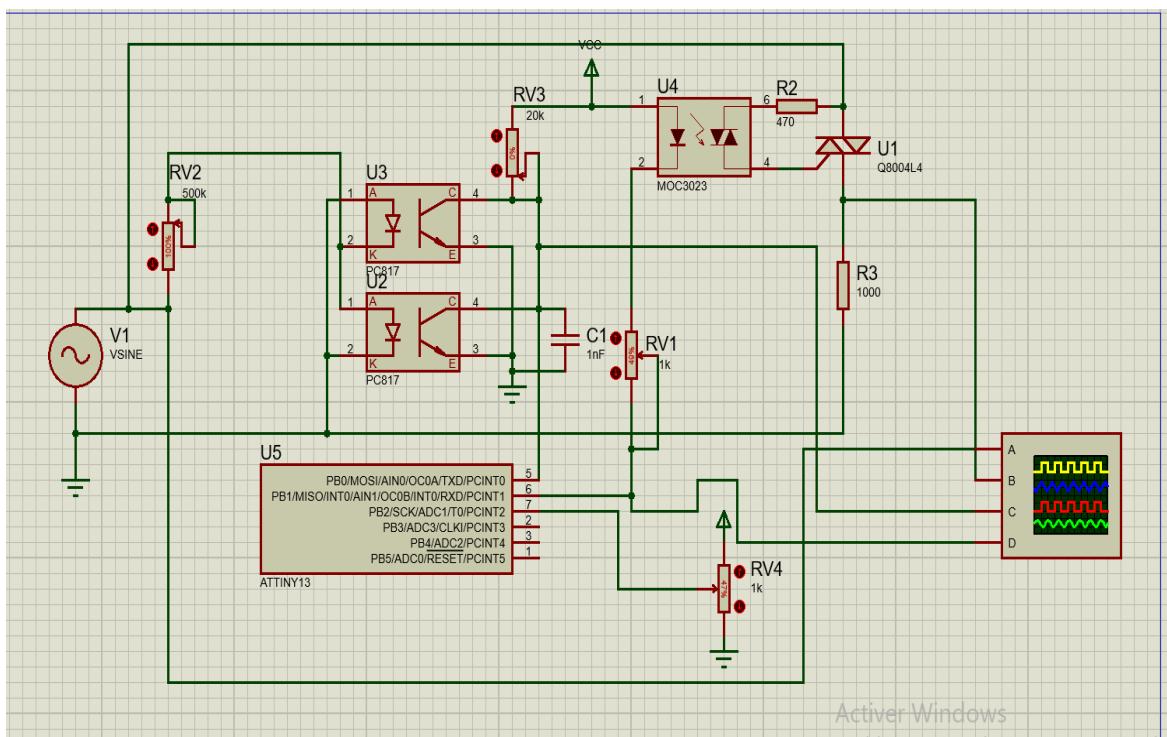


Figure II -1: Schéma du Montage "ISIS PROTEUS"

## II. LISTE DES COMPOSANTS

1: Analog comparator

2: capacité

3: DF10M: Signale-phase DIP Bridge Rectifier

4 : MOC3021 : Non-zero Optocoupler Triac Predriver

5: MOC3023: Non-zero Crossing Optocoupler Triac Predriver

6: PC817: High Density Mounting Type Photocoupler

7 :POT-HG : pont de diode

8: Q8004L4: TRIAC

9: Resistance

10: Source de tension alternative

Ce montage est un gradateur de lumière à base du microcontrôleur ATTINY13 qui permet de contrôler la puissance fournie à une charge en courant alternatif (comme une lampe) en agissant sur l'angle de déclenchement d'un triac. La source AC (V1) est atténuée via un diviseur de tension et transmise à deux optocoupleurs (U2 et U3 - PC817) qui détectent le passage à zéro de l'onde sinusoïdale. Cette détection est envoyée au microcontrôleur (U5), qui utilise ce signal pour synchroniser le déclenchement d'un optotriac (U4 - MOC3023) après un délai défini, réglable via un potentiomètre (RV4). Le MOC3023 pilote ensuite un triac (U1 - Q6004L4) qui alimente la charge. Ce système permet de faire varier la puissance moyenne délivrée à la charge en fonction du moment d'amorçage du triac dans chaque demi-onde. Des résistances (R2, R3), condensateurs (C1) et potentiomètres (RV1, RV2, RV3) assurent le conditionnement du signal et la protection du circuit. Un oscilloscope placé à droite du schéma permet de visualiser les différents signaux pour mieux comprendre le fonctionnement en temps réel.

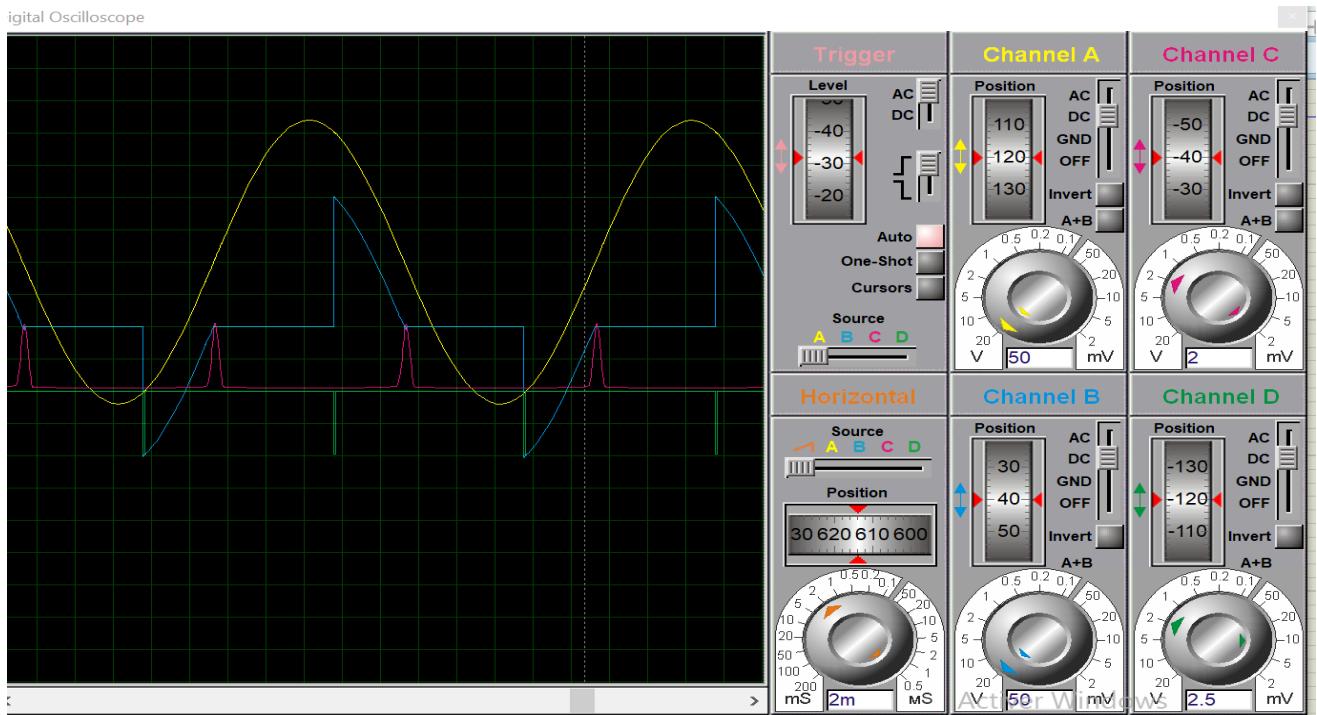
### III. CODE SOURCE

```
#include <inttypes.h>
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/sleep.h>
#include <util/delay.h>
volatile unsigned char prev_input=0, input=0;
volatile unsigned char flag=0, pot=0;
ISR(PCINT0_vect) {
    prev_input = input;
    input = PINB;
    flag=1;
}
ISR(ADC_vect){
    pot = ADCH;
}
void adc_setup (void){
    // Set the ADC input to PB2/ADC1
    ADMUX |= (1 << MUX0);
    ADMUX |= (1 << ADLAR);
    // Set the prescaler to clock/128 & enable ADC & ADC interrupts & Auto-trigger enabled
    ADCSRA |= (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0) | (1 << ADEN) | (1 << ADIE) | (1 << ADATE);
    // (Auto-trigger) conversion will start by Pin Change Interrupt Request
    ADCSRB |= (1 << ADTS2) | (1 << ADTS1);
    // disable digital input pin
    DIDR0 |= 0x04;
}
int main() {
    DDRB = 0b00000010;
    PORTB = 0b00011111;
    PCMSK |= (1<<PCINT0); // pin change mask
    GIMSK |= (1<<PCIE); // enable PCINT interrupt
    sei(); // enable Global interrupts
    adc_setup();
    while (1) {
        if(flag) {
            flag=0;
            if(!(input&0x01)){
                char unsigned n;
                for(n=pot;n>0;n--){
                    _delay_us(40);
                }
            }
            if(!flag && !(input&0x01)){
                PORTB &= 0xfd;
                if(pot<100){
                    _delay_us(1000);
                } else {
                    _delay_us(100);
                }
                PORTB |= 0x02;
            }
        }
        return 0;
}
```

# Résultats sur l'oscilloscope

**Résultat des simulations sur l'oscilloscope pour différentes valeurs de résistance variable (Angle d'amorçage)**

Digital Oscilloscope



Digital Oscilloscope

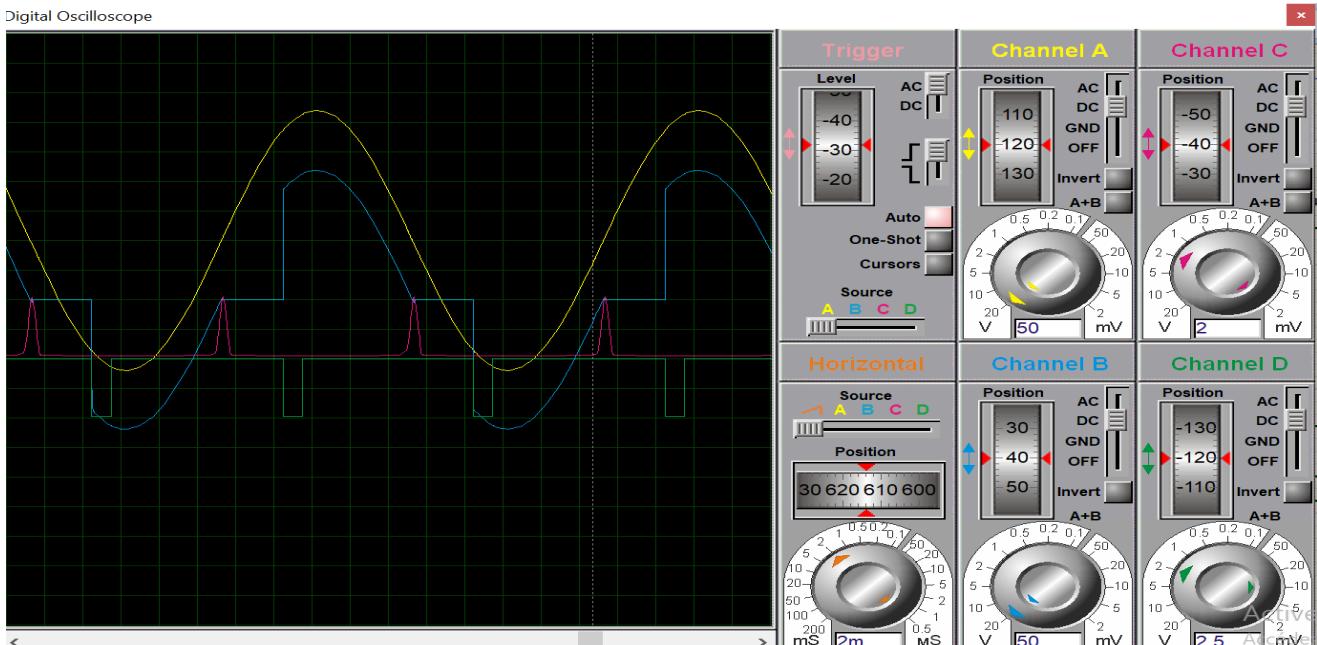


Figure II-2 : Résultats sur oscilloscope

## **IV. SIMULATION PSIM**

### **Présentation du logiciel :**

PSIM est un logiciel de simulation pour l'électrotechnique et l'électronique de puissance.

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

Les appareils de mesure disposés sur le schéma de montage définissent les courbes représentatives des grandeurs électriques et mécaniques que l'on peut obtenir après simulation

### **MONTAGE :**

Ce montage représente un variateur de puissance à commande par retard de phase pour courant alternatif, typiquement utilisé pour contrôler la luminosité d'une lampe ou la vitesse d'un moteur. La tension alternative est appliquée à travers un pont redresseur (constitué des deux diodes) qui permet le passage de courant dans les deux directions, assurant ainsi une conduction en demi-alternance pour le triac. Un détecteur de passage par zéro (composé de portes logiques à gauche) identifie le moment où la tension traverse zéro, ce qui permet de synchroniser la commande. Une fois le passage par zéro détecté, un système de retard (générateur d'impulsion temporisée) est activé. Ce retard détermine l'instant où une impulsion de commande est envoyée à la gâchette du triac (élément de commutation), via une autre porte logique. En modifiant le temps de retard (par exemple avec un potentiomètre ou une commande analogique), on change l'instant de déclenchement du triac dans chaque demi-alternance, ce qui permet de faire varier la puissance moyenne délivrée à la charge (résistance en série avec une inductance, probablement une lampe ou un moteur). L'ampèremètre indique le courant consommé par la charge, permettant de visualiser les effets du contrôle de phase.

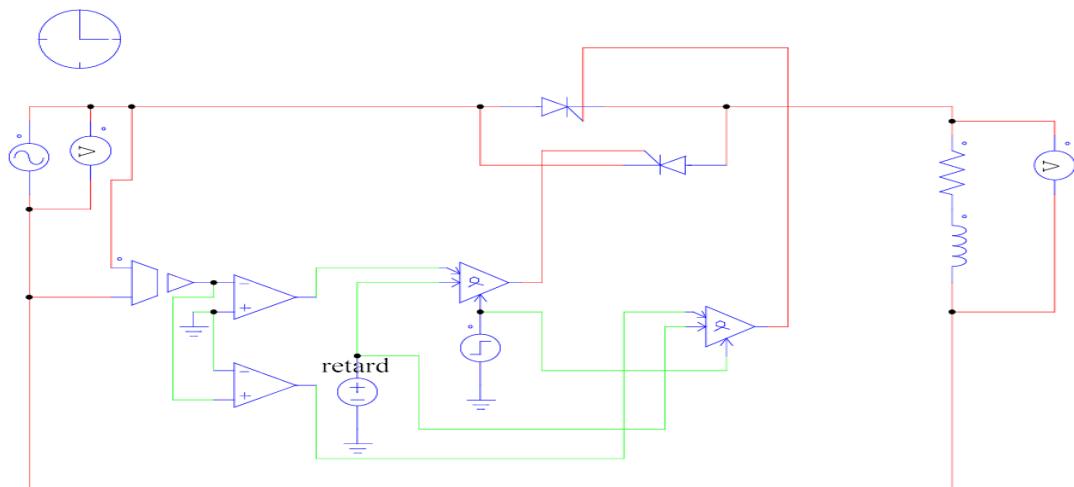


Figure II-3 : Montage sur PSIM

### Résultats:

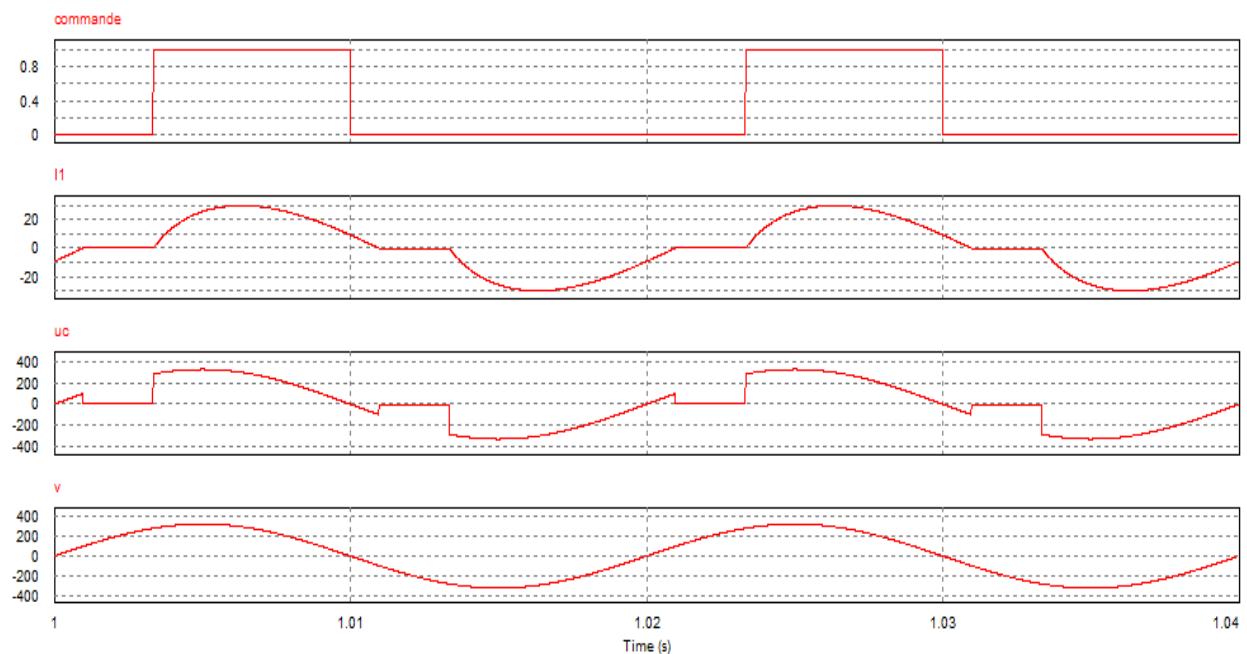
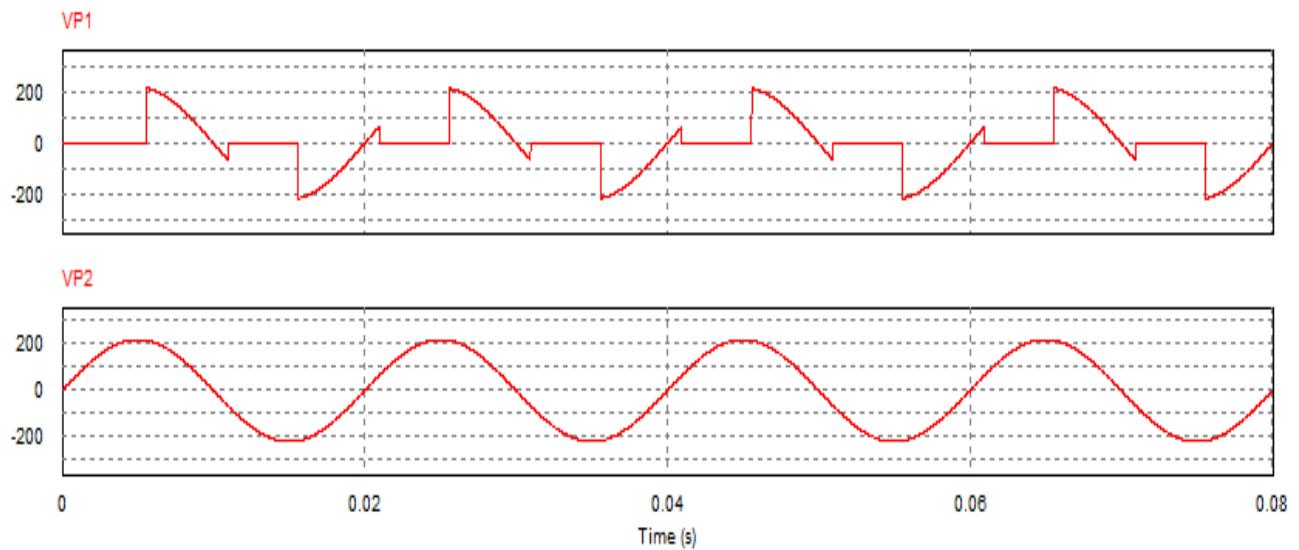


Figure II-4 : Allure sur PSIM



## V. Réalisation du gradateur monophasé au laboratoire

La phase de réalisation du gradateur monophasé a été effectuée au sein de notre laboratoire d'électronique de puissance. L'objectif était de réaliser ce dernier avec une charge résistive. Dans la figure ci-dessous, on trouve le montage qu'on a réalisé avec deux thyristors, une carte Arduino pour envoyer un signal de commande aux gâchettes et une résistance et le tout alimenté par un GBF et on a visualisé notre signal par un oscilloscope.

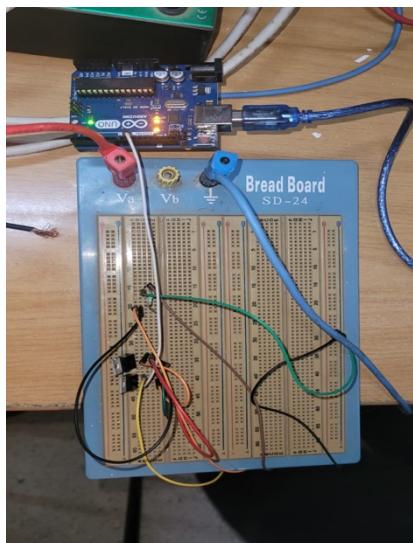


Figure II-5 : Montage sur maquette



Figure II-6 : GBF

## Résultats

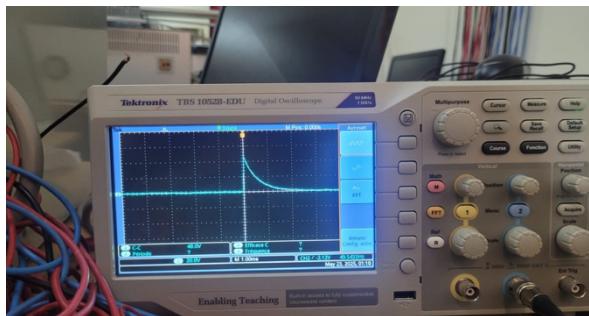


Figure II-7 : Allure sur oscilloscope



Figure II-8 : signal commande gâchette

# **CONCLUSION**

Ces travaux de recherche portent sur le Gradateur monophasé. Mon objectif principal était de réaliser ce Gradateur monophasé qui est un convertisseur statique ayant pour but de varier la puissance dissipée dans un récepteur pour qu'il fonctionne dans les conditions souhaitées. Le Gradateur monophasé est ici utilisé pour contrôler l'intensité lumineuse délivrée par une ampoule d'éclairage.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons d'abord revu les parties théoriques, puis nous avons conçu notre circuit. Nous avons ensuite vérifié les dires de la partie théorique grâce à des analyses temporelles. Enfin, nous avons procédé à la réalisation pratique de nos montages.

Ce travail nous a permis de comprendre le principe des convertisseurs statiques en général, mais tout particulièrement le Gradateur. Il a aussi servi à mettre en pratique les connaissances acquises lors des années d'étude antérieures. Nous avons pu mettre en œuvre les techniques de conception d'un circuit imprimé et les types de soudure dans le domaine de l'électronique.

En conclusion, nous avons pu élargir mes connaissances sur le sujet et constater que le circuit est pratique et facile à concevoir. Les composants sont limités et évitent le plus d'encombrement possible. Par la présence des éléments de stockage, l'énergie est conservée au maximum offrant alors un rendement élevé. Cependant, il reste encore des améliorations possibles, notamment en ce qui concerne la régulation de la sortie des circuits.

## Références

- [1] G. Séguier, F. Labrique et P. Delarue, «Electronique de puissance : structures, commandes, applications», Paris: DUNOD 10è édition, 2015.
- [2] E651ENP, « Electronique de Puissance », cours en L3, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo,: Mention électronique, Année universitaire 2022-2023.
- [3] E312BEN, « Base de l'électronique », cours en L3, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo,: Mention électronique, Année universitaire 2021-2022.
- [4] Ludovic, « Semi-conducteurs cours de base electronique », EURELEC, février 2010.
- [5] L. Lasne, «Electronique de puissance Cours, étude de cas et exercices corrigés », Paris: DUNOD 2è édition, 2011.
- [6] E652SPC, « Simulation PSPICE », cours en L3, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo: Mention électronique, Année universitaire 2022-2023.

**Titre :** ANALYSE ET CONCEPTION D'UN GRADATEUR MONOPHASE

**Auteur :** ZENZER ABDELOUAHAB

SOUABI OUSSAMA

LAGHRISSI WALID

**Nombres de pages :** 42

**Nombre de figures :** 18

---

## **RESUME :**

Ce projet, intitulée “Analyse et Conception d'un Gradateur Monophasé”, présente une étude approfondie d'un montage essentiel dans le domaine de l'électronique. Le premier chapitre offre une introduction générale aux gradateurs, expliquant leur fonctionnement. Le deuxième chapitre se concentre sur la conception d'un Gradateur monophasé, décrivant en détail le processus de conception et de simulation à l'aide du logiciel MATLAB/ISIS PROTEUS /PSIM. Le dernier chapitre détaille la réalisation pratique du circuit, discutant des défis rencontrés et des solutions adoptées pour les surmonter. L'ouvrage contient des théories pour la compréhension de ce dispositif, ainsi que des vérifications de ces théories par le biais du logiciel de simulation. En somme, ce projet offre une compréhension approfondie de l'analyse et de la conception d'un Gradateur monophasé.

**Mots clés :** gradateur monophasé.

---

**Encadrant :** Mr. Ahmed LAGRIOUI

**Adresse de l'auteur :** MARJANE MEKNES

**Contact :** +212 87 89 58 18 – [a.zenzer@edu.umi.ac.ma](mailto:a.zenzer@edu.umi.ac.ma)

