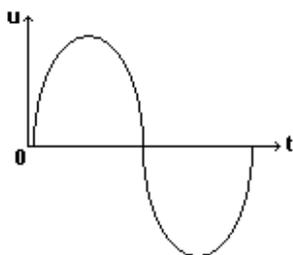


Physique appliquée

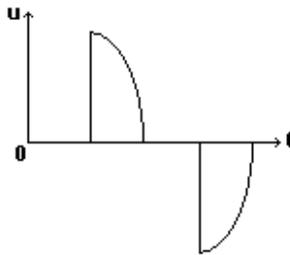
BTS 1 Electrotechnique



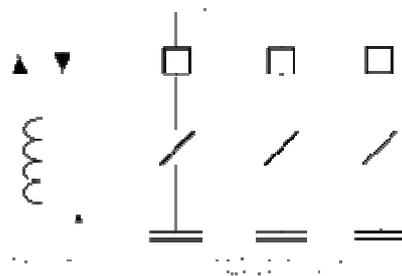
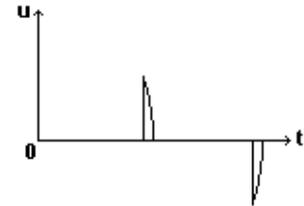
rapport cyclique = 1



rapport cyclique = 0.5



rapport cyclique proche de 0



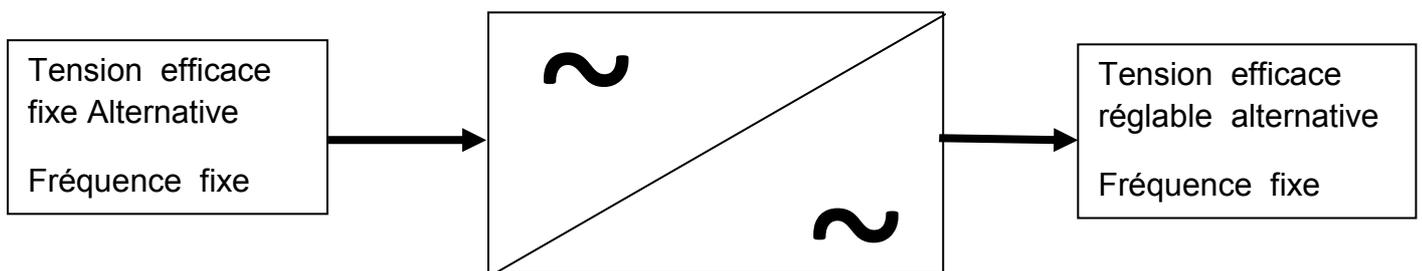
Les gradateurs

1. Domaine d'action des gradateurs	3
1.1. Le réglage des intensités lumineuses dans les salles de spectacle.....	3
1.2. Le chauffage industriel.....	4
1.3. Les moteurs universels	5
1.4. Les compensateurs statiques	6
2. Le gradateur monophasé en angle de phase et train d'ondes	7
2.1. Interrupteur statique utilisé : le Triac.....	7
2.2. Application sur charge résistive en angle de phase.....	9
2.2.1 Schéma d'étude (cas d'un éclairage).....	9
2.2.2 Forme d'onde et intervalle de conduction de TH1 et TH'1	9
2.3. Application sur charge résistive en train d'ondes (Cas de l'électrothermie).....	12
2.3.1 Principe de modulation par train d'ondes.....	12
2.3.2 Forme d'ondes de la modulation par train d'ondes.....	13
2.4. Application sur charge L en angle de phase	16
2.4.1 Schéma d'étude (application aux compensateur statique) :.....	16
2.4.2 Forme d'ondes :.....	16
3. Le gradateur triphasé en commande angle de phase	18
3.1. Schéma d'étude du couplage étoile sur charge résistive :	18
3.2. Forme d'ondes du couplage étoile dans le premier mode :	18
3.3. Forme d'ondes du couplage étoile dans le deuxième mode :	20
3.4. Forme d'ondes du couplage étoile dans le troisième mode :	21
3.5. Cas du couplage triangle sur charge résistive :	22

1. Domaine d'action des gradateurs

1.1. Le réglage des intensités lumineuses dans les salles de spectacle

Pour assurer le réglage des lumières qui vont d'un léger éclairage d'ambiance à un éclairage ciblé sur un artiste par exemple, il nous faut un convertisseur alternatif en entrée de valeur efficace fixe à un signal alternatif en sortie de valeur efficace variable.

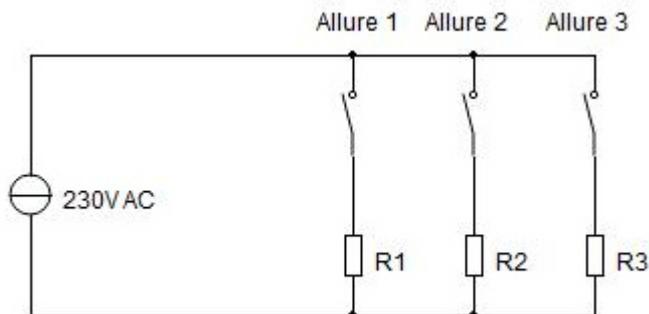


Cette fonction de l'électronique de puissance se nomme :

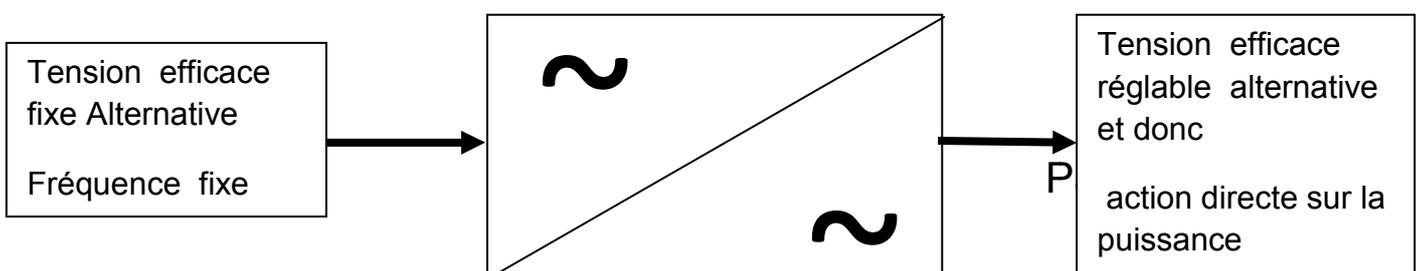
GRADATEUR

1.2. Le chauffage industriel

La régulation de puissance sur un four électrique se faisait par pallier en plaçant des résistances en parallèle.



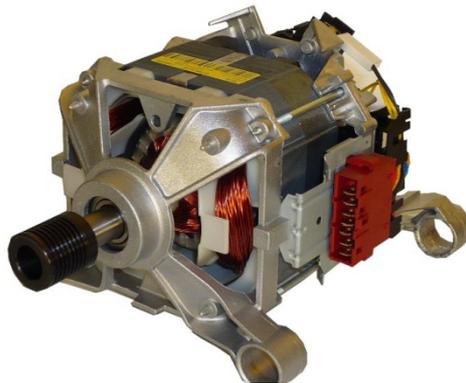
Lorsque les palliers de puissance deviennent gênant pour le traitement thermique des produits à fournir, la solution consiste à utiliser des gradateurs en groupant l'ensemble des résistances de chauffe :



1.3. Les moteurs universels

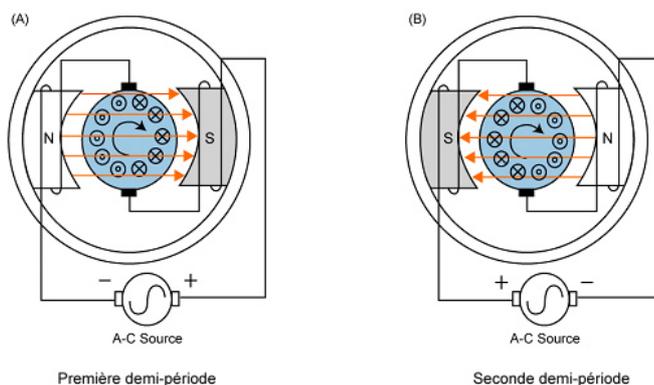
Les moteurs universels sont très utilisés dans l'électroménager, les machines outils.

Ce sont en fait des machines à courant continu qui ont leur enroulement inducteur (stator) mis en série avec leur induit (rotor).



Le sens de circulation du courant dans les enroulements change à chaque période mais ne change ni le signe du couple, ni le signe de la vitesse.

C'est pour cela qu'on peut l'alimenter aussi bien en continu qu'en alternatif.



Pour régler la vitesse de rotation de ces machines, il sera nécessaire de considérer la valeur absolue des alternances et donc les gradateurs permettent bien de rendre variable la valeur moyenne d'une demi période.

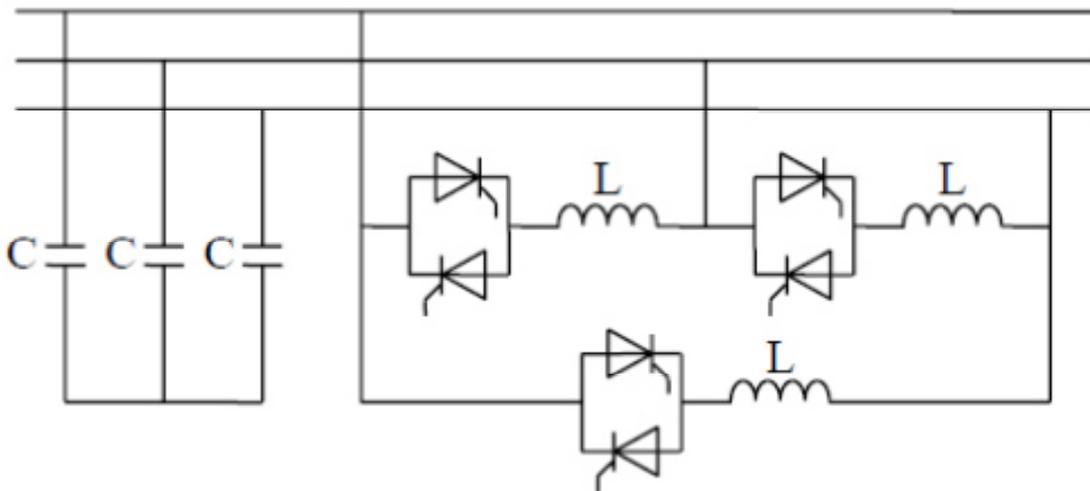
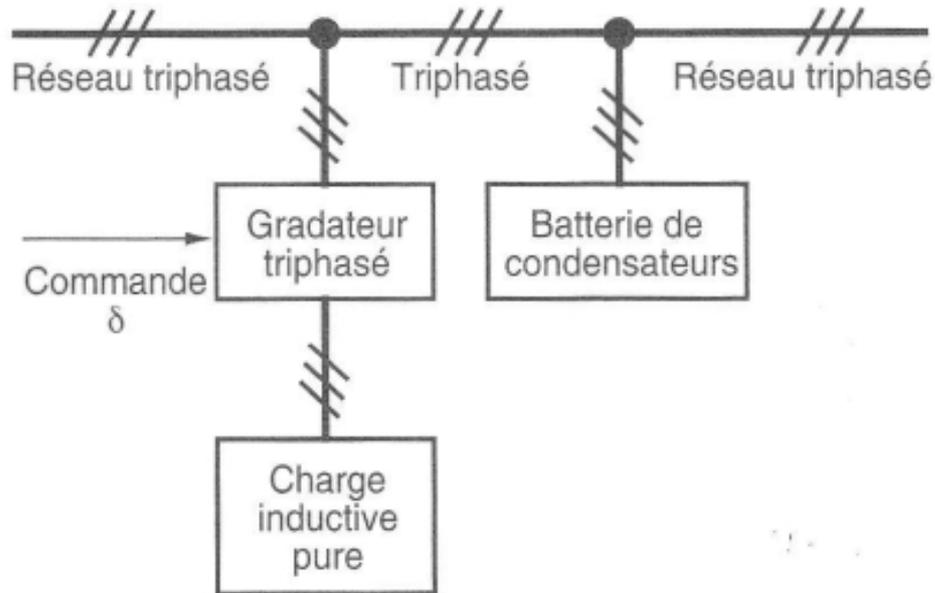


1.4. Les compensateurs statiques

Pour redresser le facteur de puissance d'une installation, la méthode ancienne consiste à mettre sous tension des batteries de condensateur suivant la puissance réactive consommée par les charges.

Cette technique a l'inconvénient de fonctionner par paliers.

En utilisant des gradateurs, on peut ajuster le facteur de puissance de manière très fine sans avoir des fonctionnements tout ou rien comme cité précédemment.

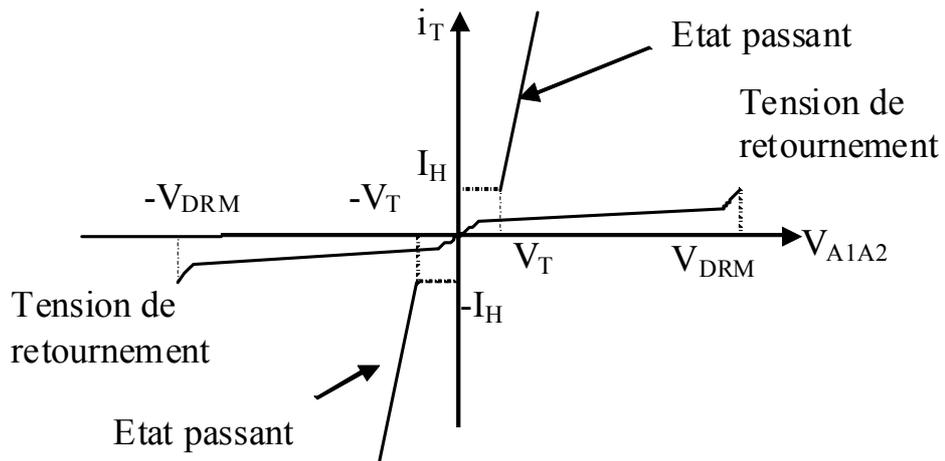


2. Le gradateur monophasé en angle de phase et train d'ondes

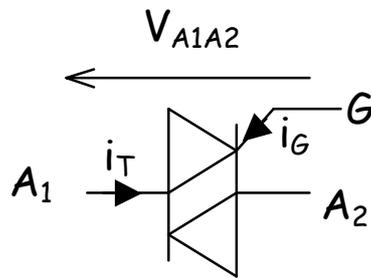
2.1. Interrupteur statique utilisé : le Triac

Le triac est un composant constitué de deux thyristors montés tête bêche.

Le triac est donc bidirectionnel en courant contrairement au thyristor seul.



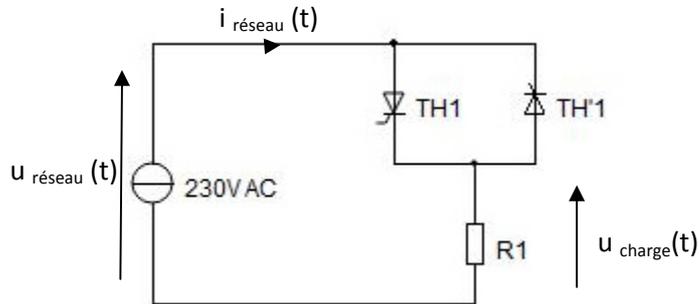
Le composant est constitué de deux anodes et d'une seule gâchette.



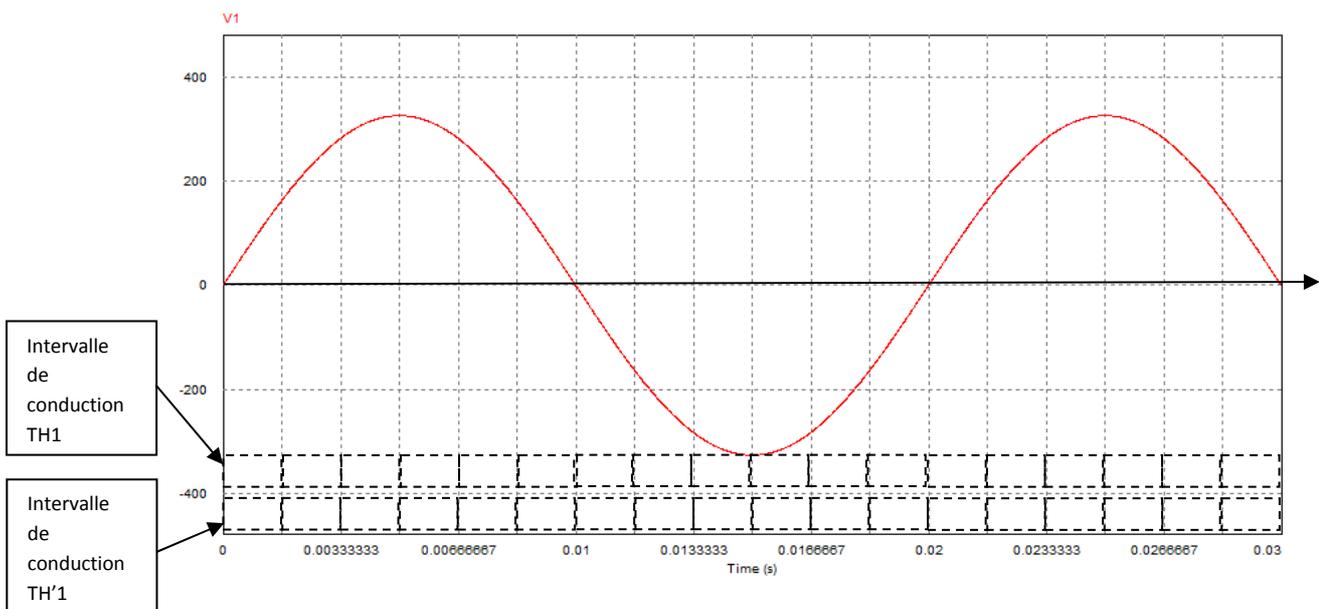
2.2. Application sur charge résistive en angle de phase

2.2.1 Schéma d'étude (cas d'un éclairage)

Le triac est représenté par deux thyristors séparés pour faciliter l'étude du montage.



2.2.2 Forme d'onde et intervalle de conduction de TH1 et TH'1



Etude dirigée sur le gradateur monophasé sur charge résistive :

- Si les thyristors sont remplacés par des diodes, indiquer les angles de conduction naturelle en notant les points sur l'axe des abscisses.
- On commande les thyristors avec un angle de retard de $\psi = \frac{2\pi}{3}$, déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH1 et TH'1.
- Comme la charge est résistive, le courant dans la résistance a la même forme que la tension. Indiquer sur l'oscillogramme, la tension $u_{\text{charge}}(t)$ et dessiner l'allure de $i_{\text{charge}}(t)$ en notant la valeur maxi du courant si $R_1 = 100 \Omega$.

Le calcul de la valeur efficace est donné par la relation :

Valeur efficace

$$U_C = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} u_c^2(\theta) d\theta} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} 2V^2 \sin^2(\theta) d\theta}$$

$$\text{En utilisant } \sin^2(\theta) = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$$

$$\text{On obtient } U_C = V \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} 1 - \cos 2\theta d\theta} = V \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[\theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\delta}^{\pi}}$$

$$\text{Soit } U_C = V \sqrt{1 - \frac{\delta}{\pi} + \frac{\sin 2\delta}{2\pi}} \text{ et comme } I = U/R$$

$$\text{Alors } P = \left(\frac{V^2}{R} \right) \left(1 - \frac{\delta}{\pi} + \frac{\sin 2\delta}{2\pi} \right)$$

- Calculer la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge et sa puissance consommée.
- Calculer la valeur efficace du courant appelé au réseau.
- Calculer la puissance apparente vue du réseau.
- Calculer la valeur du facteur de puissance du montage.
- Que peut 'on constater ?
- Interpréter le résultat concernant le facteur de puissance ?

Problème 1 :

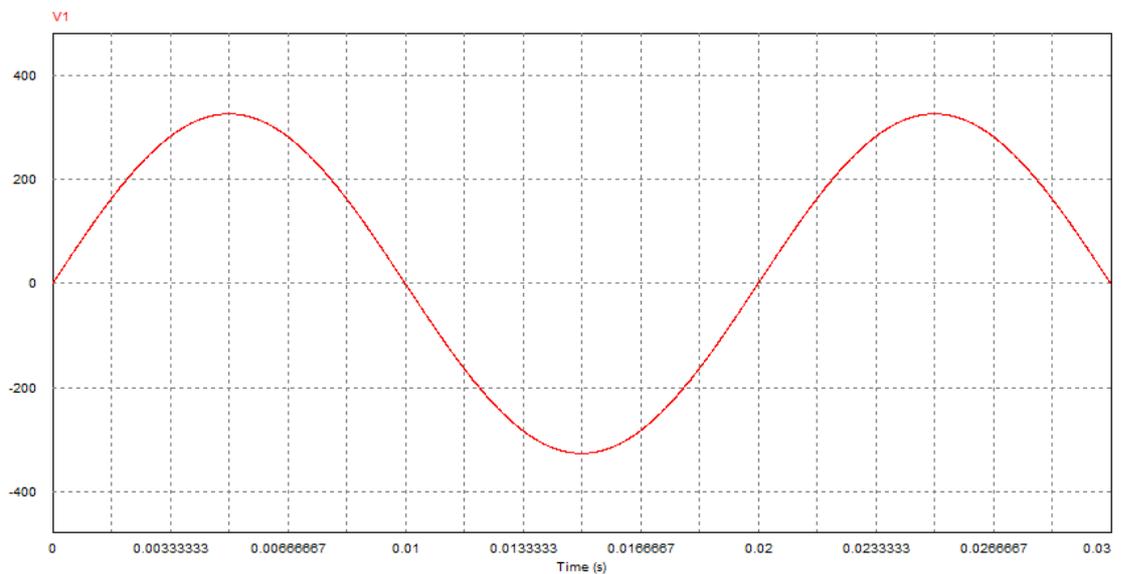
On travaille avec le même montage mais la résistance R_1 est de 60 Ohms et un retard à l'amorçage de $\psi = \frac{\pi}{3}$.

Questionnement :

Etude dirigée sur le gradateur monophasé sur charge résistive :

- Indiquer les angles de conduction naturelle en notant les points sur l'axe des abscisses de l'oscillogramme ci dessous.
- Déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH1 et TH'1.
- Indiquer sur l'oscillogramme, la tension $u_{\text{charge}}(t)$ et dessiner l'allure de $i_{\text{charge}}(t)$
- Exprimer la puissance consommée par la charge en fonction de l'angle de retard.
- Exprimer la puissance apparente en fonction de l'angle de retard.
- Exprimer sous forme littérale puis calculer la valeur du facteur de puissance du montage.

On complètera les formes d'ondes sur l'oscillogramme suivant :

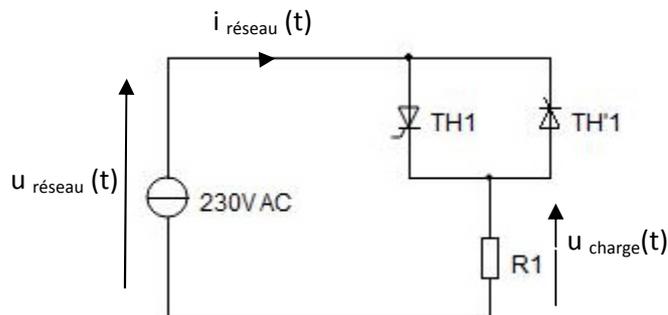


2.3. Application sur charge résistive en train d'ondes (Cas de l'électrothermie)

2.3.1 Principe de modulation par train d'ondes.

En ce qui concerne les applications de chauffage, on peut utiliser des trains d'ondes pour agir sur la puissance moyenne transmise aux résistances de chauffe.

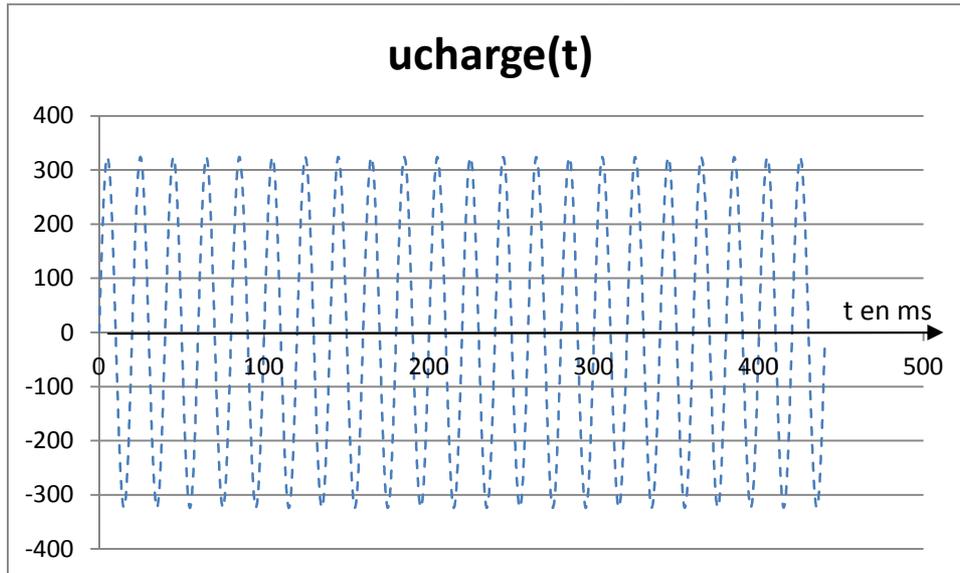
Le schéma d'étude est identique :



Le triac est commandé pendant un temps t_1 par rapport à une période très largement supérieur à 20ms. D'où le terme « **train d'ondes** »

- des **cycles rapides** (période fixe de 400ms)
- des **cycles lents** (période fixe de 40s) : pour les charges résistives de forte inertie thermique dans les installations situées en bout de ligne
- des **cycles syncopés** (période variable) : pour les charges résistives de faible inertie thermique

2.3.2 Forme d'ondes de la modulation par train d'ondes.



Etude dirigée sur le gradateur monophasé sur charge résistive :

- Définir le temps t_1 si le rapport cyclique est de 30% pour une période de 400 ms
- Calculer le nombre de sinusoïdes entières correspondant à 30% de rapport cyclique.
- Représenter la forme d'onde présente aux bornes de la charge.
- Calculer la valeur de la puissance moyenne transmise à la charge sur une période de 400 ms sachant que $P_{max} = \frac{U^2}{R}$.
- Quelle devrait être la période de modulation pour que la précision de réglage soit de 1% lors du rapport cyclique minimum.
- Justifier alors le mode de régulation dit « syncopé ».

Pour des puissances assez conséquentes, la répétition des cycles de trains d'ondes provoquent des chutes de tensions sur le réseau.

Les sources lumineuses de type à incandescence voient leur intensité lumineuse varier.

Cela peut être perceptible à l'œil humain et peut causer une gêne non négligeable sur l'environnement de travail du personnel.

On identifie ce phénomène sous le nom de dose de « Flicker ».

Le tableau ci-dessous donne la limite acceptable entre la chute de tension relative et la répétition du signal de train d'ondes.

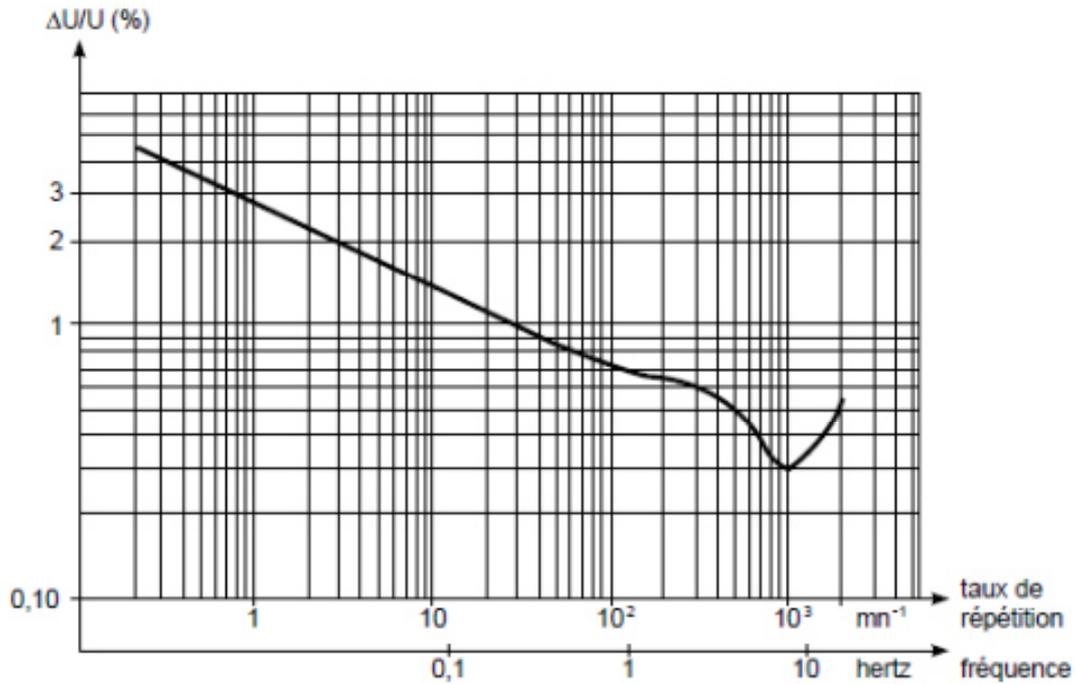


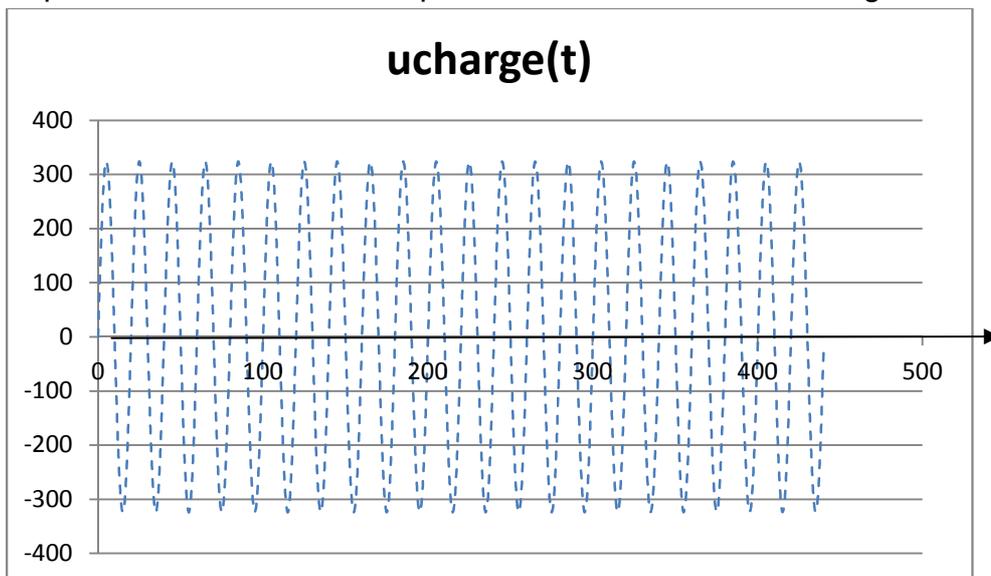
fig. 7 : courbe limite de gêne du flicker donnant l'amplitude des fluctuations de tension en fonction de leur fréquence de répétition pour une sévérité de flicker $P_{st} = 1$ (selon CEI 868). A noter que la fréquence correspond à deux fluctuations.

- g) Si à chaque train d'ondes, la chute de tension en ligne vaut 2,3V, calculer la chute de tension relative en %.
- h) Déterminer la fréquence admissible pour palier au problème de Flicker.
- i) Calculer la valeur de la période de la modulation par train d'ondes.
- j) La période de 400 ms est-elle convenable.
- k) Quelle modulation sera-t-elle la plus adaptée.

Problème 2:

On travaille avec le même montage mais la résistance R_1 est de 30 Ohms et un rapport cyclique de 70% sur une période de modulation de 400 ms.

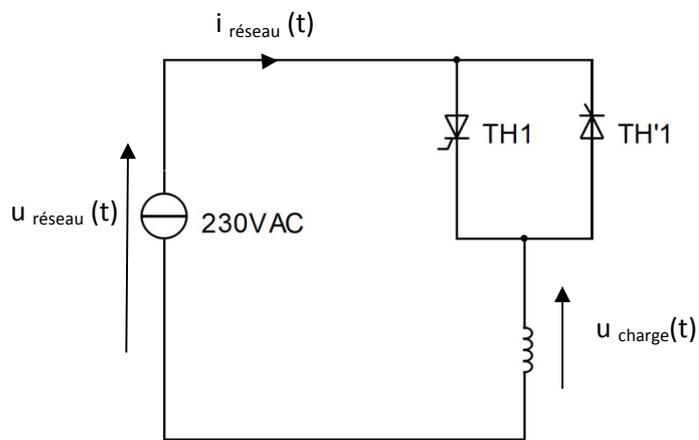
- Définir le temps t_1 si le rapport cyclique est de 70% pour une période de 400 ms
- Calculer le nombre de sinusoïdes entières correspondant à 70% de rapport cyclique.
- Représenter la forme d'onde présente aux bornes de la charge.



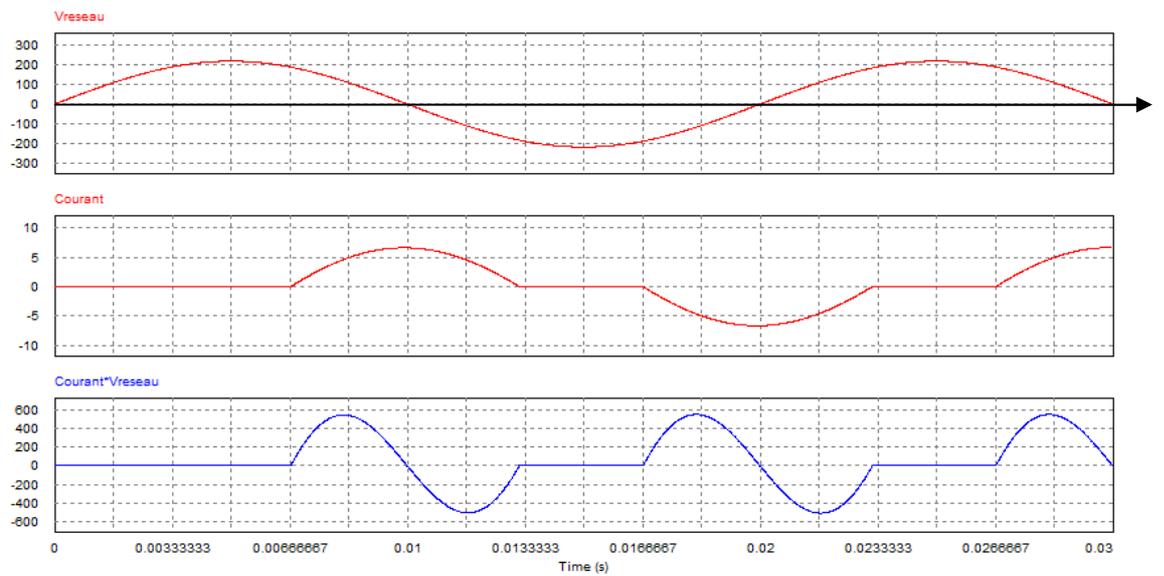
- Calculer la valeur de la puissance moyenne transmise à la charge sur une période de 400 ms pour ce rapport cyclique.

2.4. Application sur charge L en angle de phase

2.4.1 Schéma d'étude (application aux compensateur statique) :



2.4.2 Forme d'ondes :



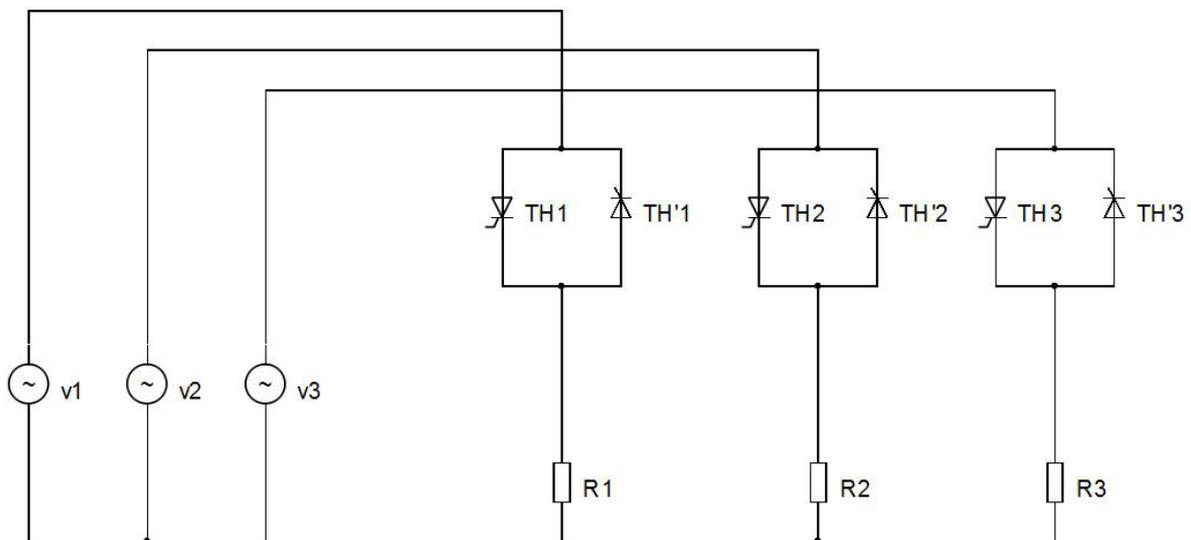
Etude dirigée sur le gradateur monophasé sur charge inductive pure :

- a) On commande les thyristors avec un angle de retard de $\psi = \frac{2\pi}{3}$, déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH1 et TH'1.
- b) Lorsque le thyristor TH1 est amorcé, la bobine pure est soumise a une tension d'équation $u_{charge} = U_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$, établir l'équation du courant dans la bobine sachant que la condition initiale est :à $\omega t_1 = \psi$; $i_{charge}(t_1) = 0$.
- c) On donne la forme du courant dans la charge, En déduire sur l'oscillogramme, la tension $u_{charge}(t)$.
- d) Sur la forme d'onde ou l'on a multiplié la tension du réseau par le courant appelé par la charge, que peut 'on dire de la forme de la courbe $p(t)$ en watt.
- e) Que vaut alors la puissance P moyen consommé par la charge.
- f) Calculer la puissance apparente vue du réseau si la valeur efficace du courant est 3,71A.
- g) De quelle type de puissance, la puissance apparente est 'elle alors constituée.
- h) Comment peut 'on régler le facteur de puissance d'une installation grâce à ce dispositif.

3. Le gradateur triphasé en commande angle de phase

Les gradateurs triphasés se commande de la même manière que pour les monophasés mais suivant l'intervalle où se situe l'angle de retard, il existe trois modes de fonctionnement.

3.1. Schéma d'étude du couplage étoile sur charge résistive :



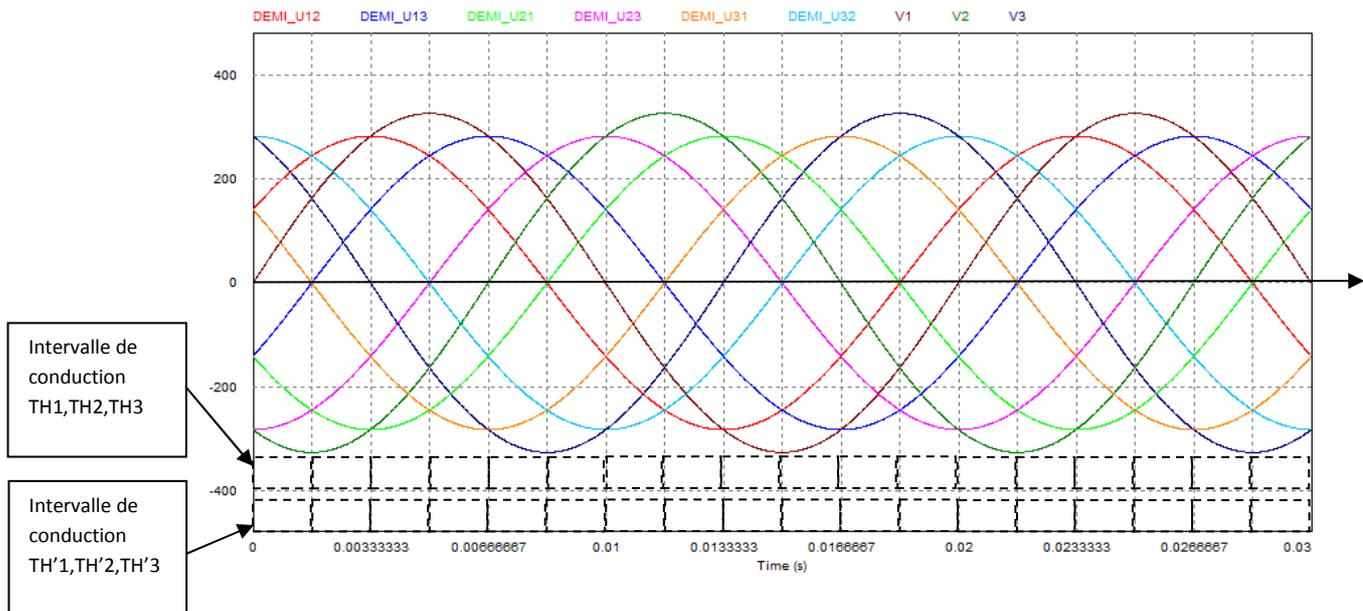
3.2. Forme d'ondes du couplage étoile dans le premier mode :

Dans ce mode l'angle de retard est compris dans l'intervalle : $0 < \psi < \frac{\pi}{3}$

Dans ce mode, il y a **deux ou trois thyristors** qui vont conduire les courants.

Lorsqu'il y a **trois thyristors** qui conduisent, alors aux bornes des charges, on retrouve **les trois tensions simples**.

Lorsqu'il y a **deux thyristors** qui conduisent, alors aux bornes des charges parcourues par un courant, on retrouve **des demi-tensions composées**.



Etude dirigée sur le gradateur triphasé en couplage étoile mode 1:

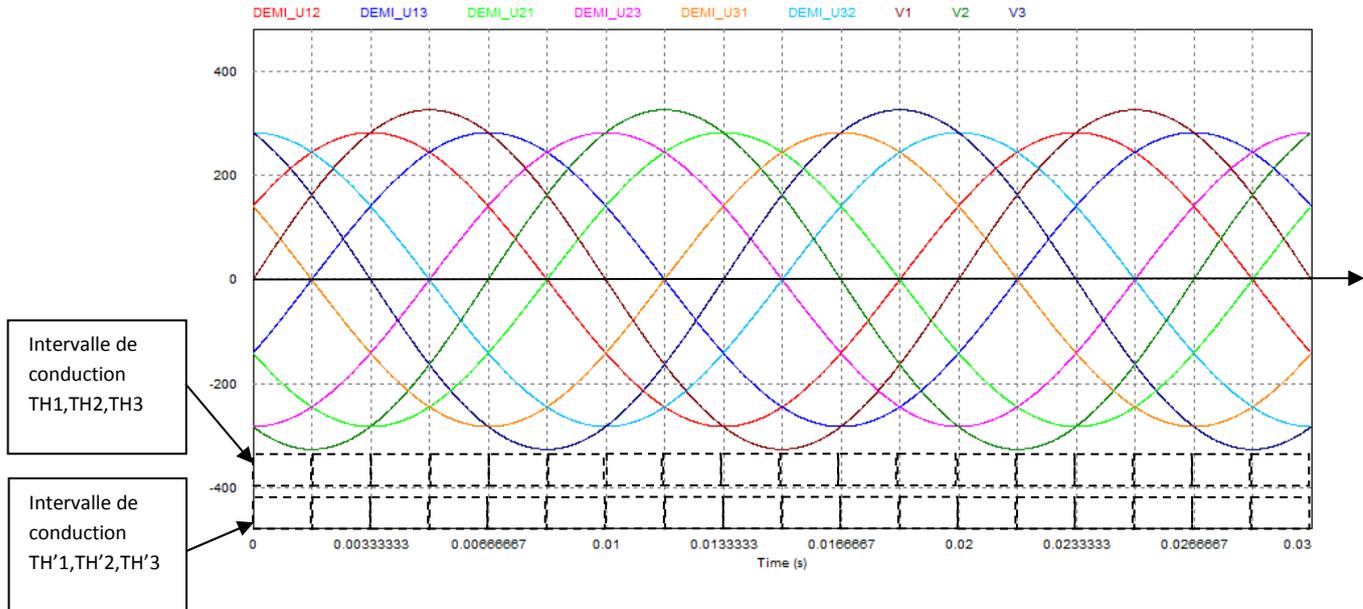
- Si les thyristors sont remplacés par des diodes, indiquer les angles de conduction naturelle en notant les points sur l'axe des abscisses.
- On commande les thyristors avec un angle de retard de $\psi = \frac{\pi}{6}$, déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH1, TH2 et TH3.
- On commande les thyristors avec un angle de retard de $\psi = \frac{\pi}{6}$, déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH'1, TH'2 et TH'3.
- Lorsque les thyristors TH1 et TH'1 ne sont pas en conduction, quelle sera la valeur de i_{R1} et V_{R1} .
- Lorsque les thyristors TH1 ou TH'1 sont en conduction et que trois thyristors sont en conduction simultanée, quelle devrait être la tension aux borne de R1.
- Quand TH1 et TH'2 sont en conduction simultanée, dessiner la maille constituée des deux charges R1 et R2 et mettre en évidence la demi tension composée appliquée aux bornes de R1.
- En tenant compte des résultats précédents, tracer alors la forme d'ondes aux bornes de la résistance R1.

3.3. Forme d'ondes du couplage étoile dans le deuxième mode :

Dans ce mode l'angle de retard est compris dans l'intervalle : $\frac{\pi}{3} < \psi < \frac{\pi}{2}$

Dans ce mode, il y a **deux thyristors** qui vont conduire les courants.

Aux bornes des charges parcourues par un courant, on retrouve donc seulement **des demi-tensions composées**.



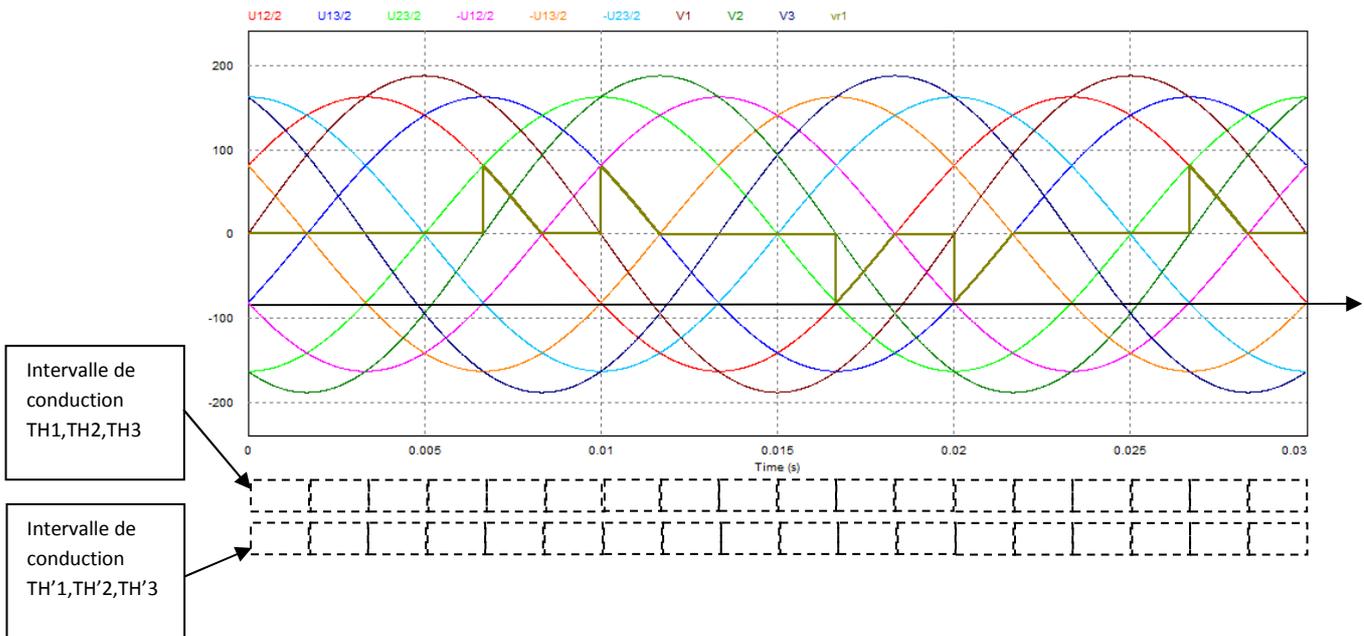
Etude dirigée sur le gradateur triphasé en couplage étoile mode 2:

- Si les thyristors sont remplacés par des diodes, indiquer les angles de conduction naturelle en notant les points sur l'axe des abscisses.
- On commande les thyristors avec un angle de retard de $\psi = \frac{5\pi}{12}$, déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH1, TH2 et TH3.
- On commande les thyristors avec un angle de retard de $\psi = \frac{5\pi}{12}$, déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH'1, TH'2 et TH'3.
- Tracer alors la forme d'ondes aux bornes de la résistance R1.

3.4. Forme d'ondes du couplage étoile dans le troisième mode :

Dans ce mode l'angle de retard est compris dans l'intervalle : $\frac{\pi}{2} < \psi < \frac{5\pi}{6}$

Dans ce mode, il y a **deux ou zéro thyristors** qui vont conduire les courants.
Aux bornes des charges parcourues par un courant, on retrouve donc **seulement des demi-tensions composées ou 0v suivant le cas.**

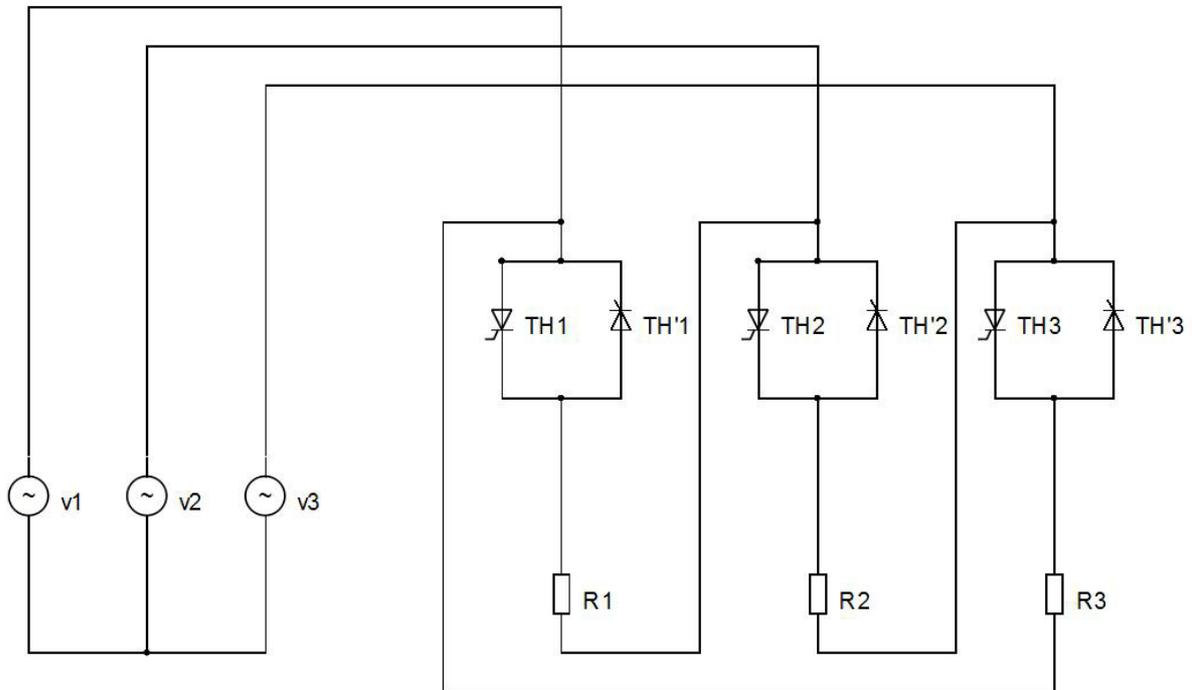


Etude dirigée sur le gradateur triphasé en couplage étoile mode 2:

- Si les thyristors sont remplacés par des diodes, indiquer les angles de conduction naturelle en notant les points sur l'axe des abscisses.
- On commande les thyristors avec un angle de retard de $\psi = \frac{2\pi}{3}$, déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH1, TH2 et TH3.
- On commande les thyristors avec un angle de retard de $\psi = \frac{2\pi}{3}$, déterminer les intervalles de conduction des thyristors TH'1, TH'2 et TH'3.
- Déterminer les impulsions de confirmation nécessaire afin d'avoir un fonctionnement correct du gradateur.

3.5. Cas du couplage triangle sur charge résistive :

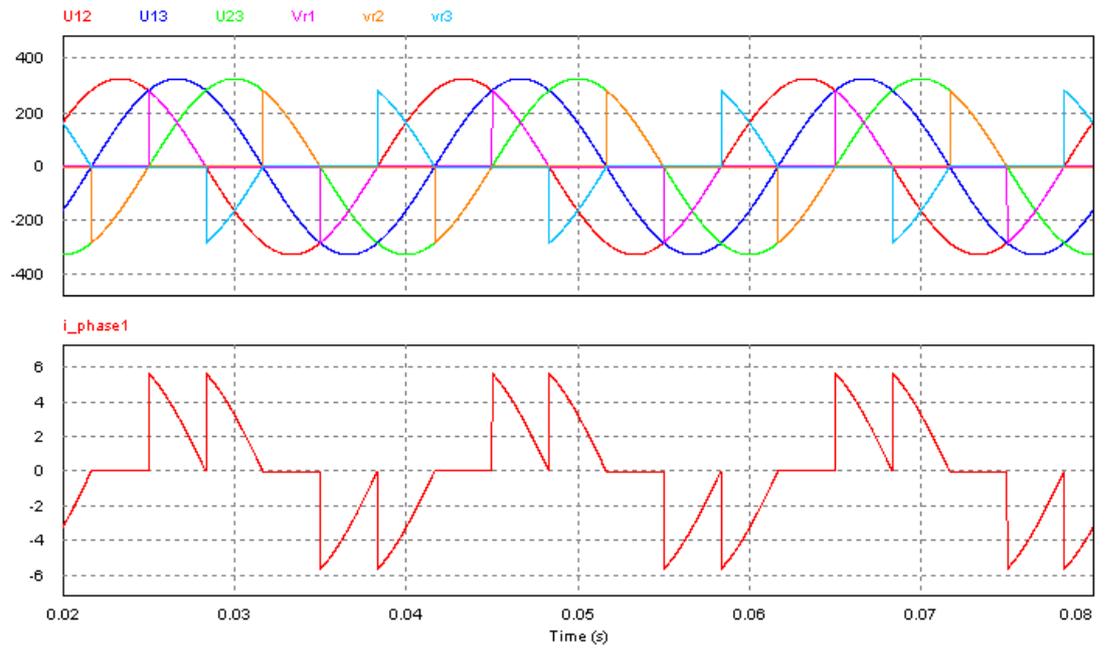
Le schéma d'étude est le suivant :



La charge est forcément connectée entre deux phases de part le couplage. La commande des deux thyristors composant le triac est synchronisée avec une des tensions composées. Les formes d'ondes obtenues aux bornes des charges est celle qu'on avait obtenue sur le montage monophasé.

L'avantage de cette structure est la distorsion moins importante du courant en ligne. (Ce point sera précisé dans le cours « circuit en régime non sinusoïdal »)

On peut le constater dans les oscillogrammes suivants :



Question :

A l'aide de la loi des nœuds, justifier la forme du courant en ligne.