

Compte-rendu TP3

Etude d'un pont redresseur monophasé

I. Introduction

Lors de ce TP, on s'intéresse au pont redresseur commandé monophasé, ce qui est un convertisseur AC/DC. On étudiera en détail les points suivants:

- Condition d'amorçage et d'extinction des thyristors
- Principe du redressement monophasé double alternance
- Influence de l'inductance de charge sur le courant

II. Préparation

On considère le circuit d'un redresseur monophasé simple alternance suivant:

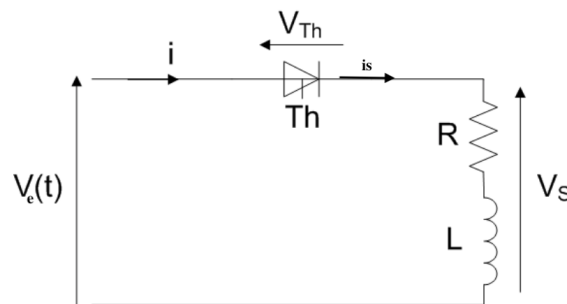


Figure 1. circuit redresseur commandé monophasé simple alternance

1) Analyse du circuit

On considère que l'angle de retard à l'amorçage du thyristor est α .

La loi des mailles nous donne:

$$V_e(t) = V_s(t) + V_{th}(t)$$

On sait que la tension aux bornes du thyristor est nulle lorsqu'il est passant. On pourra donc écrire l'équation qui régit le circuit:

$$V_s(t) = V_e(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t) = L \frac{di_s}{dt} + Ri_s(t)$$

On résout cette équation différentielle avec $i_s(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) + C e^{-\frac{R}{L}t}$ et on obtient:

$$i_s(\theta) = \frac{R}{R^2 + (L\omega)^2} V \sqrt{2} \sin(\theta) - \frac{L\omega}{R^2 + (L\omega)^2} V \sqrt{2} \cos(\theta) + K e^{-\frac{R}{L} \frac{\theta}{\omega}}$$

avec $\omega = 2\pi f$ et
$$K = \sqrt{2}V \left[\frac{L\omega}{R^2 + (L\omega)^2} \cos(\alpha) - \frac{R}{R^2 + (L\omega)^2} \sin(\alpha) \right] \cdot e^{\frac{R}{L} \frac{\alpha}{\omega}}$$

On a également:

$$v_s(\theta) = \begin{cases} v_e(\theta) & \text{pour } \theta \text{ tel que } i_s(\theta) > 0 \\ 0 & \text{pour } \theta \text{ tel que } i_s(\theta) = 0 \end{cases}$$

$$v_{th}(\theta) = v_e(\theta) - v_s(\theta)$$

2) Chronogrammes de V_e , V_s , I_s et V_{th}

On trace ensuite les chronogrammes à l'aide de Matlab avec les valeurs suivantes:

$V_e = 15\text{ V}$, $R = 10\ \Omega$, $f = 50\text{ Hz}$, $L = 30\text{ mH}$. Prenons un exemple de $\alpha = 45^\circ$:

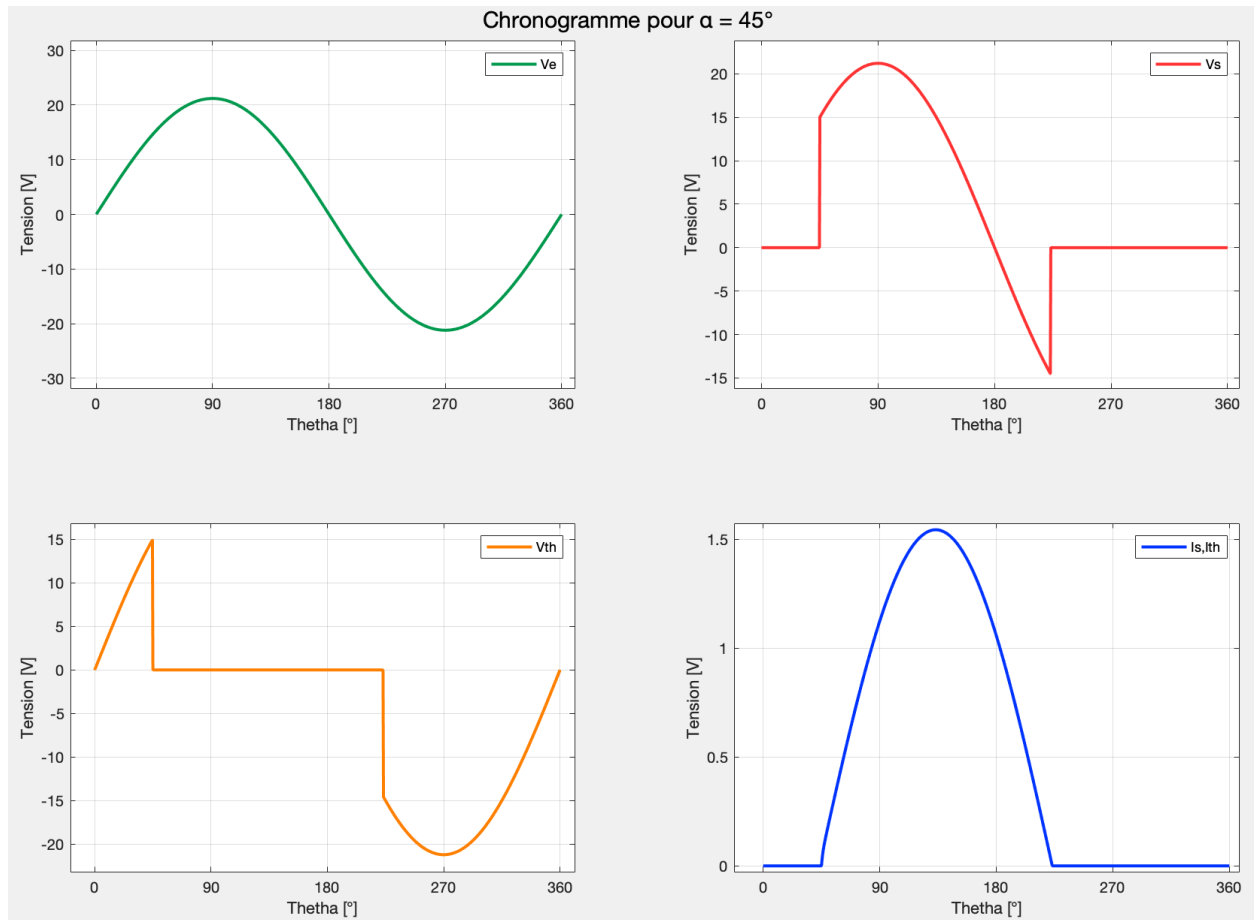


Figure 2. Chronogrammes de V_e , V_s , I_s , V_{th}

III. Travail en séance

Partie A: Redressement simple alternance

3) Montage

On a un transformateur monophasé avec un rapport de transformation de 15/230 qui nous permet d'avoir une tension d'entrée alternative de 15 V. On a également 4 thyristors et 4 diodes sur la maquette, dans ce TP, on va travailler sur un redresseur entièrement commandé donc avec uniquement les thyristors.

On étudie d'abord le redressement commandé simple alternance dans le cas d'une charge purement résistive avec $R = 10\ \Omega$. La tension d'entrée étant 15 V, le courant ne dépasse jamais le courant maximal admissible par la maquette (6A).

4) Schéma de principe

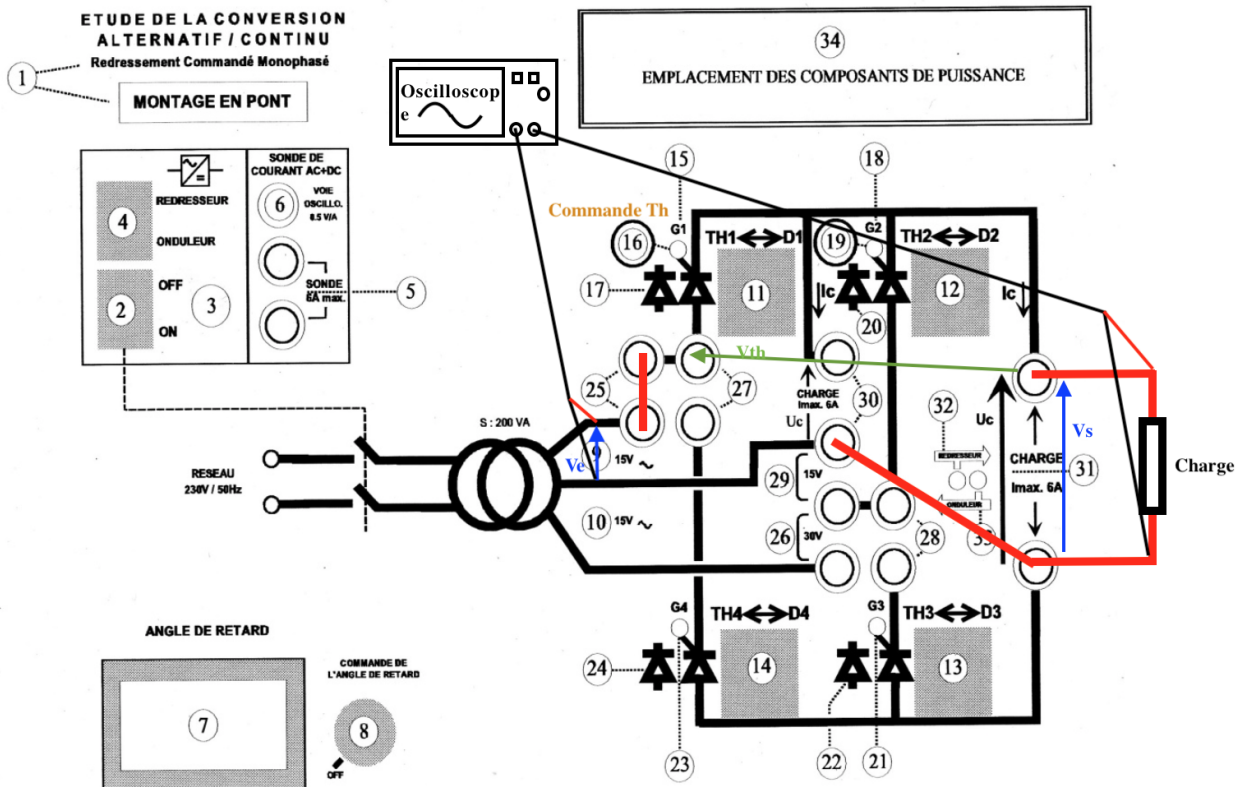
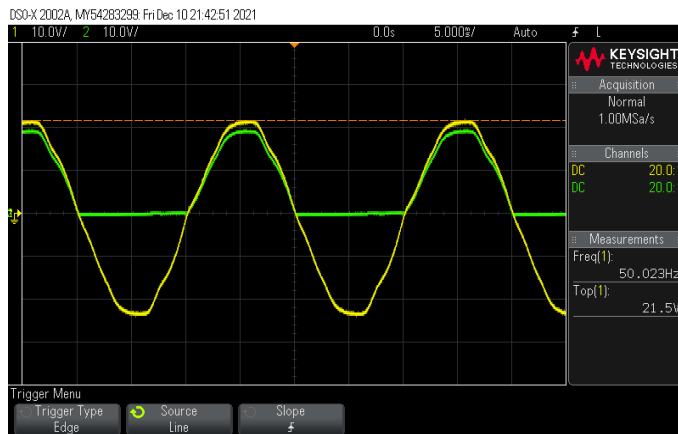
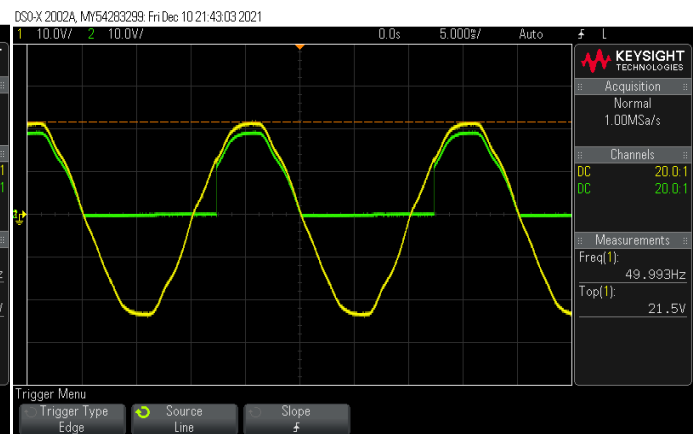
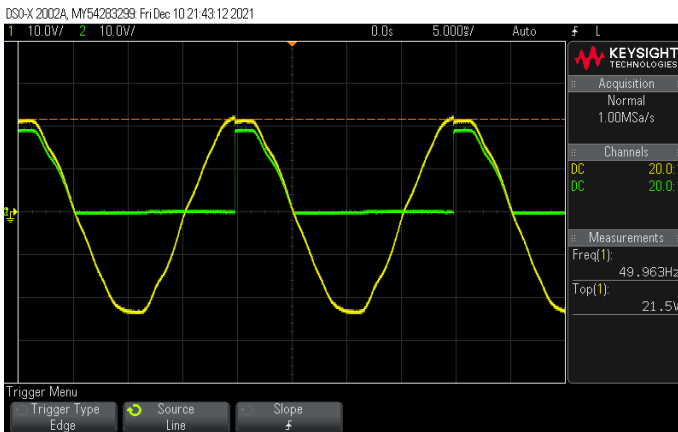
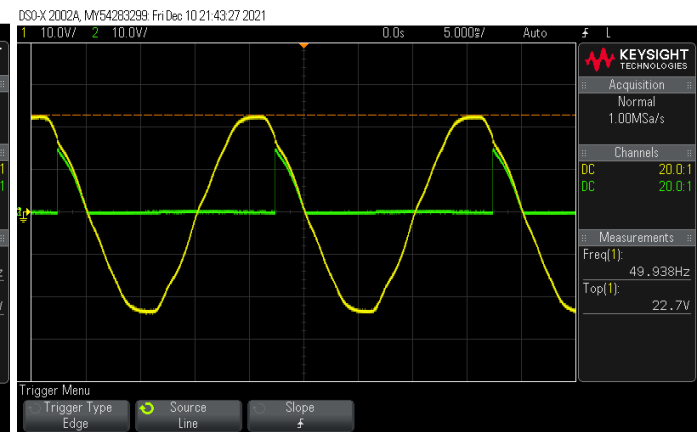
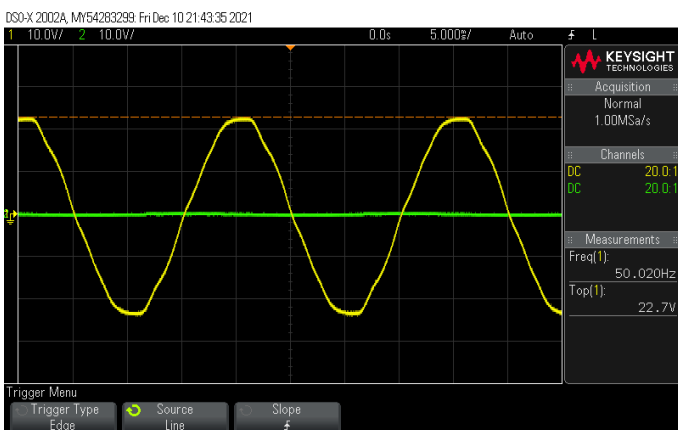


Figure 3. Câblage montage simple alternance

On réalise le câblage du montage et on utilise deux sondes pour visualiser les signaux à l'aide de l'oscilloscope. Étant donné que l'oscilloscope n'a que 2 voies, on ne peut visualiser que deux signaux en même temps. La figure ci-dessus montre l'exemple d'une visualisation des tensions V_e et V_s .

5) Chronogrammes tension V_e & tension V_s pour $\alpha \in [0, 180^\circ]$ par pas de 45° :

Figure 4. Visualisation V_e & V_s , $\alpha = 0^\circ$ Figure 5. Visualisation V_e & V_s , $\alpha = 45^\circ$ Figure 6. Visualisation V_e & V_s , $\alpha = 90^\circ$ Figure 7. Visualisation V_e & V_s , $\alpha = 135^\circ$ Figure 8. Visualisation V_e & V_s , $\alpha = 180^\circ$

Les tensions de sortie correspondent aux prévisions car quand le thyristor n'est pas amorcé, le circuit n'est pas fermé et la tension de sortie est égale à zéro. À l'amorçage du thyristor, $V_{th} = 0$ et donc $V_s = V_e$. Cela marche uniquement quand $V_e > 0$ car il s'agit d'un circuit simple alternance et quand $V_e < 0$, le thyristor n'est pas amorçable donc V_s est toujours nulle.

Chronogrammes commande de Th et tension Vs pour $\alpha \in [0,180^\circ]$ par pas de 45° :

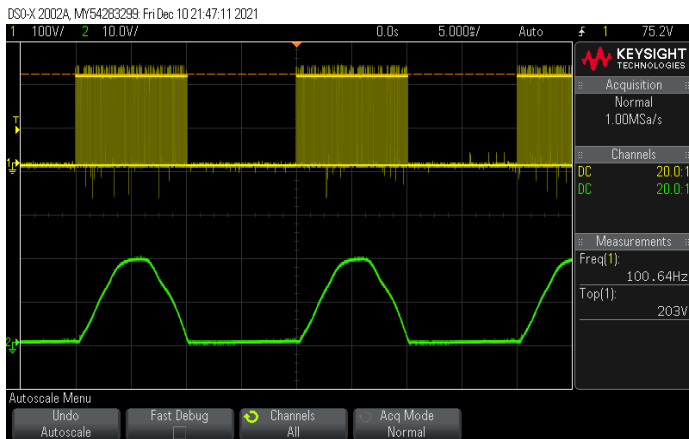


Figure 9. Visualisation commande Th & Vs, $\alpha = 0^\circ$

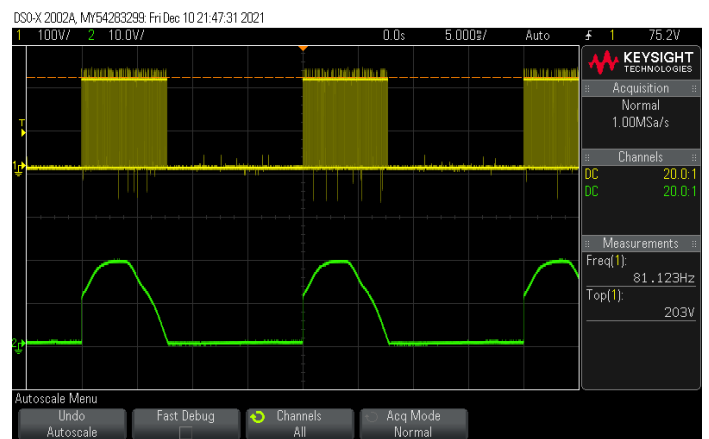


Figure 10. Visualisation commande Th & Vs, $\alpha = 45^\circ$

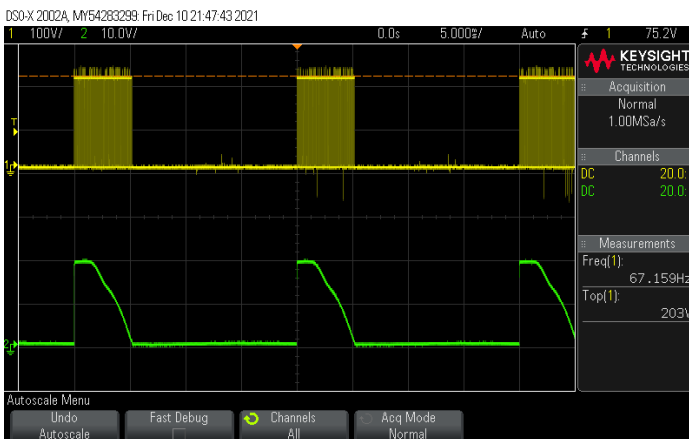


Figure 11. Visualisation commande Th & Vs, $\alpha = 90^\circ$

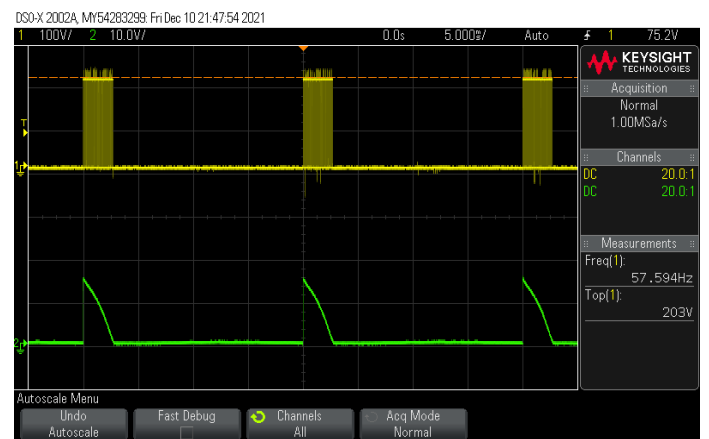


Figure 12. Visualisation commande Th & Vs, $\alpha = 135^\circ$

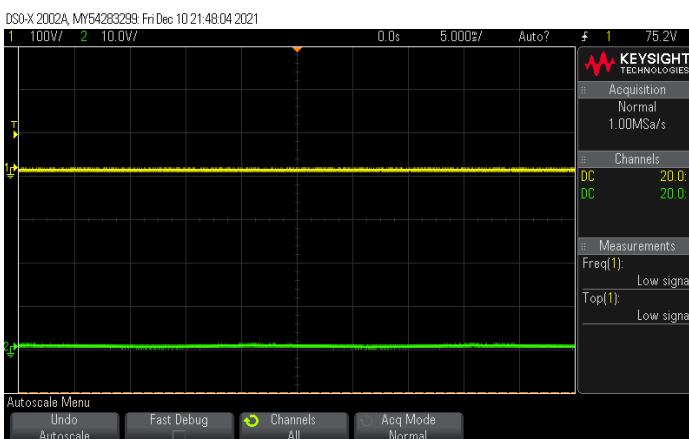


Figure 13. Visualisation commande Th & Vs, $\alpha = 180^\circ$

On constate que la forme du signal de commande du thyristor est des impulsions et le début de la première impulsion correspond à l'endroit où se situe l'angle de retard à l'amorçage.

6) Chronogrammes tension V_s et courant I_s pour charge R pour $\alpha \in [0, 180^\circ]$ par pas de 45° :

Pour une charge R, la forme du courant I_s est exactement la même que la tension de sortie V_s , étant donné que les chronogrammes de V_s pour $\alpha \in [0, 180^\circ]$ sont déjà disponibles dans la partie 5), on ne trace pas de nouveau ces chronogrammes.

Chronogrammes tension V_s et courant I_s pour charge RL pour $\alpha \in [0, 180^\circ]$ par pas de 45° (V_s en vert et I_s en jaune):

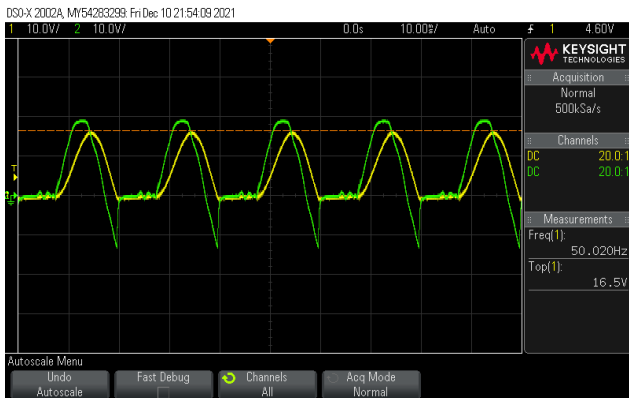
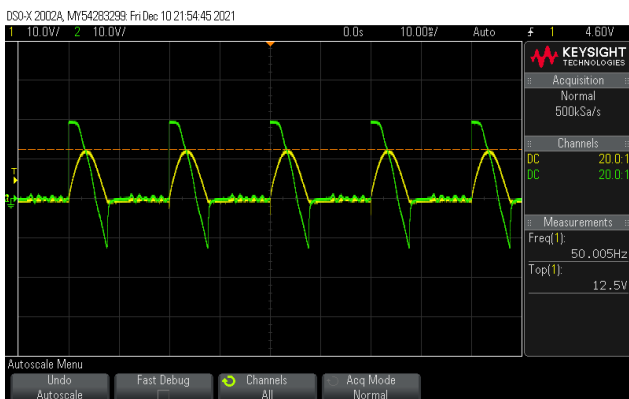
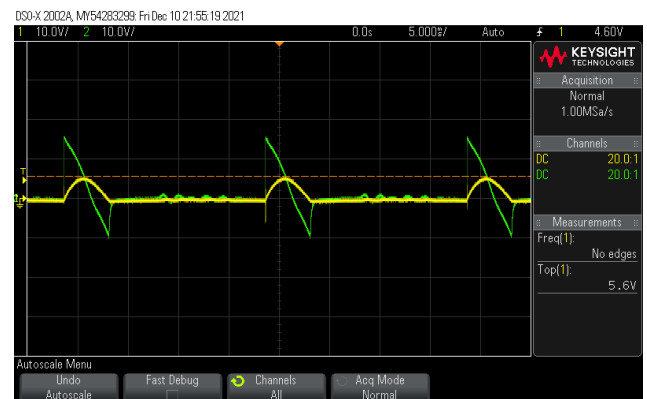
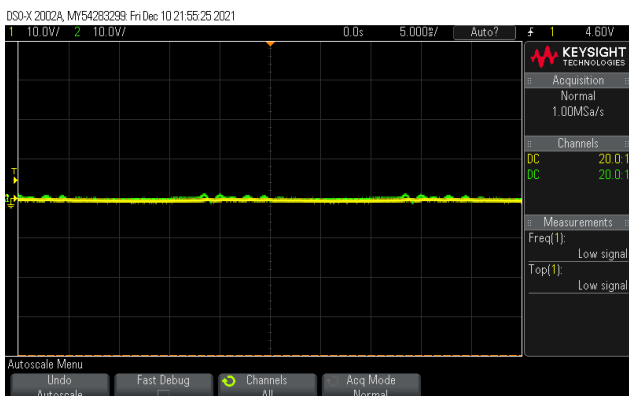
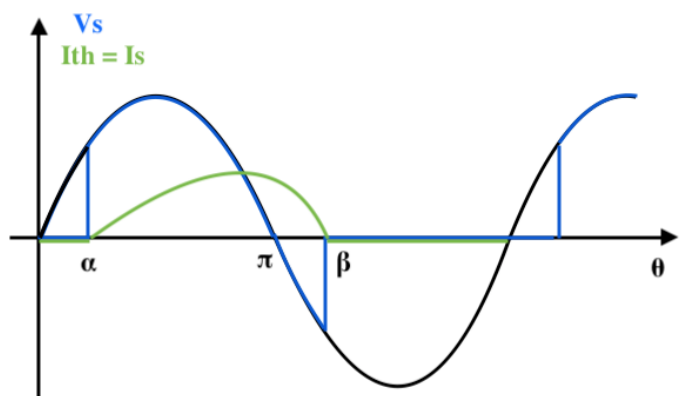
Figure 14. Visualisation V_s & I_s , $\alpha = 0^\circ$ Figure 15. Visualisation V_s & I_s , $\alpha = 45^\circ$ Figure 16. Visualisation V_s & I_s , $\alpha = 90^\circ$ Figure 17. Visualisation V_s & I_s , $\alpha = 135^\circ$ Figure 18. Visualisation V_s & I_s , $\alpha = 180^\circ$ 

Figure 19. Illustration des signaux (généralisation)

Remarque et explications:

Dans le cas d'une charge purement résistive, la forme du courant correspond exactement à celle de sa tension de sortie car il n'y a qu'un rapport de R , selon la loi d'Ohm.

Dans le cas d'une charge RL, l'amorçage du thyristor se fait à α , comme montré dans la figure 19. Il y a d'abord un déphasage entre le courant et la tension (courant en retard) en raison de la présence de l'inductance donc le courant s'annule plus tardivement par rapport à la tension d'entrée. Par conséquent, l'inductance assure la continuité du courant et le thyristor continue à conduire jusqu'à ce que le courant s'annule au moment de β , illustré dans la figure 19, donc la tension de sortie est égale à V_e avant que le courant s'annule, et ensuite devient nulle car le thyristor n'est plus passant, jusqu'au prochain amorçage du thyristor ($2\pi + \alpha$).

7) Chronogrammes tension V_{th} et courant I_{th} pour une charge R:

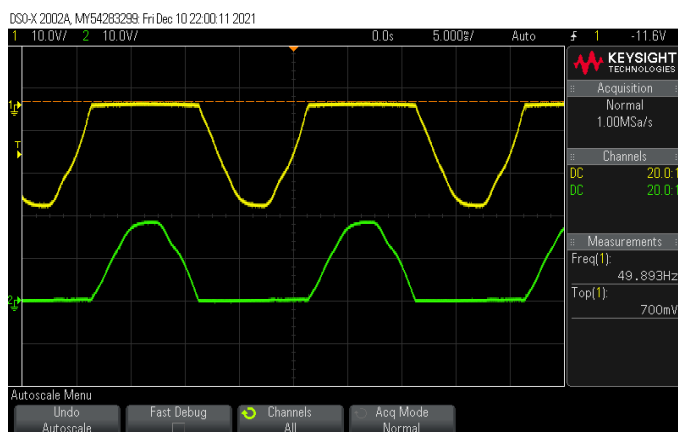


Figure 20. Visualisation V_{th} & I_{th} , $\alpha = 0^\circ$

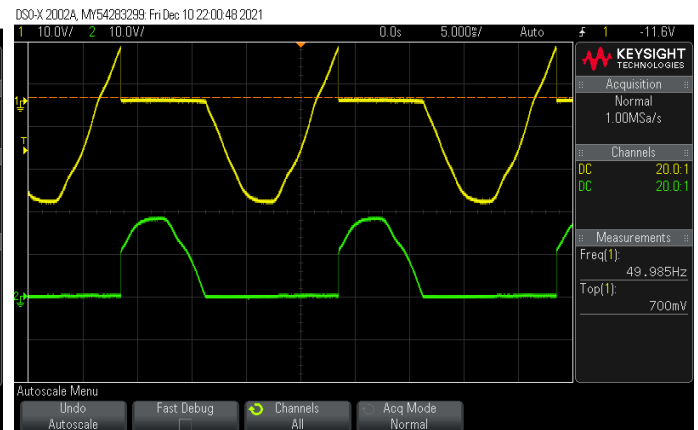


Figure 21. Visualisation V_{th} & I_{th} , $\alpha = 45^\circ$

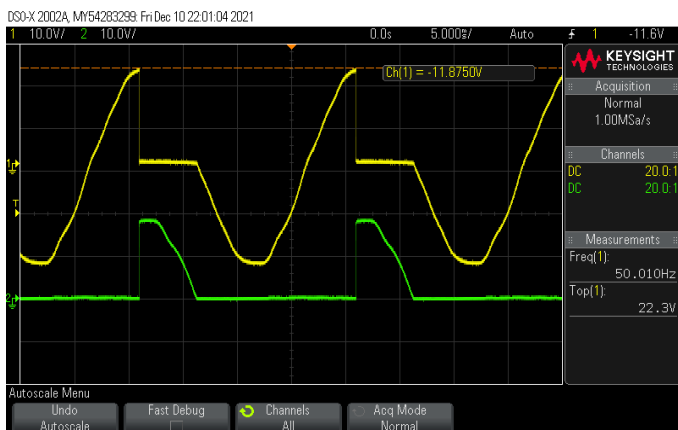


Figure 22. Visualisation V_{th} & I_{th} , $\alpha = 90^\circ$

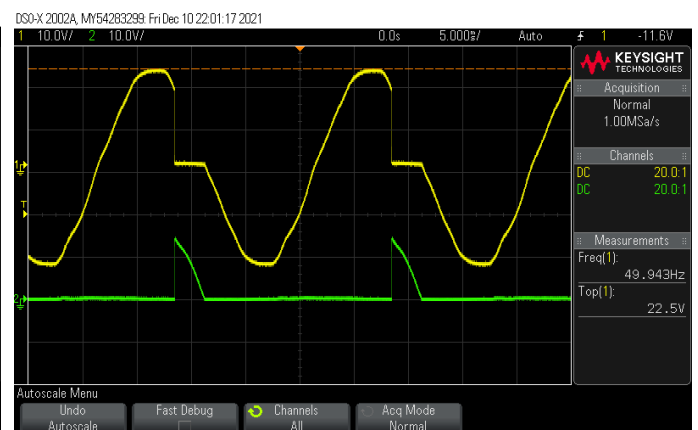


Figure 23. Visualisation V_{th} & I_{th} , $\alpha = 135^\circ$

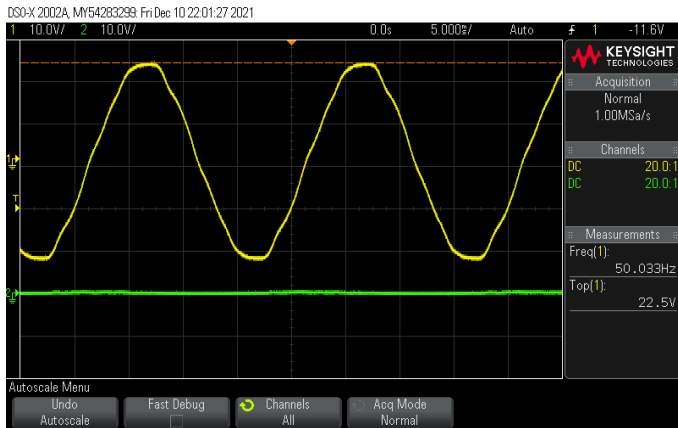


Figure 24. Visualisation V_{th} & I_{th} , $\alpha = 180^\circ$

Chronogrammes tension V_{th} et courant I_{th} pour une charge RL:

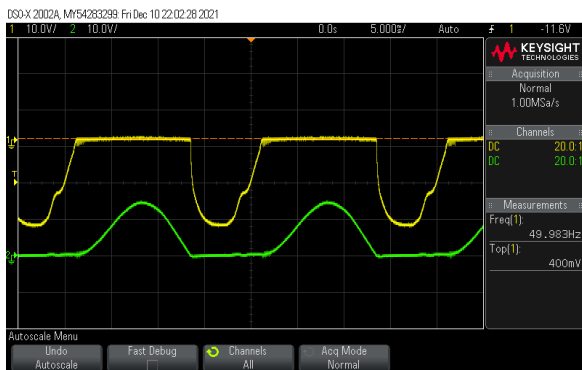


Figure 25. Visualisation V_{th} & I_{th} (RL), $\alpha = 0^\circ$

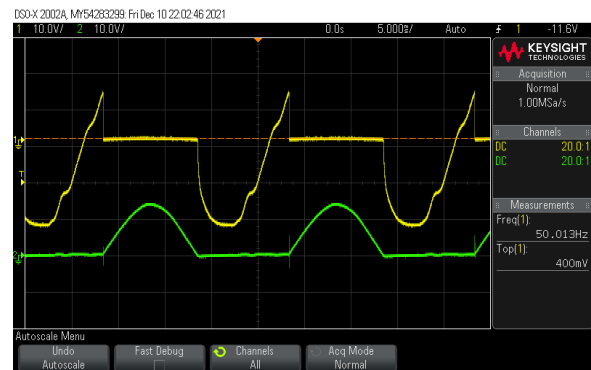


Figure 26. Visualisation V_{th} & I_{th} (RL), $\alpha = 45^\circ$

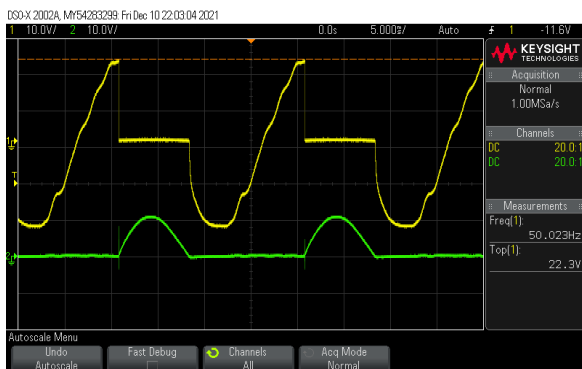


Figure 27. Visualisation V_{th} & I_{th} (RL), $\alpha = 90^\circ$

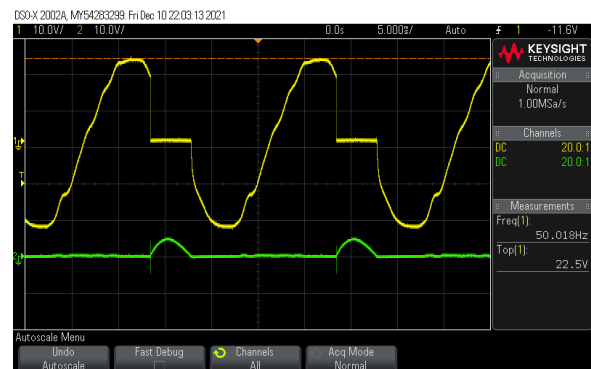


Figure 28. Visualisation V_{th} & I_{th} (RL), $\alpha = 135^\circ$

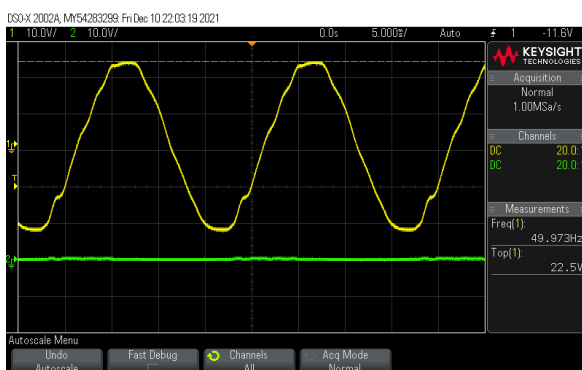


Figure 29. Visualisation V_{th} & I_{th} (RL), $\alpha = 180^\circ$

Remarque:

On sait que le thyristor est passant si la tension aux bornes est supérieur à 0 ainsi que la commande est envoyé à la gâchette. Le thyristor est bloqué si la tension aux bornes est supérieur à 0 et que la commande n'a pas été envoyée, ou si le courant passe à 0.

Charge R:

Étant donné qu'il n'y a pas d'inductance qui peut assurer la continuité du courant, le courant dans le circuit est donc discontinu. Le courant étant en phase avec la tension, il s'annule quand la tension d'entrée passe à 0. Pendant une période, c'est-à-dire pour $\theta \in [0, 2\pi]$, le thyristor est donc passant pour $\theta \in [\alpha, \pi]$, bloqué pour $\theta \in [\pi, 2\pi]$. Quand il est passant, la tension à ses bornes est nulle, quand il est bloqué, il n'y a pas de courant dans le circuit et $V_{th} = V_e$ d'après la loi des mailles.

Charge RL:

On sait également que le thyristor est passant pour $\theta \in [\alpha, \beta]$, les deux instants spécifiés dans la figure 19, et bloqué sinon.

Pendant une période, $\theta \in [0, 2\pi]$, quand le thyristor est passant (pour $\theta \in [\alpha, \beta]$), le courant $I_{th} = I_s$ n'est pas nul. Étant donné que le thyristor est passant, la tension à ses bornes V_{th} est évidemment nulle. pour $\theta \in [0, \alpha]$ et $[\beta, 2\pi]$, le thyristor est bloqué et donc il n'y a pas de courant dans le circuit car il est équivalent à un circuit ouvert. Par conséquent, $V_{th} = V_e$ d'après la loi des mailles. Cela explique donc les formes de la tension V_{th} et du courant I_s .

Partie B: Redressement double alternance - pont de Graetz**8) Montage**

On fait le câblage pour réaliser le montage suivant:

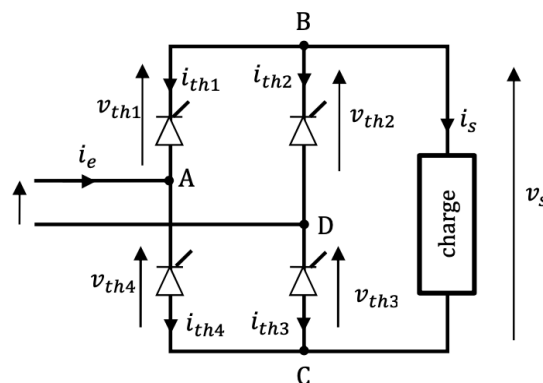


Figure 30. pont de Graetz

Il s'agit d'un pont redresseur commandé monophasé, on met en entrée $V_e = 15\text{ V}$ et une charge $R = 10\ \Omega$.

9) Schéma de principe

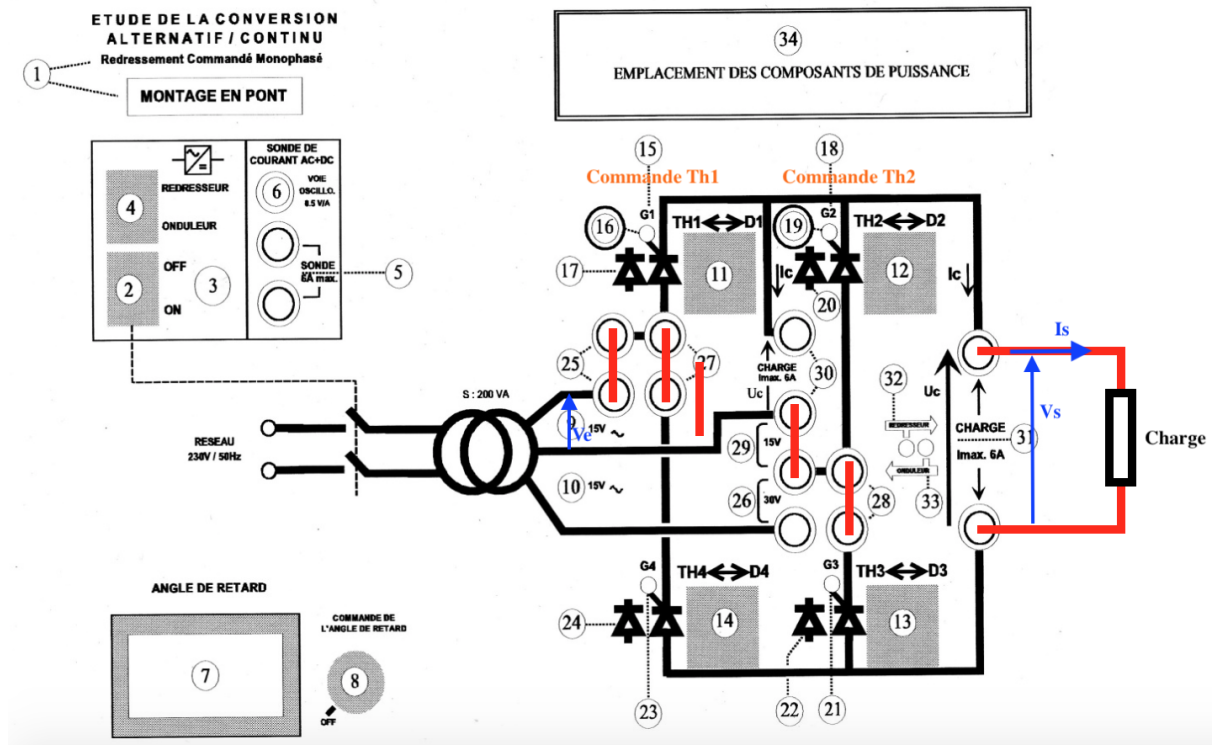


Figure 31. Schéma de principe - pont de Graetz

10) Chronogrammes des signaux de commandes Th1 et Th2 pour $\alpha = 0^\circ$ 45° et 90°

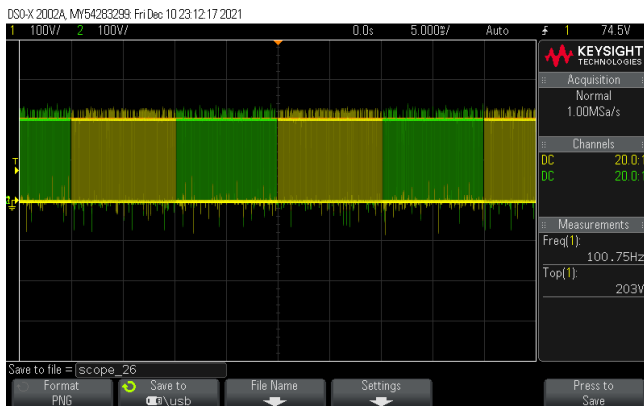


Figure 32. Visualisation commandes Th1 et Th2 $\alpha = 0^\circ$

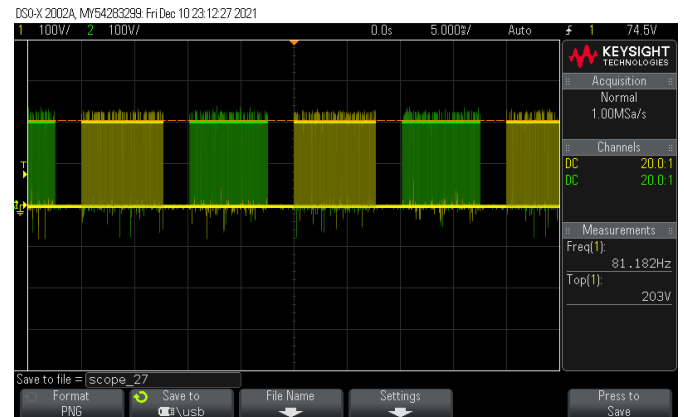


Figure 33. Visualisation commandes Th1 et Th2 $\alpha = 45^\circ$

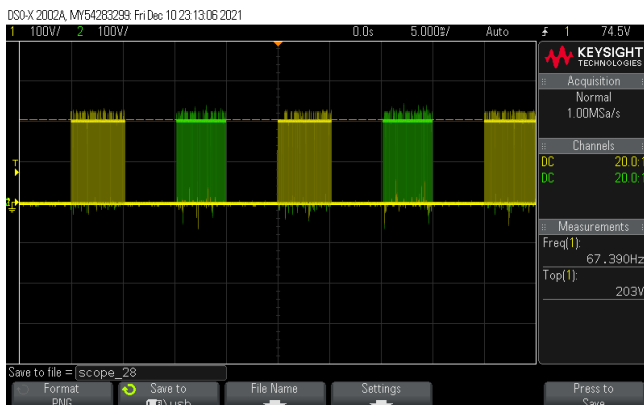


Figure 34. Visualisation commandes Th1 et Th2 $\alpha = 90^\circ$

Remarque: Le signal de commande de Th3 est le même que celui de Th1, le signal de commande de Th4 est le même que celui de Th2.

11) Chronogrammes commande de Th1 & tension Vs, charge R

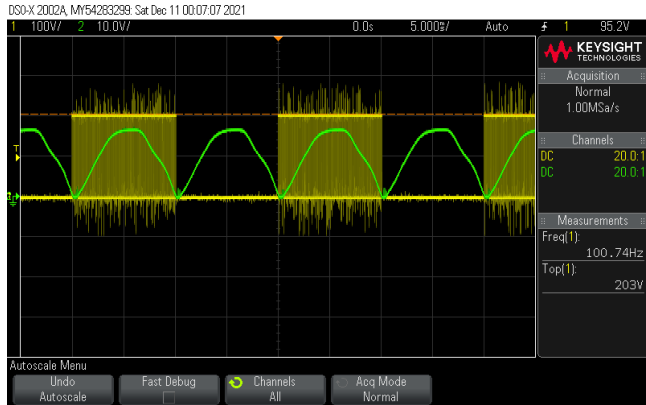


Figure 35. Visualisation commandes Th1 et Vs $\alpha = 0^\circ$

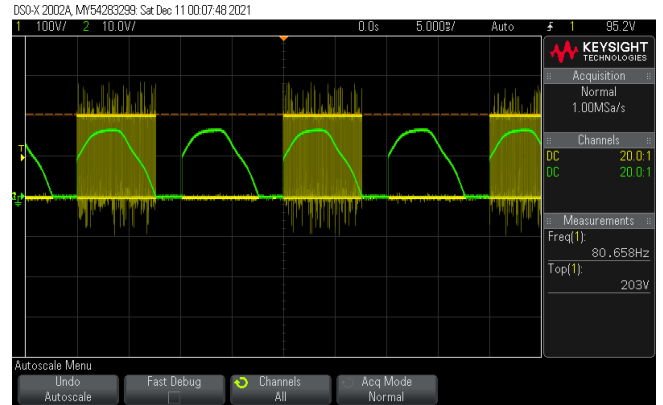


Figure 36. Visualisation commandes Th1 et Vs $\alpha = 45^\circ$

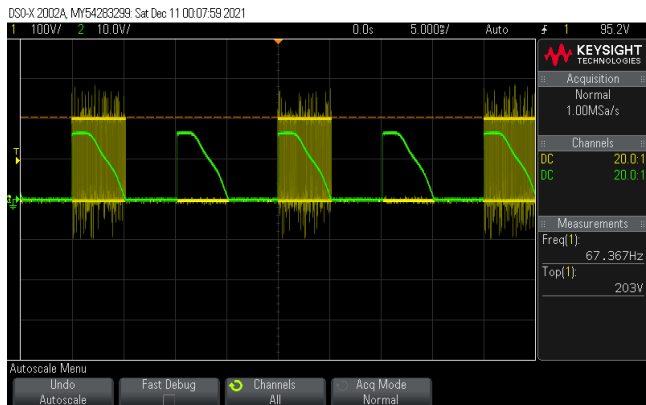


Figure 37. Visualisation commandes Th1 et Vs $\alpha = 90^\circ$

Chronogrammes commande de Th1 & tension Vs, charge RL

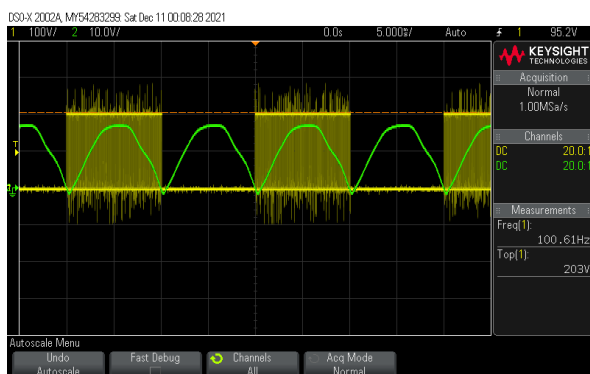


Figure 38. Visualisation commandes Th1 et Vs $\alpha = 0^\circ$

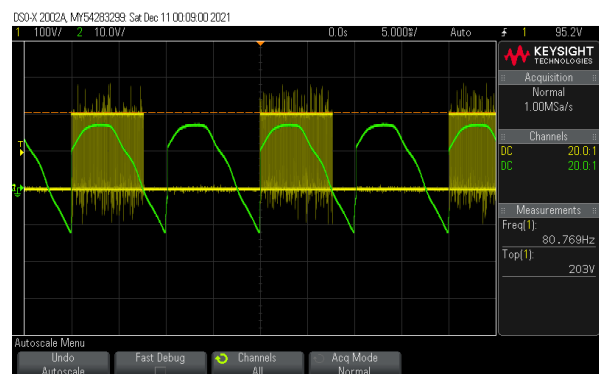


Figure 39. Visualisation commandes Th1 et Vs $\alpha = 45^\circ$

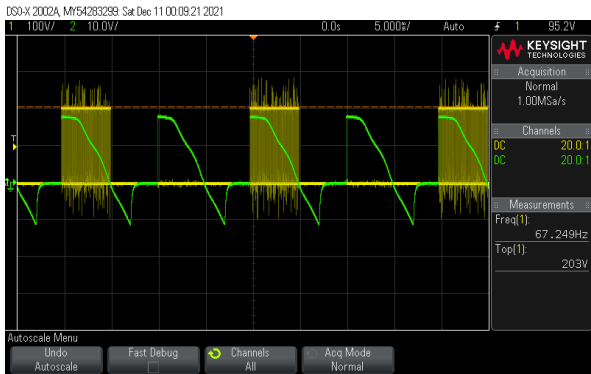
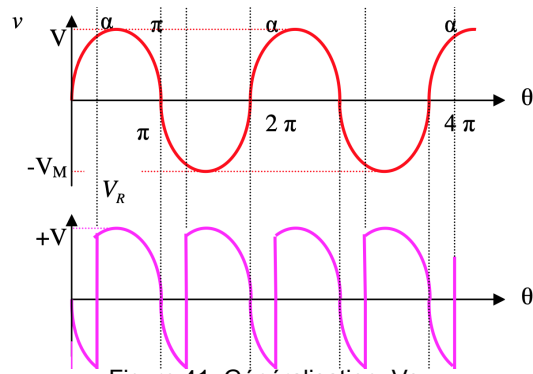

Figure 40. Visualisation commandes Th1 et Vs $\alpha = 90^\circ$


Figure 41. Généralisation: Vs

Remarque et explications:

Le signal de commande de Th1 est périodique et la première impulsion correspond à l'amorçage du thyristor.

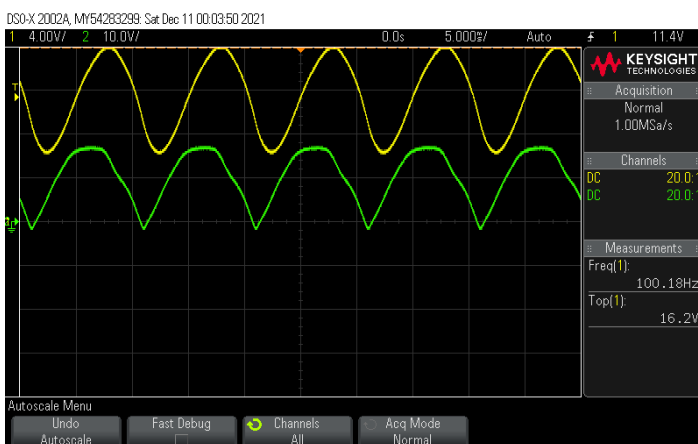
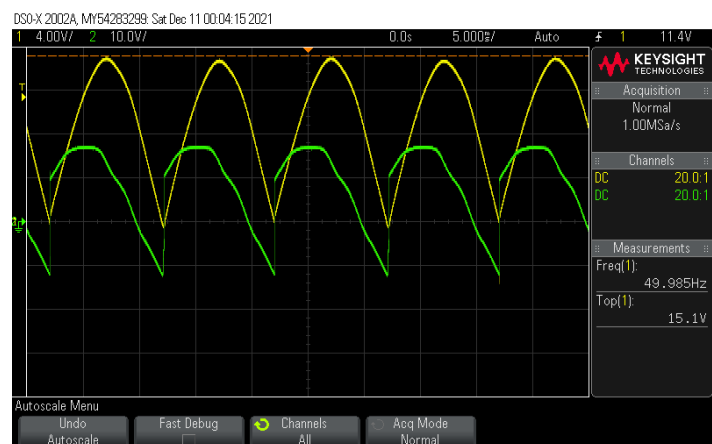
L'état des thyristors: pendant une période de $[0, 2\pi]$, Th1 et Th3 sont passants dans l'intervalle $[\alpha, \pi + \alpha]$, Th2 et Th4 sont bloqués. Ensuite à $\pi + \alpha$, Th2 et Th4 sont amorcés donc Th2 et Th4 sont passants, Th1 et Th3 sont bloqués.

Dans le cas d'une charge R, le courant est discontinu et dans le cas d'une charge RL, l'inductance peut assurer la continuité du courant donc quand V_e passe à 0 (de positif à négatif), Th1 et Th3 continuent à conduire avant que le courant s'annule, donc $V_s = V_e$. Quand V_e devient négatif et quand on amorce Th2 et Th4, $V_s = -V_e$.

12) Les chronogrammes tension Vs & courant Is pour charge R:

Dans le cas d'une charge R, la forme de Is est la même que celle de Vs. Les chronogrammes de Vs sont déjà disponibles dans la section 11).

Les chronogrammes tension Vs & courant Is pour charge RL: (Vs en vert et Is en jaune)


Figure 42. Visualisation Vs et Is $\alpha = 0^\circ$

Figure 43. Visualisation Vs et Is $\alpha = 45^\circ$

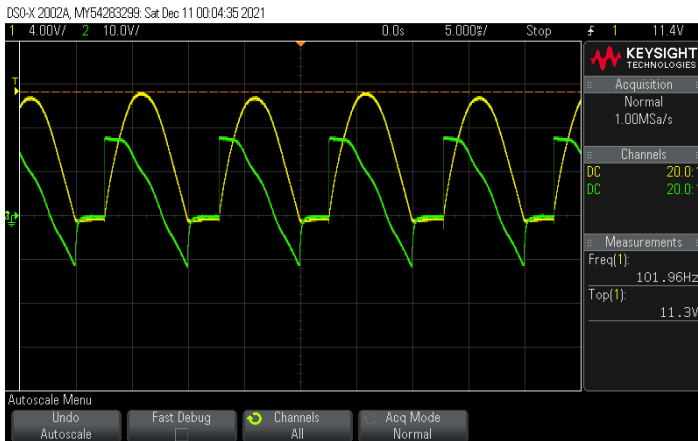


Figure 44. Visualisation V_s et I_s $\alpha = 90^\circ$

Remarque et explications:

Dans le cas d'une charge R, il n'y a pas d'inductance qui assure la continuité du courant, le courant I_s est donc discontinu. Le signal de commande de Th1 est périodique et la première impulsion correspond à l'amorçage du thyristor. Quand $V_e > 0$, le thyristor Th1 est amorçable et quand $V_e < 0$, le thyristor Th2 est amorçable. Avant l'amorçage, le thyristor ne conduit pas donc la tension de sortie est nulle. Quand le thyristor est passant, le circuit est fermé donc $V_s = V_e$ quand $V_e > 0$ (Th1 et Th3 passants) et $V_s = -V_e$ quand $V_e < 0$ (Th2 et Th4 passants).

Dans le cas d'une charge RL, l'inductance peut assurer la continuité de courant et en raison du déphasage entre le courant et la tension, quand $V_e > 0$ et au moment où V_e passe à 0, les thyristors Th1 et Th3 peuvent continuer à conduire avant que le courant I_s s'annule, jusqu'à ce que les thyristors Th2 et Th4 sont amorcés ($V_e < 0$). Par contre, il y a une valeur critique de l'angle α : 90° car au mieux, pour une inductance pure, le déphasage entre le courant et la tension est 90° , une charge RL a bien une valeur de déphasage inférieure, donc au delà de 90° , la continuité de courant ne peut plus être assurée (sauf si on a une source de tension E dans la charge).

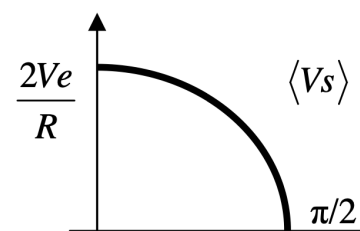
13) Valeur moyenne de la tension de sortie:

$$\langle V_s \rangle = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \pi} V_e \sin \theta d\theta = \frac{V_e}{\pi} [-\cos \theta]_{\alpha}^{\alpha + \pi} \Rightarrow \langle V_s \rangle = \frac{2V_e \cos \alpha}{\pi}$$

avec $V_e = \sqrt{2}V$

On a aussi $\langle I_s \rangle = \frac{\langle V_s \rangle}{R}$

On constate que la valeur moyenne de la tension de sortie est variable en fonction de l'angle de retard à l'amorçage donc il s'agit d'un redresseur commandé.



Charge R

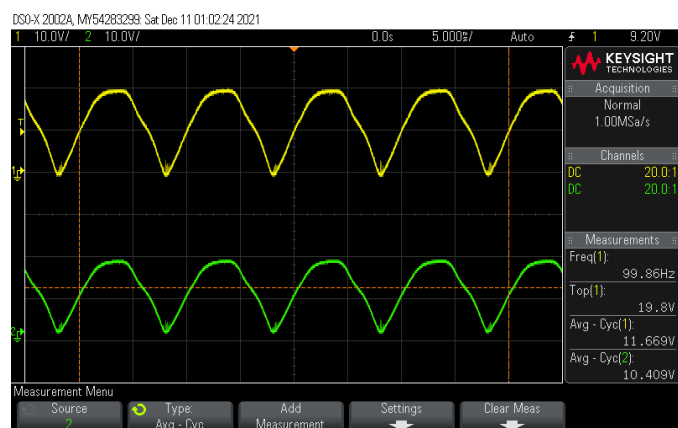


Figure 45. Visualisation $\langle V_s \rangle$ et $\langle I_s \rangle$ $\alpha = 0^\circ$

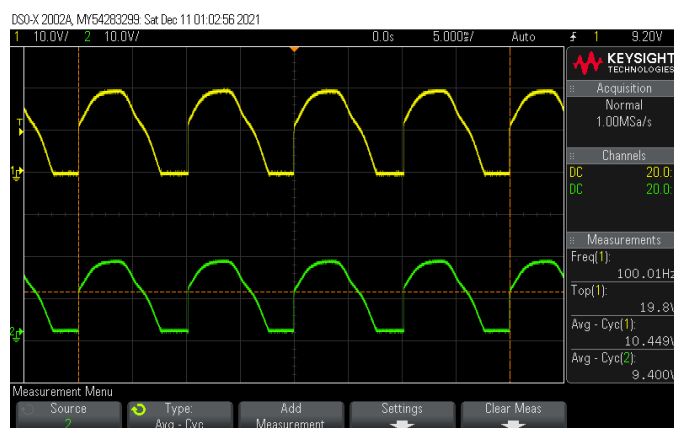


Figure 46. Visualisation $\langle V_s \rangle$ et $\langle I_s \rangle$ $\alpha = 45^\circ$

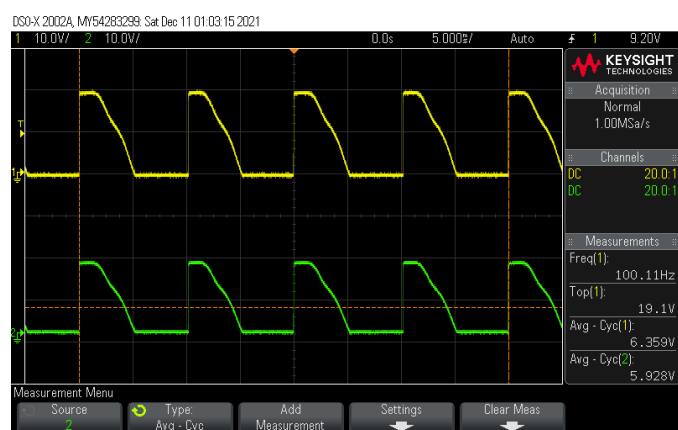


Figure 46. Visualisation $\langle V_s \rangle$ et $\langle I_s \rangle$ $\alpha = 90^\circ$

Charge RL

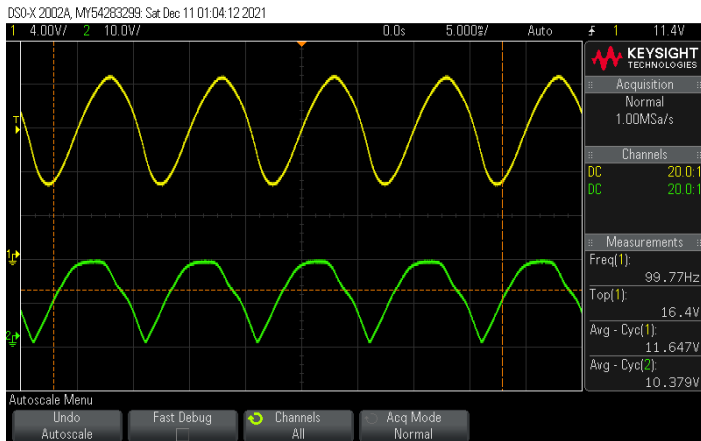


Figure 47. Visualisation $\langle V_s \rangle$ et $\langle I_s \rangle$ $\alpha = 0^\circ$

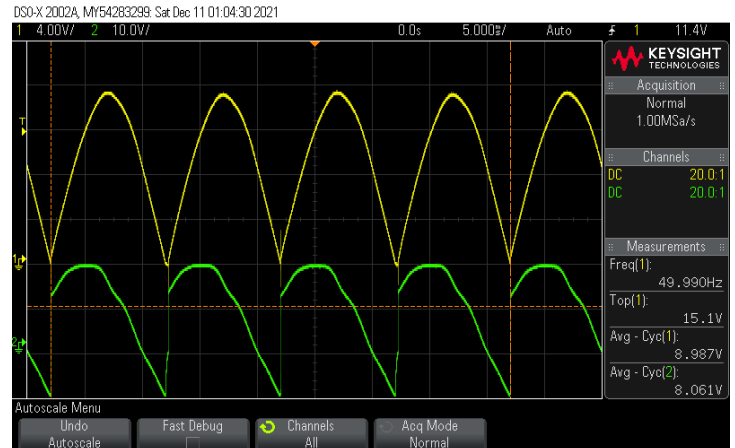


Figure 48. Visualisation $\langle V_s \rangle$ et $\langle I_s \rangle$ $\alpha = 45^\circ$

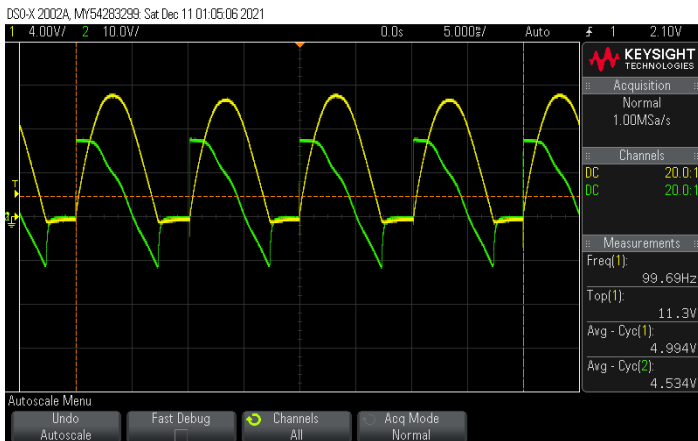


Figure 49. Visualisation $\langle V_s \rangle$ et $\langle I_s \rangle$ $\alpha = 90^\circ$

IV. Conclusion du TP

À travers ce TP nous avons étudié le principe de fonctionnement du pont Graëtz, le redresseur commandé monophasé ainsi que l'influence de l'inductance dans la charge . Nous avons vérifié que les résultats trouvés expérimentalement correspondent aux prévisions.

ANNEXE: Code Matlab

```
clear all; clf;

% donnees
V = 15;
R = 10;
f = 50;
omega = 2*pi*f;
L = 0.03;
alpha = 60;

% Chronogramme de Ve
theta = linspace(0,360,1000);
Ve = V * sqrt(2) * sind(theta);
figure(1)
subplot(2,2,1);
p1 = plot(theta,Ve,'LineWidth',2.0);
set(p1,'Color',[0 0.6 0.3]),grid on
legend('Ve');
xlabel('Theta [°]');
ylabel('Tension [V]');
xticks([0 90 180 270 360]) % specify axis tick values
xlim([-20 370])
ylim([-V*sqrt(2)*1.5 V*sqrt(2)*1.5])

% Chronogramme de Is
K = sqrt(2)*V*exp(R*alpha/(L*omega))*((L*omega/(R^2+(L*omega)^2))...
    *cosd(alpha) - (R/(R^2+(L*omega)^2))*sind(alpha));
Is = max((R/(R^2+(L*omega)^2))*V*sqrt(2)*sind(theta) - ...
    (L*omega/(R^2+(L*omega)^2))*V*sqrt(2)...
    *cosd(theta) + K*exp(-R*theta/(L*omega)),0);
% Is = 0.*(theta<alpha & theta>180+alpha)+((R/(R^2+(L*omega)^2))*V*sqrt(2)*sind(theta) - ...
% (L*omega/(R^2+(L*omega)^2))*V*sqrt(2)...
% *cosd(theta) + K*exp(-R*theta/(L*omega))) .* (theta>=alpha&theta<=180+alpha);
subplot(2,2,4);
p2 = plot(theta,Is,'LineWidth',2.0);
set(p2,'Color',[0 0.2 1]),grid on
legend('Is,Ith');
xlabel('Theta [°]');
ylabel('Tension [V]');
xticks([0 90 180 270 360]) % specify axis tick values
xlim([-20 370])

% Chronogramme de Vs
ix = Is>0; % variable logique - detection Is > 0
Vs = ix.*Ve; % Vs = Ve quand Is > 0 et 0 sinon
subplot(2,2,2);
p3 = plot(theta,Vs,'LineWidth',2.0);
set(p3,'Color',[1 0.2 0.2]),grid on
legend('Vs');
```



```

xlabel('Thetha [°]');
ylabel('Tension [V]');
xticks([0 90 180 270 360]) % spicify axis tick values
xlim([-20 370])

% Chronogramme de Vth
Vth = Ve - Vs;
subplot(2,2,3);
p4 = plot(thetha,Vth,'LineWidth',2.0);
set(p4,'Color',[1 0.5 0]),grid on;
legend('Vth');
xlabel('Thetha [°]');
ylabel('Tension [V]');
xticks([0 90 180 270 360]) % spicify axis tick values
xlim([-20 370])

txt = ['Chronogramme pour  $\alpha =$ ',num2str(alpha),'°'];
sgtitle(txt); % Titre de la figure des 4 subplots

```