

Compte-rendu TP2

Etude d'un onduleur en pont monophasé

I. Introduction

Lors de ce TP, nous nous intéresserons à l'onduleur monophasé, ce qui est un convertisseur DC/AC. Nous étudierons en détail les points suivants:

- Principe de fonctionnement
- Analyse spectrale de la tension alternative générée
- Influence de la charge sur le spectre du courant

II. Préparation

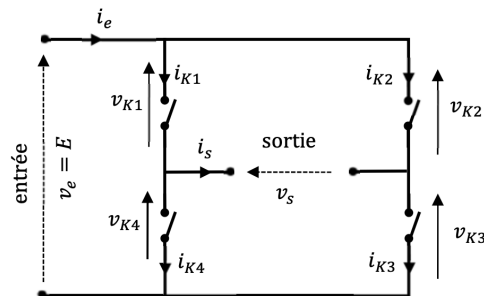


Figure 1. Schéma de principe de l'onduleur

On va étudier en premier lieu l'onduleur représenté sur le schéma ci-dessus. L'onduleur est constitué de 2 cellules de commutation: K1/K4 et K2/K3. Nous étudions l'onduleur à commande décalée, c'est à dire pour le bit de commande bi:

$b1 = 1$ sur l'intervalle $[0, \pi[$ et $b1 = 0$ sur l'intervalle $[\pi, 2\pi[$

$b3 = 1$ sur l'intervalle $[d, \pi+d[$ et $b3 = 0$ sur l'intervalle $[\pi+d, 2\pi+d[$

Ce qui nous donne les séquences des interrupteurs K_i :

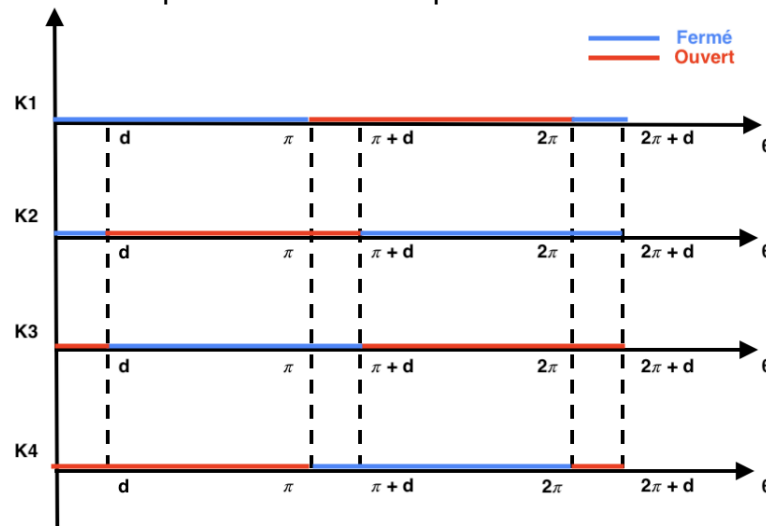


Figure 2. Séquences de fermeture des interrupteurs

1) Chronogramme de tension

On trace d'abord le chronogramme de la tension de sortie vs sur l'intervalle $[-2\pi, 2\pi[$ sur Matlab, en prenant par exemple $d = \pi/4$ et $E = 24V$:

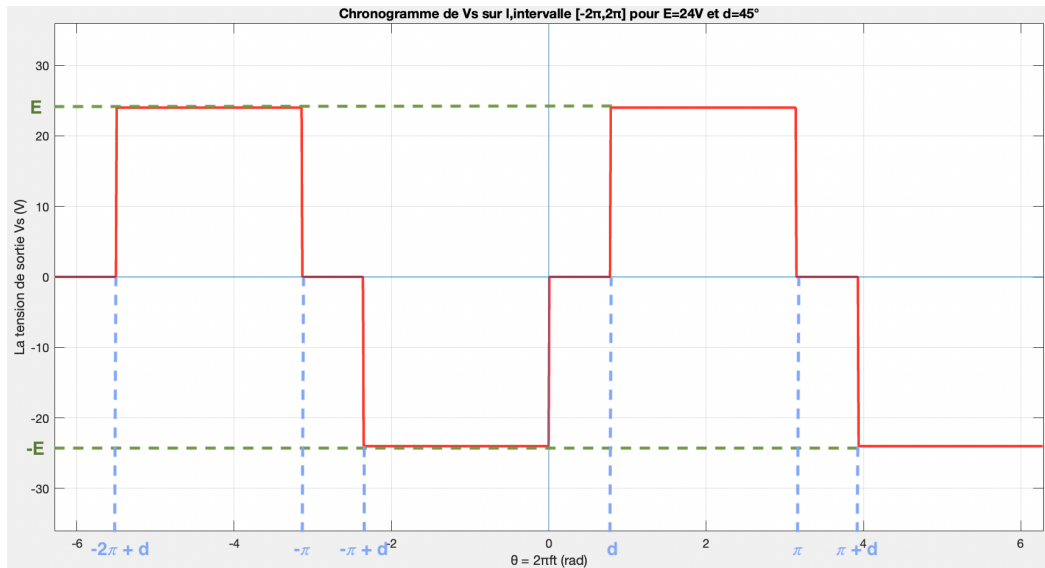


Figure 3. Chronogramme de Vs

2) Le spectre de la tension Vs

On prend ensuite $E = 24 \text{ V}$ pour tracer son spectre par Matlab: $V_n = \frac{2\sqrt{2}E}{n\pi} \cdot \cos\left(n \frac{d}{2}\right)$

si n est impair et 0 sinon.

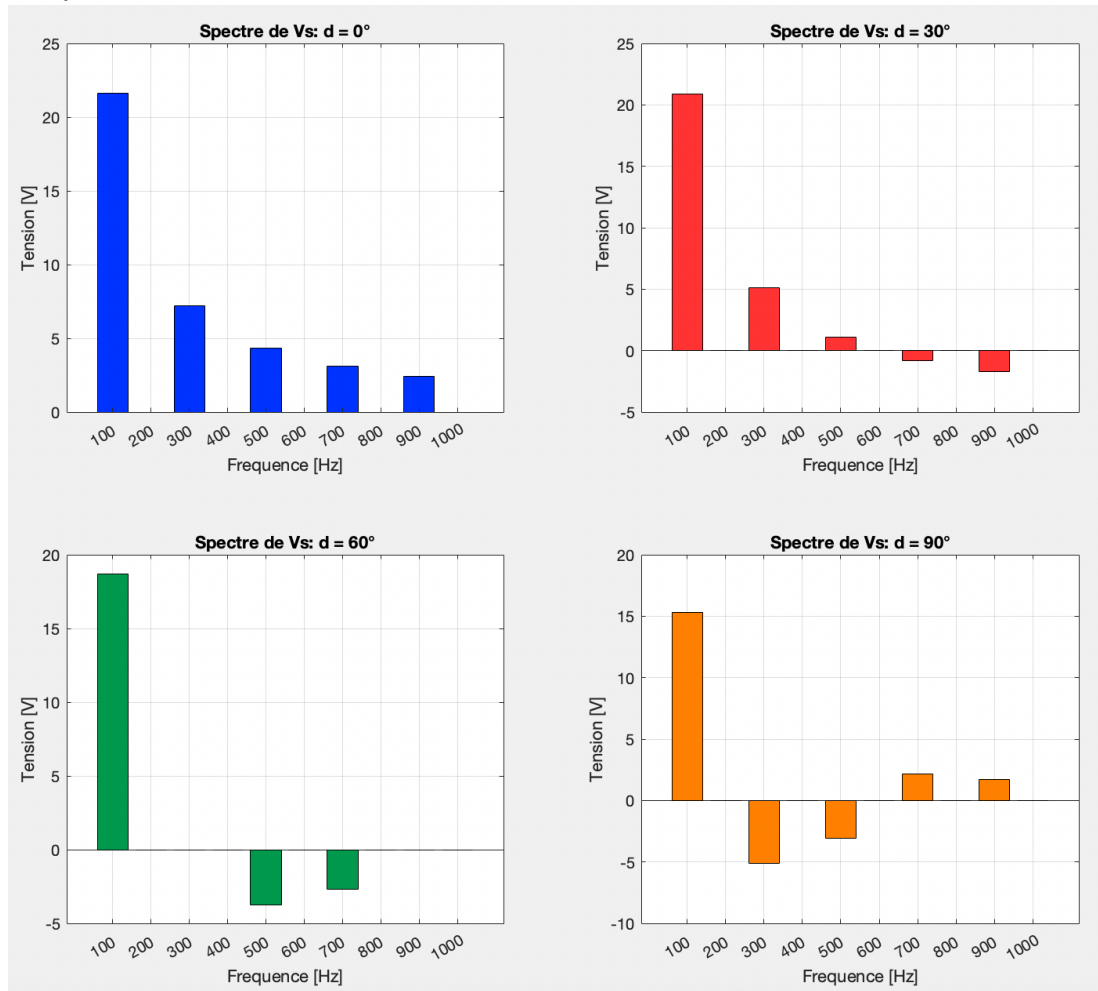


Figure 4. Spectre de Vs

Remarque: On peut faire varier le contenu spectral en jouant sur l'angle d . On peut aussi annuler certains rangs harmoniques pour certaines valeurs de d .

On place ensuite une charge RL en sortie d'onduleur. Prenons $R = 12 \Omega$, $L = 10 \text{ mH}$ et $f = 100 \text{ Hz}$ ainsi que les valeurs de d que l'on a prises dans la partie précédente pour la tension V_s .

2) Le spectre du courant I_s

On peut donc ensuite tracer le spectre du courant sur Matlab de la même manière:

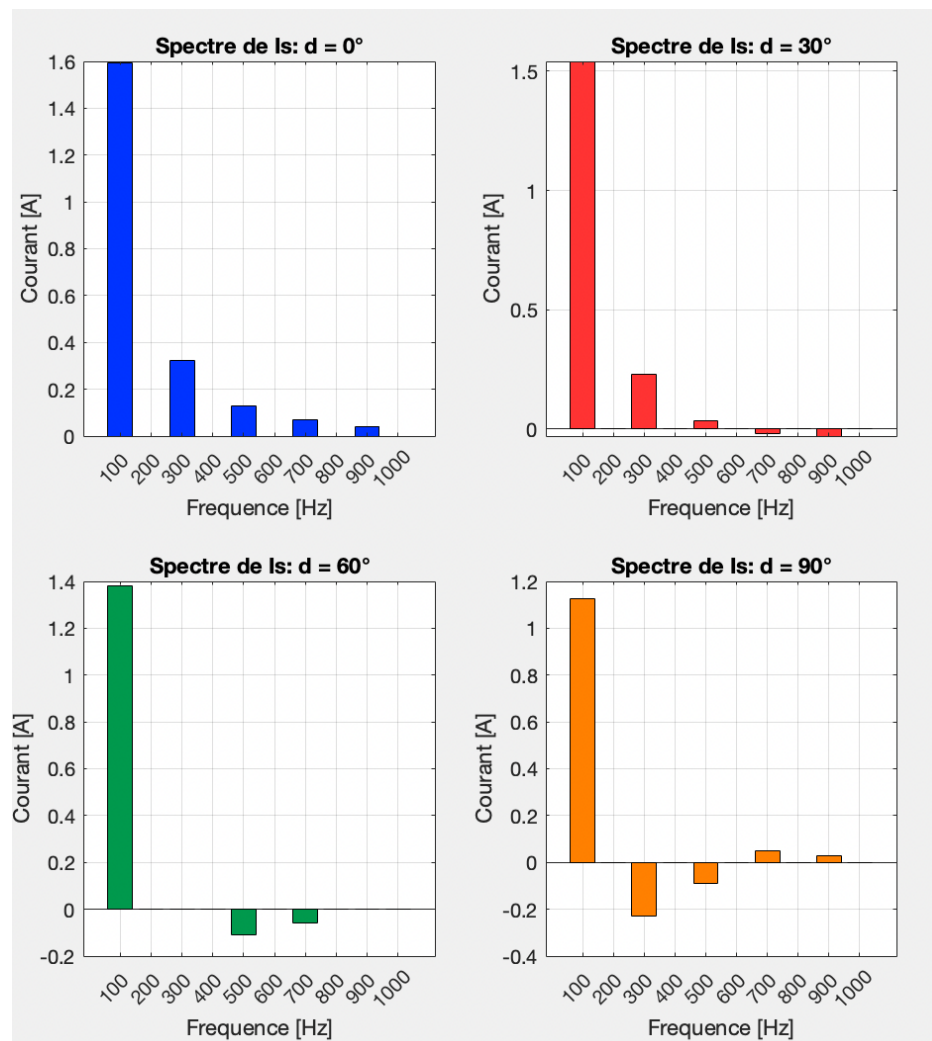


Figure 5. Spectre de I_s

Remarque: On constate que pour certaines valeurs de d , par exemple 60° , les harmoniques sont négligeables devant le fondamental, la forme du courant serait donc quasi sinusoïdale.

On remarque également qu'on obtient des valeurs de spectres négatives ce qui correspond à une valeur de phase négative. Pour retrouver les valeurs expérimentales en FFT il faudra prendre la valeur absolue des harmoniques.

III. Travail en séance

4) Repérer les différents éléments de la maquette

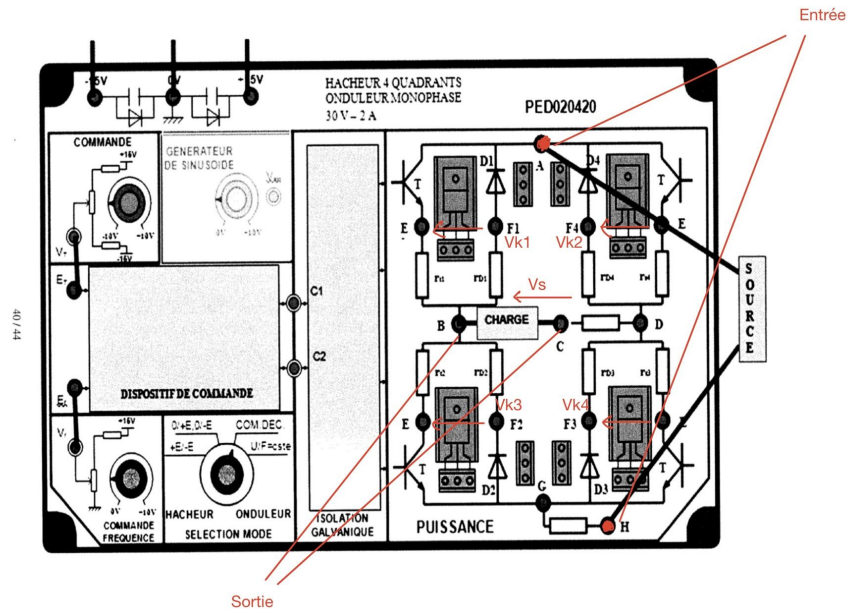


Figure 6. Câblage

5) Réalisation du câblage

On alimente la maquette de manière suivante:

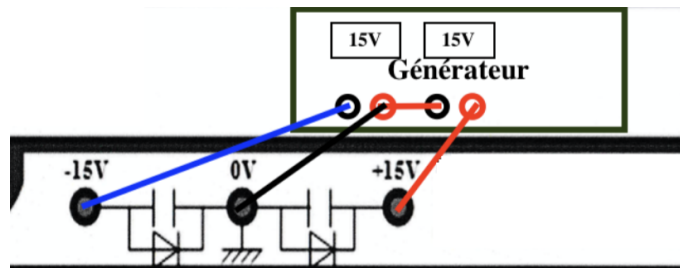


Figure 7. Alimentation de la maquette

Et on alimente l'entrée de l'onduleur avec tout simplement une source de tension continue de 20 V.

6) Visualisation:

- tension de sortie de l'onduleur v_0 :

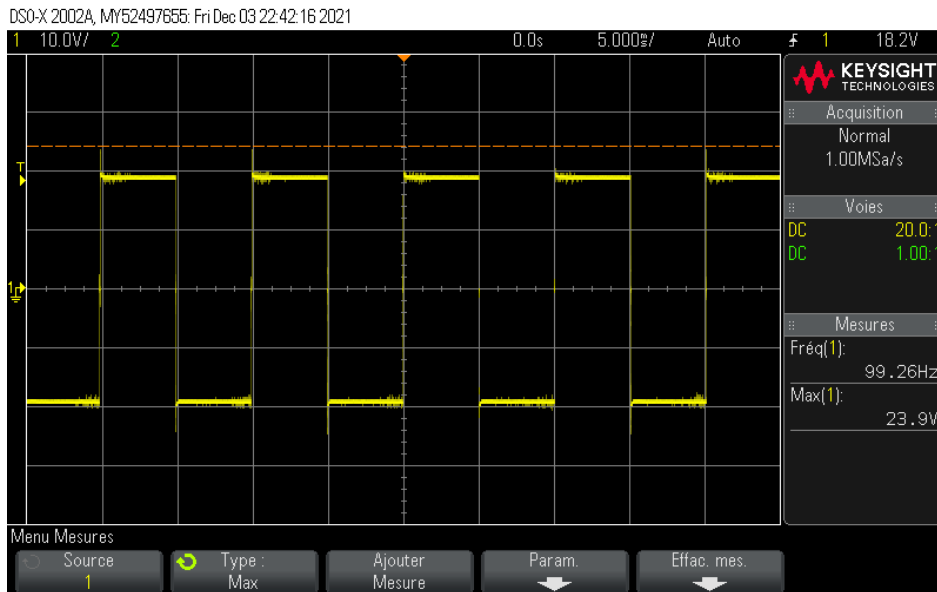


Figure 8. Allure de V_s sans charge

- courant de sortie de l'onduleur i_0 : Comme la visualisation de I_s nécessite de placer une charge résistive R (ce qui est fait dans les questions suivantes) on visualise le courant plus tard.
- tension aux bornes de l'interrupteur K_1 V_{k1} : Visualisation faite dans les questions suivantes du TP.
- courant traversant de l'interrupteur K_1 i_{k1} : Comme la visualisation de I_s nécessite de placer une charge résistive R (ce qui est fait dans les questions suivantes) on visualise le courant plus tard.

7) Charge RL

On régler le rhéostat à $20\ \Omega$ et l'inductance de 100mH

$$F_c = R / (2\pi L)$$

$$\text{Alors } F_c = 20 / (2\pi \cdot 0.1) = 31.83\ \text{Hz}$$

8) Relevés des chronogrammes de la tension V_s et du courant I_s :

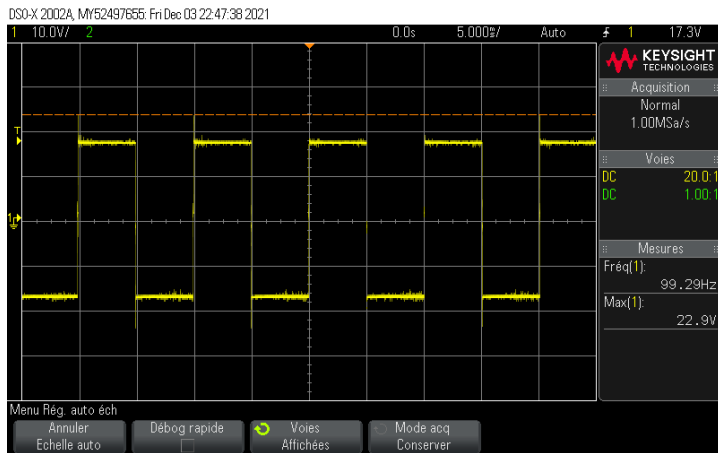


Figure 9. Visualisation de la tension V_s (R)

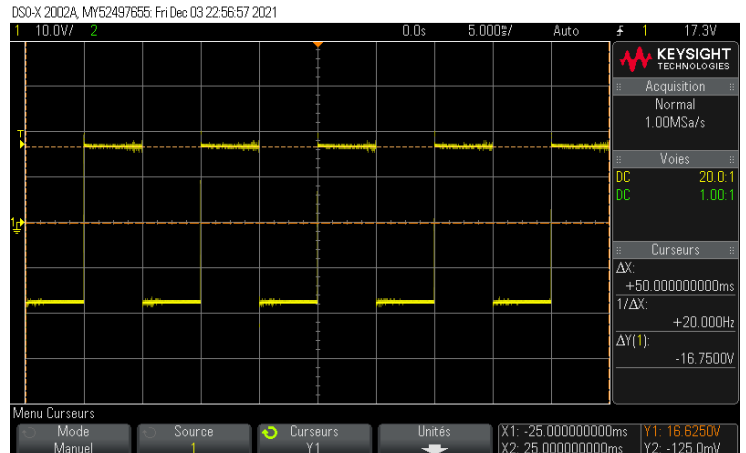


Figure 10. Visualisation de la tension V_s (RL)

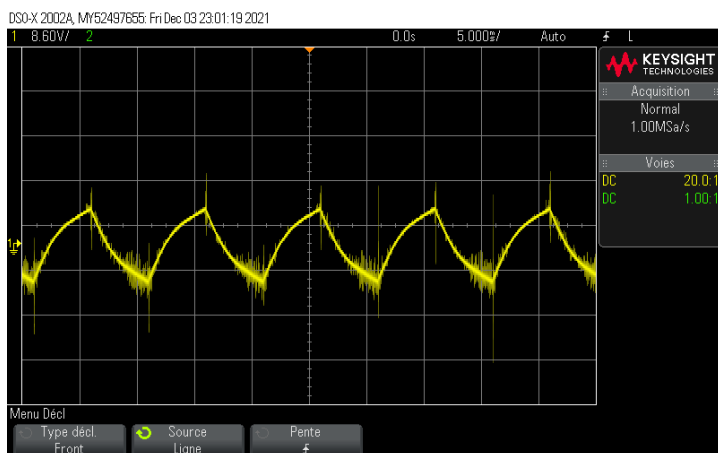


Figure 11. Visualisation de la tension I_s (R)

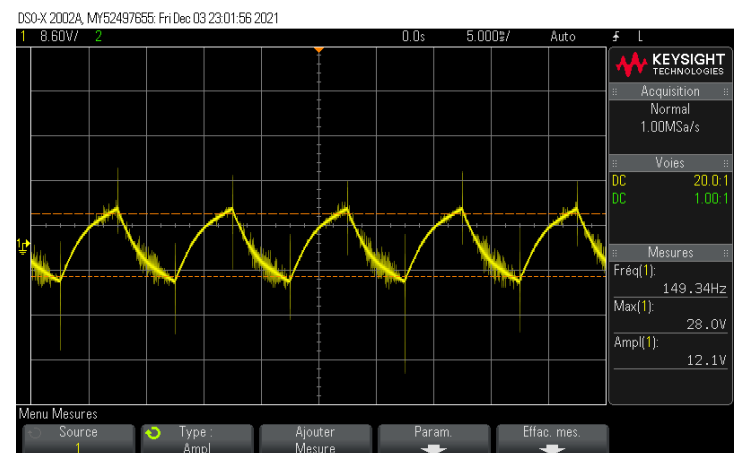


Figure 12. Visualisation de la tension I_s (RL)

Remarque:

Pour $d = 0$,

Quand t dans $[0, \pi]$, K_1 et K_3 sont fermés, K_2 et K_4 sont ouverts. V_s est positive et I_s diminue.

Quand t dans $[\pi, 2\pi]$, K_1 et K_3 sont ouverts, K_2 et K_4 sont fermés. V_s est négative et I_s augmente.

9) Visualisation des chronogrammes de la tension V_s et du courant I_s avec l'angle de décalage = $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

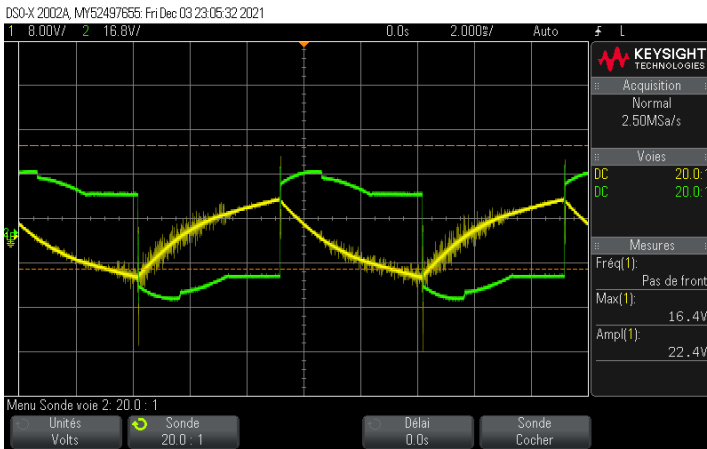


Figure 13. Visualisation V_s et I_s , angle = 0°

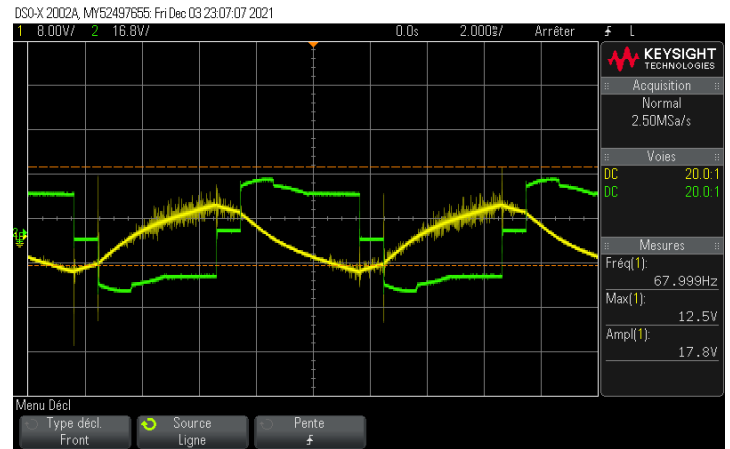


Figure 14. Visualisation V_s et I_s , angle = 30°

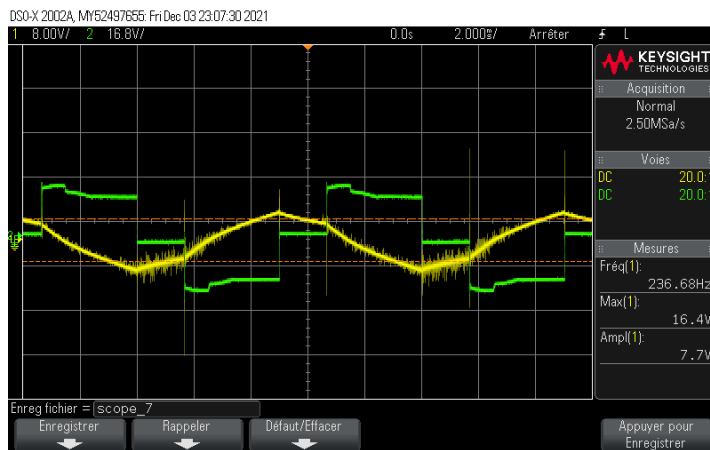


Figure 15. Visualisation V_s et I_s , angle = 60°

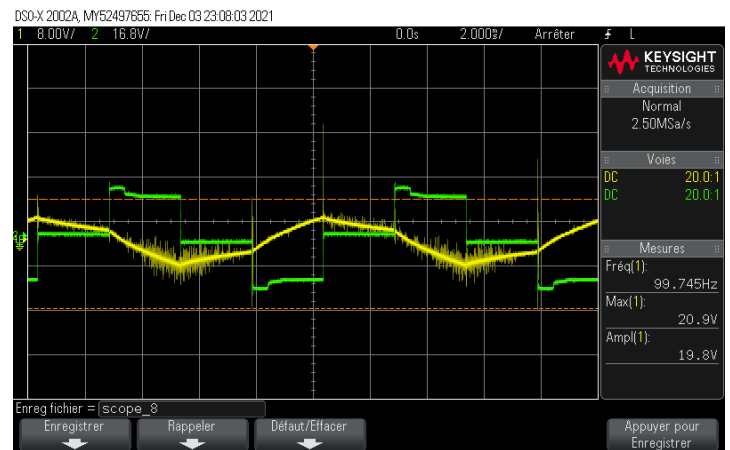


Figure 16. Visualisation V_s et I_s , angle = 90°

Remarque: On s'intéresse maintenant à l'influence d'angle, on a choisi $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$. Lorsqu'on change la valeur d'angle de décalage, les harmoniques de V_s et I_s changent et il existe une valeur de d qui peut amener certains rangs harmoniques à 0.

10) Visualisation des chronogrammes de la tension V_{k1} et du courant I_{k1} à l'angle de décalage = 90°

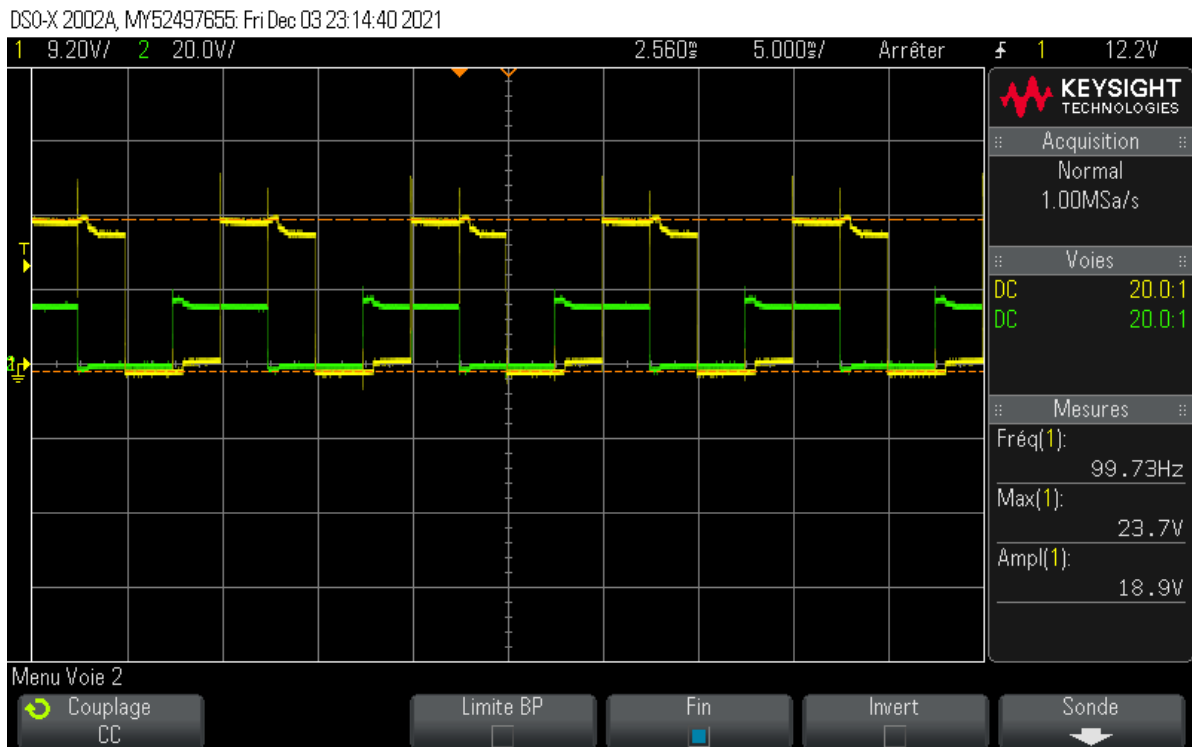


Figure 17. Visualisation V_{k1} et I_{k1} , angle = 90°

Remarque:

La courbe jaune correspond à V_{k1} et vert correspond à I_{k1} . Les tensions et les courants sont bien toujours supérieurs ou égale à 0.

Pour V_{k1} , quand t dans $[0, \pi]$ $V_{k1} = 0$ V, t dans $[\pi, 2\pi]$ $V_{k1} = E$

Pour I_{k1} , quand t dans $[d, \pi]$ I_{k1} est en état haut, car $K1$ et $K3$ sont fermés et quand t dans $[\pi, 2\pi+d]$ $I_{k1} = 0$ V car il y a un (ou les deux quand t dans $[\pi+d, 2\pi]$) interrupteur ouvert.

11)- Visualisation du spectre de Vs et de Is :

Les spectres de Vs :

- Pour $d = 0^\circ$:

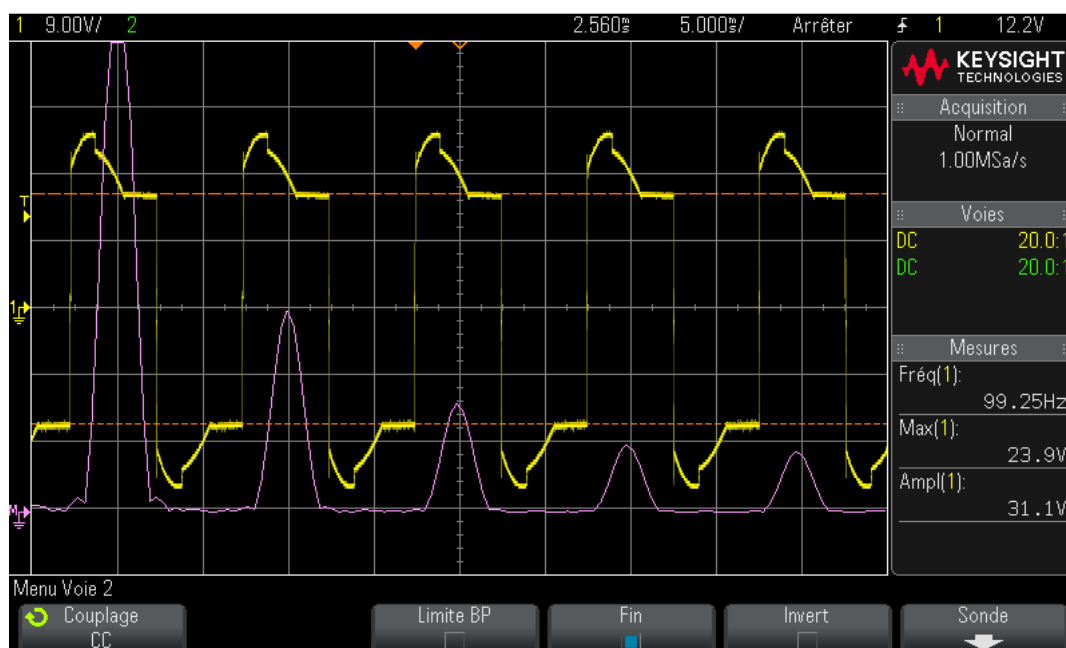


Figure 18. Le spectre de Vs ($d=0^\circ$)

- Pour $d = 45^\circ$:

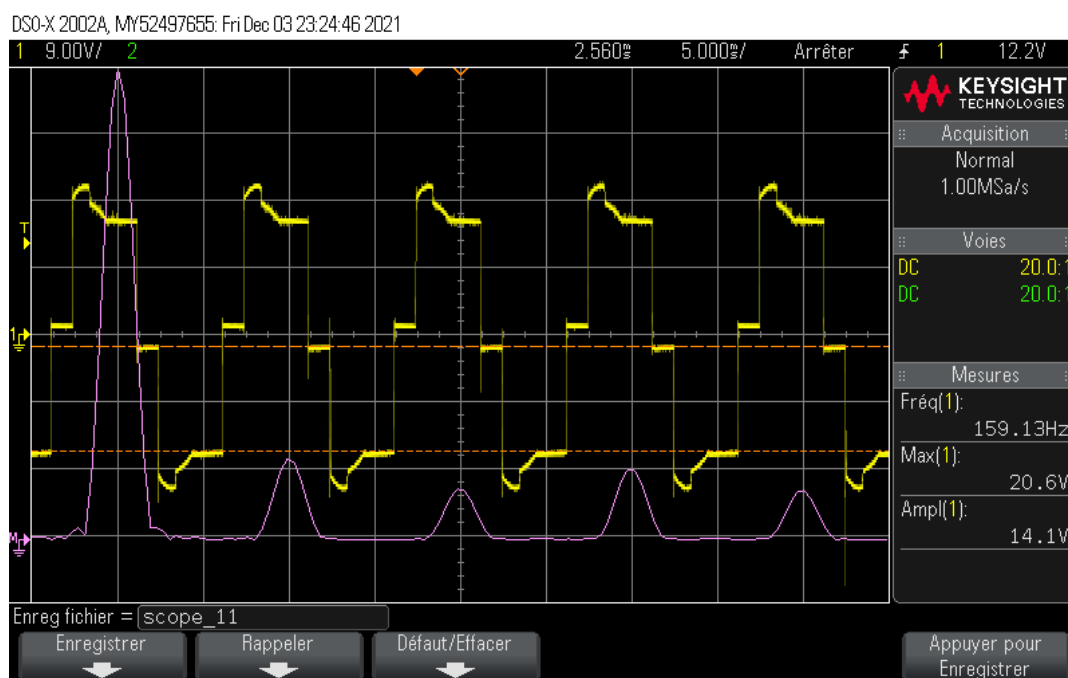


Figure 19. Le spectre de Vs ($d=45^\circ$)

- Pour $d = 90^\circ$:

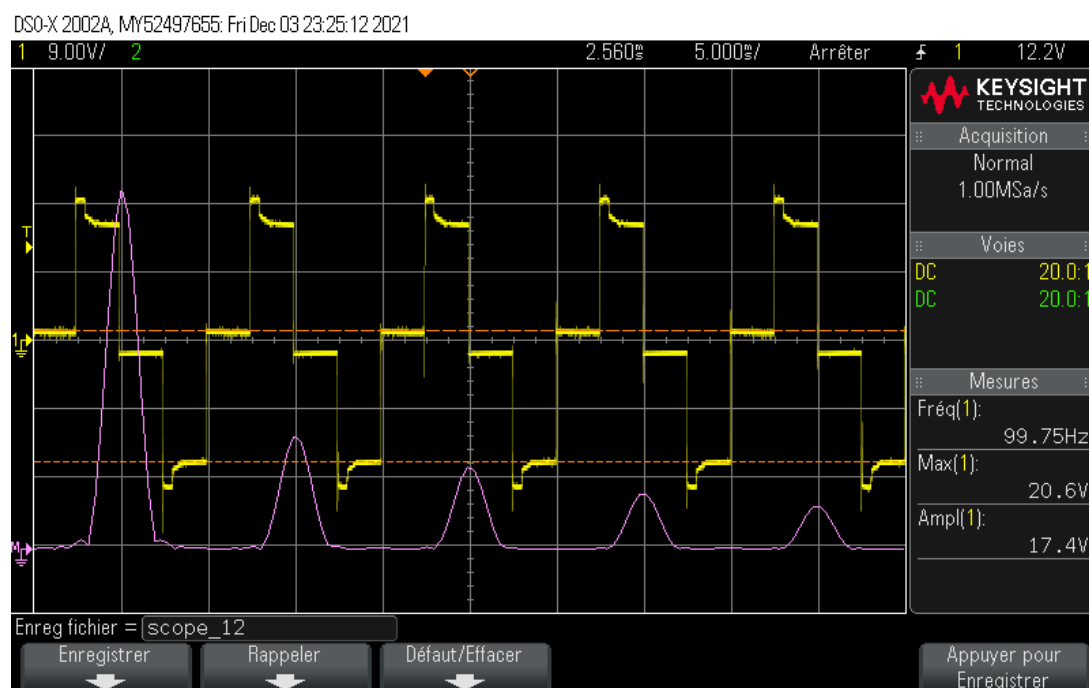


Figure 20. Le spectre de V_s ($d=90^\circ$)

Les spectres de I_s :

- Pour $d = 0^\circ$:

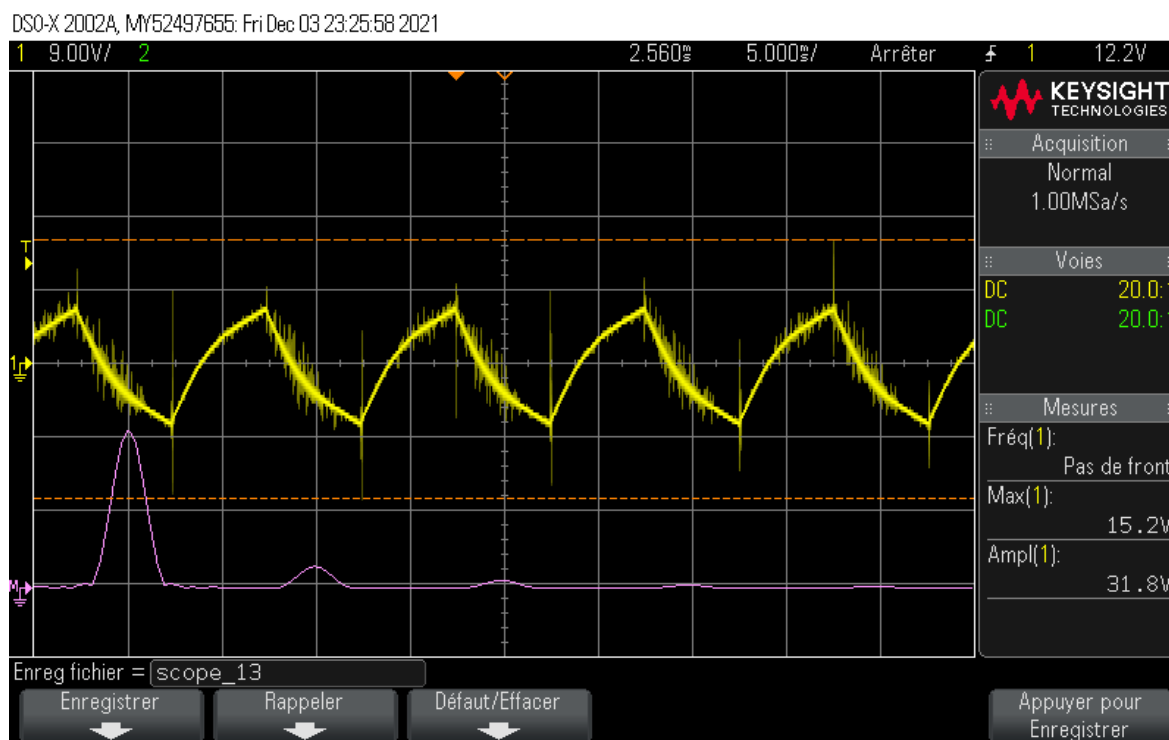


Figure 21. Le spectre de I_s ($d=0^\circ$)

- Pour $d = 45^\circ$:

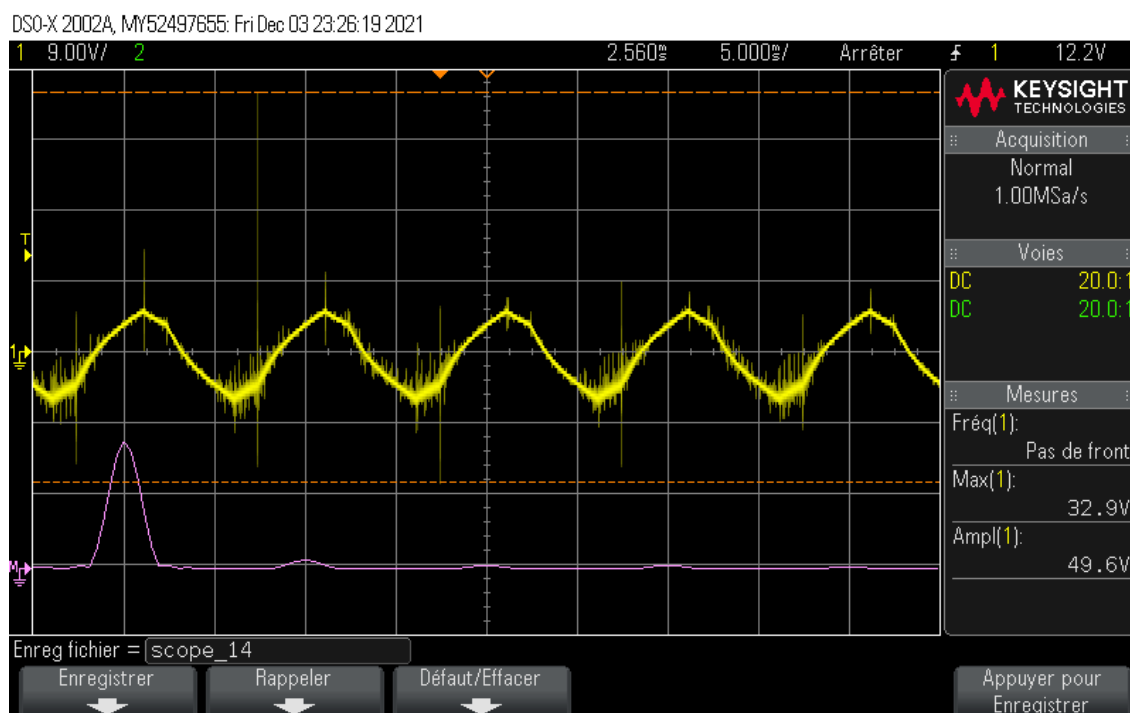


Figure 22. Le spectre de I_s ($d=45^\circ$)

- Pour $d = 90^\circ$:

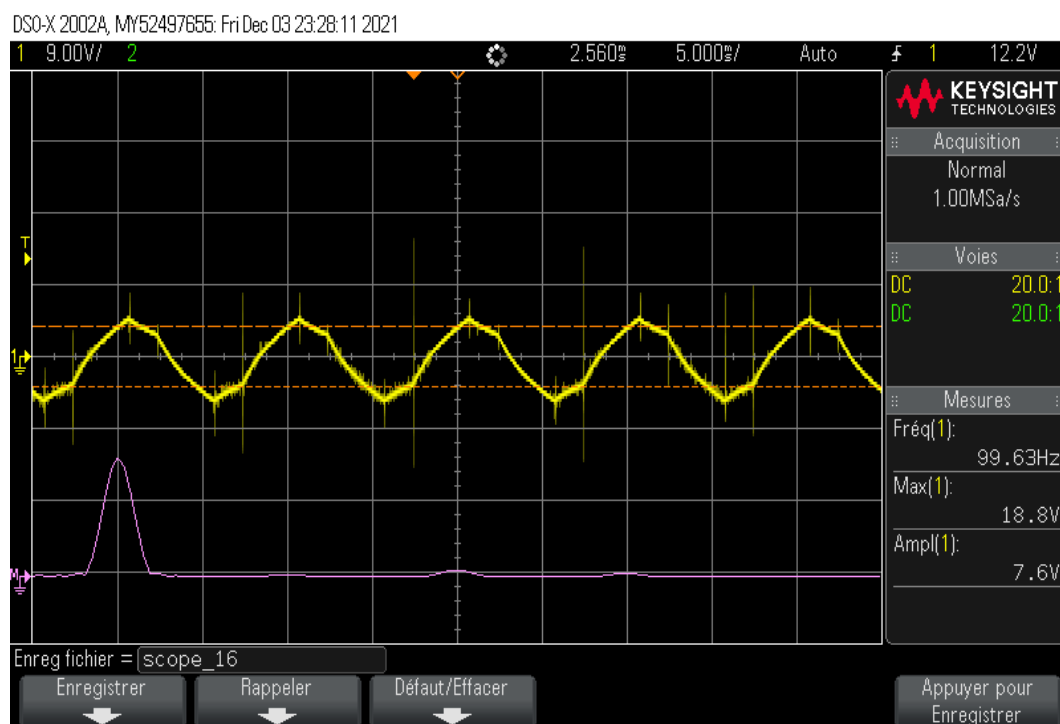


Figure 23. Le spectre de I_s ($d=90^\circ$)

12)- On remarque que les spectres du courant I_s sont analogues à ceux de tension V_s , ils ont les mêmes propriétés, c'est-à-dire plus on augmente l'angle de décalage plus la fondamentale diminue en amplitude. Les harmoniques ont une plus forte pollution.

On remarque également que le spectre de I_s décroît plus rapidement ce qui correspond à un meilleur taux de distorsion harmonique (TDH) ce qui est bien conforme à ce qu'on avait trouvé théoriquement.

13) Théoriquement on a trouvé que pour un angle de décalage $d = 60$ on a l'harmonique de $n = 3$ nulle pour V_s .

On retrouve bien ce résultat expérimentalement comme le démontre la figure ci-dessous:

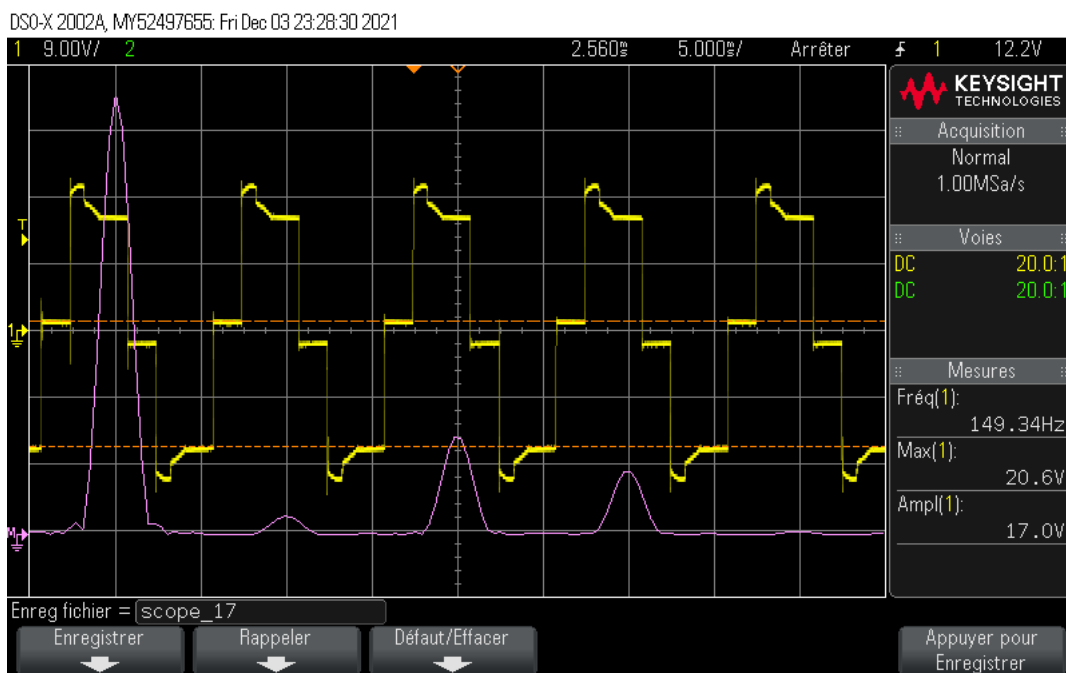


Figure 24. Les spectres de V_s (annulation de l'harmonique rang 3)

Donc les résultats trouvés théoriquement concordent avec la théorie à quelques erreurs près.

14) On alimente maintenant une charge RLC série. La charge étant alimentée par une tension sinusoïdale de valeur efficace V et de fréquence f , on peut déterminer les valeurs efficaces du courant et de la tension aux bornes de la résistance, de l'inductance et du condensateur:

$$|U_l| = |V| \left| \frac{jL\omega}{R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega}} \right| = V \frac{L\omega}{\sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}}$$

$$|U_r| = |V| \left| \frac{R}{R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega}} \right| = V \frac{R}{\sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}}$$

$$|Il| = |Ir| = |Ic| = V \frac{1}{\sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}}$$

$$|Uc| = |V| \left| \frac{-j\frac{1}{C\omega}}{R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega}} \right| = V \frac{\frac{1}{C\omega}}{\sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}} = \frac{V}{C\omega \sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}}$$

L'impédance équivalente de la charge:

$$Z_{eq} = R + jL\omega + \frac{1}{jC\omega} = R + j(L\omega - \frac{1}{C\omega})$$

à la résonance, on annule la partie imaginaire de Z_{eq} donc

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

on a donc:

$$|Ul| = V \frac{L\omega}{R}, |Ur| = V, |Uc| = V \frac{1}{RC\omega}, |I| = \frac{V}{Z_{eq}} = \frac{V}{R}$$

15) Si on veut que la fréquence reste à 100 Hz, il nous faut une inductance

$$L\omega = \frac{1}{C\omega} \Rightarrow L = \frac{1}{C\omega^2} = 0.115H$$

Or la plage de l'inductance variable que l'on possède est de 0.15H à 1.4H, il n'est donc pas possible de choisir $f = 100$ Hz. On calcule donc inversement, les fréquences que l'on peut choisir pour faire fonctionner le circuit en résonance.

•Pour $L1 = 0.15$ H:

$$f1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{22 * 10^{-6} * 0.15}} = 88Hz$$

•Pour $L2 = 1.4$ H

$$f2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{22 * 10^{-6} * 1.4}} = 29Hz$$

16) On visualise donc ensuite l'allure du courant dans la charge RLC à la résonance ainsi que son spectre:

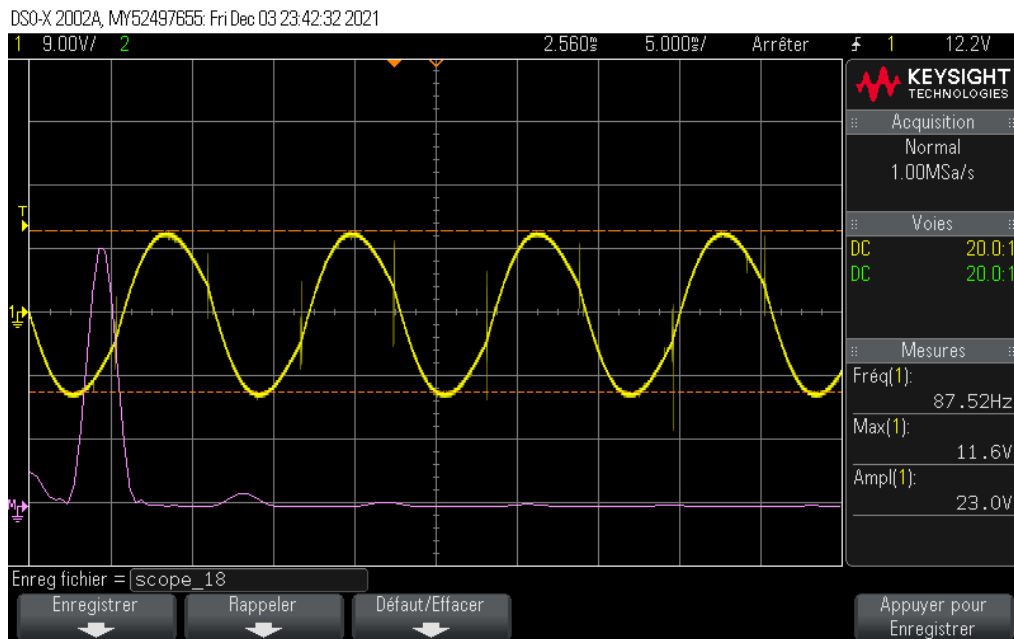


Figure 25 . Allure du courant et son spectre à la résonance pour $f = 88$ Hz

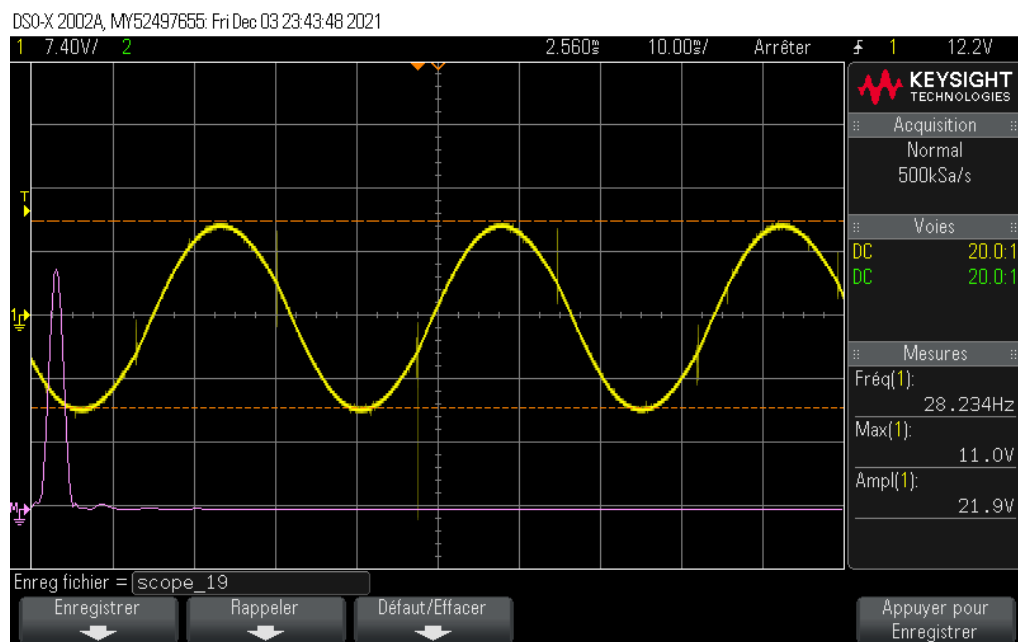


Figure 26 . Allure du courant et son spectre à la résonance pour $f = 29$ Hz

Conclusion: quand la charge fonctionne à la résonance, on peut annuler les harmoniques du courant, l'allure du courant est donc très proche d'une sinusoïde pure.

IV. Conclusion du TP

À travers ce TP nous avons étudié le principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé et comment nous pouvons annuler certains rangs harmoniques en variant l'angle de décalage ' d ' ou en mettant le circuit à la résonance, pour avoir un courant quasi sinusoïdal. Nous avons vérifié que les résultats trouvés expérimentalement correspondent aux prévisions.

```

clear all clf;

%% Chronogramme de Vs
d = pi/4;
E = 24;
x=-2*pi:0.01:2*pi;
y=0*(x>=-2*pi&x<-2*pi+d)+E*(x>=-2*pi+d&x<-pi)+0*(x>=-pi&x<-pi+d)...
-E*(x>=-pi+d&x<0)+0*(x>=0&x<d)+E*(x>=d&x<pi)...
+0*(x>=pi&x<pi+d)-E*(x>=pi+d&x<2*pi);
figure(1)
plot(x,y,'r','linewidth',2),grid on
xlim([-2*pi 2*pi])
ylim([-E*1.5 E*1.5])

xL = xlim;
yL = ylim;
line([0 0], yL); %x-axis
line(xL, [0 0]); %y-axis

title(['Chronogramme de Vs sur l,intervalle ' ...
'[-2 $\pi$ ,2 $\pi$ ] pour E=24V et d=45°'], '')
xlabel('θ = 2 $\pi$ ft (rad)')
ylabel('La tension de sortie Vs (V)')

%% Analyse spectrale: V

d1 = 0; d2 = pi/6; d3 = pi/3; d4 = pi/2;
for n = 1:10
    if mod(n,2)==0 Vn1(n) = 0;
    else Vn1(n) = (2*sqrt(2)*E./(n*pi)) .* cos(n*d1/2);
    end
end
for n = 1:10
    if mod(n,2)==0 Vn2(n) = 0;
    else Vn2(n) = (2*sqrt(2)*E./(n*pi)) .* cos(n*d2/2);
    end
end
for n = 1:10
    if mod(n,2)==0 Vn3(n) = 0;
    else Vn3(n) = (2*sqrt(2)*E./(n*pi)) .* cos(n*d3/2);
    end
end
for n = 1:10
    if mod(n,2)==0 Vn4(n) = 0;
    else Vn4(n) = (2*sqrt(2)*E./(n*pi)) .* cos(n*d4/2);
    end
end

nt = [100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000];
figure(2)
subplot(2,2,1);

```



```

b1 = bar(Vn1) % Vn quand d = 0
set(gca,'xticklabel',nt) % changement d'echelle
set(b1,'FaceColor',[0 0.2 1]),grid on % blue
title('Spectre de Vs: d = 0°');
xlabel('Frequence [Hz]');
ylabel('Tension [V]');
subplot(2,2,2);
b2 = bar(Vn2) % Vn quand d = pi/6
set(gca,'xticklabel',nt) % changement d'echelle
set(b2,'FaceColor',[1 0.2 0.2]),grid on % red
title('Spectre de Vs: d = 30°');
xlabel('Frequence [Hz]');
ylabel('Tension [V]');
subplot(2,2,3);
b3 = bar(Vn3) % Vn quand d = pi/3
set(gca,'xticklabel',nt) % changement d'echelle
set(b3,'FaceColor',[0 0.6 0.3]),grid on % green
title('Spectre de Vs: d = 60°');
xlabel('Frequence [Hz]');
ylabel('Tension [V]');
subplot(2,2,4);
b4 = bar(Vn4) % Vn quand d = pi/2
set(gca,'xticklabel',nt) % changement d'echelle
set(b4,'FaceColor',[1 0.5 0]),grid on % orange
title('Spectre de Vs: d = 90°');
xlabel('Frequence [Hz]');
ylabel('Tension [V]');

```

%% Analyse Spectrale: I

```

R = 12;
L = 0.01;
f = 100;
for n = 1:10
    Zn(n) = sqrt(R^2 + (n*L*2*pi*f).^2);
end
In1 = Vn1 ./ Zn;
In2 = Vn2 ./ Zn;
In3 = Vn3 ./ Zn;
In4 = Vn4 ./ Zn;

```

```

figure(3)
subplot(2,2,1);
b1 = bar(In1) % Vn quand d = 0
set(gca,'xticklabel',nt) % changement d'echelle
set(b1,'FaceColor',[0 0.2 1]),grid on % blue
title('Spectre de Is: d = 0°');
xlabel('Frequence [Hz]');
ylabel('Courant [A]');
subplot(2,2,2);
b2 = bar(In2) % Vn quand d = pi/6
set(gca,'xticklabel',nt) % changement d'echelle
set(b2,'FaceColor',[1 0.2 0.2]),grid on % red
title('Spectre de Is: d = 30°');
xlabel('Frequence [Hz]');

```

```

ylabel('Courant [A]')
subplot(2,2,3);
b3 = bar(In3) % Vn quand d = pi/3
set(gca,'xticklabel',nt) % changement d'echelle
set(b3,'FaceColor',[0 0.6 0.3]),grid on % green
title('Spectre de Is: d = 60°');
xlabel('Frequence [Hz]');
ylabel('Courant [A]')
subplot(2,2,4);
b4 = bar(In4) % Vn quand d = pi/2
set(gca,'xticklabel',nt) % changement d'echelle
set(b4,'FaceColor',[1 0.5 0]),grid on % orange
title('Spectre de Is: d = 90°');
xlabel('Frequence [Hz]');
ylabel('Courant [A]')

```