

TP2 : Onduleur de tension

Yann LABBÉ
Olivier LÉVÊQUE

17 décembre 2015

Résumé

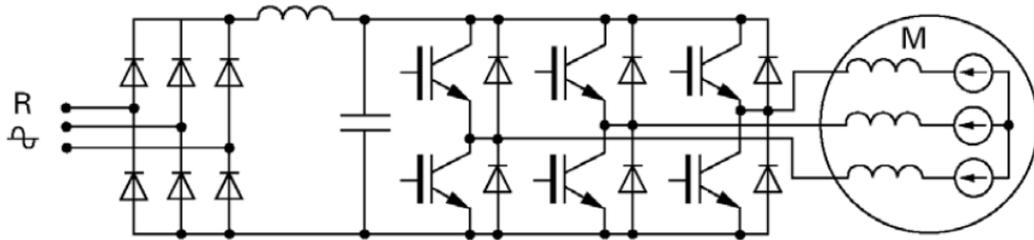
L'objectif de cette séance de travaux pratiques est d'étudier la commande et les caractéristiques d'un onduleur de tension triphasé. Cet onduleur sera le convertisseur pouvant être associé à la machine synchrone ou à la machine asynchrone.

Table des matières

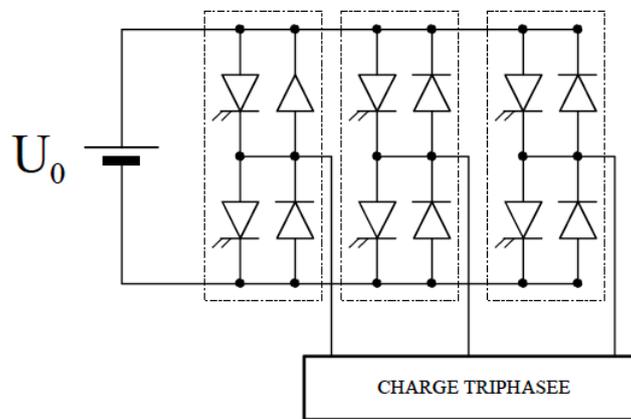
1	Présentation	2
2	Cellule de commutation (bras d'onduleur)	3
2.1	Relation entre la modulante et le rapport cyclique	3
2.2	Répartition spectral du signal de consigne	4
3	Ondulateur triphasé	12
4	Conclusion	15

1 Présentation

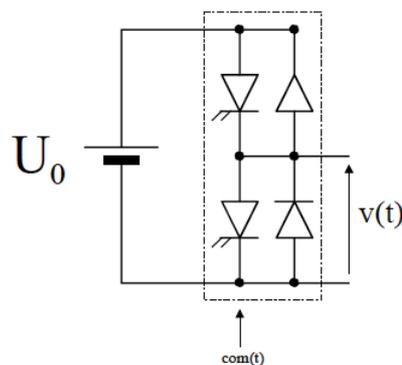
La structure d'un variateur de vitesse utilisant un onduleur triphasé est présentée ci-dessous :



De cette structure, nous pouvons établir la structure équivalente de l'onduleur triphasé qui est présenté ci-dessous.



U_0 est une source de tension continue. La structure de base de cet onduleur est une cellule de commutation bidirectionnelle en courant et unidirectionnelle en tension. Elle se compose de deux interrupteurs l'un formé d'un transistor IGBT et l'autre d'une diode, comme l'illustre la figure ci-dessous.



2 Cellule de commutation (bras d'onduleur)

En considérant les temps suivant nuls :

- temps de commutation des transistors ;
- temps de retard de la commande ;
- temps morts (indispensables pour le bon fonctionnement du système) des commandes.

On montre que :

$$v(t) = U_0 \cdot com(t)$$

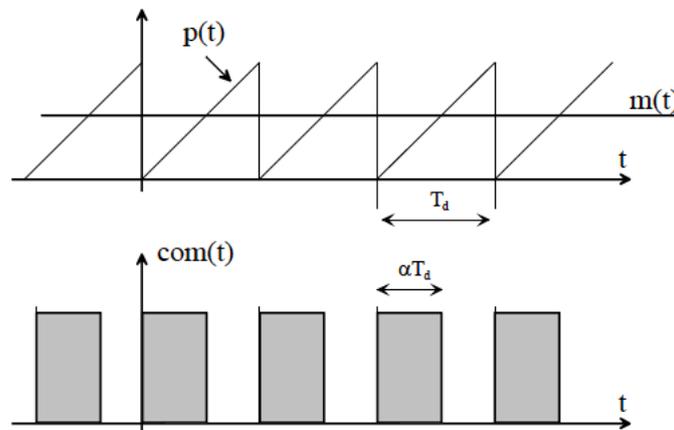
où $com(t)$ est le signal de commande.

Pour réaliser le signal de $com(t)$, nous comparons une modulante $m(t)$ avec une porteuse $p(t)$ tel que :

$$\begin{aligned} m(t) - p(t) > 0 &\longrightarrow com(t) = 1 \\ m(t) - p(t) < 0 &\longrightarrow com(t) = 0 \end{aligned}$$

avec la porteuse $p(t) \in [0, 1]$ étant un signal périodique triangulaire de période T_d et la modulante $m(t) \in [0, 1]$

Le schéma suivant illustre la construction du signal $com(t)$ à partir des signaux $p(t)$ et $m(t)$.



2.1 Relation entre la modulante et le rapport cyclique

En faisant l'hypothèse que la modulante est constante sur une durée égale à la période de découpage (e.i. $m(t) = m(iT_d)$ avec $i \in \mathcal{N}$), nous pouvons donner la relation entre $m(t)$ et le rapport cyclique $\alpha(t)$. Plus exactement $m(iT_d)$ et $\alpha(iT_d)$.

Pour $t = (i + \alpha(t))T_d$ avec $i \in \mathcal{N}$, on a :

$$m(t) = p(t)$$

Or $p(t') = \frac{t'}{T_d}$ pour $t' = t - iT_d \in [0, T_d]$. Ainsi :

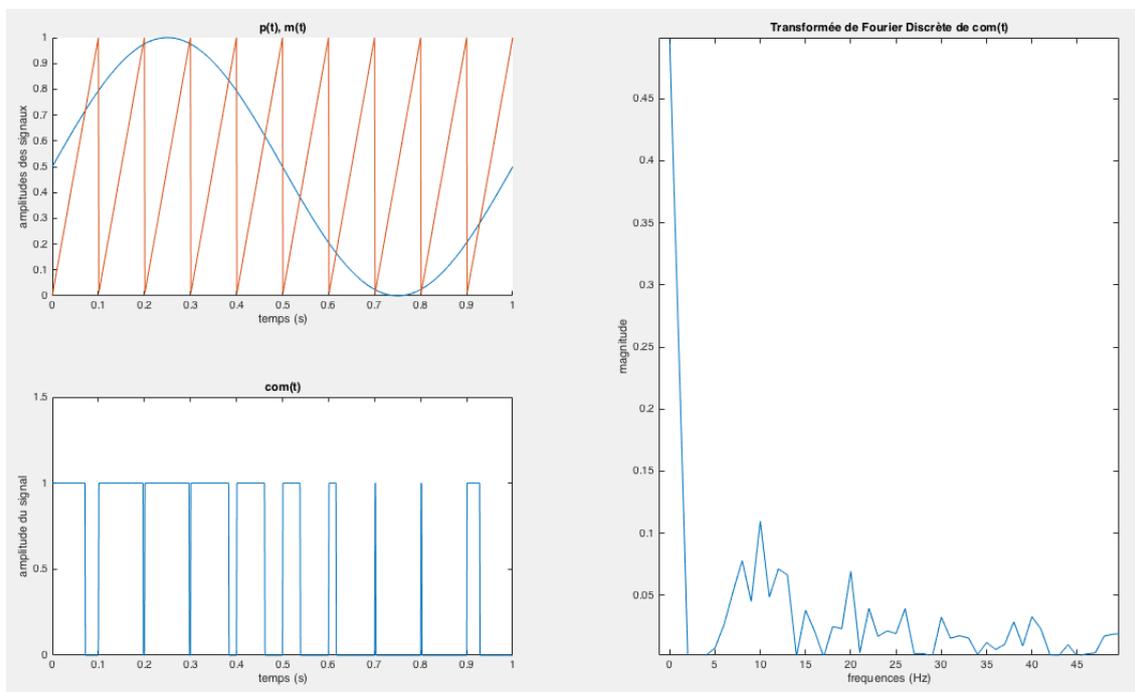
$$\begin{aligned} m(t = (i + \alpha(t))T_d) &= p(t = (i + \alpha(t))T_d) \\ &= p(t' = \alpha(t)T_d) \\ &= \alpha(t = (i + \alpha)T_d) \end{aligned}$$

Comme $iT_d \gg \alpha(t)T_d$, on peut écrire :

$$m(iT_d) = \alpha(iT_d) \quad \longrightarrow \quad m(t) = \alpha(t)$$

2.2 Répartition spectrale du signal de consigne

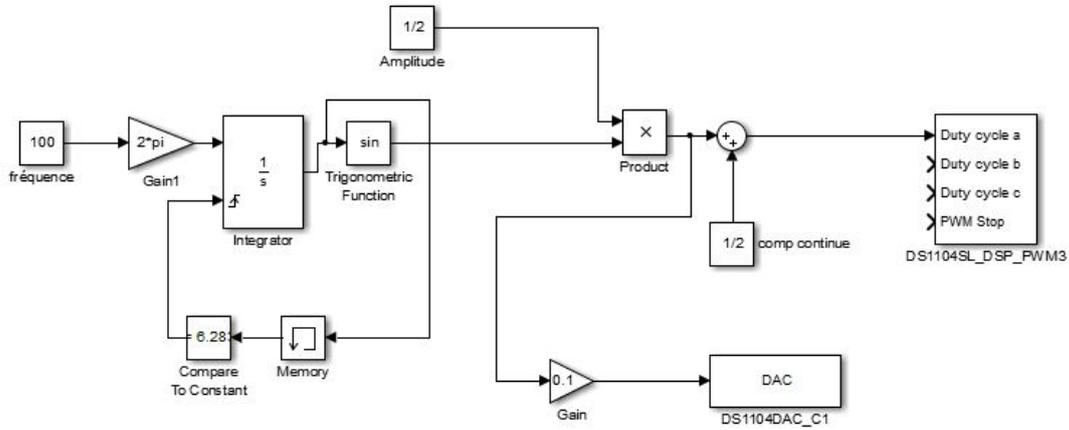
Avec une modulante $m(t) = \frac{1}{2}(1 + x(t))$ où $x(t) = \hat{X} \sin(\omega t)$ ($\hat{X} = 1$ car $m(t) \in [0, 1]$) et $\frac{2\pi}{T_d} = 10\omega$, nous pouvons tracer sur le logiciel Matlab (cf. programme en annexe), les signaux $p(t)$, $m(t)$ et $com(t)$ ainsi que le spectre en fréquence de $com(t)$.



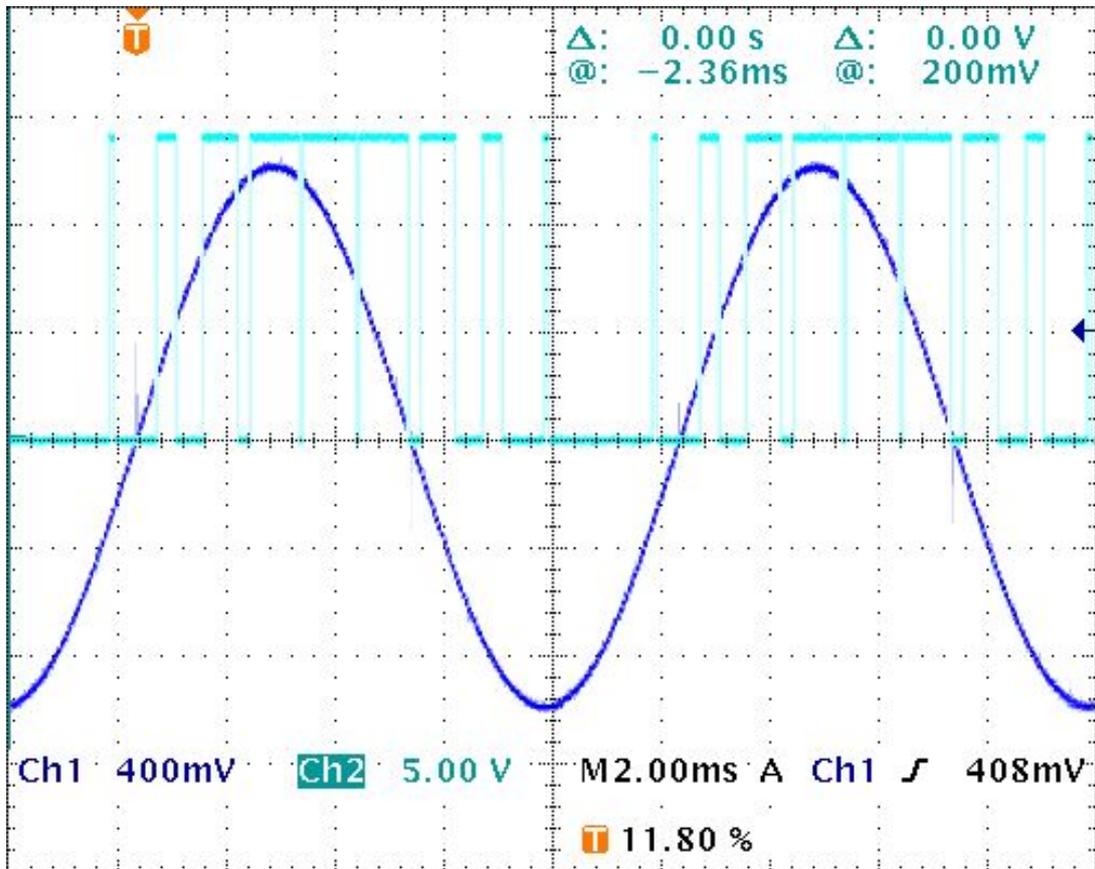
Remarque : Afin de tracer les signaux souhaités sur Matlab, nous avons fixé arbitrairement $T_d = 0.1s$ et $F_e = 10^3 Hz$ (la fréquence d'échantillonnage). Bien entendu, nous avons pris soin de respecter le théorème de schannon en choisant $\frac{1}{2F_e} < T_d < \frac{2\pi}{\omega}$.

Le signal de commande $com(t)$ se construit à partir du signal $p(t)$ et du rapport cyclique $\alpha(t)$ qui est, comme nous l'avons montré précédemment, égale à la modulante $m(t)$. Nous nous attendons alors à avoir dans le spectre basse fréquence de $com(t)$ les composantes de $m(t)$ et au moins le fondamentale de $p(t)$, ce qui est bien vérifié par le calcul effectué sur Matlab.

Expérimentation À l'aide de la carte DSPACE associé au logiciel SIMULINK de MATLAB, et du bloc PWM (Pulsation Width Modulation), nous générons le signal $com(t)$ comme nous l'avons défini plus au haut lors de la préparation. Nous fixerons la fréquence de découpage à $1kHz$ et la fréquence de la modulante à $100Hz$.



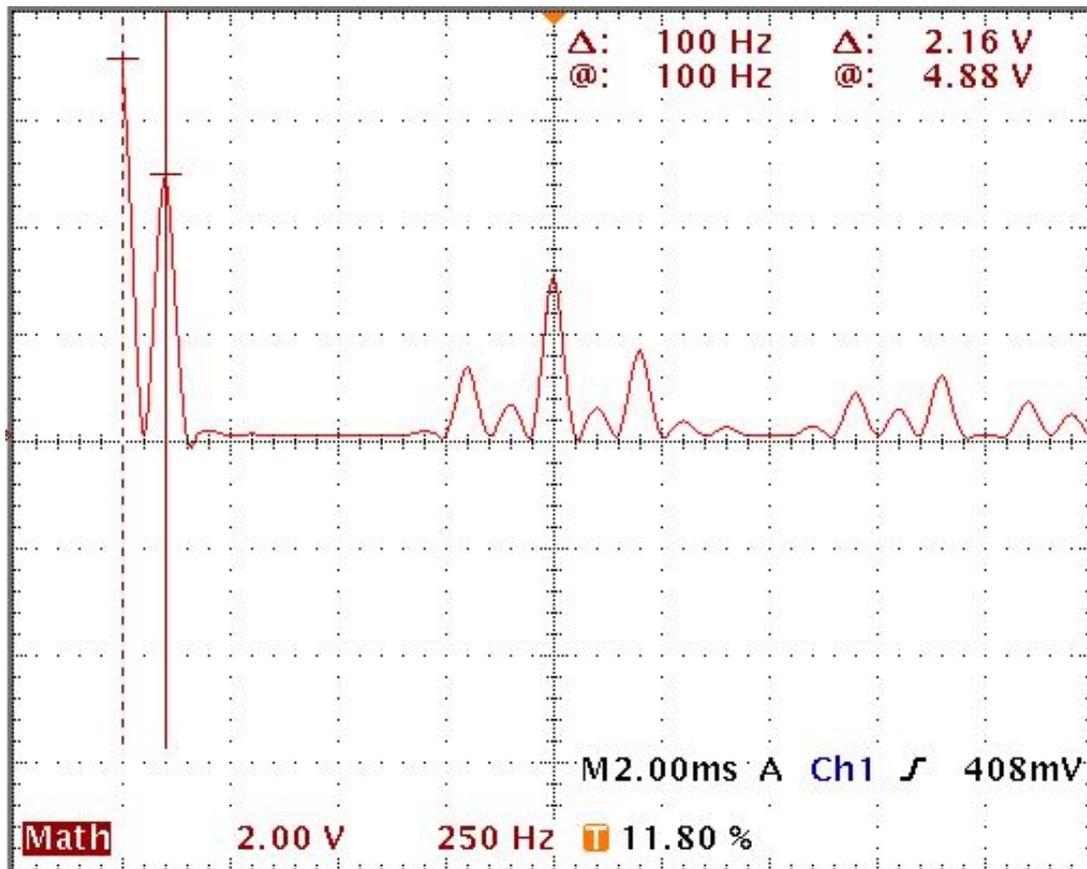
Nous relevons à l'oscilloscope le signal $x(t)$ (en jaune) et le signal de commande $com(t)$ (en bleu).



Comme l'illustre la capture d'écran d'oscilloscope ci-dessus, nous parvenons à générer le signal $com(t)$ à partir du signal $x(t)$ (image de la modulante) tel que le rapport cyclique de $com(t)$ soit maximum lorsque $x(t)$ est maximum et minimum lorsque $x(t)$ est minimum.

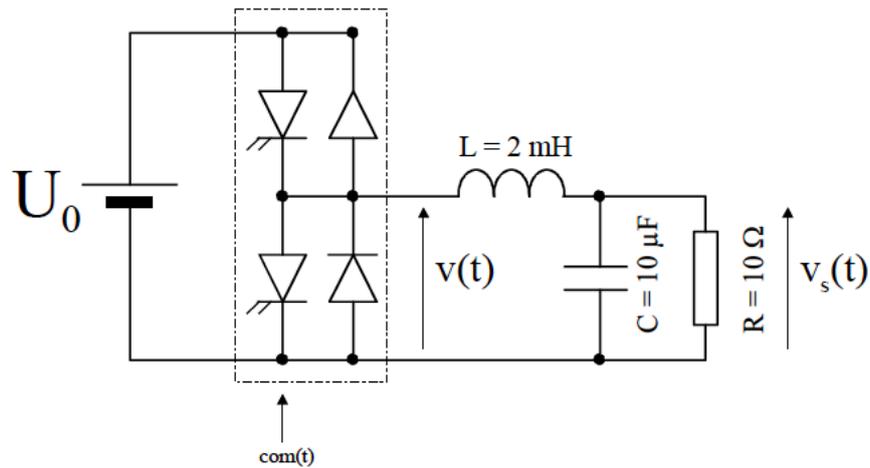
Remarque Nous visualisons un glissement entre les signaux $x(t)$ et $com(t)$ à l'oscilloscope. En effet le signal $com(t)$ est construit en hardware par la carte DSPACE avec une horloge pas forcément synchrone avec celle utilisé en software pour construire le signal $x(t)$.

Nous pouvons utiliser la fonction FFT présente sur l'oscilloscope pour vérifier que le spectre de $com(t)$ se comporte bien comme nous l'avons décrit précédemment.

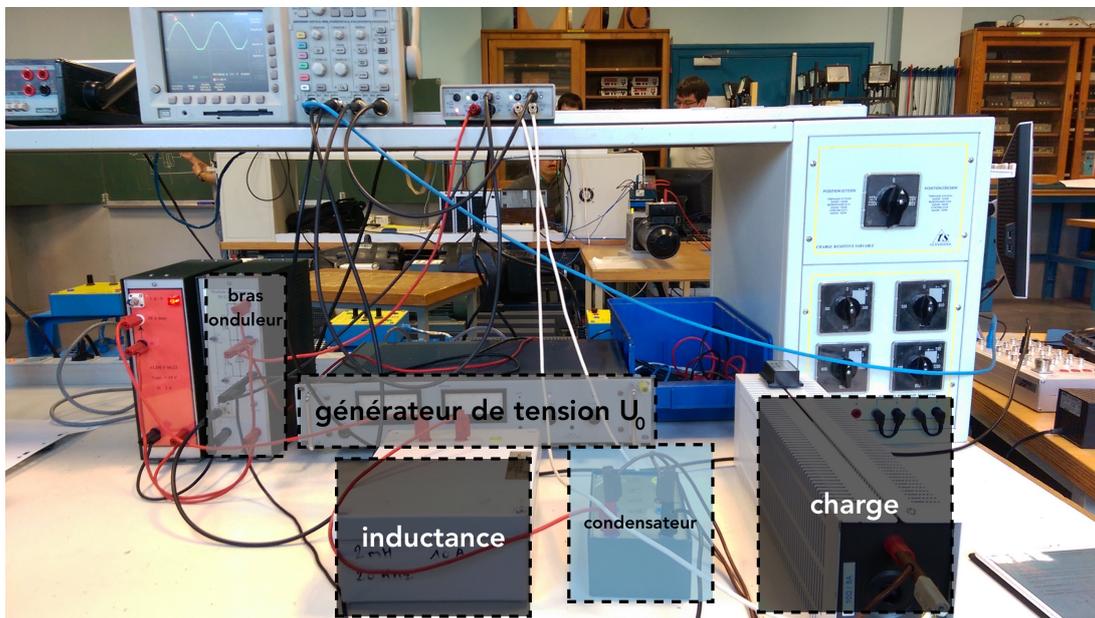


Nous remarquons que le signal $com(t)$, généré à l'aide de la carte DSPACE, comporte bien des harmoniques en $1kHz$ et $100Hz$ correspondant respectivement à la fréquence de découpage et la fréquence de la modulante.

Nous réalisons et câblons à présent le circuit suivant.



(Nous fixons $U_0 = 70V$)



Comme $v(t) = U_0.com(t)$, l'étude spectrale que nous avons menée sur $com(t)$ est valable pour le signal $v(t)$. Notre objectif est de générer un signal sinusoïdal $v_s(t)$ à l'entrée d'une charge R qui est image du signal modulant $m(t)$. Comme nous l'avons vu, le signal $v(t)$ comporte, dans son spectre basses fréquences, les composantes fréquences de $m(t)$, l'idée est donc de filtrer les hautes fréquences du signal $v(t)$ à l'aide d'un filtre passe-bas non dissipatif (constitué uniquement de condensateurs et d'inductances).

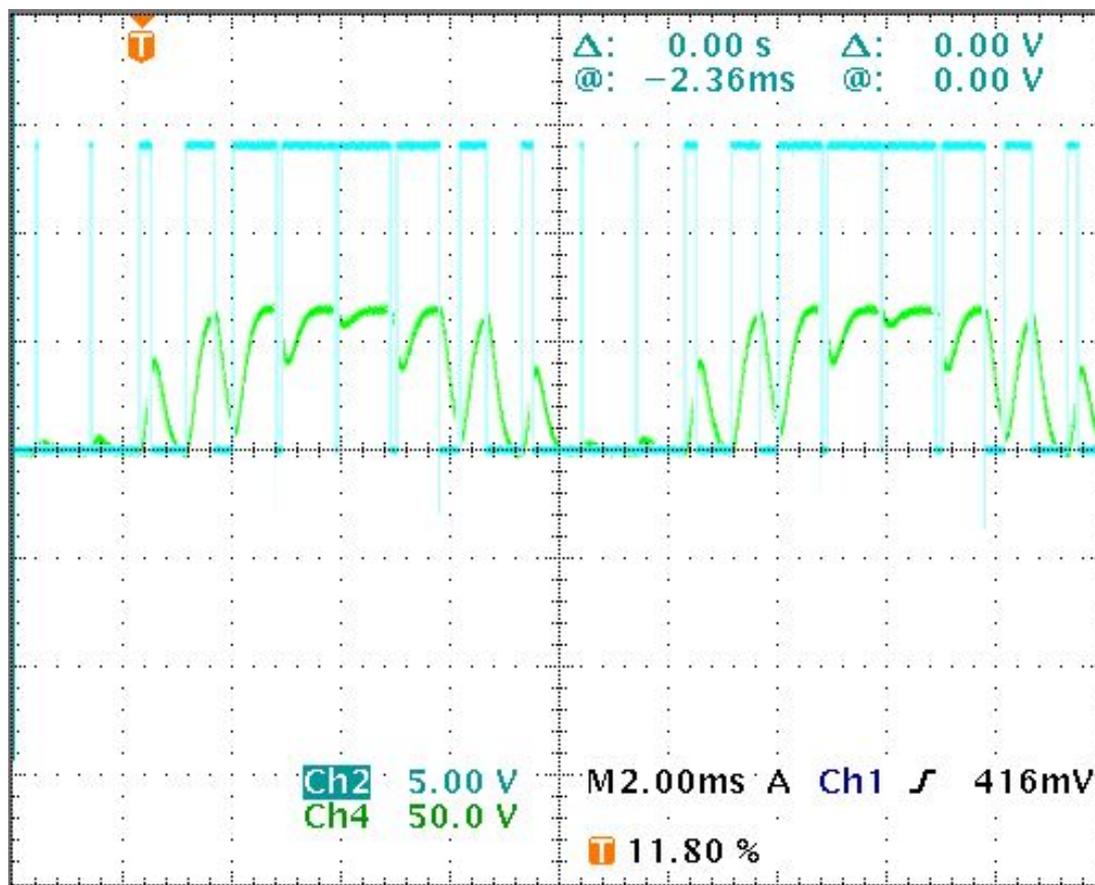
Le filtre qui nous est présenté à pour fonction de transfert.

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{L\omega}{R} - LC\omega^2}$$

Comme il nous est imposé $L = 2mH$ et $C = 10\mu F$, nous pouvons déterminer la fréquence de coupure de notre filtre :

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 1.1254kHz$$

Remarque Nous remarquons d'après l'étude fréquentielle précédente, que le filtre est mal dimensionné car nous ne filtrons pas les fréquences autour de $1kHz$ qui sont dûes à la fréquence de découpage.

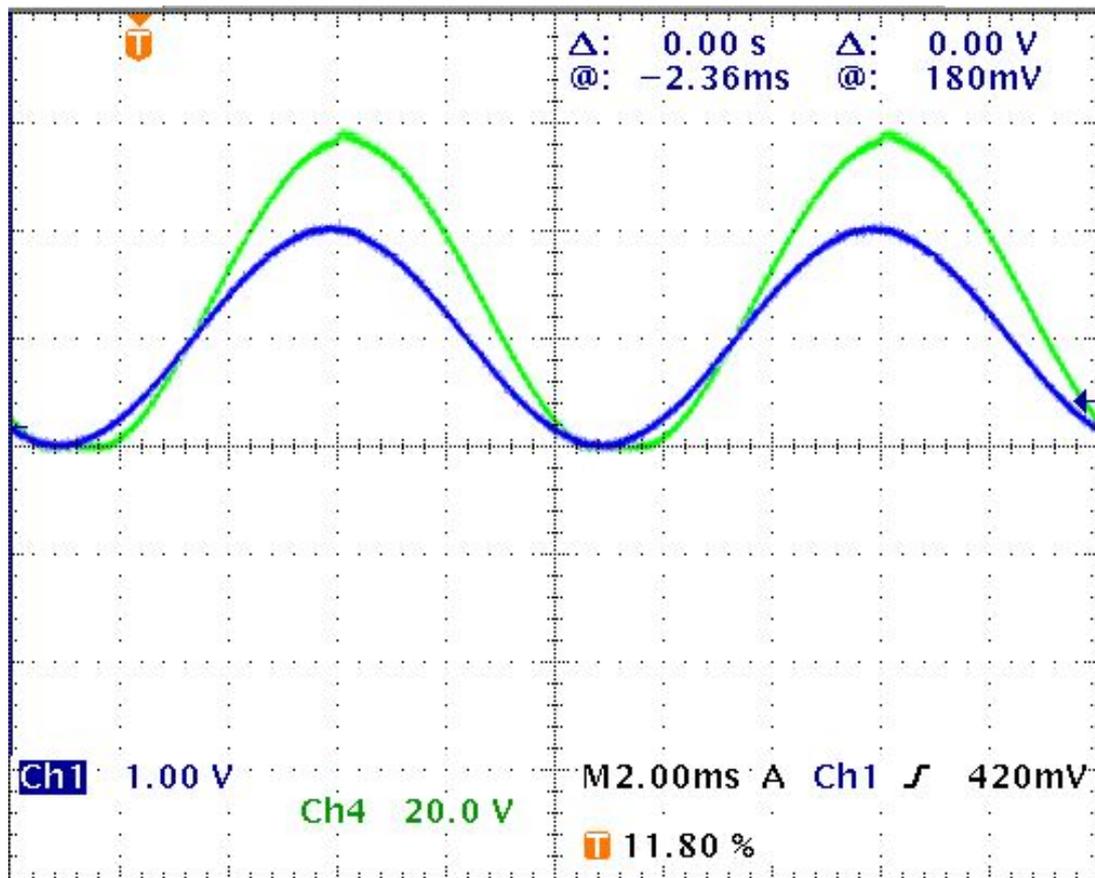


($com(t)$ en bleu et $v_s(t)$ en vert)

En effet, nous voyons à l'oscilloscope que le signal de $v_s(t)$ n'est pas image du signal $m(t)$ puisque le filtrage des hautes fréquences est mal réalisé. Pour améliorer ce filtrage, deux options s'offrent à nous :

- soit redimensionner les composantes du filtre pour diminuer la fréquence de coupures.
- soit augmenter la fréquence de découpage et préserver la fréquence de coupure du filtre actuelle.

Nous choisissons la deuxième option et nous passons à une fréquence de découpage de $10kHz$. Avec cette nouvelle condition, nous réeffectuons les mesures à l'oscilloscope et nous obtenons les signaux suivants.



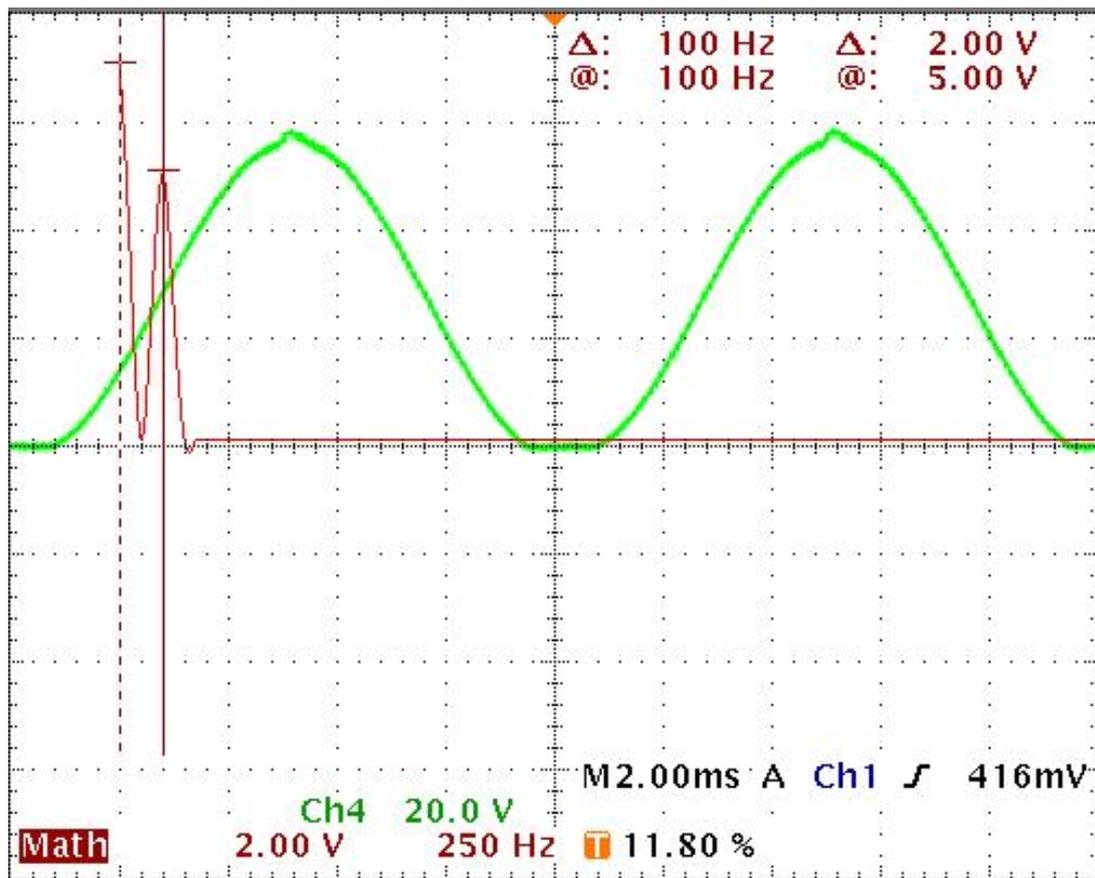
($x(t)$ en bleu et $v_s(t)$ en vert)

Nous pouvons vérifier expérimentalement l'expression du signal $v(t)$:

$$v(t) = \frac{U_0}{2}(1 + x(t))$$

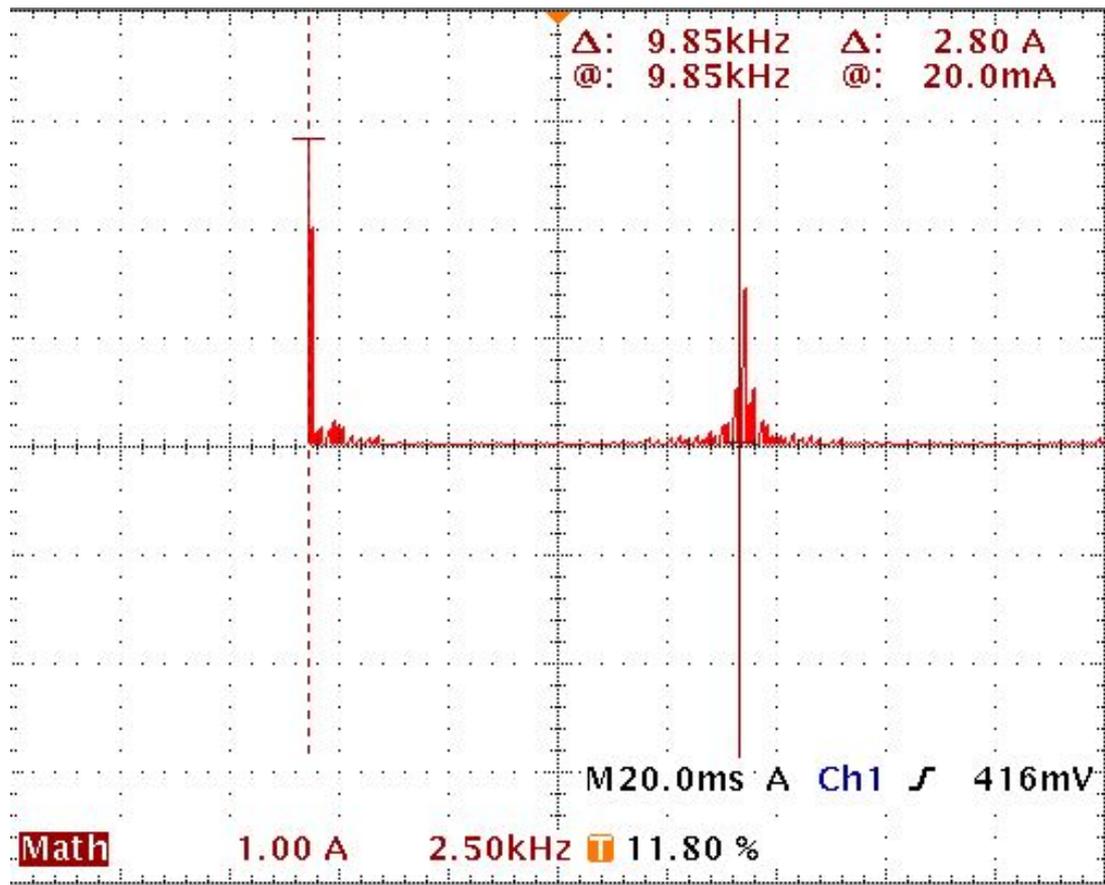
avec $U_0 = 70V$

Nous pouvons aussi observer le signal $v_s(t)$ en fréquence, grâce à la fonction FFT de l'oscilloscope.



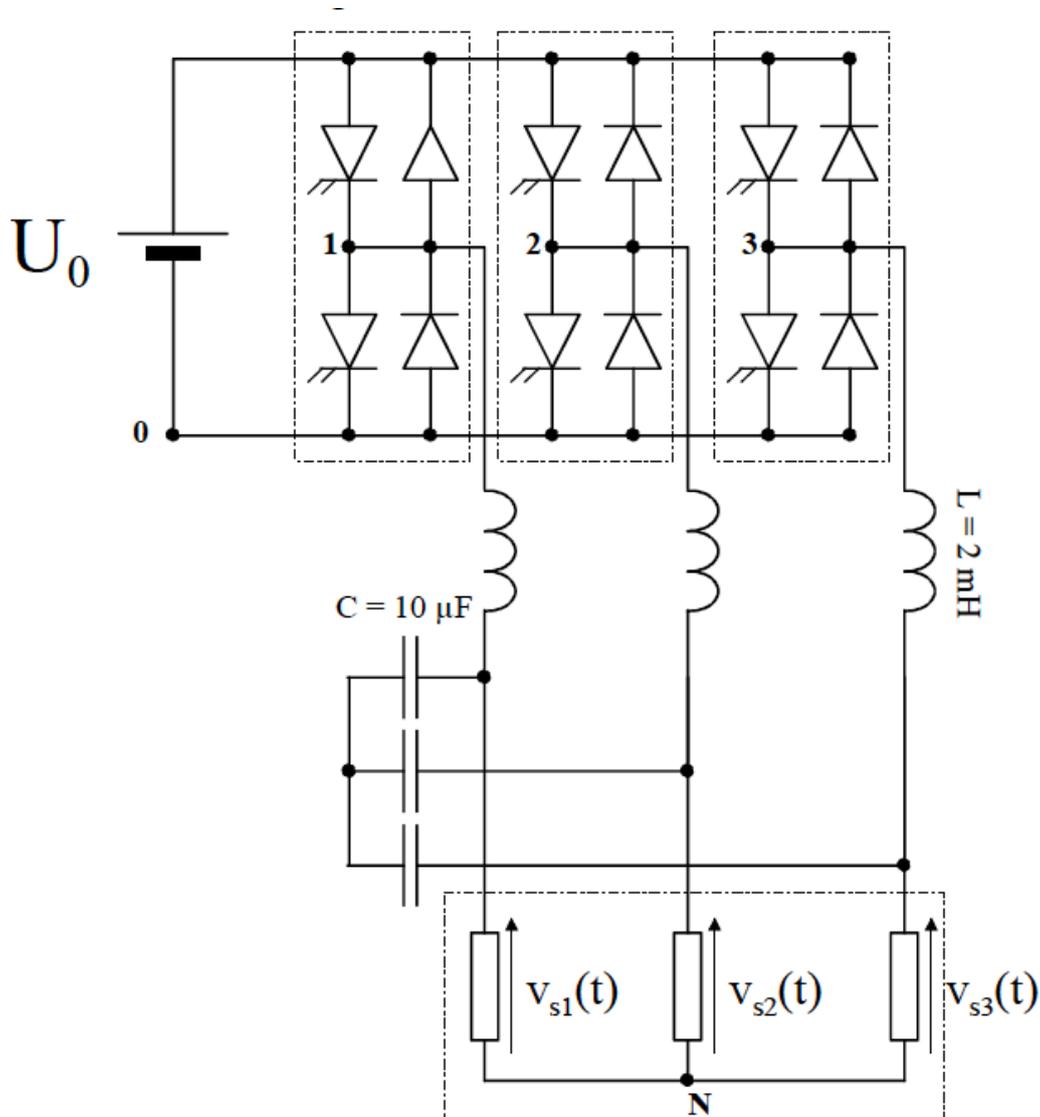
Nous retrouvons les deux fréquences caractéristiques de la modulante $m(t)$ dont celle à 100Hz correspondant à la fréquence de $x(t)$.

Par ailleurs, l'allure du spectre du signal $v(t)$ confirme les observations précédentes. Puisque nous avons en basses fréquences les composantes de $m(t)$ qui nous intéresse et en hautes fréquences ($f \gg f_c$) les multiples de la fréquence de découpage.



3 Ondulateur triphasé

Nous passons à présent au montage de l'ondulateur triphasé dont le schéma électrique est rapellé ci-dessous.



plan de charge triphasé 220 V - 3 kW

(attention ici $L = 5mH$)

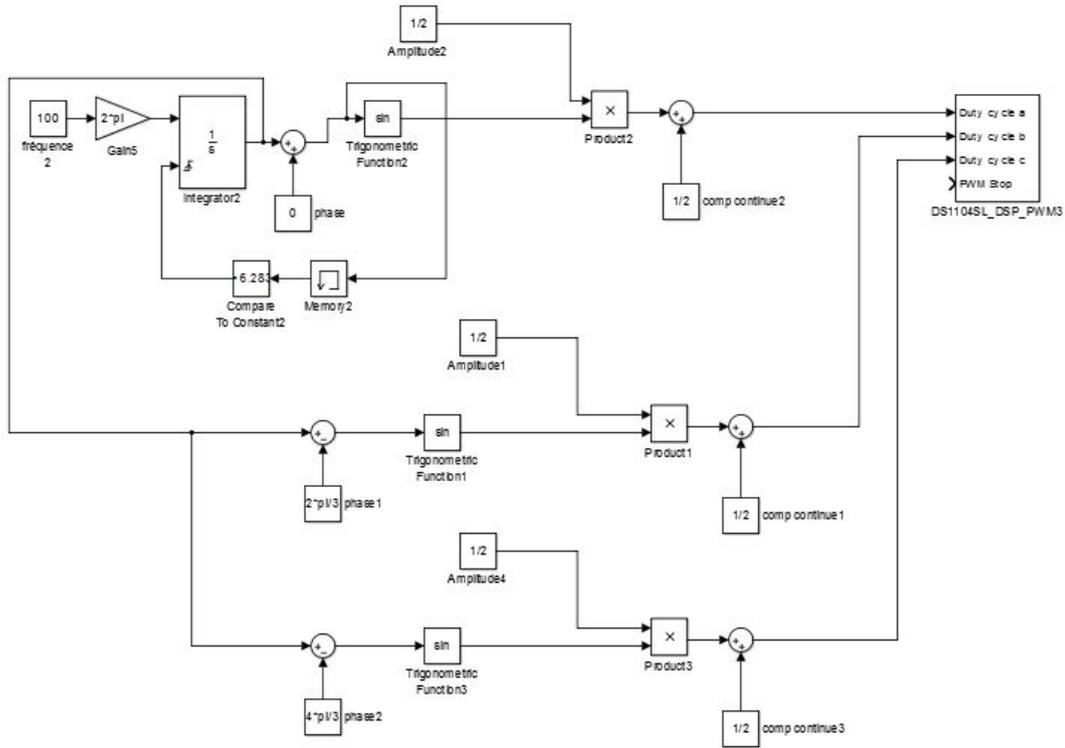
À l'aide de la carte DSPACE et du bloc PWM, nous générons les signaux de commande $com_1(t)$, $com_2(t)$ et $com_3(t)$ associés aux trois cellules de commutation tel que :

$$com_1(t) = \hat{X} \sin(\omega t)$$

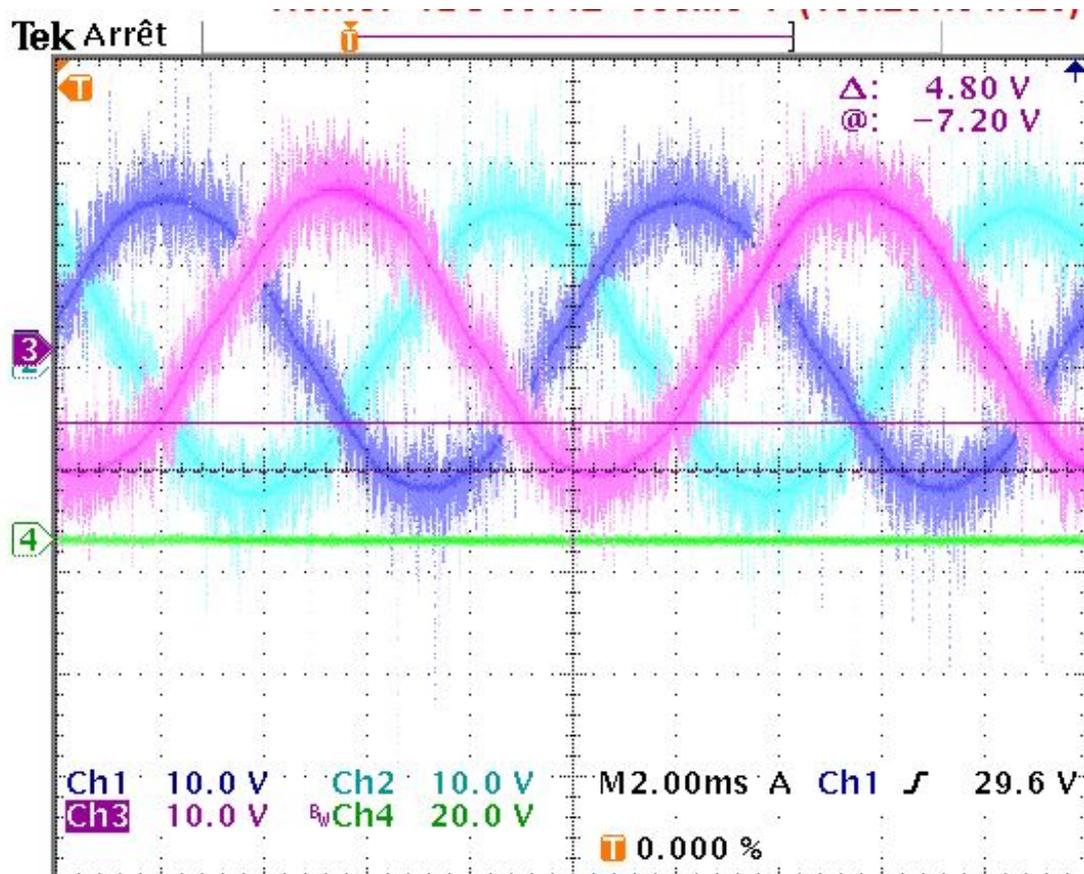
$$com_2(t) = \hat{X} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$com_3(t) = \hat{X} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

Nous fixons la fréquence de découpage à $10kHz$ et la fréquence des modulantes à $100Hz$.



D'autre part, nous relevons à l'oscilloscope la tension $v_{s1}(t)$, $v_{s2}(t)$, et $v_{s3}(t)$.



On observe bien 3 signaux déphasés de $2\pi/3$. Pour une tension continue U_0 en entrée on obtient des tensions v_{si} ayant des amplitudes $\frac{U_0}{2}$.

Nous pouvons vérifier à partir de ces relevés expérimentaux les expressions suivantes :

$$v_{s1}(t) = x_1(t) \frac{U_0}{2}$$

$$v_{s2}(t) = x_2(t) \frac{U_0}{2}$$

$$v_{s3}(t) = x_3(t) \frac{U_0}{2}$$

avec $U_0 = 70V$

4 Conclusion

Nous avons eu, lors de cette séance de TP, l'occasion de mettre en oeuvre le fonctionnement d'un onduleur de tension monophasé et notamment d'étudier sa commande. Après avoir caractérisé cet onduleur, nous avons cherché à étudier l'onduleur triphasé en générant des signaux de commande à partir de la carte DSPACE. Cependant, nous avons manqué de temps pour mettre en oeuvre l'onduleur de tension piloté en courant.

Code Matlab -- TP2.m

```
clear all;
close all;

%VARIABLES
Td=0.1; %en s
Fe=10^3; %en Hz

%vecteur temps t
t=[0:1/Fe:10*Td];

%modulante m(t)
m=(1/2)*(1+sin(((2*pi)/(10*Td))*t));

%porteuse p(t)
pp=[1/Fe:1/Fe:Td]*(1/Td);
p=[0 pp pp pp pp pp pp pp pp pp];

%commande com(t)
com=(m-p>0);

%transformÈe de fourier discrÈte normalisÈe de la commande m(t)
TFcom=fft(com)/Fe;
freq=[0:1/Fe:1]*Fe;

%affichages
figure(1);
subplot(2,2,1);
    hold on;
    plot(t,m);
    plot(t,p);
    hold off;
    title('p(t), m(t)')
    xlabel('temps (s)');
    ylabel('amplitudes des signaux');
subplot(2,2,3);
    plot(t,com);
    ylim([0 1.5]);
    title('com(t)')
    xlabel('temps (s)');
    ylabel('amplitude du signal');
subplot(1,2,2);
    plot(freq,abs(TFcom));
    xlim([0 Fe/2]);
    title('TransformÈe de Fourier DiscrÈte de com(t)');
    xlabel('frequences (Hz)');
    ylabel('magnitude');
```