

# LES ONDULEURS

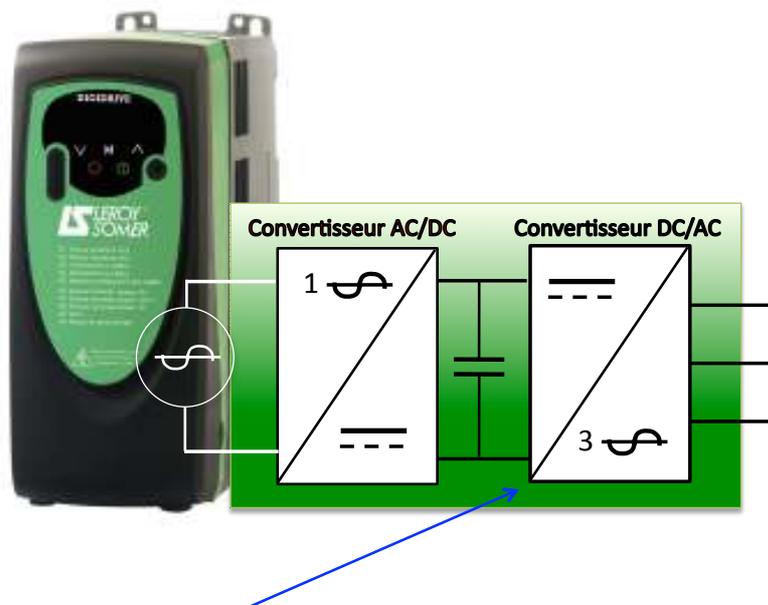
Convertisseurs DC/AC

*Sciences Industrielles de l'Ingénieur*  
*Ingénierie électrique*

Philippe MARSEILLE

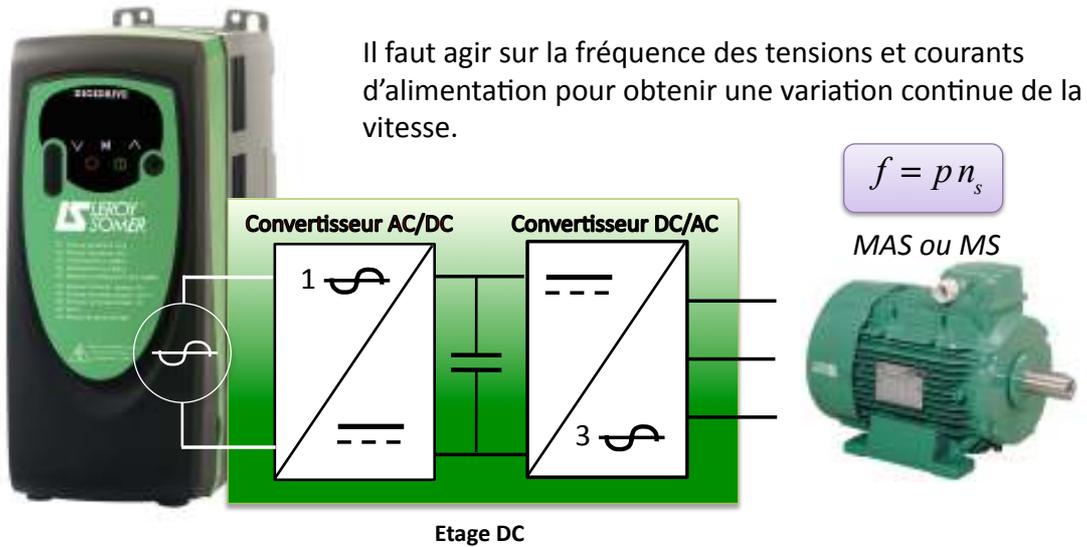
3. Onduleurs – P. MARSEILLE

1



**L'onduleur est un convertisseur DC/AC** : c'est l'élément du variateur qui transforme le continu en une source de tension triphasée à fréquence et amplitude variables, adaptée à la variation de vitesse des moteurs à courant alternatif

## Applications



Le contrôle/commande du variateur gère les lois de commande : U/f constant et contrôle vectoriel pour la MAS, autopilotage pour la MS...

## Variation de vitesse de la MAS

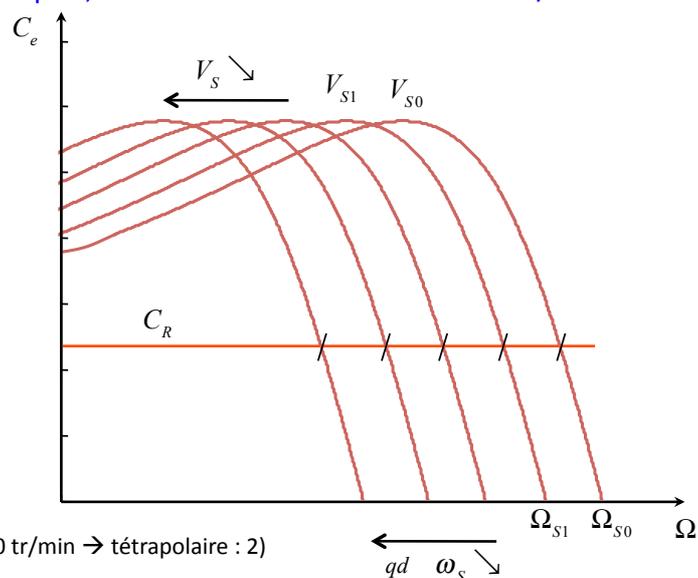
Evolution du point de fonctionnement de la MAS à  $C_R$  constant en agissant sur la fréquence des tensions statoriques, avec une commande scalaire en U/f = Cte

$$\omega_s = 2\pi f_s = p\Omega_s$$

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

$$C_{e \max} = \frac{3pV_s^2}{2N\omega_s^2}$$

$$\dot{a} \quad g_{\max} = \pm \frac{R}{N\omega_s}$$



$p$  nb de paires de pôles (1500 tr/min → tétrapolaire : 2)

$R, N$  paramètres électriques (résistance et inductance de fuites) de la MAS calculés en fonction des éléments du schéma équivalent ( $R_r, L_s$  et  $L_r$  notamment)

# ONDULEUR MONOPHASÉ

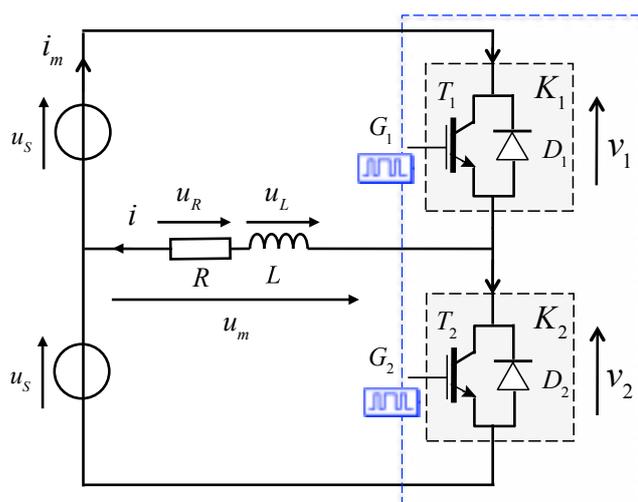
- Onduleur en demi-pont

- Commandes pleine onde
  - Commande MLI ou PWM

- Onduleur en pont monophasé

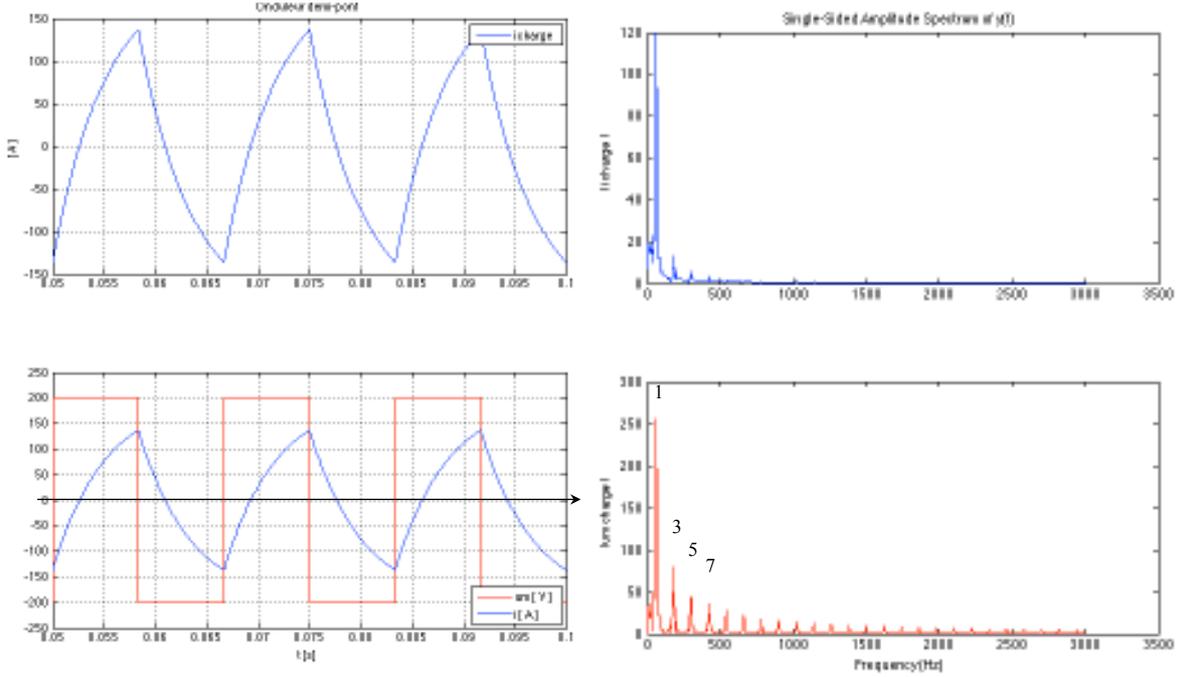
- Commandes pleine onde
  - Commandes pleine onde décalées
  - Commande MLI ou PWM

## Schéma de l'onduleur en demi-pont



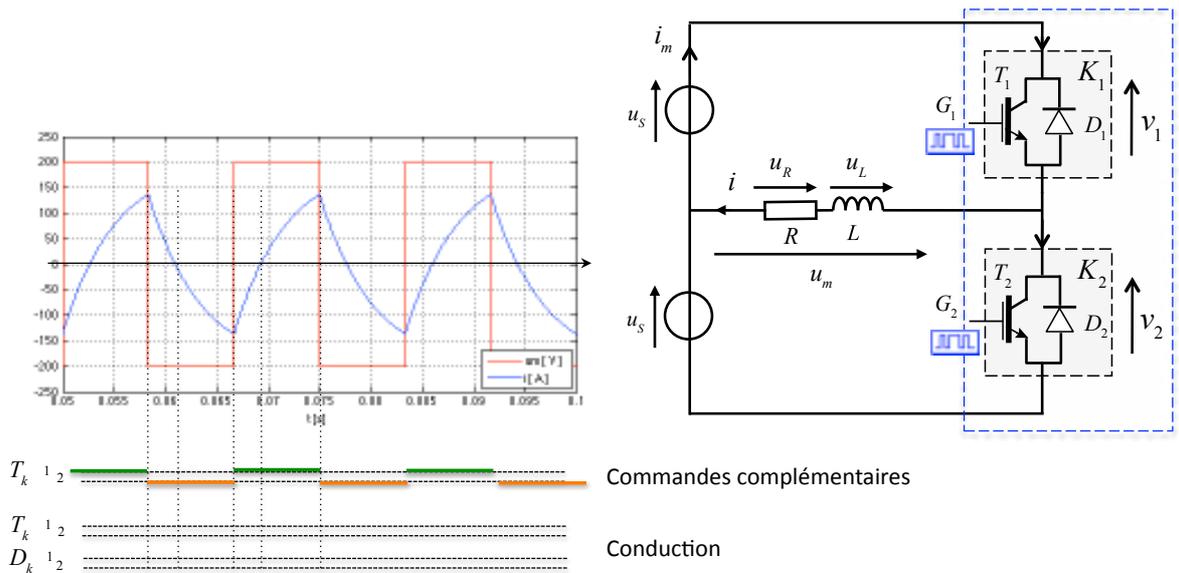
On impose une tension +/-  $u_s$  aux bornes de la charge quelque soit le signe de  $i$  dans la charge

## Commande pleine onde de l'onduleur en demi-pont



Inverter\_1phPonde\_IGBT.mdl  
PlotScopeFFTPonde1.m

## Exercice

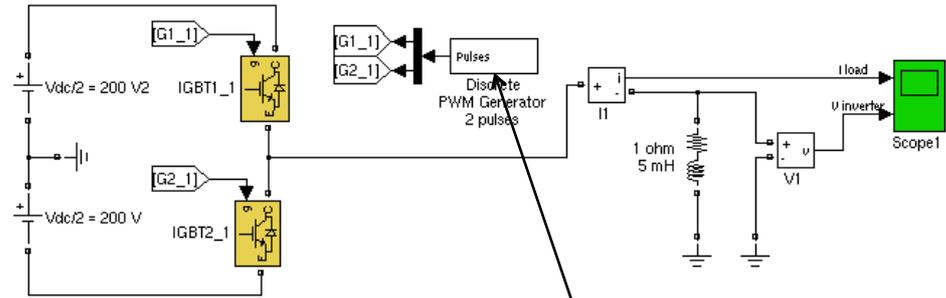


# Simulation de l'onduleur en demi-pont

Modèle SimPower Systems (Matlab)

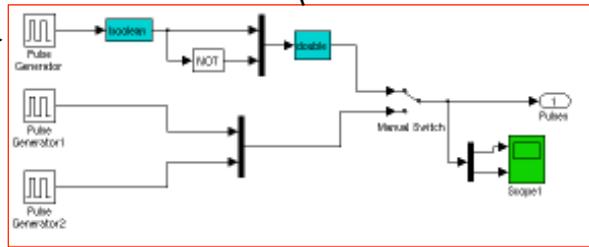
DC/AC Half-Bridge Inverter

V1 fundamental:  
 $= m/2 * V_{dc}$  V peak  
 $= 0.8/2 * 400$   
 $= 160$  V



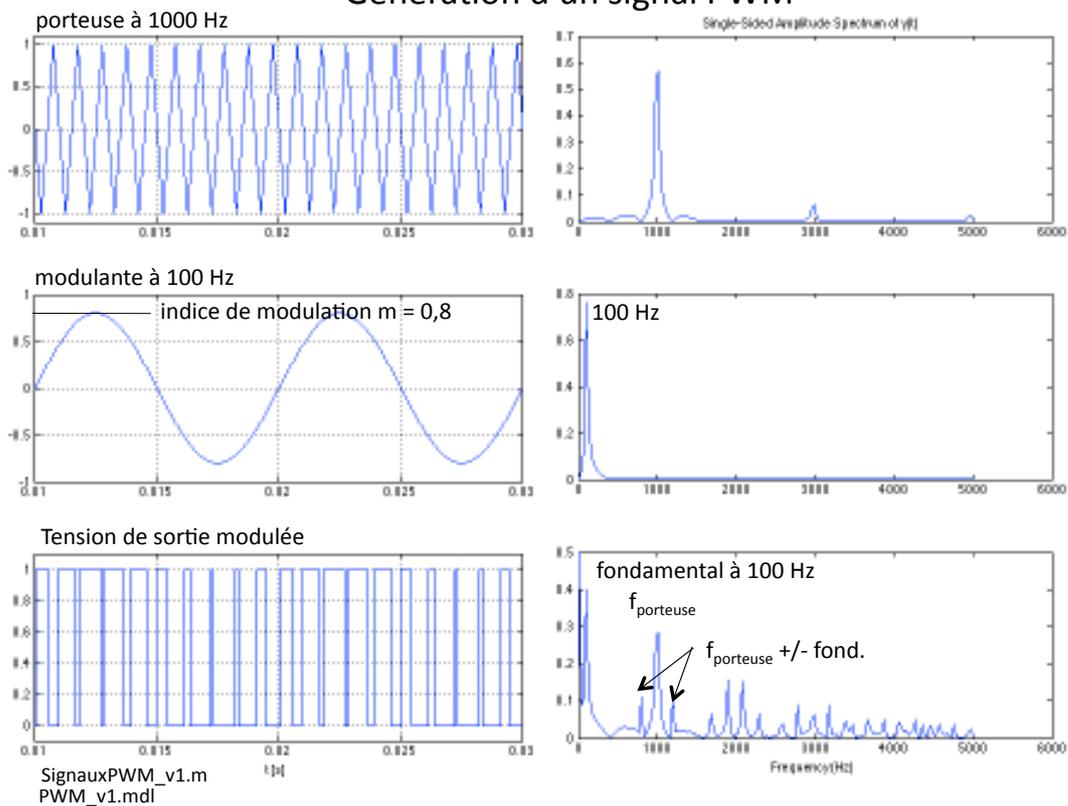
commandes complémentaires →

commandes disjointes →



Inverter\_1phPonde\_IGBT.mdl

## Génération d'un signal PWM

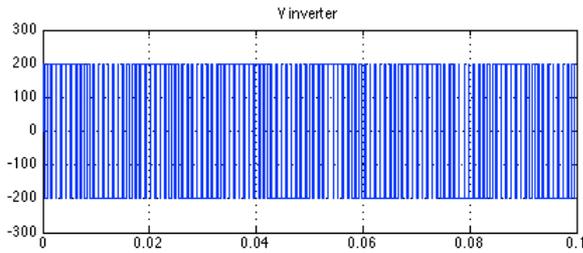
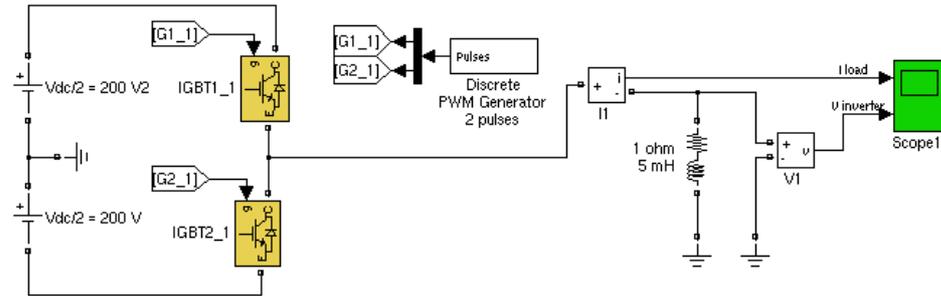


# Commande PWM de l'onduleur en demi-pont

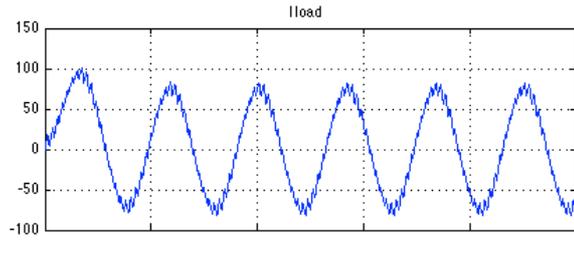
Modèle de simulation SimPower Systems (Matlab)

DC/AC Half-Bridge Inverter

V1 fundamental:  
 $= m/2 * V_{dc}$  V peak  
 $= 0.8/2 * 400$   
 $= 160$  V



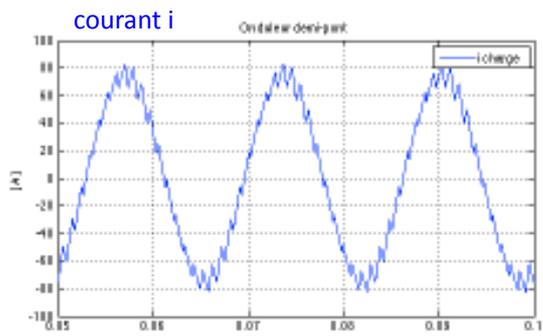
tension  $u_m$  aux bornes de la charge RL



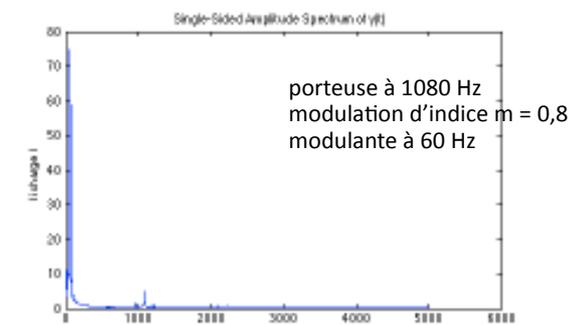
courant  $i$  dans la charge RL

Inverter\_1phPWM\_IGBT.mdl

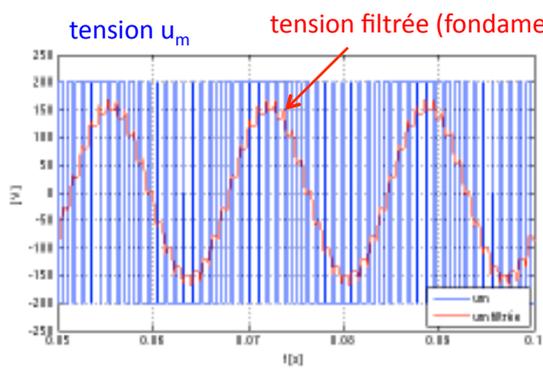
## Analyse fréquentielle



courant  $i$

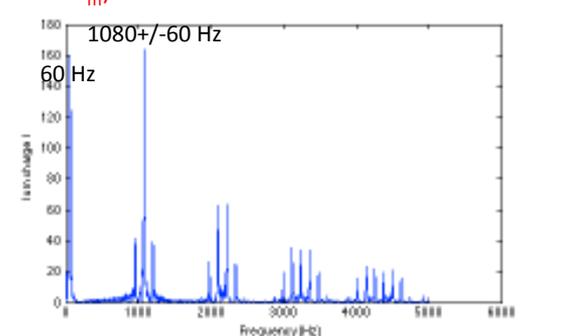


porteuse à 1080 Hz  
 modulation d'indice  $m = 0,8$   
 modulante à 60 Hz



tension  $u_m$

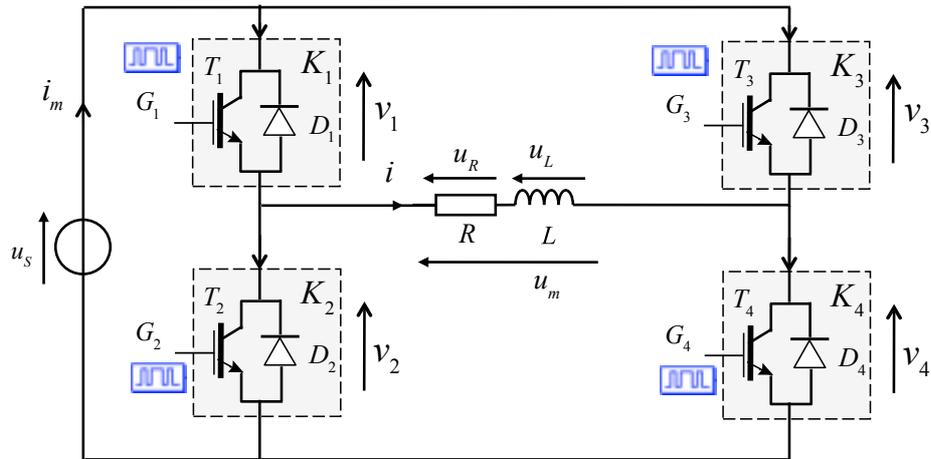
tension filtrée (fondamental de  $u_m$ )



1080 +/- 60 Hz  
 60 Hz

PlotScopeFFTPWM1.m

## Structure de l'onduleur en pont monophasé



L'onduleur en pont monophasé utilise la même structure que le hacheur 4 quadrants.  
Seules la séquence des signaux de commande et sa fréquence de lecture les différencie

Hacheur 4 quadrants

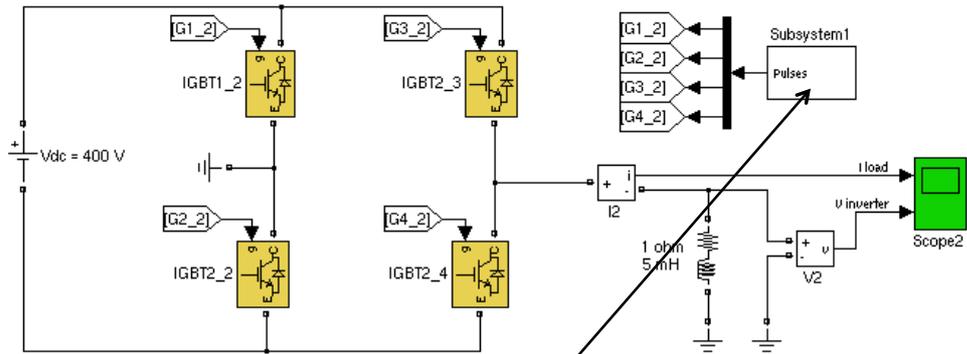
Onduleur en pont

# Simulation de l'onduleur en pont monophasé

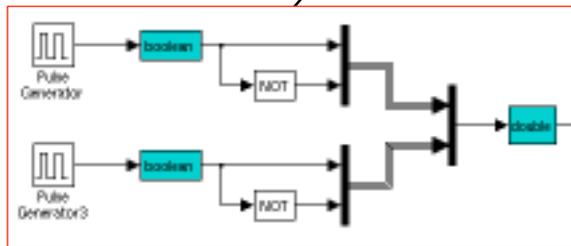
Modèle Matlab SimPower Systems

DC/AC Full-Bridge Inverter

V2 fundamental:  
 = m\*Vdc V peak  
 = 0.8\*400  
 = 320 V



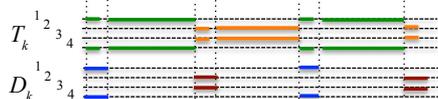
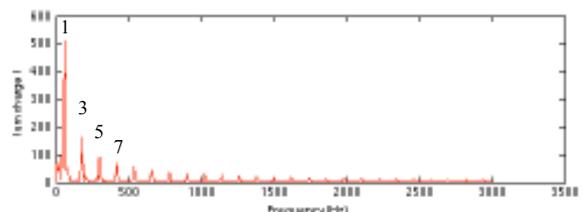
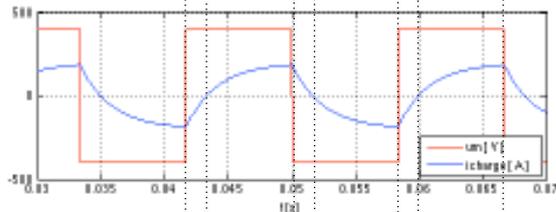
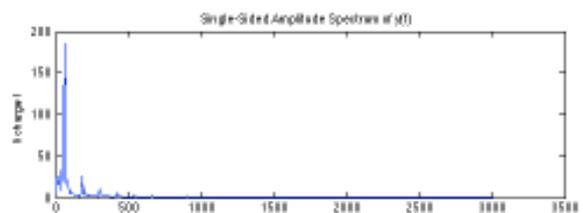
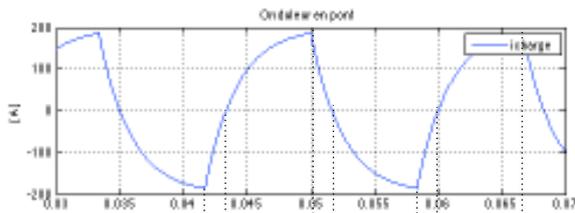
commandes complémentaires  
 décalées ou pas  
 commande PWM



Inverter\_1phPonde\_IGBT.mdl  
 Inverter\_1phPWM\_IGBT.mdl

## Onduleur en pont monophasé. Commandes complémentaires

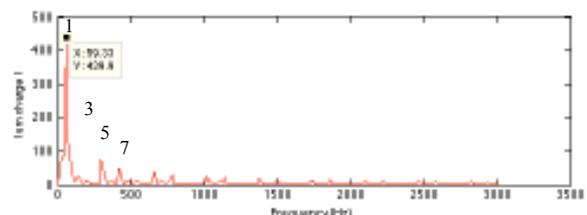
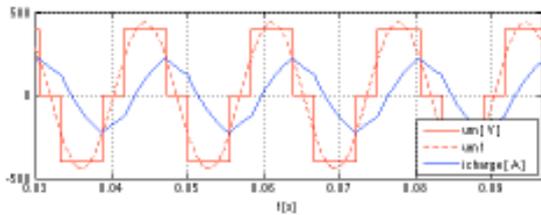
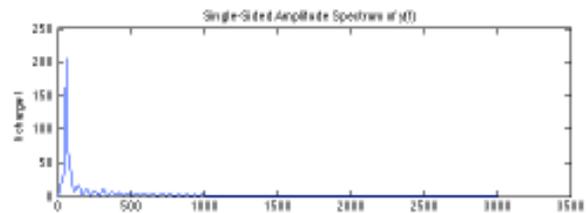
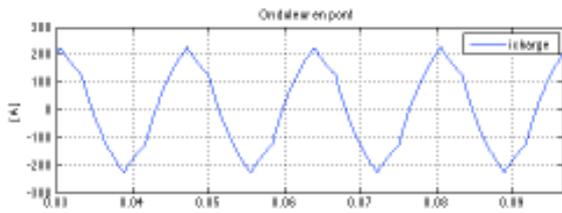
Commandes  $T_k$



PlotScopeFFTPonde2.m

## Onduleur en pont monophasé. Commandes décalées

Commandes  $T_k^1, 2, 3, 4$



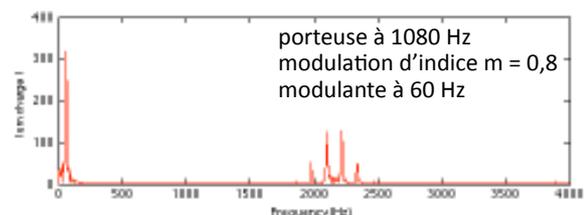
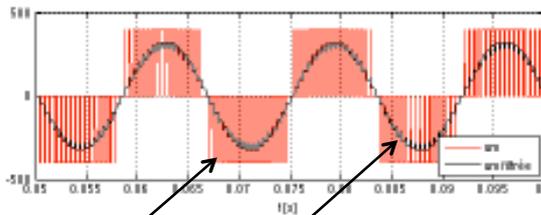
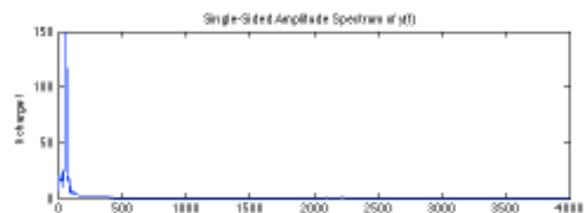
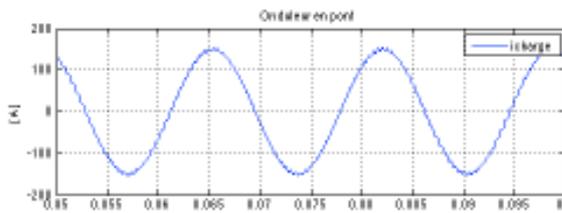
L'onduleur en pont permet d'obtenir une tension à 3 niveaux  $-u_s, 0, u_s$   
Avec des commandes décalées de  $60^\circ$  l'harmonique 3 disparaît !

La suppression des harmoniques permet de réduire les échauffements et améliore donc le rendement du moteur

PlotScopeFFTPonde2.m

## Onduleur en pont monophasé. Commande PWM

La Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) réduit les harmoniques de rang faible. Par contre, elle fait apparaître des harmoniques de rang élevé (peu énergétiques mais à l'origine de bruit, de problèmes de CEM...)



porteuse à 1080 Hz  
modulation d'indice  $m = 0,8$   
modulante à 60 Hz

tension  $u_m$  filtrée

tension  $u_m$  modulée

PlotScopeFFTPWM2.m

# ONDULEUR TRIPHASÉ

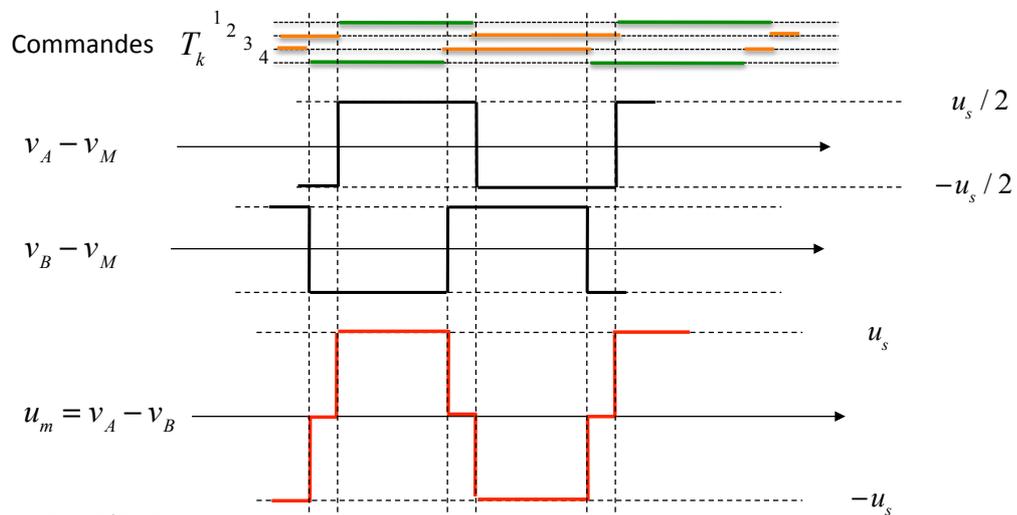
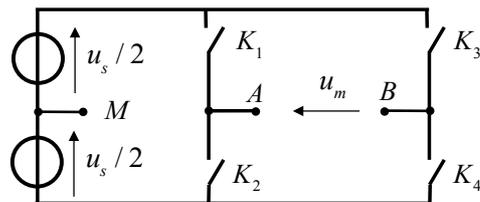
- Onduleur pleine onde
- Onduleur MLI

## Onduleur triphasé

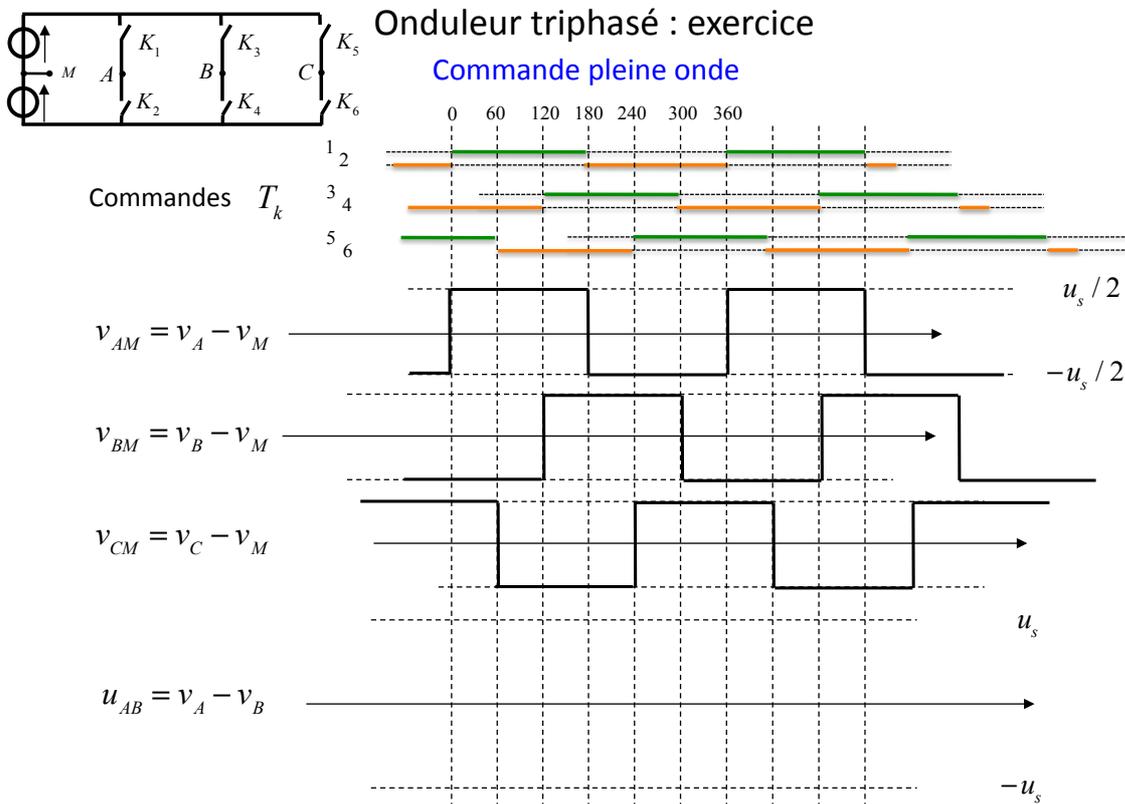
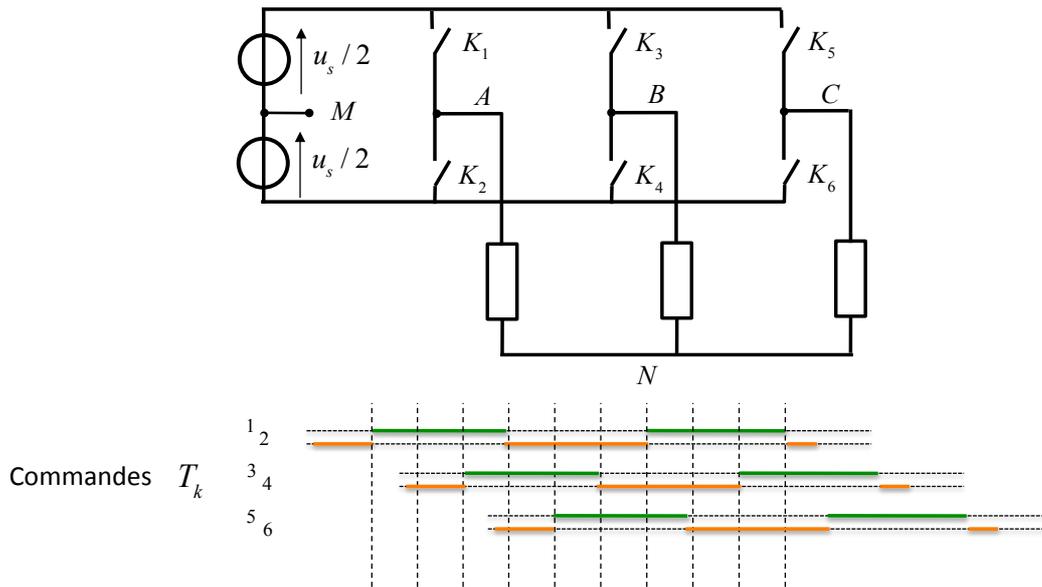
### Introduction

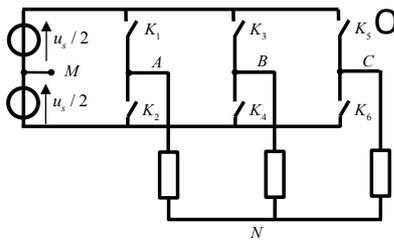
On généralisera l'étude de l'onduleur monophasé au triphasé selon la méthode ci-contre :

$$u_m = v_A - v_B = (v_A - v_M) - (v_B - v_M)$$



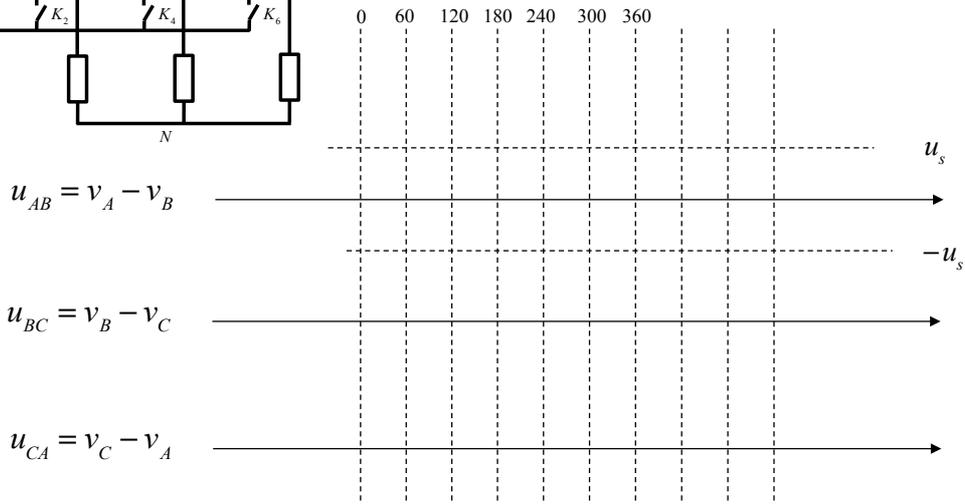
## Onduleur triphasé Commande pleine onde



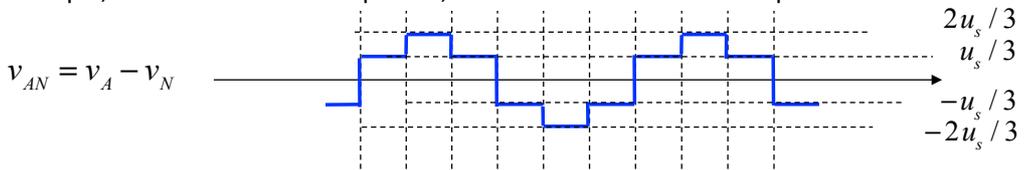


### Onduleur triphasé : exercice

#### Commande pleine onde



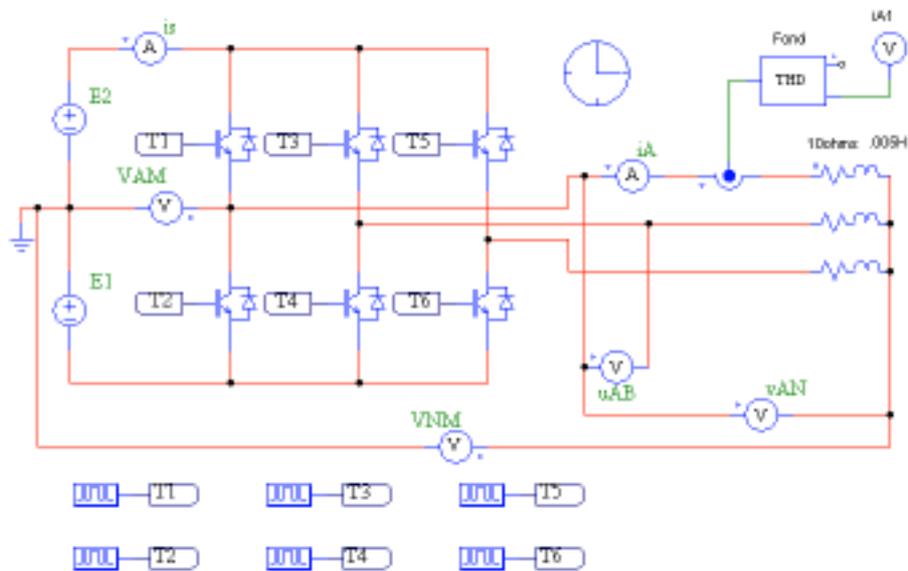
Montrer que, en fonctionnement équilibré, la tension aux bornes d'une phase a l'allure ci-dessous :



### Onduleur triphasé

#### Commande pleine onde

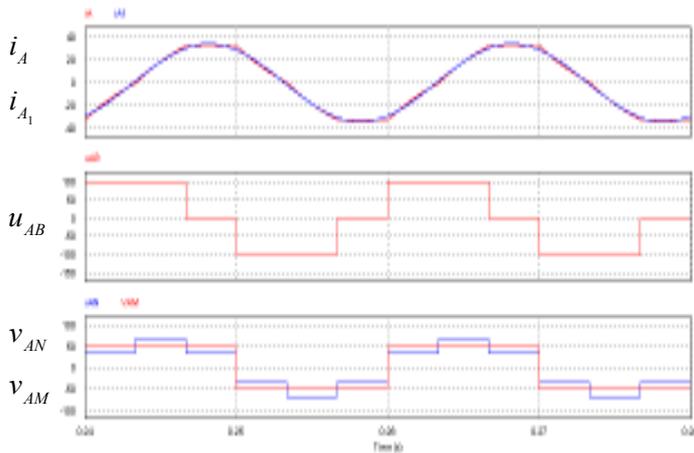
#### Modèle PSim



## Onduleur triphasé Commande pleine onde

Modèle PSim

On choisit  $E_1 = E_2 = 50V$   
 $f = 50 Hz$



Le taux de distorsion harmonique du courant de sortie est :

$$THD_i = 6,7\%$$

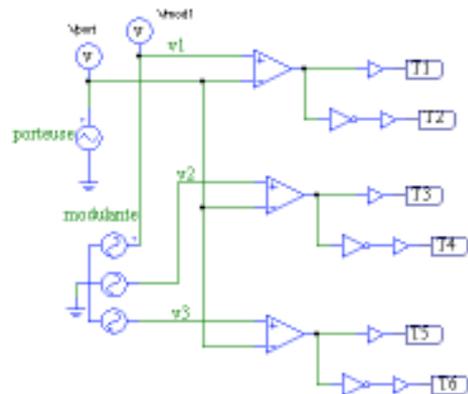
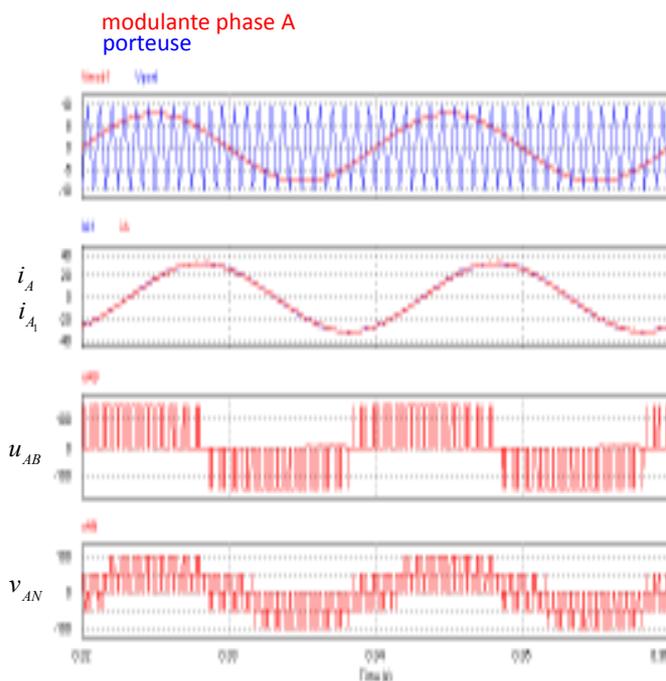
THD : voir annexes

ond\_tri\_pleine\_onde\_S11.psimsch

3. Onduleurs – P. MARSEILLE

25

## Onduleur triphasé Commande MLI ou PWM



Le taux de distorsion harmonique du courant de sortie est meilleur que le précédent :

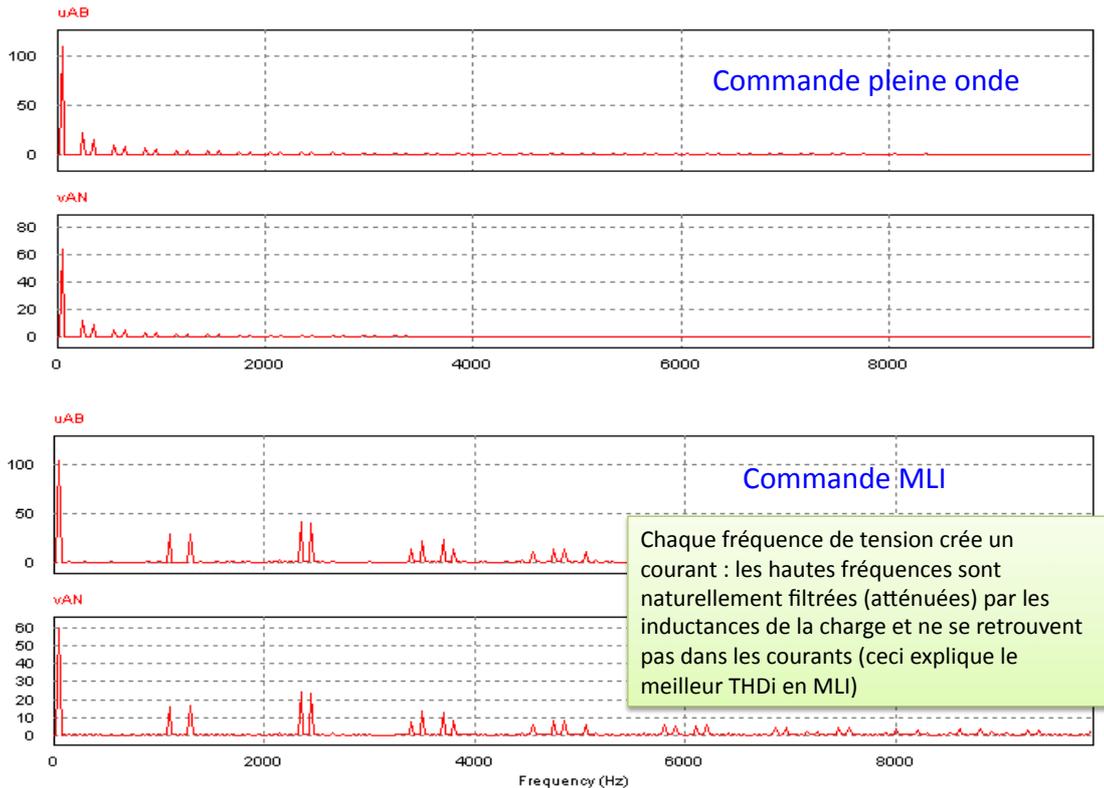
$$THD_i = 2,7\%$$

ond\_tri\_mli\_rl3.psimsch

3. Onduleurs – P. MARSEILLE

26

## Comparaison des spectres fréquentiels des tensions



## Conclusion

L'onduleur se rencontre dans de très nombreuses applications de puissance.

Nous nous sommes limité ici au cas de la **variation de vitesse** des machines triphasées à courant alternatif mais les **installations photovoltaïques** connectées au réseau alternatif sont un autre exemple faisant aussi appel à ces convertisseurs (monophasés pour de petites productions).

On rappelle que l'onduleur en pont monophasé utilise la même structure que le hacheur 4Q, **c'est la stratégie de commande qui définit la fonction** : dans le cas de l'onduleur on cherche à recréer des grandeurs de fréquence basse généralement alors que le hacheur a pour but de créer une tension continue à valeur variable à partir d'un découpage haute fréquence.

C'est en partant d'un « bras d'onduleur » (onduleur en demi pont) que **l'on construit progressivement l'onduleur triphasé**. Cette démarche appliquée avec une commande en ondes pleines permet de mettre en évidence la méthode de détermination des tensions simples et composées imposées à la charge. L'interprétation directe du comportement à partir des signaux issus d'une commande MLI (ou PWM en anglais) est beaucoup plus difficile.

Enfin, la MLI a montré sa supériorité quand il s'agit **d'améliorer le THD du courant**.

# ANNEXE

## Formulaire

### Développement en série Fourier d'un signal périodique

$$u(t) = \langle u(t) \rangle_T + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{U}_k \cos(k\omega t + \varphi_k) \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

pulsation (du terme fondamental) correspondant à la période T du signal décomposé

### Valeur efficace U d'un signal u(t) en présence d'harmoniques (Bessel-Parseval)

$$U^2 = \langle u^2(t) \rangle_T = \langle u(t) \rangle^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2$$

### Taux de distorsion ou taux d'harmoniques d'un signal

$$THD_{\%} = 100 \frac{\sqrt{U^2 - U_1^2}}{U} \rightarrow 0 \quad \text{pour un signal purement sinusoïdal } (U = U_1)$$

### Puissance instantanée

$$p(t) = u(t) i(t)$$

### Puissance moyenne (active) en watts [W] : signaux sinusoïdaux de même pulsation

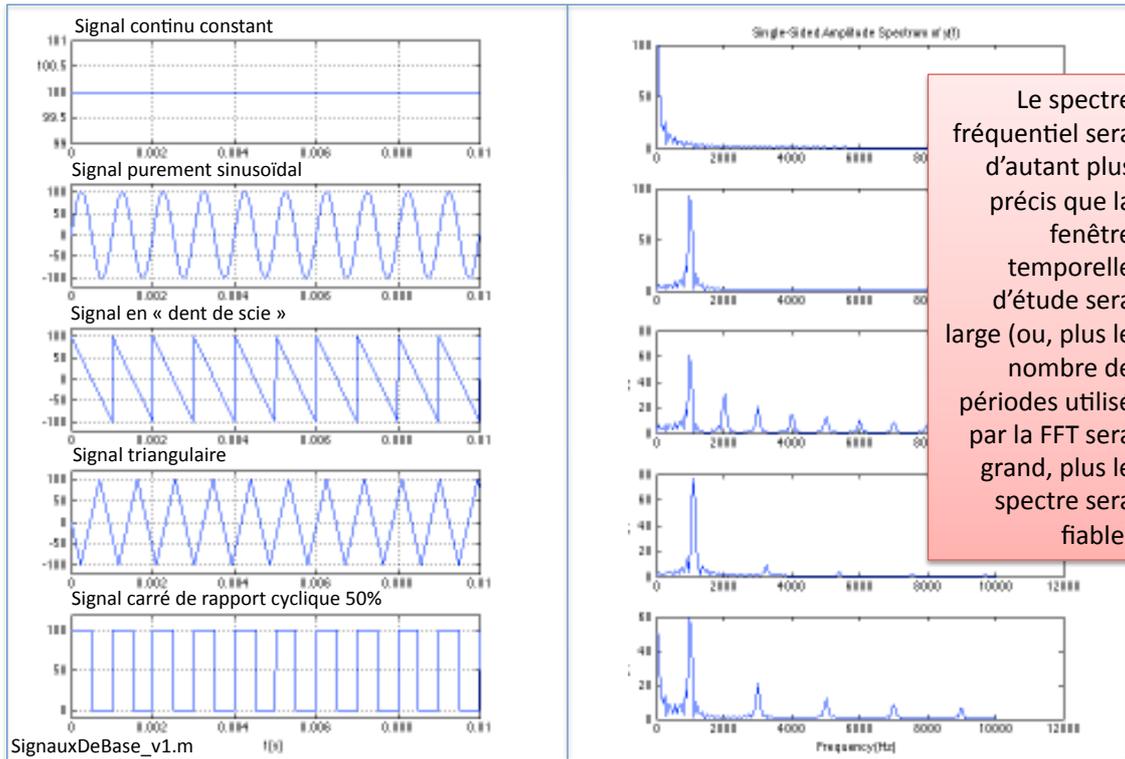
$$P = \langle p(t) \rangle_T = \frac{1}{T} \int_{(t)} u(t) i(t) dt = U I \cos(\varphi_{u/i})$$

### Puissance active) en watts [W] en présence d'harmoniques

$$P = \langle u(t) \rangle \langle i(t) \rangle + \sum_{k=n=1}^{\infty} U_k I_k \cos(k\omega t + \varphi_{u_k/i_k})$$

seules les grandeurs de même fréquence créent de la puissance

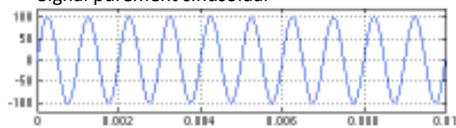
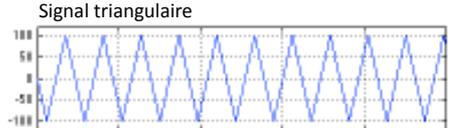
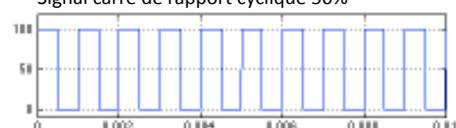
## Correspondances temporel / fréquentiel



Le spectre fréquentiel sera d'autant plus précis que la fenêtre temporelle d'étude sera large (ou, plus le nombre de périodes utilisé par la FFT sera grand, plus le spectre sera fiable)

SignauxDeBase\_v1.m  
 Sim\_SignauxDeBase.mdl  
 3. Onduleurs – P. MARSEILLE

## Développements en série de Fourier

$\hat{S} = 100 \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$ pulsation du terme fondamental ( $T=1ms$ ici)	$s(t) = \langle s(t) \rangle + \sum_{k=1}^{\infty} \hat{S}_k \cos(k\omega t + \varphi_k)$
<p>Signal purement sinusoïdal</p> 	$s(t) = \hat{S} \sin(\omega t)$
<p>Signal triangulaire</p> 	$s(t) = \frac{8\hat{S}}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(2k+1)^2} \sin((2k+1)\omega t)$
<p>Signal carré de rapport cyclique 50%</p> 	$s(t) = \frac{4\hat{S}}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin((2k+1)\omega t)}{2k+1}$

## Grandeurs triphasées équilibrées

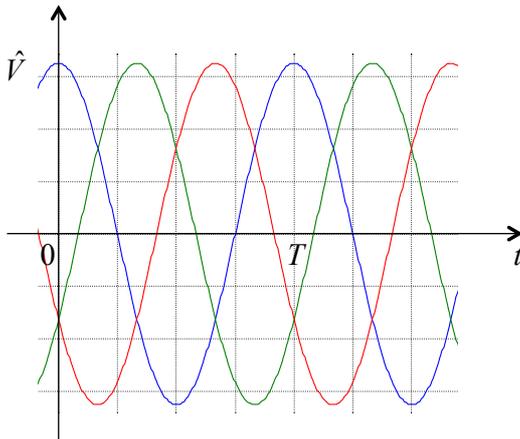
$$v_{1N}(t) = \hat{V} \cos(\omega t)$$

$$v_{2N}(t) = \hat{V} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

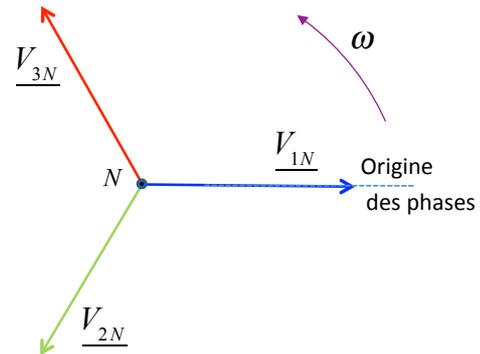
$$v_{3N}(t) = \hat{V} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

**Grandeurs triphasées équilibrées :** les formes sont identiques, décalées de  $T/3$  l'une par rapport à l'autre.

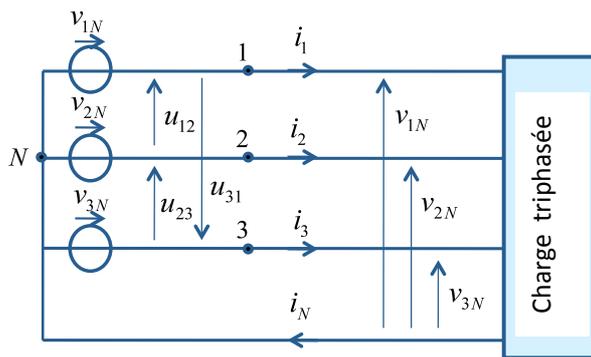
**Conséquence :** le système est à somme nulle



Représentation vectorielle



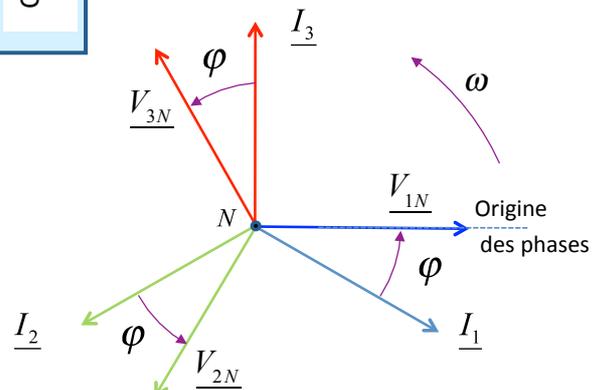
## Charge équilibrée



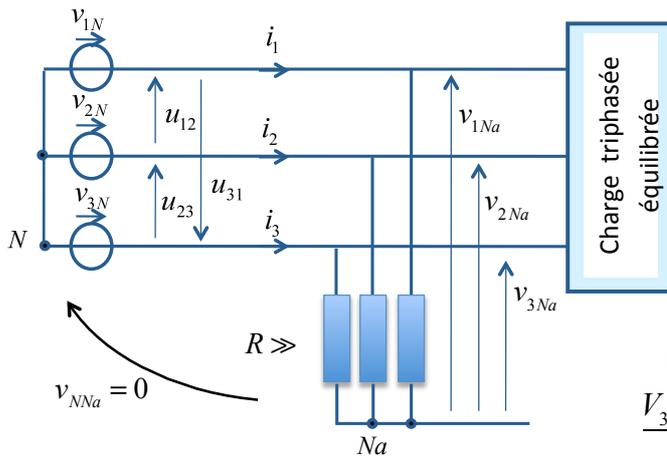
Une charge est dite équilibrée si, alimentée par des tensions équilibrées elle absorbe des courants triphasés équilibrés

$$i_N(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0$$

Le courant dans le neutre étant nul en fonctionnement équilibré, on peut le supprimer

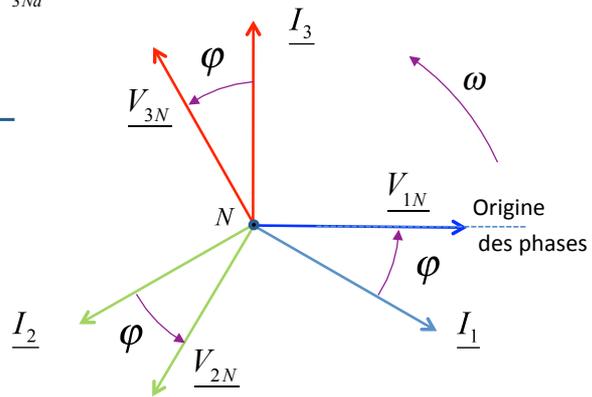


## Neutre artificiel

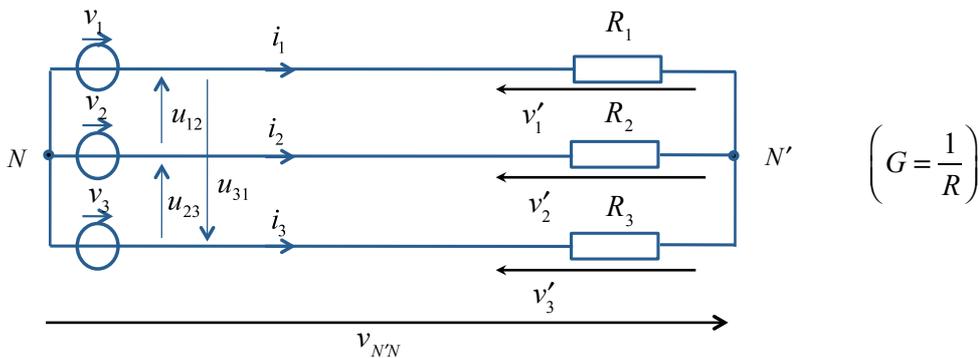


Une charge est dite équilibrée si, alimentée par des tensions équilibrées elle absorbe des courants triphasés équilibrés

En fonctionnement équilibré, les points N et Na sont au même potentiel



## Théorème de Millman



$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad \text{loi des nœuds}$$

$$\frac{v'_1}{R_1} + \frac{v'_2}{R_2} + \frac{v'_3}{R_3} = 0$$

$$\frac{v_1 - v_{N'N}}{R_1} + \frac{v_2 - v_{N'N}}{R_2} + \frac{v_3 - v_{N'N}}{R_3} = 0$$

$$(v_1 - v_{N'N})G_1 + (v_2 - v_{N'N})G_2 + (v_3 - v_{N'N})G_3 = 0$$

$$v_{N'N}(G_1 + G_2 + G_3) = v_1G_1 + v_2G_2 + v_3G_3$$

$$v_{N'N} = \frac{v_1G_1 + v_2G_2 + v_3G_3}{G_1 + G_2 + G_3}$$

$v_{N'N} = 0$  si la charge est équilibrée  $R_1 = R_2 = R_3$

$v_1 + v_2 + v_3 = 0$  si tensions triphasées équilibrées

En fonctionnement équilibré, les points N et N' sont au même potentiel