

Entrainement à vitesse variable de la machine asynchrone

Variation à base d'onduleur

Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Loi de commande V/f :

L'action sur la fréquence, modifie la vitesse de synchronisme ainsi que le point de fonctionnement.

Pour une bonne maîtrise d'un processus d'entraînement, on cherche à conserver un couple moteur maximal constant. Au voisinage de la vitesse du synchronisme l'expression du couple maximal T_{max} s'écrit :

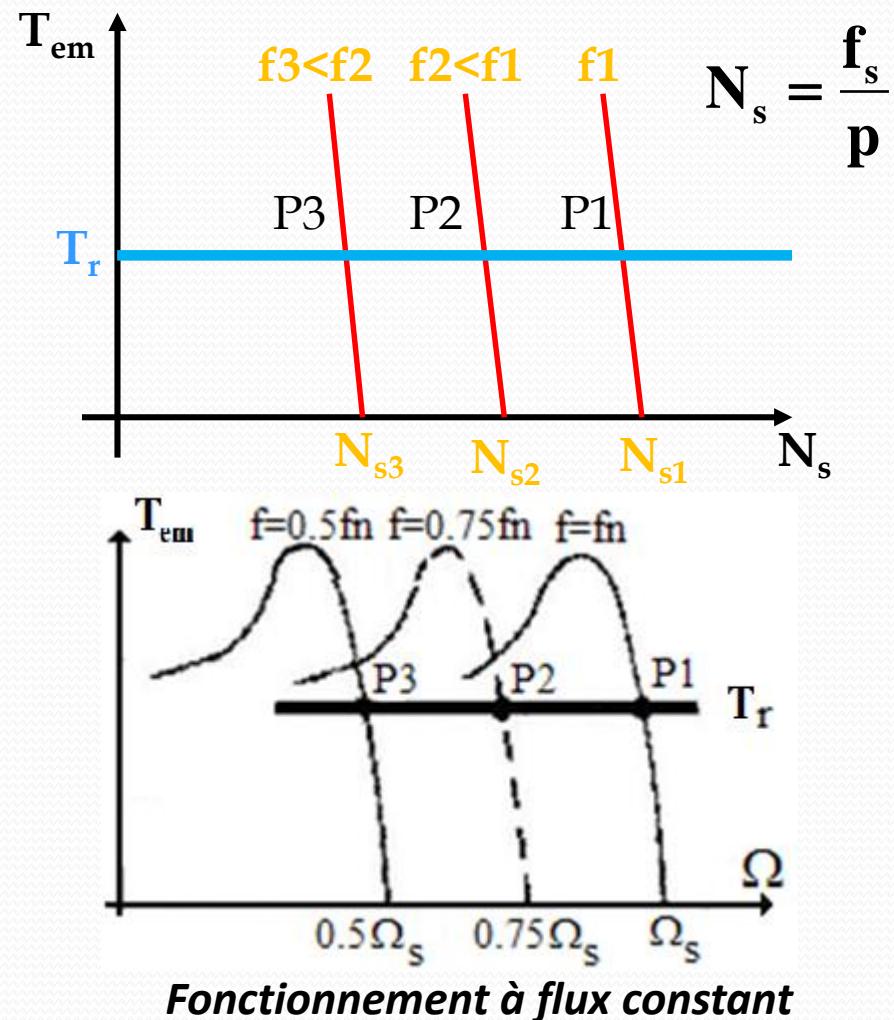
$$T_{max} = \frac{3V_s^2}{2\Omega_s L_2 \omega} \quad \text{avec : } \Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

$$T_{max} = \frac{3p}{8\pi^2 L_2} \left(\frac{V_s}{f} \right)^2 = K \left(\frac{V_s}{f} \right)^2$$

$\left(\frac{V_s}{f} \right)$ est représentatif du flux magnétisant

f varie et on veut maintenir

T_{max} , il faut que V_s varie pour que : $\frac{V_s}{f} = \text{Cste}$



Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Convertisseurs de fréquence :

On distingue plusieurs types de convertisseurs de fréquence dont le schéma synoptique reste identique au schéma suivant :

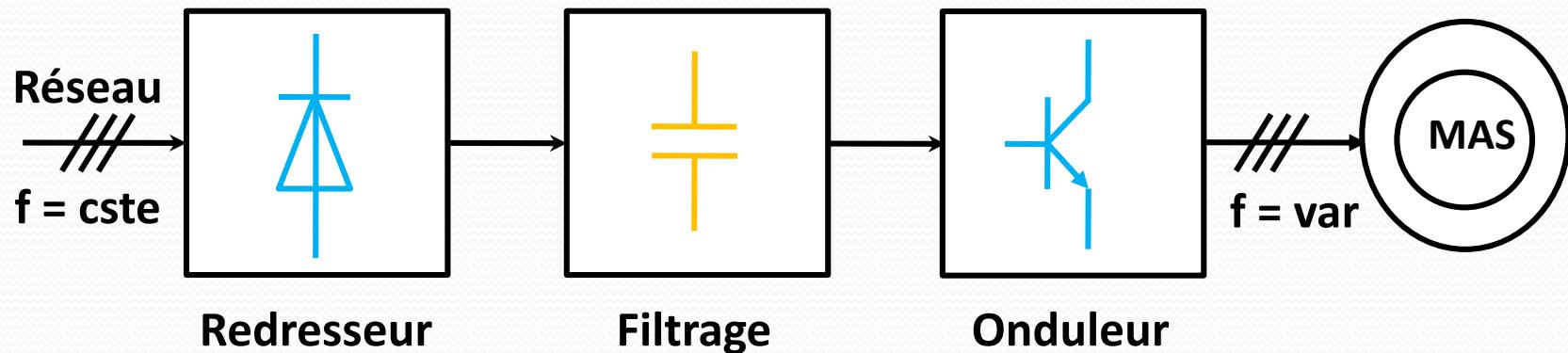


Schéma synoptique d'un convertisseur de fréquence

- ❖ La fonction assurée par l'étage **redresseur** est de **convertir de l'énergie alternative en énergie continue**.
- ❖ Le rôle du **filtre** est :
 - ✓ soit de créer **une source de tension continue** (condensateur).
 - ✓ soit de créer **une source de courant continu** (self).
- ❖ L'**onduleur** permet de **convertir l'énergie continue en énergie alternative à tension et fréquence variables** sous forme d'un réseau triphasé.

Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

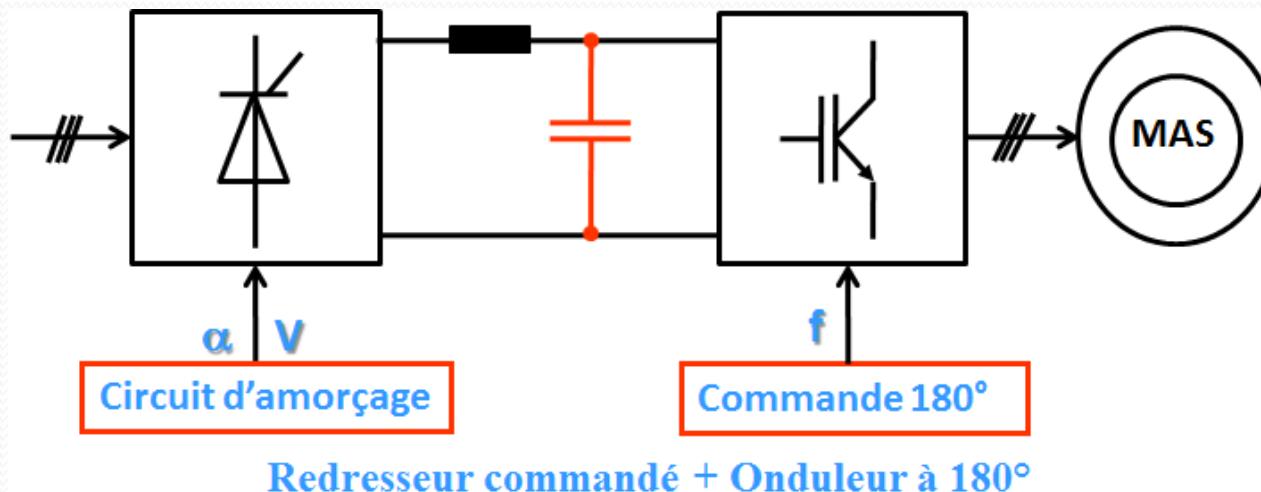
Variateur à base d'onduleur

Convertisseurs de fréquence :

Suivant le type d'alimentation, on distingue deux grandes catégories de convertisseurs de fréquence :

1- Alimentation en tension :

a- Redresseur commandé + onduleur 180°



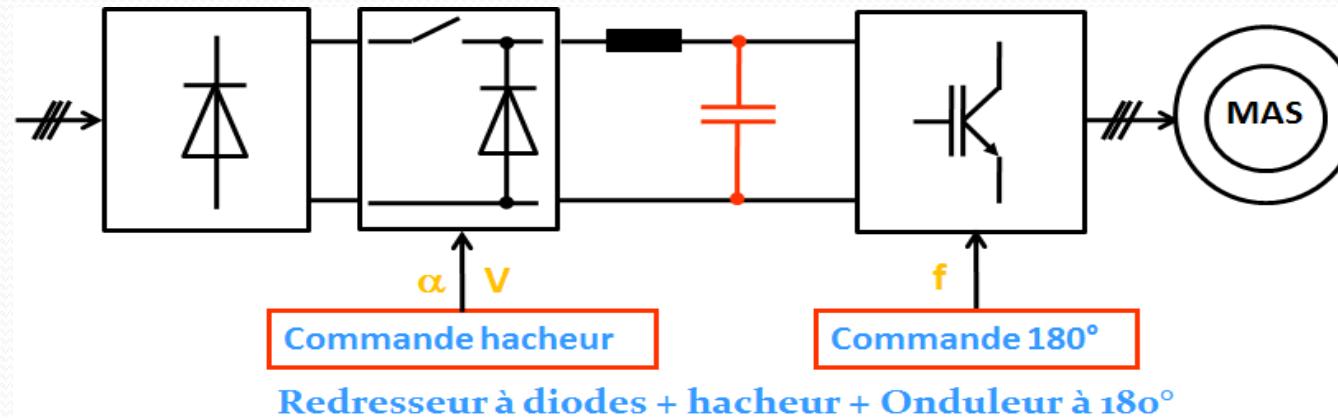
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

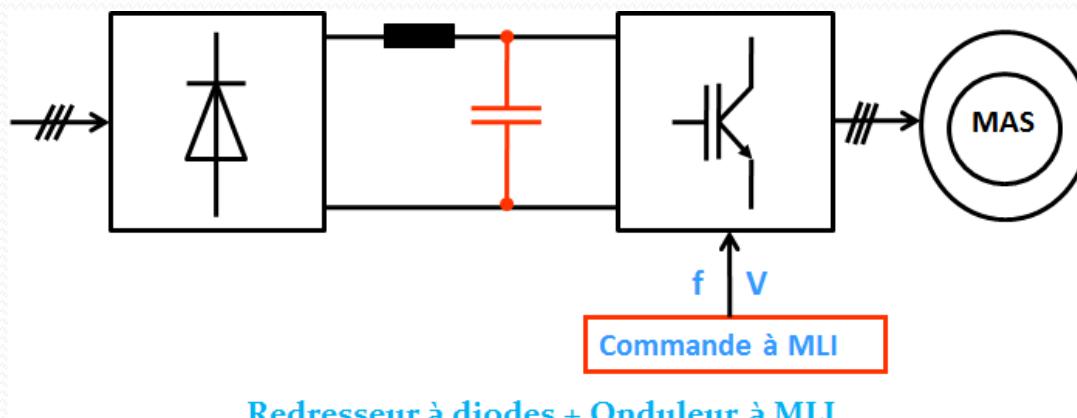
Convertisseurs de fréquence :

1- Alimentation en tension :

b- Redresseur à diodes + hacheur + onduleur 180°



c- Redresseur à diodes + Onduleur à MLI



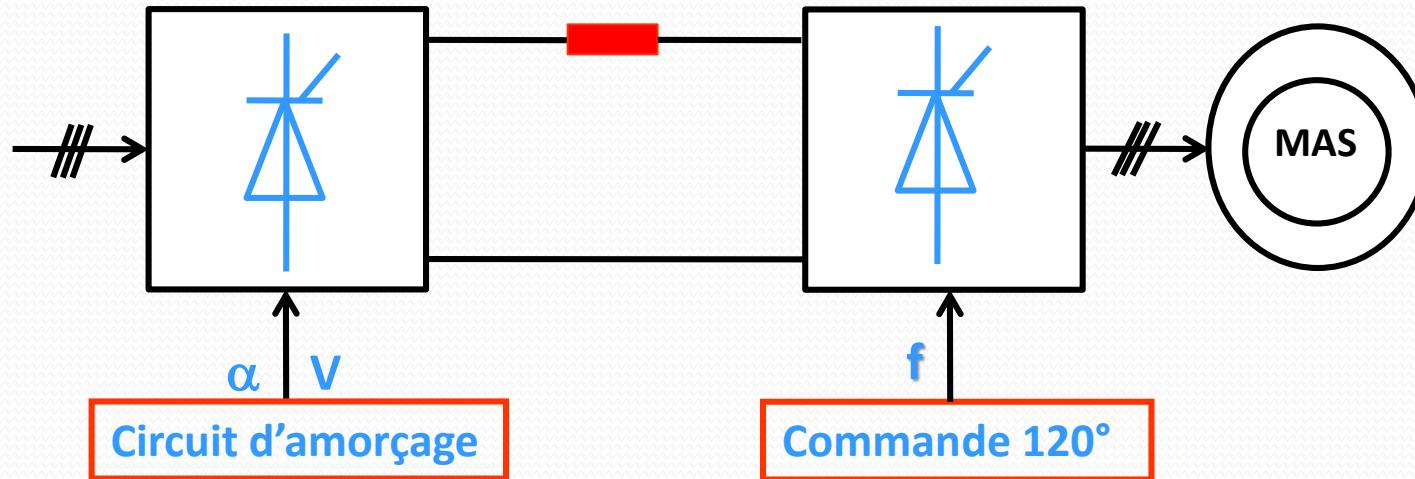
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Convertisseurs de fréquence :

2- Alimentation en courant :

On parle de **commutateurs de courant** ou **onduleurs de courant** où l'étage « redresseur-filtre » constitue une source de courant continu pour l'onduleur.



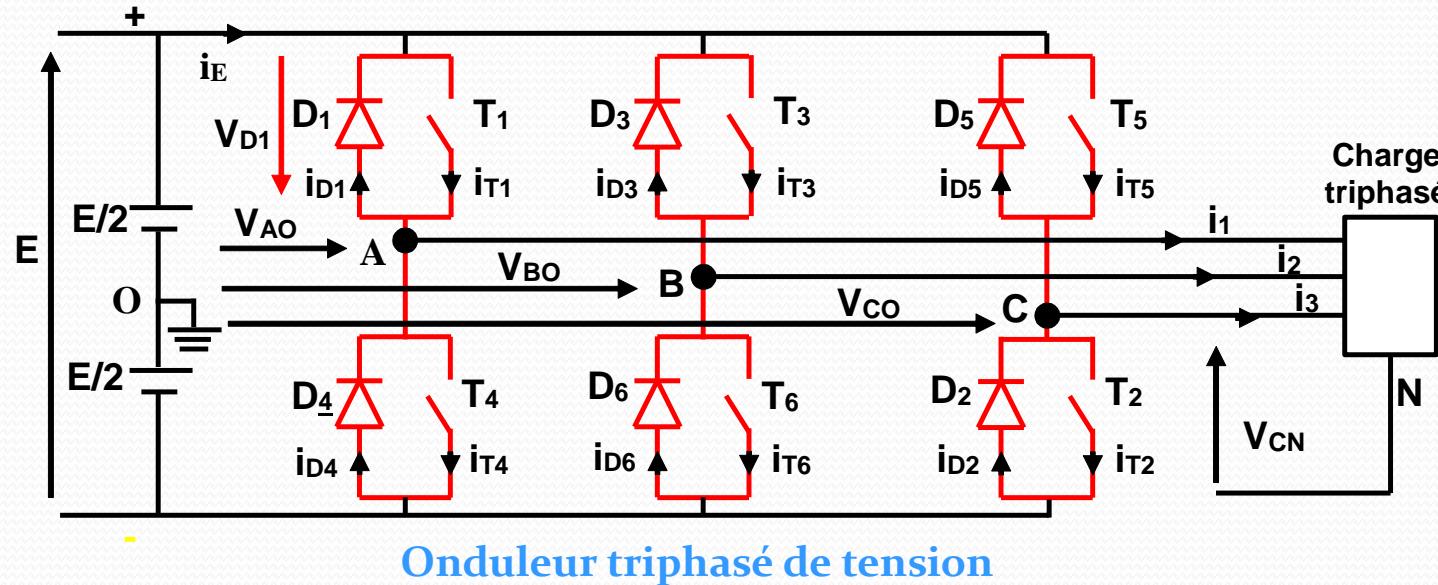
Le commutateur de courant de type auto-séquentiel est le plus souvent utilisé à cause de sa robustesse.

Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs triphasés

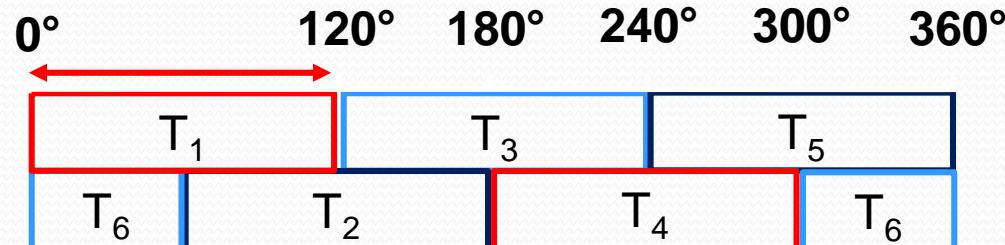
Constitué principalement **de six interrupteurs** de puissance



Onduleur triphasé de tension

Commande 120° :

Dans une commande à 120° chaque transistor est commandé pendant 120°.



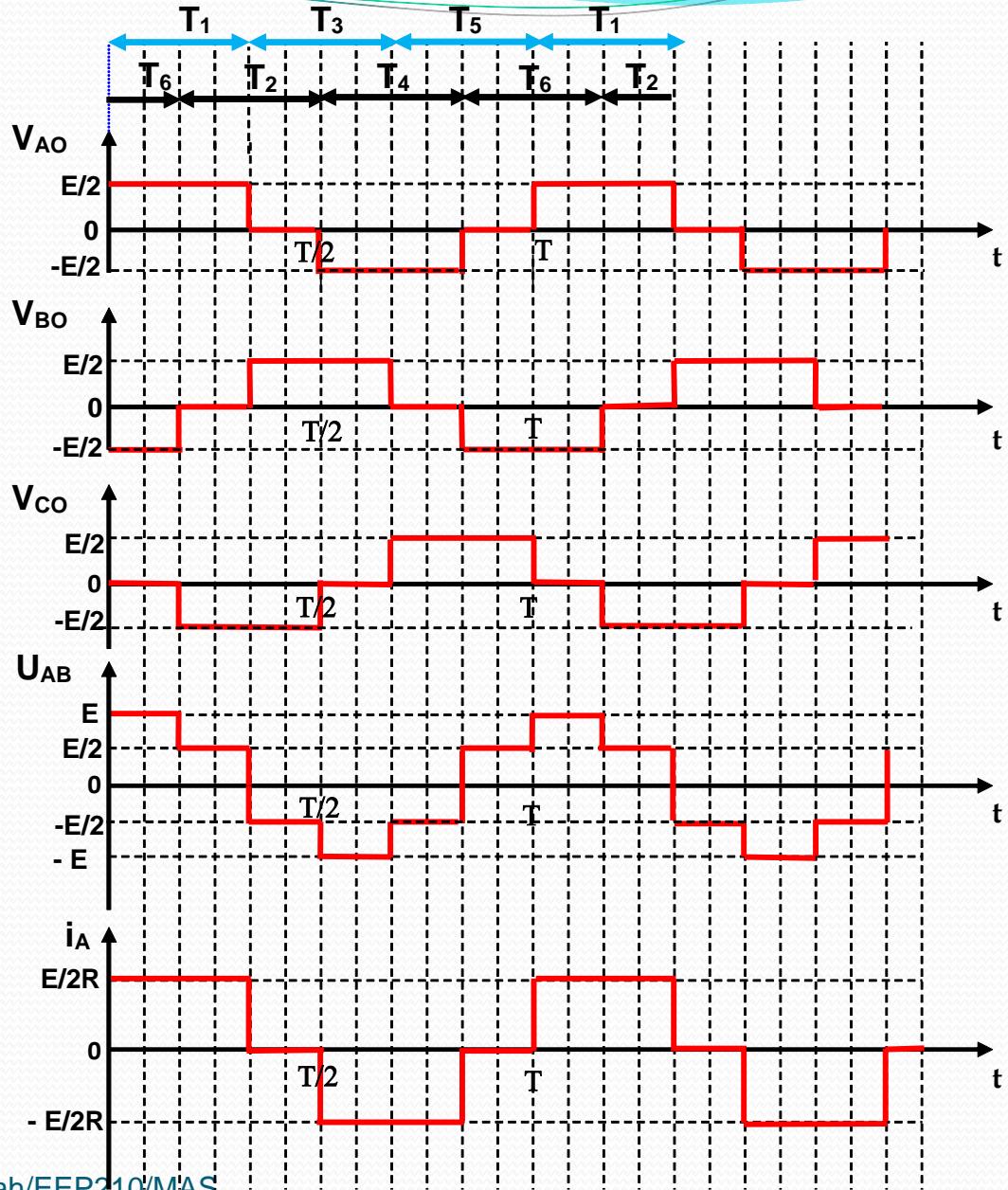
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs triphasés

Commande 120° :

Formes d'ondes : Commande 120°
cas d'une charge résistive



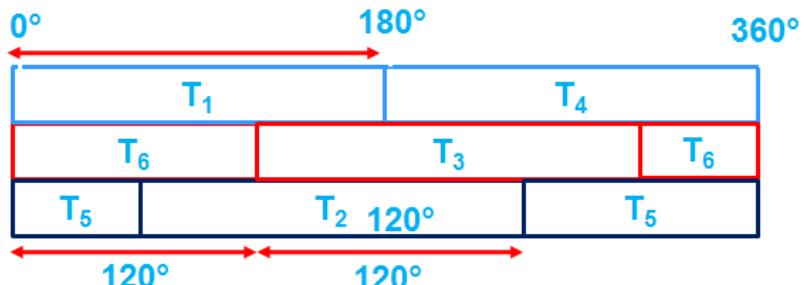
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

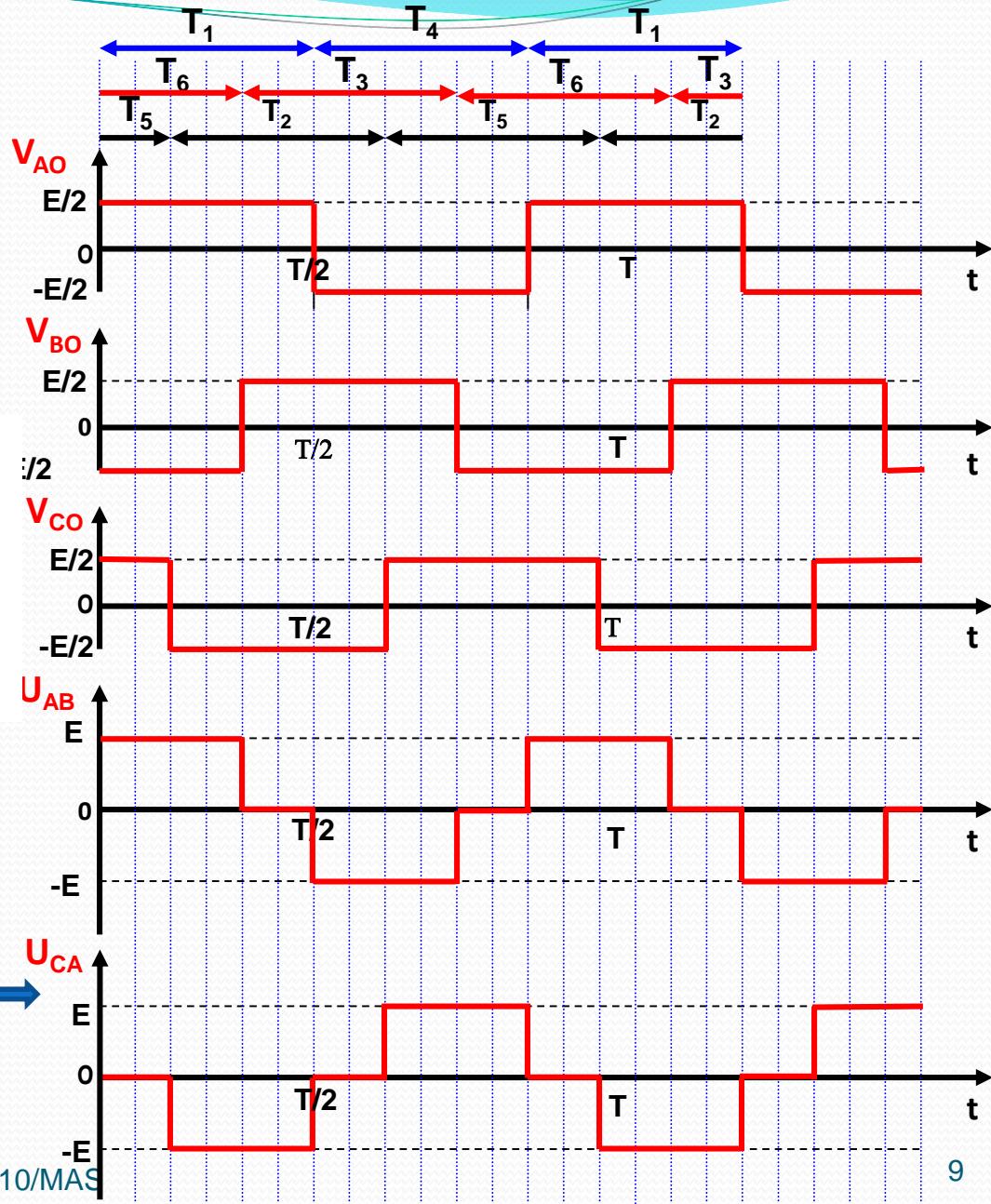
Onduleurs triphasés

Commande 180° :

Chaque transistor est commandé pendant 180°.



Formes d'onde : commande 180°
cas d'une charge résistive

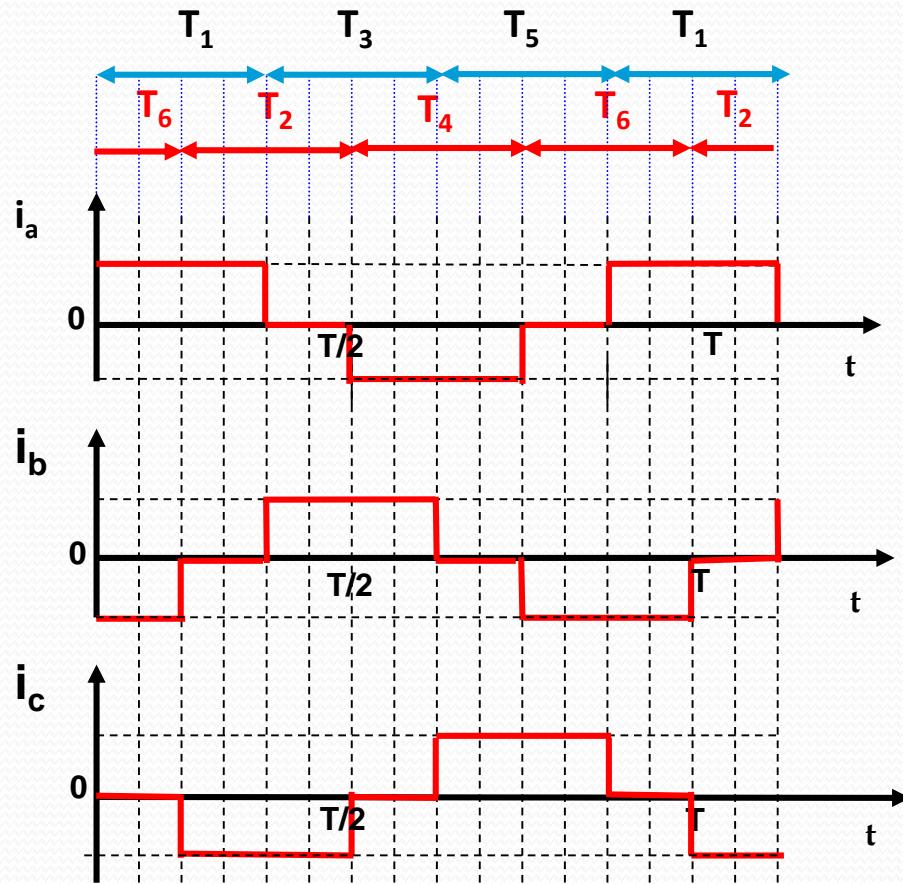
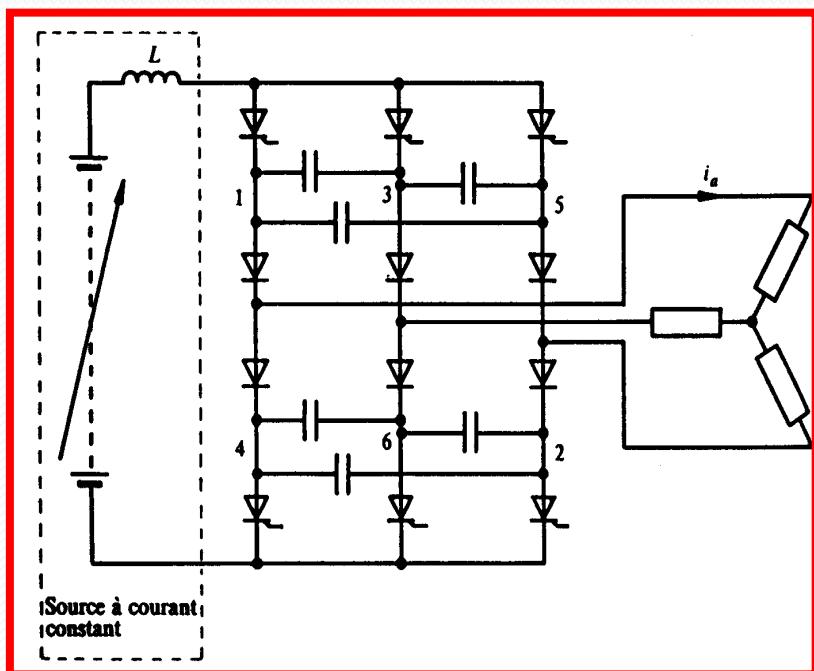


Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs triphasés de courant

Pour un **onduleur de courant** ou **commutateur de courant**, la source continue impose un courant constant.



Le courant de charge est **une onde quasi carrée**, chaque thyristor **conduit durant 120°**.

Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI :

La MLI ou PWM consiste à introduire des **commutations supplémentaires à fréquence plus élevée que celle du fondamental**, transformant la tension en une suite de créneaux d'amplitude et de largeur variables.

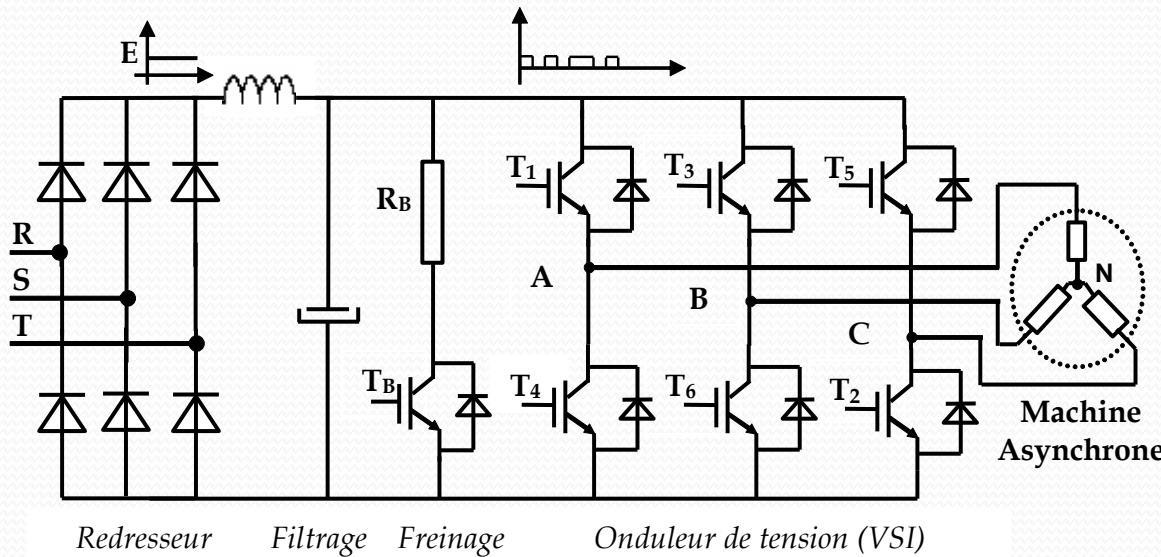
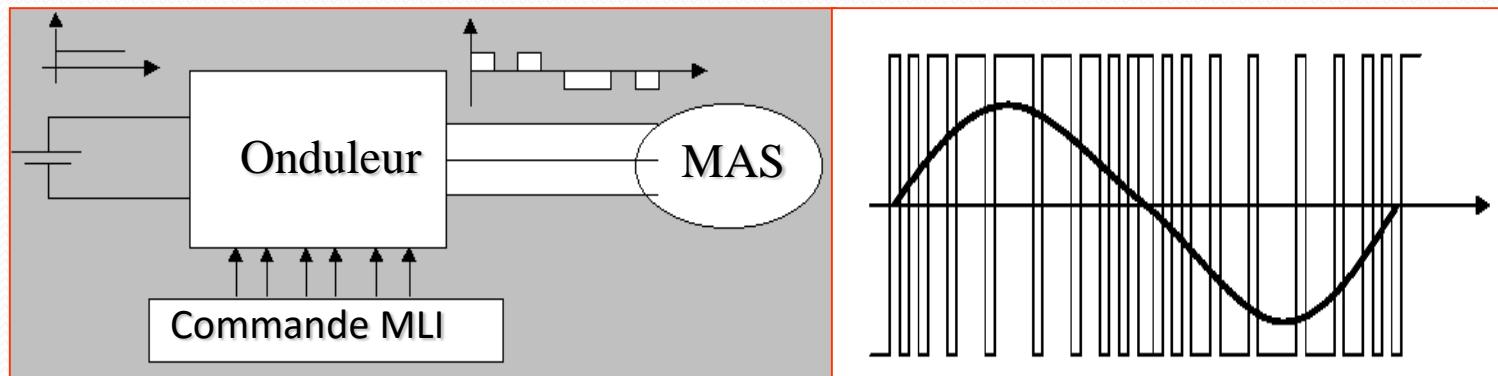


Schéma bloc d'un onduleur à MLI

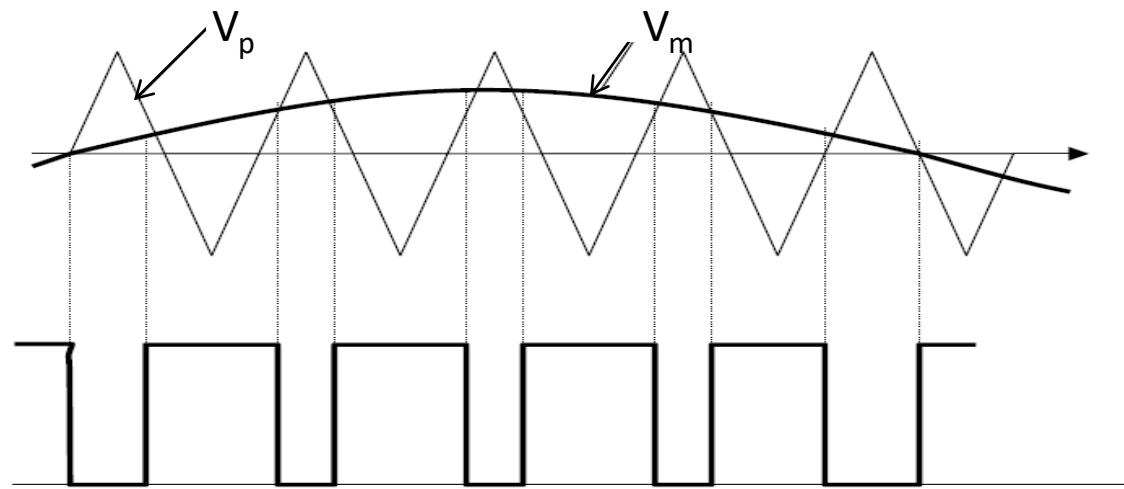
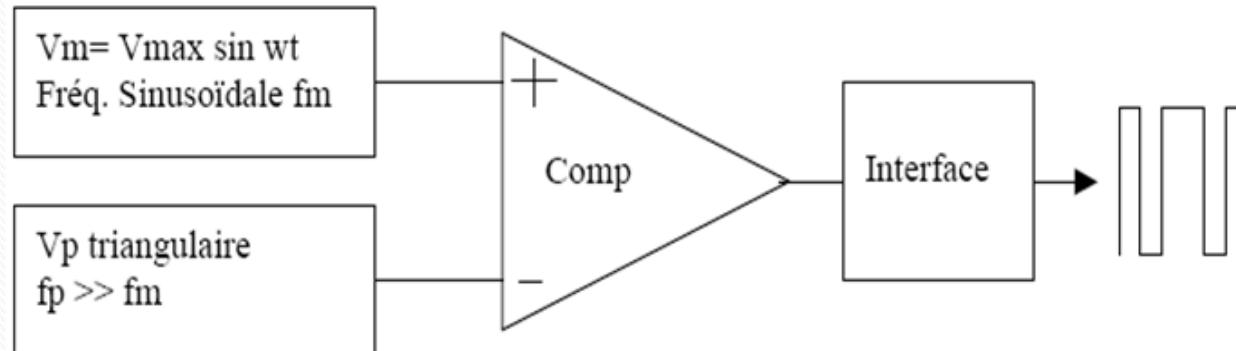
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI :

La commande à MLI présente une **neutralisation** efficace des harmoniques permettant ainsi de se rapprocher du **signal sinusoïdal** désiré.

Principe de la MLI :



Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI :

Techniques de commande à MLI

Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion ont été développées au cours de ces dernières années. Deux variantes de commande ont eu beaucoup d'intérêt :

- ✓ La modulation sinusoïdale (SPWM)
- ✓ La modulation vectorielle (SVPWM)

MLI sinusoïdale

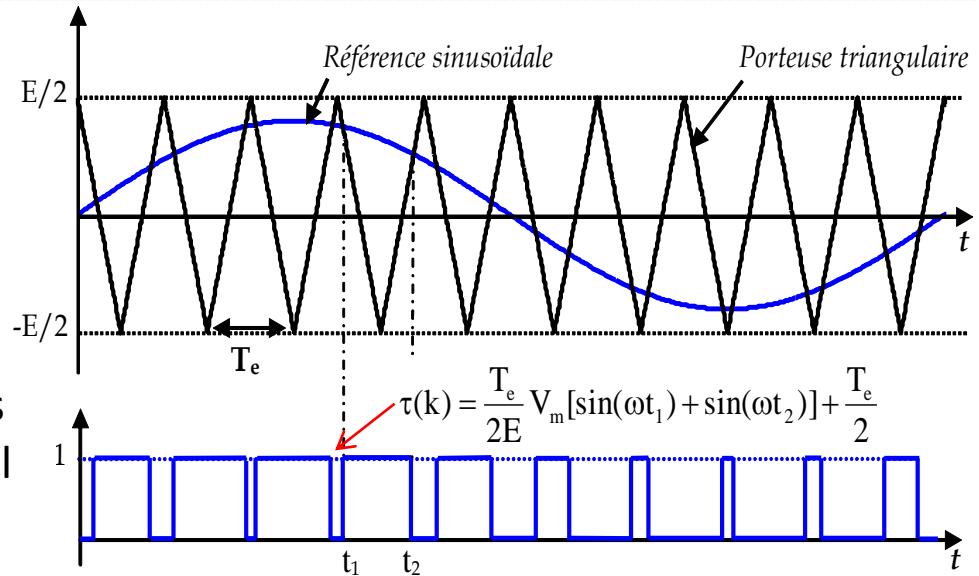
1- MLI sinusoïdale naturelle

Avantage :

- ☞ Souplesse d'implantation

Inconvénients :

- ☞ Maîtrise incomplète des harmoniques
- ☞ Implantation inadaptée en temps réel



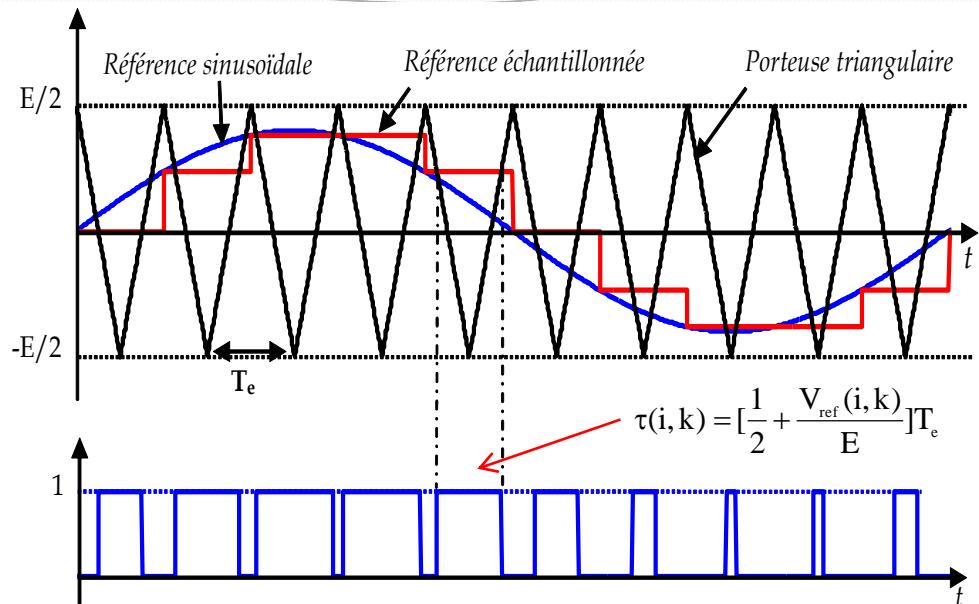
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI :

2- MLI Sinusoïdale régulière

a- MLI Sinusoïdale régulière symétrique

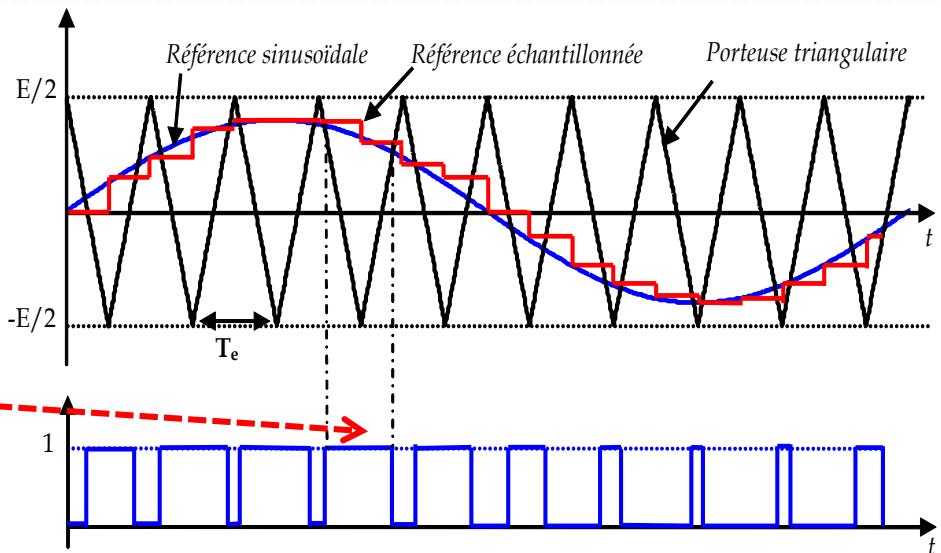


b- MLI Sinusoïdale régulière asymétrique

Avantages :

- * Maîtrise des instants de commutation
- * Facilement réalisable en temps réel par microprocesseur

$$\tau(i,k) = \frac{T_e}{2E} V_m [\sin kT_e + \sin(k + 0.5)T_t] + \frac{T_e}{2}$$



Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI :

MLI vectorielle

Concept de vecteur d'espace

Dans l'étude des machines à courant alternatif, le concept de vecteur d'espace est très utile et est souvent utilisé. En effet, pour une machine asynchrone, il est judicieux de représenter les grandeurs triphasées (tensions, courants, flux, ...) x_a , x_b et x_c , dans un plan complexe (α, β), par un vecteur d'espace $x(t)$ d'amplitude x et de position angulaire φ , défini par :

$$x_a = X_m \cos(\omega t)$$

$$x_b = X_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$x_c = X_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

X_m est l'amplitude de la composante fondamentale. Les composantes x_α et x_β se calculent à l'aide de la transformation orthogonale de Concordia.

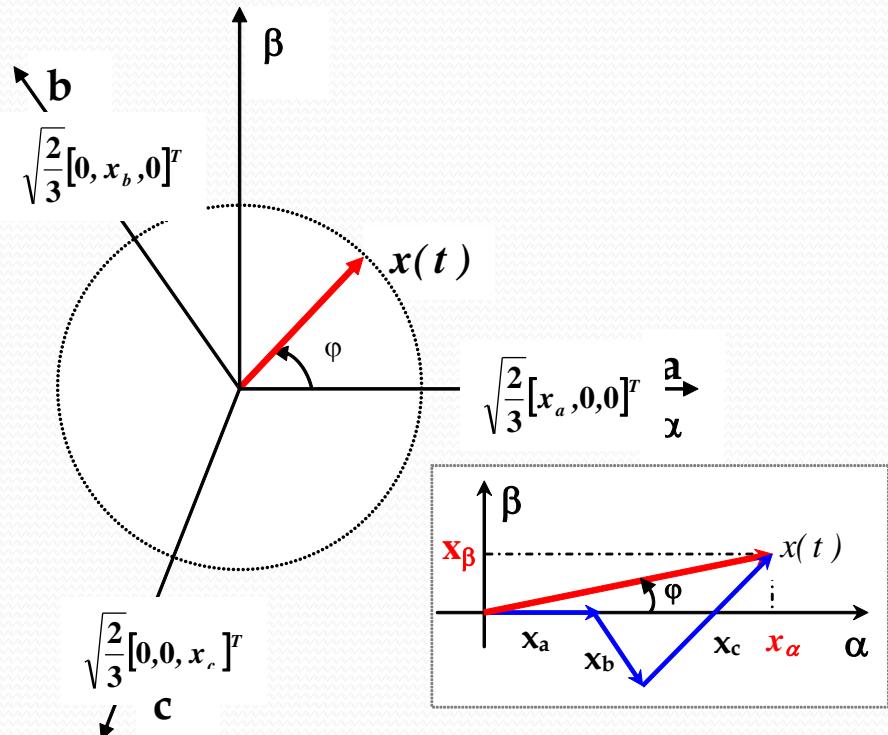
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI :

MLI vectorielle

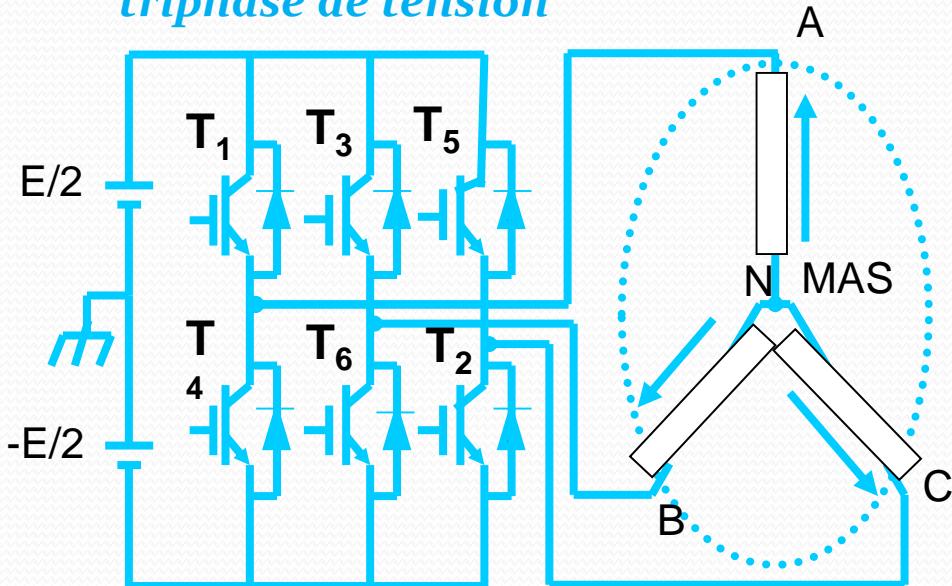
Concept de vecteur d'espace



$$\vec{x}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}(x_a + a \cdot x_b + a^2 \cdot x_c) = x_\alpha + j x_\beta$$

$$a = e^{j \frac{2}{3}\pi}$$

Vecteurs d'espace d'un onduleur triphasé de tension



$$V_{AN} = V_m \cos(\omega t))$$

$$V_{BN} = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$V_{CN} = V_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

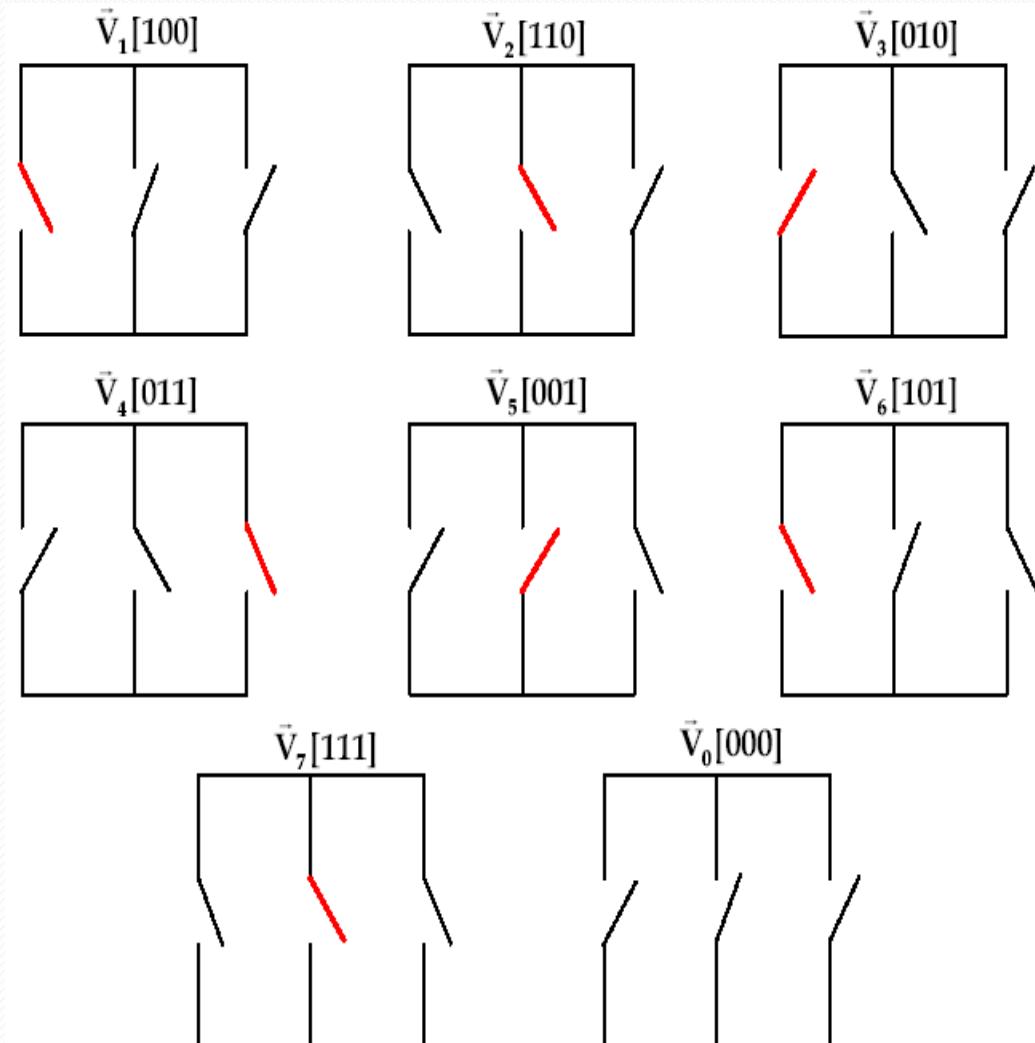
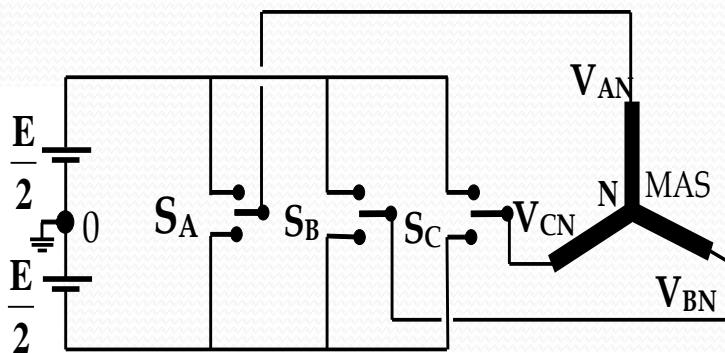
$$\vec{V}_s = \sqrt{\frac{2}{3}}(V_{AN} + a V_{BN} + a^2 V_{CN}) = V_{s\alpha} + j V_{s\beta}$$

Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Ainsi, chaque état de commutation de l'onduleur est caractérisé par le symbole $[S_A, S_B, S_C]$ dont les valeurs sont "1" ou "0" suivant la connexion des bornes S_A, S_B et S_C de l'onduleur à la borne positive et à la borne négative de la source de tension continue (figure), ce qui détermine parfaitement les tensions de sortie de l'onduleur triphasé.



Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Une analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs et une application de la transformation triphasée/biphasée suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{S\alpha} \\ V_{S\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix}$$

permet de calculer les tensions $V_{S\alpha}$ et $V_{S\beta}$ correspondant :

S_A	S_B	S_C	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	$V_{s\alpha}$	$V_{s\beta}$	Etat
o	o	o	o	o	o	0	0	\vec{V}_0
o	o	1	$-E/3$	$-E/3$	$2E/3$	$-E/\sqrt{6}$	$-E/\sqrt{2}$	\vec{V}_5
o	1	o	$-E/3$	$2E/3$	$-E/3$	$-E/\sqrt{6}$	$E/\sqrt{2}$	\vec{V}_3
o	1	1	$-2E/3$	$E/3$	$E/3$	$-\sqrt{2/3}E$	0	\vec{V}_4
1	o	o	$2E/3$	$-E/3$	$-E/3$	$\sqrt{2/3}E$	0	\vec{V}_1
1	o	1	$E/3$	$-2E/3$	$E/3$	$E/\sqrt{6}$	$-E/\sqrt{2}$	\vec{V}_6
1	1	o	$E/3$	$E/3$	$-2E/3$	$E/\sqrt{6}$	$E/\sqrt{2}$	\vec{V}_2
1	1	1	o	o	o	0	0	\vec{V}_7

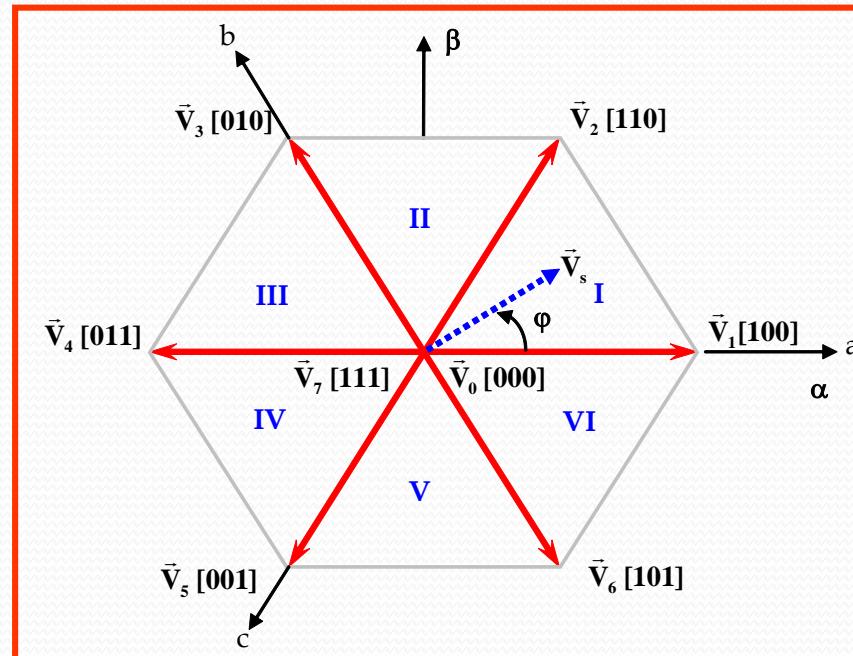
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Ces huit états possibles du vecteur d'espace définissent les limites de 6 secteurs dans le plan complexe (α, β). Six de ces huit configurations génèrent une tension de sortie non nulle et sont connus comme **vecteurs de commutation non nuls** $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{V}_4, \vec{V}_5, \vec{V}_6$ et les deux autres configurations génèrent une tension de sortie nulle et sont connus comme **vecteurs de commutation nuls** \vec{V}_0 et \vec{V}_7 .

\vec{V}_7 et \vec{V}_0 sont 2 vecteurs nuls



Représentation du polygone de commutation

Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Technique de Modulation Vectorielle :

Les huit vecteurs de tension, définis auparavant, correspondent à la tension statorique qu'on pourrait avoir si les interrupteurs de l'onduleur restaient dans un état correspondant à un vecteur donné. Pour avoir une tension statorique quelconque, La MLI vectorielle consiste à:

- Reconstituer la tension de référence V_s , pendant une période d'échantillonnage T_e par combinaison des vecteurs tensions adjacents et des vecteur nuls pendant les intervalles de temps T_1 , T_2 et T_0 .
- Afin d'aboutir à des séquences optimales au niveau énergétique, conduisant au minimum d'harmoniques avec le minimum de commutations, la sélection d'ordre de commutation doit se faire avec inversion d'ordre des états sur une période d'échantillonnage T_e . Dans ce cas, le passage d'un état du convertisseur au suivant se fait en commutant seulement un seul bras

Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

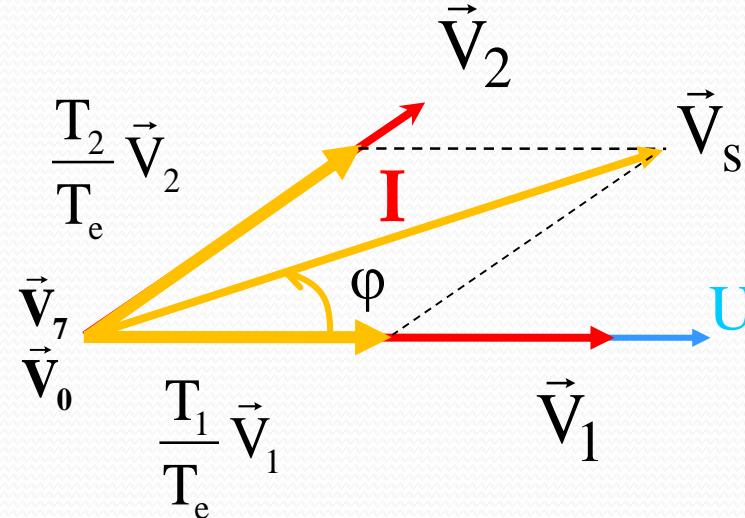
Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Technique de Modulation Vectorielle :

Par conséquent, la tension de référence \vec{V}_s est reconstituée en faisant une moyenne temporelle des tensions \vec{V}_1 , \vec{V}_2 , \vec{V}_7 et \vec{V}_0

Après, il suffit de déterminer la position du vecteur de référence \vec{V}_s et le secteur dans lequel il se trouve.

→ La **symétrie** du système triphasé, permet de réduire l'analyse au cas général **d'un secteur de 60 degrés**. On se place alors dans le cas où le vecteur de référence ou de position est situé dans le secteur I.



Principe de construction du vecteur \vec{V}_s (secteur I)

Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Technique de Modulation Vectorielle :

Pour une fréquence de commutation suffisamment élevée le vecteur d'espace de référence \vec{V}_s est considéré constant pendant un cycle de commutation. Tenant compte que V_1 et V_2 sont constants et V_0 et V_7 , on trouve :

$$T_e \vec{V}_s = T_1 \vec{V}_1 + T_2 \vec{V}_2$$

La résolution de cette équation, après décomposition sur les deux axes du plan complexe (α, β) donne :

$$\mathbf{T}_1 = \frac{\sqrt{2}}{E} \mathbf{V}_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \varphi\right)$$

$$\mathbf{T}_2 = \frac{\sqrt{2}}{E} \mathbf{V}_s \sin(\varphi)$$

$$\mathbf{T}_0 = \frac{1}{2} (\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_1 - \mathbf{T}_2) \quad \text{Avec : } 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{3}$$

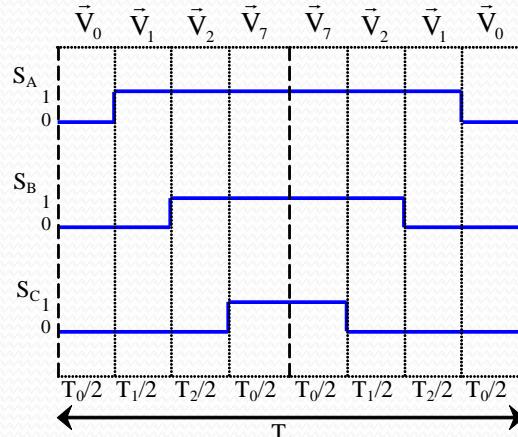
Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

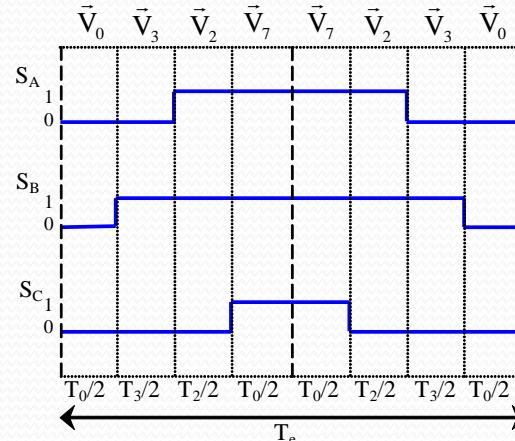
Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Ces dernières équations peuvent être facilement étendues si le vecteur de référence est placé dans les secteurs II,...,VI. Ceci résulte dans les ordres de commutations définis.

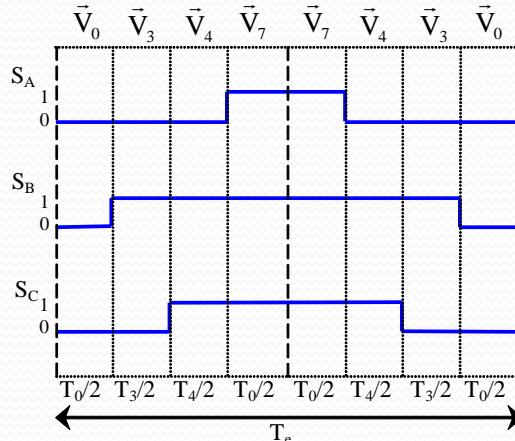
Secteur 1



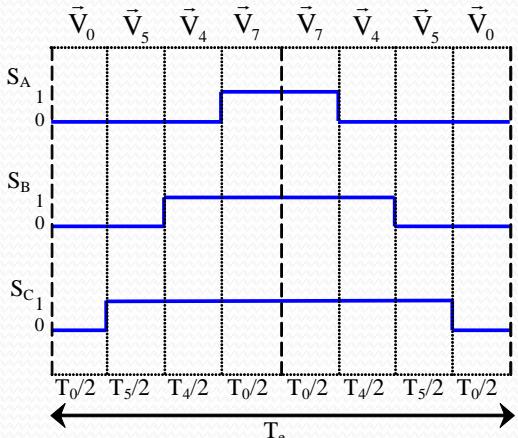
Secteur 2



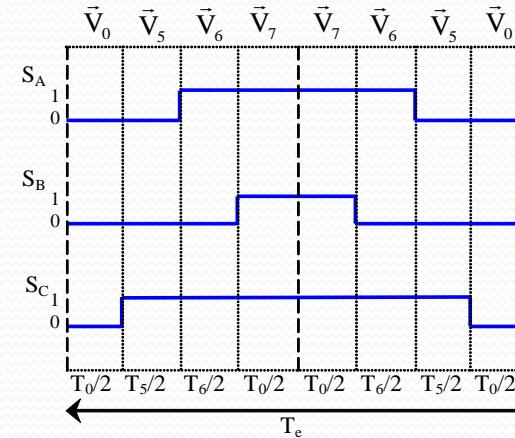
Secteur 3



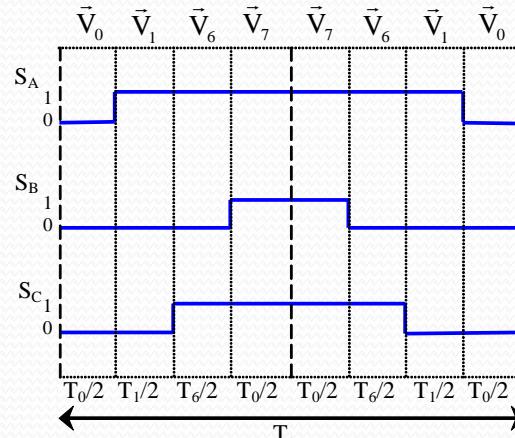
Secteur 4



Secteur 5



Secteur 6



Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

Variateur à base d'onduleur

Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Etude comparative : indice de modulation

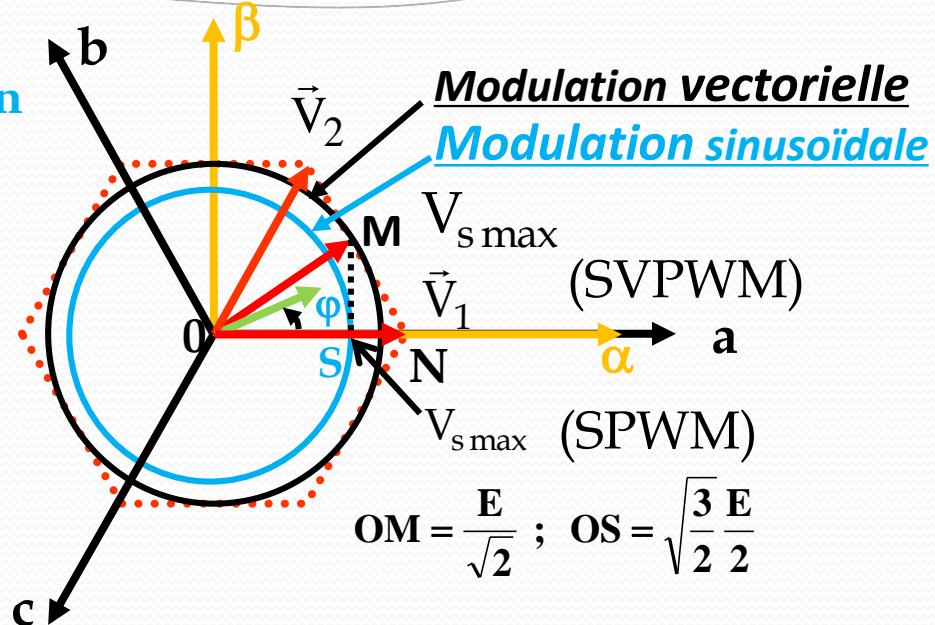
$$m = \frac{\hat{V}_{\text{modulante}}}{\hat{V}_{\text{porteuse}}} = \frac{V_{\max}}{E/2}$$

$$V_{s \max} = \sqrt{\frac{3}{2}} * V_{\max} = \frac{E}{\sqrt{2}}$$

$$V_{\max} = \frac{E}{\sqrt{3}}$$

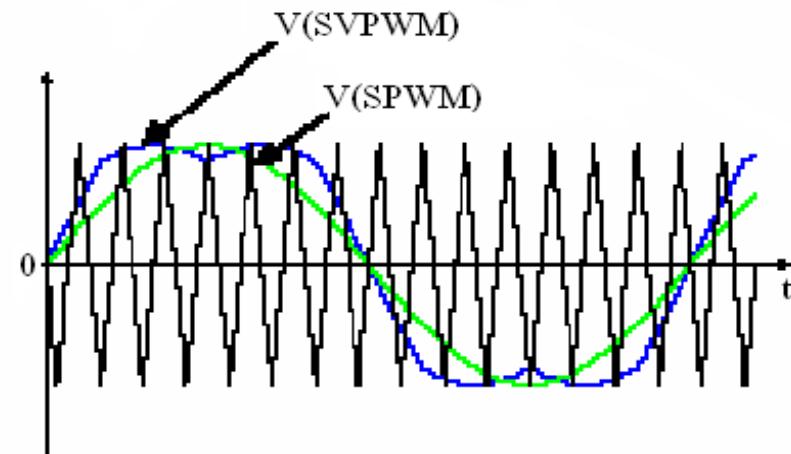
$$m(\text{SVPWM}) = 1.15$$

$$m(\text{SPWM}) \leq 1$$



$$OM = \frac{E}{\sqrt{2}} ; OS = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{E}{2}$$

	m^i	Stabilité du couple	TDH
MLI sinusoïdale	< 1	faible	faible
MLI vectorielle	> 1	meilleure	meilleure



Comparaison entre la MLI sinusoïdale et la MLI vectorielle.