

# Entraînement 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 :

$$T_{\max} = \frac{3 V_s^2}{2 \Omega_s L_2} \frac{1}{\omega} \quad \text{avec : } \Omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

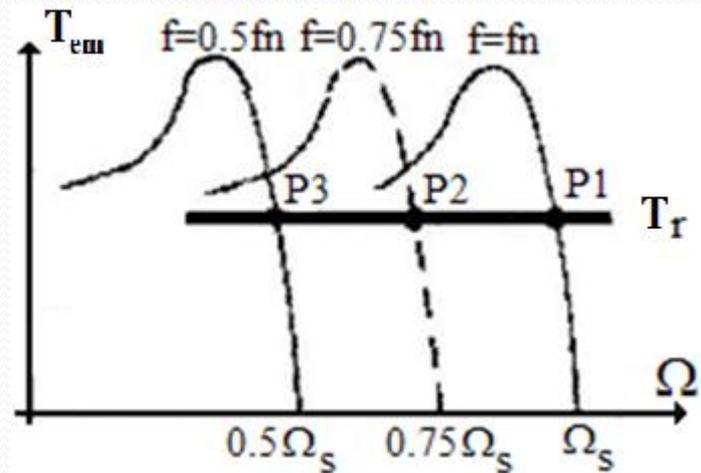
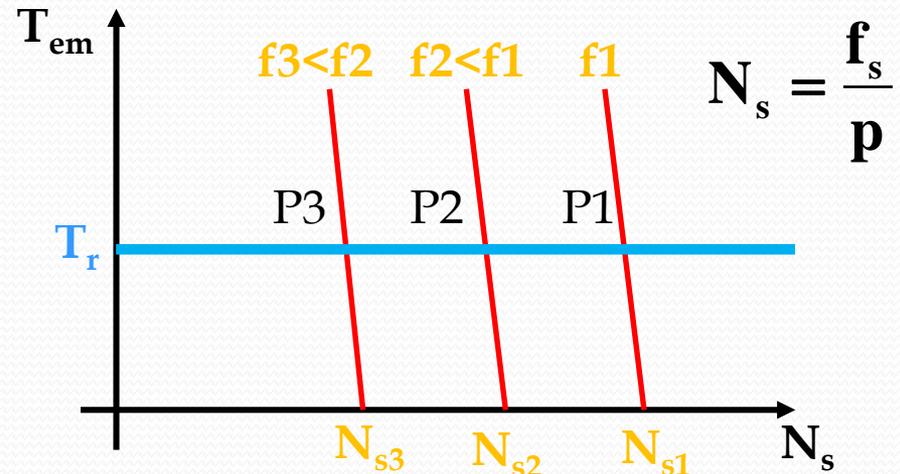
$$T_{\max} = \frac{3p}{8\pi^2 L_2} \left( \frac{V_s}{f} \right)^2 = K \left( \frac{V_s}{f} \right)^2$$

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

f varie et on veut maintenir

$T_{\max}$ , il faut que  $V_s$  varie pour que :

$$\frac{V_s}{f} = \text{Cste}$$



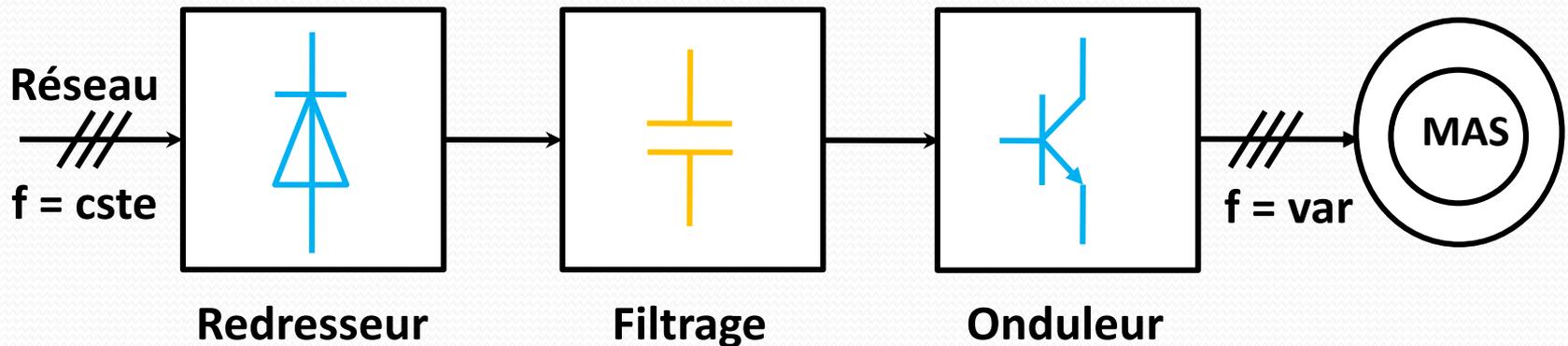
**Fonctionnement à flux constant**

# 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

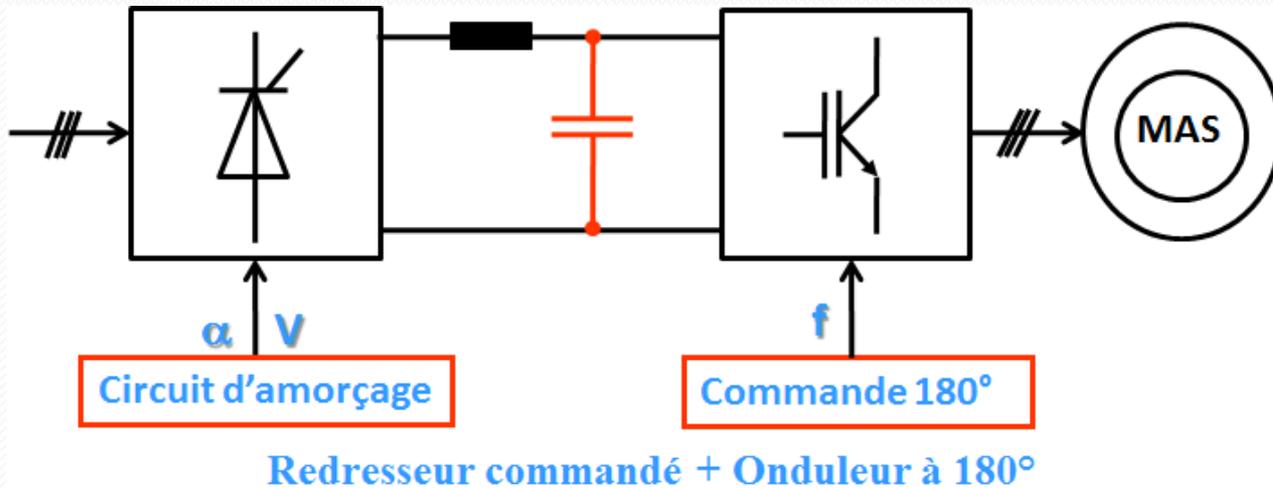
## Variateur à base d'onduleur

### 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°



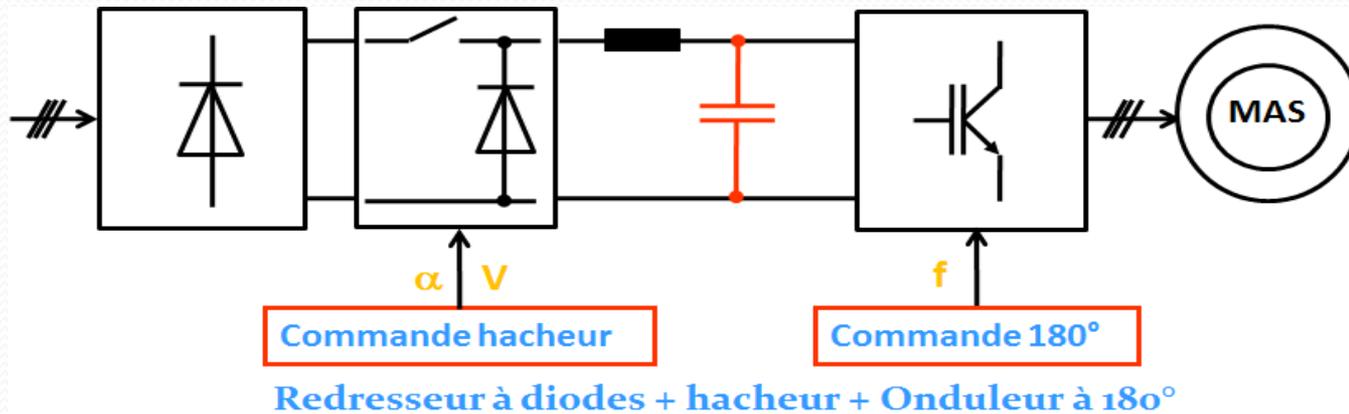
# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## Variateur à base d'onduleur

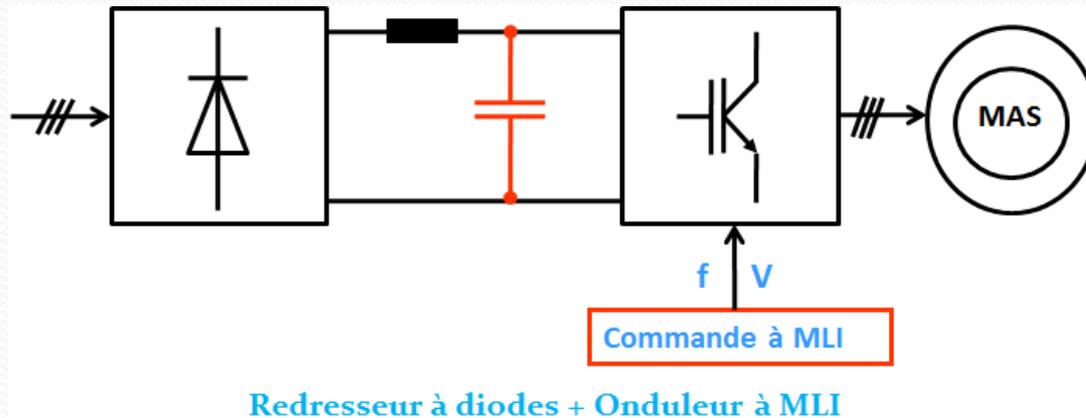
### Convertisseurs de fréquence :

#### 1- Alimentation en tension :

#### b- Redresseur à diodes + hacheur + onduleur 180°



#### c- Redresseur à diodes + Onduleur à MLI



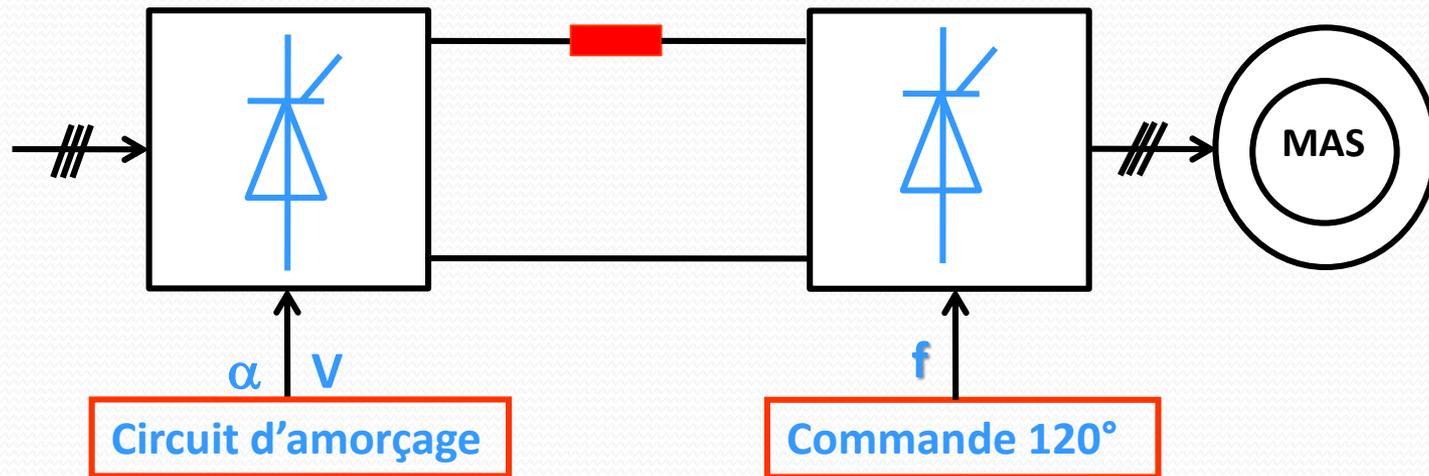
# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## 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.



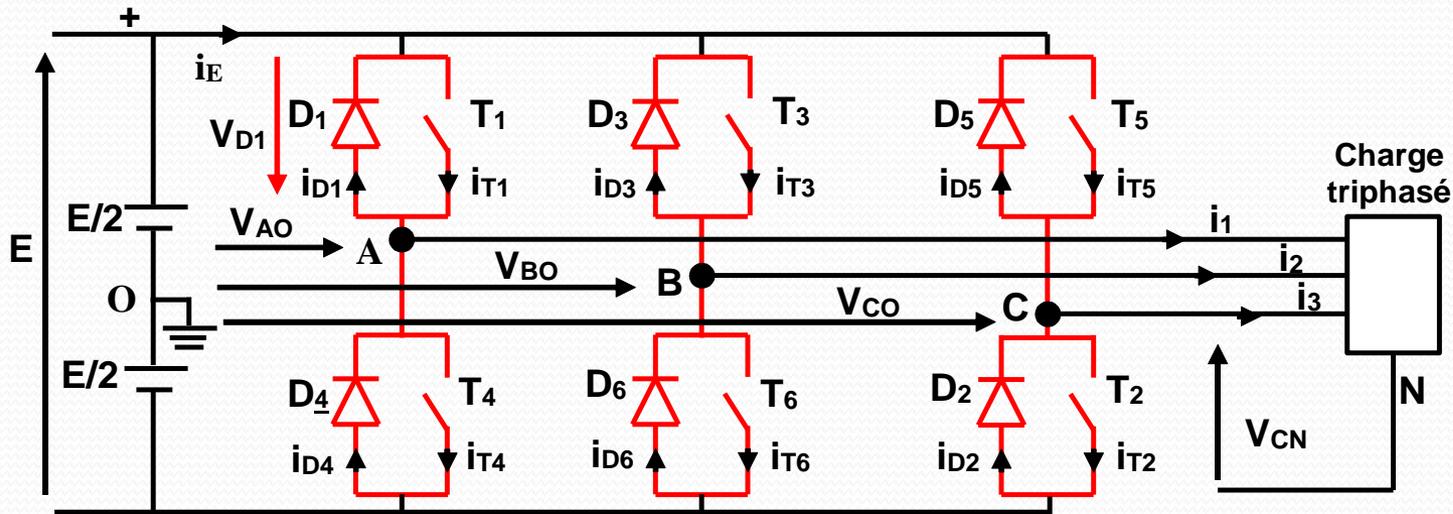
Le commutateur de courant de **type auto-séquentiel** est le **plus souvent utilisé** à cause de sa **robustesse**.

# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## Variateur à base d'onduleur

### Onduleurs triphasés

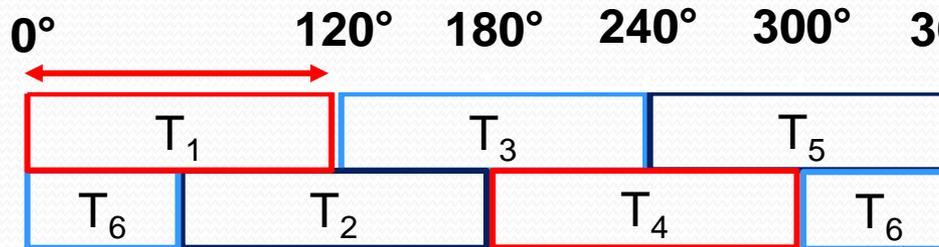
Constitué principalement de six interrupteurs de puissance



Onduleur triphasé de tension

### Commande 120° :

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

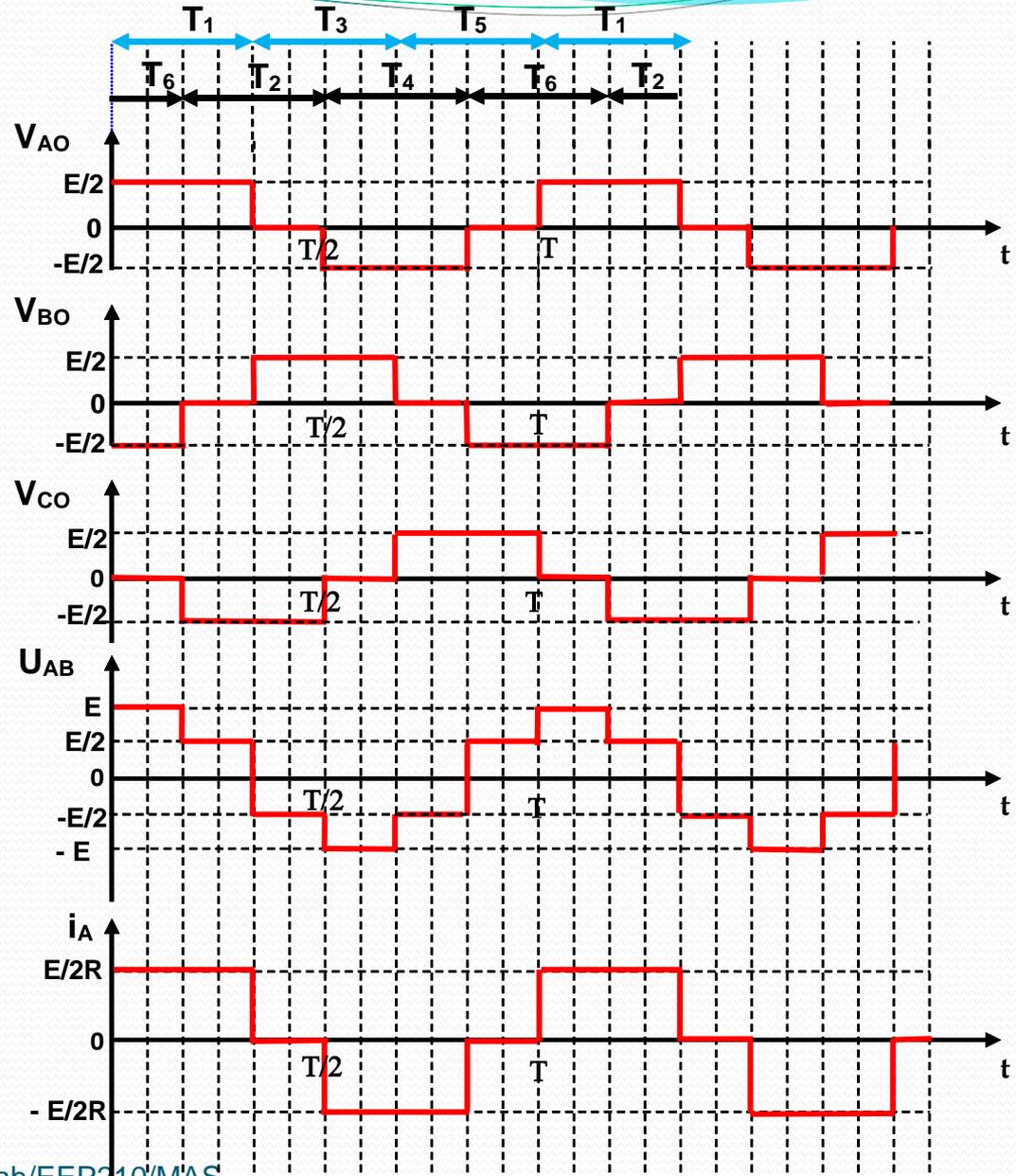


# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## Variateur à base d'onduleur

### Onduleurs triphasés

#### Commande $120^\circ$ :



Formes d'ondes : Commande  $120^\circ$   
cas d'une charge résistive

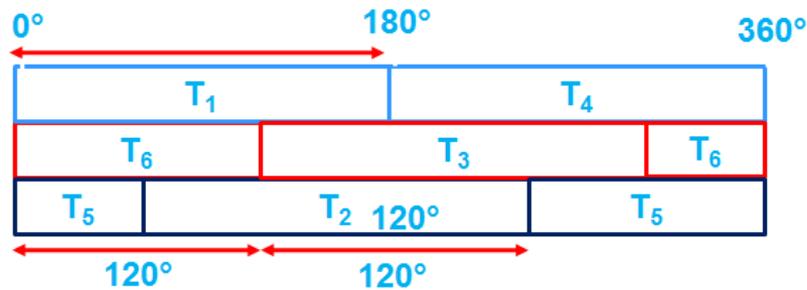
# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## Variateur à base d'onduleur

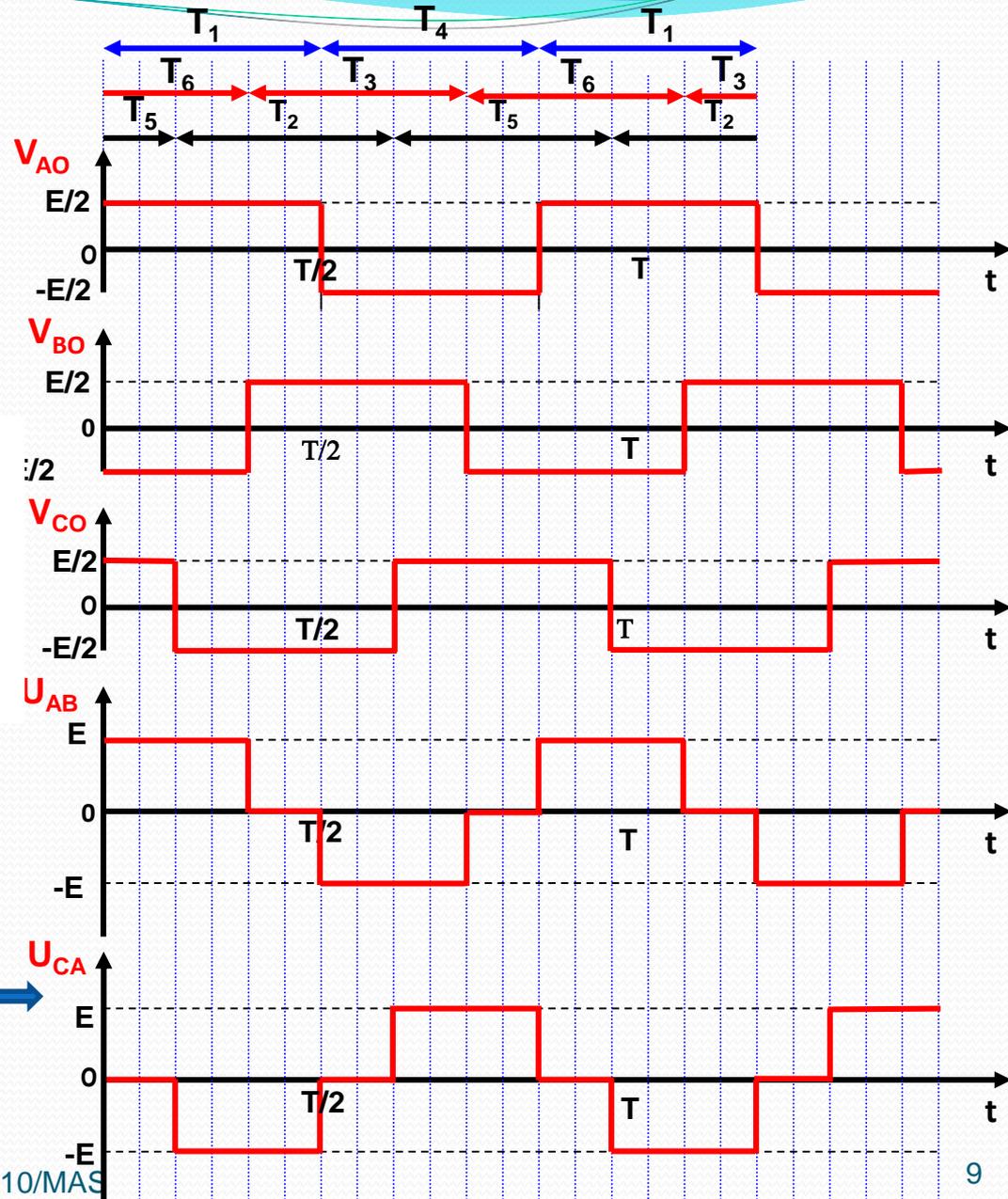
### Onduleurs triphasés

#### Commande 180° :

Chaque transistor est commandé pendant 180°.



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

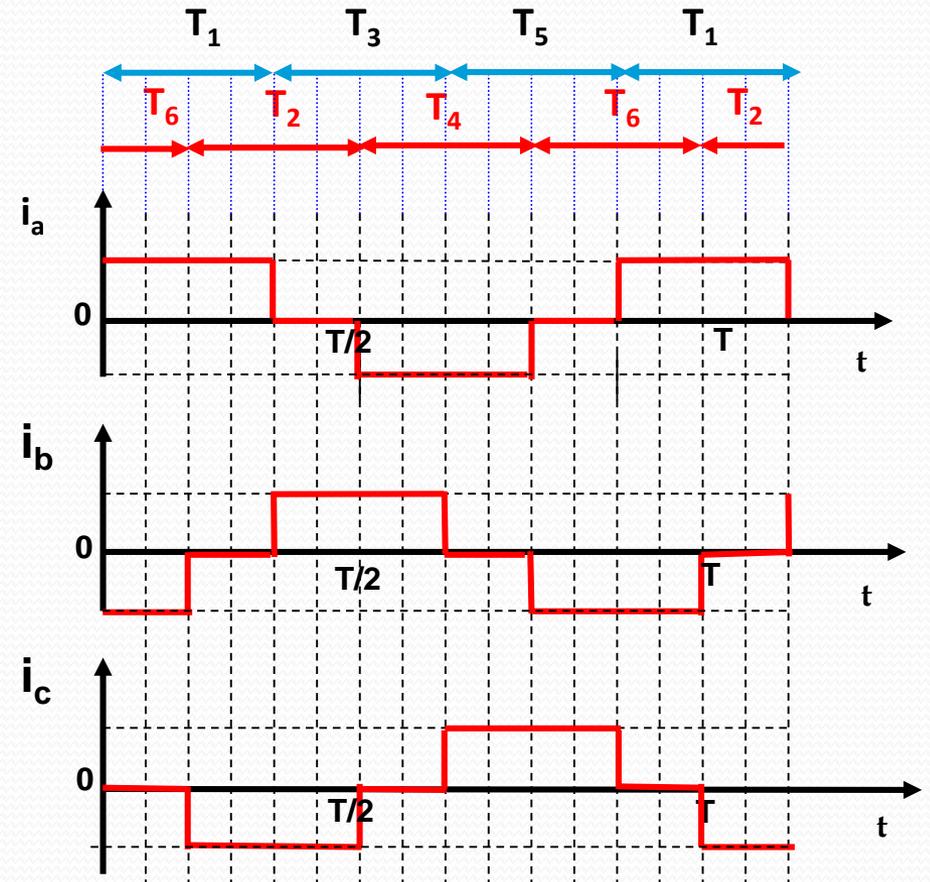
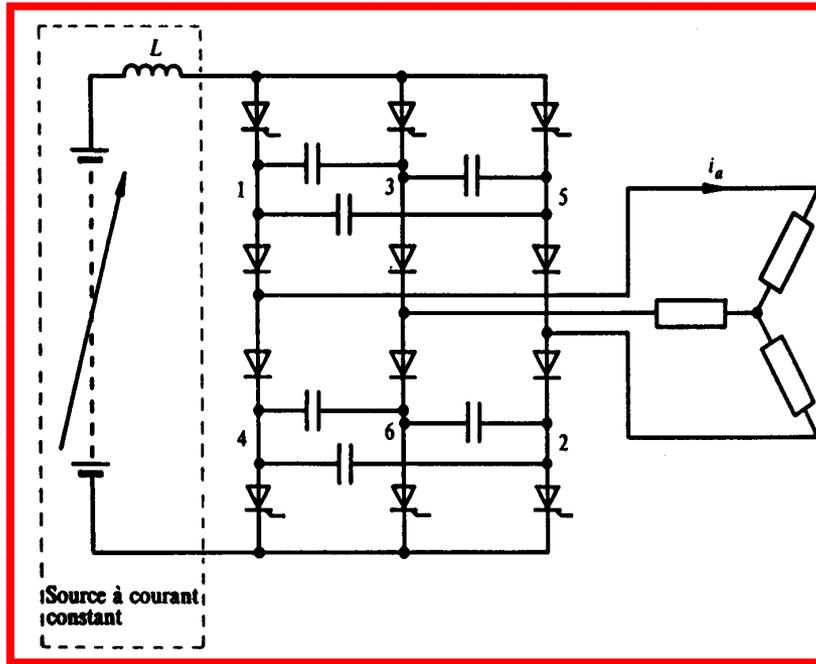


# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## 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.



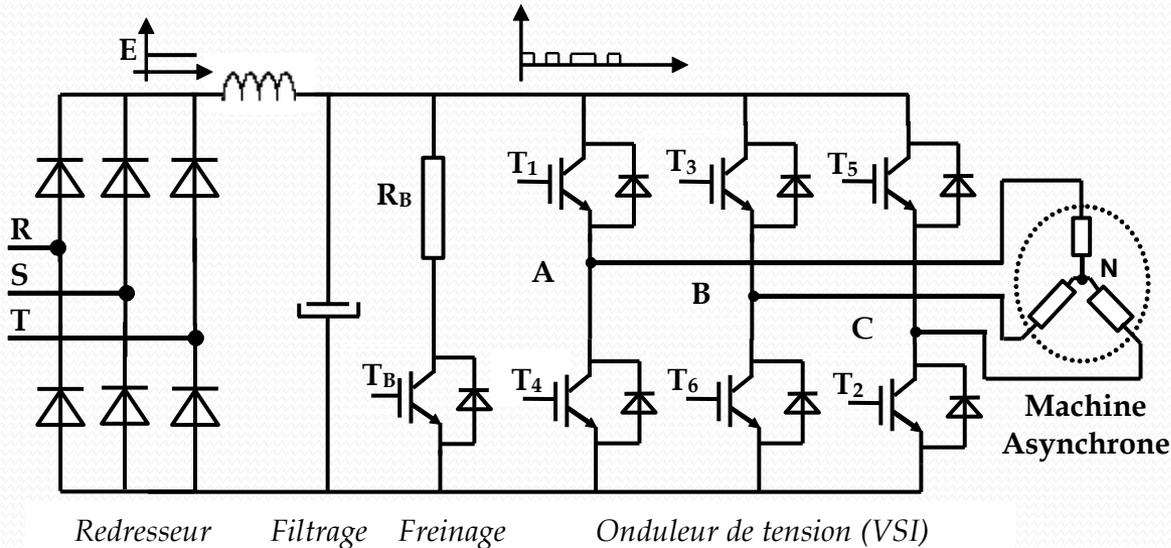
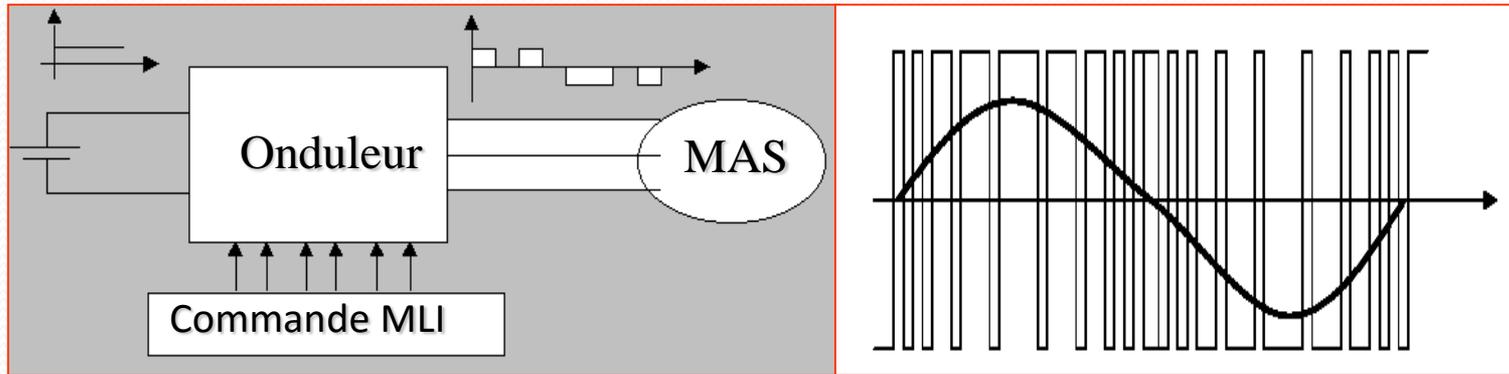
Le courant de charge est **une onde quasi carrée**, chaque thyristor **conduit durant 120°**.

# 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.

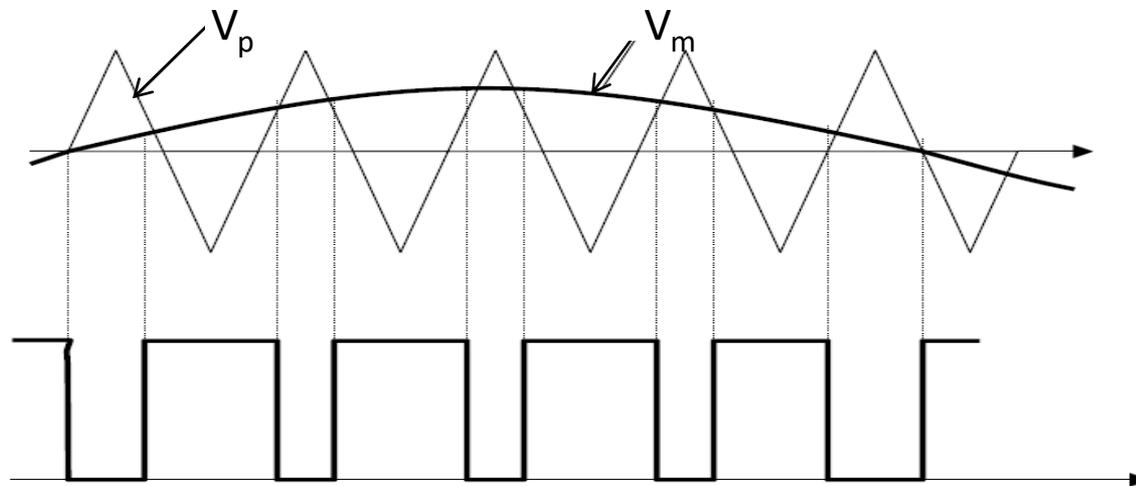
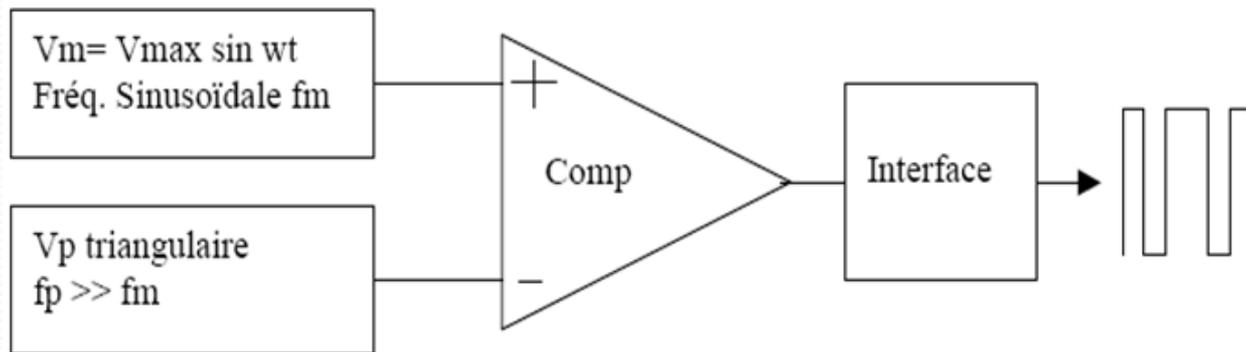


*Schéma bloc d'un onduleur à MLI*

### 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 :*



### 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

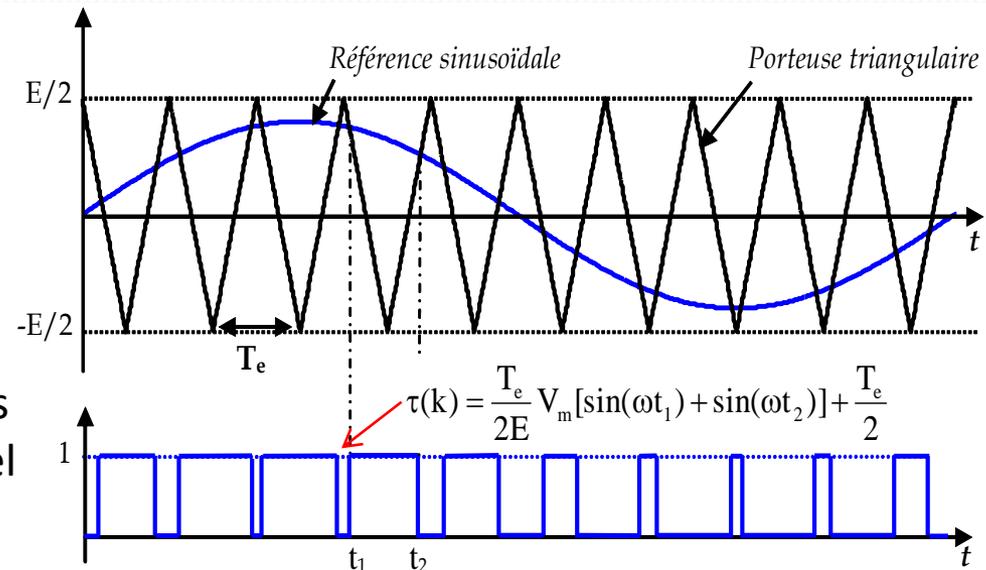
#### 1- MLI sinusoïdale naturelle

##### Avantage :

☞ Souplesse d'implantation

##### Inconvénients :

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



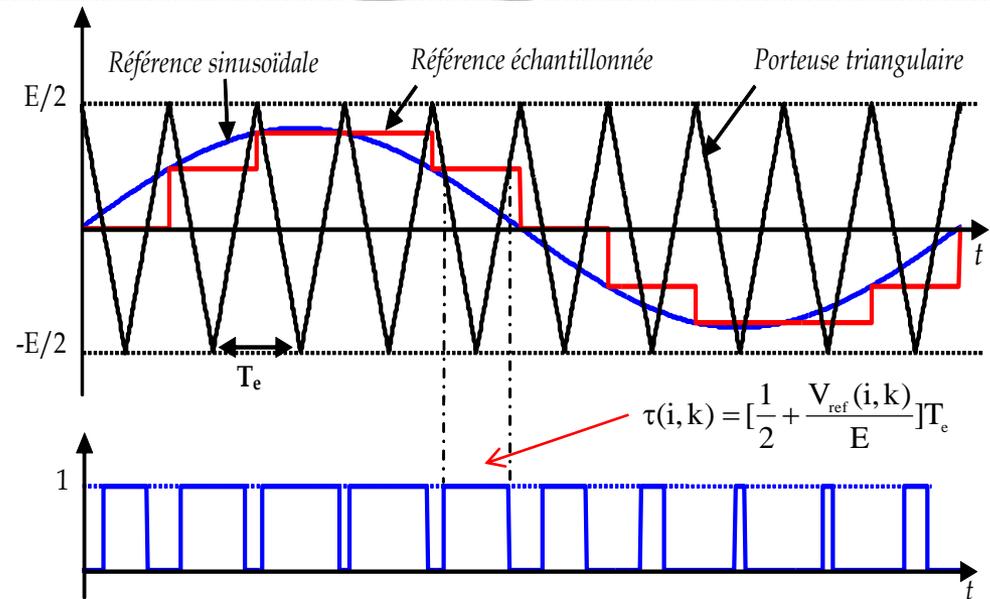
# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## Variateur à base d'onduleur

### Onduleurs à MLI :

#### 2- MLI Sinusoïdale régulière

##### a- MLI Sinusoïdale régulière symétrique

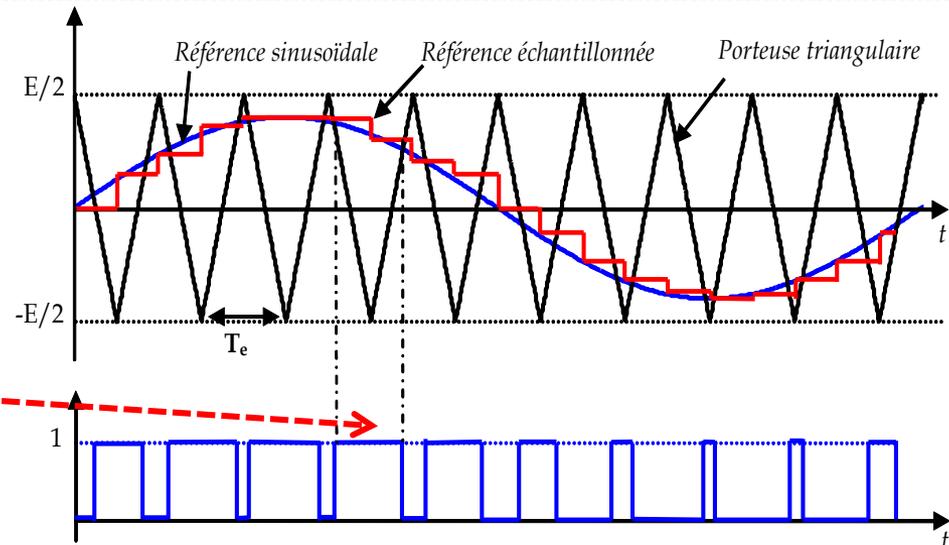


##### b- MLI Sinusoïdale régulière asymétrique

#### Avantages :

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

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



### 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 ( $\alpha, \beta$ ), par un vecteur d'espace  $x(t)$  d'amplitude  $x$  et de position angulaire  $\varphi$ , défini par :

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

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

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

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

$X_m$  est l'amplitude de la composante fondamentale. Les composantes  $x_\alpha$  et  $x_\beta$  se calculent à l'aide de la transformation orthogonale de Concordia.

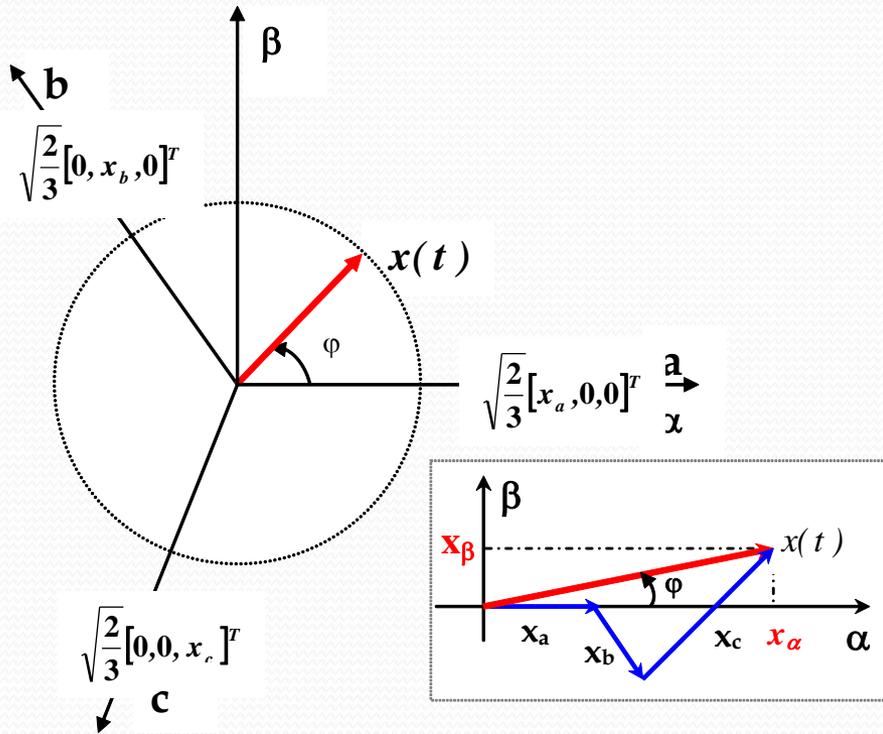
# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## Variateur à base d'onduleur

### Onduleurs à MLI :

#### MLI vectorielle

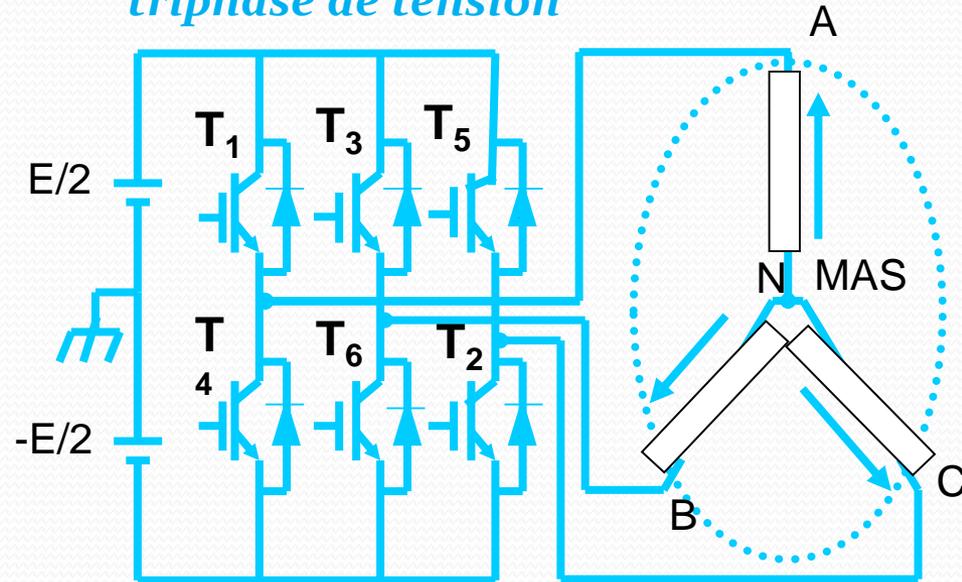
#### Concept de vecteur d'espace



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

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

#### Vecteurs d'espace d'un onduleur triphasé de tension



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

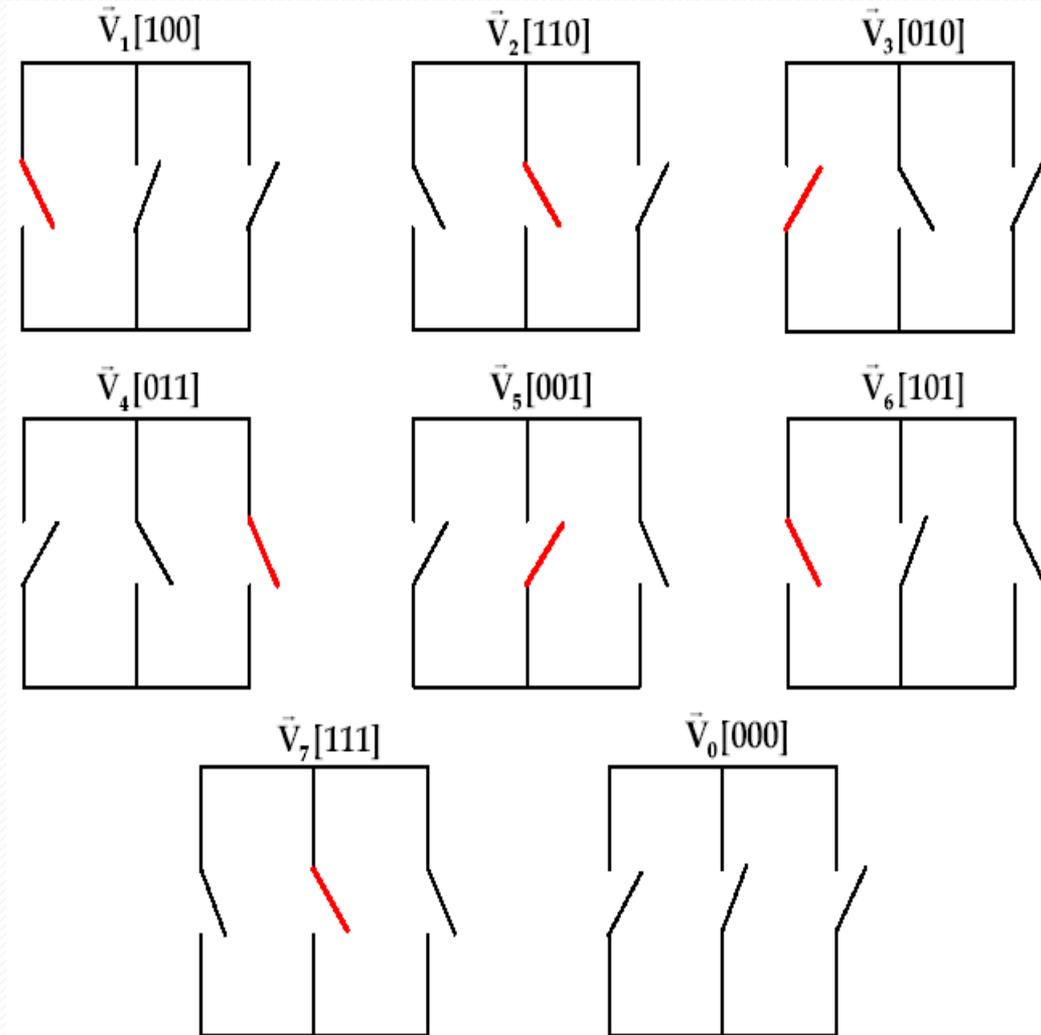
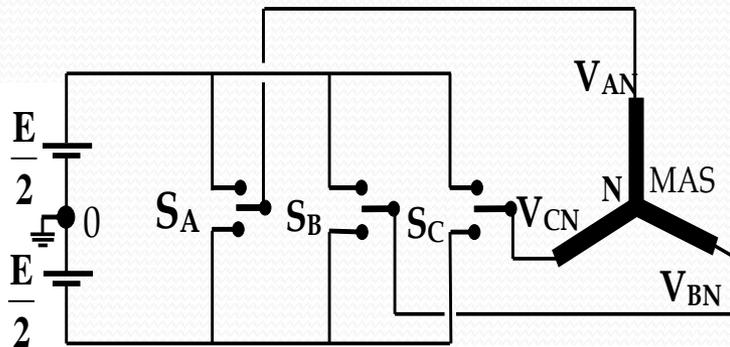
$$V_{BN} = V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

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

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

### 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.



### Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

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

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

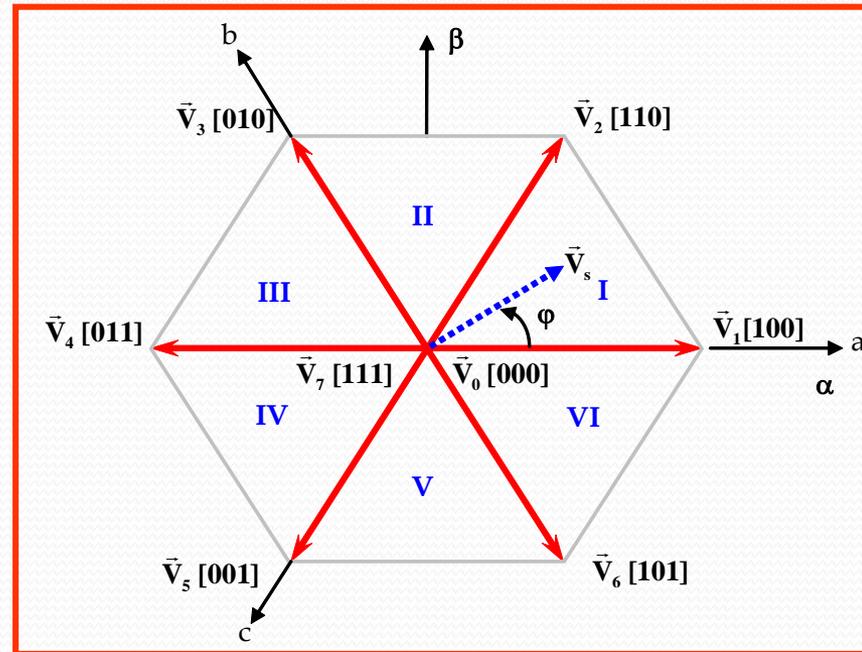
permet de calculer les tensions  $V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$  correspondant :

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

### Onduleurs à MLI : MLI vectorielle

Ces huit états possibles du vecteur d'espace définissent les limites de 6 secteurs dans le plan complexe  $(\alpha, \beta)$ . 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*

### 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

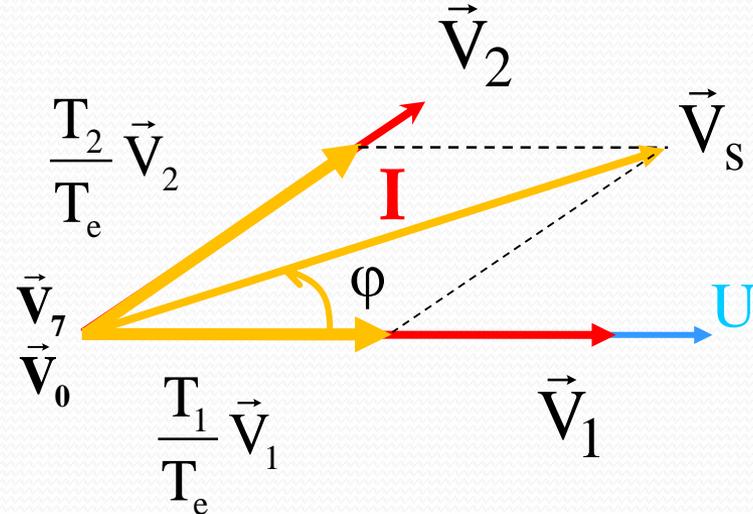
### Onduleurs à MLI: MLI vectorielle

#### Technique de Modulation Vectorielle :

Par conséquent, la tension de référence  $V_s$  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  $V_s$  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)

### 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 :

$$\mathbf{T}_e \vec{V}_s = \mathbf{T}_1 \vec{V}_1 + \mathbf{T}_2 \vec{V}_2$$

La résolution de cette équation, après décomposition sur les deux axes du plan complexe ( $\alpha, \beta$ ) donne :

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

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

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

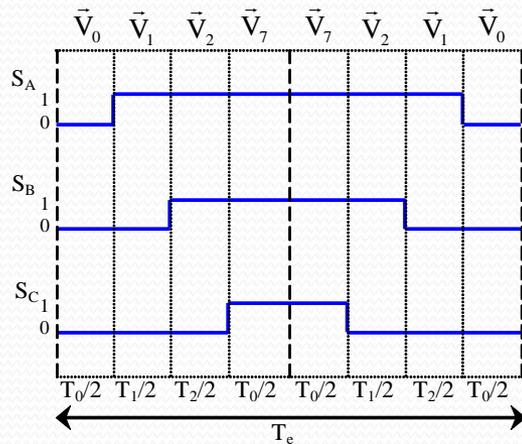
# Moteurs asynchrones en fréquence et tension variables

## Variateur à base d'onduleur

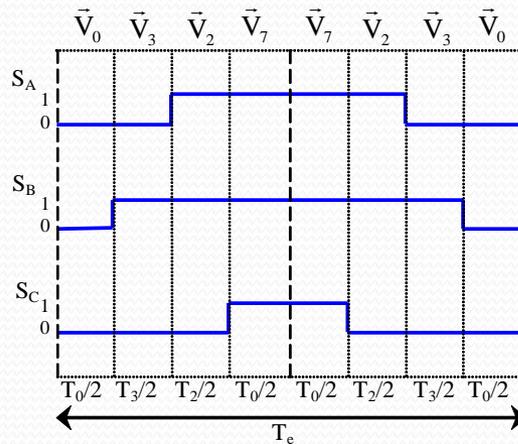
### Onduleurs à MLI: MLI vectorielle

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.

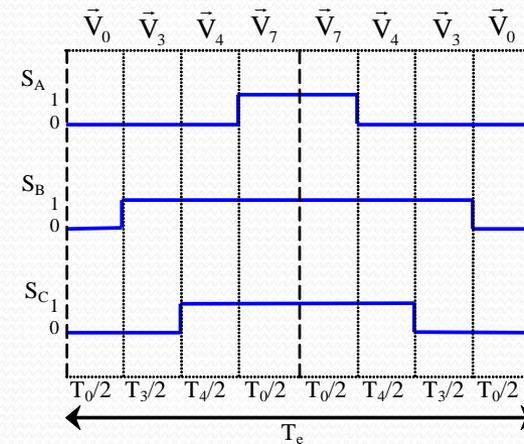
#### Secteur 1



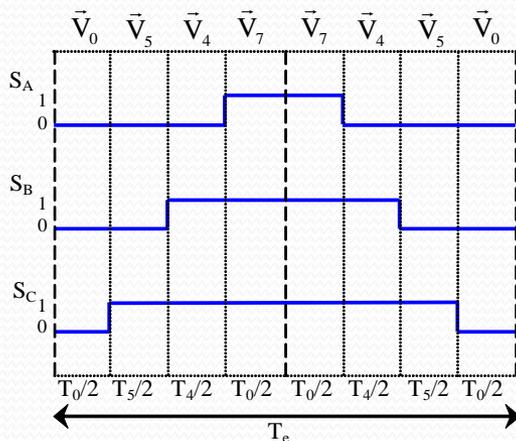
#### Secteur 2



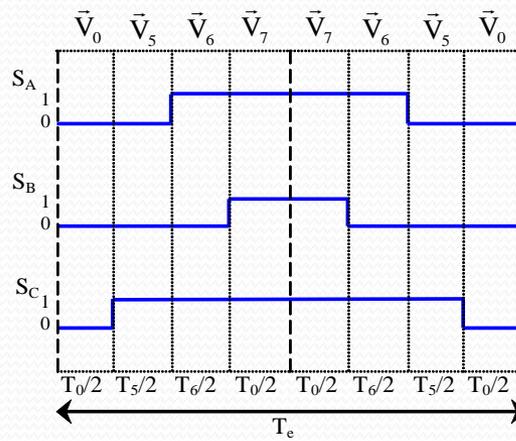
#### Secteur 3



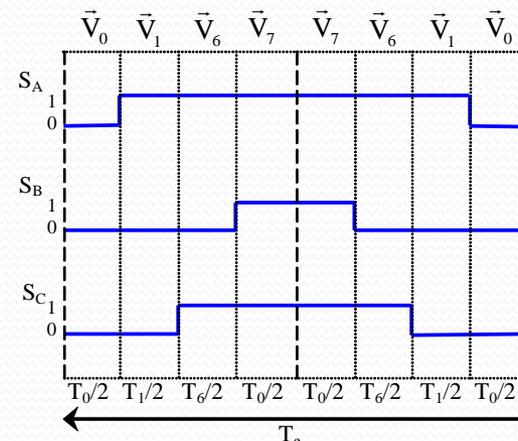
#### Secteur 4



#### 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

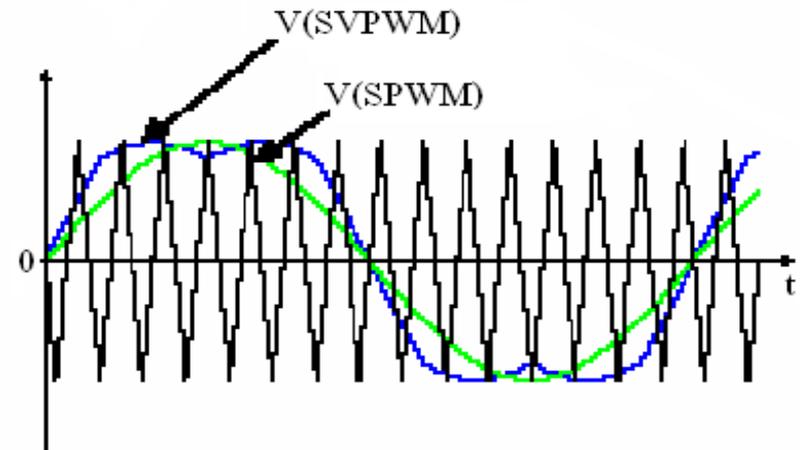
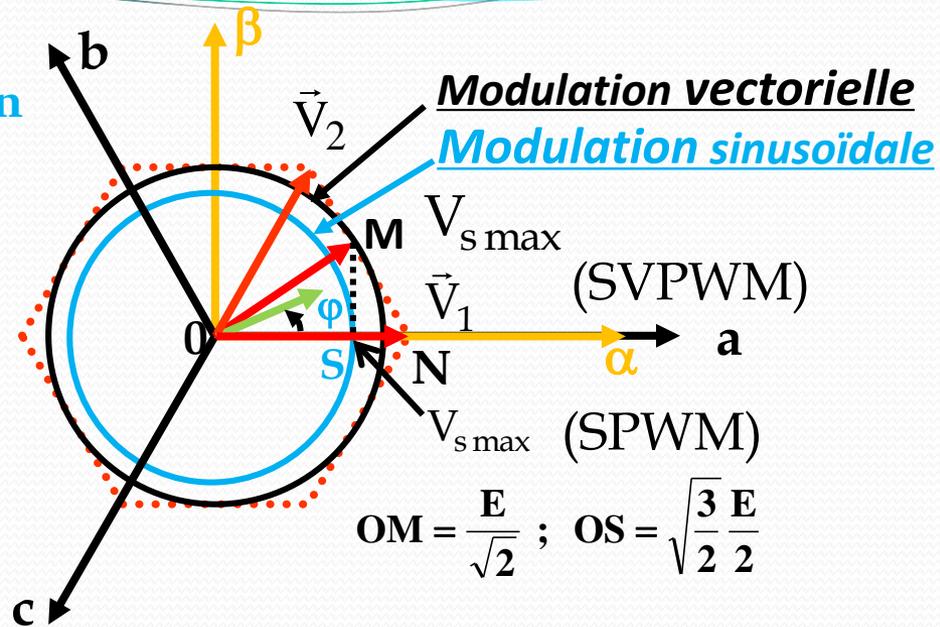
$$m = \frac{\hat{V}_{\text{modulante}}}{\hat{V}_{\text{porteuse}}} = \frac{V_{\text{max}}}{E/2}$$

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

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

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

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



Comparaison entre la MLI sinusoidale et la MLI vectorielle.