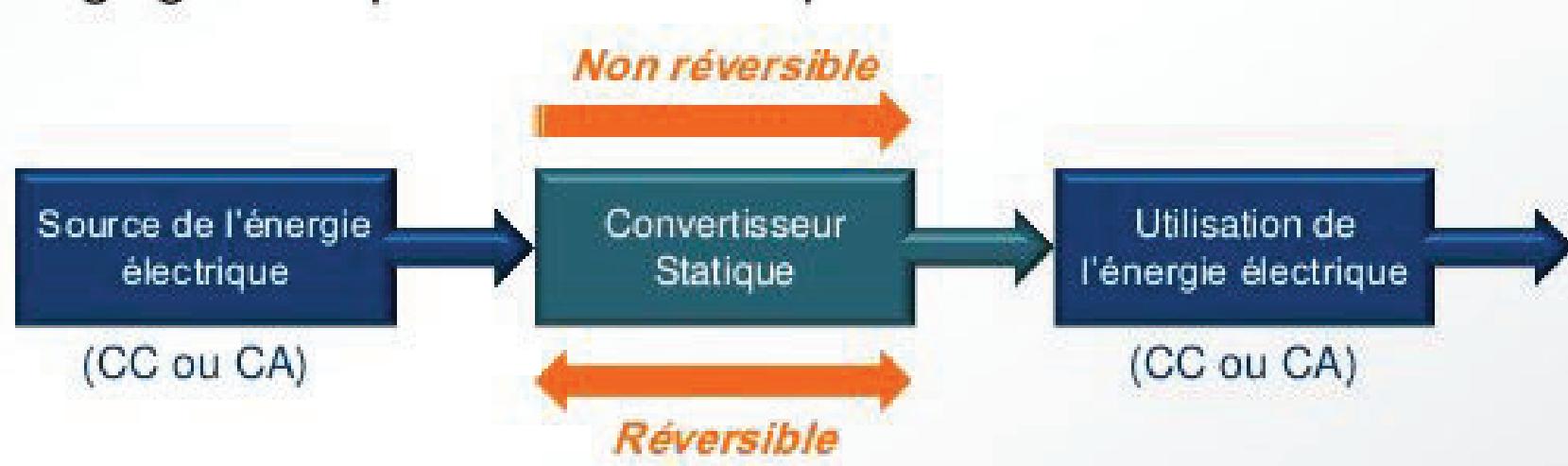
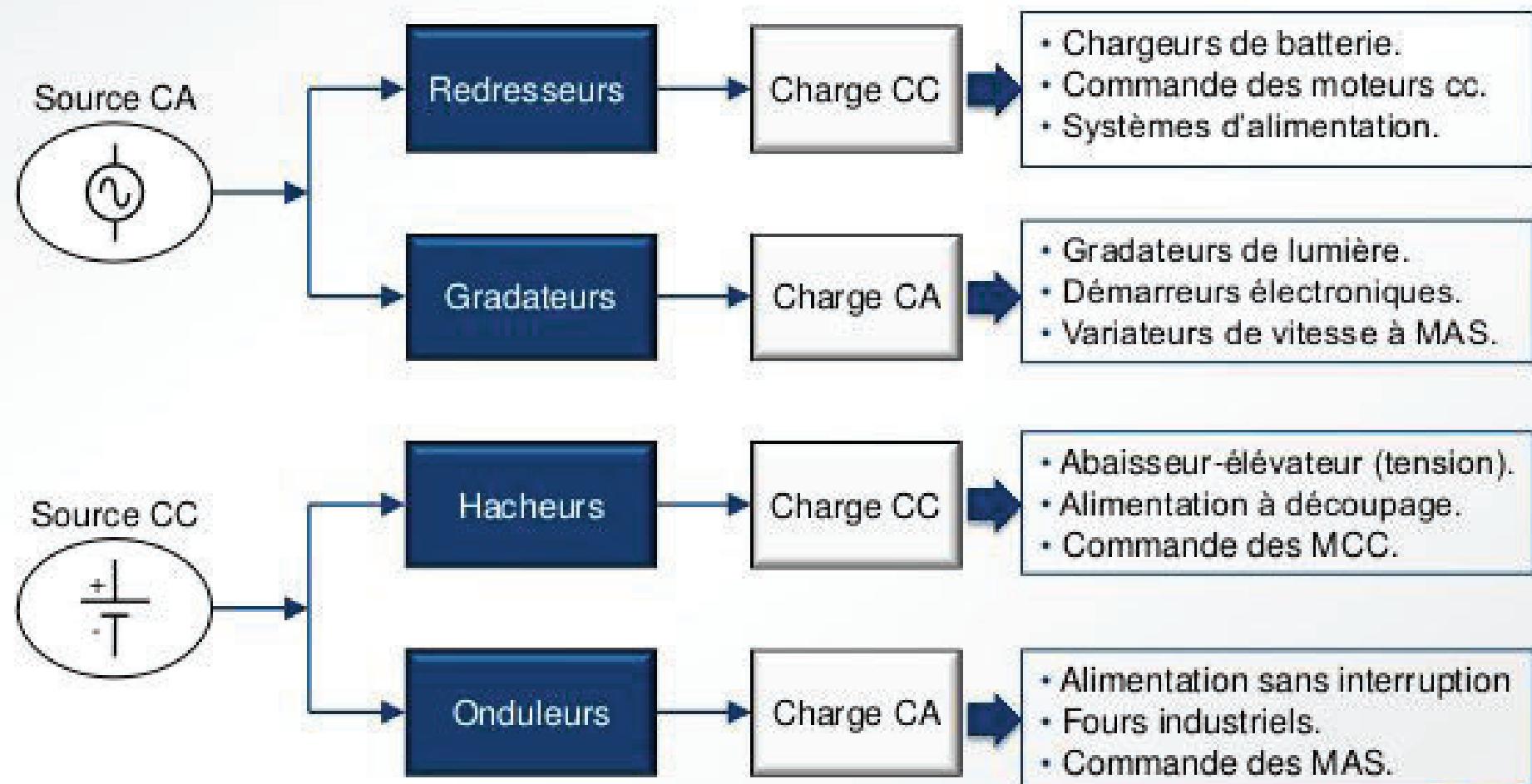


Fonctions des convertisseurs

- Modifier la nature des grandeurs électrique (CC-CA).
- Régler la puissance d'un système électrique.
- Assurer conjointement, en cas de besoin, la modification de la nature et le réglage de la puissance électrique.



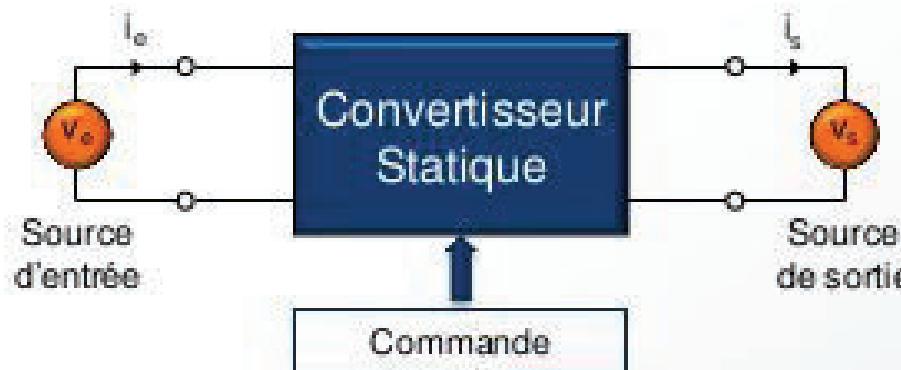
Classification des convertisseurs



Structure des convertisseurs statiques

Un convertisseur statique comporte essentiellement :

- Des interrupteurs électroniques fonctionnant, de manière périodique, en régime de commutation (tout ou rien).
- Des éléments réactifs (inductances et/ou condensateurs) permettant le stockage intermédiaire de l'énergie électrique.



Types des interrupteurs

- **Dispositifs à semi-conducteurs ...**

- Diodes.
- Thyristors et triacs.
- Transistors (BJT, MOSFET, IGBT)

- **... adaptés aux dispositifs de puissances**

- Courants et tensions élevés.
- Phénomènes de commutation (limites en tension et en courant).

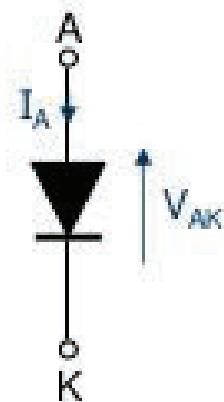
Diode (D) : caractéristiques

Interrupteur à 2 électrodes : Anode (A), Cathode (K)

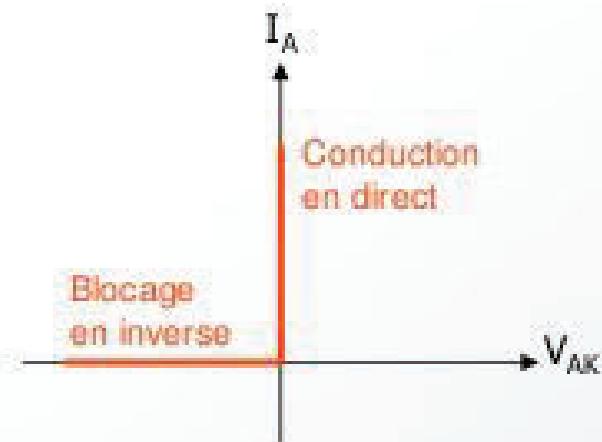
Date 1954



Diode de puissance



Symbol



Caractéristique v-i

- **Conduction** : $V_{AK} > 0$
- **Blocage** : $I_A = 0$

(conduction spontanée)
(blocage spontané)

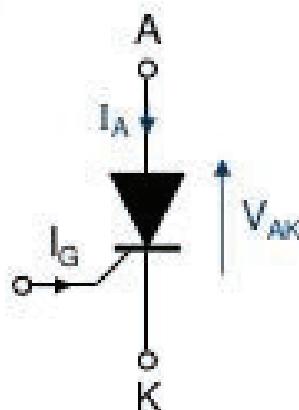
Thyristor (SCR) : caractéristiques

Interrupteur à 3 électrodes : Anode (A), Cathode (K), Gâchette (G)

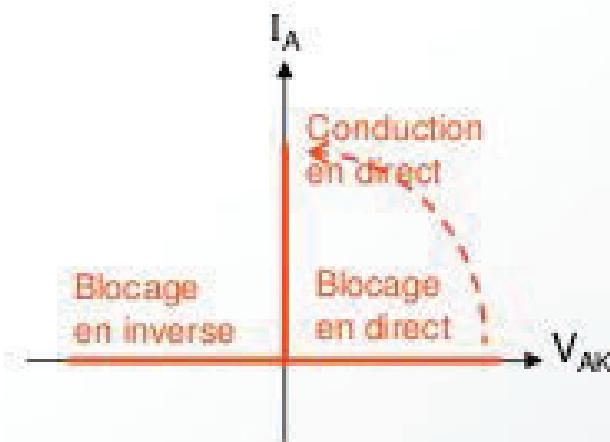
Date 1962



Thyristor de puissance
BTW 48A-1200V



Symbole



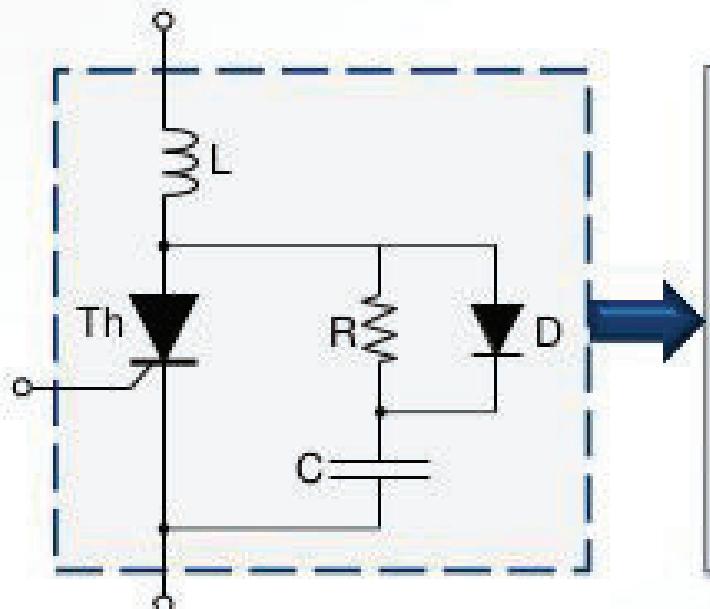
Caractéristique v-i

- **Amorçage** : $V_{AK} > 0$ ET $I_G > 0$ (*amorçage commandé*)
- **Blocage** : $|I_A| < I_H$ OU $V_{AK} \ll 0$ (*blocage spontané*)

Thyristor : Circuit de protection

Le Circuit d'Aide à La Commutation (CALC) permet de protéger contre :

- Les variations importantes de la tension (dv/dt) par un circuit RC.
- Les variations importantes du courant (di/dt) par une inductance L.



- Th : thyristor à protéger.
- L : inductance pour protéger contre les (di/dt).
- C : condensateur pour protéger contre les (dv/dt).
- R : protège le thyristor pendant la décharge de C.
- D : permet la charge rapide du condensateur.

M. SAIDI Salem

Thyristor GTO (*Gate Turn-Off*)

Variante du thyristor rapide complètement commandé par sa gâchette :

- Amorçage : maintenir un courant $I_G > 0$.
- Blocage : maintenir un courant $I_G < 0$.

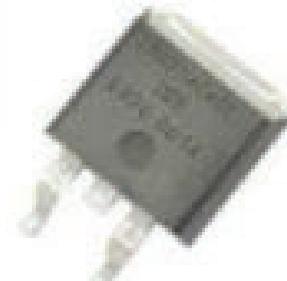
Date 1962

Utilisation

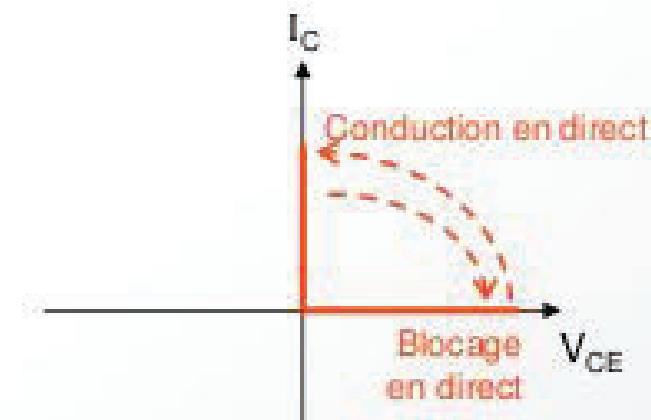
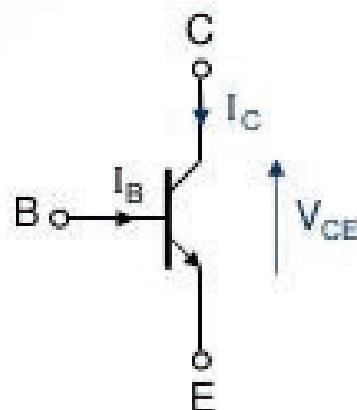
Convertisseurs de forte puissance (jusqu'à 10 kV et 5 000 A). Toutefois, en raison des progrès des IGBT, leur part de marché tend à décroître.

Transistor bipolaire (BJT) : caractéristiques

Interrupteur à 3 électrodes : Base (B), Collecteur (E), Emetteur (E)



Transistor bipolaire
TIP 3055 – TO 218



- **Amorçage** : $V_{CE} > 0$ ET $I_B > 0$ (*amorçage commandé*)
 - **Blocage** : $I_B = 0$ OU $V_{CE} \ll 0$ (*blocage commandé*)

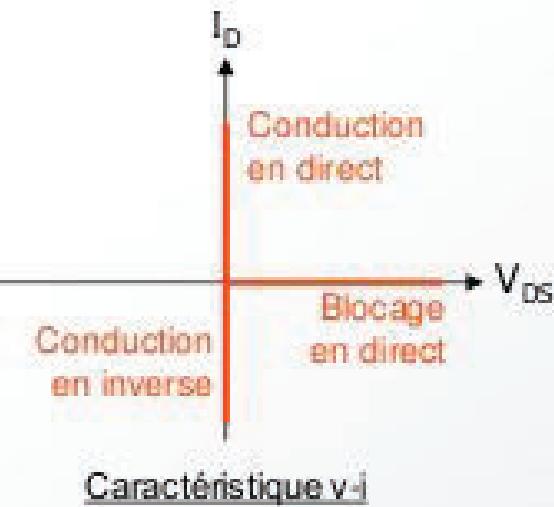
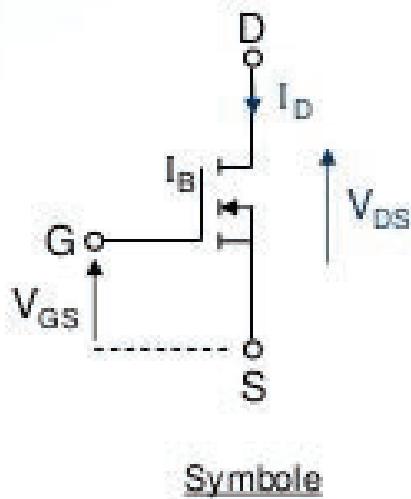
Transistor à effet de champ (MOS-FET)

Interrupteur à 3 électrodes : Grille (G), Drain (D), Source (S)

Date 1963



Transistor MOS-FET
en pont



- **Amorçage** : $V_{DS} > 0$ ET $V_{GS} > 0$ (*amorçage commandé*)
- **Blocage** : $V_{GS} \leq 0$ (*blocage commandé*)

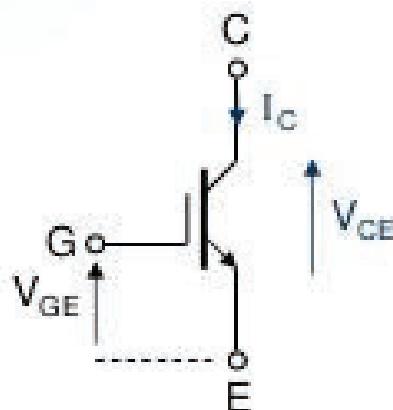
Transistor à grille isolée (IGBT)

Interrupteur à 3 électrodes : Grille (G), Collecteur (C), Emetteur (E)

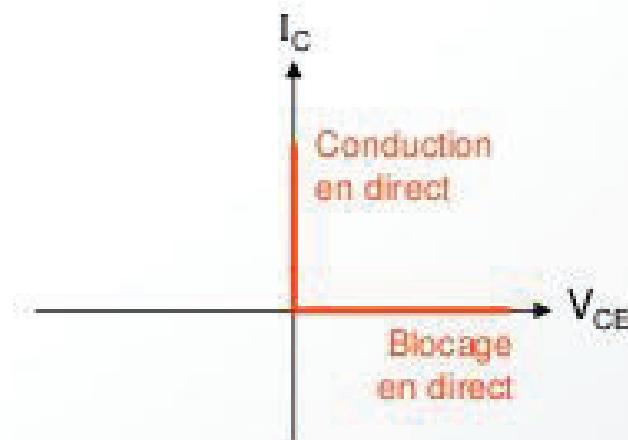
Date 1995



Transistor IGBT
400 V - 12 A



Symbole

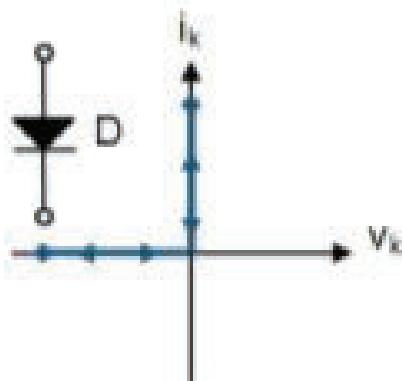


Caractéristique v-i

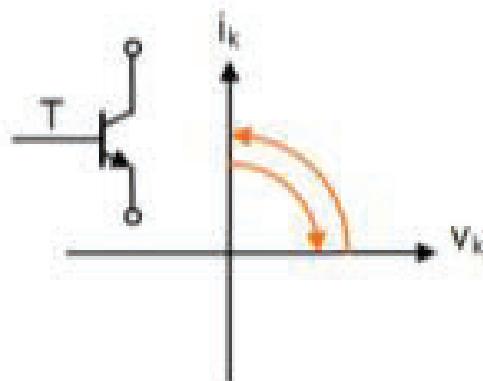
- **Amorçage** : $V_{CE} > 0$ ET $V_{GE} > 0$ (*amorçage commandé*)
- **Blocage** : $V_{GE} \leq 0$ (*blocage commandé*)

Choix d'un interrupteur

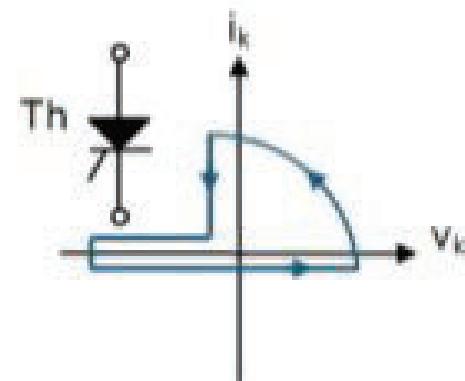
Dans le plan (v_k, i_k) , le point de fonctionnement décrit un cycle au cours d'une période. Les modes de commutation se déduisent alors de ses positions initiales et finales.



Amorçage spontané
Blocage spontané



Amorçage commandé
Blocage commandé



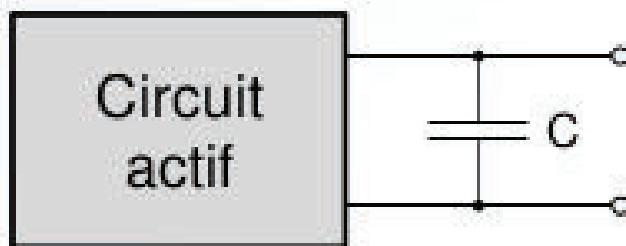
Amorçage commandé
Blocage spontané

Tableau de synthèse

Amorçage	Spontané	Commandé
Blocage	Spontané	<ul style="list-style-type: none">■ Diodes■ Thyristors
Commandé	<ul style="list-style-type: none">■ Thyristor dual	<ul style="list-style-type: none">■ Transistor■ Thyristor avec circuit d'e blocage.

Caractérisation des sources

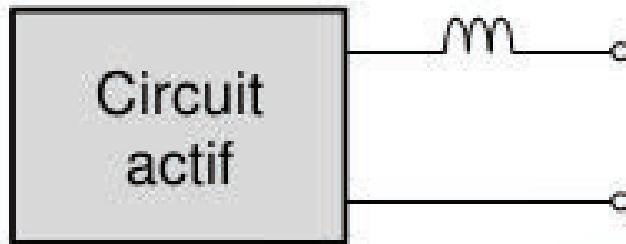
- Source de tension



≡



- Source de courant



≡



Règles d'interconnexion des sources

Le convertisseur statique connecte deux sources par l'intermédiaire des interrupteurs électroniques.

Les règles d'interconnexion des sources sont :

1. Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée, mais elle peut être ouverte.
2. Une source de courant ne doit jamais être ouverte, mais elle peut être court-circuitée.
3. Ne jamais connecter entre elles deux sources de même nature.
4. On ne peut connecter directement que deux sources de natures différentes.

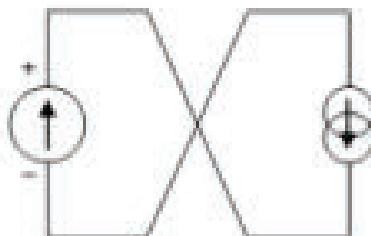
Conception des convertisseurs directs

Elle met en liaison une source de tension avec une source de courant.

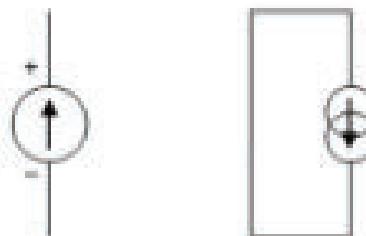
Séquences



(a)

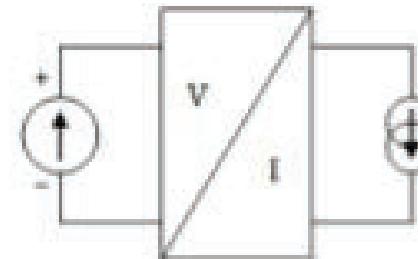
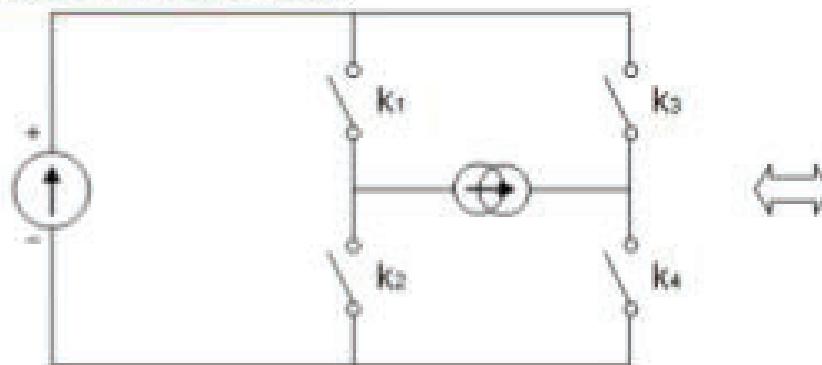


(b)



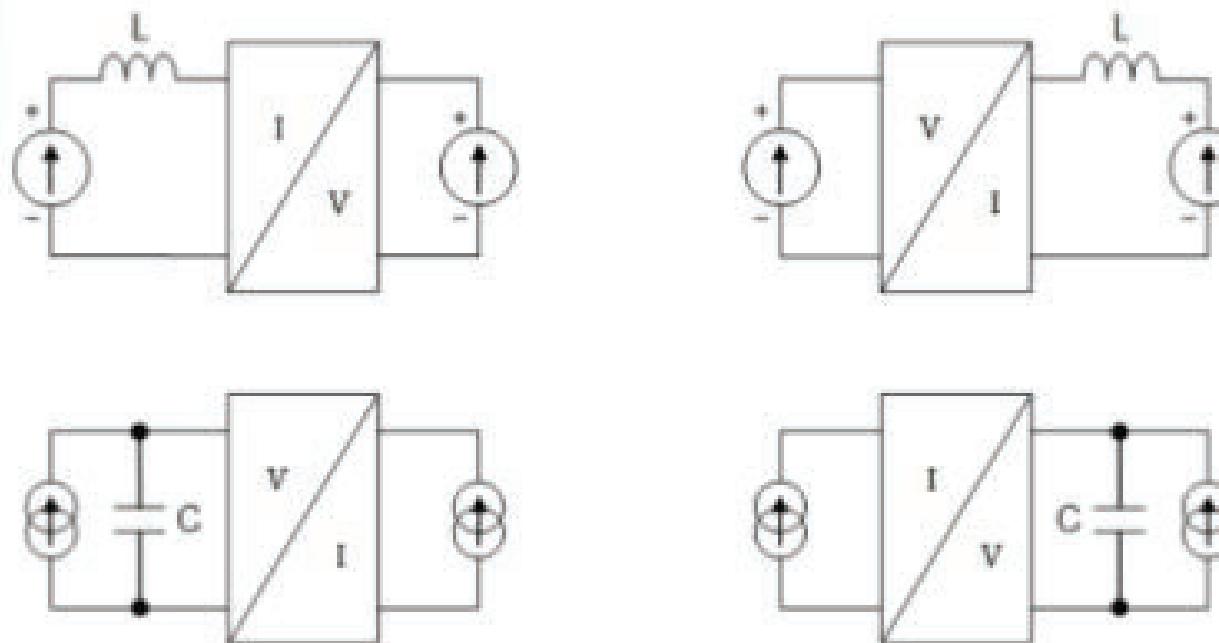
(c)

Configuration de base



Conception des convertisseurs indirects

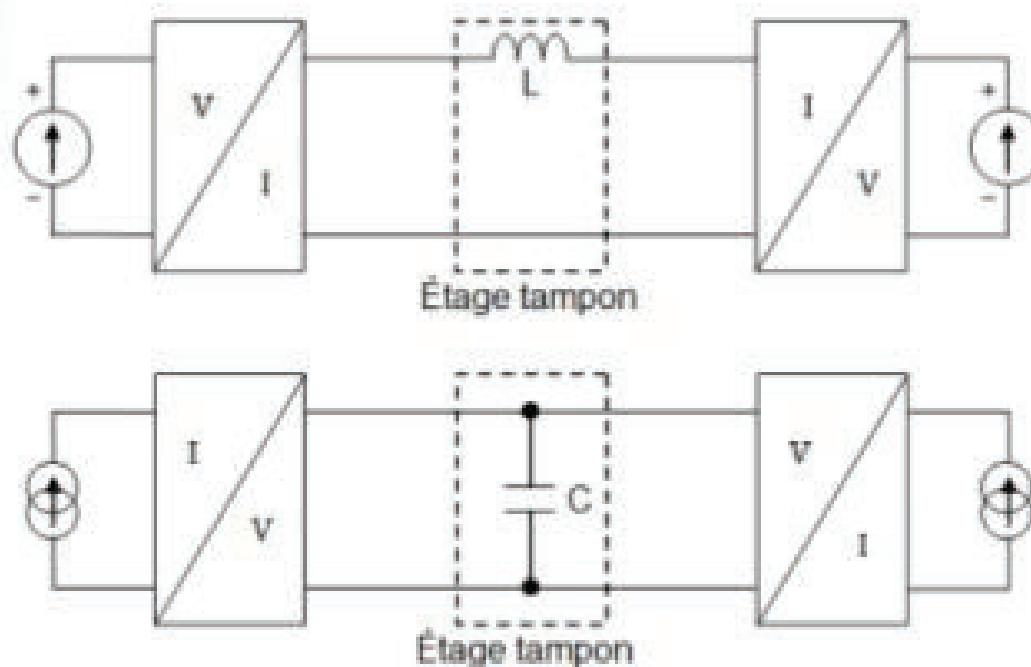
1^{ère} Structure : Modifier la nature de l'une des sources.



L'élément de stockage est placé à l'extérieur du convertisseur.

Conception des convertisseurs indirects

2^{ème} Structure : Utiliser deux convertisseurs directs intercalés.



L'élément de stockage fait partie du convertisseur global.

Fonctionnement non linéaire

En pratique, les convertisseurs statiques sont le plus souvent alimentés par des sources de tensions sinusoïdales 1~ ou 3~ :

$$v_s(t) = V_s \sqrt{2} \sin(\omega t)$$

Pulsation : $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$

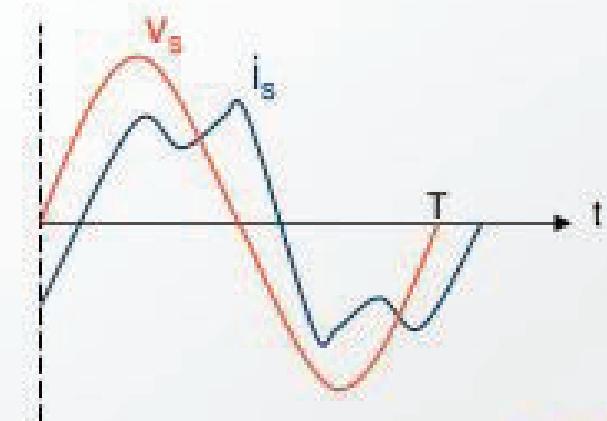
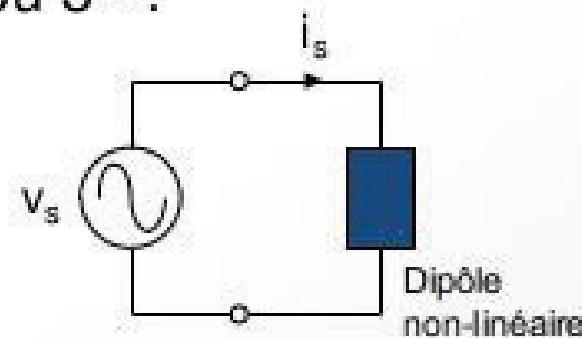
Le courant absorbé est périodique (T) mais non sinusoïdal :

■ Courant moyen :

$$i_s(\text{moy}) = I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i_s(t) dt$$

■ Courant efficace :

$$i_s(\text{eff}) = I_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_s^2(t) dt}$$



Notion d'harmoniques

La décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i_s(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

Où : $a_n = \frac{2}{T} \int_0^T i_s(t) \cos(n\omega t) dt$ et $b_n = \frac{2}{T} \int_0^T i_s(t) \sin(n\omega t) dt$

Propriétés générales

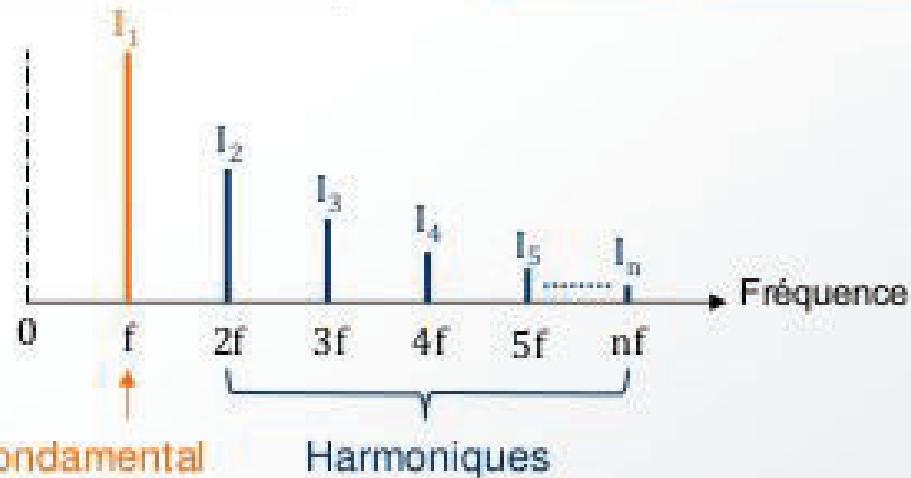
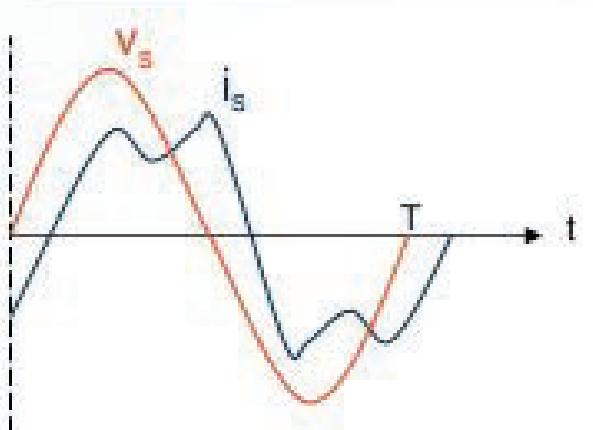
- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.
- si la fonction est symétrique, les termes d'indices pairs sont nuls.
- le terme d'indice "n = 1" est appelé **fondamental**. Les autres termes sont désignés « **harmoniques** »

Représentation spectrale

En électronique de puissance, le courant est non sinusoïdal et déphasé de φ par rapport à la tension d'alimentation :

$$i_s(t) = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

- termes a_n nuls.
- coefficients $I_n = b_n / \sqrt{2}$



Courant efficace : $I_s = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$

Puissances effectives

Nous définissons les puissances suivantes :

- Puissance active :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [v_s(t) \cdot i_s(t)] dt = V_s I_1 \cos \phi_1$$

- Puissance réactive :

$$Q = V_s I_1 \sin \phi_1$$
 Puissance due uniquement au fondamental I_1 , du courant i_s .

- Puissance apparente :

$$S = V_s I_s = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

- Puissance déformante :

$$D = V_s \sqrt{I_s^2 - I_1^2} = V_s \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

Grandeurs caractéristiques

Le fonctionnement en mode non-linéaire met en évidence :

- Facteur de puissance :

$$F_p = \frac{P}{S}$$

- Facteur de déplacement :

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

- Taux de Distorsion Harmonique du courant :

$$(THD)_i = \frac{\sqrt{I_s^2 - I_1^2}}{I_1}$$

- Facteur de crête du courant source absorbé :

$$F_c = \frac{I_{\max}}{I_s}$$

Effets de la pollution harmonique

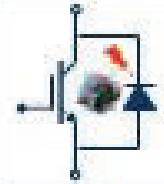
La présence des harmoniques du courant absorbé par un convertisseur provoque les effets suivants :

- Diminution du facteur de puissance (à cause de la puissance D).
- Augmentation des pertes Joule (effet accentué par l'effet de peau).
- Augmentation des pertes magnétiques.
- Déclassement des appareils alimentés (moteurs, transformateurs, etc.)
- Création de courants homopolaires dans la ligne neutre.

Compensation des harmoniques

Les effets des harmoniques peuvent être réduit par :

- Connexion sur des réseaux HTA (moyenne tension) ou HTB (haute tension) moins sensibles à la pollution harmonique.
- Utilisation d'un filtre passif (par circuit RLC placé en parallèle).
- Utilisation d'un filtre actif (onduleur) permettant d'absorber la composante polluante du courant fourni par le réseau.
- Synthèse de convertisseurs avec des commandes particulières, de façon à compenser les effets des harmoniques.



Chapitre

2

REDRESSEURS - HACHEURS

VARIATION DE VITESSE DES MOTEURS CC

Plan

- Montages Redresseurs Non commandés à diodes.
- Montages Redresseurs Commandés à thyristors.
- Montages Hacheurs à 1 quadrant.
- Montages Hacheurs à 2 et 4 quadrants.
- Variateurs de vitesse des moteurs à courant continu.

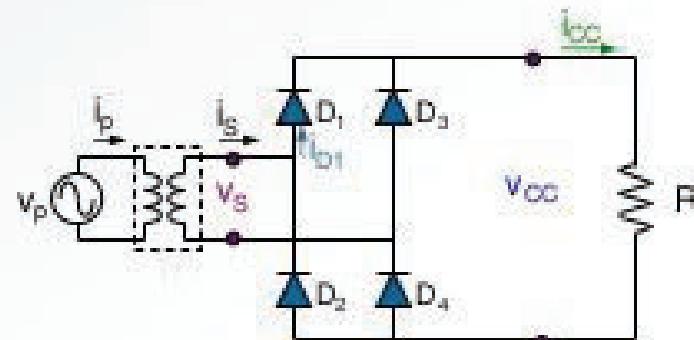
Principe

Conversion d'une source **CA** en une source **CC** :



- Facteur de forme : $FF = \frac{v_{cc}(\text{eff})}{v_{cc}(\text{moy})}$
- Facteur d'ondulation : $FO = \frac{\sqrt{[v_{cc}(\text{eff})]^2 - [v_{cc}(\text{moy})]^2}}{v_{cc}(\text{moy})} = \sqrt{FF^2 - 1}$

Pont monophasé : PD1



■ Grandeurs caractéristiques

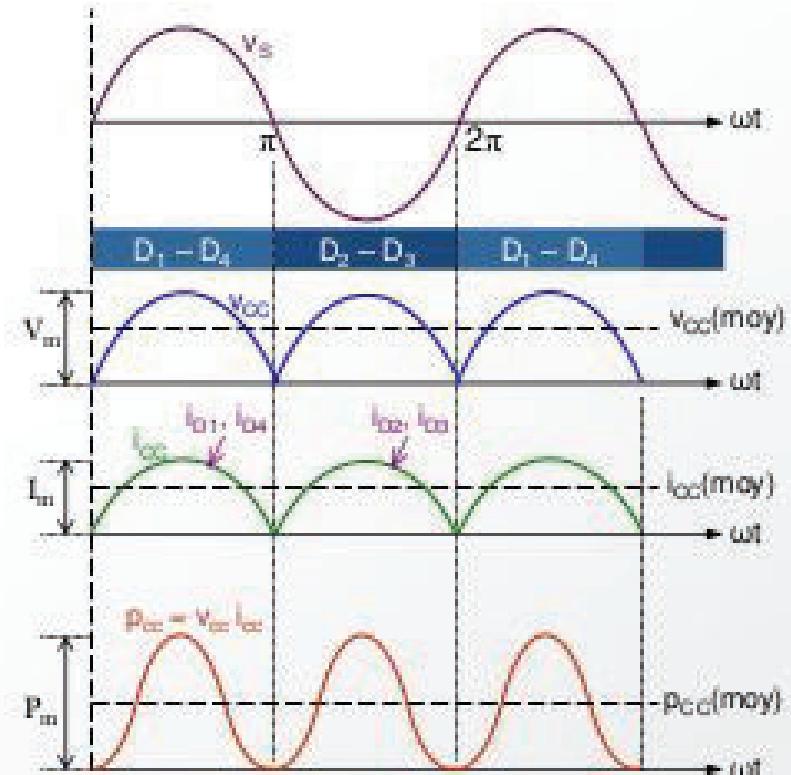
$$v_{cc}(\text{moy}) = \frac{2V_m}{\pi} \quad i_{cc}(\text{moy}) = \frac{v_{cc}(\text{moy})}{R} = \frac{2V_m}{\pi R}$$

$$v_{cc}(\text{eff}) = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad i_{cc}(\text{eff}) = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

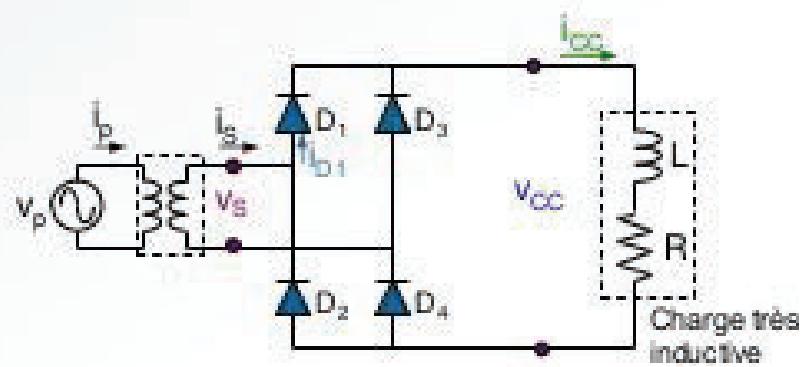
■ Performances

FF = 1.11

FO = 48.2%



Pont monophasé : PD1

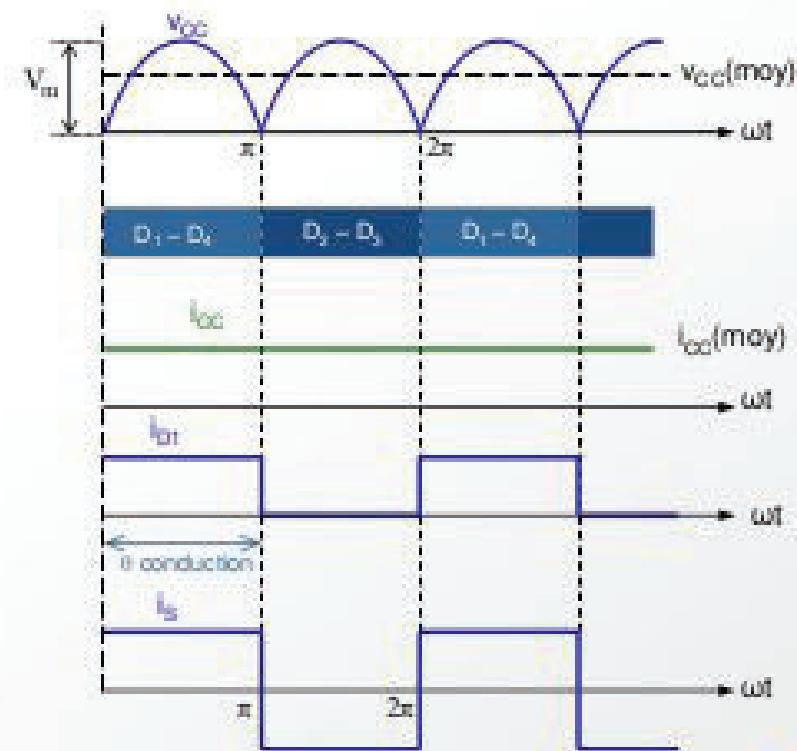


- Tension v_{cc} doublement redressée.

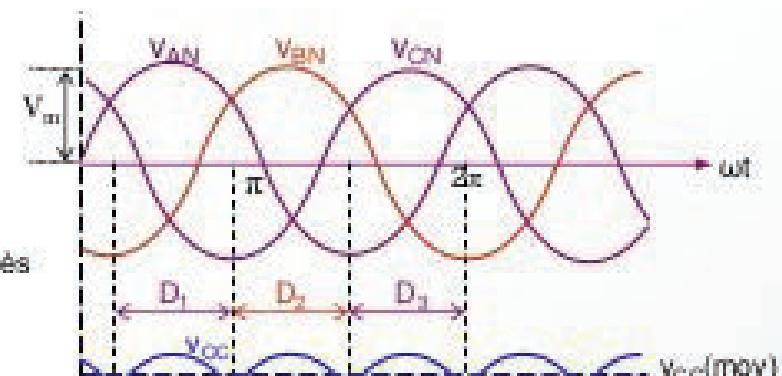
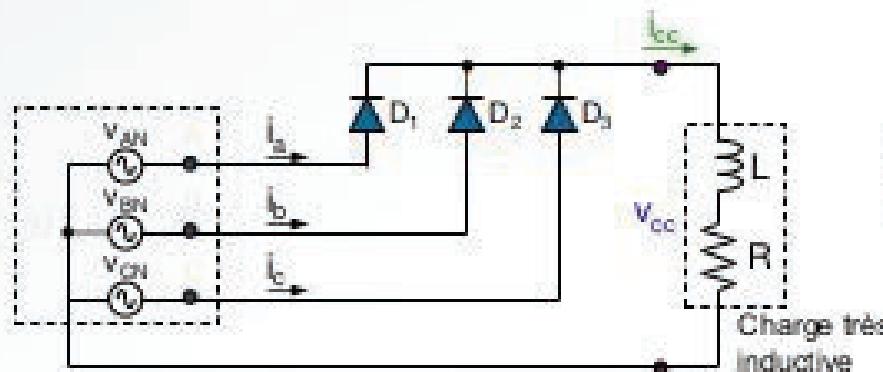
$$v_{cc}(\text{moy}) = \frac{2V_m}{\pi}$$

- Courant i_{cc} pratiquement constant.

$$i_{cc}(\text{moy}) = \frac{v_{cc}(\text{moy})}{R}$$



Pont Simple Triphasé : PS3

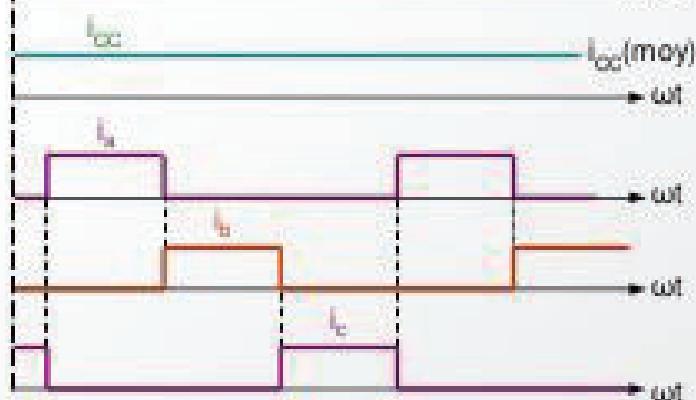


- Tension moyenne dans la charge :

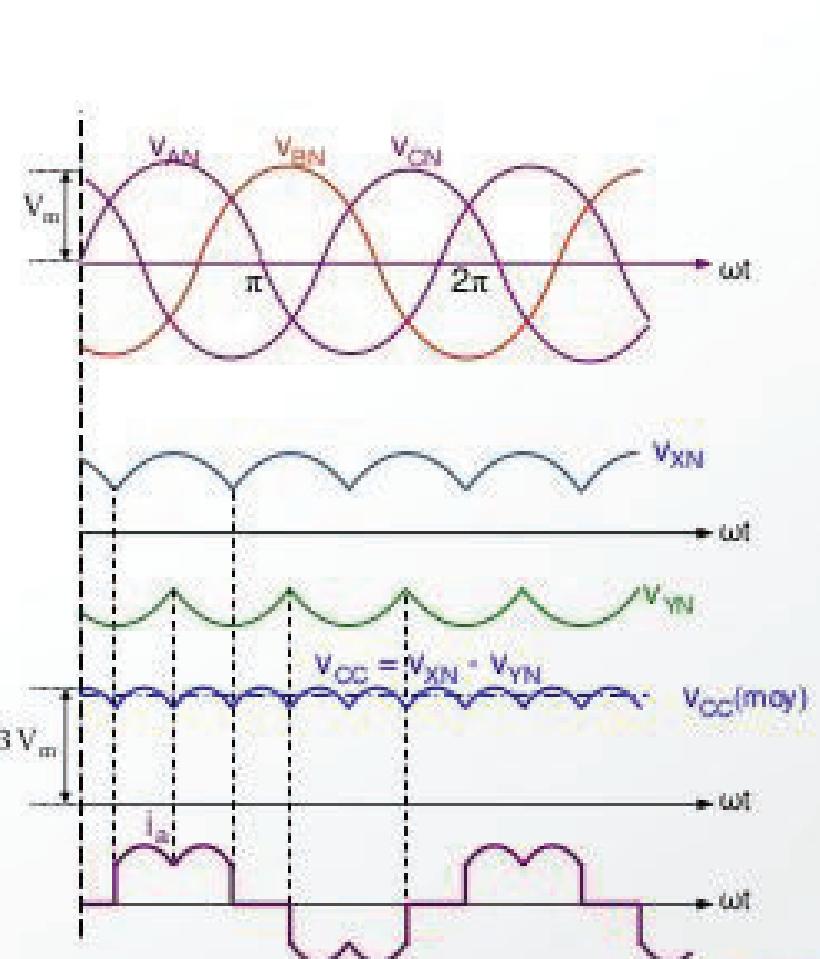
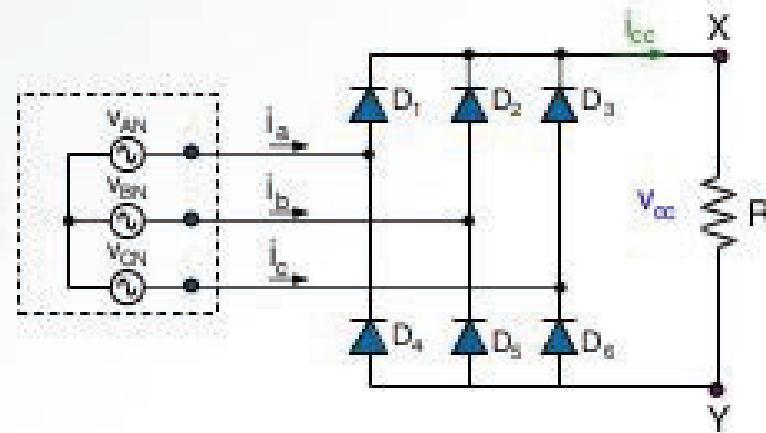
$$v_{\alpha}(\text{moy}) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$$

- Ondulations du courant négligeables :

$$i_{cc}(\text{moy}) = \frac{v_{cc}(\text{moy})}{R} = C^{\text{le}}$$



Pont Double Triphasé : PD3



Tension v_{cc} composée des sections les plus positives et les plus négatives :

$$V_{cc} = V_{XN} - V_{YN}$$

$$v_{cc}(\text{moy}) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \quad i_{cc}(\text{moy}) = \frac{v_{cc}(\text{moy})}{R}$$

Redresseurs commandés

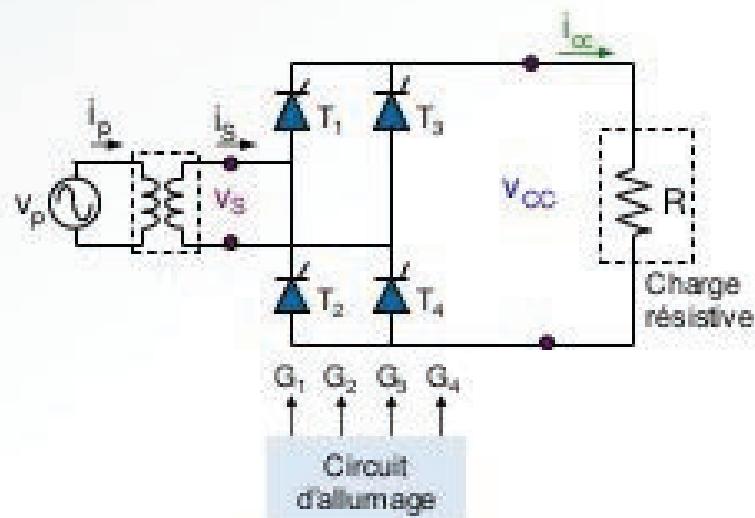
■ Principe

- L'élément redresseur est un thyristor amorcé à partir d'un circuit d'allumage ;
- La tension obtenue est continue et réglable.

■ Structures

- Redressement simple ou double alternance ;
- Source monophasée ou triphasée ;
- Emploi d'un pont tout thyristors ou mixte.

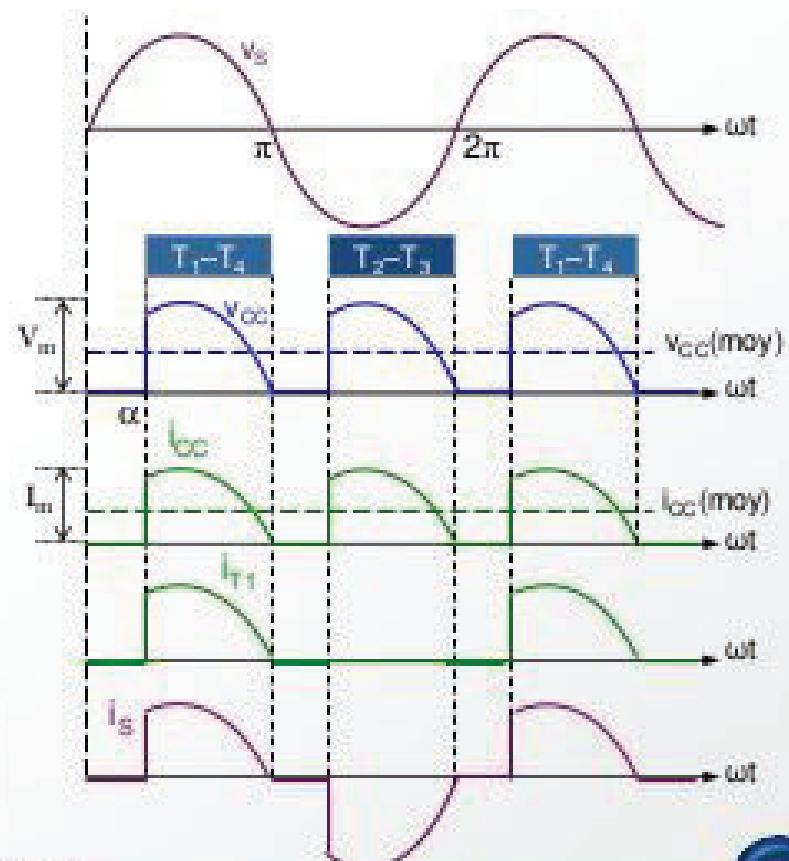
Pont commandé PD1



Angle de conduction : $\theta_{\text{cond}} = \pi - \alpha$

Valeurs moyennes :

$$v_{cc}(\text{moy}) = \frac{V_m}{\pi} [1 + \cos \alpha] \quad i_{cc}(\text{moy}) = \frac{v_{cc}(\text{moy})}{R}$$



Pont commandé : marche en onduleur

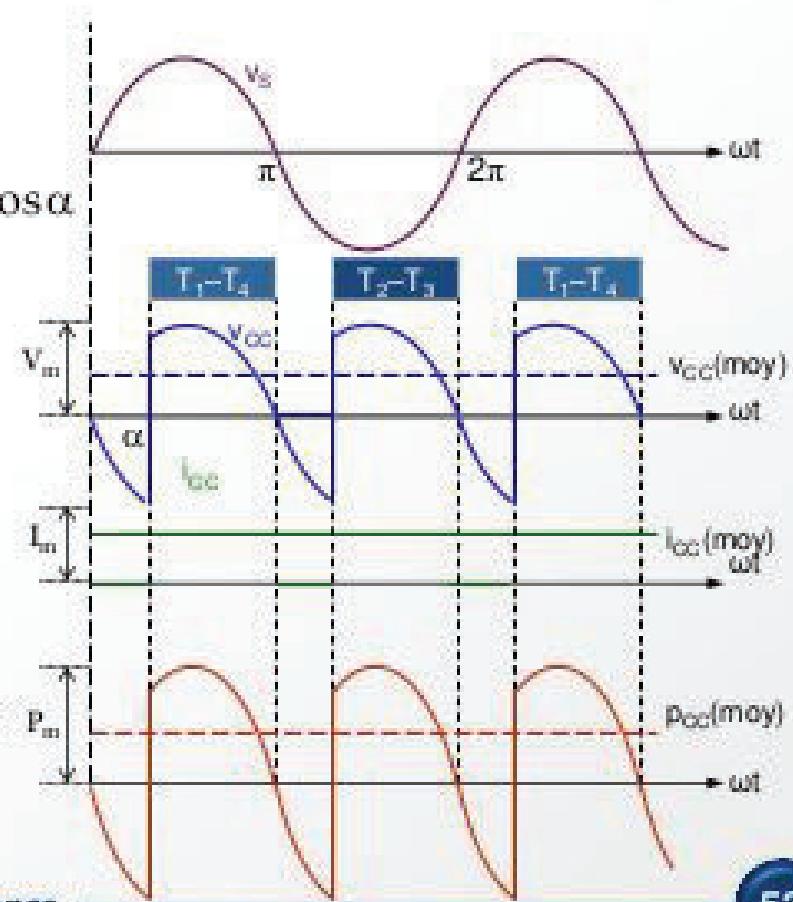
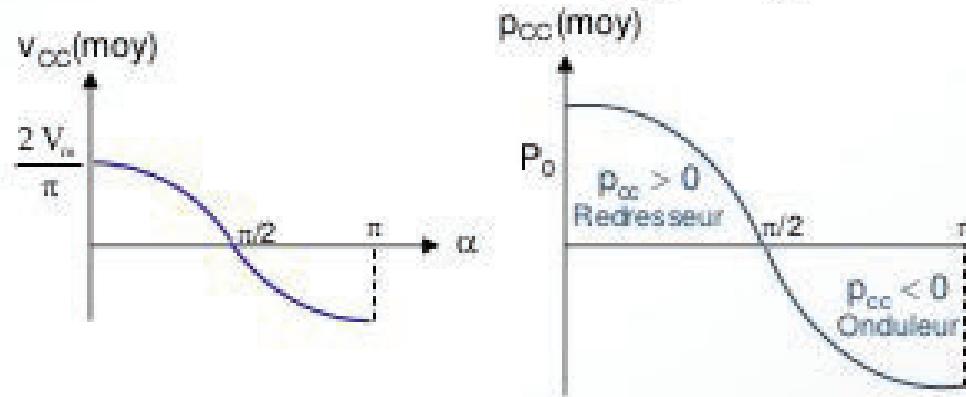
Les caractéristiques électriques sont :

$$v_{\alpha}(\text{moy}) = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

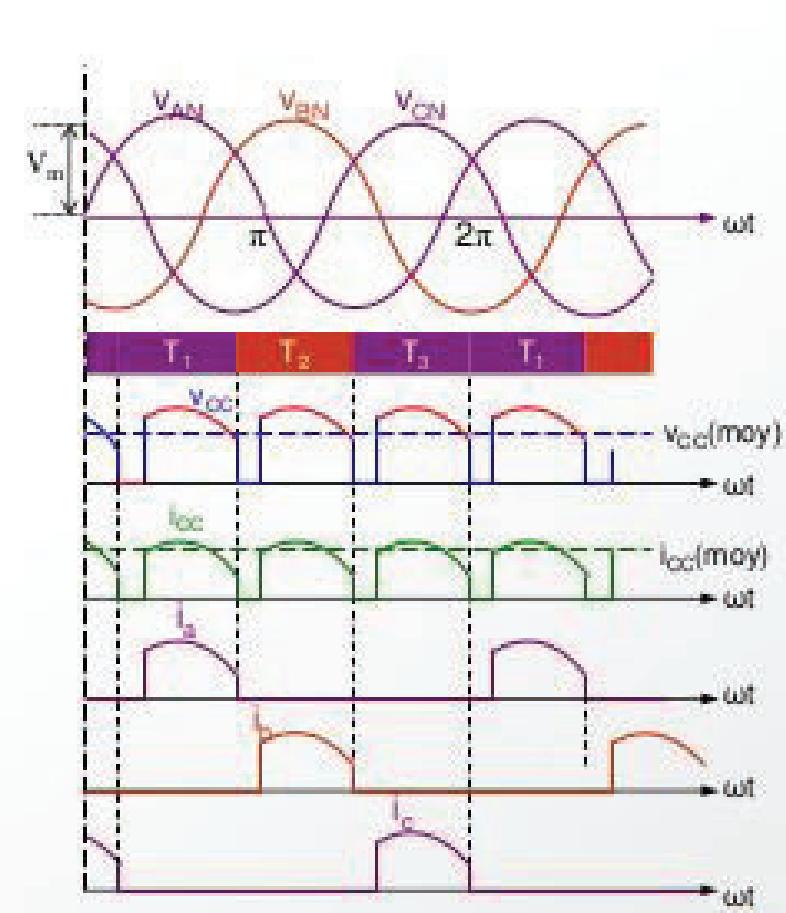
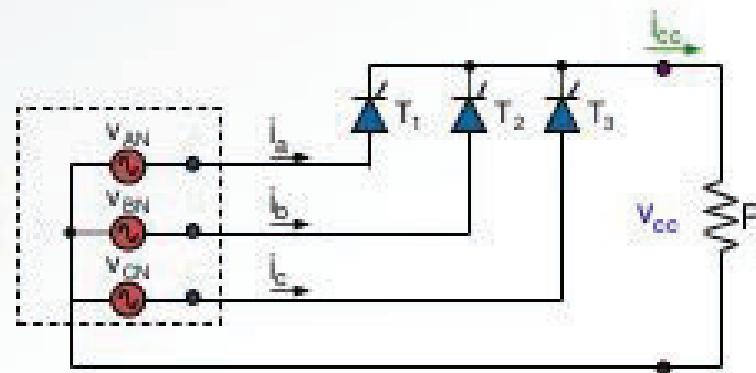
$$i_{\alpha}(\text{moy}) = \frac{v_{\alpha}(\text{moy})}{R} = I_0 \quad F_r = \frac{P_{\alpha}(\text{moy})}{v_s(\text{eff}) \times i_s(\text{eff})} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha$$

$$P_{\alpha}(\text{moy}) = \frac{2V_m I_0}{\pi} \cos \alpha$$

Courbes de variation de $v_{cc}(\text{moy})$ et P :



Pont commandé PS3



Sections les plus positives :

- Conduction continue : $0 < \alpha < 30^\circ$

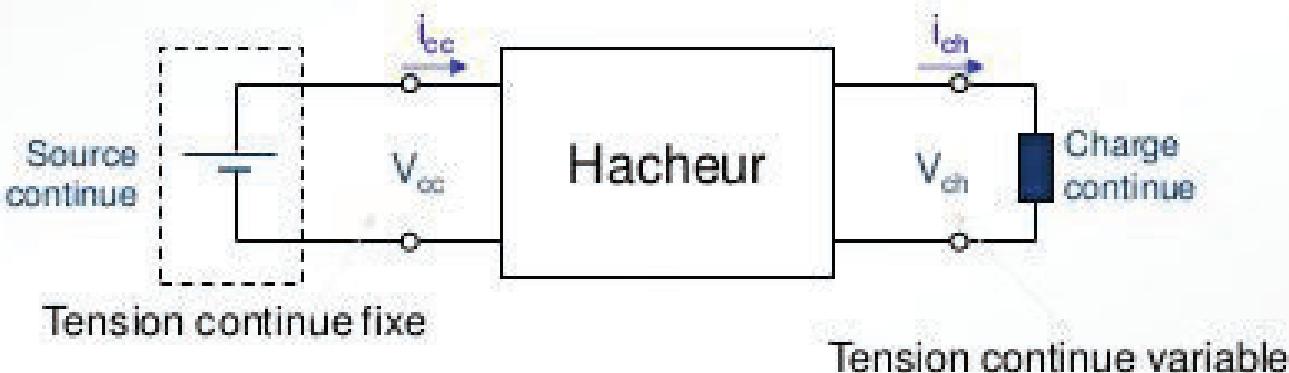
$$v_{cc}(\text{moy}) = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos \alpha$$

- Conduction discontinue : $30^\circ < \alpha$

$$v_{cc}(\text{moy}) = \frac{3V_m}{2\pi} \left[1 + \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) \right]$$

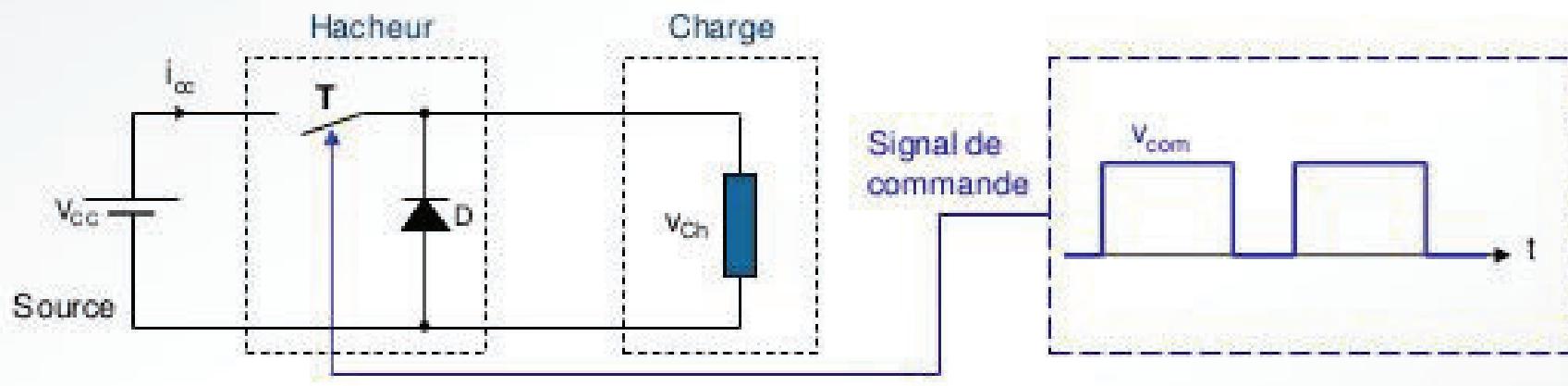
Montage Hacheur

On converti une source **CC fixe** à une source **CC variable**.



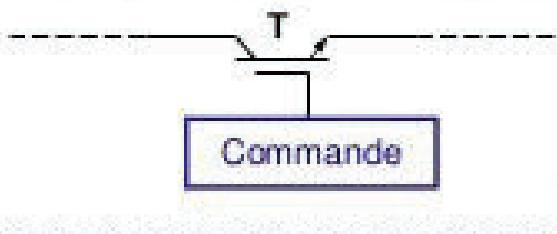
- Hacheur dévolteur : $V_{cc} > V_{ch}$
- Hacheur survolteur : $V_{cc} < V_{ch}$

Réalisation des interrupteurs

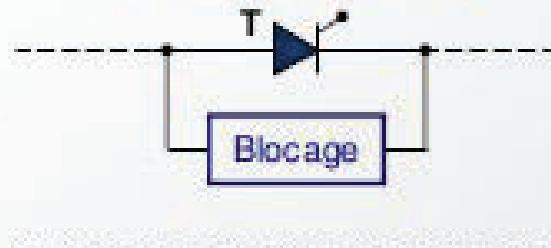


L'interrupteur "T" peut être :

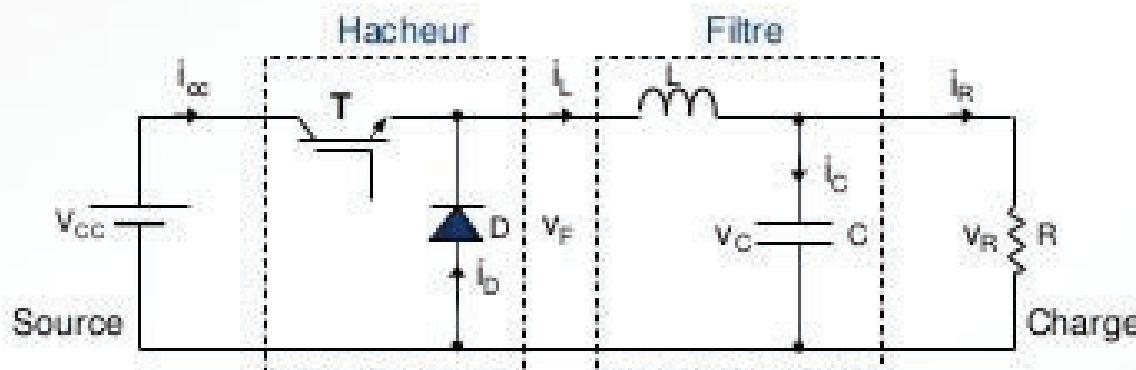
Un transistor de puissance fonctionnant en commutation



Un thyristor de puissance avec un circuit de blocage



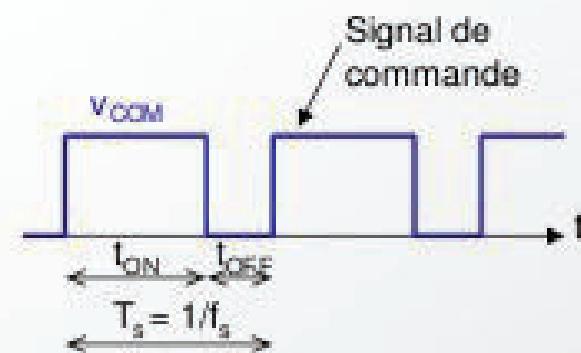
Hacheur dévolteur (série)



- Temps de conduction : t_{ON}
- Temps de blocage : t_{OFF}
- Période de hachage : $T_s = t_{ON} + t_{OFF}$
- Rapport cyclique : $\alpha = t_{ON} / T_s$

$$t_{ON} = \alpha T_s$$

$$t_{OFF} = (1 - \alpha) T_s$$



Phases de fonctionnement

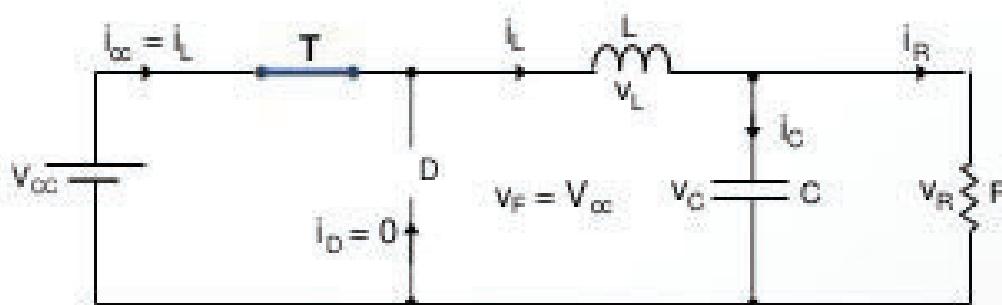
- Phase de conduction

$$V_F = V_{cc}$$

$$V_L = V_{cc} - V_R$$

$$i_L = i_T$$

$$i_D = 0$$



- Phase de récupération

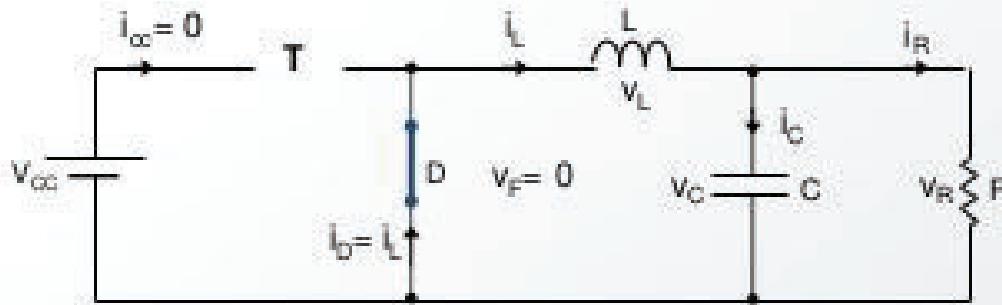
$$V_F = 0$$

$$V_L = -V_R$$

$$i_L = i_D$$

$$i_T = 0$$

Hacheur non réversible en courant et en tension (1Q)



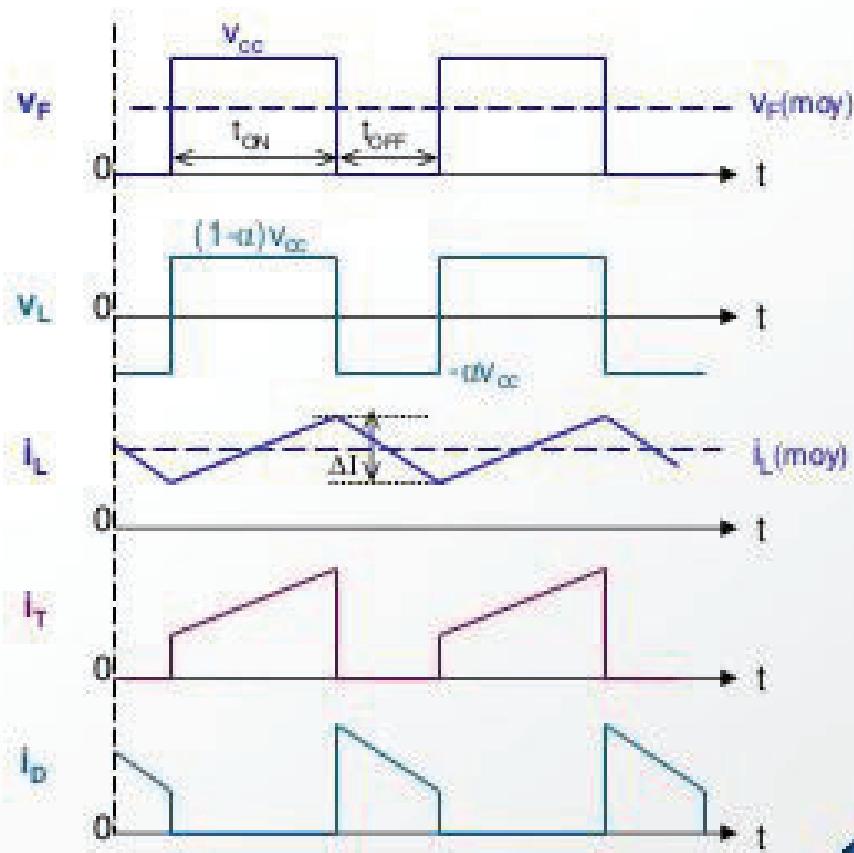
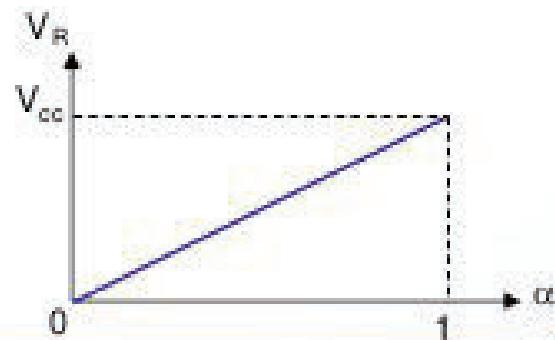
Formes d'onde

- Courant i_L ininterrompu
(L suffisamment grande).
- Tension v_R constante
(R suffisamment grande)

$$v_F(\text{moy}) = \alpha V_{cc}$$

$$v_L(\text{moy}) = 0$$

$$v_R = v_F(\text{moy}) = \alpha V_{cc}$$



Filtre de sortie

- Ondulation du courant i_L

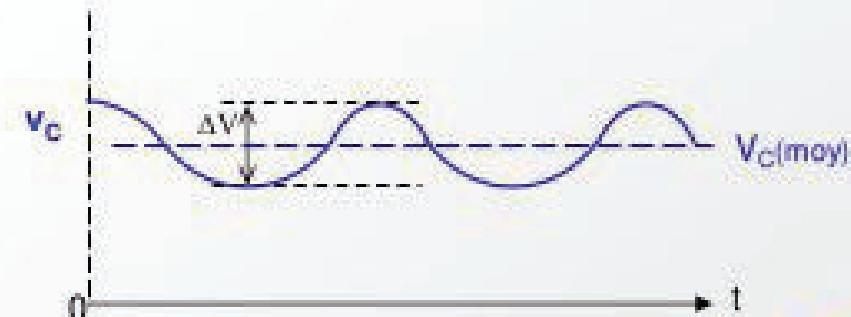
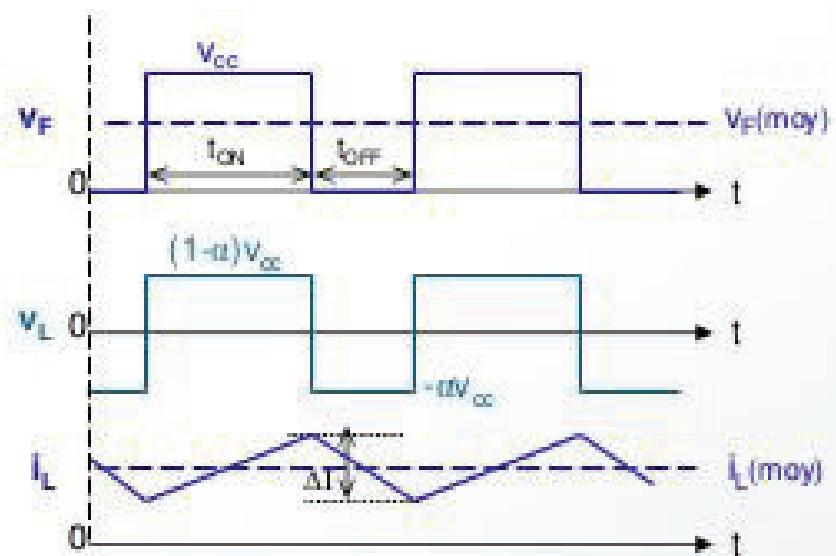
$$i_L(t) = \frac{(1-\alpha)V_{cc}}{L} t + I_{min}$$

$$i_L(\text{moy}) = \frac{V_R}{R} = \frac{\alpha V_{cc}}{R}$$

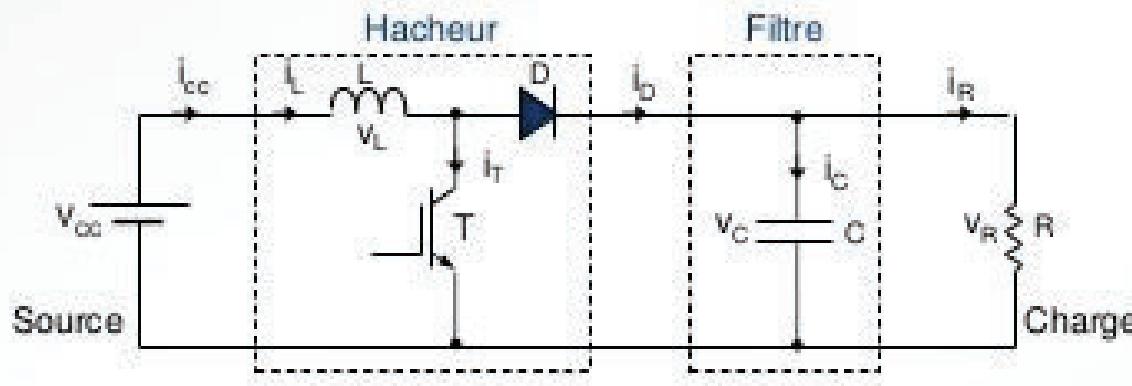
$$\Delta I = \frac{V_{cc} - V_R}{L} t_{ON} = (1-\alpha)\alpha \frac{V_{cc}}{L} T_s$$

- Ondulation de la tension v_R

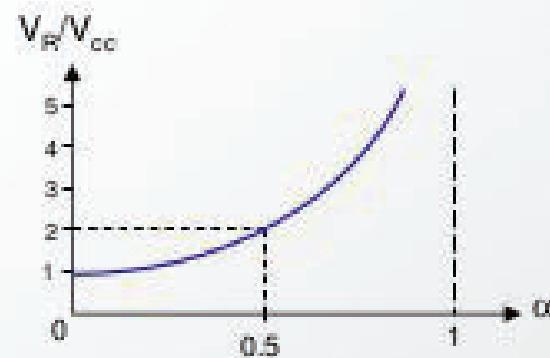
$$\frac{\Delta V}{V_R} = \frac{(1-\alpha)\alpha}{8} \times \frac{V_{cc} \times T_s^2}{LC} = \frac{(1-\alpha)}{8} \times \frac{T_s^2}{LC}$$



Hacheur Survolteur (parallèle)



- Tension de sortie : $v_R = \frac{T_s}{t_{OFF}} V_{cc} = \frac{1}{1-\alpha} V_{cc}$

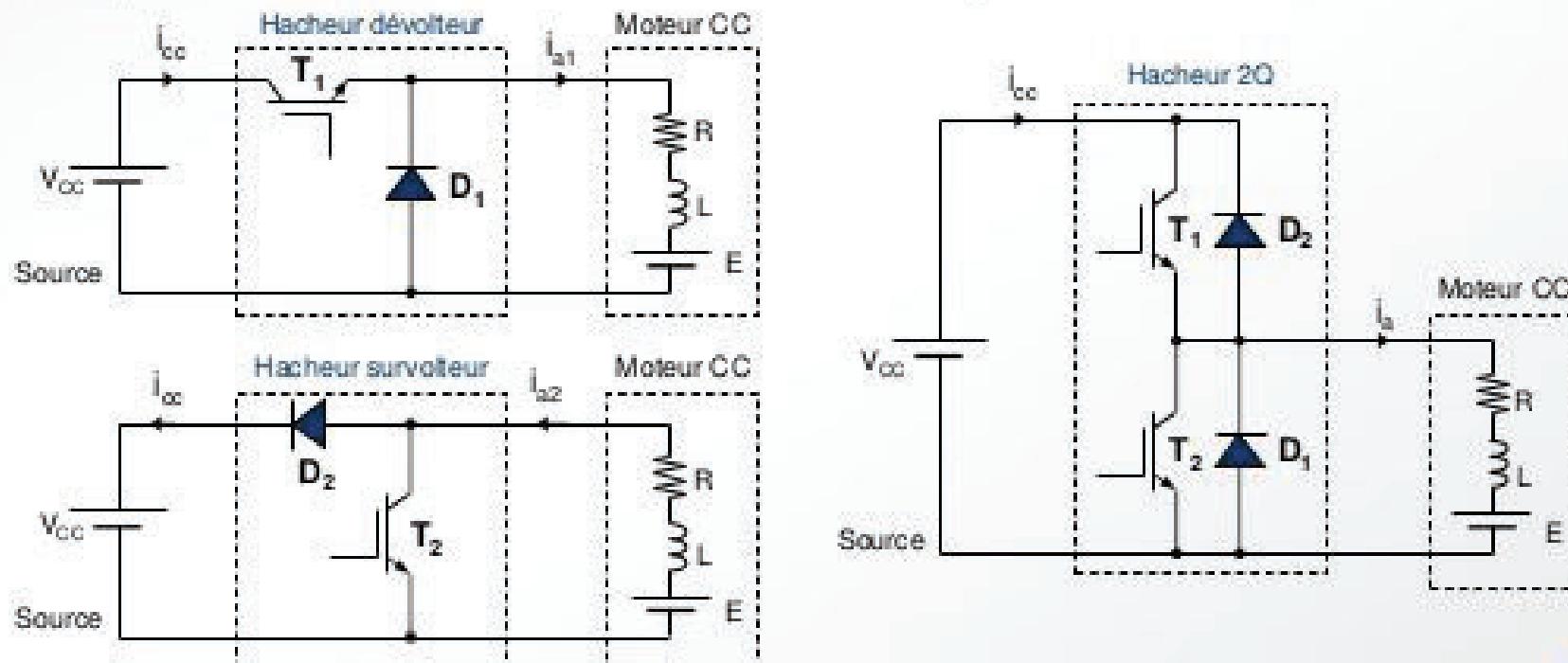


- Ondulation de courant : $\Delta I = \frac{V_{cc}}{L} t_{ON} = \alpha \frac{V_{cc}}{L} T_s$

Hacheur réversible en I (2Q)

Combinaison de 2 hacheurs (série et parallèle) avec un sens de rotation :

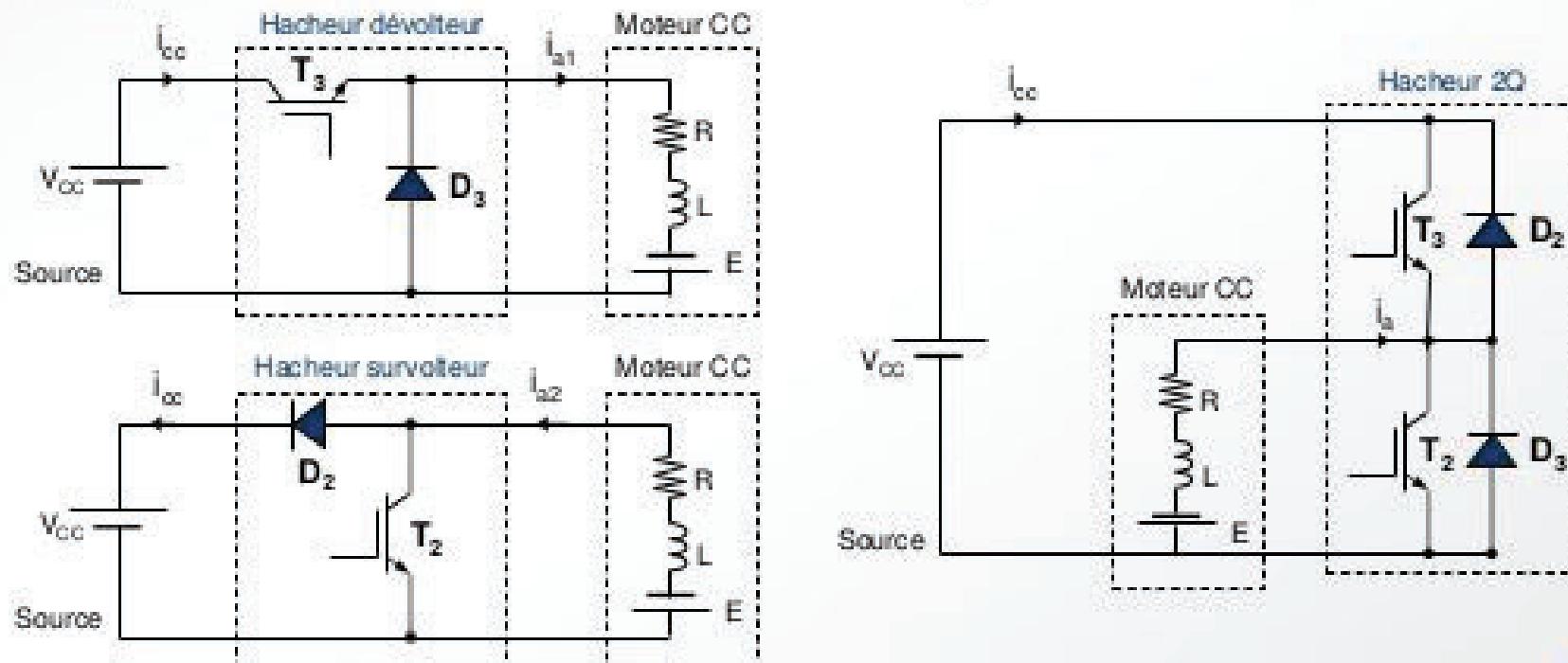
- Hacheur série : Fonctionnement en moteur.
- Hacheur parallèle : Fonctionnement en récupération.



Hacheur réversible en V (2Q)

Combinaison de 2 hacheurs avec inversion du sens de rotation :

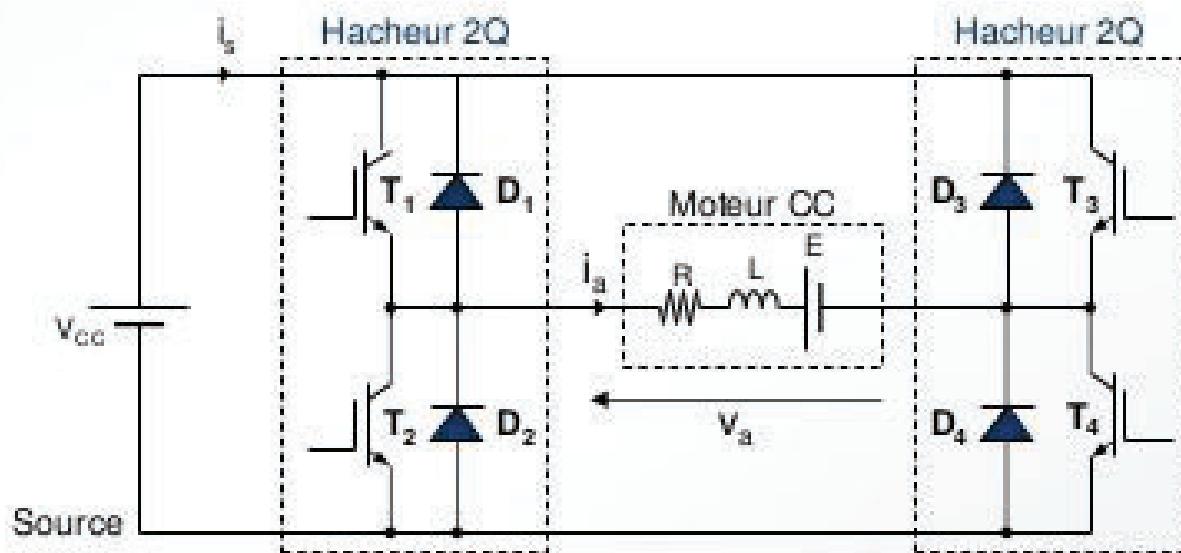
- Hacheur série : Fonctionnement en moteur.
- Hacheur parallèle : Fonctionnement en récupération.



Hacheur réversible en V et en I (4Q)

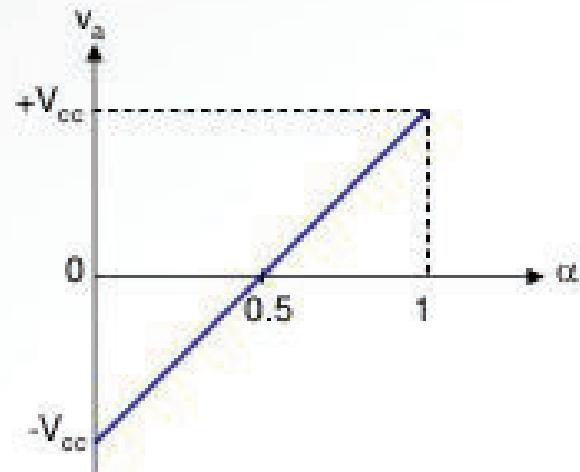
Combinaison de deux hacheurs à 2 quadrants (dévolteur-survolteur) :

→ Hacheur à 4 Quadrants réversible en courant et en tension.

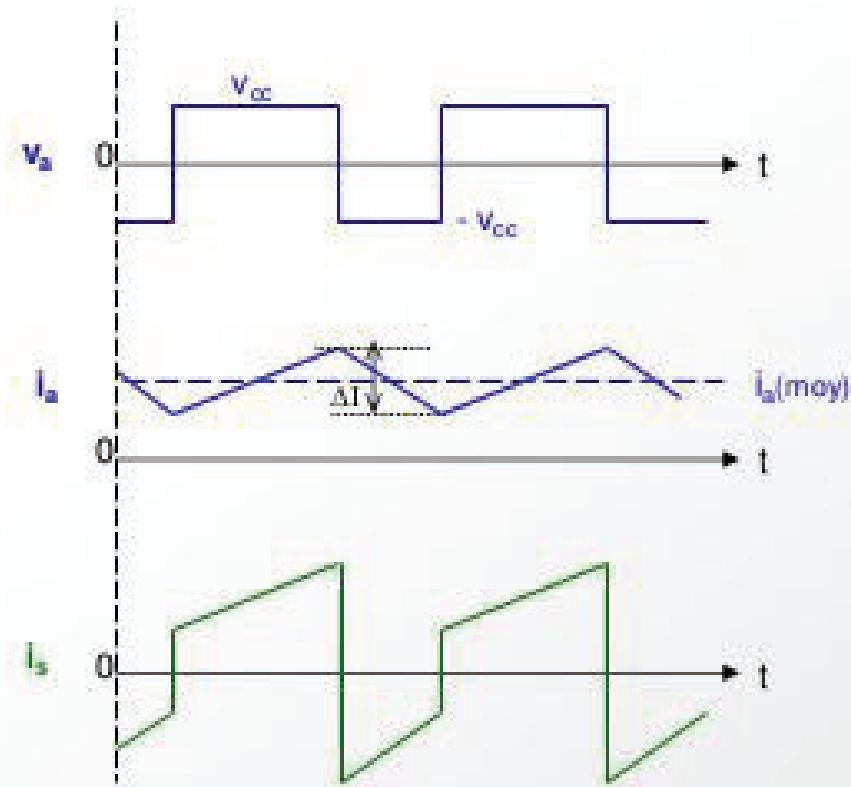


Hacheur 4Q : caractéristiques

- Tension moyenne : $v_a(\text{moy}) = (2\alpha - 1) V_{cc}$



Forme bipolaire de la tension.



Variation de vitesse des moteurs cc

Équations simplifiées :

Expression de la vitesse : $\Omega = \frac{V_a - R_s I_a}{K\phi} = \frac{V_a}{K\phi} - \frac{R_s}{(K\phi)^2} T_{em} = \Omega_v - m T_{em}$

Caractéristique mécanique : $\Omega = \Omega_v - m T_{em}$ $\Omega_v = \frac{V_a}{K\phi}$ $m = \frac{R_s}{(K\phi)^2}$

Variation de la vitesse par modification de la caractéristique du couple $T_{em}(\Omega)$.

Paramètres de variation de la vitesse :

- Résistance d'induit : R_s
- Flux inducteur : ϕ
- Tension d'alimentation : V_a

Action sur la résistance d'induit

Procédure :

Placer une résistance R_v en série avec l'induit.

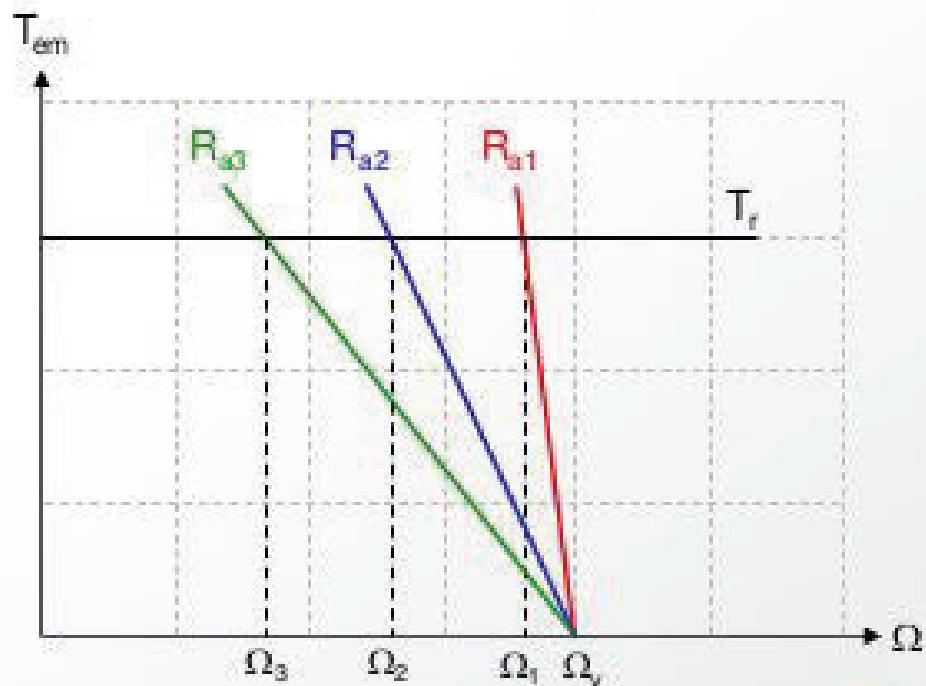
$$\Omega_v = \frac{V_a}{K\phi}$$

$$m = \frac{R_a + R_v}{(K\phi)^2}$$

Mode de variation :

- Vitesse à vide Ω_v inchangée.
- Modification de la pente m de la caractéristique mécanique.

Entraînement à couple résistant constant



Action sur le flux inducteur

Procédure :

Varier le courant inducteur I_e d'excitation.

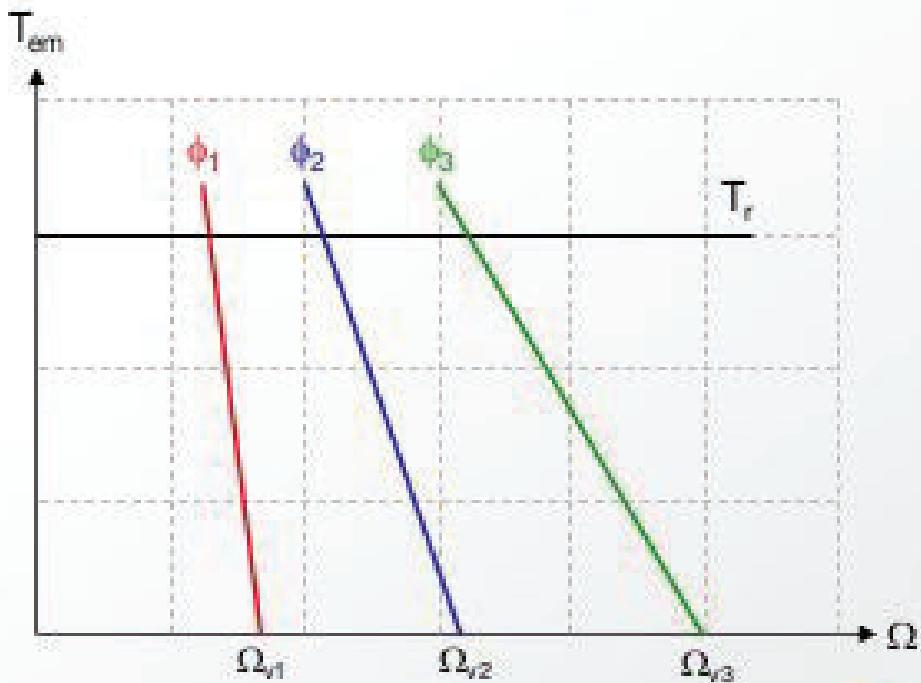
$$\Omega_v = \frac{V_a}{K\phi}$$

$$m = \frac{R_a}{(K\phi)^2}$$

Mode de variation :

- Modification de la vitesse à vide Ω_v .
- Modification de la pente m de la caractéristique mécanique.

Entraînement à couple résistant constant



Action sur la tension d'alimentation

Procédure :

Varier la tension V_a d'alimentation de l'induit.

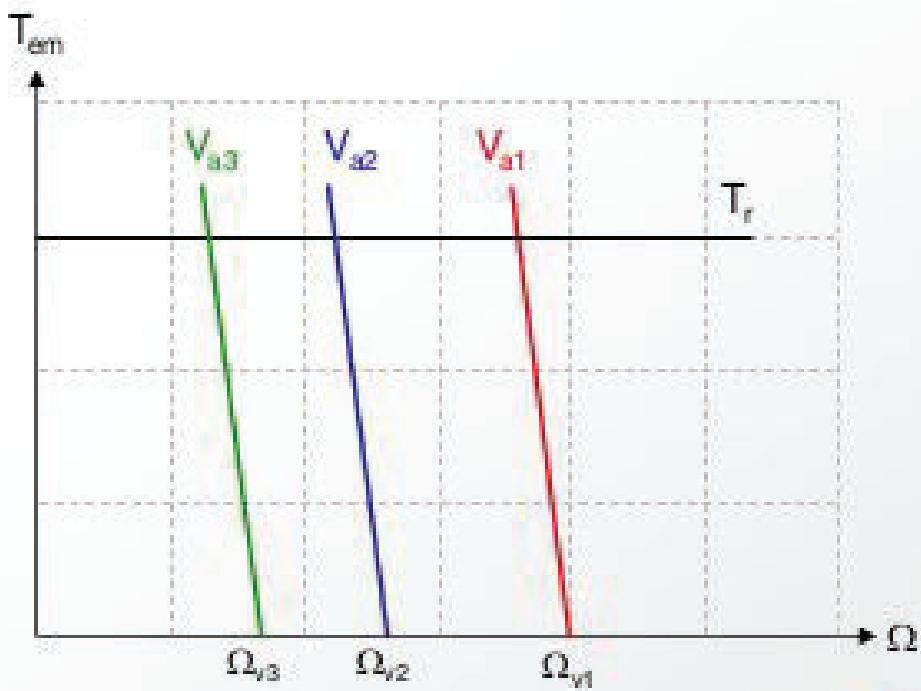
$$\Omega_v = \frac{V_a}{K\phi}$$

$$m = \frac{R_a}{(K\phi)^2}$$

Mode de variation :

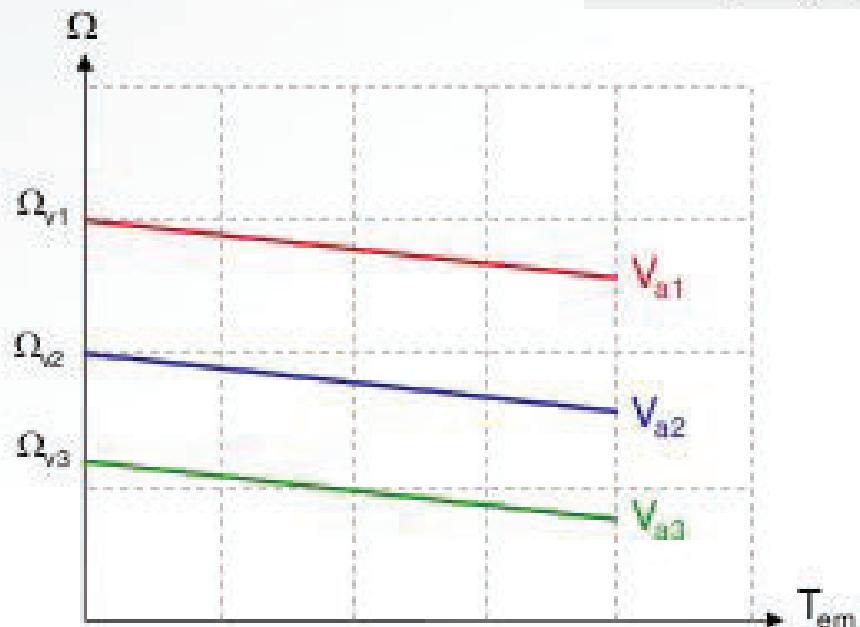
- Vitesse à vide Ω_v déplacée.
- Pente m de la caractéristique mécanique reste inchangée.

Entraînement à couple résistant constant

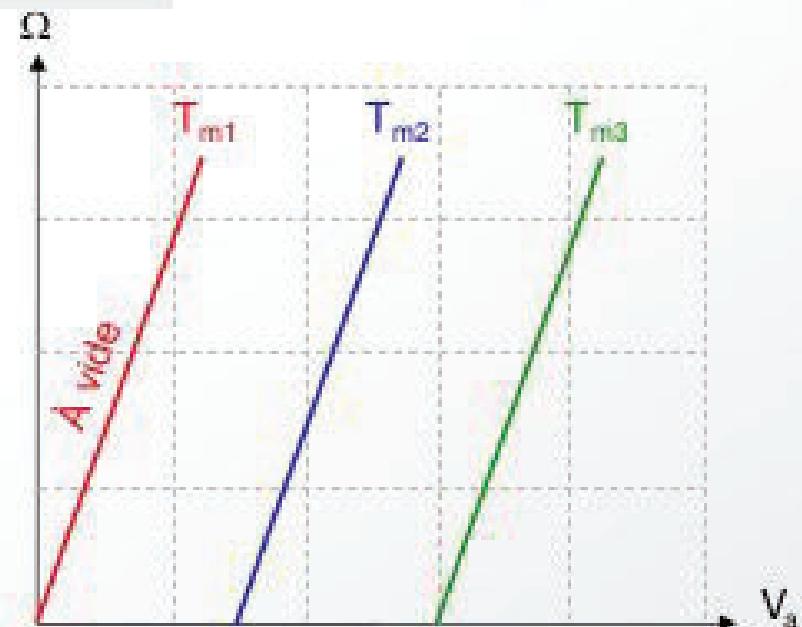


Action sur la tension d'alimentation

$$\text{Équation de la vitesse : } \Omega = \frac{V_a}{K\phi} - \frac{R_a}{(K\phi)^2} T_{em} = \Omega_v - m T_{em}$$



Courbes paramétrées en tension.

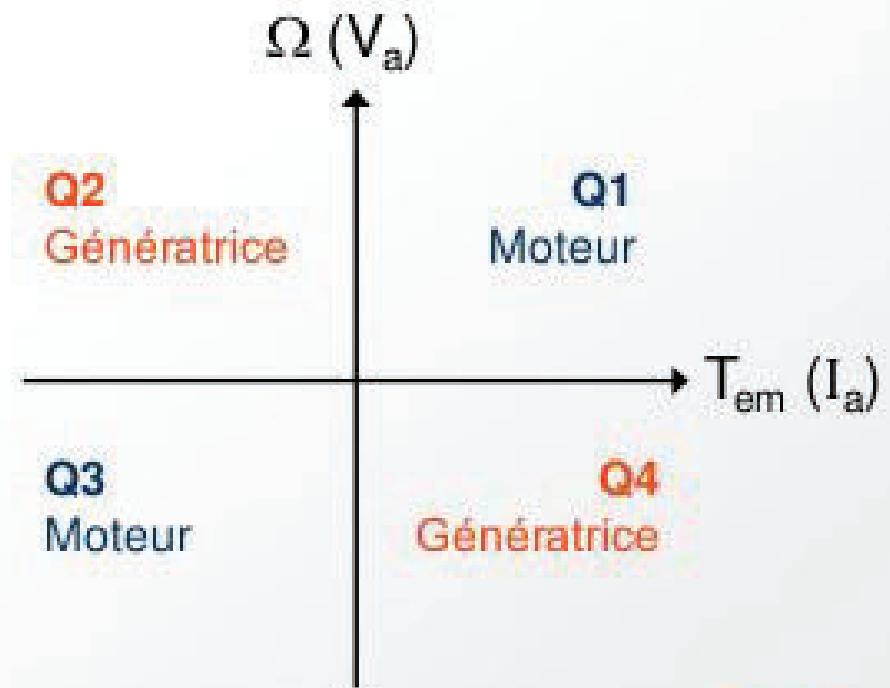


Courbes paramétrées en couple.

Structure des variateurs MCC

Plusieurs critères sont à prendre en considération :

- Nature de la source d'énergie (continue ou alternative)
- Inversion du sens de rotation
- Charge entraînante ou non
- Mode de freinage (naturel ou forcé)
- Gamme de puissance du moteur
- Mode de commande du moteur
(en couple ou en vitesse)



Variateurs de vitesse pour MCC

