

CONVERSION STATIQUE D'ÉNERGIE

OBJECTIFS

- Posséder des connaissances générales sur les convertisseurs statiques (classement par familles).
- Etudier en détail deux convertisseurs (continu-continu et continu-alternatif).
- Connaître le comportement des interrupteurs commandés ou non commandés.
- Connaître quelques applications industrielles des convertisseurs statiques.
- Calculer des valeurs en sortie des convertisseurs (tension moyenne, tensions efficaces...).

I- LES CONVERTISSEURS STATIQUES – GÉNÉRALITÉS

1- Définition

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné.

Exemples :

- Une alimentation stabilisée transforme la tension alternative sinusoïdale du réseau EDF en tension continue (famille des redresseurs).
- Un onduleur de secours transforme la tension continue des batteries en tension alternative pour alimenter, par exemple, du matériel informatique (famille des onduleurs).

2- Origine des convertisseurs de puissance électrique

Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement.
 Une machine à courant alternatif d'une part (de type synchrone ou asynchrone) couplée au réseau permettait de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique à vitesse fixe.
 Une machine à courant continu d'autre part dont l'excitation commandée permettait de disposer d'une tension continue variable en sortie.

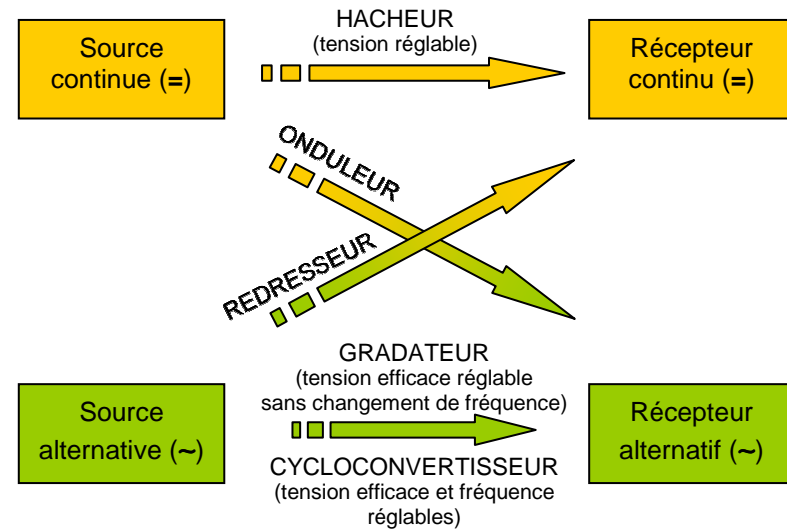
Le développement des composants de puissance au milieu du 20^e siècle (électronique de puissance) a permis de développer des convertisseurs de puissance électrique sans machines tournantes.

La technologie des composants utilisés (semi-conducteurs) ne cesse d'évoluer :

- faible coût
- puissances commutées élevées
- facilité de contrôle.

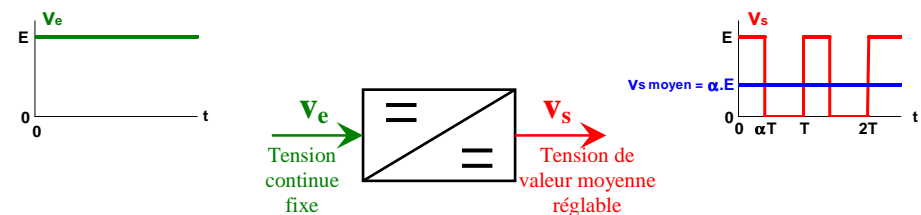
3- Familles de convertisseurs statiques

Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques (schéma ci-dessous):

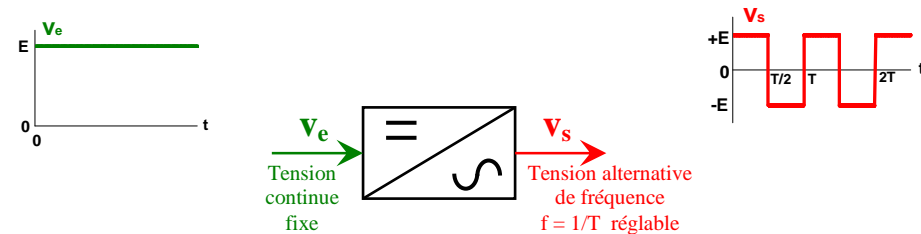


4- Symbole et exemples de signaux issus des convertisseurs

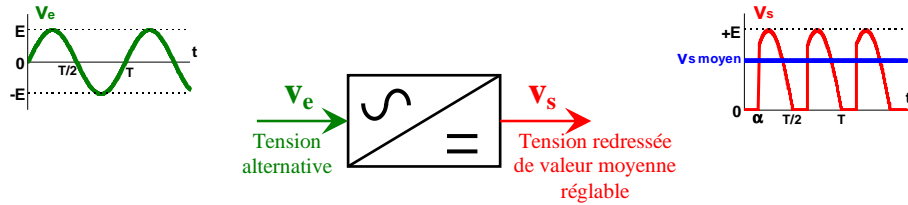
- **Hacheur** : continu → continu (rapport cyclique α réglable)



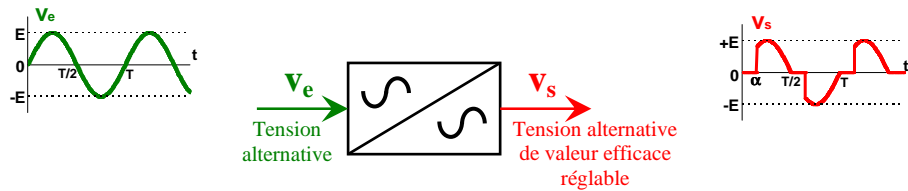
- **Onduleur** : continu → alternatif (valeur moyenne = 0)



■ **Redresseur** : alternatif → continu (valeur moyenne éventuellement réglable)



■ **Gradateur** : alternatif → alternatif (valeur efficace réglable)



5- Réversibilité des convertisseurs

Une notion importante en électronique de puissance comme en électrotechnique est la notion de réversibilité.

Définition : Un convertisseur statique d'énergie est dit **réversible** lorsque **l'énergie** peut **transiter dans les deux sens** (source → récepteur ou récepteur → source) de manière naturelle ou commandée.

Exemple : Lors du freinage d'une voiture électrique, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (moteur → génératrice) qui sert à recharger les accumulateurs à travers le redresseur réversible (redresseur commandé).

II- LES INTERRUPTEURS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

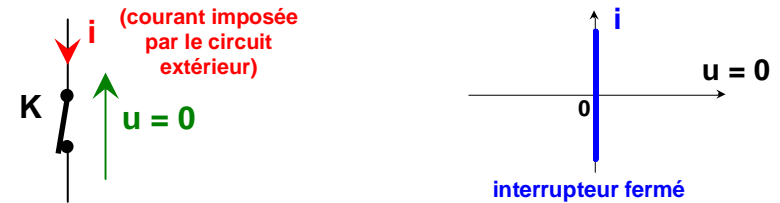
1- Les interrupteurs parfaits

Un interrupteur parfait possède deux états : "Ouvert (OFF)" et "Fermé (ON)"

■ **Interrupteur ouvert** (position OFF : $i = 0$)

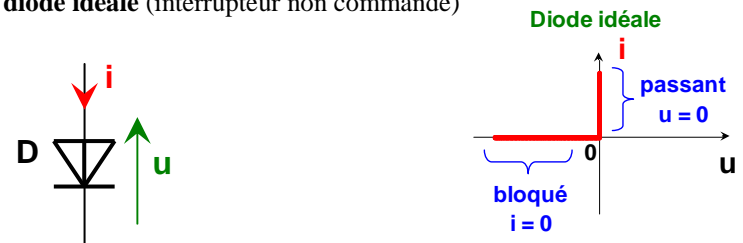


■ **Interrupteur fermé** (position ON : $u = 0$)



2- Les interrupteurs à semi-conducteurs

■ **La diode idéale** (interrupteur non commandé)

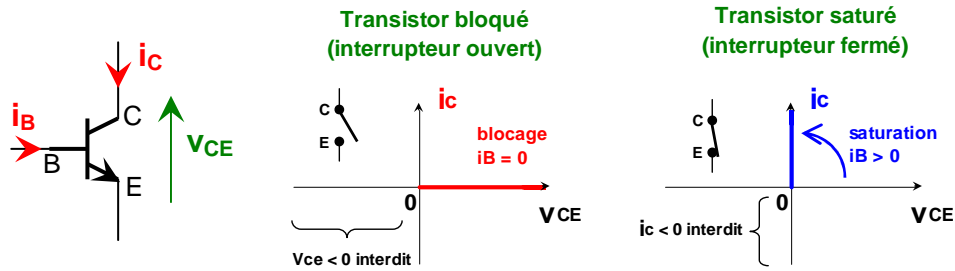


La diode passe de l'état bloqué à l'état passant lorsque u ou i change de signe (positif).
La diode passe de l'état passant à l'état bloqué lorsque u ou i change de signe (négatif).

La commutation est spontanée car elle ne dépend que de signe du courant ou de la tension du circuit extérieur.

■ Le transistor bipolaire

Cet interrupteur est commandable à l'ouverture et à la fermeture, la commutation se fait par une action électrique (injection d'un courant de base i_B).

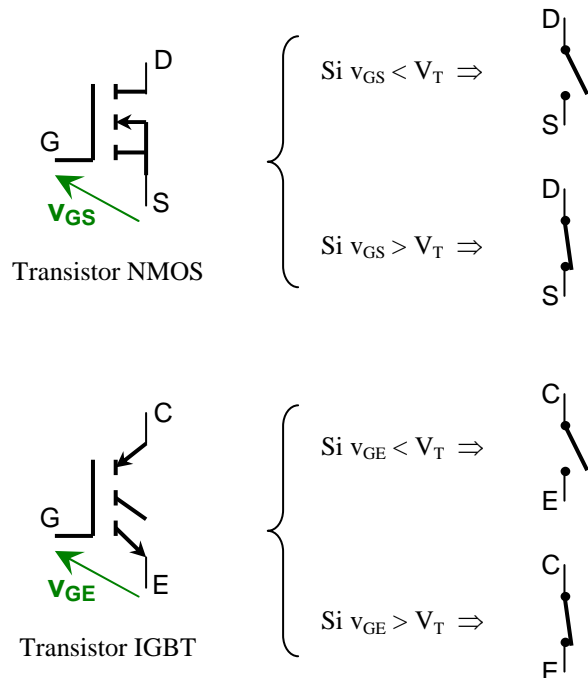


Lorsque le transistor est saturé (interrupteur fermé) le courant i_C et la tension V_{CE} ne doivent pas être négatif.

Le transistor est donc un interrupteur commandé unidirectionnel en tension et en courant.

■ Les transistors MOS et IGBT

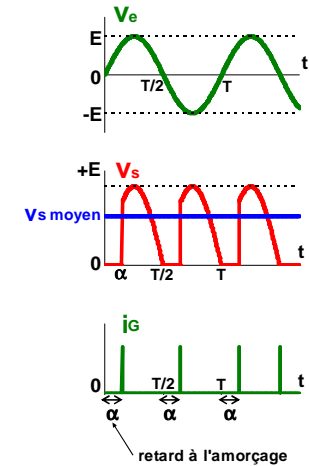
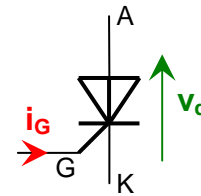
Ces transistors, plus performants, ont le même comportement que le bipolaire à la différence qu'ils se commandent avec une tension (le courant de commande est très faible).



■ Le thyristor

Le thyristor est une diode commandée qui ne permet donc le passage du courant que dans un sens. De plus il n'est commandable qu'à la fermeture. L'ouverture s'effectue lors de la disparition du courant direct (voir diode).

Le thyristor se comporte donc comme une diode dont la mise en conduction dans le sens passant sera autorisée par une impulsion de courant sur la gâchette (retard α à l'amorçage réglable).

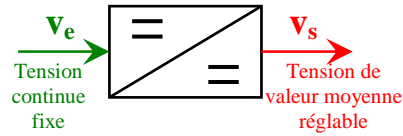


Prenons l'exemple du redressement commandé. On retarde de α l'amorçage du thyristor pour régler la valeur moyenne (schéma ci-dessous):

III- LA CONVERSION CONTINU-CONTINU

1- Généralités

Un convertisseur continu-continu permet d'obtenir (avec éventuellement une isolation galvanique) une tension ondulée de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe.



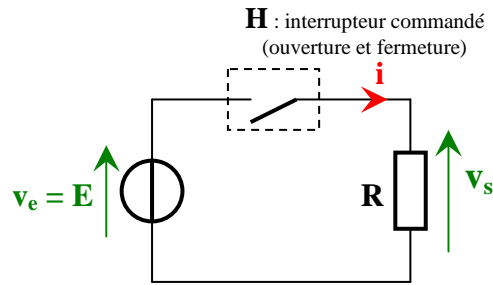
L'étude se limitera au hacheur série et au hacheur en pont dans lequel les interrupteurs (supposés parfaits) sont en série avec la source de tension.

2- Le hacheur série sur charge résistive

■ Schéma

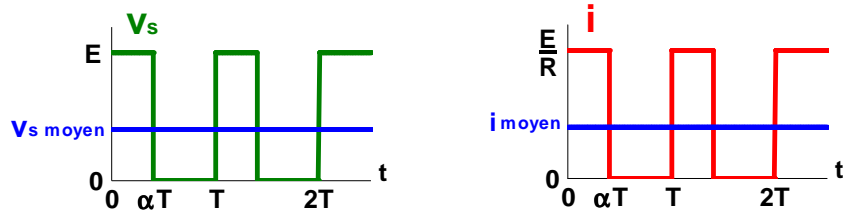
L'interrupteur **H** (de type transistor) est commandé à la fréquence **f** (période **T = 1/f**).

Durant la période **T**, l'interrupteur est fermé pour une durée **α.T** (rapport cyclique **α** avec $0 \leq \alpha \leq 1$).



■ Chronogrammes

Les chronogrammes ci-dessous montrent l'allure de la tension **v** et du courant **i** pour un rapport cyclique **α** donné :



■ Calcul de v_s moyen et i moyen

Le calcul se fait par la méthode des surfaces entre la courbe et l'axe du temps:

$$v_{s \text{ moyen}} = \langle v_s \rangle = \frac{\text{Surface}}{\text{Période}} = \frac{E \cdot \alpha T}{T} \quad \text{soit} \quad \boxed{\langle v_s \rangle = E \alpha}$$

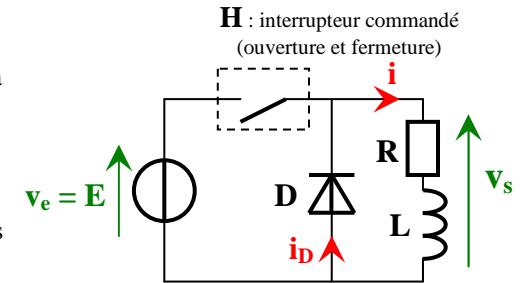
$$\text{On a de même} \quad \boxed{\langle i \rangle = \frac{E}{R} \alpha}$$

La valeur moyenne de v_s est donc réglable de 0 à E.

3- Le hacheur série sur charge inductive

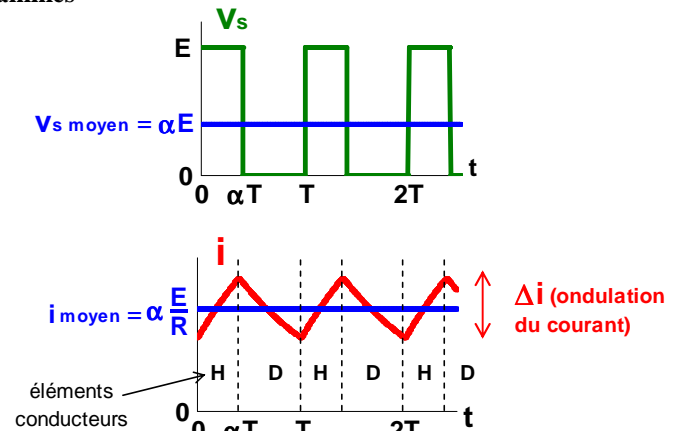
■ Schéma

Très souvent, le récepteur (charge) a un caractère inductif (moteur à courant continu par exemple). Le courant **i** ne pourra donc varier brusquement et à l'ouverture de l'interrupteur le courant ne devra pas être interrompu sous peine de surtension (auto-induction).



La diode **D** appelée "**diode de roue libre**" permettra le passage du courant lorsque l'interrupteur sera ouvert.

■ Chronogrammes



■ Analyse des chronogrammes

Le caractère inductif de la charge ne change pas l'allure de v_s et on a toujours

$$\langle v_s \rangle = E\alpha T$$

Le courant i ondule autour de la valeur moyenne $\langle i \rangle = \frac{E}{R} \alpha$.

L'inductance n'a donc pas d'influence sur la valeur moyenne du courant.

Analysons les chronogrammes sur une période :

- de 0 à αT : H se ferme et le courant augmente (exponentielle) à travers H
 \Rightarrow dans cette phase, l'énergie provient de la source de tension E.
- de αT à t : H s'ouvre et le courant décroît à travers le diode D
 \Rightarrow c'est la phase de "**roue libre**" et l'énergie provient de l'inductance.

Remarque : L'ondulation du courant Δi diminue lorsque L augmente (lissage).

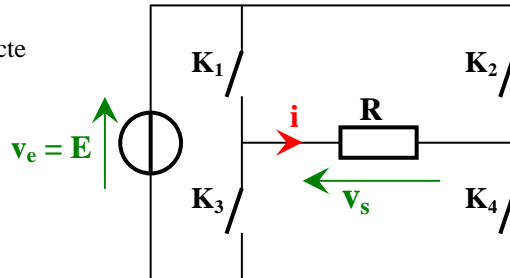
4- Le hacheur en pont sur charge résistive


L'étude du hacheur en pont se limitera à la charge résistive.

■ Schéma

La commande des interrupteurs respecte l'ordre suivant ($0 < \alpha < 1$):

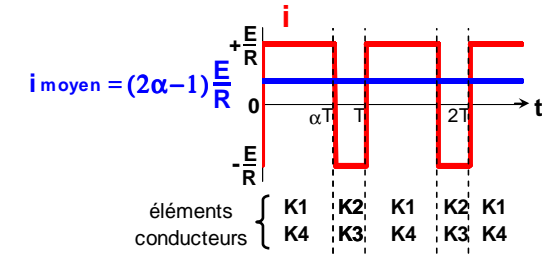
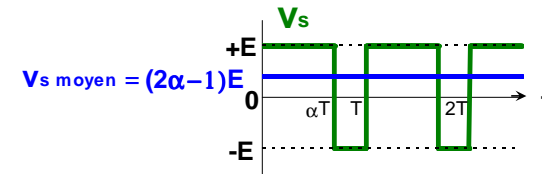
- de 0 à αT : K_1 et K_4 fermés
 K_2 et K_3 ouverts
- de αT à T : K_1 et K_4 ouverts
 K_2 et K_3 fermés



 Remarque importante :

La source de tension E ne doit pas être en "court-circuit", il est donc impératif de ne jamais avoir K_1 et K_3 ou K_2 et K_4 fermés en même temps.

■ Chronogrammes



■ Calcul de $v_{s \text{ moyen}}$ et i_{moyen}

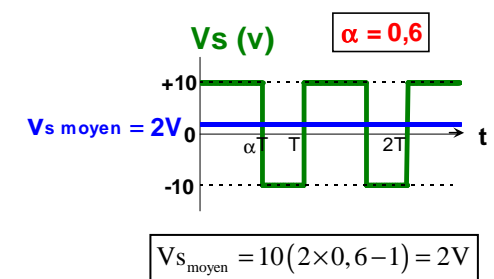
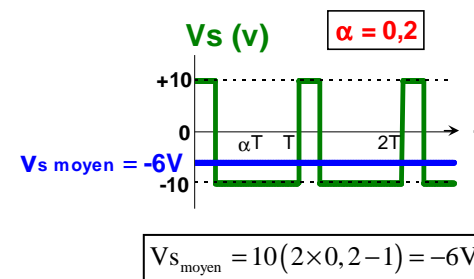
Le calcul se fait par la méthode des surfaces entre la courbe et l'axe du temps:

$$v_{s \text{ moyen}} = \langle v_s \rangle = \frac{\text{Surface}}{\text{Période}} = \frac{E \cdot \alpha T + (-E)(T - \alpha T)}{T} \text{ soit } \langle v_s \rangle = E(2\alpha - 1)$$

$$\text{On a de même } \langle i \rangle = \frac{E}{R} (2\alpha - 1)$$

La valeur moyenne de v_s est donc réglable de -E à E.

Prenons un exemple avec $E = 10V$ et deux valeurs de α (0,2 et 0,6)

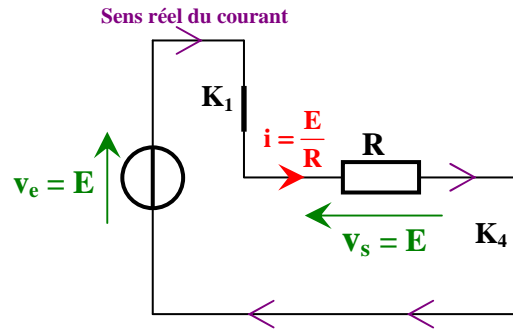


■ Analyse des chronogrammes

heg

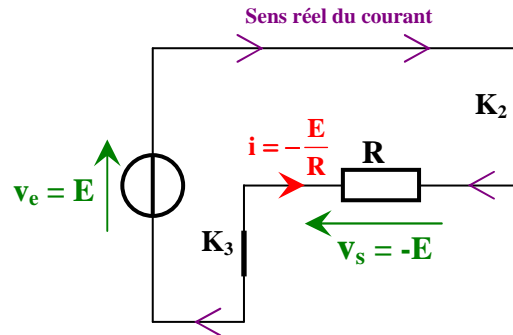
- de 0 à αT : K_1 et K_4 se ferment (K_2 et K_3 s'ouvrent)

\Rightarrow on a donc $v_s = +E$ et $i = +\frac{E}{R}$ (schéma ci-dessous) :



- de αT à T : K_2 et K_3 se ferment (K_1 et K_4 s'ouvrent)

\Rightarrow on a donc $v_s = -E$ et $i = -\frac{E}{R}$ (schéma ci-dessous) :

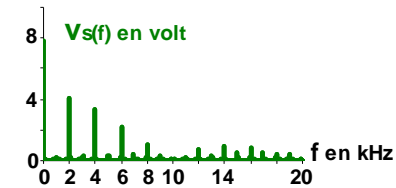


5- Etude spectrale des signaux

On est dans le cas d'un signal de sortie de type "continu", les fréquences autres que la composante continue ($f = 0$) seront non désirables.

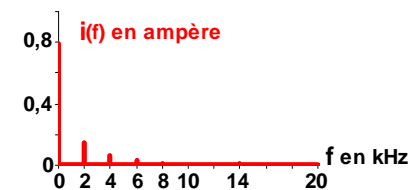
Prenons le cas d'un hacheur série ($\alpha = 0,8$) sur charge inductive et effectuons une analyse fréquentielle des signaux :

Spectre de v_s pour $E = 10V$ et $\alpha = 0,8$



On constate que la tension v_s présente de nombreux harmoniques d'amplitudes non négligeables, ce qui est très éloigné d'un signal continu.

Spectre de i pour $E = 10V$; $\alpha = 0,8$; $R = 10\Omega$ et $L = 2mH$



Le spectre du courant i nous montre des harmoniques d'amplitudes réduites par rapport au cas de la tension.

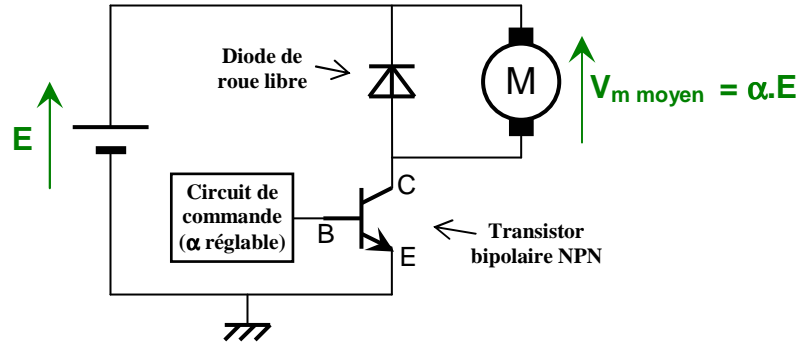
Le courant est donc lissé car le circuit "RL" joue le rôle de filtre passe-bas pour le courant.

Les variations rapides de courant dans les interrupteurs (diodes et transistors) génèrent des perturbations électromagnétiques. Il est donc préférable de placer le hacheur dans une carcasse métallique reliée à la terre (blindage).

6- Utilisation des hacheurs

■ Alimentation et réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu

En utilisant une source de tension fixe, le hacheur est très utilisé pour faire varier la vitesse des moteurs à courant continu à excitation séparée (schéma ci-dessous):

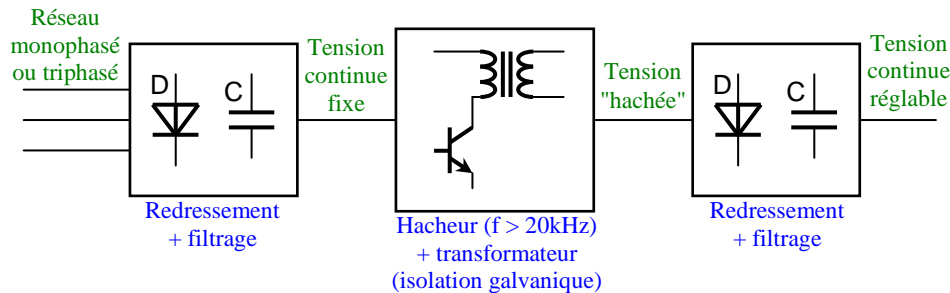


■ Alimentation à découpage des ordinateurs

Les alimentations traditionnelles (alimentations linéaires) utilisent un transformateur encombrant ainsi qu'un régulateur au rendement très moyen.

L'intérêt de l'alimentation à découpage est de ne pas utiliser de transformateur ni de régulateur linéaire.

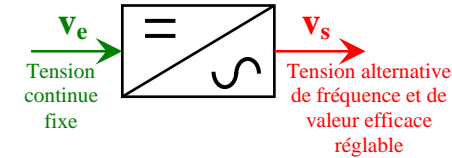
Le principe de fonctionnement est simple; la tension du secteur est directement redressée puis abaissée à l'aide d'un hacheur à inductances couplées (petit transformateur) pour assurer l'isolation galvanique (schéma ci-dessous):



IV- LA CONVERSION CONTINU-ALTERNATIF

1- Généralités

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue.



L'étude se limitera à l'onduleur autonome en pont (commande symétrique, décalée puis MLI) dans lequel les interrupteurs seront supposés parfaits avec une charge inductive.

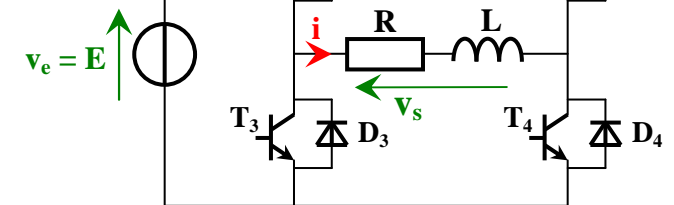
2- L'onduleur en pont à commande symétrique

La structure électrique est identique à celle du hacheur en pont et la commande se fait avec le rapport cyclique $\alpha = 0,5$.

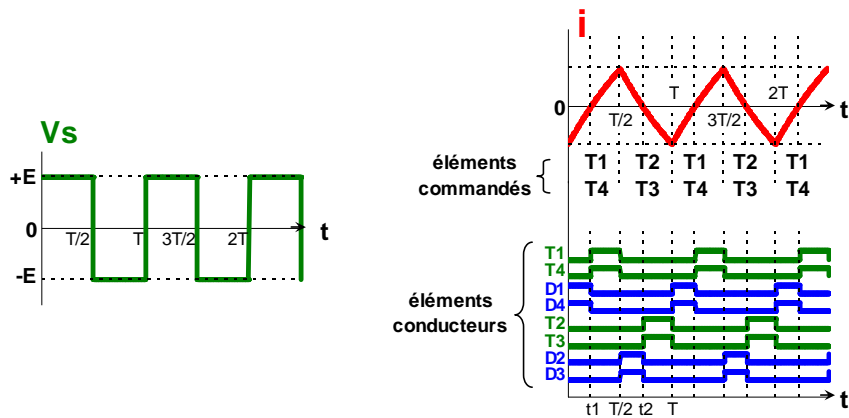
■ Schéma

La commande des interrupteurs (transistors) respecte l'ordre suivant :

- de 0 à $T/2$: T_1 et T_4 fermés
 T_2 et T_3 ouverts
- de $T/2$ à T : T_1 et T_4 ouverts
 T_2 et T_3 fermés



■ Chronogrammes



■ Analyse des chronogrammes pour $0 \leq t < T$:

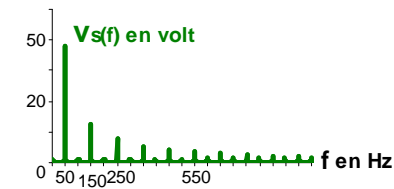
- de 0 à t_1 : T_1 et T_4 sont commandés,
 $\Rightarrow v_s = +E$ donc i augmente mais est encore négatif
 \Rightarrow le courant passe donc par les diodes D_1 et D_4
 C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).
- de t_1 à $T/2$: T_1 et T_4 sont toujours commandés,
 \Rightarrow le courant i est devenu positif
 \Rightarrow les transistors T_1 et T_4 sont conducteurs (D_1 et D_4 se bloquent).
 C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).
- de $T/2$ à t_2 : T_2 et T_3 sont commandés,
 $\Rightarrow v_s = -E$ donc i diminue mais est encore positif
 \Rightarrow le courant passe donc par les diodes D_2 et D_3 .
 C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).
- de t_2 à T : T_2 et T_3 sont toujours commandés,
 \Rightarrow le courant i est devenu négatif
 \Rightarrow les transistors T_2 et T_3 sont conducteurs (D_2 et D_3 se bloquent).
 C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

■ Etude spectrale

On est dans le cas d'un signal de sortie de type "alternatif" et si possible, proche d'une sinusoïde. **Les fréquences autres que le fondamental (harmonique 1) seront non désirables.**

Analysons le spectre de la tension de sortie v_s et du courant i :

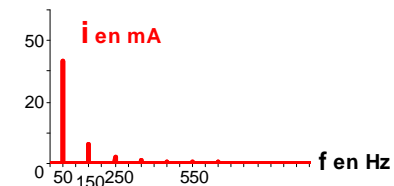
Spectre de v_s pour $E = 30V$ et $f = 50Hz$



On constate que la tension v_s ne possède pas de composante continue mais un fondamental (50Hz) d'amplitude 35V.

Par contre, v_s présente de nombreux harmoniques (150Hz; 250Hz ...) d'amplitudes non négligeables, ce qui est **très éloigné d'un signal sinusoïdal pur**.

**Spectre de i pour
 $E = 30V$; $f = 50Hz$; $R = 1k\Omega$ et $L = 2H$**



On constate que le courant i ne possède pas de composante continue mais un fondamental (50Hz) d'amplitude 35mA.

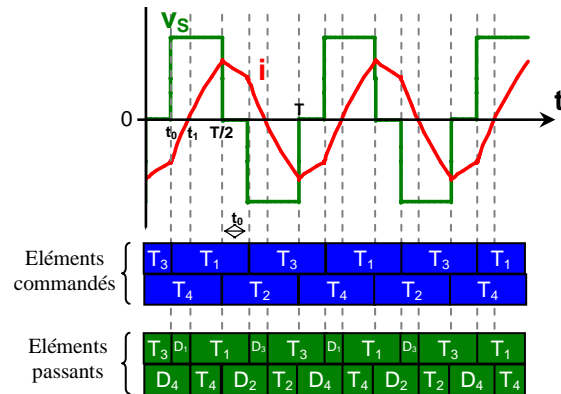
Par contre, i présente de nombreux harmoniques (150Hz; 250Hz ...) d'amplitudes plus faibles que pour la tension, on est donc **plus proche d'un signal sinusoïdal pur**.

Le circuit "RL" joue le rôle d'un filtre passe-bas (atténuation des hautes fréquences du courant).

Les variations rapides de courant dans les interrupteurs (diodes et transistors) génèrent des perturbations électromagnétiques et le fondamental est lui aussi perturbateur de l'environnement électromagnétique.

3- L'onduleur en pont à commande décalée

La structure électrique est identique à celle de l'onduleur en pont à commande symétrique. La commande des transistors présente un **décalage de durée t_0** (chronogrammes ci-dessous):



■ Analyse des chronogrammes pour $0 \leq t < T$:

- de 0 à t_0 : T₃ et T₄ sont commandés,
 $\Rightarrow v_s = 0V$ donc i tend vers 0 mais est encore négatif
 \Rightarrow le courant passe donc par T₃ et D₄
 C'est la **phase de roue libre** (l'énergie est dissipée dans la résistance).
- de t_0 à t_1 : T₁ et T₄ sont commandés,
 $\Rightarrow v_s = +E$ donc i augmente mais est encore négatif
 \Rightarrow le courant passe donc par les diodes D₁ et D₄
 C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).
- de t_1 à $T/2$: T₁ et T₄ sont toujours commandés,
 \Rightarrow le courant i est devenu positif
 \Rightarrow les transistors T₁ et T₄ sont conducteurs (D₁ et D₄ se bloquent).
 C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).
- de $T/2$ à $T/2+t_0$: T₁ et T₂ sont commandés,
 $\Rightarrow v_s = 0V$ donc i tend vers 0 mais est encore positif
 \Rightarrow le courant passe donc par T₁ et T₂
 C'est la **phase de roue libre** (l'énergie est dissipée dans la résistance).
- de $T/2+t_0$ à $T/2+t_1$: T₃ et T₂ sont commandés,

- $\Rightarrow v_s = -E$ donc i diminue mais est encore positif
- \Rightarrow le courant passe donc par les diodes D₂ et D₃.
- C'est la **phase de récupération** (l'énergie est renvoyée vers la source).

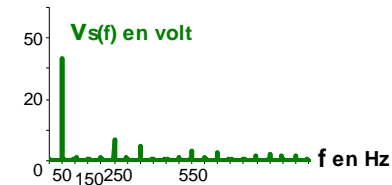
- de $T/2+t_2$ à T : T₃ et T₂ sont toujours commandés,
 \Rightarrow le courant i est devenu négatif
 \Rightarrow les transistors T₂ et T₃ sont conducteurs (D₂ et D₃ se bloquent).
 C'est la **phase d'alimentation** (l'énergie est fournie par la source).

■ Etude spectrale

On est toujours dans le cas d'un signal de sortie de type "alternatif" et si possible, proche d'une sinusoïde. **Les fréquences autres que le fondamental (harmonique 1) seront non désirables.**

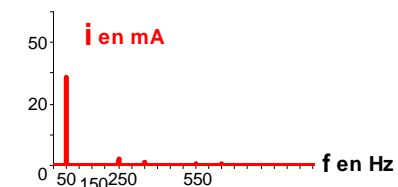
Analysons le spectre de la tension de sortie v_s et du courant i pour un **décalage de 60°** :

Spectre de v_s pour $E = 30V$ et $f = 50Hz$



On constate une amélioration par rapport à la commande décalée : l'harmonique 3 (150Hz) a disparu. C'est une particularité de la commande décalée de 60° .

Spectre de i pour $E = 30V$; $f = 50Hz$; $R = 1k\Omega$ et $L = 2H$



Les harmoniques indésirables du courant seront plus facile à filtrer car elles commencent à 250Hz.

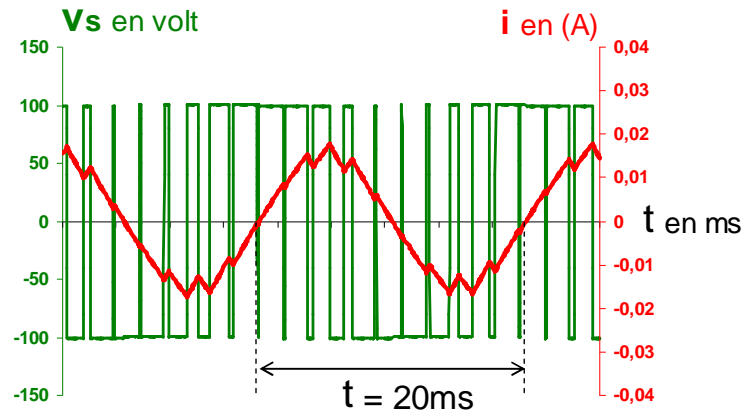
La commande décalée de 60° est une première amélioration pour l'onduleur en pont (**disparition de l'harmonique 3**).

4- L'onduleur en pont à commande MLI

La structure électrique est toujours la même (pont à 4 transistors et 4 diodes). La commande est plus complexe, il s'agit d'une commande symétrique (pas de décalage) présentant un grand nombre de commutations par période avec des ouvertures et des fermetures d'interrupteurs de durées modulées.

La tension de sortie v_s présente alors des "impulsions" de largeurs variables (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Un exemple d'allure de v_s et de i est représentée ci-dessous (on remarque que le courant est presque sinusoïdal):



■ Analyse globale du chronogramme :

- $V_s = +E$: T_3 et T_4 sont commandés
⇒ Le courant augmente exponentiellement (charge RL)

- $V_s = -E$: T_1 et T_2 sont commandés
⇒ Le courant diminue exponentiellement (charge RL)

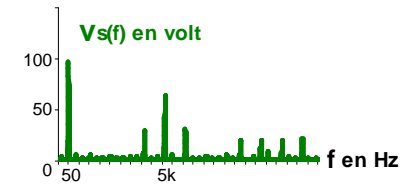
C'est la durée de chaque impulsion qui va permettre au courant d'être le plus sinusoïdal possible.

■ Etude spectrale

On est toujours dans le cas d'un signal de sortie de type "alternatif" et si possible, proche d'une sinusoïde. **Les fréquences autres que le fondamental (harmonique 1) seront non désirables.**

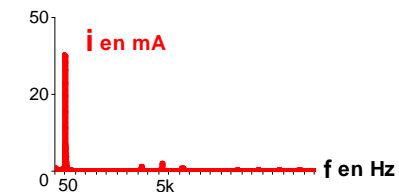
Analysons le spectre de la tension de sortie v_s et du courant i pour une commande MLI avec **10 impulsions par période**:

Spectre de v_s pour $E = 100V$ et $f = 50Hz$



On constate que les harmoniques indésirables sont éloignées en fréquence (5kHz). La tension v_s sera donc facile à filtrer.

Spectre de i pour
 $E = 100V$; $f = 50Hz$; $R = 1k\Omega$ et $L = 2H$



Le spectre nous indique clairement que le courant est très proche d'une sinusoïde. Le récepteur a filtré la tension v_s .

L'intérêt de la commande MLI est d'avoir un courant quasi-sinusoïdal. Cependant, des harmoniques à hautes fréquences sont présentes et peuvent perturber l'environnement électromagnétique.

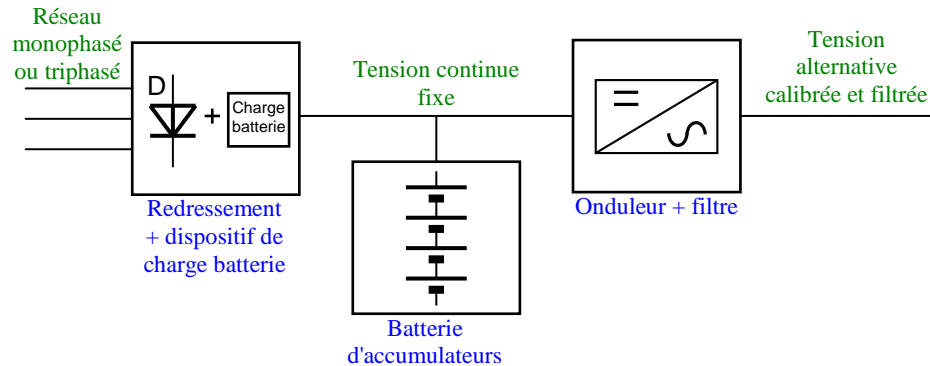
6- Utilisation des onduleurs

■ Onduleur de secours pour le matériel informatique

L'onduleur de secours permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau.

Il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou surtensions).

La structure comprend un accumulateur avec dispositif de charge et un onduleur avec sortie filtrée (schéma ci-dessous):



■ Variation de vitesse des moteurs à courant alternatif

L'intérêt de l'onduleur est de pouvoir produire une tension alternative réglable en amplitude et en fréquence.

La vitesse des moteurs synchrones et asynchrones est directement liée à la fréquence d'alimentation; un onduleur réglable en fréquence permettra donc de faire varier la vitesse de ces moteurs.

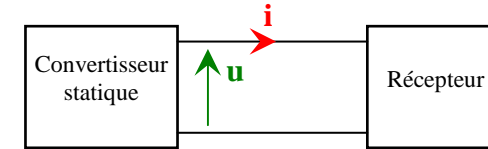
Remarque : Il faut maintenir le rapport $\frac{\text{tension efficace}}{\text{fréquence}}$ constant pour un bon fonctionnement des moteurs.

IV- PUISSANCES DES CONVERTISSEURS

1- Définitions

Considérons un convertisseur statique quelconque relié à un récepteur.

Nous adopterons la convention "générateur" pour le convertisseur et donc la convention "récepteur" pour le récepteur (schéma ci-dessous):



■ Puissance instantanée

La puissance instantanée est, comme en régime continu, définie par le produit "courant \times tension". En principe cette puissance est variable dans le temps.

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

watt (W) volt (V) ampère (A)

Remarque : Si $p > 0$ alors le convertisseur fournit la puissance.

■ Puissance active

La puissance active P (watt) est la valeur moyenne de la puissance instantanée $p(t)$:

$$P = P_{\text{moyen}} = \langle u(t) \times i(t) \rangle$$

Remarque : Ce n'est qu'en régime sinusoïdal alternatif que l'on a $P = UI \cos \phi$.

■ Puissance apparente

La puissance apparente S est définie par le produit " $U_{\text{eff}} \times I_{\text{eff}}$ ". C'est une grandeur théorique qui sert à dimensionner les générateurs :

$$S = U.I$$

voltampère (VA) volt (V) ampère (A)

■ Facteur de puissance

Dans de nombreux cas, le produit $U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$ présente une forte valeur par rapport à la valeur moyenne P .

Pour évaluer ce phénomène, on définit le **facteur de puissance k** ($k < 1$):

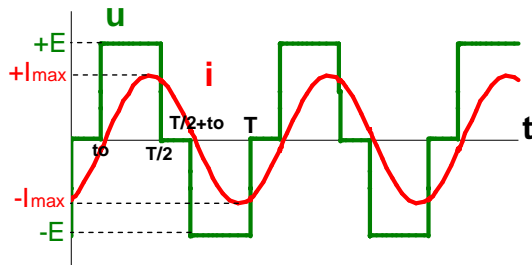
$$k = \frac{\langle u(t) \cdot i(t) \rangle}{U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}} \quad \text{soit} \quad \boxed{k = \frac{P}{S}}$$

Remarques : Pour un mauvais facteur de puissance (k proche de 0), le courant I peut devenir très élevé.

Ce n'est qu'en régime sinusoïdal que l'on a $k = \cos\phi$.

2- Etude d'un exemple

Considérons l'exemple d'un onduleur à commande décalée et déterminons, par le calcul, quelques valeurs relatives aux puissances :



■ U_{moyen} et I_{moyen}

Un calcul n'est pas utile pour en déduire que $U_{\text{moyen}} = 0V$ et que $I_{\text{moyen}} = 0A$; ce qui est normal car on est dans le cas d'un onduleur avec des signaux alternatifs.

■ U_{eff}

$$U_{\text{eff}} = U = \sqrt{\frac{E^2 (T/2 - t_0) + (-E)^2 (T - (T/2 + t_0))}{T}} = \sqrt{\frac{2E^2 (T/2 - t_0)}{T}}$$

soit $\boxed{U = E \sqrt{1 - \frac{2t_0}{T}}}$.

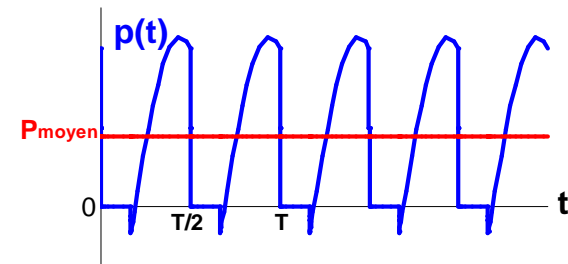
■ I_{eff}

Le courant paraît sinusoïdal alternatif donc $\boxed{I_{\text{eff}} = I = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}}$.

■ Puissance active

Le calcul de la puissance active (puissance moyenne) est rarement possible car la courbe ne présente pas de forme simple (carré, sinus ...)

La puissance active s'évalue graphiquement en déterminant la valeur moyenne de $p(t)$.



■ Facteur de puissance

Le facteur de puissance se déduit des calculs précédents :

$$k = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P_{\text{moyen}}}{E \sqrt{1 - \frac{2t_0}{T}} \cdot \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}} \quad \text{donc} \quad k = \frac{P_{\text{moyen}}}{E \sqrt{1 - \frac{2t_0}{T}} \cdot \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}}}$$

Remarques : Ce résultat de valeur de k n'est qu'un exemple. La valeur de k dépend de l'onduleur mais aussi de la charge.