

# ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE -DU COMPOSANT AU VARIATEUR-

<b>1 -À quoi ça sert ?</b> .....	<b>2</b>
<b>2 -Les Composants</b> .....	<b>3</b>
2.1 -Les interrupteurs statiques.....	3
Diode.....	3
Thyristor.....	4
Transistors.....	4
2.2 -Les « stockeurs » d'énergie.....	6
<b>3 -Les convertisseurs</b> .....	<b>7</b>
3.1 -Convertisseurs AC/DC : redresseurs.....	7
3.2 -Convertisseurs DC/DC : hacheurs.....	7
3.3 -Convertisseurs DC/AC : onduleurs.....	8
3.4 -Convertisseurs AC/AC : gradateurs.....	8
<b>4 - Les variateurs</b> .....	<b>10</b>
4.1 -Les Mcc et les Mcs.....	10
4.2 -Les Variateurs de vitesse.....	10
<b>5 -Étudier un convertisseur : ce que l'on cherche</b> .....	<b>12</b>



# 1 - À QUOI ÇA SERT ?

Les premiers redresseurs et les premiers transistors étaient fabriqués à partir de « lampes ». Ces composants sont fragiles, énergivores et nécessitent une alimentation haute tension : il faut donc un transformateur bt/HT d'alimentation, qui augmente considérablement le poids.

L'apparition des semi-conducteurs au silicium (diode, transistor, amplificateur opérationnel, thyristor) au tournant de la seconde guerre mondiale a permis le développement de l'électronique, de l'informatique et de l'électronique de puissance.

Les « semi conducteurs » sont des matériaux fabriqués principalement à base de Silicium. Ces matériaux sont normalement des isolants, mais à grâce à un traitement (« dopage » positif et négatif) ils deviennent conducteurs à partir d'une tension de l'ordre de 0,7V.

Les montages d'électronique de puissance permettent d'alimenter à partir du réseau électrique les différents moteurs (Mcc, MS, MAS) : ce sont des convertisseurs d'énergie électrique.

Le contrôle du moteur par la commande du convertisseur nous permet de réaliser un variateur de vitesse. Avec un variateur de vitesse, on est capable de piloter dans n'importe quelle condition le moteur, quel que soit son type.

Mais selon le type de moteur, le contrôle de celui ci est plus ou moins difficile.

## 2 -LES COMPOSANTS.

Quel que soit le convertisseur, on retrouve 2 types de composants :

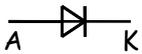
- Les interrupteurs statiques qui permettent de laisser passer ou de bloquer le courant, sans qu'il y ait de mouvement mécanique (d'où l'adjectif « statique »).
- Les « stockeurs » d'énergie qui fournissent l'énergie à la charge lorsque les interrupteurs sont ouverts. Évidemment lorsque l'interrupteur est fermé, le « stockeur » se recharge.

### 2.1 - LES INTERRUPTEURS STATIQUES.

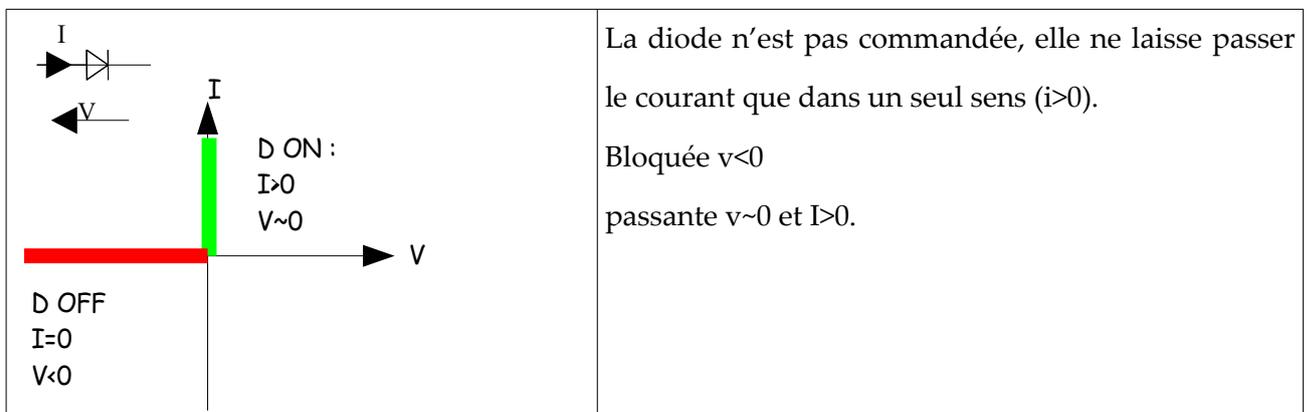
Il y a 3 types :

- ceux non commandés : diodes
- ceux commandés uniquement à la fermeture : thyristors
- ceux commandés à l'ouverture et à la fermeture : transistors et thyristors à GTO (Gate Turn Off).

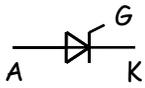
#### **DIODE.**



- La diode a été le premier semi conducteur fabriqué.



**THYRISTOR.**



➤ Le thyristor a été le premier interrupteur statique commandé de forte puissance (1000V - 1000A).

<p>Th ON  <math>I &gt; 0</math>  <math>V \sim 0</math></p> <p>Comm ON :  <math>I_G + V &gt; 0</math></p> <p>Th OFF  <math>I = 0</math>  <math>V &gt; 0</math> ou <math>V &lt; 0</math></p>	<p>On ne commande le thyristor qu'à la fermeture.</p> <p>La fermeture d'un thyristor est provoqué par une impulsion de courant envoyée sur sa gâchette G et il faut alors que <math>v &gt; 0</math>.</p> <p>Passant <math>v \sim 0</math> et <math>i &gt; 0</math></p> <p>L'ouverture se fait automatiquement lorsque le courant <math>i</math> s'annule</p> <p>bloqué on peut avoir <math>v &gt; 0</math> ou <math>v &lt; 0</math>.</p>
--	--

Le thyristor à GTO est aussi commandable à l'ouverture. C'est un interrupteur de forte puissance (1000V 1000A) mais la fréquence de commutation est faible (<500Hz).

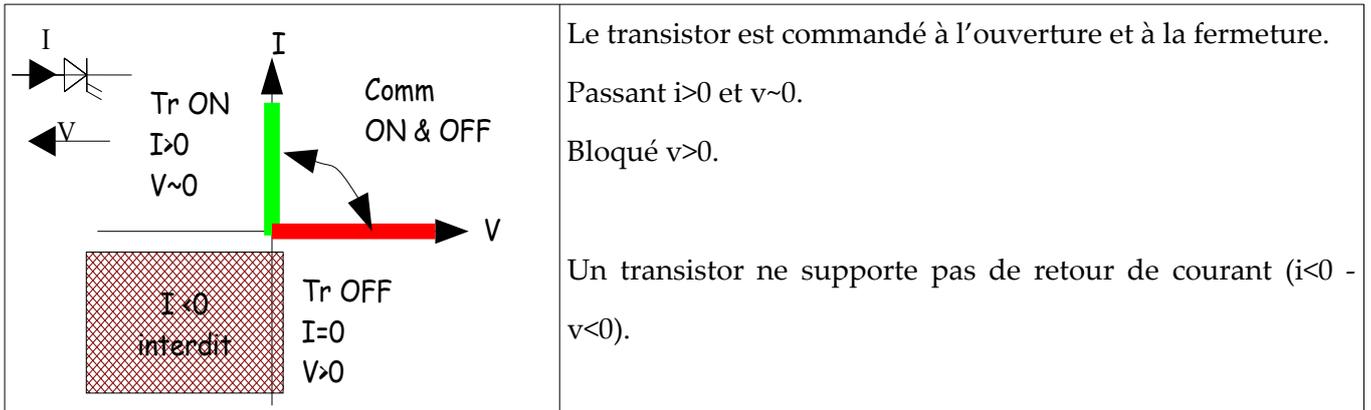
**TRANSISTORS.**



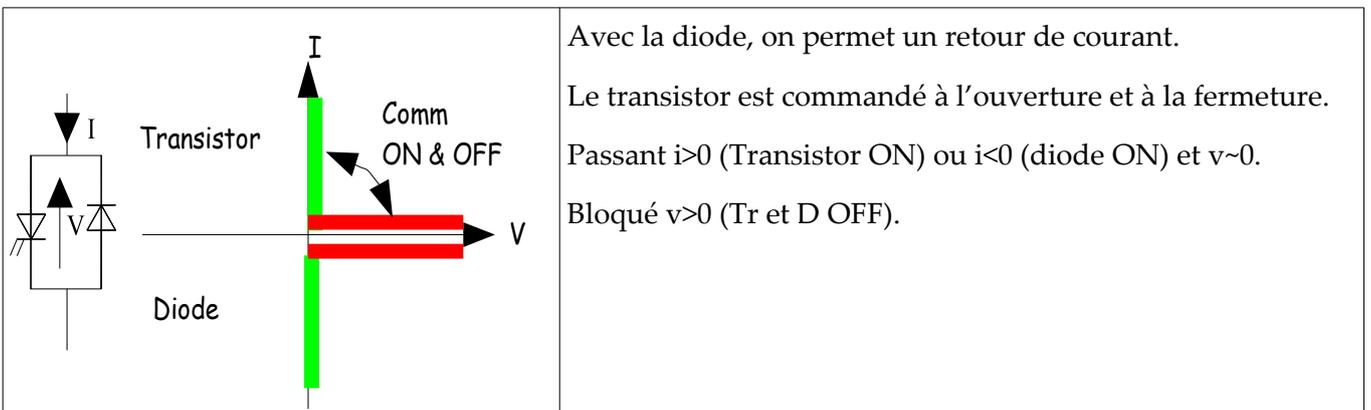
➤ Il y a 3 technologies de transistors de puissance : bipolaire, MOS et IGBT.

Le transistor bipolaire a été le premier utilisé. Actuellement on utilise des transistors MOS pour les petites puissances et des IGBT pour les puissances plus fortes.

transistor bipolaire	transistor MOSFET	transistor IGBT
<p>La commande est un courant envoyé sur sa base.</p> <p>Le courant collecteur est proportionnel au courant de base.</p>	<p>Le transistor MOSFET se commande en tension.</p> <p>À l'état bloqué, il se comporte comme un condensateur <math>C_{DS}</math>.</p> <p>À l'état passant, il se comporte comme une résistance <math>R_{DS}</math>.</p>	<p>Le transistor IGBT combine les avantages de la commande en tension d'un transistor MOS et de la faible tension à l'état passant d'un transistor bipolaire.</p>



Pour les protéger, on place en anti-parallèle une diode de protection.





## 2.2 - LES « STOCKEURS » D'ÉNERGIE.

Les stockeurs d'énergie vont permettre de lisser soit la tension, soit le courant. Ce sont donc des condensateurs, des bobines ou des transformateurs.

Le condensateur permet de lisser la tension à ses bornes.

Si on note  $U$  la tension à ses bornes, l'énergie électrostatique qu'il a stockée a pour expression :

$$\Delta W = \frac{1}{2} C U^2 .$$

La bobine permet de lisser le courant qui la traverse.

Si on note  $I$  le courant la traversant, l'énergie magnétique qu'elle a stockée a pour expression :

$$\Delta W = \frac{1}{2} L I^2 .$$

Les transformateurs sont utilisés dans les alimentations à découpage isolées, ils permettent à la fois de stocker de l'énergie magnétique et d'adapter les niveaux de tension.

La fréquence de fonctionnement étant élevée (>kHz), pour limiter les pertes fer, on utilise des transformateurs spécialisés haute fréquence.

Pour augmenter l'énergie magnétique stockée dans le transformateur, on place un entrefer dans le noyau.

Les convertisseurs fonctionnant en régime périodique, les stockeurs d'énergie ne peuvent pas accumuler d'énergie : ils stockent de l'énergie pendant une phase de fonctionnement puis la restitue pendant une autre phase.

La variation d'énergie est donc nulle sur une période en régime permanent :  $\Delta W_C = \Delta W_L = 0$  .

Ce qui implique que :

$$\langle i_C \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \left( C \frac{du_C}{dt} \right) dt = 0 \quad \text{Le courant moyen dans un condensateur est nul.}$$

$$\langle u_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \left( L \frac{di_L}{dt} \right) dt = 0 \quad \text{La tension moyenne aux bornes d'une bobine est nulle.}$$



## 3 - LES CONVERTISSEURS.

Les différents convertisseurs permettent, à partir de la tension réseau, de fournir le courant et/ou la tension demandés par une charge. Leur commande permet de contrôler la puissance échangée entre le réseau et la charge.

### 3.1 - CONVERTISSEURS AC/DC : REDRESSEURS.

La tension d'entrée est la tension réseau (sinusoïde de fréquence fixe).

Les ponts sont constitués de diodes (ponts non commandés) et/ou de thyristors (ponts commandés).

On distingue les ponts redresseurs à lissage capacitif (avec un condensateur en parallèle à la charge) et ceux à lissage inductif (inductance en série avec la charge).

- Les ponts à lissage capacitif permettent d'obtenir une tension continue avec un faible taux d'ondulation.
  - On trouve ce type de pont dans les alimentations continues pour circuits électroniques (alimentation linéaire ou alimentation à découpage).
  - On trouve ce type de pont en tête dans les variateurs pour Mcc à hacheur et dans les variateurs pour MS ou MAS.
- Les ponts à lissage inductif permettent d'alimenter une charge par un courant quasi-constant : on l'utilise donc pour l'excitation et/ou l'induit d'une Mcc, et pour l'excitation d'une MS.  
Ce type de pont peut être commandé ou non.  
Dans les ponts commandés, en jouant sur l'angle de retard à l'amorçage, on modifie la valeur moyenne de la tension de sortie du pont.

### 3.2 - CONVERTISSEURS DC/DC : HACHEURS.

La tension d'entrée est constante, elle est « hachée » par des transistors pour donner une tension de sortie rectangulaire.

En jouant sur le rapport cyclique, on modifie la valeur moyenne de la tension de sortie.

Les hacheurs sont utilisés pour alimenter les Mcc et dans les alimentations à découpage.



### 3.3 - CONVERTISSEURS DC/AC : ONDULEURS.

La tension d'entrée est constante, elle est hachée pour donner une *tension de sortie obligatoirement alternative*.

La structure d'un onduleur est donc la même que celle d'un hacheur (pont à transistors) mais :

- la tension de sortie est alternative
- la commande permet de modifier la fréquence de hachage et non pas le rapport cyclique (qui doit être globalement de 50 %)
- la fréquence de base peut être plus basse (50Hz au lieu de quelques kHz)
- le découpage de la tension de sortie est plus compliqué (type MLI par exemple)

Les onduleurs assistés fonctionnent à fréquence fixe pour alimenter une charge en cas de défaillance du réseau.

Les onduleurs autonomes fonctionnent à fréquence variable et sont utilisés pour modifier la vitesse des Mcs, ou dans les systèmes de chauffage par induction.

### 3.4 - CONVERTISSEURS AC/AC : GRADATEURS.

La tension d'entrée est celle du réseau, la tension de sortie est alternative. Le gradateur est constitué de 2 thyristors montés tête bêche (« triac »).

On utilise 2 commandes pour gradateurs : à angle de phase et à train d'ondes.

**La commande à angle de phase** permet de modifier la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge.

- Ce type de commande permet de réaliser des variateurs de lumière ou des compensateurs statiques de puissance réactive.
- On trouve ce type de gradateurs dans les démarreurs pour MAS. Ils permettent de limiter le courant de démarrage mais ils *ne modifient pas* la vitesse du moteur.

**La commande à trains d'onde** permet de modifier la puissance envoyée à la charge.

- Ce type de commande est utilisé dans les systèmes de chauffage.

Dans les premiers types de variateurs de vitesse pour MAS, les gradateurs ont permis de concevoir les « cyclo-convertisseurs » qui permettent d'obtenir des vitesses sous multiple de la vitesse de synchronisme  $n = n_s / 2^k$ .



## 4 - LES VARIATEURS.

### 4.1 - LES MCC ET LES MCS.

Il y a 2 catégories de moteur électrique : les machines à courant continu (Mcc) et les machines à courant sinusoïdal (MS et MAS).

Les Mcc pour fonctionner ont besoin d'un courant continu.

Les champs magnétiques dans cette machine sont de direction fixe.

Comme l'angle entre les champs magnétiques inducteur et induit est de  $90^\circ$  en permanence, le couple développé est optimal, il ne dépend que du courant absorbé par l'induit et permet à cette machine de ne jamais câler, juste de ralentir.

La vitesse est réglée par la tension moyenne d'induit

Les Mcs pour fonctionner ont besoin d'un courant sinusoïdal. Ce sont des machines à champ tournant, leur vitesse est donc réglée par la fréquence de la tension stator.

L'angle entre ces champs dépend de la charge, ces machines peuvent donc câler en cas de surcharge.

### 4.2 - LES VARIATEURS DE VITESSE.

J'ai décidé de qualifier de « variateur de vitesse » une alimentation moteur qui répond au cahier des charges suivant :

1. Le variateur doit *protéger la machine* : il doit surveiller et limiter le courant arrivant dans la machine et surveiller la température à l'intérieur de la machine.
2. Le variateur doit permettre de *contrôler les phases de démarrage et de freinage* de la machine (par contrôle du courant et du couple)
3. Le variateur doit permettre de *contrôler la stabilité de la machine* : si la machine est trop chargée, elle doit ralentir, et surtout pas câler même si c'est une Mcs (contrôle de la position des champs magnétiques).
4. Enfin l'association {variateur de vitesse + machine} doit être, du point de vue mécanique, un *moteur « idéal »* : dans les limites de la machine, on doit être capable d'obtenir *n'importe quel couple à n'importe quelle vitesse*. (contrôle du couple et de la vitesse)

Avec un « vrai variateur de vitesse » on doit pouvoir faire du pilotage en vitesse, en couple ou du positionnement.

*Au contraire avec un variateur de fréquence, on ne peut régler que la valeur de la fréquence d'alimentation stator, on ne règle pas la vitesse, encore moins le couple.*

Pour une consigne de vitesse, la caractéristique mécanique de l'association est une droite verticale ( figure 1) : lorsqu'on charge le moteur, la vitesse ne doit pas changer.

*Au contraire avec un variateur de fréquence, lorsqu'on charge le moteur, la vitesse diminue.*

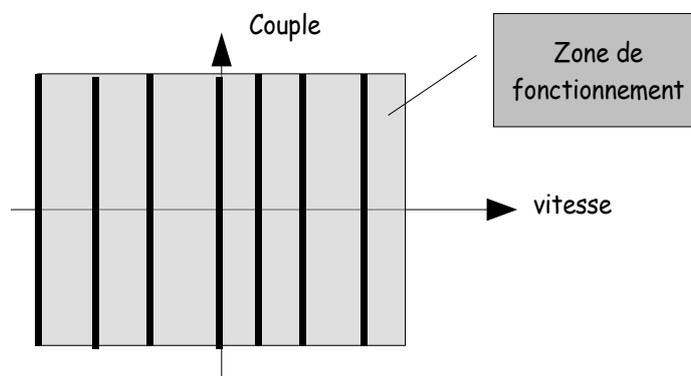


figure 1: Caractéristique mécanique d'un moteur « idéal »

En particulier la machine doit être capable d'avoir un couple à vitesse nulle : on pourra donc faire du positionnement.

Pour faire du positionnement, plus on s'approche de la position de consigne, plus on doit ralentir le moteur – mais sans qu'il ne câle.

*Au contraire avec un variateur de fréquence, le moteur n'est pas capable de fournir un couple à vitesse nulle.*

Avec un variateur 4 quadrants, la caractéristique mécanique en fonctionnement moteur se prolongera en fonctionnement génératrice.

En fonctionnement génératrice, la machine agira comme un frein, ce qui nous permettra de contrôler la phase de freinage.

Pour fonctionner dans les 4 quadrants, un variateur « classique » (équipé d'un pont de diodes coté réseau) doit avoir une résistance de freinage.

Dans les nouveaux variateur 4 quadrants, on a remplacé le pont de diodes par un onduleur, il n'y a plus besoin de résistance de freinage pour le fonctionnement en génératrice : l'énergie électrique est renvoyée proprement sur le réseau.



## 5 -ÉTUDIER UN CONVERTISSEUR : CE QUE L'ON CHERCHE.

Lorsqu'on étudie un convertisseur, on recherche :

- les chronogrammes des tensions et courants
- les relations entre les grandeurs d'entrée (valeurs moyennes ou efficaces) et les grandeurs de sortie .

Les chronogrammes nous permettent de dimensionner chacun des composants du convertisseur connaissant :

leur tension max,

leur courant max,

leur pertes pour dimensionner le radiateur (  $\Delta \theta = R_{th} \times P_{pertes}$  ).

Les relations entrée/sortie nous permettent de déterminer le type de commande à appliquer en fonction des grandeurs à contrôler.

Enfin cette étude nous permet d'évaluer la qualité du courant et des puissances appelés par le convertisseur (TDH\_i ? DPF ? Q? Fp? D?) et la qualité de la tension ou du courant envoyé à la charge.