

# DC24 MODULATEURS ET INTERRUPTEURS STATIQUES



Table des matières

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>LES INTERRUPTEURS STATIQUES :</b> .....	<b>3</b>
2.1	La diode : .....	4
2.2	Le thyristor : .....	4
2.3	Le transistor bipolaire : .....	5
2.4	Le triac : .....	5
2.5	Thyristors GTO : .....	5
2.6	Transistors MOS : .....	6
2.7	Transistors IGBT : ( Insulated Gate Bipolar Transistor).....	6
2.8	Comparaison rapide : .....	6
<b>3</b>	<b>PROTECTION DES INTERRUPTEURS STATIQUES</b> .....	<b>7</b>
3.1	Le $I^2t$ ou contrainte thermique de l'interrupteur statique : .....	7
3.2	Refroidissement des interrupteurs statiques : .....	7

# 1 INTRODUCTION

L'éventail des modulateurs permettant, dans la pratique, la transformation d'énergies diverses pour obtenir de l'énergie électrique est peu étendu, surtout dans le domaine des fortes puissances.

On trouve principalement l'énergie sous forme

- continue : batteries d'accumulateurs, génératrices continues
- alternative : alternateurs synchrones à fréquence fixe ( 50 Hz en Europe ).

Or, de nombreux dispositifs nécessitent l'utilisation de l'énergie électrique sous des formes plus diverses :

- tension variable en continu ou alternatif;
- fréquence variable en alternatif.

*Exemple : Transport ferroviaire :*

*En traction urbaine ( trolleybus, tramways, métros ) les matériels sont en général alimentés sous une tension continue de 600 ou 750V.*

*Mais en grande traction, les réseaux sont variés : continu 1500V aux Pays-Bas; continu 3000V en Belgique, Italie, Espagne;*

*monophasé alternatif 25kV 50Hz ( réseau SNCF ); monophasé alternatif 15kV 16,6Hz (Allemagne, Suisse, Autriche ).*

*Lorsque les matériels sont destinés à rouler sur plusieurs réseaux, cette diversité oblige à les concevoir en conséquence. Ainsi en France, tous les matériels SNCF récents ( TGV et motrices ) sont bicourants pour pouvoir circuler sur l'ensemble du réseau. Les TGV-SE qui passent en Suisse sont tricourants. Le TGV TransManche est tricourant pour circuler en France (25kV 50Hz), en Belgique(3000V cont) et en Angleterre (750Vcont).*

*Cette nécessité de pouvoir fonctionner avec différentes énergies représente une contrainte importante pour le concepteur qui doit rechercher le meilleur compromis entre coût, masse et encombrement.*

D'où la nécessité de modulateurs d'énergie électrique.

Il existe de nombreuses machines permettant d'apporter des solutions électromécaniques : groupes convertisseurs, commutatrices,...

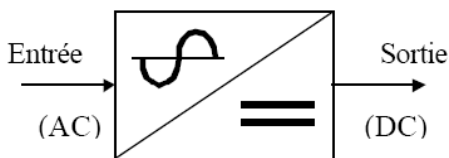
L'utilisation de modulateurs statiques est la solution adoptée grâce aux énormes progrès dans le domaine des composants électroniques et de leur utilisation ( diodes, thyristors, triacs et transistors ), permettant une réduction de masse et d'encombrement. Le rendement est très supérieur à celui obtenu avec des convertisseurs électromécaniques.

*Exemples de domaines d'utilisation des modulateurs statiques :*

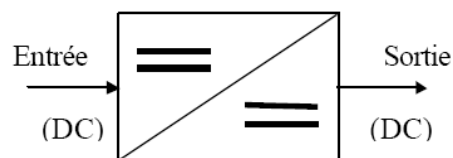
- chargeurs de batterie et alimentations sans coupure
- variateurs de vitesse pour machines asynchrones et synchrones
- variateurs de vitesse pour machines à courant continu
- alimentations à découpage.....

On différencie quatre types de modulateurs :

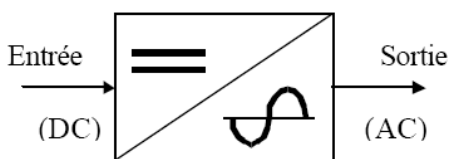
- Modulateur alternatif-continu : redresseur ;
- Modulateur continu-continu : hacheur ;
- Modulateur continu-alternatif : onduleur ;
- Modulateur alternatif-alternatif : c'est un gradateur lorsque seule la valeur efficace de la tension alternative est modifiée, sinon c'est un cycloconvertisseur.



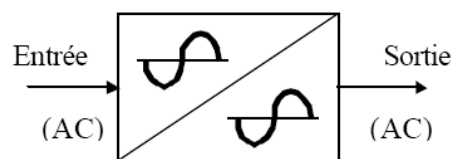
**Convertisseur Alternatif (AC) - Continu (DC)**



**Convertisseur Continu (DC) - Continu (DC)**



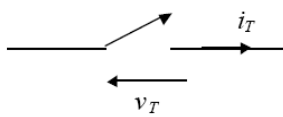
**Convertisseur Continu (DC) - Alternatif (AC)**



**Convertisseur Alternatif (AC) - Alternatif (AC)**

## 2 LES INTERRUPTEURS STATIQUES :

Le principe de ces modulateurs consiste à faire commuter des courants entre mailles adjacentes, ce qui nécessite l'emploi de composants permettant de réaliser la fonction interrupteur.



Pour l'interrupteur fermé :  $U=0$  et  $I \neq 0$  donc  $P = 0$

Pour l'interrupteur ouvert :  $I = 0$  et  $U \neq 0$  donc  $P = 0$

Globalement, les pertes dans le composant seront donc nulles. C'est ce qui est très intéressant et a conduit à l'essor de ce type de composants. Nous utiliserons donc ces composants comme interrupteurs.

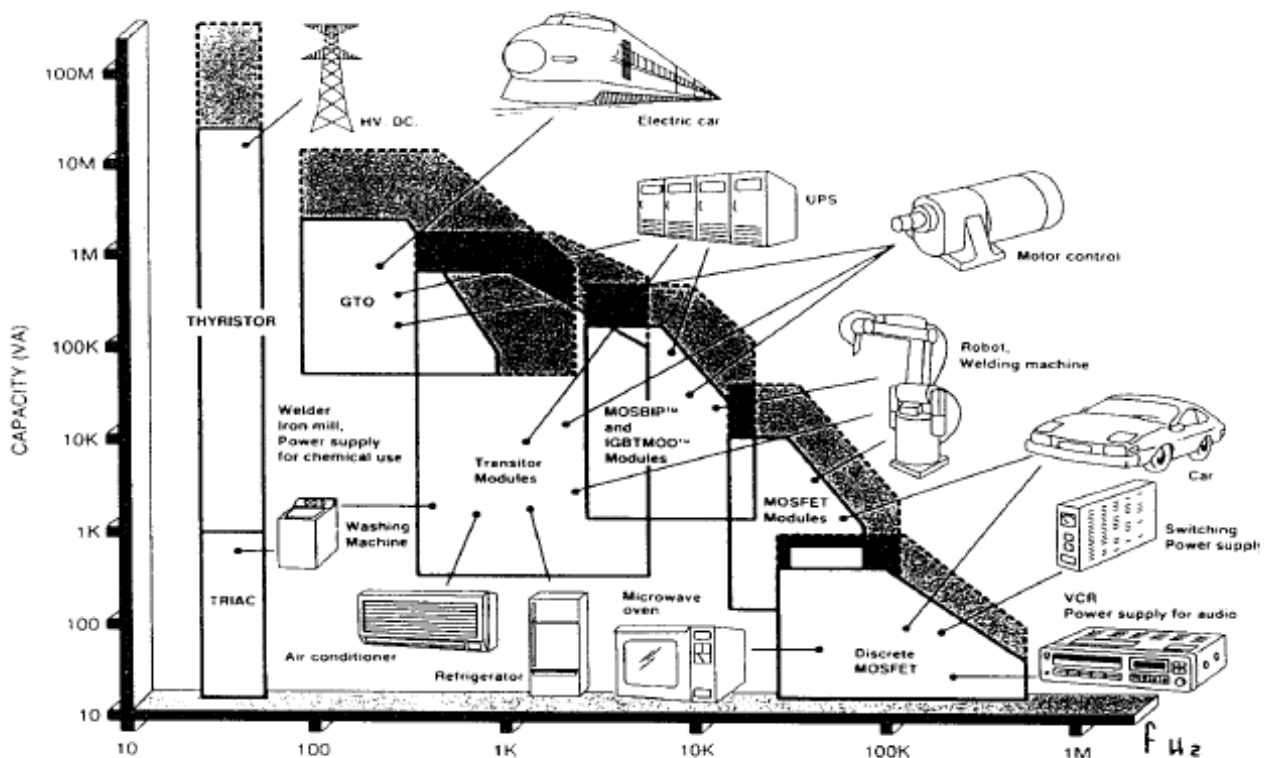
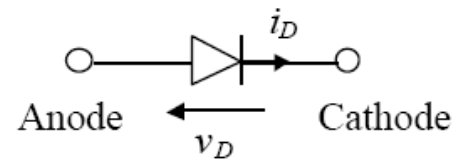
On distinguera les actions (blocage ou amorçage) commandées (grâce à un signal électrique extérieur) des actions spontanées (suite à l'annulation ou au changement de signe d'une tension ou d'un courant par exemple).

La diode est, par exemple, un composant à action spontanée.

La catégorie des interrupteurs commandables inclut de nombreux types de composants :

- Transistors Bipolaires à Jonctions (Bipolar Junction Transistors - BJTs) ;
- Transistors à effet de champ Metal-Oxyde-Semiconducteur (MOSFETs) ;
- Thyristors commandés à l'ouverture (Gate-Turn-Off Thyristors - GTO Thyristors) ;
- Transistors bipolaires à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistors - IGBTs)

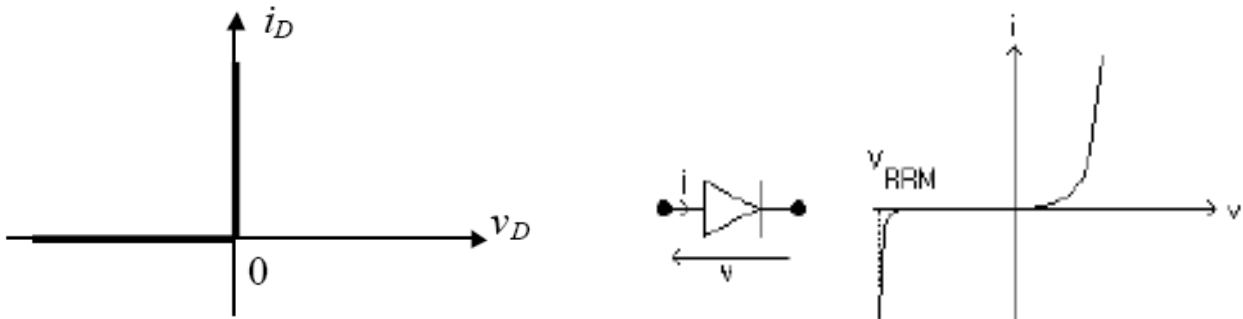
Le choix de l'un ou l'autre de ces interrupteurs électroniques dépend de la gamme de puissance nécessaire ainsi que de la fréquence de commutation nécessaire.



## 2.1 La diode :

Il s'agit d'un composant à amorçage et blocage spontanés. Ce sont des éléments extérieurs ( source et charge) qui vont déterminer son état.

Dans la pratique, pour expliquer le fonctionnement des convertisseurs statiques, nous travaillerons à partir d'une caractéristique idéalisée, sur laquelle on néglige la tension de seuil et la résistance dynamique, et nous supposons que le diode n'est jamais polarisée en inverse au delà de  $V_{RRM}$ . La caractéristique statique idéalisée est alors donnée par les courbes suivantes.



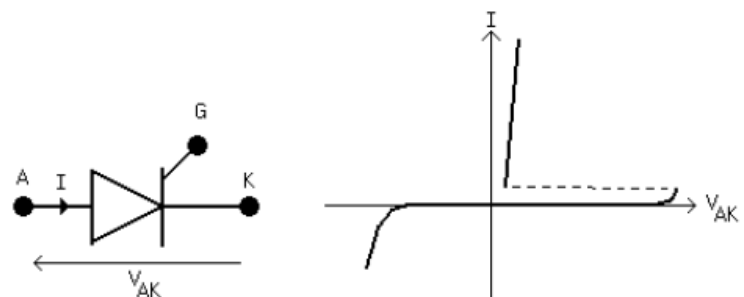
## 2.2 Le thyristor :

Il s'agit d'un interrupteur commandé à l'amorçage mais à blocage naturel (quand le courant s'annule à ses bornes). La conduction est provoquée par l'envoi d'un courant sur une des entrées du composant appelée gâchette.

Il est notamment utilisé dans les redresseurs commandés et les gradateurs.

Le schéma et la caractéristique statique de ce composant sont les suivants :

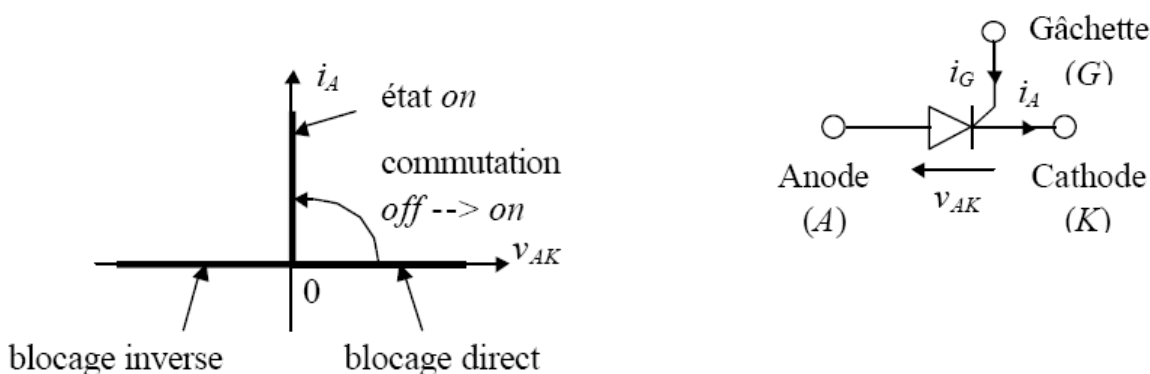
Si le thyristor est bloqué en étant polarisé en direct ( $V_{AK} > 0$ ), l'envoi, dans la gâchette, d'un courant  $i_G$  adapté au composant, permet de déclencher la conduction (la tension  $V_{AK}$  devient faible et le courant augmente en fonction des exigences de l'extérieur).



Si le courant se met à décroître et s'annule, alors, le composant se bloque et il sera nécessaire d'appliquer une autre impulsion sur la gâchette, à un moment où  $V_{AK}$  est positif pour que le thyristor conduise à nouveau.

Il faut noter que, pour que le blocage soit effectif, il faut que le composant reste polarisé en inverse suffisamment longtemps, sinon, le thyristor se réamorçage spontanément. Ce temps minimum, appelé  $t_q$  est un facteur limitant, lorsque l'on veut réaliser des commutations à haute fréquence.

On peut définir une caractéristique statique idéalisée



## 2.3 Le transistor bipolaire :

Il s'agit d'interrupteurs commandés à l'amorçage et au blocage. On les trouve notamment dans les hacheurs.

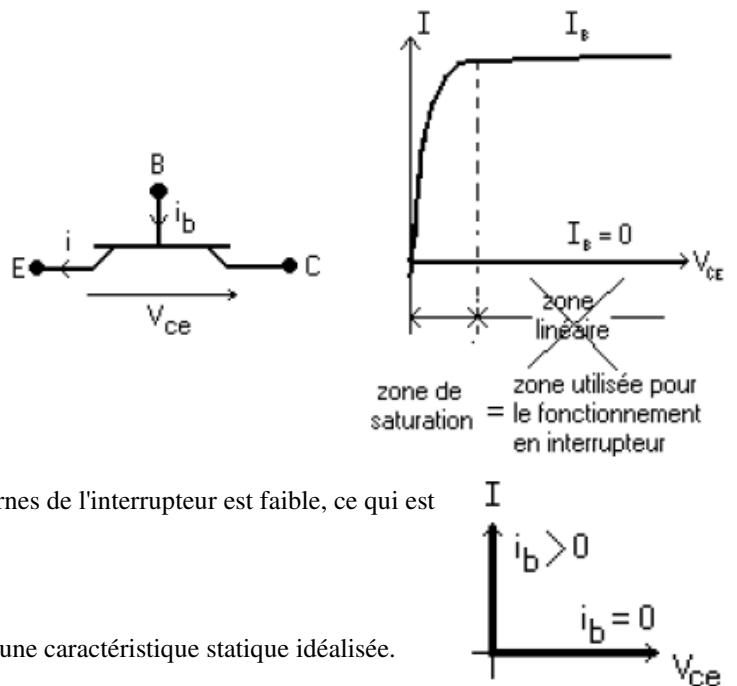
La mise en conduction et le blocage sont commandés par l'intermédiaire du courant de base.

On utilise essentiellement des transistors NPN.

Lorsqu'on l'utilise en commutation et qu'il est passant, le transistor fonctionne dans la zone de saturation.

Lorsque  $I_b$  est nul, le courant d'émetteur reste nul. En revanche, pour un courant de base  $I_b$  positif, on fait en sorte que le transistor fonctionne en zone saturée (cela dépend du courant que l'on cherche à imposer). Alors, la tension aux bornes de l'interrupteur est faible, ce qui est compatible avec ce type de fonctionnement ( $V_{ce} = 0,2V$ )

Pour simplifier, on utilise souvent une caractéristique statique idéalisée.



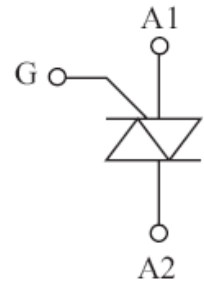
## 2.4 Le triac :

Nous avons déjà étudié le fonctionnement d'un thyristor (fermeture commandée par impulsion sur la gâchette et ouverture naturelle)

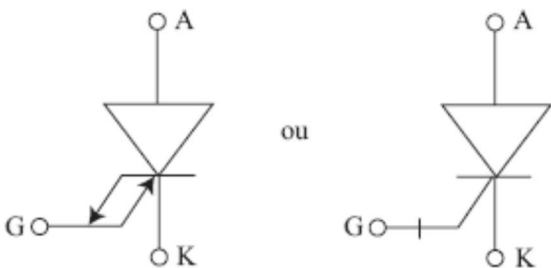
Le triac (TRIode for Alternative Current) est un semi-conducteur de puissance conçu pour fonctionner en interrupteur commandé sur un réseau alternatif.

Suivant le signe de  $V_{A1A2}$  et de  $I_G$ , c'est l'un ou l'autre des deux thyristors équivalents tête-bêche qui sera passant.

Applications du triac : contacteur statique ; circuit de démarrage de moteurs alternatifs ; variateurs de puissance (gradateurs de lumière ou variateurs simples de vitesse)



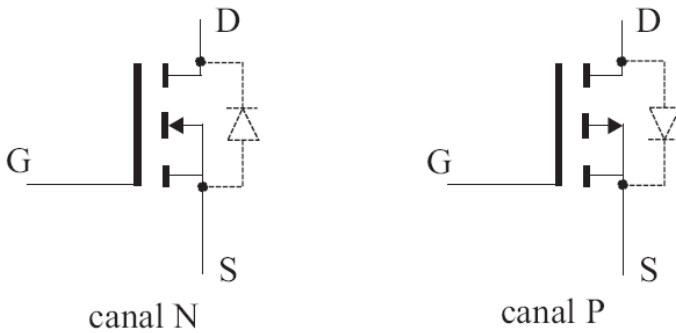
## 2.5 Thyristors GTO :



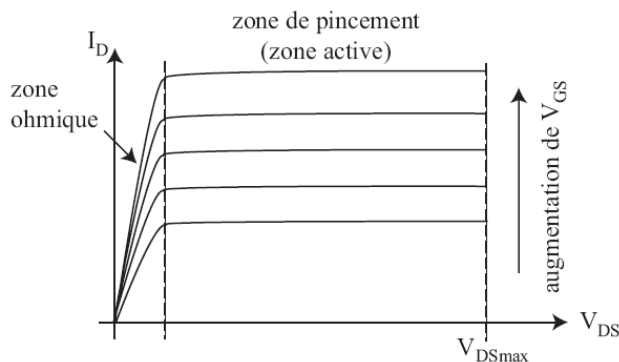
Comme le thyristor, le GTO peut être commandé de l'état *off* à l'état *on* par une impulsion de courant brève appliquée sur la gâchette. Le GTO peut en plus être commandé de l'état *on* à l'état *off* par application d'une tension Gâchette-Cathode négative, créant un fort courant négatif de gâchette. Ce fort courant négatif de gâchette doit seulement être maintenu pendant quelques microsecondes (durant le temps de commutation *on-off*).

La chute de tension à l'état *on* (2 à 3V) aux bornes d'un GTO est supérieure à un thyristor classique. Les temps de commutation pour un GTO sont de l'ordre de quelques microsecondes. De par leur capacité à supporter des tensions importantes (supérieures à 4,5kV) et de forts courants (supérieurs à plusieurs kA), les GTOs sont utilisés dans les applications de très forte puissance à des fréquences allant de quelques centaines de Hz à 10kHz.

## 2.6 Transistors MOS :



Suivant le signe de  $V_{GS}$ , le courant  $I_D$  va pouvoir passer ( interrupteur fermé ) ou pas ( interrupteur ouvert ).



Pour  $V_{DS} \geq 0$  :

- si  $V_{GS} \leq 0$ , pas de courant qui circule entre drain et source car la jonction PN entre la zone N de drain et la zone P est polarisée en inverse donc  $I_D = 0$ ;

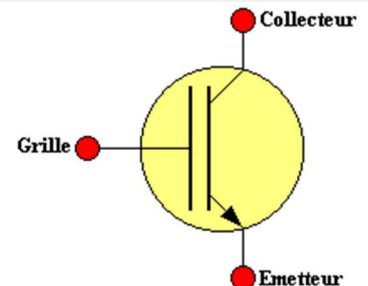
- si  $V_{GS} > 0$ , création du canal N induit à la surface de la zone P, ce canal relie le drain à la source donc  $I_D > 0$ .

Ces transistors se commandent en tension et permettent une fréquence de commutation élevée. Mais les pertes sont importantes car à l'état passant, le MOS est équivalent à une résistance  $R_{DSon}$ .

## 2.7 Transistors IGBT : ( Insulated Gate Bipolar Transistor)

L'IGBT combine les avantages du transistor bipolaire et du MOSFET :

- bipolaire → faibles pertes en conduction mais temps de commutation élevé ;
- MOSFET → temps de commutation faible mais pertes en conduction plus élevées,



## 2.8 Comparaison rapide :



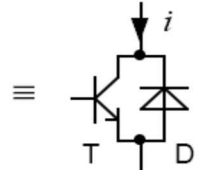

Composant	Puissance d'utilisation	Rapidité de commutation
BJT	Moyen	Moyen
MOSFET	Faible	Rapide
GTO	Fort	Lent
IGBT	Moyen	Moyen
MCT	Moyen	Moyen

Actuellement, l'interrupteur statique le plus employé ( notamment dans les variateurs de vitesse ) est le transistor IGBT, qui combine les avantages du MOS en entrée ( commande en tension ) et du transistor bipolaire en sortie (  $V_{CEsat}$  presque nul ) et permet des plages d'utilisation en puissance et en fréquence élevées.



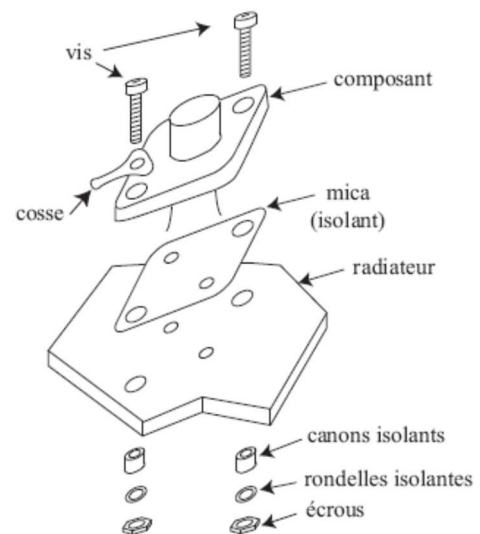
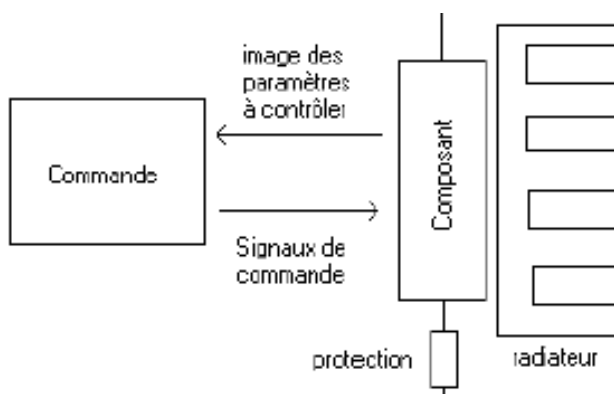
## 2.9 REGLES DE CONDUCTION, CELLULE DE COMMUTATION

La majorité des structures d'onduleur utilisent des interrupteurs commandés associés avec une diode de roue libre en anti parallèle que l'on nomme **CELLULE DE COMMUTATION**.

<p>Les cellules suivent les conditions suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>K ouvert si T non commandé et <math>i &gt; 0</math></b></li> <li>• <b>K fermé si :</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>T commandé et <math>i &gt; 0</math></b></li> <li>○ <b>T non commandé et <math>i &lt; 0</math></b></li> </ul> </li> </ul>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">  <p>Règle de conduction</p> </div> <div style="margin-right: 10px;">  </div> <div>  </div> </div>
 <p>« bras » d'onduleur constitué de 2 cellules de commutation 75A 1200v</p>	

## 3 PROTECTION DES INTERRUPTEURS STATIQUES

Nous venons de nous intéresser à la partie "Silicium" des interrupteurs. Cependant, la fonction interrupteur est beaucoup plus complexe. En effet, elle regroupe le composant lui même, mais aussi la commande, les dispositifs de protection et de dissipation (indispensables à cause des pertes, surtout à fréquence élevée).



### 3.1 Le $I^2t$ ou contrainte thermique de l'interrupteur statique :

C'est une valeur en  $A^2s$  définissant la contrainte thermique de l'interrupteur statique. Si cette valeur est dépassée, le composant se détériore. Afin de protéger l'interrupteur statique (exemple : triac) notamment en cas de court-circuit, il est nécessaire d'utiliser un fusible ultra-rapide ayant un  $I^2t$  inférieur à celui du composant : ainsi c'est bien le fusible qui fondra en premier.

### 3.2 Refroidissement des interrupteurs statiques :

Pourquoi un dissipateur thermique ?

Les semi-conducteurs ont une température de jonction maximale qui est liée au matériau utilisé. Si la température augmente trop, les caractéristiques du composant changent et sa durée de vie diminue. Il est donc nécessaire de refroidir les semi-conducteurs.

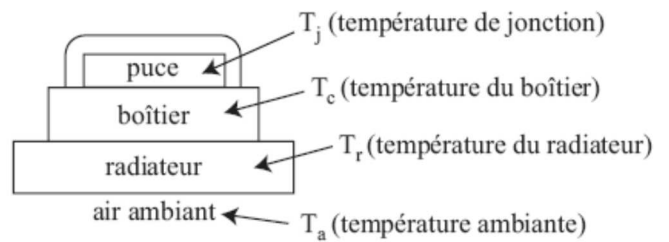
On utilise donc un dissipateur thermique souvent appelé radiateur.

## Dimensionnement d'un radiateur :

Il est important d'avoir une estimation des pertes dans le semi-conducteur ( au niveau de la jonction ) pour dimensionner correctement le dissipateur thermique, qui permettra d'évacuer l'énergie à l'extérieur du composant pour que sa température n'augmente pas trop.

L'évacuation des pertes s'effectue par conduction, par convection et par rayonnement.

modèle thermique :  $\Delta T = R_{th}.P$   
avec P puissance transférée et  $R_{th}$  en  $^{\circ}C/W$



On définit :  $R_{th}$  : résistance thermique

$R_{thjc}$  : résistance thermique jonction-boîtier ( case en anglais ) qui ne dépend que du composant

$R_{thcr}$  : résistance thermique boîtier-radiateur qui dépend du mode de fixation sur le radiateur  
( peut être diminuée par utilisation de graisse aux silicones )

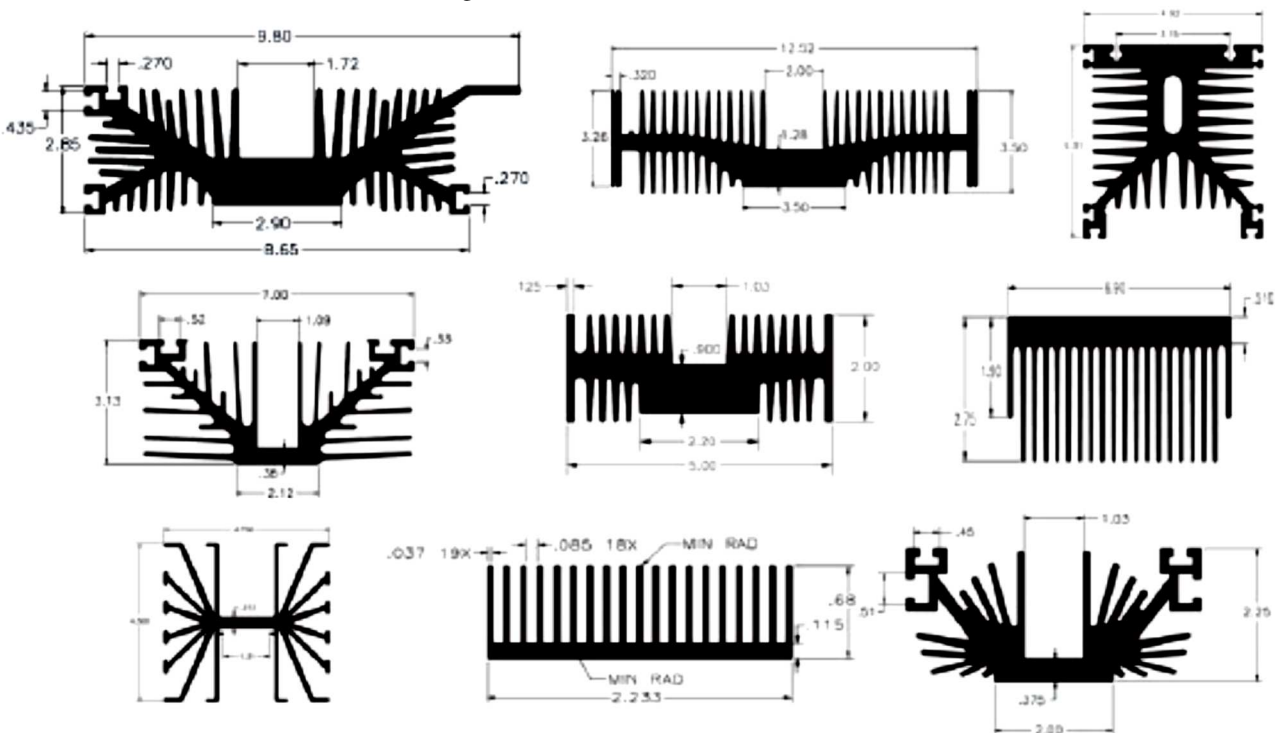
$R_{thra}$  : résistance thermique radiateur-ambiant qui dépend de la forme du radiateur, du type de convection ( naturelle ou forcée )...

Le composant supporte une température de jonction maximale donc on peut déterminer  $\Delta T$  maximum

Puis en appliquant :  $\Delta T = \Sigma R_{th}.P$  on trouve la résistance thermique globale maximale

Puis en utilisant :  $\Sigma R_{th} = R_{thjc} + R_{thcr} + R_{thra}$  on trouve la résistance thermique maximale du radiateur.

On choisit ensuite le radiateur dans un catalogue.



Quand on choisit un interrupteur statique, plusieurs critères sont donc à prendre en compte :

- son type ( lié à la puissance, à la fréquence de commutation nécessaire, à la commande disponible )
- critères électriques : courant moyen ( dépend de la charge ) et tension inverse ( lié au réseau )
- estimation des pertes : résistance dynamique, tension de seuil, tension à l'état passant...
- critères thermiques :  $R_{th}$ , température de jonction maximale pour dimensionner le radiateur.