

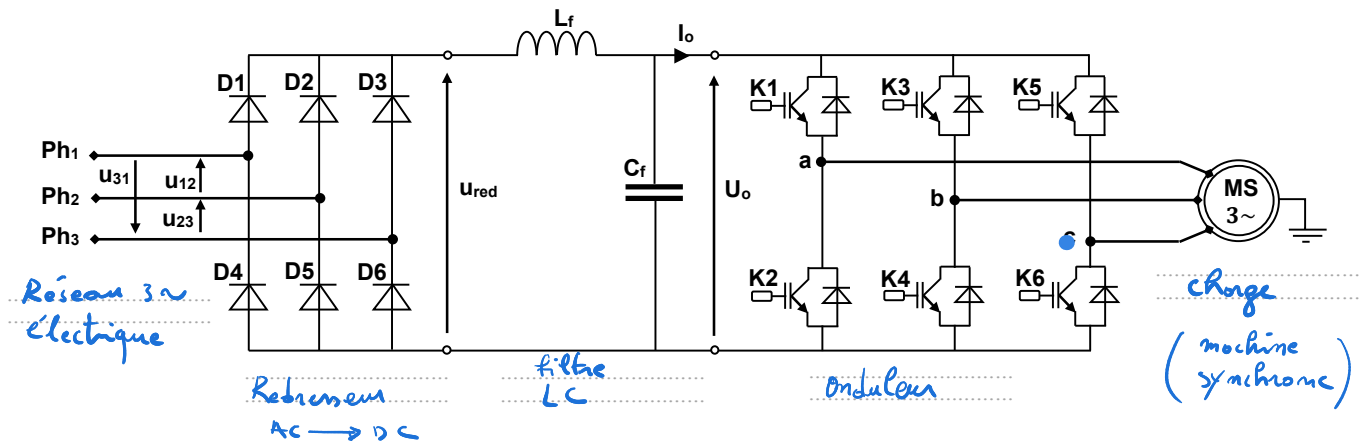
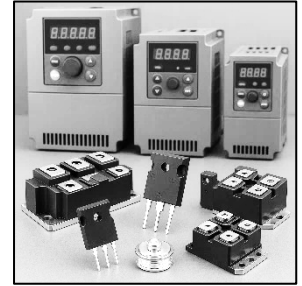
Chapitre 4 : Interrupteurs électroniques de puissance

I. Introduction

Les interrupteurs électroniques de puissance jouent un rôle fondamental dans les systèmes modernes de motorisation électrique. Grâce aux avancées technologiques, ces composants assurent le contrôle efficace de l'énergie électrique. Ils sont au cœur des variateurs de vitesse, permettant une régulation précise du fonctionnement des moteurs.

Diodes, IGBT, GTO ou encore MOSFET sont autant d'exemples de ces dispositifs indispensables dans les applications industrielles, de l'automatisation à la conversion d'énergie.

Le schéma présente un variateur de vitesse triphasé conçu à partir d'interrupteurs électroniques de puissance, notamment des diodes et des IGBT.



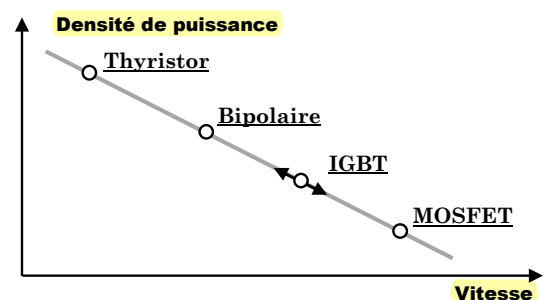
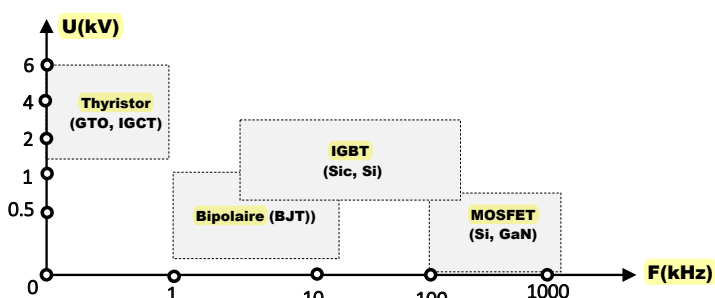
II. Interrupteurs électroniques de puissance

Un interrupteur électronique de puissance contrôle le transfert d'énergie dans un système électrique. Il assure une commutation rapide et précise, permettant un pilotage efficace de l'alimentation, essentiel pour les applications modernes telles que les variateurs de vitesse.

Dans ce cours, nous nous focaliserons sur les interrupteurs couramment utilisés dans les variateurs de vitesse de technologie avancée. Les principaux types d'interrupteurs sont les suivants :

Diode	Thyristor	MOSFET	IGBT

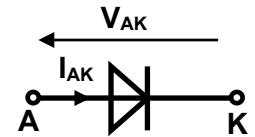
Les graphiques suivants illustrent la classification des interrupteurs électroniques de puissance en fonction de leur vitesse de commutation, de la tension de blocage et de la puissance supportée. Ils reflètent l'état de l'art de la technologie en 2025, en intégrant les dernières avancées dans le domaine de l'électronique de puissance.



1. La Diode de puissance.

La diode est un composant unidirectionnel, c'est-à-dire qu'elle ne permet le passage du courant que dans un seul sens. Elle n'est pas commandable, ni à l'ouverture ni à la fermeture, ce qui signifie qu'elle conduit uniquement lorsque les conditions de polarisation sont réunies.

On la retrouve dans l'ensemble des structures de convertisseurs statiques. Elle possède deux bornes : l'anode (A) et la cathode (K), cette dernière correspondant au côté du symbole qui évoque la lettre "K" inversée.



➤ Conditions de fonctionnement d'une diode

- **Conduction (diode passante)** : une diode conduit lorsque :

- Le potentiel à l'anode (A) est **supérieur** à celui de la cathode (K) (polarisation directe),
- Et le courant circule de l'anode vers la cathode ($i > 0$, sens conventionnel).

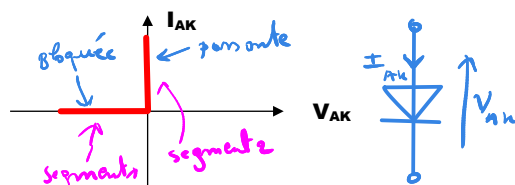
Blocage (diode non conductrice) : une diode est bloquée lorsque :

- Le potentiel à la cathode (K) est supérieur à celui de l'anode (A) (polarisation inverse),
- Ou le courant est nul ($i = 0$) ou très faible (courant de fuite inverse).

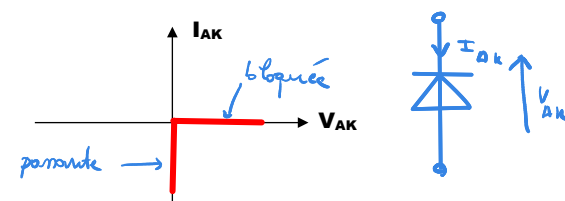
➤ Dans le cas parfait :

Diode passante (saturée)	Bloquée

➤ La caractéristique statique d'une diode



Diode en polarisation directe



Diode en polarisation inverse

La diode est un interrupteur à deux segments.

2. Transistors de puissance : MOSFET et IGBT

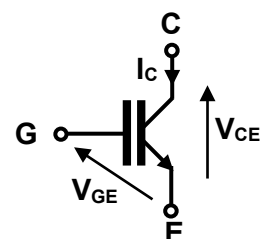
Les transistors de puissance sont des composants commandables aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture. Ils sont utilisés pour commuter et réguler des niveaux élevés de puissance électrique dans les systèmes électroniques. Conçus pour supporter des tensions et des courants importants, les transistors tels que les MOSFET et les IGBT permettent un contrôle précis et rapide du flux d'énergie, ce qui les rend indispensables dans les convertisseurs statiques et les variateurs de puissance.

2.1- Le transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

L'IGBT est un composant de puissance largement utilisé pour commander des charges élevées, avec des puissances pouvant atteindre plusieurs mégawatts. Il combine les avantages du MOSFET (commande en tension) et du transistor bipolaire (forte capacité en courant).

Il est composé de :

- Deux électrodes principales : le **collecteur (C)** et l'**émetteur (E)**, reliées au circuit de puissance,
- Une électrode de commande : la **grille (G)**, reliée au circuit de commande.



Les IGBT standard sont généralement utilisés pour des **fréquences de commutation allant jusqu'à 20 à 50 kHz** (IGBT SiC peut y aller jusqu'à **100 kHz**), selon les applications. Ils sont particulièrement adaptés aux **convertisseurs statiques**, **onduleurs industriels**, et **systèmes de traction électrique**.

➤ Conditions de fonctionnement d'un transistor IGBT

Un IGBT est **amorcé (passant)** lorsque :

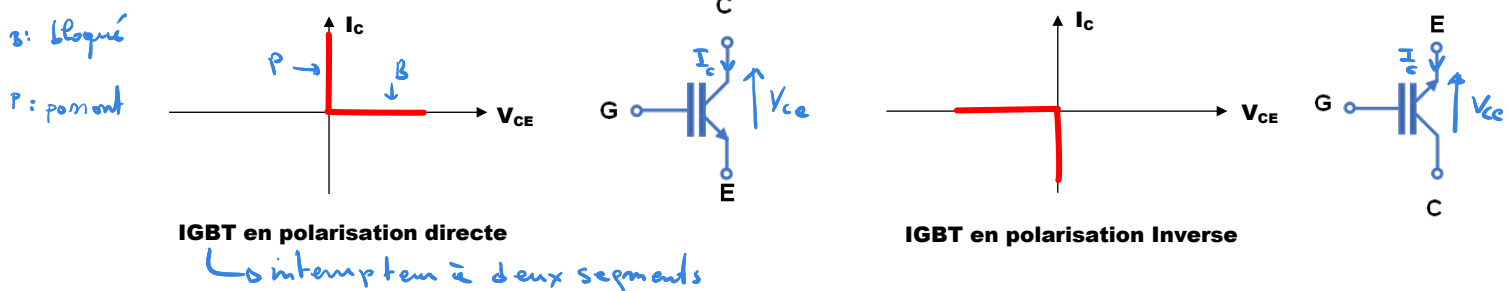
$$V_{GE} > V_{seuil} \text{ et } V_{CE} > 0$$

Le courant traverse alors l'IGBT du collecteur vers l'émetteur, sous l'effet de la tension de commande appliquée entre G et E. et Pour le **bloquer**, il faut juste : $V_{GE} \leq 0$

➤ Dans le cas parfait :

Passant (saturé)	Bloqué

➤ La caractéristique statique d'un transistor IGBT :



2.2- Transistors MOSFET (Metal - Oxide - Semiconductor Field - Effect Transistor)

Les MOSFET sont des transistors à effet de champ largement utilisés dans l'électronique de puissance pour leurs temps de commutation très rapides et leur commande en tension.

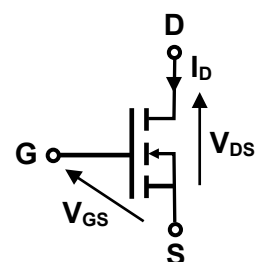
Ils sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant des fréquences de commutation élevées (jusqu'à **1 MHz**, voire plus avec les technologies récentes) et des puissances faibles à moyennes, typiquement jusqu'à plusieurs centaines de kilowatts selon la technologie employée.

Avec l'évolution des matériaux, les MOSFET en **SiC (carbure de silicium)** et en **GaN (nitrure de gallium)** permettent désormais :

- Une résistance à l'état passant plus faible,
- Une plus grande tenue en tension (jusqu'à **1700 V** et au-delà),
- Et des fréquences de commutation supérieures à celles des **MOSFET** en silicium classique.

Les **MOSFET** comportent :

- **Deux électrodes principales** : le drain (**D**) et la source (**S**), reliées au circuit de puissance,
- **Une électrode de commande** : la grille (**G**), reliée au circuit de commande.



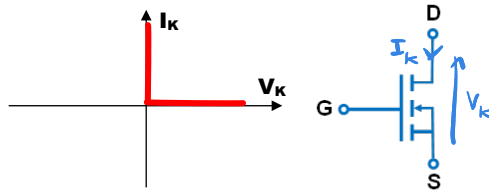
➤ Conditions de fonctionnement d'un transistor MOSFET

Un MOSFET est **amorcé (passant)** lorsque :

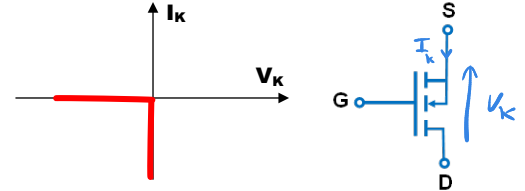
$$V_{GS} > V_{seuil} \text{ et } V_{DS} > 0$$

Le courant circule alors du drain vers la source, sous l'effet de la tension de commande appliquée entre la grille (G) et la source (S). Et Pour le **bloquer**, il faut juste : $V_{GS} \leq 0$

➤ La caractéristique statique d'une diode :



MOSFET en polarisation directe



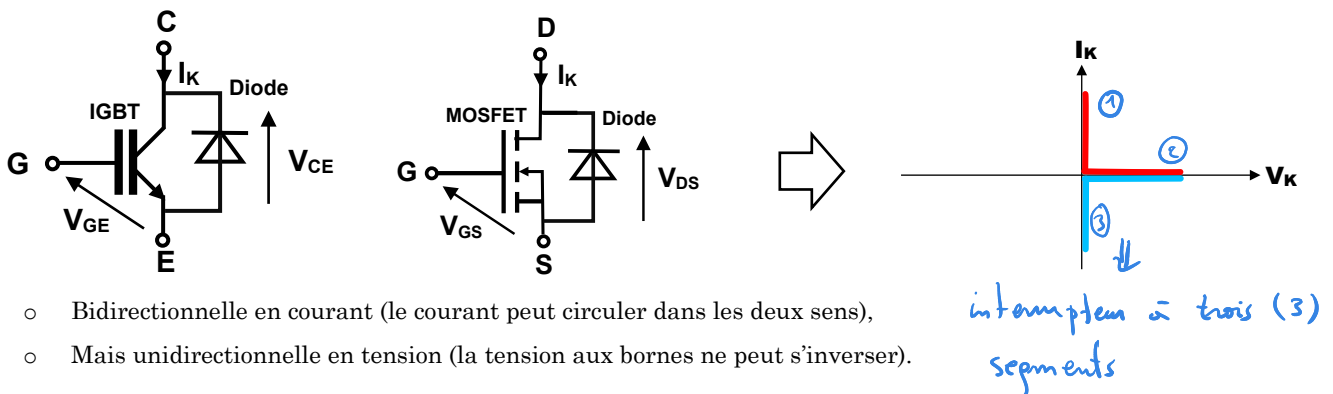
MOSFET en polarisation inverse

III. Association des interrupteurs de puissance : interrupteur à trois segments

Dans les convertisseurs statiques, l'énergie est transférée de la source vers la charge ou inversement, ce qui exige l'utilisation d'interrupteurs réversibles en tension et/ou en courant, selon l'application.

Un exemple typique est celui de l'onduleur, qui permet de contrôler le flux bidirectionnel d'énergie lorsqu'il alimente une machine synchrone (MS).

La structure d'interrupteur à trois segments présentés ci-dessous est :



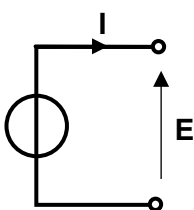
- Bidirectionnelle en courant (le courant peut circuler dans les deux sens),
- Mais unidirectionnelle en tension (la tension aux bornes ne peut s'inverser).

Le tableau suivant, illustre le composant de puissance qui conduit selon le sens du courant :

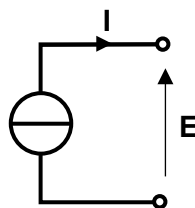
Type d'interrupteur	Lorsque le courant $I_k > 0$	Lorsque le courant $I_k < 0$
IGBT en parallèle avec la Diode	IGBT	Diode
MOSFET en parallèle avec la Diode	MOSFET	Diode.

IV. Notions de base sur les sources électrique

1- Sources électriques

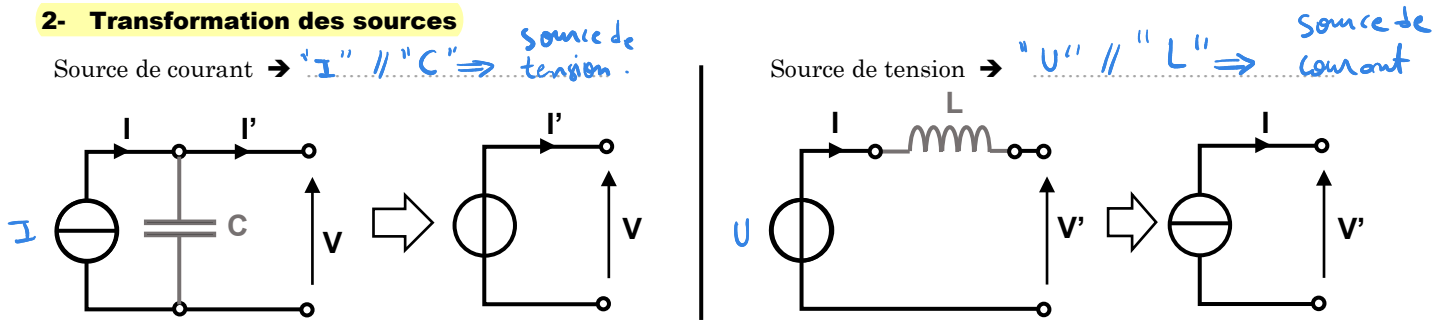


Une **source de tension** est un générateur capable de maintenir une tension constante à ses bornes, quelles que soient les variations du courant absorbé par la charge ou les perturbations du circuit.



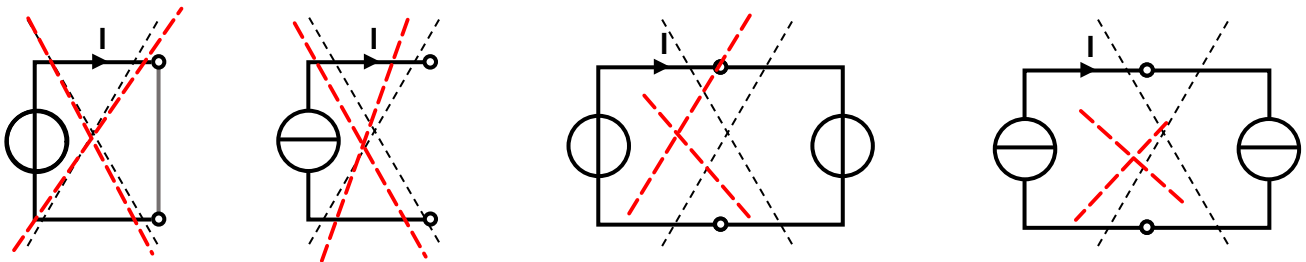
Une **source de courant** est un générateur qui fournit un courant constant, indépendamment des variations de la tension aux bornes de la charge ou des perturbations du circuit.

2- Transformation des sources



3- Les règles d'association des sources

- Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée, mais elle peut être ouverte.
- Une source de courant ne doit jamais être ouverte, mais elle peut être court-circuitée.
- Il ne faut jamais connecter entre elles deux sources de même nature.

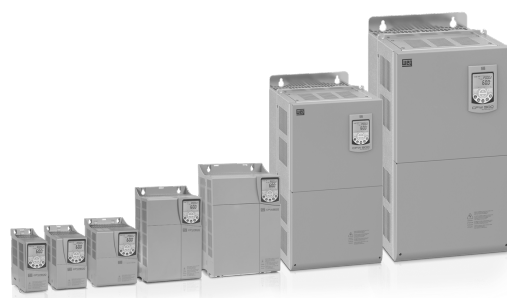


V. Classification des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs électroniques permettant de transformer l'énergie électrique d'une forme à une autre, sans éléments mobiles. Ils utilisent des composants semi-conducteurs (diodes, transistors, thyristors) et se classent selon la nature des tensions en entrée et en sortie :

- **Hacheur** : C'est un convertisseur statique de type DC/DC qui transforme une tension continue en une autre tension continue de valeur moyenne différente, en ouvrant et fermant rapidement un interrupteur électronique (MOSFET, IGBT...).
- **Redresseur** : C'est un convertisseur statique de type AC/DC qui transforme une tension alternative (AC) en une tension continue (DC). Il utilise des dispositifs unidirectionnels comme les diodes ou thyristors.
- **Onduleur** : C'est un convertisseur statique de type DC/AC qui transforme une tension continue (DC) en une tension alternative (AC), généralement à fréquence et amplitude contrôlées.
- **Gradateur** : C'est un convertisseur statique de type AC/AC à fréquence constante qui permet de modifier la puissance moyenne fournie à une charge en ajustant l'angle de conduction des composants semi-conducteurs (thyristors, triacs).

Ces convertisseurs statiques constituent la **base technologique des variateurs de vitesse industriels**. Ils jouent un rôle fondamental dans l'électronique de puissance, les systèmes d'alimentation et de nombreuses applications industrielles.

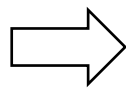
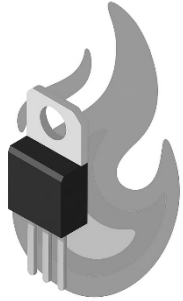
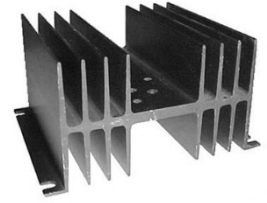


Remarque : Dans le programme de deuxième année SPE en Génie Électrique, l'accent sera mis sur l'étude approfondie de deux convertisseurs essentiels : le **redresseur** et l'**onduleur**, tant sur le plan des concepts que des applications pratiques.

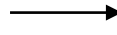
VI. Chaîne de refroidissement des composants

1- Présentation

Un interrupteur de puissance peut être endommagé si sa température interne ou celle de sa jonction dépasse une limite critique. La température maximale admissible de la jonction, appelée T_{jmax} , est généralement de l'ordre de **150 °C**. Il est donc essentiel de surveiller cette température pour garantir la fiabilité du composant.



Puissance
d'entrée P_e



Interrupteur de
puissance



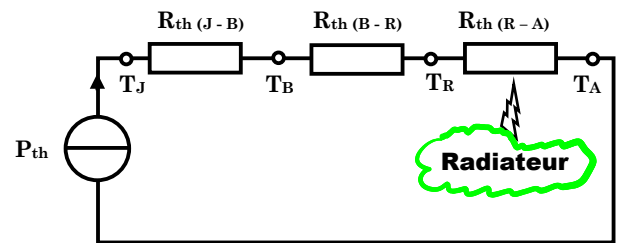
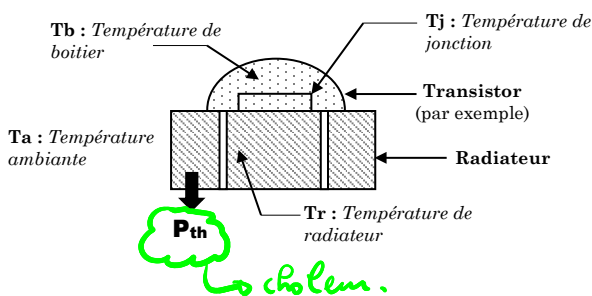
Puissance de
sortie P_s

Puissance dissipée P_{th}
(puissance thermique)

La température de jonction T_j dépend de la température ambiante T_A , de la puissance totale dissipée P_{th} , ainsi que de la résistance thermique jonction-ambiante $R_{th(j-A)}$. Elle est estimée par la relation : $T_j - T_A = R_{th(j-A)} \cdot P_{th}$

2- Circuit électrique équivalent

Le circuit électrique équivalent est une méthode de calcul thermique basée sur l'analogie électrique. Elle permet de modéliser les échanges thermiques dans un composant de puissance afin d'estimer les températures internes. Cette approche est essentielle pour dimensionner correctement le radiateur et garantir un fonctionnement sûr du composant.



Grâce à l'analogie avec la loi d'Ohm $U = R \cdot I$, les problèmes thermiques peuvent être transposés en équivalents électriques, ce qui permet d'appliquer les mêmes raisonnements que ceux utilisés en électrocinétique pour analyser le transfert de chaleur.

3- Dimensionnement thermique du radiateur

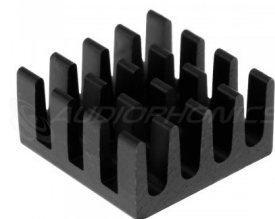
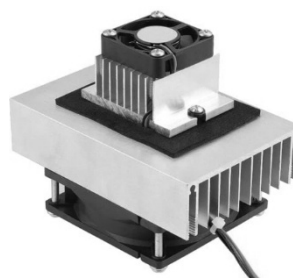
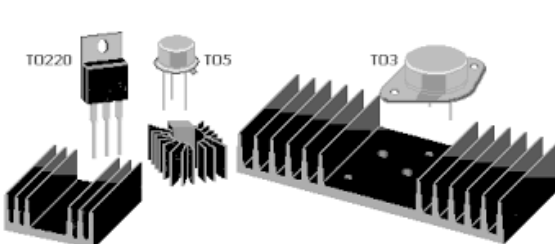
Le radiateur permet de diminuer la résistance thermique entre le boîtier et l'air ambiant. Il est efficace si :

$$R_{th(B-R)} + R_{th(R-A)} \ll R_{th(B-A)}$$

- La résistance thermique totale devient : $R_{th(j-A)} = R_{th(j-B)} + R_{th(B-R)} + R_{th(R-A)}$
- Le fabricant fournit $R_{th(R-A)}$, qu'on calcule par : $R_{th(R-A)} = \frac{T_j - T_A}{P_{th}} \cdot (R_{th(j-B)} + R_{th(B-R)})$

Pour éviter la destruction de la jonction ($T_j < T_{jmax}$), il faut choisir $R_{th(R-A)}$ telle que :

$$R_{th(R-A)} < \frac{T_{jmax} - T_A}{P_{th}} - (R_{th(j-B)} + R_{th(B-R)})$$



Références bibliographiques :

- 🔧 **Claude CHEVASSU**. Électronique de puissance (Principes) : cours et problèmes [PDF]. Version 5 décembre 2013. Licence Libre. Disponible sur : <http://mach.elec.free.fr>
- 📖 **Christophe FRANÇOIS**, Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016
- 📖 **Pierre Tréhin**, Sciences industrielles de l'ingénieur (SII) - spécial ATS, Ellipses 2019

Remarque :

