

Chapitre 1 : Caractéristiques des interrupteurs semi-conducteur de puissance

I. Introduction :

L'électronique de puissance (EP) à pris une place considérable pratiquement dans tout les domaines d'électricité industrielle, elle permet la **conversion de l'énergie électrique** entre une source et un récepteur (charge) afin de satisfaire aux besoins des dispositifs électriques.

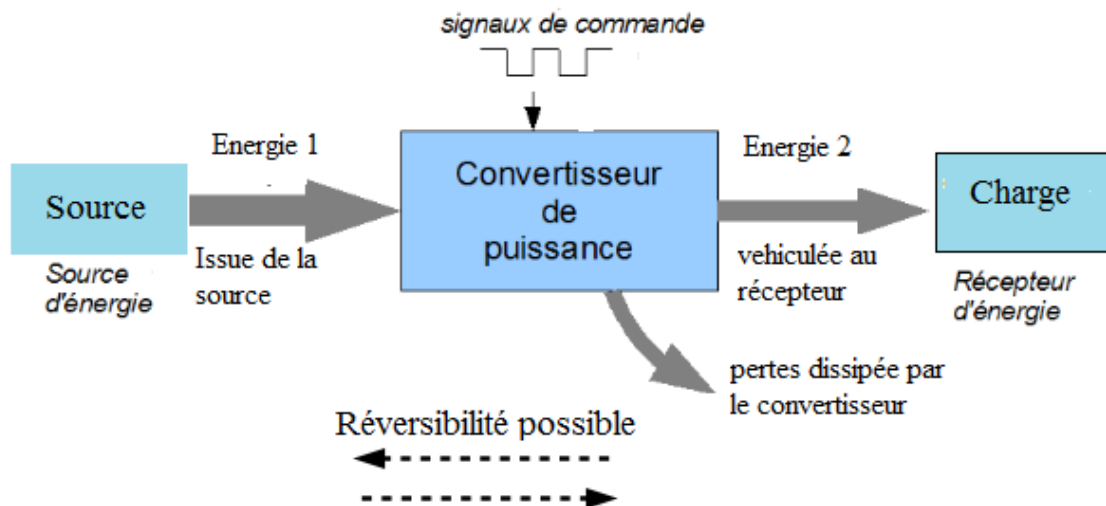


Figure 1 : Synoptique générale d'un dispositif d'EP

Autrement dit, les sources que nous disposons (sources triphasés d'amplitude et fréquence fixe et aussi les batteries) ne peuvent pas alimenter convenablement de nombreux systèmes électriques, on a besoins donc **d'adapter ou modifier la forme de l'énergie électrique** issus de ces sources pour répondre aux besoins des systèmes électriques alimentés.

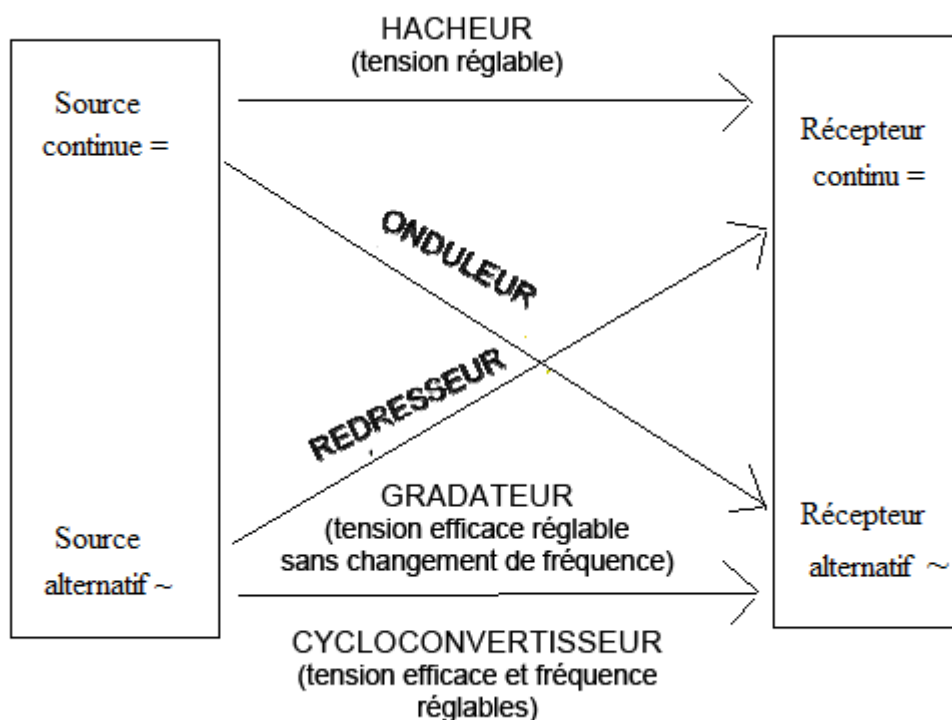
L'EP à pour objectif **d'assurer** :

- une fonction de **conversion** de la source (changement de forme, fréquence, amplitude....) pour l'adapter au dispositif alimenté.

- une fonction de ***réglage*** de ce transfert d'énergie par une **commande appropriée** (dans le cas nécessaire).

Le dispositif permettant cette conversion est le **convertisseur statique** (il est appelé ainsi car il ne comprend aucun élément mécanique mobil).

On rappelle les différents types de convertisseurs statique schématisés sur la figure suivante :



La conversion statique est assurée grâce à l'utilisation des **interrupteurs à semi-conducteurs de puissance**.

En effet, les performances de ces composants ne cessent de s'améliorer, ce qui permet une évolution extrêmement rapide de l'électronique de puissance.

Notons aussi la notion du **rendement** qui est essentielle en électronique de puissance et qu'il faut la prendre en considération lors de la fabrication des convertisseurs statique (CS) et le choix des composants à semi-conducteurs, car plus les **pertes** sont grande plus elles sont difficile à les évacuer et plus les CS sont onéreuses.

II. Caractéristiques des interrupteurs à semi-conducteurs de puissance :

Pour limiter les pertes dans les convertisseurs statiques, on utilise des semi-conducteurs de puissance bien choisis et bien étudiés, qui travaillent en **commutation** (c.à.d. fonctionnement en **interrupteur fermé** ou **ouvert**).

Les interrupteurs à semi-conducteurs jouent le même rôle qu'un interrupteur mécanique.

Deux états se présentent :

- **Passant ou fermé** : passage de courant avec moins de chute de tension possible.
- **Bloqué ou ouvert** : courant de fuite négligeable.

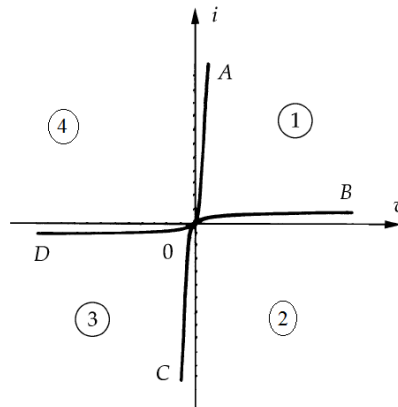
II.1 Passage d'un état fermé (ou ouvert**) vers l'état ouvert ou (**ou fermé**) :**

Lorsque les composants semi-conducteurs (SC) sont insérés dans un montage de convertisseur statique, le changement d'état d'un interrupteur à SC peut s'effectuer par deux manières :

- **Spontanée** : l'interrupteur s'ouvre au passage par zéro du courant qui le traverse et se ferme au passage par zéro de la tension à ses bornes. Ces passages par zéro sont imposés par l'évolution des variables (courant ou tension) et ne sont pas donc imposés par l'utilisateur.
- **Commandée** : l'interrupteur à SC réagit à **un signal de commande** à la fermeture ou à l'ouverture, qui intervient à l'instant imposé par l'utilisation.

II.2 Caractéristique statique des semi-conducteurs de puissance :

On étudie la figure ci-dessous qui donne la **caractéristique** *courant (tension)* $i(v)$ **statique** d'un interrupteur à semi-conducteur.



Cette caractéristique représente l'ensemble des **points de fonctionnement** d'un interrupteur à SC en régime statique.

Un interrupteur à SC est considéré comme étant une résistance **positive** :

- très faible à l'état passant (fermer)
- très élevée à l'état bloqué (ouvert)

Le point de fonctionnement se situe alors dans **le quadrant 1** et **3** de sorte que le produit :

$$v \cdot i > 0$$

On appelle **chute directe de tension**, la faible tension qu'on a sur ses bornes lorsque l'interrupteur est fermé.

On appelle **courant de fuite**, le faible courant qui le traverse lorsque l'interrupteur est ouvert.

On déduit alors **les segments** ou **les branches** suivants :

Segment **OA** : interrupteur fermé avec courant direct ($i > 0$ et $v > 0$ mais très faible)

Segment **OB** : interrupteur ouvert avec polarisation directe ($v > 0$ et $i > 0$ mais très faible)

Segment **OC** : interrupteur fermé avec courant inverse ($i < 0$ et $v < 0$ mais très faible)

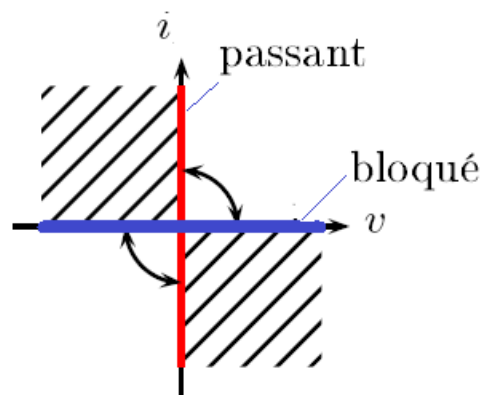
Segment **OD** : interrupteur ouvert avec polarisation inverse ($v < 0$ et $i < 0$ mais très faible)

La caractéristique statique est donc composée des différents segments situés sur les axes. On distingue alors les interrupteurs à **deux segments**, **trois segments** et **quatre segments**.

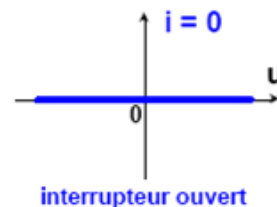
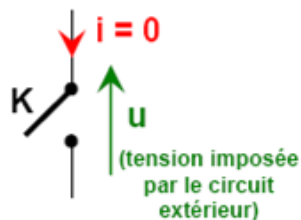
Pour faciliter l'étude on suppose que les interrupteur sont parfaits c.à.d.

- Chute de tension directe nulle
- Courant de fuite nul
- Durée des commutations négligeable

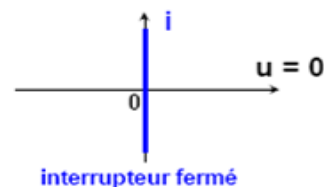
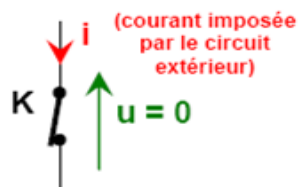
Ce qui donne la **caractéristique statique idéale** de la figure ci-dessous :



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



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



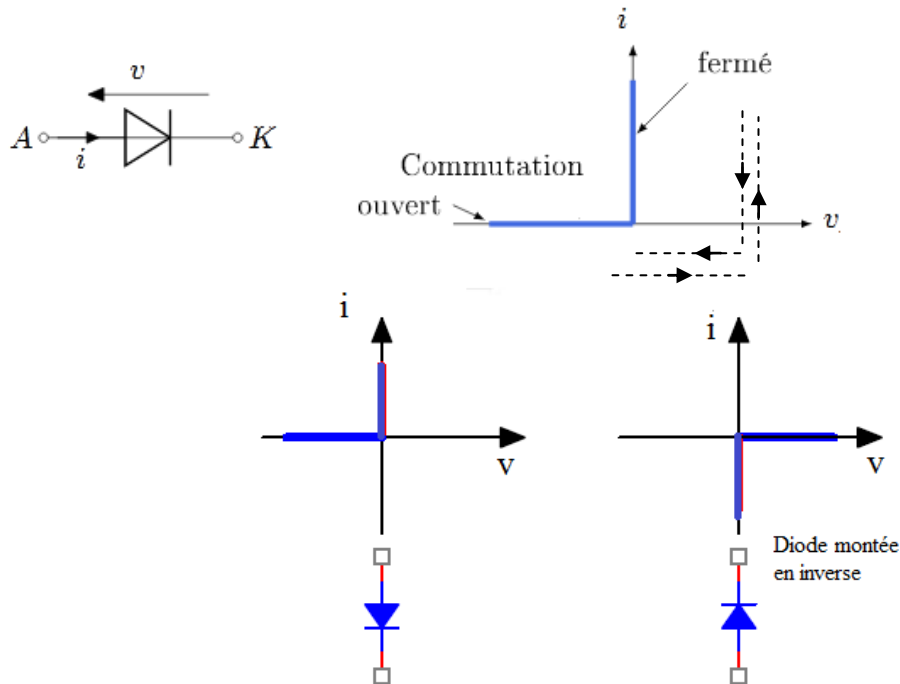
On note donc que pour un **interrupteur idéal**, la **caractéristique statique** est **non dissipative**.

II.2.1 Interrupteur à deux segments :

a) La diode :

Contenant deux électrodes anode et cathode.

La diode est unidirectionnelle en courant et en tension

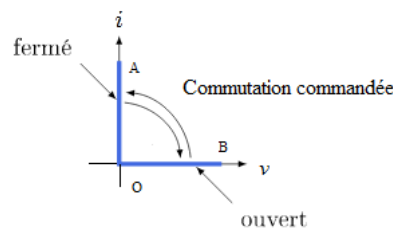


C'est un interrupteur **non commandé**, il se ferme dès que $v > 0$ et s'ouvre dès que $i = 0$ (lorsque le courant s'annule).

Les commutations sont **spontanées** et le passage d'un segment à l'autre s'effectue nécessairement par le point « 0 ».

b) Les transistors de puissances :

Un transistor comporte trois bornes (3 électrodes), deux bornes de puissance assurant la fonction « interrupteur » et une borne auxiliaire qui forme avec une borne de puissance l'accès à la commande.



C'est un interrupteur commandé, le segment sur lequel se trouve le point de fonctionnement est fixé par un signal de commande, en effet :

- Le signal de commande « on » donne le point de fonctionnement sur OA : interrupteur fermé
- Le signal de commande « off » donne le point de fonctionnement sur OB : interrupteur ouvert

Les différents types de transistor :

➤ **Transistor bipolaire :**

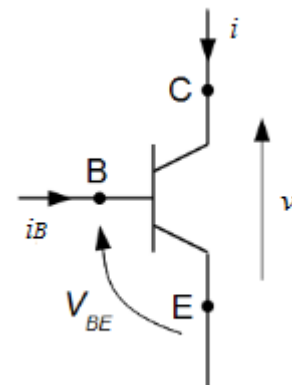
L'accès de puissance est assuré par le collecteur C et l'émetteur E.

L'accès de commande est assuré la base B et l'émetteur.

Il utilise une commande en courant :

Interrupteur fermé ou passant (segment OA) : lorsque on injecte dans le circuit base-émetteur un courant de commande i_B suffisant.

Interrupteur ouvert ou bloqué (segment OB) : lorsque on impose à i_B une valeur de courant nulle.



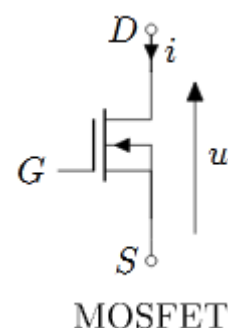
➤ **Transistor MOSFET (Metal Oxyde Semi-conductor Field Effect Transistor)**

Le circuit de puissance est relié au drain D et la source S, et le circuit de commande est branché entre la grille G et la source S.

Il utilise une commande en tension, en effet :

-une tension de commande V_{GS} nulle donne

l'état ouvert du transistor (segment OB), dans ce cas on a une impédance drain-source très élevée ce qui annule le courant i de puissance.



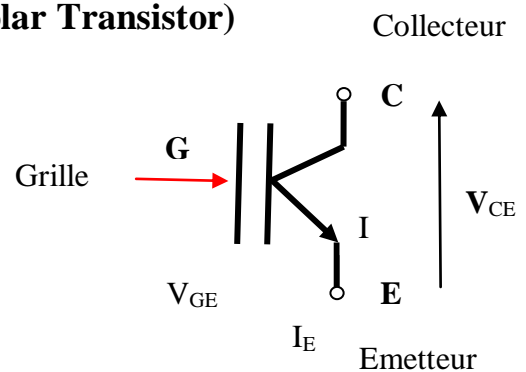
-une tension V_{GS} de valeur positive suffisante rend l'impédance drain-source très faible et permet la circulation du courant i , c'est l'équivalent de l'interrupteur fermé (segment OA).

On note que le MOSFET présente une meilleure vitesse de commutation (ouverture /fermeture) par rapport au transistor bipolaire, mais il est limité en puissance.

➤ Transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

Le circuit de puissance entre le collecteur C et l'émetteur E.

Le circuit de commande entre la grille G et l'émetteur E.



Une tension de commande V_{GE} nulle ou négative \longrightarrow interrupteur ouvert (segment OB)

Une tension V_{GE} positive et suffisante \longrightarrow interrupteur fermé (segment OA).

Ce type de transistor présente une chute de tension directe faible malgré l'utilisation dans le cas des tensions élevées.

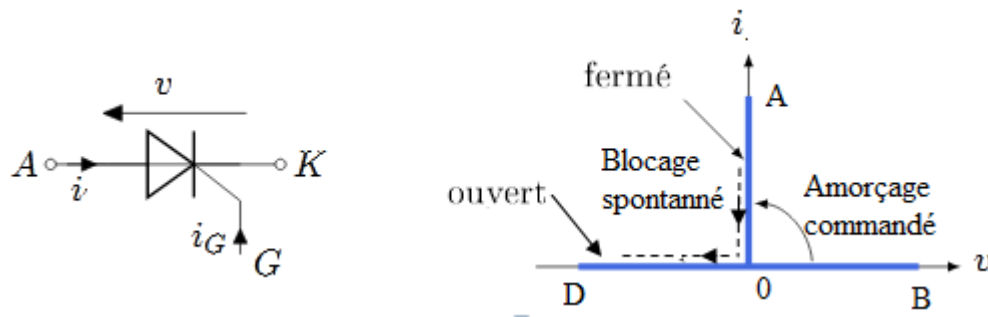
II.2.1 Interrupteur à trois segments :

a) Le thyristor :

On note :

- La branche OA présente l'état passant
- Les branches OB et OD présentent l'état bloqué
- Commutation commandées entre OB et OA.
- Commutation spontanées entre OA et OD.

Le thyristor contient 3 bornes (trois électrodes).



Circuit de puissance entre l'anode A et la cathode K.

La gâchette G forme avec la cathode l'accès de la commande :

- pour un courant de commande $i_G=0$, le thyristor est bloqué que ça soit pour $V>0$ (branche OB) ou pour $V<0$ (branche OD)
- lorsque $V>0$, la fermeture de l'interrupteur s'effectue par injection de courant de commande i_G positif, on passe alors de OB à OA.

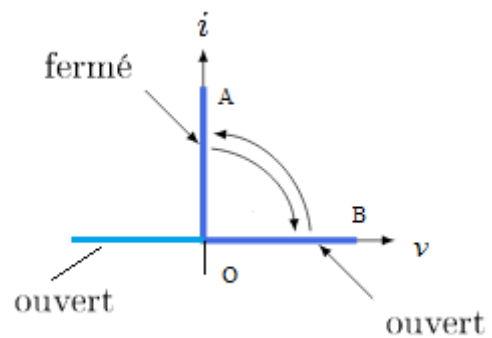
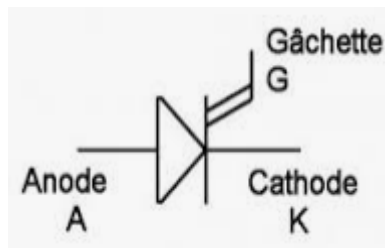
⇒ Lorsque le courant I est supérieur au « courant d'accrochage », il n'y aura pas de retour sur OB (pas d'ouverture d'interrupteur) même si on supprime le courant de commande i_G .

-le retour à l'état bloqué est assuré spontanément (manière naturelle) par passage de OA à OD comme une diode.

⇒ Le point de fonctionnement doit se maintenir un temps suffisant « temps de désamorçage » pour que le thyristor reste bloqué si $V>0$.

b) Le GTO (Gate Turn-Off)

Le GTO est un semi-conducteur de puissance qui peut être commandé en conduction et en blocage.



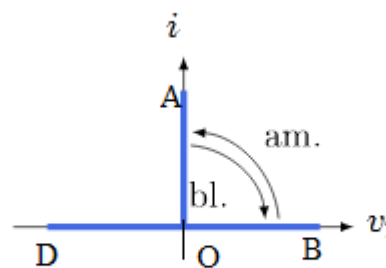
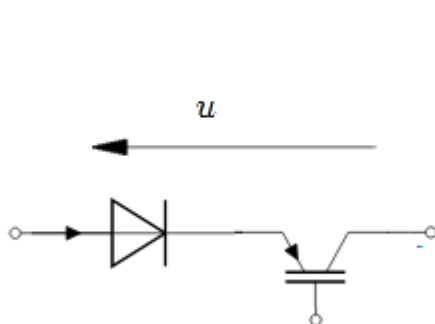
En effet, pour entrer en conduction et lorsque $V > 0$, il lui faut une impulsion de courant positif sur sa gâchette G (passage de OB à OA).

Pour le bloqué, il faut appliquer sur ça gâchette une impulsion de forte courant négatif (passage de OA à OB).

Le blocage spontané (OA à OD) s'effectue comme pour le thyristor à condition d'annuler le courant de gâchette.

L'inconvénient du GTO, c'est que les pertes sont importantes, et sa fréquence de commutation est limitée. Mais il est recommandé pour les cas de très grandes puissances.

c) Association en série d'un transistor et une diode

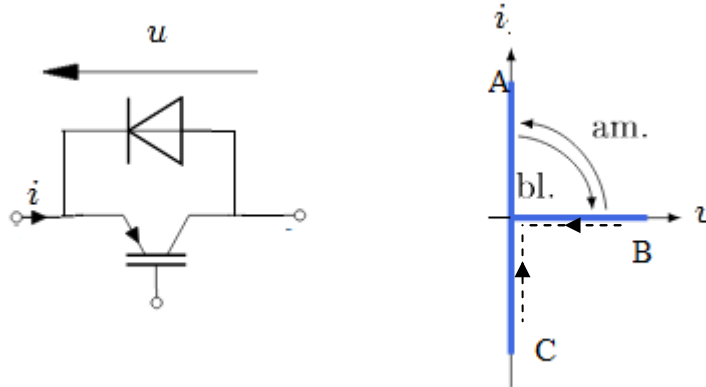


Lorsque le courant i et la tension v sont positifs, la commande 'on' du transistor assure le passage de OB à OA (fermeture) et la commande 'off' du transistor assure le passage inverse de OA à OB (ouverture).

La diode fixe l'état de l'interrupteur pour une commande 'on' du Transistor, il est passant si v est positive et bloqué si v est négative.

Avec une commande 'off' du transistor, l'interrupteur est bloqué (reste bloqué) quelque soit le signe de la tension v .

d) Association en parallèle inverse d'un transistor et une diode



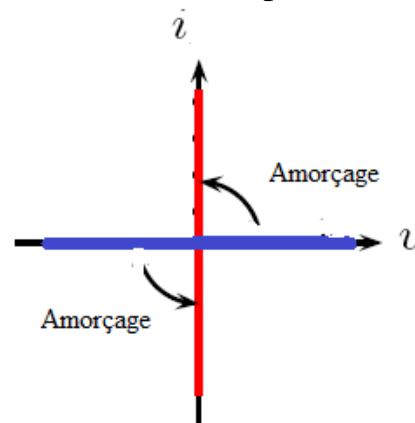
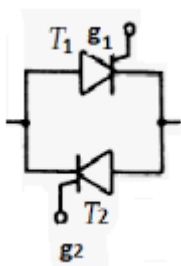
Lorsque le courant i et la tension v sont positifs, l'interrupteur peut effectuer des commutations commandées entre OA et OB par actions sur 'on' et 'off' du transistor.

Le passage entre OB et OC est assurée si la commande du transistor est à l'état 'off' et la diode est passante.

Le passage entre OA et OC ou inversement est assurée lorsque la commande du transistor est à l'état 'on' et au moment du changement de la polarité du courant i .

II.2.3 Interrupteur à quatre segments :

C'est le cas où on utilise deux thyristors symétriques montés en antiparallèle (association de deux thyristors). Ce dispositif convient pour les grandes puissances.



On peut aussi utiliser un triac

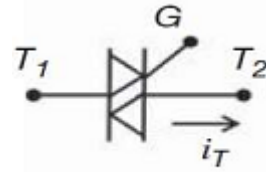
a) Le triac :

Il est utilisé beaucoup plus en faible puissance,

le triac est un semi-conducteur qui peut être

dans l'état passant ou l'état bloqué dans le sens direct ou inverse.

Il contient deux bornes de puissance T_1 , T_2 et une borne de commande G (la gâchette).



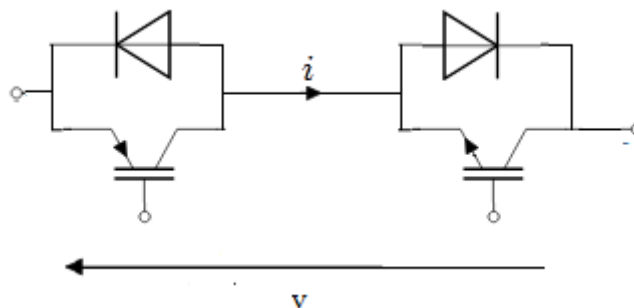
-Lorsque $v = v_{T1-T2}$ est positive, le triac est déclenché par un courant de commande i_G positif (il travaille dans le quadrant 1).

-Lorsque $v = v_{T1-T2}$ est négative, le triac est déclenché par un courant de commande i_G négatif (il travaille dans le quadrant 3).

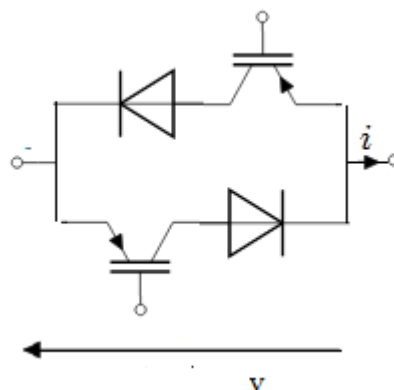
L'ouverture est spontanée dès que le courant qui le traverse s'annule.

b) Autre configurations pour des interrupteurs à 4 segments

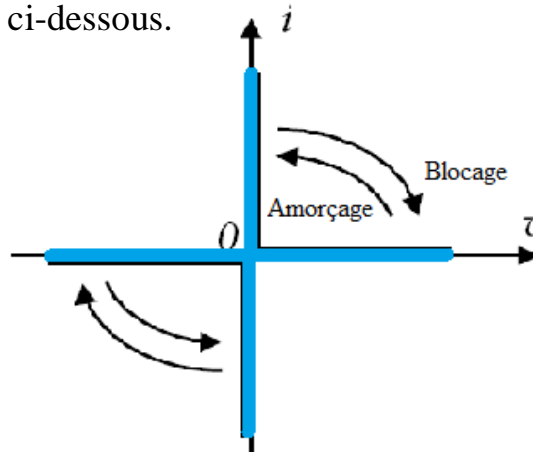
Association en série inverse de deux interrupteurs à trois segments réversible en courant.



Association en parallèle inverse de deux interrupteurs à trois segments réversible en tension.



Pour les deux configurations, la caractéristique statique $i(v)$ à 4 segments est représentée sur la figure ci-dessous.



II.3 Caractéristique dynamique

Lors d'un changement d'état d'interrupteur (fermé \longleftrightarrow ouvert), le point de fonctionnement, sur la caractéristique $i(v)$, passe d'un segment à un autre. La connaissance de cette dynamique peut mettre en évidence le mécanisme de commutation est les pertes par commutation.

Ainsi, lors d'une commutation, l'énergie dissipée est :

$$W = \int_{\text{commutation}} v(t) i(t) dt$$

Puisque l'interrupteur est dissipatif, $W \geq 0$, en effet:

- Si le point de fonctionnement se déplace le long des axes dans des quadrants où les **segments sont de signes opposés** $W=0 \implies$ commutation spontanée.

- Si il se déplace dans un **quart** de plan où les **segments sont de mêmes signes** $W>0$,

\implies Commutation commandée à l'amorçage ou au blocage.

On verra dans le 2eme chapitre les détails des commutations et la dynamique de l'interrupteur