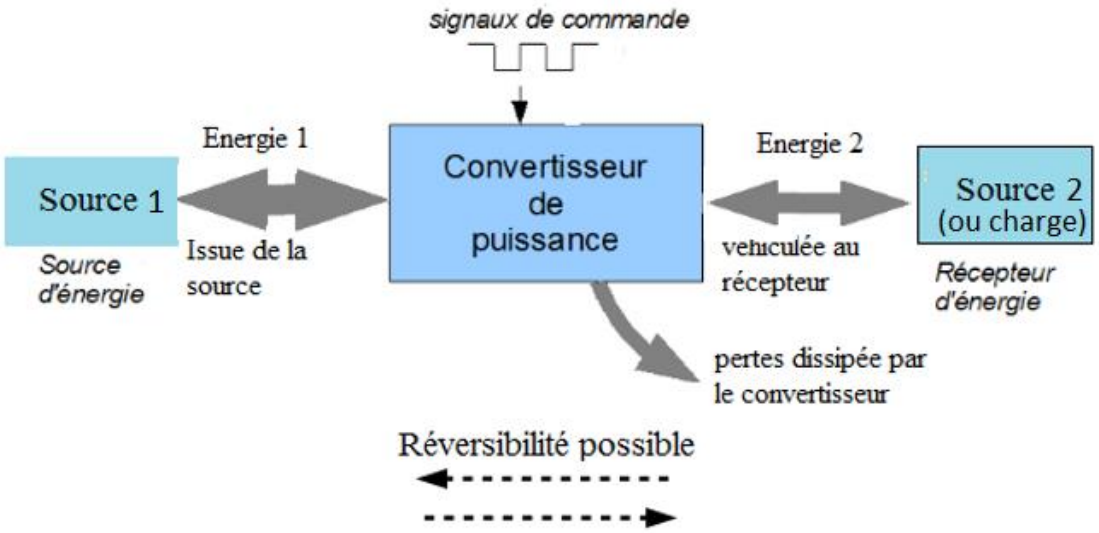
Chapitre 1 : Méthodes de modélisation et simulation des semi-conducteurs de puissance

I. Introduction :

L'électronique de puissance (**EP**) a pris une place considérable dans pratiquement tous les domaines de l'électricité industrielle, elle permet la **conversion de l'énergie électrique** entre une source et un récepteur (charge), ou entre deux sources dans le cas de réversibilité, afin de satisfaire aux besoins des dispositifs électriques.



Synoptique générale d'un dispositif d'EP

Autrement dit, les sources dont nous disposons (sources triphasées à amplitude et à fréquence fixes, ainsi que les batteries) ne peuvent pas alimenter convenablement de nombreux systèmes électriques ; on a donc besoin d'adapter ou de modifier la forme de l'énergie électrique issue de ces sources pour répondre aux besoins des systèmes électriques alimentés.

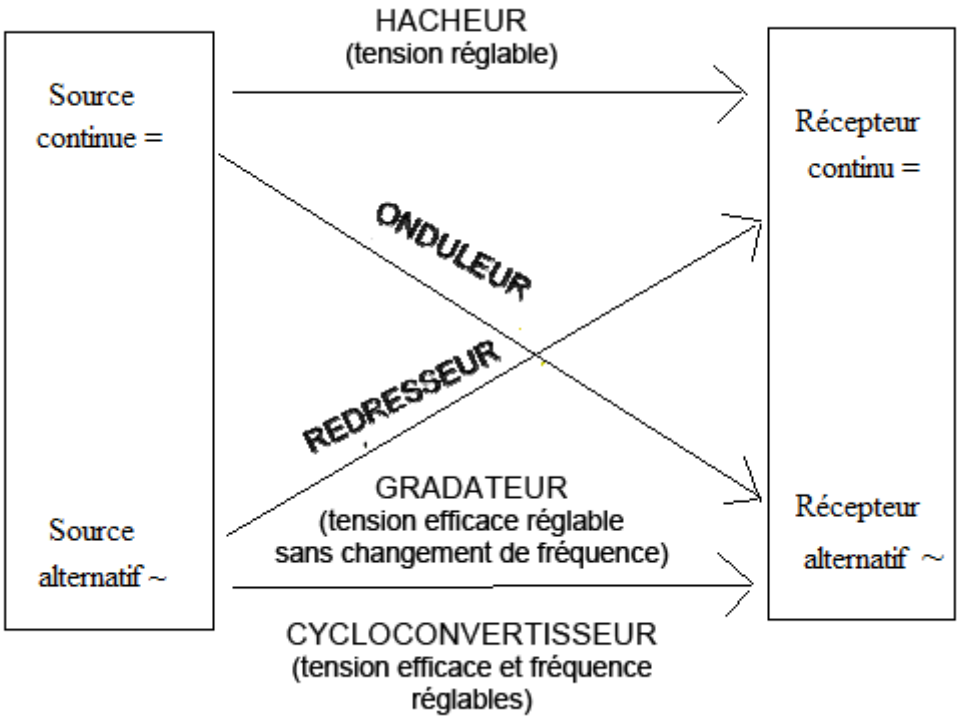
L'EP a pour objectif **d'assurer** :

- 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 convertisseurs statiques classiques 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 statiques (CS) et le choix des composants à semi-conducteurs, car plus les **pertes** sont grandes plus il est difficile de les évacuer et plus les CS sont onéreux.

Par ailleurs, l'électronique de puissance repose sur l'utilisation des interrupteurs semi-conducteurs fonctionnant en régimes saturés (état passant) ou bloqués (état bloqué) pour minimiser les pertes énergétiques.

Ces interrupteurs 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.

Ces interrupteurs travaillent en **commutation**

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 :

- **Commutation 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.
- **Commutation 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.

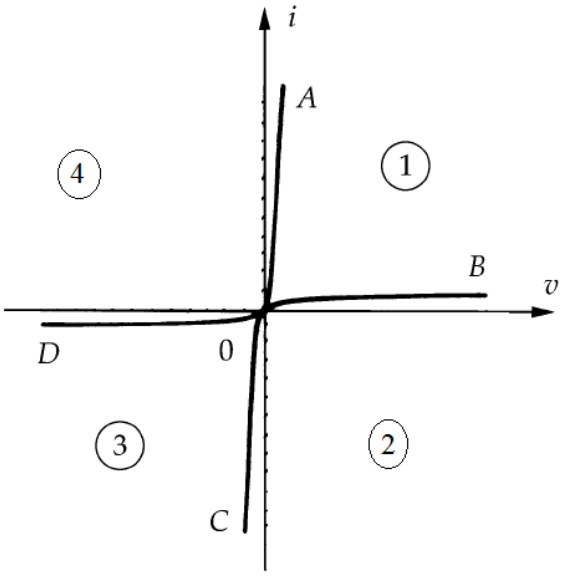
Caractéristique des différents types de semi-conducteurs

Dans l'analyse des convertisseurs statiques, on distingue deux types de modélisation :

Le modèle idéal (ou fonctionnel) : Utilisé pour la synthèse du circuit, la compréhension globale du fonctionnement et l'établissement des équations d'état.

Le modèle réel (ou physique) : Utilisé pour la simulation fine du comportement dynamique (commutations, surtensions, surintensités, calcul des pertes).

On étudie la figure ci-dessous qui donne la **caractéristique** *courant (tension)* ***i*(*v*) statique** d'un interrupteur à semi-conducteur dans le **cas du modèle réel**.



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*** (interrupteur dissipatif) :

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

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

$$v*i > 0$$

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

On appel **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 direct (***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)

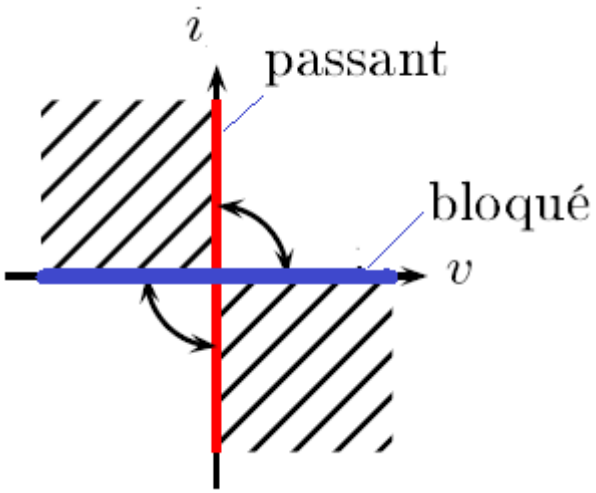
La caractéristique statique est donc composée des différents segments situés sur les axes. On distingue alors les interrupteurs à **deux segments**, **trois segments** et **quatre segments**.

II. Caractéristique idéalisée des différents types de semi-conducteurs

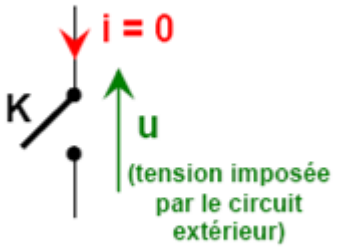
Pour faciliter l'étude on suppose que les interrupteurs sont idéals c.à.d.

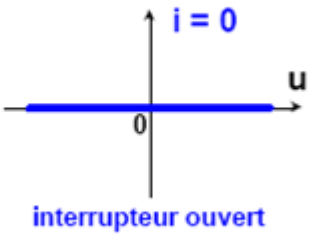
- Chute de tension directe nulle
- Courant de fuite nul
- Durées de commutation négligeables

Ce qui donne la **caractéristique statique idéalisée** représentée ci-dessous :

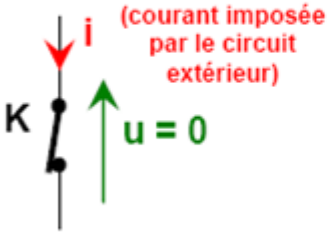


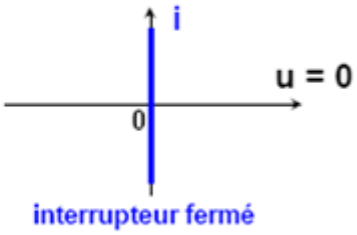
■ **Interrupteur ouvert** (position OFF : i = 0)





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





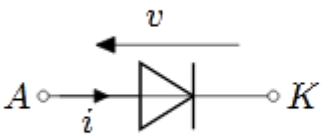
On note donc que pour un **interrupteur semi-conducteur idéal**, la **caractéristique statique est non dissipative**.

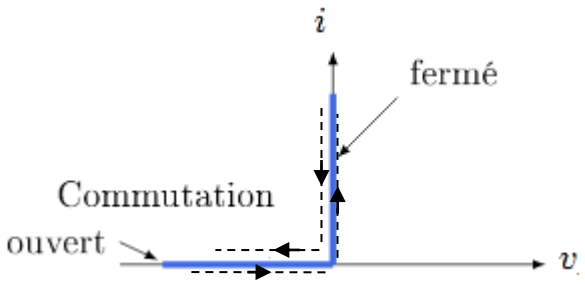
II. 1 Interrupteur à deux segments :

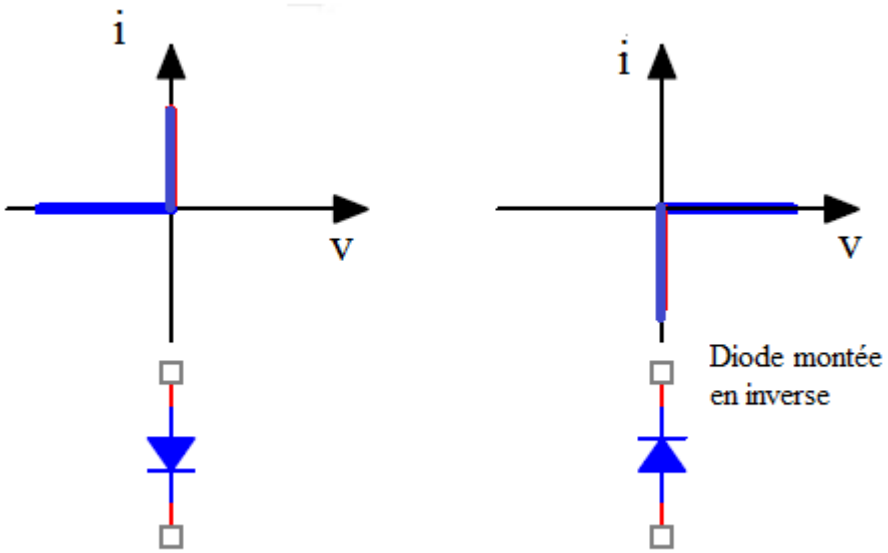
a) La diode :

Contenant deux électrodes anode et cathode.

La diode est unidirectionnelle en courant et en tension





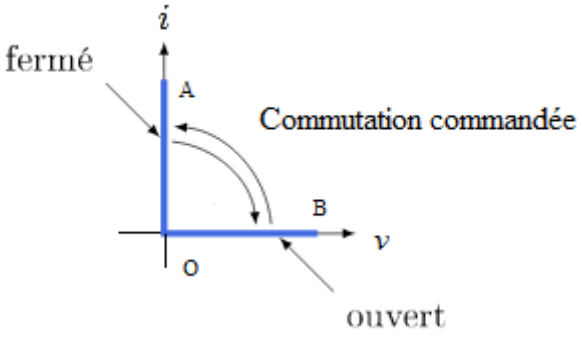


C'est un interrupteur **non commandé** qui se ferme dès que $v > 0$ et s'ouvre dès que $i = 0$ (lorsque le courant s'annule).

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

b) <u>Les transistors de puissances :</u>

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.



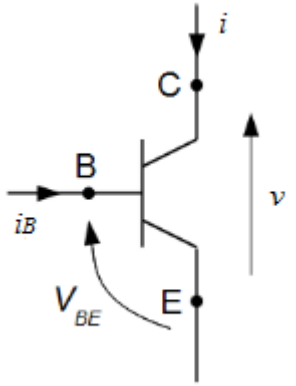
C'est un interrupteur commandé, le segment sur lequel se trouve le point de fonctionnement est fixé par un signal de commande, en effet :

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

- Le signale 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.

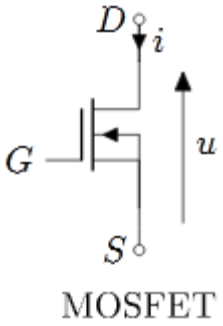
L'accès de commande est assuré la base B et l'émetteur.

Il utilise une commande en courant :

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

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

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



MOSFET

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

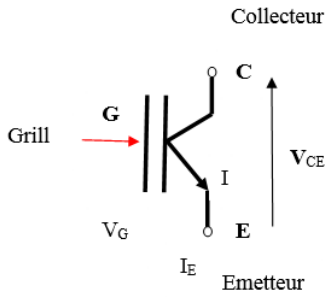
-une tension V_{GS} de valeur positive suffisante rend l'impédance drain-source très faible et permet la circulation du courant i, c'est l'équivalent de l'interrupteur fermé (segment OA).

On note que le MOSFET présente une meilleur 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 ⟶ interrupteur ouvert (segment OB)

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

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

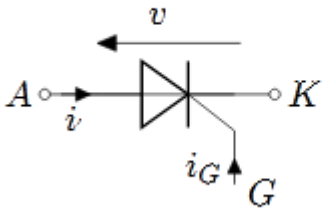
II.2 Interrupteur à trois segments :

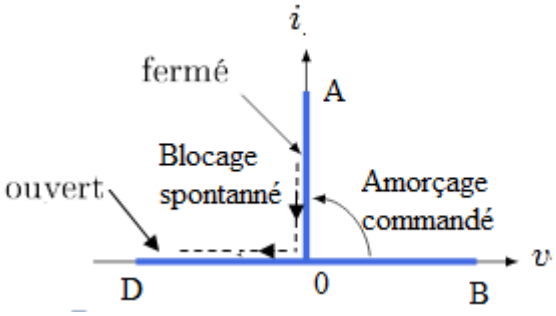
a) Le thyristor :

On note :

- La branche OA présente l'état passant
- Les branches OB et OD présentent l'état bloqué
- Commutation commandée entre OB et OA.
- Commutation spontanée 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 qu'il soit pour V>0 (branche OB) ou 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.

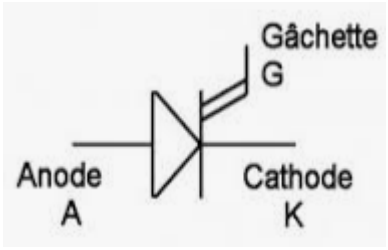
⇨ Lorsque le courant I est supérieur au « courant d'accrochage », il n'y aura pas de retour sur OB (pas d'ouverture d'interrupteur) même si on supprime le courant de commande i_G.

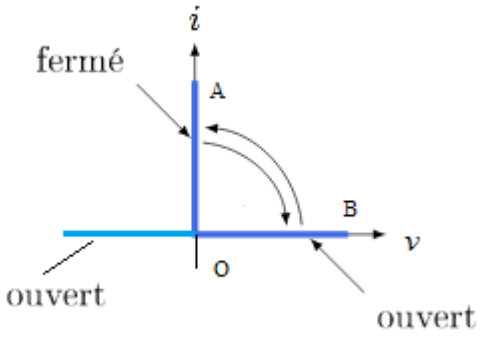
-le retour à l'état bloqué est assuré spontanément (manière naturelle) par passage de OA à OD comme une diode.

⇨ 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.





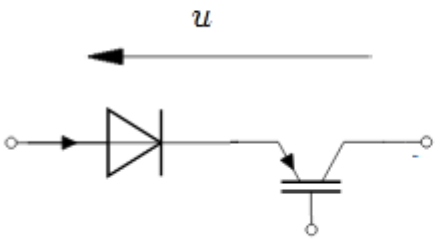
En effet, pour entrer en conduction et lorsque V>0, il lui faut une impulsion de courant positif sur sa gâchette G (passage de OB à OA).

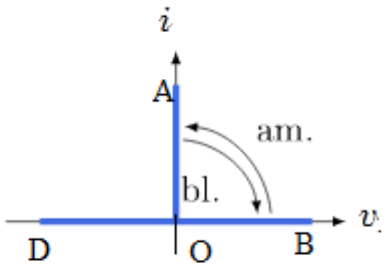
Pour le bloquer, il faut appliquer sur sa gâchette une impulsion de forts courants négatifs (passage de OA à OB).

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



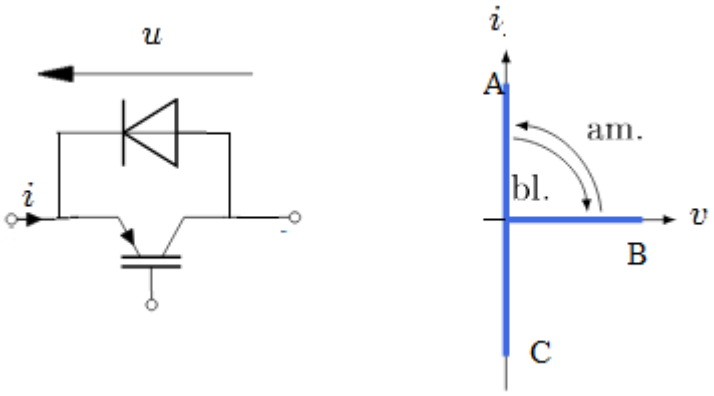


Lorsque le courant i et la tension v sont positifs, la commande 'on' du transistor assure le passage de OB à OA (fermeture) et la commande 'off' du transistor assure le passage inverse de OA à OB (ouverture).

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) quel que soit le signe de la tension v.

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



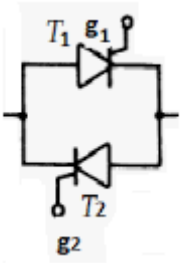
Lorsque le courant i et la tension v sont positifs, l'interrupteur peut effectuer des commutations commandées entre OA et OB par actions sur 'on' et 'off' du transistor.

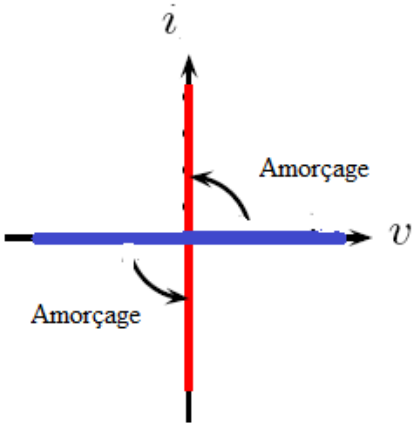
Le passage entre OB et OC est assuré si la commande du transistor est à l'état 'off' et la diode est passante.

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

II. 3 Interrupteur à quatre segments :

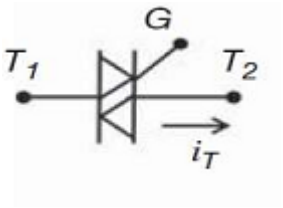
C'est le cas où on utilise deux thyristors symétriques montés en antiparallèle (association de deux thyristors). Ce dispositif convient pour les grandes puissances.





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 T1, T2 et une borne de commande G (la gâchette).

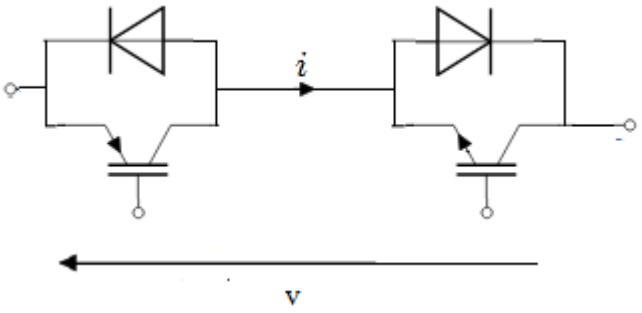
-Lorsque $v = v_{T1}-v_{T2}$ est positive, le triac est déclenché par un courant de commande i_G positif (il travaille dans le quadrant 1).

-Lorsque $v = v_{T1}-v_{T2}$ est négative, le triac est déclenché par un courant de commande i_G négatif (il travaille dans le quadrant 2).

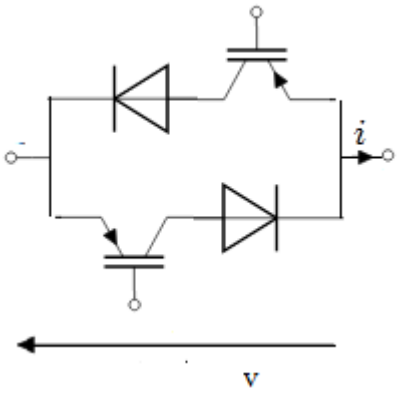
L'ouverture est spontanée dès que le courant qui le traverse s'annule.

b) Autre configurations pour des interrupteurs à 4 segments

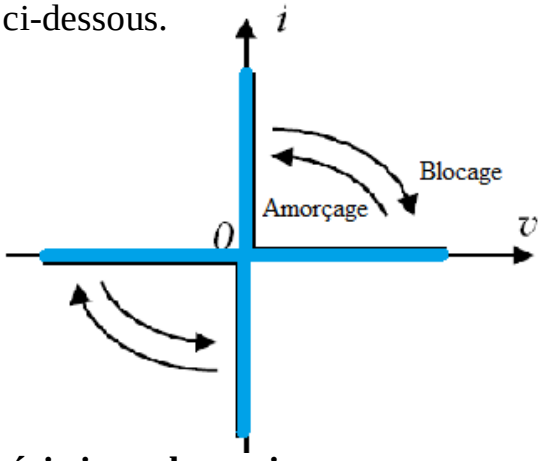
Association en série inverse de deux interrupteurs à trois segments réversible en courant.



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.



Remarque sur la 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 et les pertes par commutation.

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

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

Puisque l'interrupteur est dissipatif, W≥ 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 $\Longrightarrow$ *Commutation spontanée*.
- S'il se déplace dans un **quart** de plan où les **segments sont de mêmes signes** W>0 $\Longrightarrow$ *Commutation commandée*.

III. Équations logiques des semi-conducteurs

Afin de simplifier l'analyse et la simulation des convertisseurs, la représentation des interrupteurs SC à l'aide de variables logiques se fait par association à chaque interrupteur commandé une variable binaire telle que :

$$q(t) \in \{0, 1\}$$

$$q(t) = \begin{cases} 1 & Si\ l'interrupteur\ est\ fermé \\ 0 & Si\ l'interrupteur\ est\ ouvert \end{cases}$$

Exemple :

Soit α le rapport cyclique tel que : $\alpha = \frac{t_{on}}{T}$

Avec ($0 < \boldsymbol{\alpha} < 1$), T est la période de hachage (de découpage) et t_{on} la durée de conduction.

Pour une commande périodique :

$$q(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < t_{on} \\ 0 & t_{on} \leq t < T \end{cases}$$

Dans les modèles idéalisés, la tension et le courant, d'un interrupteur *k* commandé, peuvent s'exprimer à partir de $q(t)$ tel que :

$$v_k = (1 - q) v_{blocage}$$

$$i_k = q \; i_{branche}$$

VI. Méthodes de simulations des convertisseurs statiques

La modélisation et la simulation des convertisseurs statiques consistent à établir les équations décrivant le comportement électrique du convertisseur en fonction des états des interrupteurs.

À chaque combinaison de l'état de ces interrupteurs, le circuit peut prendre une représentation par espace d'état (State-Space)

$$\frac{dx(t)}{d(t)} = A\, x(t) + B\, u(t)$$

$$y(t) = C\, x(t) + D\, u(t)$$

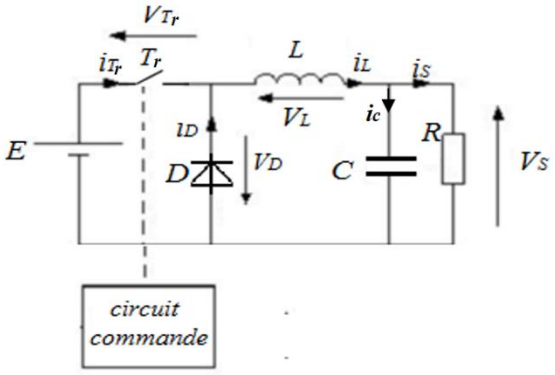
C'est la forme standard d'une équation différentielle utilisée en simulation numérique avec :

- $x(t)$: vecteur d'état, contient les grandeurs du circuit comme les courants dans les inductances $i_L(t)$ et les tensions aux bornes des condensateurs $v_C(t)$.
- $u(t)$: vecteur d'entrée, contient les sources d'alimentation comme une tension du réseau V_{DC}, générateur de tension e(t)….
- $y(t)$: vecteur de sortie, représenté par des courants de charge, puissance, etc…).
- *A, B, C et D* sont des matrices de fonctionnement du système.

Exemple hacheur série :

Prenons l'exemple d'un convertisseur DC-DC de type hacheur série de la figure suivante :

- Lorsque Tr est passant et D bloquée



L'inductance *L* stocke de l'énergie magnétique, la tension entre ses bornes s'exprime :

$$V_L = L\frac{di_L(t)}{d(t)} = E - V_s$$

Le condensateur C stocke de l'énergie électrique, le courant s'exprime :

$$i_c = C\frac{dv_c(t)}{d(t)} = i_L - i_s$$

Ou encore $\frac{dv_c(t)}{d(t)} = \frac{1}{C}\, i_L - \frac{1}{CR} V_s$

- Lorsque Tr est bloqué et D passante $V_L = L\frac{di_L(t)}{d(t)} = -V_s$

Aussi : $C\frac{dv_c(t)}{d(t)} = i_L - \frac{V_s}{R}$

Modèle unifié :

Lorsque le transistor Tr est passant *q=1* et lorsqu'il est bloqué *q=0.*

On trouve :

$$\begin{cases} \dfrac{di_L(t)}{d(t)} = \dfrac{q}{L}E - \dfrac{1}{L}V_s \\ \dfrac{dv_c(t)}{d(t)} = \dfrac{1}{C}i_L - \dfrac{1}{CR}V_s \end{cases}$$

Le vecteur d'état regroupe les variables nécessaires pour décrire l'état dynamique du système à un instant donné.

On choisit : le vecteur d'état : $x = \begin{bmatrix} i_L \\ \\ V_s \end{bmatrix}$

Donc : $\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{q}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E$

Si nous connaissons i_L et V_s à un instant donné, ainsi que la commande et la tension d'entrée, nous pouvons calculer leurs dérivées et donc déterminer leur évolution.