

CHAPITRE.1 Eléments semi-conducteurs en électronique de puissance

I. INTRODUCTION

L'électronique de puissance est l'ensemble des techniques qui s'intéressent à l'énergie contenue dans les signaux électriques. Elle est l'une des branches de l'électrotechnique qui a pour objet l'étude de la conversion statique d'énergie électrique.

Elle concerne les dispositifs (convertisseurs) permettant de changer la forme de l'énergie électrique. Elle étudie la réalisation, l'utilisation ainsi que la maintenance des composants électronique utilisés en forte puissance. Elle comprend l'étude des structures des convertisseurs, de la commande des convertisseurs et des applications industrielles des convertisseurs.

L'électronique de puissance a pour but de modifier la présentation de l'énergie électrique avec un rendement maximum :

- on transforme l'alternatif en continu : montages redresseurs,
- on transforme le continu en alternatif : montages onduleurs,
- on modifie la valeur efficace d'une tension alternative : montages gradateurs,
- on modifie la valeur moyenne d'une tension continue : montages hacheurs,
- on modifie la fréquence d'une tension alternative : montage cycloconvertisseurs.

II. LES SEMI-CONDUCTEURS DE PUISSANCE

Les principaux constituants d'un système d'électronique de puissance sont les interrupteurs de puissance appelés semi-conducteurs. Ces éléments ont la propriété d'être passants ou bloqués selon des conditions de commandes.

Ces dispositifs doivent travailler dans l'un des états stables suivant :

- état ouvert (ou bloqué) noté OFF
- état fermé (ou passant) noté ON

Le passage d'un état à l'autre, appelé **commutation**.

Les composants de puissance à semi-conducteur peuvent être classés en trois groupes :

- les diodes, composants non commandables, où les états ON et OFF dépendent des grandeurs électriques du circuit,
- les thyristors, composants commandables uniquement à l'amorçage (passage de l'état OFF à l'état ON (à la fermeture)).
- les interrupteurs entièrement commandables : les transistors bipolaires (BJT), les transistors à effet de champ à grille isolée (MOSFET), les transistors hybrides des deux premiers (IGBT), le thyristor commandé à l'ouverture (GTO).

Interrupteur idéal

L'interrupteur idéal est un élément sans dissipation d'énergie.

- chute de tension nulle à l'état fermé;
- courant nul à l'état ouvert;
- énergie dissipée nulle en passant d'un état à l'autre : pas de pertes de commutation.

□ Exemple : Interrupteur idéal sous charge résistive

La figure.1 présente la caractéristique d'un interrupteur idéal. A l'état bloqué (OFF), la résistance d'isolation est infinie et à l'état fermé (ON), la résistance de passage est nulle.

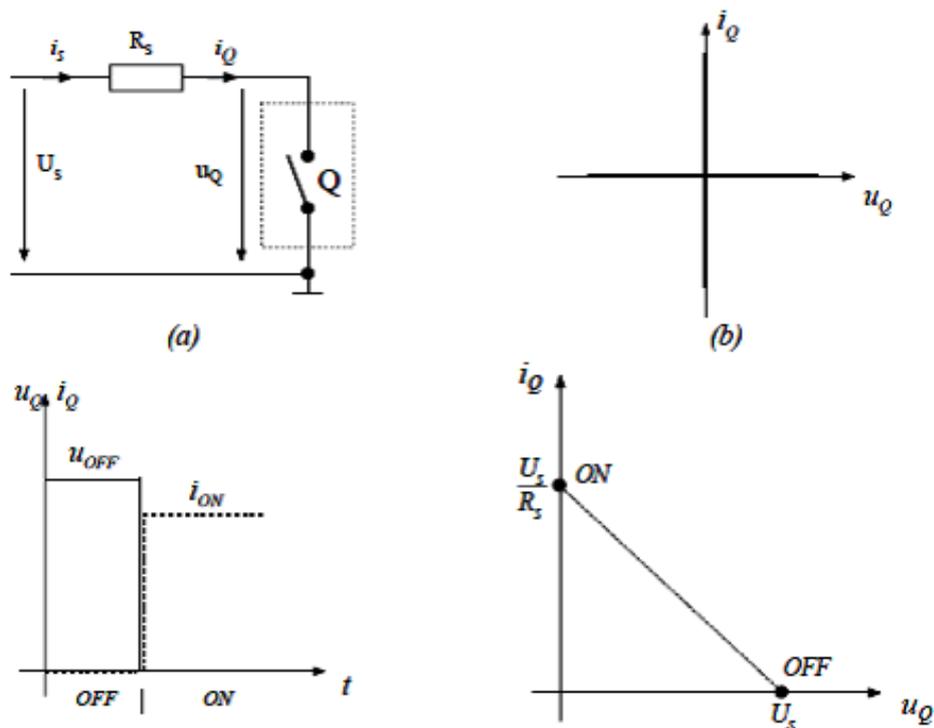


Figure 1 : Représentation schématique d'un interrupteur idéal

Interrupteur ouvert

$$i_{Q(OFF)} = 0$$

$$u_{Q(OFF)} = U_s$$

$$P_{Q(OFF)} = i_{Q(OFF)} \cdot u_{Q(OFF)} = 0$$

Interrupteur fermé

$$i_{Q(ON)} = \frac{U_s}{R_s}$$

$$u_{Q(ON)} = 0$$

$$P_{Q(ON)} = i_{Q(ON)} \cdot u_{Q(ON)} = 0$$

Dans le cas de l'interrupteur idéal, la trajectoire suivie par le point de fonctionnement est telle que la commutation n'induit aucune perte.

II.1 DIODE DE PUISSANCE:

A. STRUCTURE D'UNE DIODE

La mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N (germanium ou silicium) crée une jonction PN qui peut être utilisée pour réaliser la diode, où le semi-conducteur de type N est relié à la cathode K et le semi-conducteur de type P relié à l'anode A.

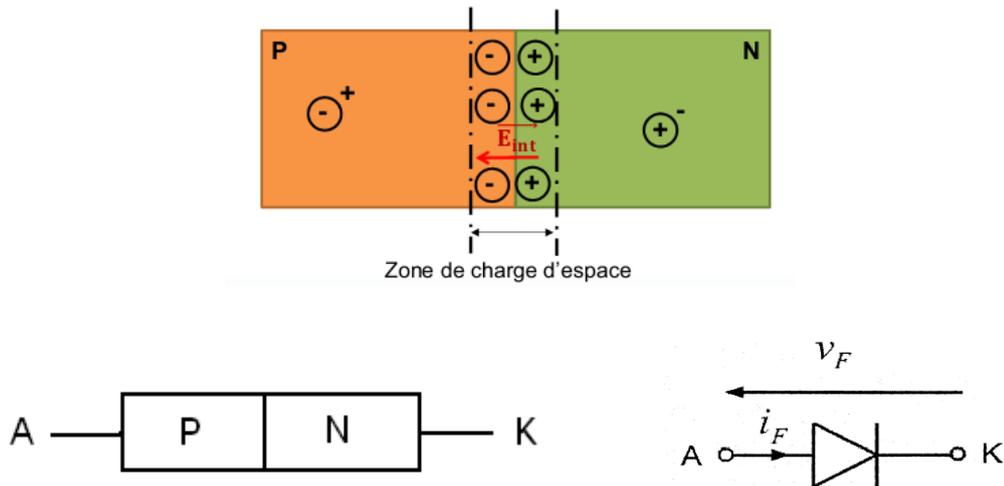


Figure 2: Structure et symbole électrique d'une Diode

La diode est le composant électronique de base. Elle est le composant à semi-conducteurs le plus simple, le moins coûteux et le plus fiable. Elle est un composant unidirectionnel qui n'est pas commandable, ni à la fermeture, ni à l'ouverture, c'est-à-dire qu'elle passe naturellement d'un état à un autre sous certaines conditions de tension à ses bornes.

Polarisation d'une jonction par une fem extérieur :

Polarisation dans le sens direct : le pôle négatif (-) du générateur est relié à la cathode (zone N) et le pôle positif (+) est relié à l'anode (zone P). La barrière de potentiel se réduit et favorisant ainsi le passage des électrons.

Polarisation dans le sens inverse : (+) du générateur est relié à la cathode (zone N) et le (-) à l'anode (zone P). La barrière de potentiel s'élargit et les électrons passent donc difficilement.

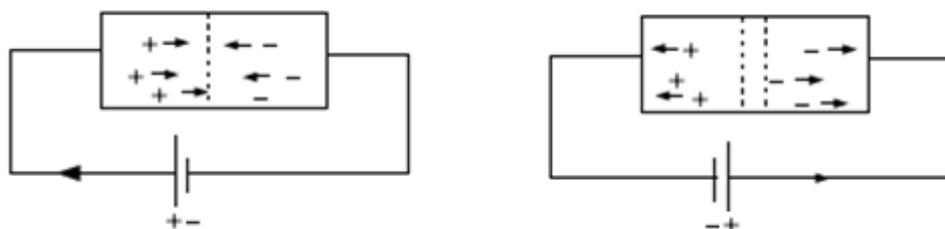


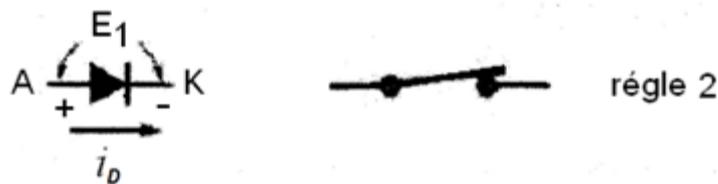
Figure 3 : Polarisation directe et Polarisation inverse

B. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

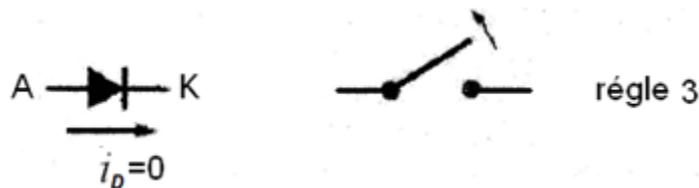
Règle 1. Lorsqu'elle n'est soumise à aucune tension, la diode se comporte comme un interrupteur dont les contacts sont ouverts; le circuit entre les bornes A et K (anode et cathode) est donc ouvert.



Règle 2. Si l'on applique une tension E_1 aux bornes de la diode de sorte que l'anode devienne légèrement positive par rapport à la cathode (entre 0.6 V et 0.7 V), il s'établit immédiatement un court-circuit entre les bornes A et K. La diode agit alors comme un interrupteur dont les contacts sont fermés et un courant i_D commence aussitôt à circuler de l'anode vers la cathode. C'est la polarisation directe.



Règle 3. Aussi longtemps que le courant circule, la diode agit comme un interrupteur fermé. Par ailleurs, dès que le courant cesse de circuler, la diode reprend son état initial et elle se comporte à nouveau comme un interrupteur ouvert. Elle ne recommencera à conduire que si l'on polarise à nouveau l'anode positivement par rapport à la cathode (règle 2).



Règle 4. Lorsqu'on applique une tension aux bornes de la diode de sorte que l'anode soit négative par rapport à la cathode, la diode continue à agir comme un interrupteur ouvert. C'est la polarisation inverse.



En résumé: une diode se comporte comme un interrupteur automatique dont les contacts se ferment dès que l'anode devient légèrement positive par rapport à la cathode, et dont les contacts s'ouvrent dès que le courant qu'elle porte devient nul.

C. CARACTERISTIQUE STATIQUE

C'est la caractéristique globale courant/tension représentée par la figure 4. Cette courbe répond assez bien à la formule suivante :

$$I_D = I_S \left(e^{V_D/U_T} - 1 \right) \quad (1)$$

Avec I_S : courant inverse ou courant de saturation
 U_T : potentiel thermodynamique.

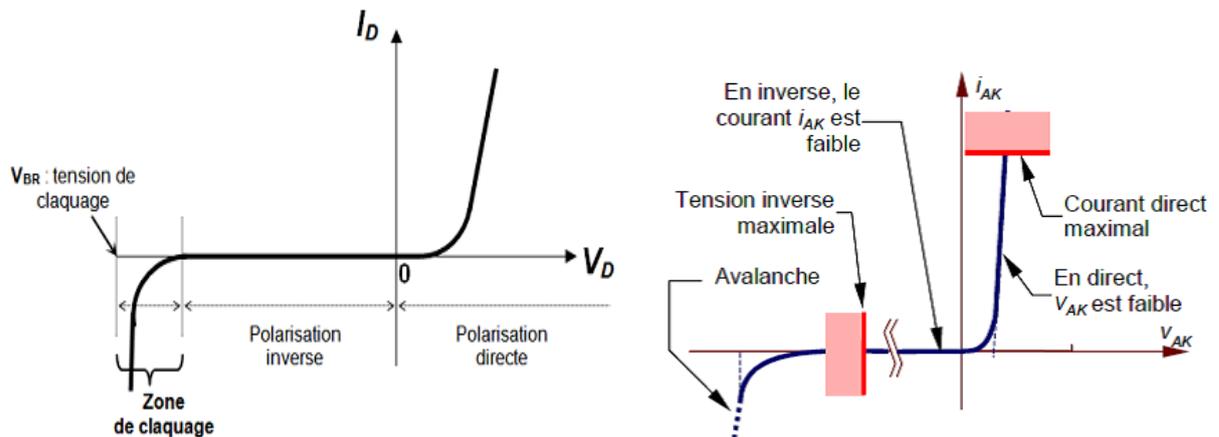


Figure 4: Caractéristique statique d'une diode réelle

□ Etat passant (ou ON)

Au-dessus d'un certain seuil V_o , le courant direct croît très rapidement avec la tension V_D positive. Le seuil V_o (barrière de potentiel) dépend du semi-conducteur intrinsèque de base utilisé. Il est d'environ 0,3V pour le germanium et 0,7V pour le silicium.

□ Etat bloqué (ou OFF)

Lorsque la tension V_D devient négative, la jonction est polarisée en inverse, un courant négatif de faible valeur apparaît (courant de fuite). Ce courant inverse devient égal au courant de saturation. En réalité, il augmente un peu avec la tension inverse. Ce n'est que lorsque la tension inverse atteint la tension de claquage que le courant inverse atteint des valeurs importantes

□ Zone de claquage :

Si la tension inverse (tension $-V_D$) aux bornes de la diode devient trop importante, il y a un risque de destruction de la diode par échauffement de la jonction PN. Les constructeurs précisent la tension de claquage inverse ; elle correspond à la tension maximum que peut supporter une diode en polarisation inverse.

D. SCHEMA EQUIVALENT

La représentation de la diode par la formule (1) (représentée par la figure 4) est un peu complexe pour l'emploi dans la plus part des situations réelles. Plusieurs schémas

équivalents simplifiés peuvent être employés en lieu et place avec profit. Pour établir ces schémas, on « linéarise » plus ou moins grossièrement la caractéristique statique de la diode.

□ **Modélisation n°1 : la diode « idéale »**

La modélisation de la diode consiste à remplacer la caractéristique statique réelle $i = f(v)$ par des segments de droites. A chaque segment de droite correspond un schéma électrique équivalent. Dans ce cas, on néglige la tension de seuil et la résistance interne de la diode. La caractéristique est alors celle de la Figure 5.

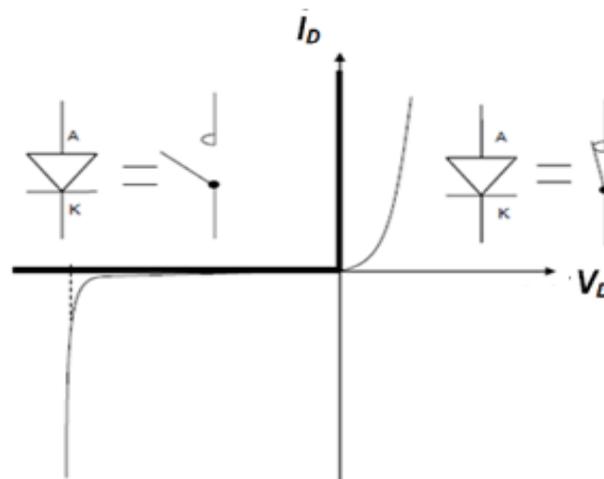


Figure 5: Caractéristique idéale d'une diode

Si $V_{AK} > 0$, l'interrupteur est fermé et le courant anode-cathode passe. Si $V_{AK} < 0$, alors l'interrupteur est ouvert et le courant anode-cathode est nul. Ce schéma est utilisé pour expliquer le principe de fonctionnement des montages ainsi que dans le domaine du redressement ou de la commutation. Si les diodes sont employées dans des circuits où les tensions sont élevées (plus de 10 V) : la tension de coude (0,7 V pour les diodes au Si) est alors négligeable.

- diode passante (ou ON), tension $v_{AK} = 0$ pour $i_{AK} > 0$
- diode bloquée (ou OFF), courant $i_{AK} = 0$ pour $v_{AK} < 0$

C'est un interrupteur automatique qui se ferme dès que $i_{AK} > 0$ et qui s'ouvre dès que $V_{AK} < 0$.

□ **Modélisation n°2 : diode avec seuil**

On peut continuer à négliger la résistance interne, mais tenir compte du seuil de la diode. La caractéristique est alors celle de la Figure 6.

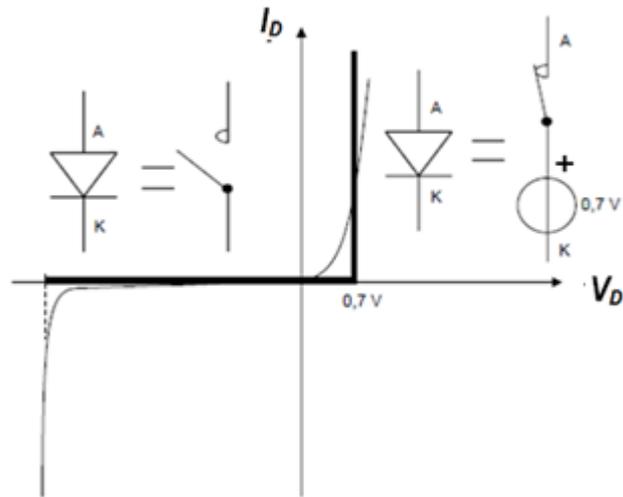


Figure 6: Caractéristique avec seuil

- diode passante (ou ON), tension $v_{AK} = 0.7$ pour $i_{AK} > 0$
- diode bloquée (ou OFF), courant $i_{AK} = 0$ pour $v_{AK} < 0$

Cette f.c.é.m. est de 0,7 V (environ, elle est comprise entre 0,6 et 0,7 V) pour les diodes au silicium. Les diodes au germanium, qui sont rares, ont une f.c.é.m. de 0,3 V. Les diodes électroluminescentes ont des f.c.é.m. variables, avec la longueur d'onde émise, entre 1,3 et 3,8 V.

□ **Modélisation n°3 : diode avec seuil et résistance**

Ici, on prend en compte la résistance de la diode. Ceci peut être utile si on utilise la diode en petits signaux alternatifs et qu'on a besoin de sa résistance dynamique. La caractéristique est alors celle de la Figure 7.

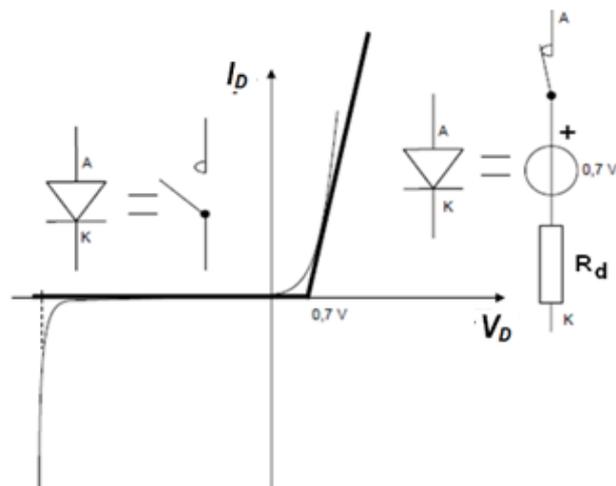


Figure 7: Caractéristique avec seuil et résistance

Sens inverse (bloqué) : la diode est équivalente à un interrupteur ouvert.

Sens passant : la diode peut être modélisée par l'association série d'un générateur de tension, appelé E_0 tension de seuil et d'une résistance R_D (faible). On peut exprimer $v_d = f(i_d)$ sous la forme (2) :

$$V_d = V_{AK} = V_0 + R_D I_D \quad (2)$$

E. LES PERTES

La puissance développée dans la diode du fait des pertes pendant la conduction :

$$p_d(t) = v_d(t) \cdot i_d(t)$$

- **À l'état passant** :

$$P_{Dmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T v_d i_d dt = \frac{E_0}{T} \int_0^T i_d dt + \frac{r_d}{T} \int_0^T i_d^2 dt = E_0 I_{Dmoy} + r_d I_{Def}^2$$

Où I_{Dmoy} : L'intensité moyenne du courant direct.

I_{Def} : L'intensité efficace du courant direct.

- **À l'état bloqué** : puisque $i_d=0$ donc

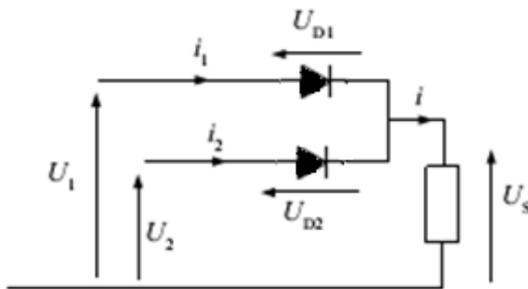
$$P_d = \frac{1}{T} \int_0^T v_d i_d dt = 0$$

Dans le cas idéal, la diode n'induit aucune perte. (soit $i_d=0$ où $v_d=0$)

F. GROUPEMENT DE DIODES

a. groupement de diodes a cathodes communes

Dans un groupement de diodes à cathodes communes, seule la diode dont l'anode est au potentiel le plus élevé est susceptible de conduire.



Hypothèse : $i > 0$ et $U_1 > U_2$

- si D_1 conduit $U_{D1} = 0$ et donc $U_s = U_2$.

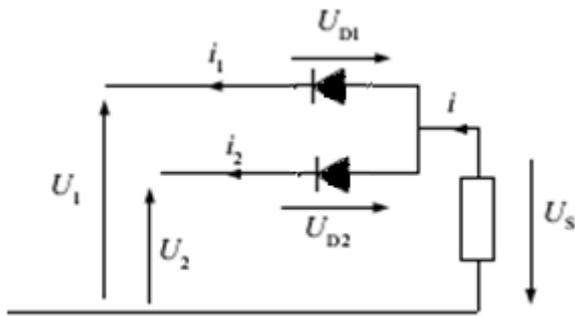
$U_{D2} = U_2 - U_1 < 0$ et la diode D_2 est bloquée.

- si D_2 passante: $U_{D2} = 0$ et $U_{D1} = U_1 - U_2 > 0$ donc D_1 également passante $U_{D1} = 0$

implique $U_1 = U_2$ en contradiction avec l'hypothèse de départ.

b. groupement de diodes a anodes communes

Dans un groupement de diodes à anodes communes, seule la diode dont la cathode est au potentiel le plus bas est susceptible de conduire.



Hypothèse : $i > 0$ et $U_1 > U_2$

- si D_2 conduit $U_{D2} = 0$.

$U_{D1} = U_2 - U_1 < 0$ et la diode D_1 est bloquée.

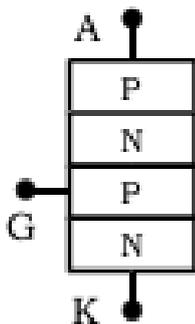
- si D_1 passante: $U_{D1} = 0$ et $U_{D2} = U_1 - U_2 > 0$ donc D_2 également passante $U_{D2} = 0$ implique $U_1 = U_2$ en contradiction avec l'hypothèse de départ.

II.2 THYRISTOR DE PUISSANCE

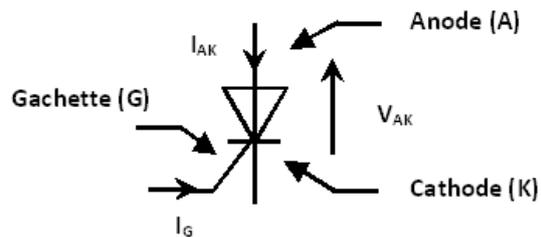
Le thyristor est le premier interrupteur semi-conducteur commandable utilisé en électronique de puissance. Il est un composant électronique **unidirectionnel** (le courant passe dans un seul sens) commandé à la fermeture, mais pas à l'ouverture.

A. STRUCTURE D'UN THYRISTOR

Le thyristor est un dispositif basé sur un empilement de quatre zones alternativement P et N constituant donc une suite de trois jonctions PN.



Structure du thyristor



Symbole du thyristor

Un thyristor comporte trois bornes : l'anode A et la cathode K, entre lesquelles il joue le rôle d'interrupteur, et la gâchette G qui forme avec la cathode l'accès de commande.

B. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le thyristor agit effectivement comme un interrupteur automatique rapide dont les contacts s'ouvrent et se ferment selon les deux modes suivantes :

□ L'état passant (ON) :

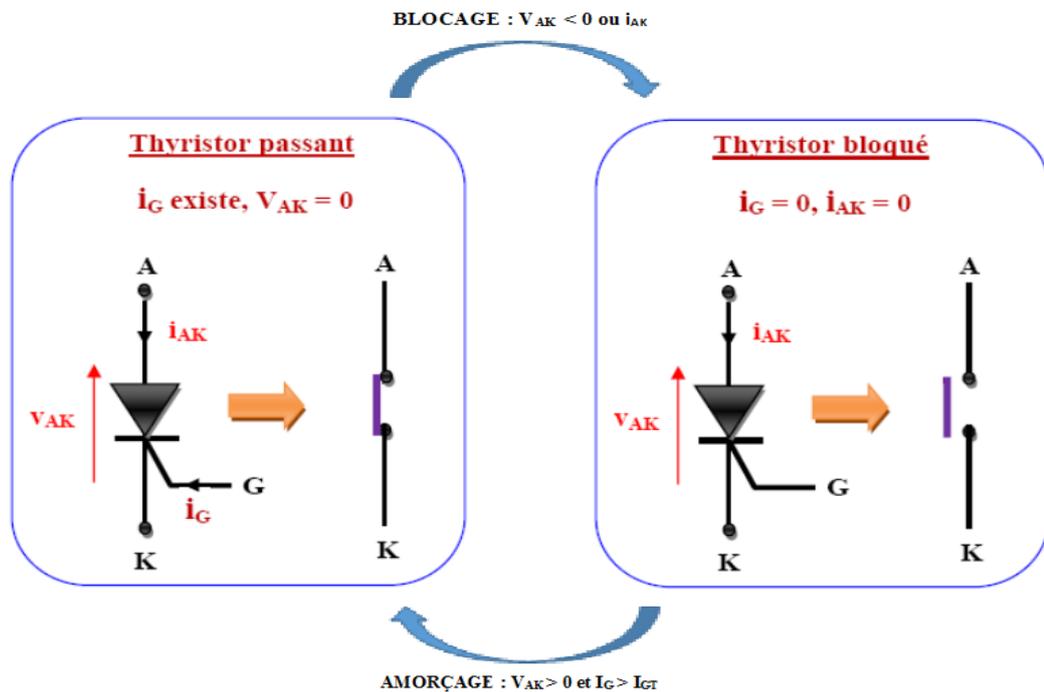
L'amorçage du thyristor est obtenu par un courant de gâchette i_G **positif** d'amplitude suffisante alors que la tension V_{AK} est positive.

Cet état est caractérisé par une tension V_{AK} nulle et un courant i_{AK} positif.

□ L'état bloqué (OFF) :

En distingue deux types de blocage:

- Blocage naturelle par annulation du courant i_{AK} .
- Blocage forcée par inversion de la tension V_{AK} .

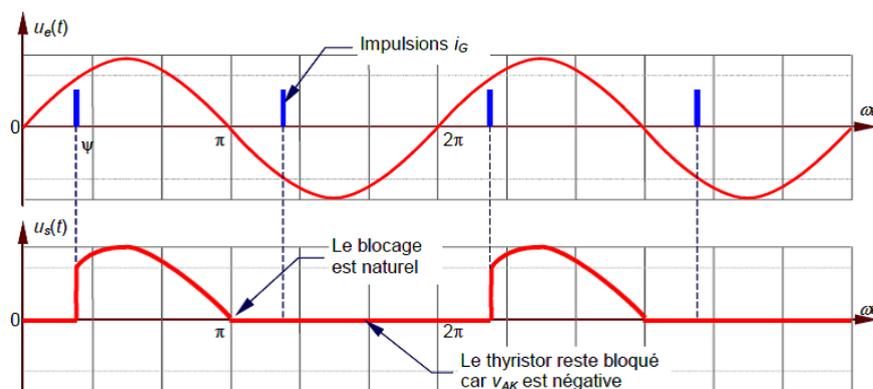
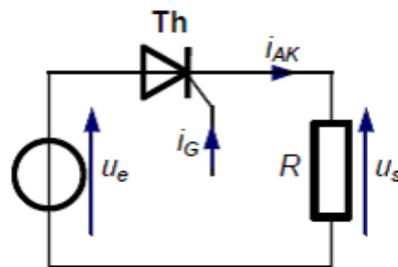


I_{GT} : le courant de gâchette d'amorçage

Blocage par commutation naturelle

Ce blocage intervient par extinction naturelle du courant anode-cathode.

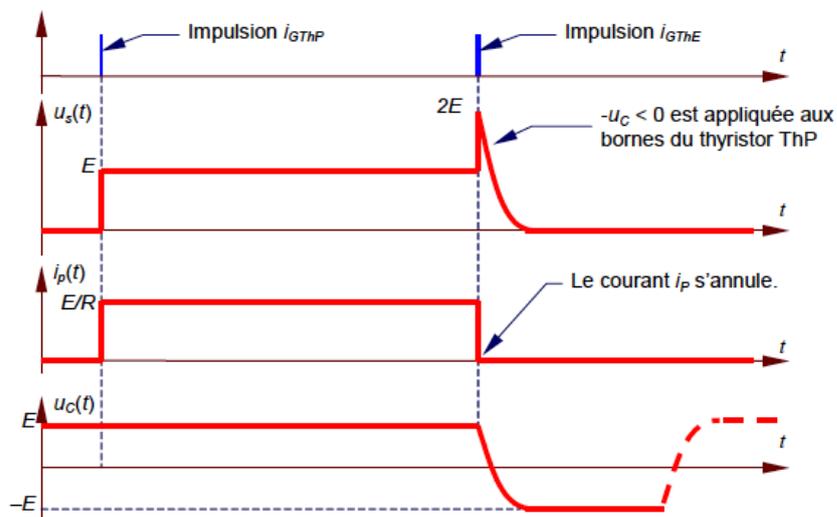
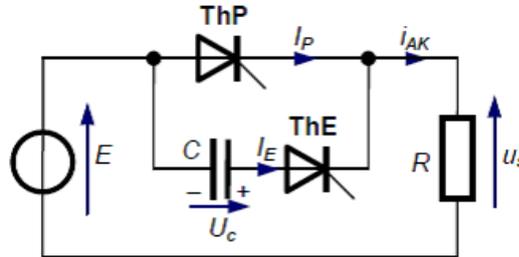
Le montage de la Figure fournit un exemple de commutation.



Chronogrammes illustrant d'une commutation naturelle

Blocage par commutation forcée

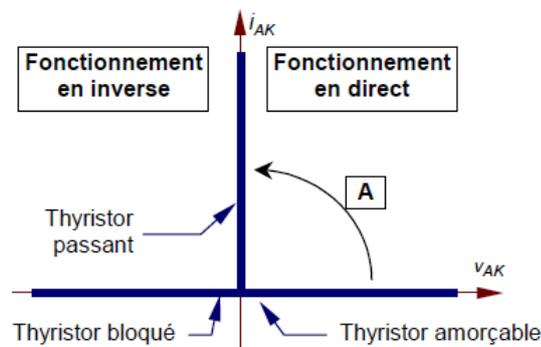
Ce blocage est imposé par la mise en conduction d'un autre composant, qui applique une tension négative aux bornes du thyristor, provoquant donc son extinction. Les deux thyristors sont initialement bloqués. Dès que Th_p est amorcé, il conduit et assure le courant i_p dans la charge.



Chronogrammes issus d'une commutation forcée

C. CARACTERISTIQUE STATIQUE

a) Fonctionnement du composant idéal



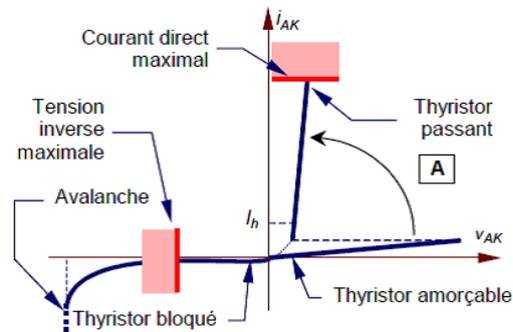
Caractéristique du thyristor idéal.

On peut remarquer que le thyristor, à la différence de la diode, a une caractéristique à trois segments, c'est à dire qu'une des grandeurs est bidirectionnelle (ici la tension).

b) Fonctionnement du composant réel

Le fonctionnement réel est, comme pour une diode, caractérisé par ses deux états:

- à l'état passant, $v_{AK} \approx 0$, le courant direct est limité par le **courant direct maximal**.
- à l'état bloqué, $i_{AK} \approx 0$, la tension inverse est limitée (phénomène de claquage par avalanche) par la **tension inverse maximale**.

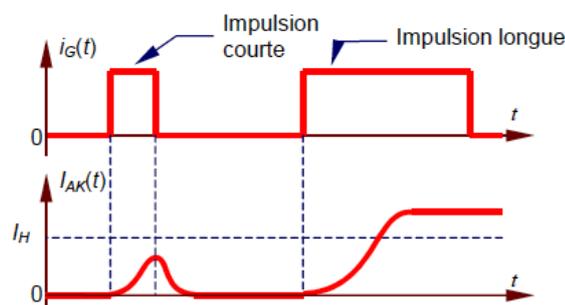


Caractéristique du thyristor réel.

Amorçage

Pour assurer l'amorçage du composant, l'impulsion de gâchette doit se maintenir tant que le courant d'anode n'a pas atteint le courant de maintien I_h .

La largeur de l'impulsion de gâchette dépend donc du type de la charge alimentée par le thyristor. Sa durée sera d'autant plus importante que la charge sera inductive.

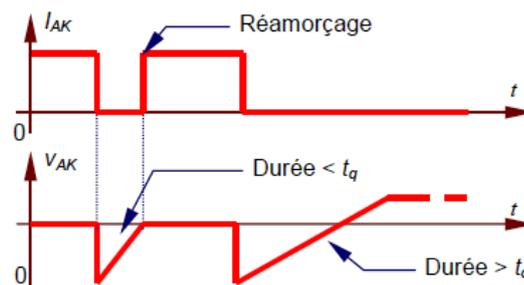


Évolution du courant i_{AK} à l'amorçage.

Blocage

Après annulation du courant i_{AK} , la tension v_{AK} doit devenir négative pendant un temps au moins égal au temps d'application de tension inverse t_q ($t_q \approx 100 \mu s$).

Si ce temps n'est pas respecté, le thyristor risque de se réamorcer spontanément dès que v_{AK} tend à redevenir positive, même durant un court instant.

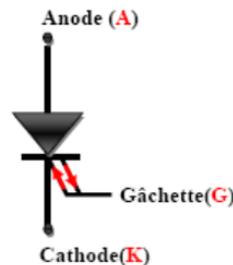


Évolution du courant i_{AK} au blocage.

II.3 THYRISTOR GTO (Gate-Turn-Off)

Le thyristor GTO est un composant commandé à la fermeture et à l'ouverture. Il est une évolution du thyristor classique qui a la propriété de pouvoir **être bloqué à l'aide de la gâchette**, il suffit d'injecter un courant dans la gâchette:

- Positif pour l'amorçage,
- Négatif pour le blocage.

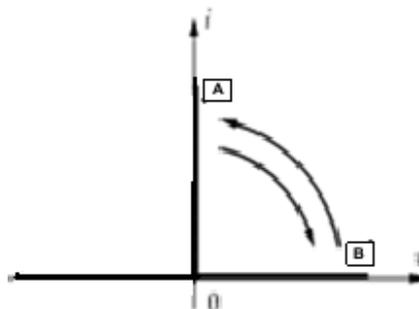


L'état passant (ON) :

Un GTO s'amorce par la gâchette (avec $V_{GK} > 0$) comme un thyristor ordinaire. Le courant de gâchette peut être de quelques ampères. Une fois la conduction amorcée, elle se maintient.

L'état bloqué (OFF) :

Le mode de blocage spécifique du GTO consiste à détourner la quasi-totalité du courant d'anode dans la gâchette. En pratique, on applique donc **une tension négative sur la gâchette** ($V_{GK} < 0$) pour détourner le courant. L'opération doit avoir une durée minimale pour assurer un blocage fiable.



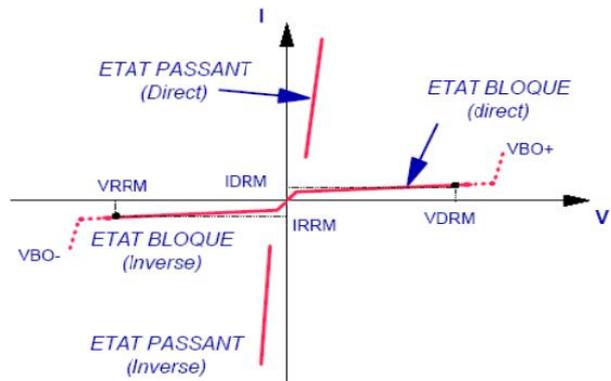
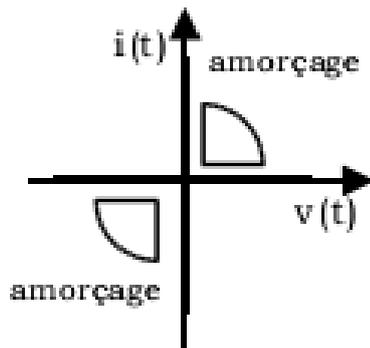
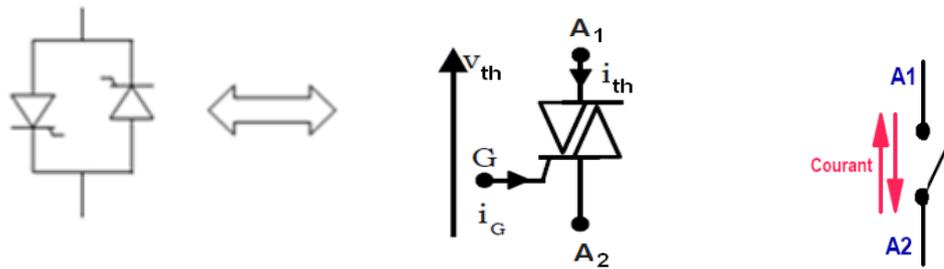
Caractéristiques idéale d'un Thyristor GTO

II.4 TRIAC

Le triac est un composant électronique bidirectionnel (le courant passe dans les deux sens) commandée à la fermeture. C'est équivalent de deux thyristors montés tête-bêche et commandés par une seule gâchette.

Le triac s'amorce par injection ou extraction d'un courant de gâchette suffisant.

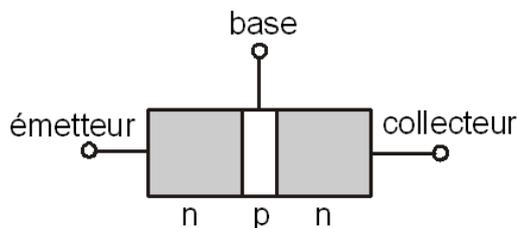
Ensuite, comme les thyristors, il reste à l'état ON tant que le courant $I_{A1 A2}$ reste supérieur au courant de maintien I_h . Dès que le courant $I_{A1 A2}$ est inférieur à I_h le triac redevient un interrupteur ouvert



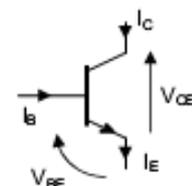
II.5 TRANSISTOR BIPOLAIRE DE PUISSANCE

Structure d'un transistor NPN

- Une couche N fortement dopée constituant l'émetteur.
- Une couche P **très mince** et faiblement dopée constituant la base.
- Une couche N faiblement dopée constituant le collecteur.



Structure du transistor NPN



Symbole du transistor NPN

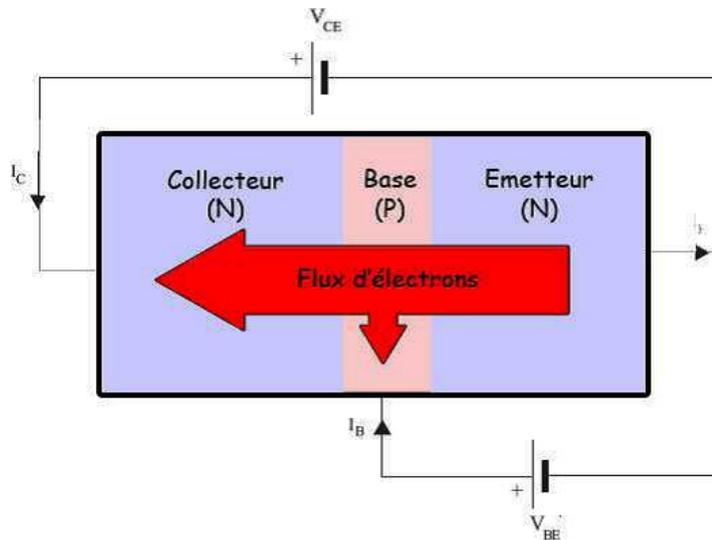
Le transistor est un composant **totalemment commandé** à la fermeture et à l'ouverture. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de sens collecteur-émetteur pour les NPN et de sens émetteur-collecteur pour les PNP. Le transistor bipolaire n'est pas réversible en tension, n'acceptant que des tensions V_{CE} positives lorsqu'il est bloqué.

Le transistor de puissance existe essentiellement dans le type (NPN).

Principe du transistor bipolaire PNP

- **effet Diode** : si le collecteur est ouvert (non connecté) : la jonction PN base-émetteur (BE) est une diode donc le transistor fonction comme une diode.

- **effet transistor** : si le collecteur est fermé (connecté) : BE est polarisée en direct (passante), BC polarisée en inverse tel que $V_C > V_B > V_E$.



$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE},$$

$$I_E = I_B + I_C$$

$$\text{et } I_C = \beta I_B \text{ (avec } \beta \approx 200)$$

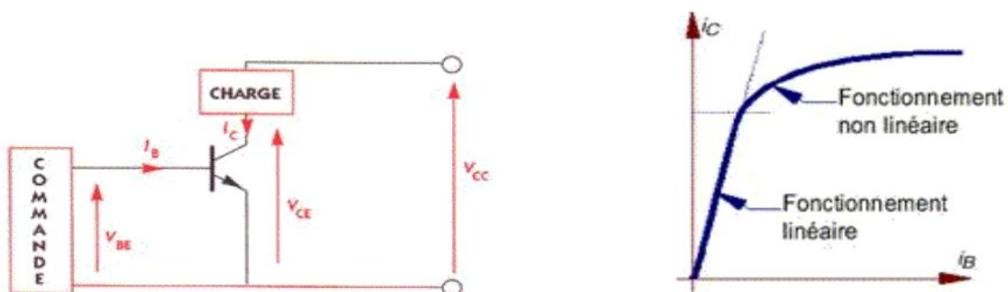
Le transistor bipolaire utilise une commande en courant (i_B). Pour qu'un transistor soit saturé, il faut injecter un courant base-émetteur (NPN) suffisant, c'est-à-dire que l'on doit avoir :

$$I_B > \frac{I_{CEmax}}{\beta}$$

Principe de fonctionnement :

En électronique de puissance, pour des raisons de rendement, le transistor bipolaire est employé uniquement en commutation (bloqué-saturé).

- **Transistor bloqué (B) ou OFF** : état obtenu en annulant le courant i_B de commande, ce qui induit un courant de collecteur nul et une tension V_{CE} égale à la tension de source. L'équivalent d'un commutateur ouvert.
- **Transistor saturé (S) ou ON** : ici, le courant i_B est tel que le transistor impose une tension V_{CE} nulle tandis que le courant i_C atteint une valeur limite dite de saturation, i_{Csat} . L'équivalent d'un commutateur fermé.



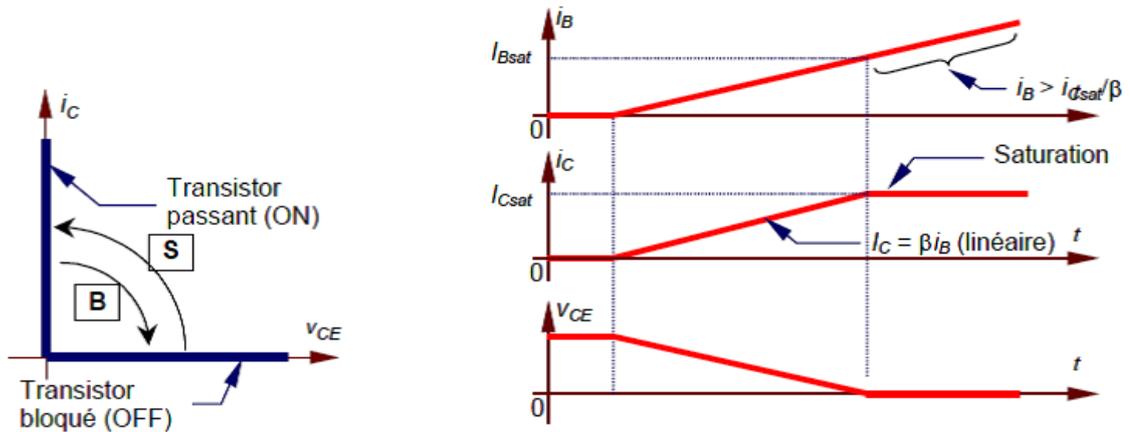
Modes de fonctionnement du transistor :

- $I_B=0$ $I_C=0$ (**commutateur ouvert**), $V_{CE}=V_{cc}$
- $I_B>0$ $I_C= \beta \cdot I_B$ (Amplificateur)
- $I_B \geq I_{Bsat}$ $I_C= I_{Cmax}$ (**commutateur fermé**) $V_{CE}=0V$

Fonctionnement du composant idéal

Transistor bloqué (B) ou OFF : le courant $i_B=0$, induit un courant de collecteur $I_C=0$ et une tension v_{CE} non fixée.

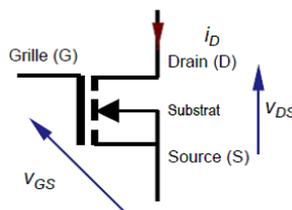
Transistor saturé (S) ou ON : ici, le courant $i_B > 0$, tel que la tension $v_{CE}=0$, et le courant i_C atteint une valeur limite dite de saturation, i_{Csat} .



Caractéristique du transistor idéal

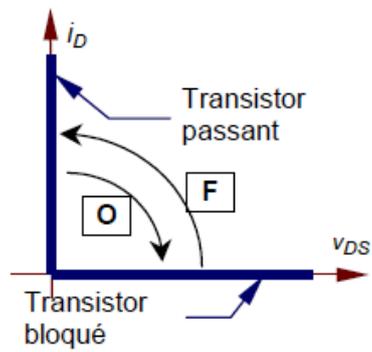
II.6 TRANSISTOR MOS DE PUISSANCE

Le transistor MOS est un composant **totalemtent commandé** à la fermeture et à l'ouverture par la tension (v_{GS}). Il est rendu passant grâce à une tension V_{GS} **positive** (de l'ordre de quelques volts). La grille est isolée du reste du transistor, ce qui procure une impédance grille-source très élevée. La grille n'absorbe donc aucun courant en régime permanent. La jonction drain-source est alors assimilable à une résistance très faible R_{DSon} de quelques $m\Omega$ (**interrupteur fermée**). On le **bloque** en annulant la tension V_{GS} ; R_{DS} devient alors très élevée.

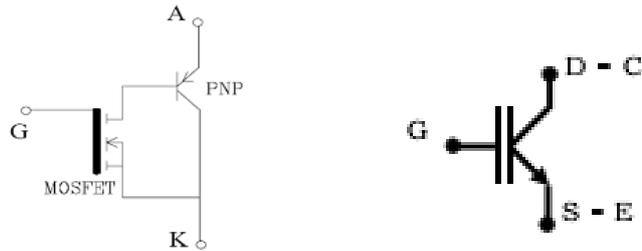


Principe de fonctionnement :

- **Transistor bloqué ou OFF** : L'équivalent d'un commutateur ouvert.
 $V_{GS}=0$ $I_D=0$
- **Transistor saturé ou ON** : L'équivalent d'un commutateur fermé.
 $V_{GS}>0$ $I_D>0$



II.6 TRANSISTOR DE PUISSANCE IGBT



Le transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) est l'association d'un transistor bipolaire (collecteur et émetteur) et d'un transistor MOSFET.

- _ Tension élevée à l'état ouvert (caractéristique BJT),
- Tension faible à l'état fermé (faibles pertes) (caractéristique BJT),
- Facile à commander (caractéristique MOSFET),
- Bonnes performances dynamiques (caractéristique MOSFET).

