

## 12.1.4. Les différents types de sources et de charges

### 12.1.4.1. Les sources

On peut définir les sources comme les dispositifs permettant de fournir l'énergie électrique. On distingue :

- les principales sources alternatives

Parmi elles on peut citer le réseau électrique triphasé, les alternateurs (machine électrique convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique par exemple dans le cas des groupes électrogènes), les alimentations de sécurité (onduleurs), etc.

- les principales sources continues

Parmi les principales on peut citer les dispositifs électrochimiques ((piles, batteries), les génératrices à courant continu, les sorties des redresseurs et des hacheurs (ou des alimentations à découpage).

### 12.1.4.2. Les charges

Il s'agira généralement de moteurs électriques (alternatifs ou continus) et de divers appareils électriques (résistances, lampes, bobines, etc.).

## 12.2. Les interrupteurs en électronique de puissance.

### 12.2.1. Généralités

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

L'utilisation d'interrupteurs à semi-conducteurs permet d'obtenir des convertisseurs statiques présentant de nombreux avantages sur les groupes tournants : entretien réduit, temps de réponse plus courts et surtout spectre d'applications beaucoup plus large.

On classe les interrupteurs en utilisant un diagramme sur lequel est tracée leur caractéristique. Lorsqu'un interrupteur est fermé (on dit aussi passant), il laisse passer le courant et la tension à ses bornes est nulle ; lorsqu'il est ouvert (ou bloqué), il ne laisse passer aucun courant et la tension à ses bornes est non nulle. Un interrupteur idéal laisse passer tous les courants, positifs ou négatifs, lorsqu'il est fermé, et accepte toute tension à ses bornes quand il est ouvert. En notant  $i_k$  et  $v_k$  respectivement le courant qui le traverse et la tension à ses bornes, la caractéristique de l'interrupteur idéal est représentée par la figure suivante :

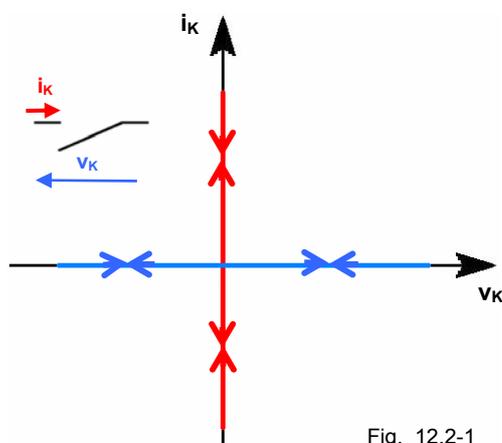


Fig. 12.2-1

Elle comporte 4 segments. Chacun des quatre secteurs délimités par les axes des abscisses et des ordonnées est appelé quadrant.

Il existe des interrupteurs à 2, 3 ou 4 segments dont la fermeture (ou amorçage) ou l'ouverture (ou blocage) peut être commandée ou non par l'opérateur.

Dans le cas d'une action commandée, le changement d'état est provoqué par un signal électrique extérieur, une impulsion ou un niveau de tension ou de courant.

Si elle n'est pas commandée, on parle de fonctionnement spontané (suite à l'annulation ou au changement de signe d'une tension ou d'un courant par exemple).

Le changement d'état d'un interrupteur est appelé commutation.

En pratique, les interrupteurs sont réalisés à partir de semi-conducteurs fonctionnant en commutation. En électronique de puissance, ce sont les diodes, les thyristors, les triacs, les GTO, les transistors (bipolaires, MOS, IGBT, etc.). Ces composants fonctionnent exclusivement en régime de commutation dans les applications de convertisseurs statiques.

Dans ce chapitre, nous rappellerons succinctement les caractéristiques principales de ces composants, nous laissons le soin au lecteur de ce reporter au chapitre 5 de cet ouvrage pour approfondir le fonctionnement de ces composants.

## 12.2.2. La diode de puissance

### 12.2.2.1. Présentation

La diode de puissance, dont le symbole électrique est représenté par la figure ci-dessous, est un composant non commandable (ni à la fermeture ni à l'ouverture).

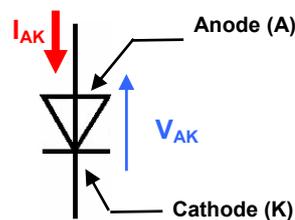


Fig. 12.2-2

La mise en conduction et le blocage résultent de causes extérieures (tension anode-cathode positive pour la mise en conduction, annulation du courant pour le blocage).

Elle n'est pas réversible en tension et ne supporte qu'une tension anode-cathode négative ( $V_{AK} < 0$ ) à l'état bloqué.

Elle n'est pas réversible en courant et ne supporte qu'un courant dans le sens anode-cathode positif à l'état passant ( $I_{AK} > 0$ ).

### 12.2.2.2. Caractéristiques principales du composant parfait

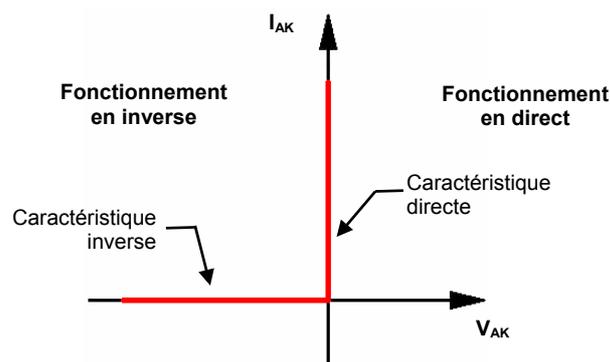


Fig. 12.2-3

Le fonctionnement de la diode s'opère suivant deux modes :

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

On dit aussi que la diode a une caractéristique à **deux segments**.

En résumé, une diode idéale se comporte comme un interrupteur parfait dont les commutations sont exclusivement spontanées :

- il est fermé (état ON) tant que le courant qui le traverse est positif.
- il est ouvert (état OFF) tant que la tension à ses bornes est négative.

### 12.2.2.3. Caractéristiques principales du composant réel

La caractéristique courant/tension de la diode a la forme dissymétrique suivante :

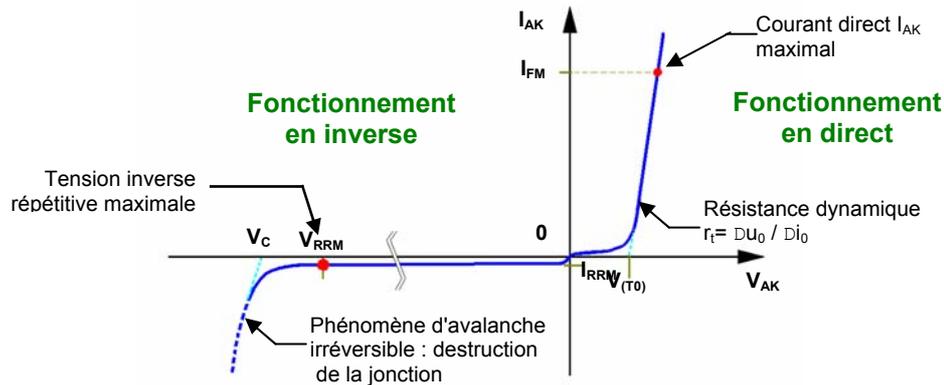


Fig. 12.2-4

Le fonctionnement réel est donc toujours caractérisé par les deux états :

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

### 12.2.2.4. Critères de choix d'une diode

Avant tout dimensionnement en vue de choisir les composants, l'étude du fonctionnement de la structure de conversion d'énergie permet de tracer les chronogrammes de  $V_{AK}$  et  $I_{AK}$ .

Ce sont les valeurs extrêmes de ces grandeurs qui sont prises en considération :

- la **tension inverse** de  $V_{AK}$  à l'état bloqué ;
- le **courant moyen** de  $I_{AK}$  ( $< I_{AK} >$ ) à l'état passant ;
- éventuellement, le **courant maximal répétitif** (sans durée prolongée).

Par sécurité de dimensionnement, on applique un coefficient de sécurité (de 1,2 à 2 selon les applications) à ces grandeurs. C'est avec ces valeurs que le choix du composant est réalisé.

## 12.2.3. Le thyristor

### 12.2.3.1. Présentation

Le thyristor est un composant commandé à la fermeture, mais **pas à l'ouverture**. Il est réversible en tension et supporte des tensions  $V_{AK}$  aussi bien positives que négatives.

Il n'est pas réversible en courant et ne permet que des courants  $I_{AK}$  positifs, c'est à dire dans le sens anode-cathode, à l'état passant.

Son allumage n'est possible que si la tension anode-cathode est positive et si le composant est normalement allumé par l'application d'une impulsion de courant entrant par la gâchette.

Le thyristor est représenté schématiquement par la figure ci-dessous :

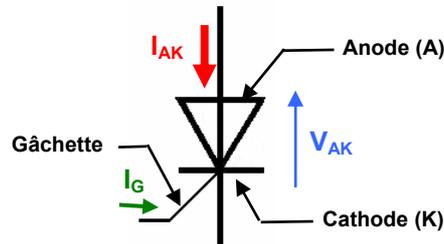


Fig. 12.2-5

### 12.2.3.2. Fonctionnement et caractéristiques principales du composant parfait

Le composant est **bloqué** (état OFF) si le courant  $I_{AK}$  est nul (quelque soit la tension  $V_{AK}$ ). Si la tension  $V_{AK}$  est positive, le thyristor est **amorçable**.

L'**amorçage** (A) est obtenu par un courant de gâchette  $I_G$  positif d'amplitude suffisante alors que la tension  $V_{AK}$  est positive.

L'état **passant** (ON) est caractérisé par une tension  $V_{AK}$  nulle et un courant  $I_{AK}$  positif.

Le **blocage** du thyristor apparaît dès l'annulation du courant  $I_{AK}$ . On ne peut pas commander ce changement, mais on en distingue deux types : La **commutation naturelle** par annulation du courant  $I_{AK}$  ou la **commutation forcée** par inversion de la tension  $V_{AK}$ .

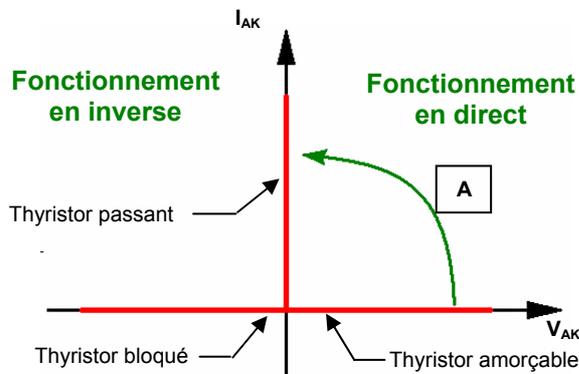


Fig. 12.2-6

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).

### 12.2.3.3. Blocage par commutation naturelle

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

La figure 12.2.7 ci-dessous illustre un exemple de montage élémentaire avec commutation naturelle

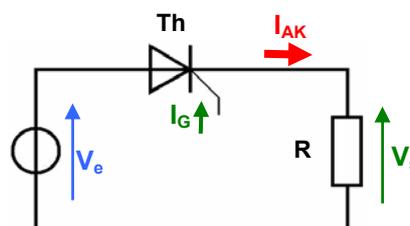


Fig. 12.2-7

Le montage de la figure 12.2-7 se traduit par les chronogrammes suivants :

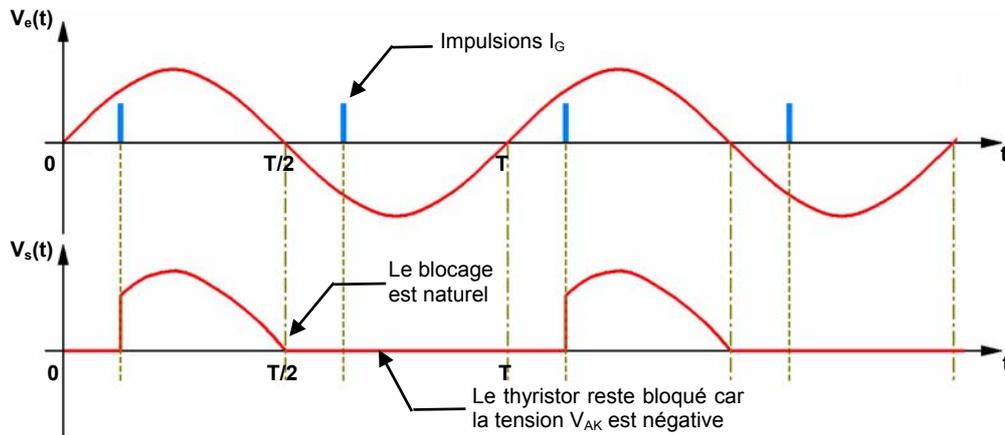


Fig. 12.2-8

#### 12.2.3.4. Blocage par commutation forcée

Lorsque le thyristor est alimenté par une source de courant continu, son blocage est imposé par la mise en conduction d'un autre composant, qui applique une tension négative aux bornes anode cathode du thyristor, provoquant ainsi son extinction.

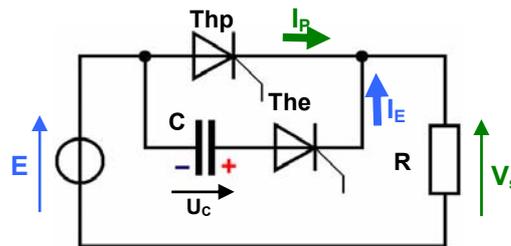


Fig. 12.2-9

Les deux thyristors sont initialement bloqués. Dès que **Thp** est amorcé, il conduit et assure le courant  $i_p$  dans la charge.

Dès l'amorçage de **The**, la tension  $v_{AK} = -U_C$  est donc négative et bloque **The**.

Le chronogramme ci-dessous illustre les évolutions des diverses tensions et courants d'un tel montage.

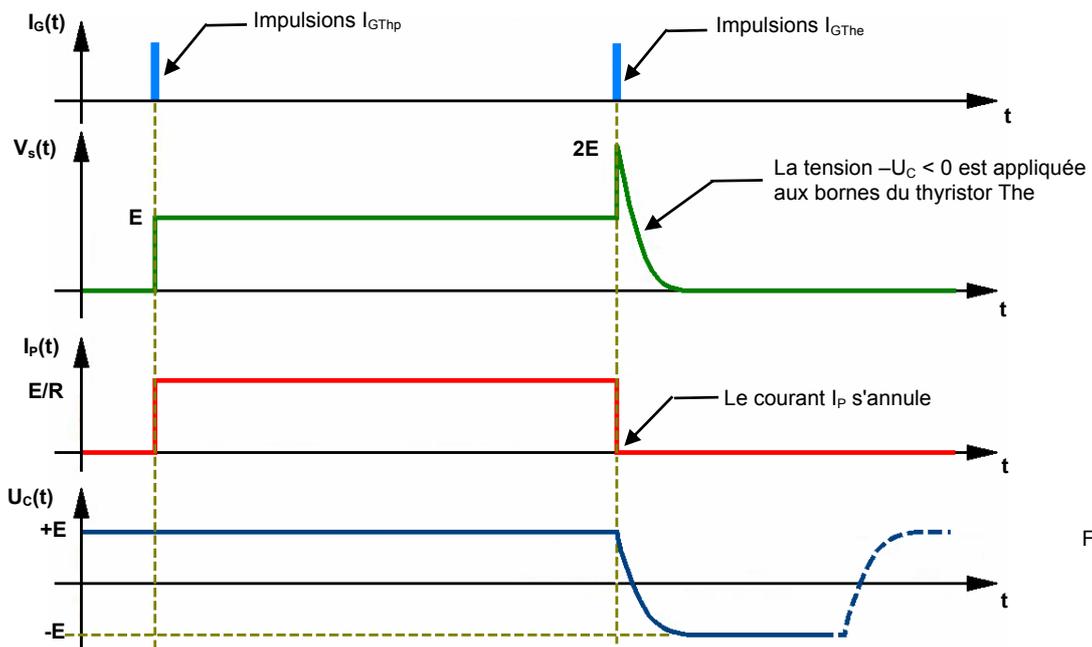


Fig. 12.2-10

### 12.2.3.5. Fonctionnement et caractéristiques principales du composant réel

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

- à l'état passant, nous avons  $V_{AK} \approx 0$ , et le courant direct doit être limité par le **courant direct maximal** que peut supporter le composant.
- à l'état bloqué,  $I_{AK} \approx 0$ , la tension inverse est limitée (phénomène de claquage par avalanche) par la **tension inverse maximale** supportable sans destruction de la jonction.

La caractéristique statique du thyristor est représentée par la figure ci-dessous.

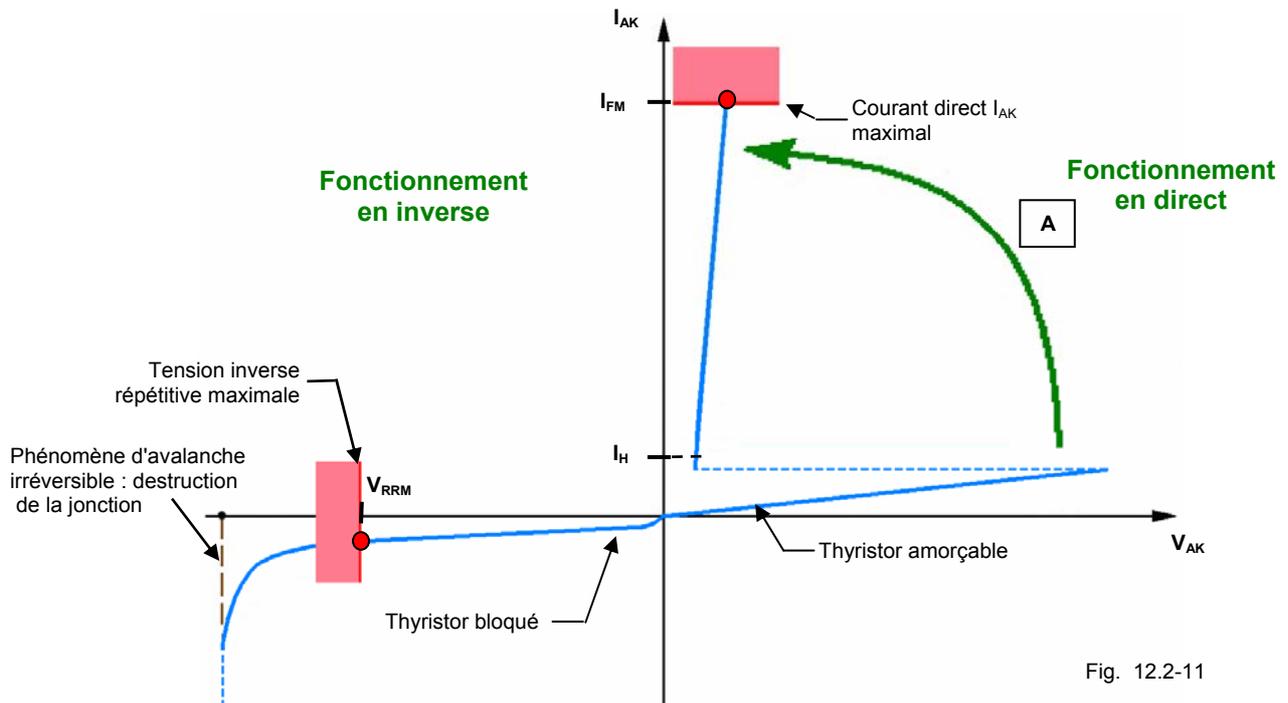


Fig. 12.2-11

### 12.2.3.6. 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  $I_H$  (Holding current).

La largeur de l'impulsion de gâchette dépend donc du **type de la charge** alimentée par le thyristor. Sa durée devra en conséquence être d'autant plus importante que la charge sera inductive pour que le courant anode-cathode se maintienne. La figure ci-après montre ce phénomène.

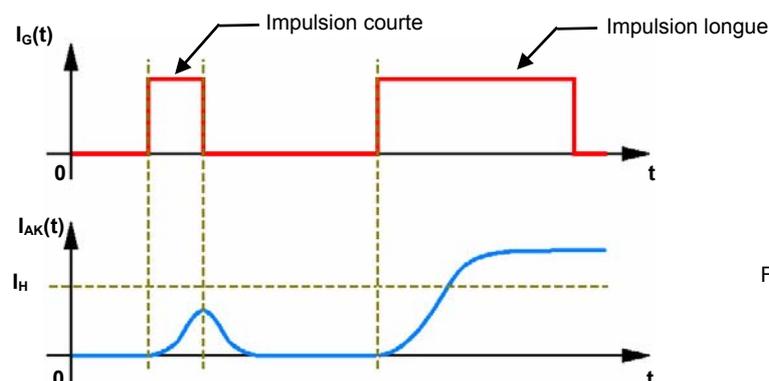


Fig. 12.2-12

### 12.2.3.7. 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 (Fig. 12.2.3.13).

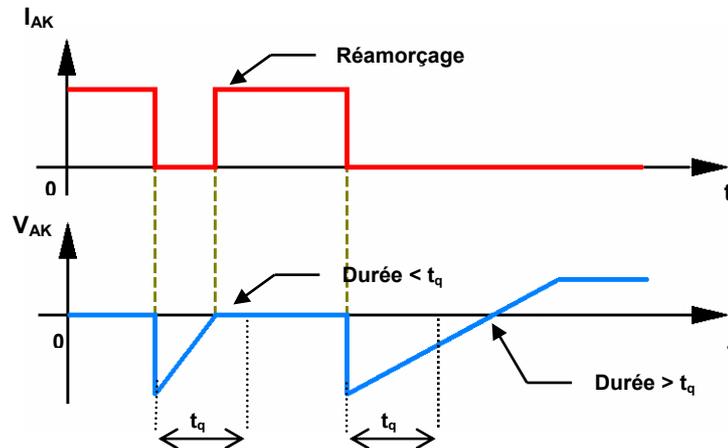


Fig. 12.2-13

### 12.2.3.8. Critères de choix d'un thyristor

Après avoir établi les chronogrammes de fonctionnement du thyristor ( $V_{AK}$  et  $I_{AK}$ ) dans le système envisagé, on calcule les valeurs extrêmes prises par :

- la **tension inverse**  $V_{RRM}$  ou directe  $V_{DRM}$  maximale de  $V_{AK}$  (à l'état bloqué);
- le **courant moyen**  $I_0$  ( $= < I_{AK} >$  à l'état passant);
- le **courant efficace**  $I_{AKeff}$  (à l'état passant).

De la même manière que la diode, on applique un coefficient de sécurité (de 1,2 à 2) à ces grandeurs. C'est avec ces valeurs que le choix du composant est réalisé en y ajoutant souvent des caractéristiques dynamiques telles que la tenue en  $dV/dt$  et le  $t_q$ .

## 12.2.4. Le transistor bipolaire de puissance

### 12.2.4.1. Présentation

Le transistor bipolaire est un composant totalement commandé à la fermeture et à l'ouverture par l'intermédiaire du courant de base. Il n'est **pas réversible en courant**, ne laissant passer que des courants de collecteur  $I_C$  positifs. Il n'est **pas réversible en tension**, n'acceptant que des tensions  $V_{CE}$  positives lorsqu'il est bloqué.

Parmi les deux types, NPN et PNP, le transistor de puissance existe essentiellement dans la première catégorie dont le symbole est représenté par la figure ci-contre.

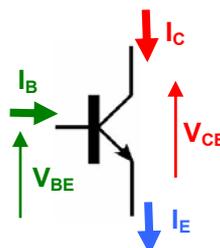


Fig. 12.2-14

### 12.2.4.2. Fonctionnement du composant parfait

Le transistor possède deux types de fonctionnement :

- le mode en commutation (ou non linéaire) qui est employé en électronique de puissance,
- et le mode de fonctionnement linéaire qui est plutôt utilisé en amplification de signaux.

Dans son mode de fonctionnement linéaire, le transistor se comporte comme une **source de courant**  $I_C$  commandée par le courant  $I_B$ . Dans ce cas, la tension  $V_{CE}$  est imposée par le circuit extérieur.

La figure ci-dessous propose l'évolution des grandeurs entre le blocage, le fonctionnement linéaire et la saturation.

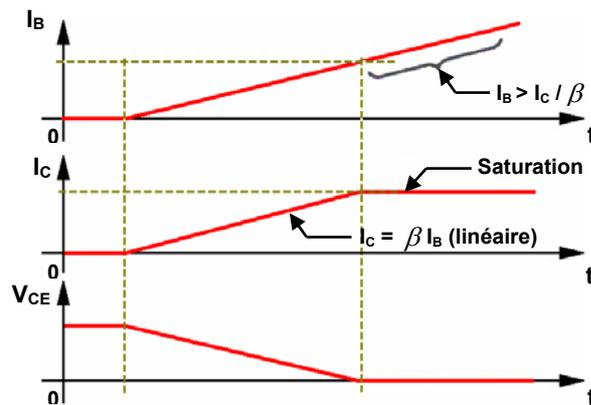


Fig. 12.2-15

#### Fonctionnement et états du transistor

La caractéristique statique idéalisée d'un transistor fonctionnant en commutation est représentée par la figure ci-dessous :

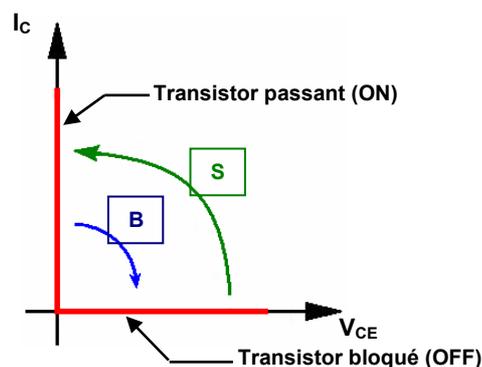


Fig. 12.2-16

La caractéristique ainsi représentée comporte deux états stables de fonctionnement :

- **Transistor bloqué (B) ou OFF** : cet état est obtenu en annulant le courant  $I_B$  de commande, ce qui induit un courant de collecteur nul et une tension  $V_{CE}$  non fixée. Le fonctionnement est équivalent à celui d'un interrupteur ouvert.
- **Transistor saturé (S) ou ON** : dans ce cas, 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,  $I_{Csat}$ . Le fonctionnement est alors équivalent à celui d'un interrupteur fermé.

Le transistor est un composant « deux segments » en raison de la forme de sa caractéristique.

### 12.2.4.3. Composant réel et limites de fonctionnement

Le composant réel subit quelques différences par rapport à l'élément parfait.

#### A l'état saturé

- le transistor est limité en puissance : courbe limite dans le plan ( $V_{CE}$ ,  $I_C$ ), l'hyperbole de dissipation maximale;
- le courant maximal moyen de collecteur est donc lui aussi limité ( $I_{Cmax}$ );
- la tension  $V_{CE}$  n'est pas tout à fait nulle ( $V_{CEsat} \neq 0$ ).

#### A l'état bloqué

- la tension  $V_{CE}$  ne peut dépasser une tension ( $V_{CE0}$ ) qui provoquerait de claquage de la jonction ;
- un courant résiduel dû aux porteurs minoritaires circule dans le collecteur ( $I_{CB0}$ ).

### 12.2.4.4. Critères de choix d'un transistor

Après avoir établi les chronogrammes de fonctionnement ( $V_{CE}$  et  $I_C$ ), on calcule les valeurs extrêmes prises par :

- la tension  $V_{CE}$  (à l'état bloqué) ;
- le courant maxi  $I_C$  (à l'état saturé).

Par sécurité de dimensionnement, en fonction des applications, on applique un coefficient de sécurité (1,2 à 2) à ces valeurs afin qu'elles soient supportées sans dommage par le composant choisi.

On doit ensuite déterminer le courant de base  $I_B$  ( $> I_C / \beta$ ) que doit délivrer la commande.

### 12.2.4.5. Commutation du transistor

En régime dynamique, le passage de l'état saturé à l'état bloqué (ou inversement) d'un transistor ne s'effectue jamais instantanément. Ce phénomène doit être systématiquement étudié si les commutations sont fréquentes (fonctionnement en haute fréquence), car l'existence simultanée d'un courant et d'une tension aux bornes de l'interrupteur engendre des pertes qui sont souvent prépondérantes.

La figure ci-dessous représente les évolutions temporelles de ces paramètres.

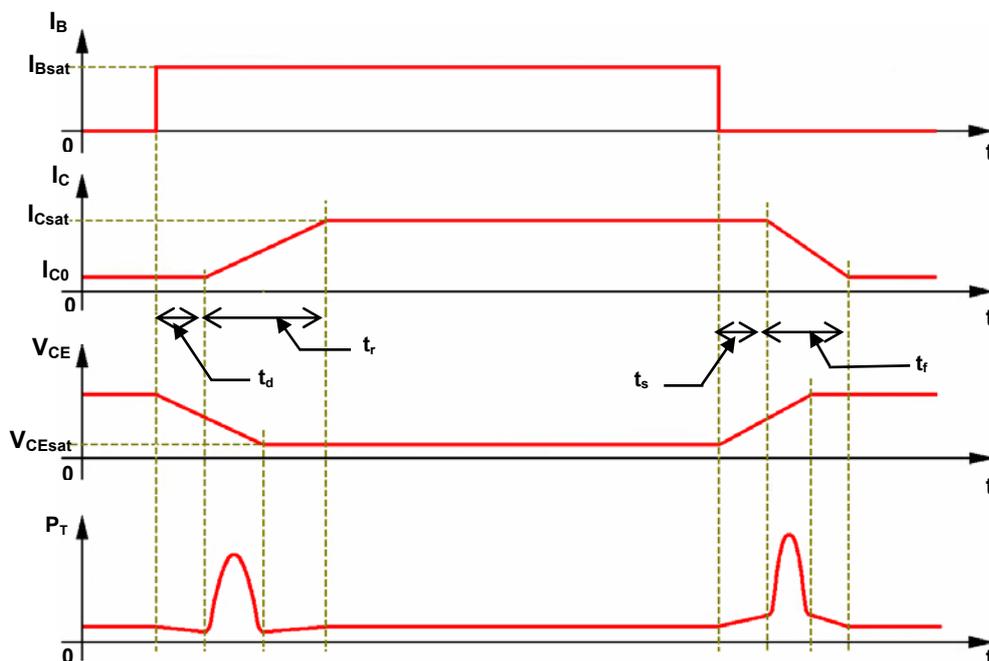


Fig. 12.2-17

Sur la figure 12.2-17 précédente nous pouvons effectuer les constatations suivantes :

➤ A la fermeture

Un retard de croissance de  $I_C$  apparaît à la saturation. Le constructeur indique le temps de retard (*delay time*) noté  $t_d$  et le temps de croissance (*rise time*) noté  $t_r$ .

La tension  $V_{CE}$  est alors imposée par le circuit extérieur (charge, alimentation) et par l'allure de  $I_C$ .

➤ A l'ouverture

Le courant de collecteur  $I_C$  ne s'annule pas instantanément. Le constructeur indique le temps de stockage (*storage time*), noté  $t_s$ , correspondant à l'évacuation des charges stockées (ce temps dépend du coefficient de saturation  $\beta \cdot I_E / I_{Csat}$ ) et le temps de descente (*fall time*) noté  $t_f$ .

Remarque : dans la pratique, les courants évoluent de manière plutôt « arrondie ». Pour en tenir compte, les temps sont référencés par rapport à 10% et 90% du maximum.

➤ Les pertes dans le transistor

L'allure des tension et courant permettent de déduire la forme de la puissance dissipée par le transistor. Durant les périodes de conduction, la puissance dissipée est constante. Elle participe aux **pertes en conduction** qui sont sensiblement constantes. Les légères pentes de la puissance durant  $t_d$  et  $t_s$  ne sont que rarement prises en compte, on considère alors cette puissance participe aux pertes en conduction. Pendant les commutations la puissance est une succession de paraboles. Cela constitue les **pertes en commutation** qui sont d'autant plus importantes que la fréquence est élevée.

## 12.2.5. Le transistor MOS et MOSFET de puissance

### 12.2.5.1. Présentation

Le transistor MOS, comme le transistor bipolaire, est un composant totalement commandé : à la fermeture et à l'ouverture.

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 dont la valeur  $R_{DSon}$  ne fait que quelques  $m\Omega$ .

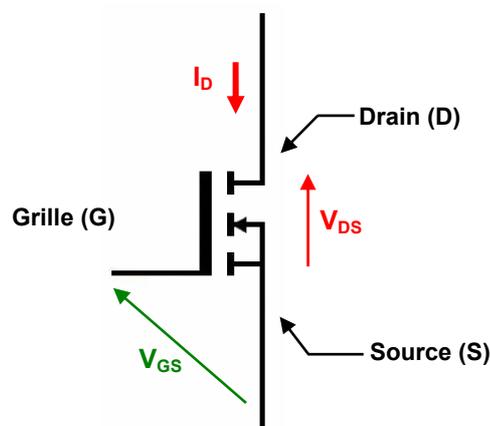


Fig. 12.2-18

On le bloque en annulant  $V_{GS}$ ,  $R_{DS}$  devient alors très élevée.

### 12.2.5.2. Fonctionnement et modèles du composant parfait

On utilise souvent, la caractéristique statique idéale qui est pour un transistor MOS canal N, représentée par la figure suivante:

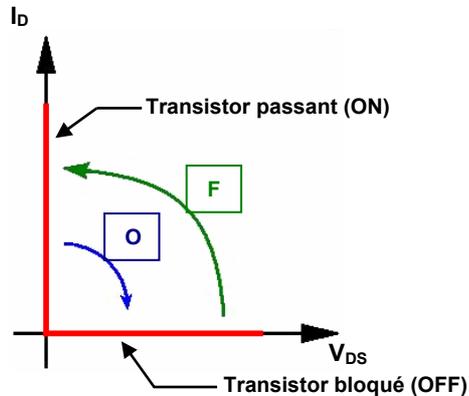


Fig. 12.2-19

- **Transistor ouvert (OFF)** : cet état est obtenu en annulant la tension  $V_{GS}$  de commande, procurant une impédance drain-source  $R_{DS}$  très élevée, ce qui annule le courant de drain  $I_D$ . La tension  $V_{DS}$  est fixée par le circuit extérieur.

L'équivalent fonctionnel est un interrupteur ouvert.

- **Transistor fermé (ON)** : Une tension de grille  $V_{GS}$  positive rend l'impédance drain-source  $R_{DS}$  très faible et permet au courant  $I_D$  de croître

L'équivalent fonctionnel est un interrupteur fermé.

#### Remarque

A l'instar du transistor bipolaire, le transistor MOS possède également un mode de fonctionnement linéaire mais qui n'est pas utilisé en électronique de puissance. Il se comporte alors comme une résistance ( $R_{DS}$ ) commandée en tension ( $V_{GS}$ ).

### 12.2.5.3. Limites de fonctionnement

Elles sont comparables à celles des transistors bipolaires.

De par sa technologie, le transistor MOS est entaché de moins de défauts que le transistor bipolaire. Les grandes différences sont :

- Une commande en tension plus simple à réaliser. En régime statique, le courant de grille est quasi nul. Il n'apparaît que durant les commutations car la capacité de la jonction grille-source impose des charges dans le circuit de grille ;
- Peu de charges stockées car la technologie n'est pas bipolaire. En conséquence, en régime de commutations, seules les durées  $t_r$  et  $t_f$  sont influentes ;

### 12.2.5.4. Circuits de puissance à transistors MOS

Les interfaces associées aux transistors MOS sont beaucoup plus simples à réaliser que celles pour les transistors bipolaires, car les transistors MOS sont commandés en tension (le courant de grille très faible est sans influence). Ils peuvent donc être directement commandés par un simple circuit numérique en logique TTL ou CMOS.

Les seuls problèmes qui apparaissent sont liés aux potentiels de source élevés ou flottants. Les solutions adoptées sont les mêmes que pour les transistors bipolaires (opto-coupleurs).

## 12.2.6. Le transistor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

### 12.2.6.1. Présentation

Le transistor IGBT est un transistor hybride à commande MOS en tension dont le circuit de puissance est bipolaire.

Le symbole électrique et son équivalent fonctionnel sont représentés par la figure ci-dessous.

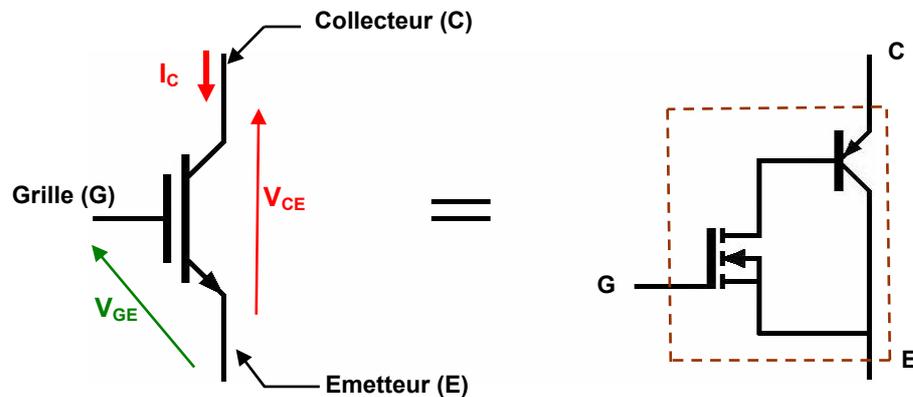


Fig. 12.2-20

De par sa structure particulière, le transistor IGBT représente un compromis entre les différents avantages du MOS et du bipolaire:

- Comme le transistor bipolaire, le transistor IGBT présente une chute de tension à l'état passant ( $V_{CEsat}$ ) une tension à l'état faible, même pour des tensions bloquées importantes (par exemple,  $V_{On}$  de l'ordre de 2 à 3V pour des tensions bloquées supérieures à 1000V).
- Par contre, il a un comportement similaire au MOSFET, car l'IGBT possède une impédance de grille importante, autorisant une commutation avec un faible apport d'énergie, d'où une absence de relation entre le courant commuté et l'énergie nécessaire à la commande.

Ses caractéristiques de sortie sont reprises de celles du transistor bipolaire :  $V_{CEsat}$  et  $I_{Csat}$ .

Les transistors IGBT présentent des temps de commutation de l'ordre de la microseconde et sont disponibles pour des tensions et courants de l'ordre de 3000V et 1200A respectivement.

#### Remarque

Chaque commutation exerce des contraintes sur le semi-conducteur, en raison d'un  $dV/dt$  important dû à la grande vitesse de commutation.

Pour minimiser ces contraintes, on utilise des inductances et des circuits d'aide à la commutation constitués de résistances, de condensateurs et de diodes.

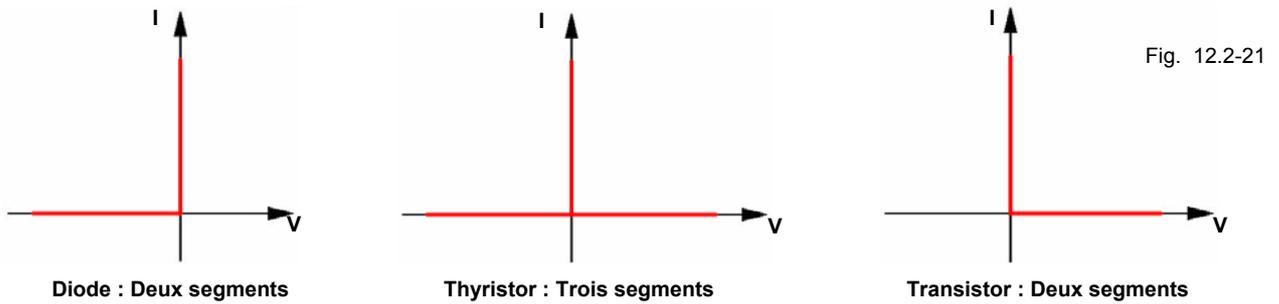
## 12.2.7. Réversibilité en courant des transistors

### 12.2.7.1. Représentation par segments

Nous avons vu que les états d'un composant parfait fonctionnant en commutation sont représentés par des demi-droites (segments) coïncidant avec un axe (puisque soit le courant, soit la tension sont nuls).

Cette représentation procure l'avantage de décrire la réversibilité en tension et en courant tout en fournissant une indication claire de la « fonction » réalisée par le composant. De plus, suivant le nombre de segments, on peut réaliser une classification des commutateurs. Enfin, elle aide à la recherche de la fonction « hybride » obtenue par assemblage de composant élémentaires.

Les caractéristiques des trois principaux types de composants de puissance étudiés précédemment peuvent être représentés par la figure ci-dessous :



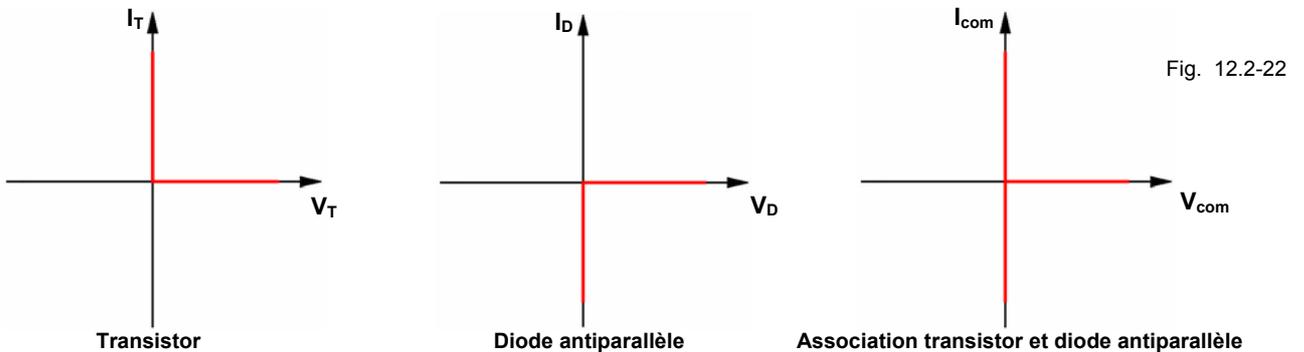
On voit alors très bien la réversibilité des grandeurs : Aucune pour la diode et le transistor (courant et tension unidirectionnels) et une réversibilité en tension pour le thyristor.

### 12.2.7.2. Recherche de la réversibilité en courant

Les transistors bipolaires et MOS sont des composants deux segments (fonctionnement un quadrant), la **tension et le courant** sont **exclusivement positifs**.

On cherche à étendre leurs caractéristiques en les associant à d'autres éléments pour en faire des **commutateurs réversibles en courant**.

L'usage des caractéristiques par segments aide à cette recherche. Sur la figure suivante, l'assemblage réversible en courant contient le transistor (à gauche) et un élément (au centre) qui se trouve être par inversion du sens des grandeurs une diode placée en parallèle inverse (antiparallèle).



Le schéma résultant est indiqué par les figures ci-dessous :

- a) pour le bipolaire et,
- b) pour le MOSFET.

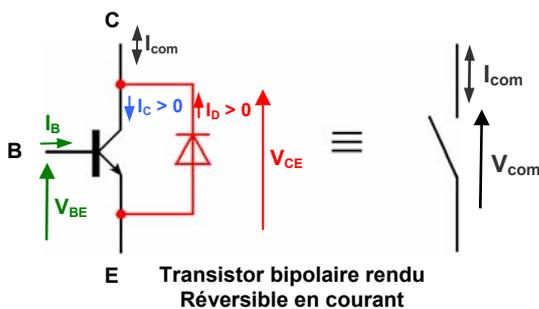


Fig. 12.2-23a

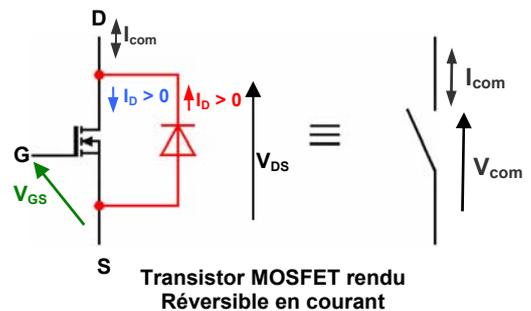


Fig. 12.2-23b

Il est à noter que le groupement résultant n'est pas réversible en tension.

➤ c) cas du thyristor

Un raisonnement similaire avec le thyristor est donné par le schéma résultant de la figure suivante.

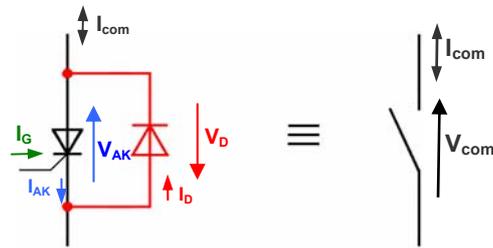


Fig. 12.2-24

On notera qu'il s'agit bien d'un interrupteur à trois segments bidirectionnel en courant et pas en tension car la diode impose une tension nulle lorsque le courant est négatif : le segment  $V_{com} < 0$  ne peut apparaître.

Les caractéristiques de la figure ci-dessous illustrent le mode de fonctionnement simplifié de cette association.

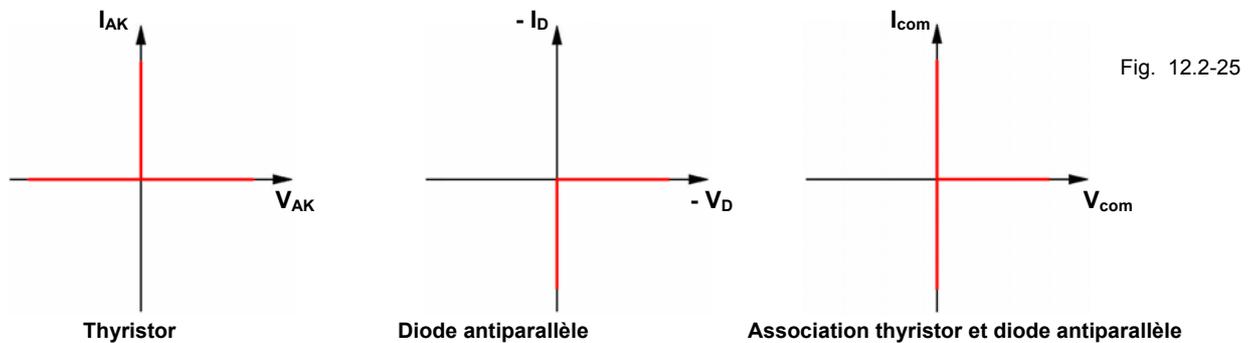


Fig. 12.2-25