

IGBT

- **Introduction**
Structure d'un transistor IGBT (Rappel)
Technologies Silicium
- **Caractéristiques statiques**
Etat bloqué
Conduction
- **Caractéristiques dynamiques**
- **Domaines d'application**

INTRODUCTION

L'IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) est une structure 4 couches. Interrupteur unidirectionnel en courant. Généralement asymétrique en tension.

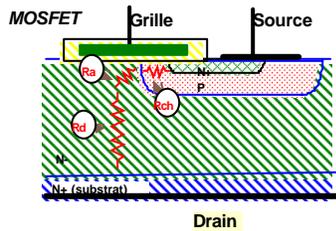
La structure de l'IGBT permet de résoudre le problème de la forte valeur de la résistance RDS(on) des MOSFET's haute tension (>500V).

Les faibles chutes de tension à l'état passant obtenues avec la structure IGBT autorise un fonctionnement à densité de courant plus élevée que celle des transistors bipolaires ou Darlington (60A/cm² à 1000V).

On réalise aujourd'hui des IGBT's pour le contrôle des gros moteurs (traction électrique) Ex. : **3 kV /1.2kA.**

STRUCTURE DE L'IGBT

RETOUR SUR LE MOSFET: Composantes de la $R_{DS(on)}$

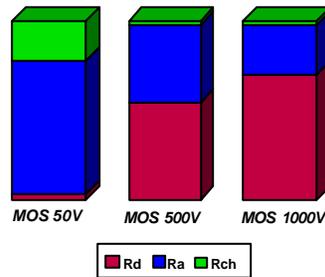


$$R_{DS(on)} = R_{ch} + R_a + R_d$$

R_{ch} = résistance du canal
 R_a = résistance d'accès
 (incluant en particulier la résistance de la couche d'accumulation induite par la grille)
 R_d = résistance de la zone épitaxiée N- (zone "drift")

Pour les MOS, standard, haute tension (>400V):

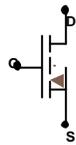
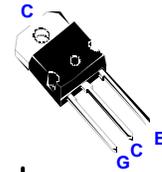
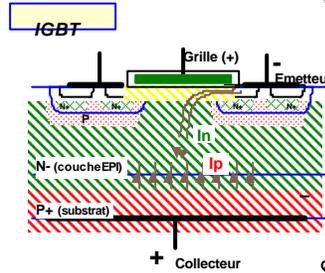
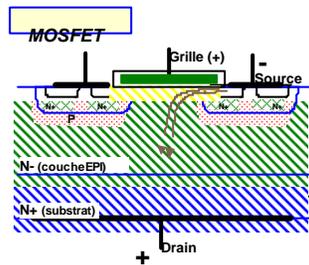
$$R_{DS(on)} = k \cdot V_{DSS}^{2.5}$$



Importance relative des 3 composantes de la $R_{DS(on)}$ pour différentes tensions

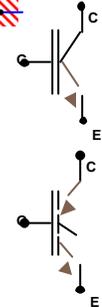
STRUCTURE DE L'IGBT

COMPARAISON MOSFET et IGBT



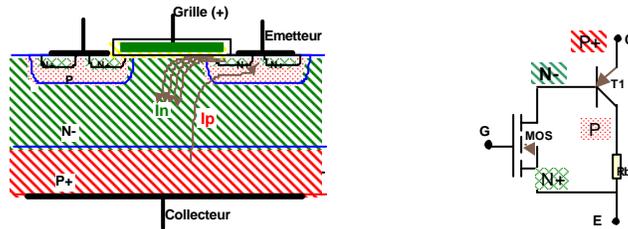
La structure d'un IGBT est très semblable à celle d'un MOSFET de puissance. La différence fondamentale est le remplacement du substrat N+ par un substrat P+ qui injectera des trous (porteurs minoritaires) dans la zone N- (épitaxiée). Cela contribuera à une réduction considérable de la résistance de cette zone et permettra d'obtenir une très faible chute de tension à l'état passant (**V_{CEsat}**).

(Symbole IGBT: Les nouvelles dénominations du drain et de la source, devenues respectivement collecteur et émetteur, sont discutables.)



STRUCTURE DE L'IGBT

SCHEMA EQUIVALENT



Le courant traversant le MOS se comporte comme le courant de base du transistor PNP (T1).
Le courant collecteur résultant s'ajoute au courant de drain du MOS.

T1 est un transistor à base épaisse :

- le gain est très faible ($\alpha = 0.3$)

⇒ **courant de trous égal à 20-30 % du courant total**

⇒ **recombinaison à l'ouverture (courant de queue)**

- il ne sera jamais saturé

(la jonction base-Collecteur de T1 est toujours bloquée, grâce au faible $R_{DS(on)}$ du MOS)

⇒ **Pas de problème de déstockage à l'ouverture !**

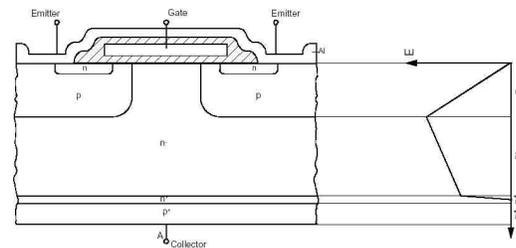
⇒ **l'IGBT est plus rapide que le Darlington.**

Zone P+, contrairement au MOS:

⇒ **Pas de diode anti-parallèle parasite.**

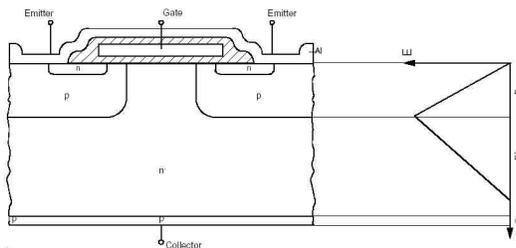
STRUCTURE DE L'IGBT

Epitaxié ou homogène ?



PT-IGBT: Punch-Through:

- la tenue en tension se fait sur toute la profondeur de la zone Drift N-
- on part d'un substrat P+ (qui peut être épais car faiblement résistif), sur lequel on fait croître une couche n par épitaxie (IGET)
- la couche N+ permet d'avoir une couche N-, moins épaisse (⇒ $V_{CE(sat)}$ faible ; mais aussi recombinaison des porteurs injectés par le P+)

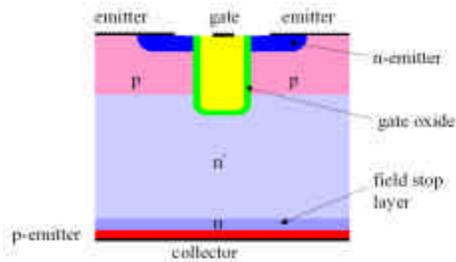


NPT-IGBT: Non-Punch-Through:

- le champ électrique ne se propage pas sur toute la profondeur de la zone Drift N- (zone N suffisamment épaisse)
- on part d'un substrat N homogène (IGHT) qui doit être fin afin de réduire la chute de tension à l'état passant
- la couche P+ est réalisée par implantation

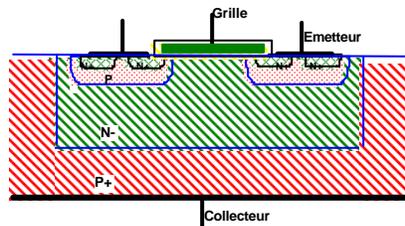
STRUCTURE DE L'IGBT

Evolutions technologiques



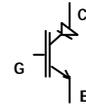
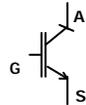
Trench IGBT:

- Résistances de canal + faible; résistance d'accès supprimée (30% de gain sur pertes à l'état passant)
- tenue au latch-up améliorée
- mais C_{ies} augmentée d'un facteur 3 et $V_{GS(th)}$ + fort



Reverse-Blocking IGBT / MBS:

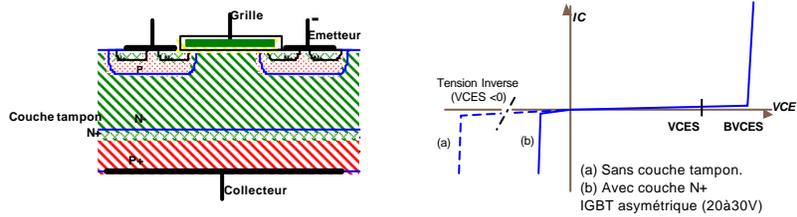
- Caisson P+ pour tenir la tension inverse
- Forte injection => composant peu rapide (qqs kHz)



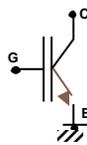
CARACTERISTIQUES STATIQUES

CARACTERISTIQUES STATIQUES

ETAT BLOQUE: limites en tensions directe & inverse



LIMITES ABSOLUES D'UTILISATION



VCE / VCES : Tension Collecteur - Emetteur @ $V_{GE}=0$
ou **BVCES** ($I_C = 200\mu A$ à qq mA)

En inverse:
VECR : Tension inverse Collecteur-Emetteur (en général 20V).

VCG (ou VCGR) : Tension Collecteur - Grille (avec $R_{GE}=20K\Omega$)

VGE(+et -) : Limite de tenue de l'oxyde de grille (en général 30V)

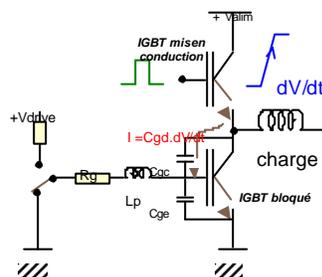
CARACTERISTIQUES STATIQUES

TENUE AU dV/dt

Le dV/dt "statique".

(même pb pour le MOSFET)

Le cas typique où l'IGBT est soumis à ce dV/dt est le bras de pont. La fermeture du composant complémentaire provoque une variation de tension (dV/dt) aux bornes de l'IGBT (ou du MOSFET).



Le courant dans la capacité C_{gc} qui en résulte se referme à travers l'impédance du circuit de grille:

Rg: Résistance série du circuit de commande.

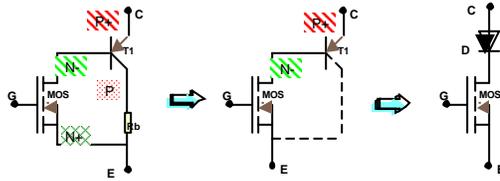
Lp: inductance parasite (câblage, boîtier..)

Cela provoque une élévation de tension de la grille. Au dessus du seuil $V_{GE(th)}$, le composant conduit. Ce court-circuit du bras de l'onduleur génère des pertes supplémentaires importantes.

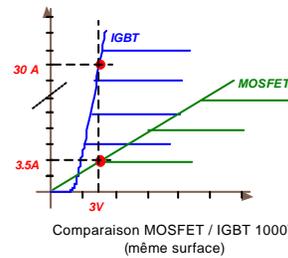
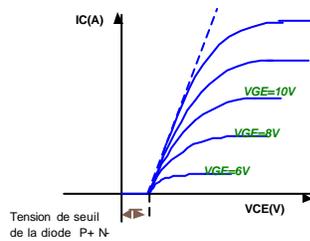
Il est recommandé de polariser la grille par une tension négative pour maintenir le composant correctement bloqué.

CARACTERISTIQUES STATIQUES

CARACTERISTIQUE A L'ETAT PASSANT

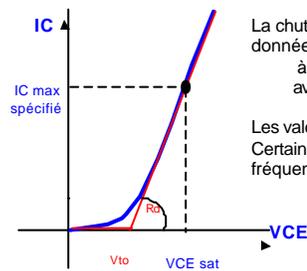


La caractéristique courant - tension à l'état passant est équivalente à celle d'un MOSFET [avec une très faible $R_{DS(on)}$] en série avec une diode.



CARACTERISTIQUES STATIQUES

SPECIFICATION de la CARACTERISTIQUE A L'ETAT PASSANT



La chute de tension à l'état passant (V_{CEsat} ou V_{CEon}) est donnée pour le courant IC_{max} spécifié à $T_j=25^\circ C$ et/ou $T_j=T_jMAX$ avec $V_{GE} = 15V$ (en général)

Les valeurs typiques sont de l'ordre de 2 à 3 Vselon les types. Certains produits, optimisés pour un fonctionnement basse fréquence (ex. 50Hz) ont des $V_{CEsat} < 2V$

Pertes en conduction:

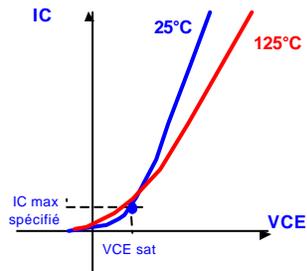
Comme pour une diode on modélise la caractéristique avec les paramètres V_{to} et R_d pour calculer la puissance dissipée :

$$P_{cond.} = V_{to} \cdot IC(av) + R_d \cdot IC^2(rms)$$

$IC(av)$ = Courant moyen dans le composant [*Average current*]
 $IC(rms)$ = Courant efficace dans le composant [*RMS current*]

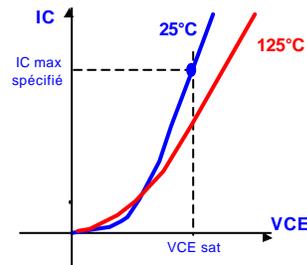
CARACTERISTIQUES STATIQUES

$V_{CE\ sat}$ versus T_J



PT-IGBT ou IGBT épitaxié:

- la chute de tension diminue avec la température
- le point spécifié à T_J max est un point favorable (à la t_d de fonctionnement, les pertes risquent d'être + fortes)



NPT-IGBT ou IGBT homogène:

- la chute de tension augmente avec la température
- mise en parallèle possible

CARACTERISTIQUES STATIQUES

Limites absolues d'utilisation

Courant Collecteur:

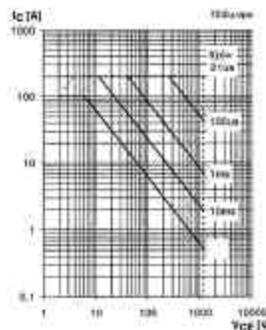
- 1) **IC** courant max en continu à $T_c = 25^\circ\text{C}$ (I) et/ou à $T_c = 100^\circ\text{C}$

Ces valeurs correspondent, pour un boîtier donné à la puissance dissipée **max** pour laquelle la température de jonction atteint la $T_{J\max}$ spécifiée.

- 2) **ICM** Courant max en impulsion:

Cette valeur est limitée par le composant et par des considérations thermiques (Aire de sécurité)

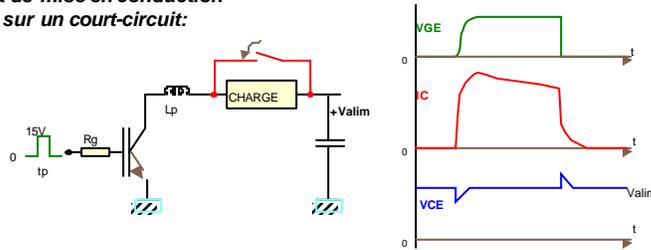
AIRE DE SECURITE (FBSOA)



CARACTERISTIQUES STATIQUES FERMETURE SUR UN COURT-CIRCUIT

Les IGBT's supportent le court circuit de la charge pendant qqs dizaines de μs sans se dégrader

Test de mise en conduction sur un court-circuit:



Le courant de court-circuit est limité par la tension V_{GE} :

$$I_{C(c/c)} = g_{fs} (V_{GE} - V_{GE(th)}) \Rightarrow \text{décroissance avec la température } (G_{fs} \searrow)$$

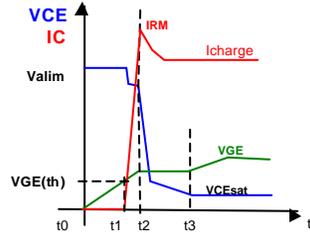
La limite de destruction est déterminée par :

- la température de jonction (on peut atteindre dans ces conditions 200 à 300°C)
- Le courant de Latch-Up & la surtension due aux selfs parasites.

Ex. : $I_{C(c/c)} \# 4$ à 10 fois $I_{C \text{ nom}}$ à $T_{case}=100^\circ\text{C}$ ($t_p=15\mu\text{s}$)

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES FERMETURE SUR CHARGE INDUCTIVE



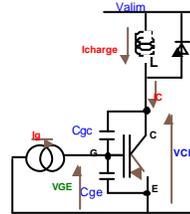
de t_1 à t_3 : Pertes à la fermeture (P_{on})
Après t_3 : Pertes en conduction (P_{cond})

La fermeture de l'IGBT est comparable à celle d'un MOSFET. La vitesse de commutation dépend de la vitesse de charge de la capacité d'entrée (C_{ies}) donc de l'impédance de sortie du circuit de commande.

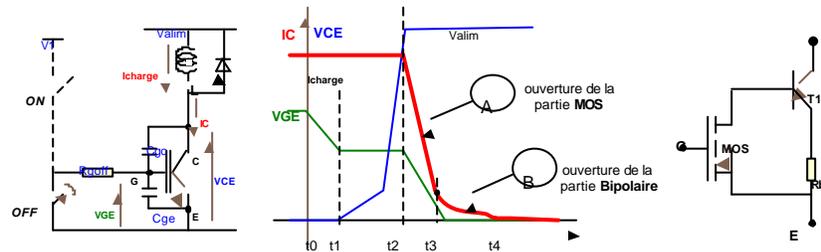
Remarque: décroissance de V_{CE} à la montée du courant due aux selfs parasites ($10 \text{ nH/cm} \Rightarrow 5 \text{ à } 15 \text{ nH}$ interne au boîtier) + le V_F de la diode.

Fonctionnement identique à un MOS:

- t_0 à t_1 : la tension grille monte et atteint le seuil $V_{GE(th)}$
- t_1 à t_2 : le courant augmente dans l'IGBT (**mode linéaire**). Le courant diminue (avec la même pente) dans la diode roue-libre qui continue à conduire jusqu'au IRM.
- t_2 à t_3 : La tension V_{CE} diminue rapidement au début du "plateau" de la tension grille, puis décroît lentement à cause de l'augmentation de la capacité C_{gc} (**effet Miller**)
- t_3 : l'IGBT est en conduction.



CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES OUVERTURE SUR CHARGE INDUCTIVE



Le blocage de l'IGBT se fait d'abord en suivant le même processus que dans le cas du MOSFET:

- t_1 à t_2 la tension V_{CE} monte doucement au début puis plus rapidement (**effet miller**). Le courant commence à décroître quand la tension V_{CE} atteint la tension d'alimentation (déblocage de la diode roue-libre).
- t_2 à t_3 le courant décroît brusquement (**section A** de la courbe), le MOS s'ouvre et la majeure partie du courant est coupé.
- t_3 à t_4 (**section B**): la base du transistor PNP est ouverte. Les porteurs minoritaires ne sont pas évacués. Un **courant de "queue"** persiste jusqu'à la recombinaison complète (**décroissance exponentielle**):

Remarque :

La partie **A** dure typiquement qq dizaines de nanosecondes.

La partie **B** s'exprime en centaines de nanosecondes ou qqs microsecondes.

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

COURANT DE "QUEUE" [" current tail "]

Ce phénomène de traînage du courant à l'ouverture est l'inconvénient de l'utilisation de **porteurs minoritaires**.

C'est la principale cause des pertes à l'ouverture, donc une limitation pour le fonctionnement à fréquence élevée (<100kHz).

Itail dépend de la technologie:

- 40-50% de I_C pour les PT-IGBT (car zone P+ très épaisse et dopée)
- 20-30% de I_C pour les NPT-IGBT (P+ fin)

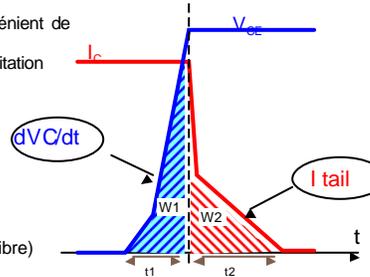
Itail augmente avec :

- Le courant collecteur initial (légèrement, surtout calibre)
- La tension VCE (ou de la tension d'écrêtage)
- La température de jonction.

Itail peut être réduit par la réduction de la durée de vie (PT-IGBT):

- Implantation de Pt.
- Bombardement d'électrons ou de neutrons (irradiation).

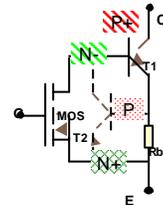
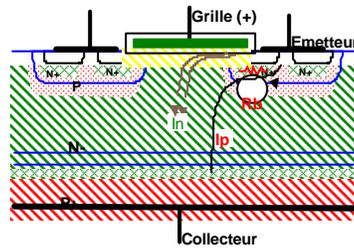
Ces techniques sont utilisées pour la fabrication des IGBT "rapides".



Compromis chute de tension à l'état passant / rapidité à u blocage

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

Le THYRISTOR PARASITE: risque de "LATCH-UP "



Le courant collecteur du transistor PNP (T1) circule dans la résistance de la zone P (Rb).

Si la tension aux bornes de cette résistance est trop importante, le transistor parasite NPN (T2) conduit et maintient le courant dans la base du transistor T1:

Fonctionnement en thyristor.

On ne peut plus ouvrir le composant par la grille (il faut couper le courant dans le circuit extérieur).

Pour repousser la limite de cet **accrochage (Latch-Up)**, les solutions technologiques sont:

- **irradiation**: pour réduire au maximum les gains des transistors et diminuer le courant de trous.
- **couchetampon N+** pour réduire l'injection de trous (surtout PT-IGBT).

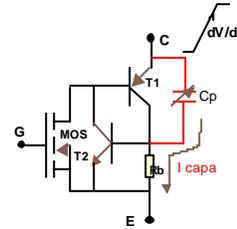
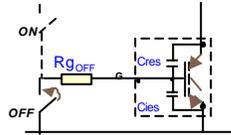
$$\Rightarrow V_{ON} \nearrow \text{ mais } t_{OFF} \searrow$$

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

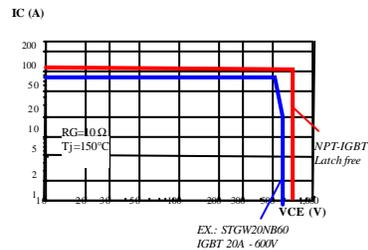
IGBT "Latch-free" & RBSOA

Le risque de Latch-up augmente avec:

- le **courant de collecteur**
- la **température de jonction** ($R_b \uparrow$)
- le **dV/dt** (c.a.d $R_{g\ OFF}$ faible et tension d'alimentation élevée)



Lorsque que le courant de LatchUp est supérieur au courant max en mode linéaire (@ V_{GS} spécifié), on parle d'IGBT **latch-free**.
L'aire de sécurité à l'ouverture (RBSOA) est alors rectangulaire.
Rq: la RBSOA est donnée pour des conditions d'ouverture bien spécifiées ($R_{g\ OFF}$, V_{CE} , T_j).



APPLICATIONS

L'IGBT s'impose de plus en plus dans le domaine de la haute tension (600 V à 3kV) et de la forte puissance (> 5kW). Cela s'adresse essentiellement aux commandes de gros moteurs.

En moyenne puissance (#1KW) l'IGBT est souvent choisi pour sa facilité de commande (comme le MOSFET) et sa robustesse (tenue dans l'avalanche, tenue en court circuit ...)

Il est utilisé :

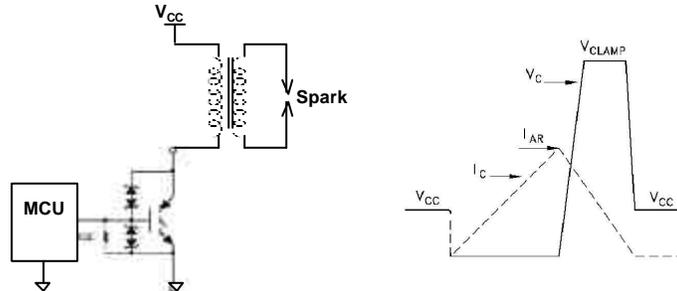
- En **commande de moteurs** : circuits économiques (souvent $F < 10\text{kHz}$)
- Dans **l'automobile** : presque exclusivement pour l'allumage (500v "logic level")
- Dans **l'éclairage** : Gradateur - Lampes H.I.D
- **Alimentations** (Convertisseurs à résonance).

APPLICATIONS

Allumage moteur

Spécifications requises:

- "logic level" (pour contrôle direct par MCU)
- "Clamped" (pour générer une haute-tension au primaire ~ 300 V)
- Grille protégée (environnement contraignant)



CONCLUSION

A retenir...

- **Domaine privilégié > 300 V**
Meilleure chute de tension que les MOS
- **Différences avec les MOS**
Seuil de tension à l'état passant
Courant de queue au blocage
Risque de Latch-up lors de l'ouverture sur court-circuit
- **Des familles différentes (technologie & comportement)**
NPT-IGBT (fort $V_{CE\ sat}$, rapide)
PT-IGBT (faible $V_{CE\ sat}$, lent)