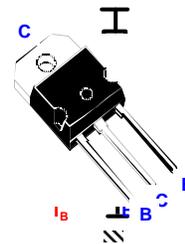
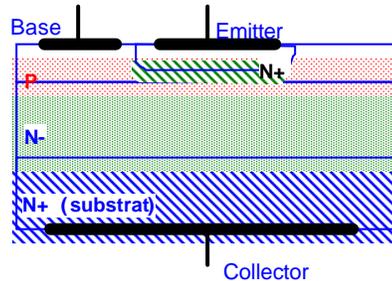


TRANSISTOR BIPOLAIRE (BJT : *Bipolar Junction Transistor*)

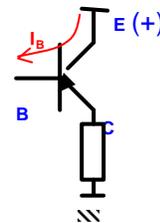
- Structure d'un transistor bipolaire - Rappel -
- Caractéristiques statiques:
 - Etat bloqué :
 - Limites en tension
 - Conduction :
 - Limites en courant
 - Aire de sécurité
- Caractéristiques dynamiques :
 - Fermeture (temps de commutation, pertes, cde de base)
 - Ouverture (aire de sécurité , temps de commutation, pertes, cde de base, C.A.L.C)
- Applications:
 - Circuit de commande de base
 - Circuit d'aide à la commutation
 - Domaines d'utilisation
- Le Transistor Darlington.

STRUCTURE TRANSISTOR BIPOLAIRE (rappel)

Transistor NPN



- Interrupteur unidirectionnel en tension et en courant.
- Structure 3 couches (*NPN* ou *PNP*).
- Plusieurs technologies sont utilisées pour la fabrication des transistors bipolaires : Triple diffusé Epi-collecteur double diffusé, Epi-base, Multi-épitaxies...etc.



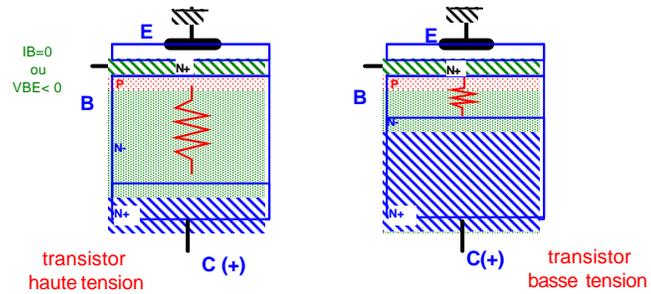


TRANSISTOR BIPOLAIRE A L'ETAT BLOQUE



CARACTERISTIQUE STATIQUE

ETAT BLOQUE



La **tenue en tension** est définie par la résistivité et l'épaisseur de la zone N-.

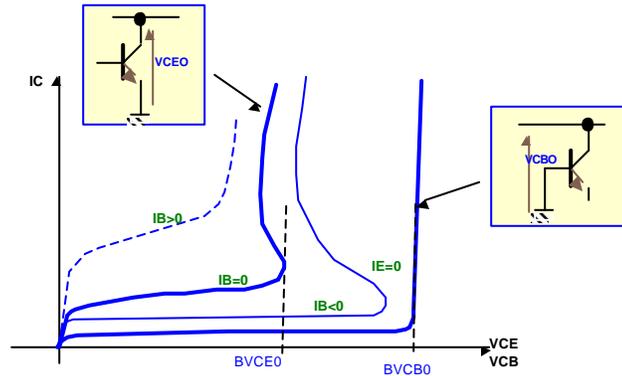
Par contre, augmenter la résistivité et l'épaisseur de cette zone c'est :

- Réduire le **gain** à fort niveau de courant. (voir courbe $\beta=f(I_C)$)
- Augmenter le **temps de commutation** à l'ouverture. (davantage de porteurs stockés pendant la conduction, à évacuer)

CARACTERISTIQUE STATIQUE

CARACTERISTIQUE V- I A L'ETAT BLOQUE

à $I_B=0$ (V_{CE0})
à $I_E=0$ (V_{CB0})

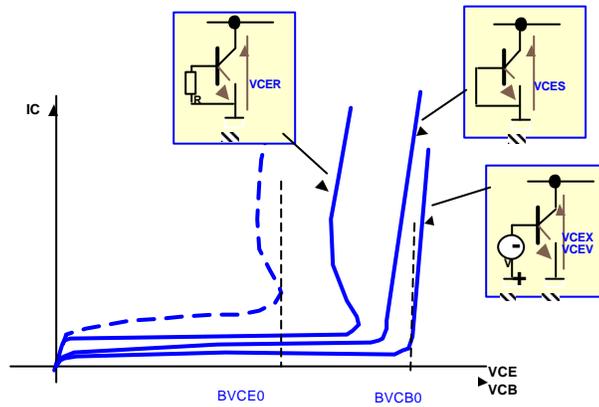


Le fabricant spécifie la tenue en tension en donnant les valeurs limites de
 $V_{CE0} \leq BV_{CE0}$ [*Breakdown Voltage*...]
 $V_{CB0} \geq BV_{CB0}$

CARACTERISTIQUE STATIQUE

CARACTERISTIQUE V- I A L'ETAT BLOQUE

(avec différents cas de polarisation de Base)



$$V_{CE0} < V_{CER} < V_{CES} < V_{CEX} \neq V_{CB0}$$

CARACTERISTIQUE STATIQUE



ETAT BLOQUE / TENUE EN TENSION

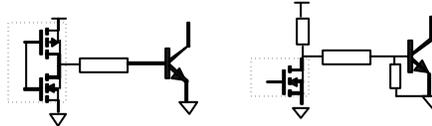
Limites absolues d'utilisation [*Absolute Maximum Ratings*]

Collecteur - Emetteur

- **V_{CES}** : Tension Max Collecteur-Emetteur avec base et émetteur en c/c.
Paramètre à utiliser pour choisir le transistor.
- **V_{CER}** : Tension Max Collecteur-Emetteur avec base connectée à l'émetteur avec une résistance R (ex: 10Ω).
- **V_{CEV}** (ou **V_{CEX}**) : Tension Max Collecteur-Emetteur avec base polarisée négativement (ex: V_{BE} = -1.5V)
- **V_{CEO}** : Tension Max Collecteur-Emetteur avec la base en l'air (I_B=0, circuit ouvert)
Cette valeur est environ 60% plus faible que le V_{CES}.



Choix en fonction du circuit de Cde:



Emetteur - Base

- **V_{EB0}** : Tension Max Emetteur-Base (spécifié à collecteur ouvert).

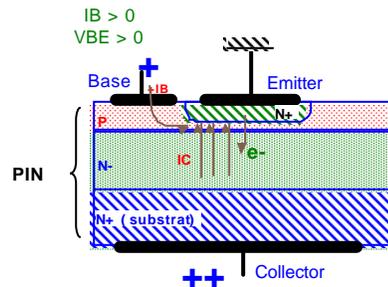


TRANSISTOR BIPOLAIRE EN CONDUCTION



CARACTERISTIQUE STATIQUE

CONDUCTION



1) Principe:

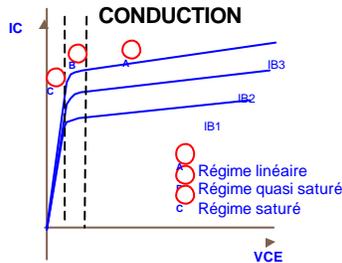
- courant circulant de B vers E et injection d'électrons de E vers B
- ces électrons se diffusent dans la base
- les électrons sont captés par le champ électrique de la jonction PN Base-Collecteur

2) Technologie:

- l'injection de trous de B vers E est à minimiser
 - ⇒ jonction dissymétrique (N+ dopé que P)
- le nombre d'électrons qui se recombinent dans la base est à minimiser
 - ⇒ base étroite (gain important)

CARACTERISTIQUE STATIQUE

CONDUCTION



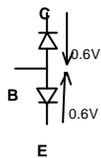
1) Régime linéaire ou "actif".

Le courant de base I_B polarise la jonction Base-Emetteur en direct : un courant d'électrons, venant de l'émetteur, est injecté dans la base. Une grande partie des électrons est "captée" par le champ électrique et circule dans le collecteur. Il y a peu de porteurs minoritaires injectés par la base P. La base reste "active": $I_C = h_{fe} I_B$ ($I_C = \beta \cdot I_B$)

2) Régime de saturation.

Si le courant de base augmente, la tension collecteur diminue et la jonction Base-Collecteur se trouve polarisée en direct. Des trous sont alors injectés par la zone P+ et envahissent le collecteur N- (porteurs minoritaires).

L'avantage de la faible chute de tension VCE obtenue, est contre balancée par un fort courant base et surtout par un **temps d'ouverture** important (évacuation des charges de la zone N-). En pratique on cherche à fonctionner à faible saturation, voire en quasi-saturation, pour réduire les contraintes à l'ouverture.



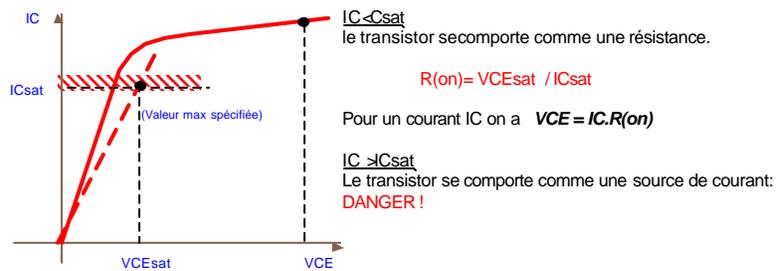


CARACTERISTIQUE STATIQUE

LA SATURATION : SPECIFICATION

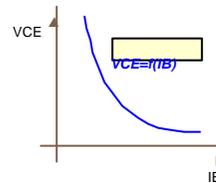
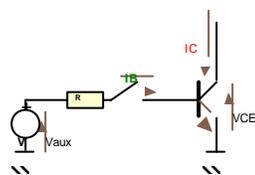
Les feuilles de caractéristiques donnent :

- **VCEsat** : Tension de saturation Collecteur-Emetteur spécifiée en 2 ou 3 points (différentes valeurs de IC [**ICsat**] et de IB).
Le VCEsat dépend de la température jonction (il augmente avec Tj)
- **VBESat** : Tension de base dans les conditions de saturation.



CARACTERISTIQUE STATIQUE

PERTE EN CONDUCTION



Pertes de puissance dans le transistor :

$$P_{cond} = P_{cond}(C) + P_{cond}(B)$$

, avec :

- $P_{cond}(C)$ = pertes collecteur-Emetteur en conduction
- $P_{cond}(B)$ = pertes base-Emetteur

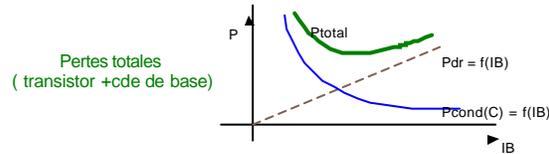
$$P_{cond} = (VCEsat \cdot IC + VBEsat \cdot IB) \cdot \delta$$

(δ = rapport cyclique conduction)

En fait les pertes dues à IB les plus importantes sont celles du circuit de commande de base (Pdr).

$$P_{dr} = IB \cdot Vaux \cdot \delta$$

Interdépendance entre P_{on}(C) et P_{dr} :





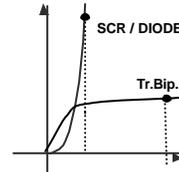
CARACTERISTIQUE STATIQUE

LIMITE EN COURANT

Limites absolues d'utilisation

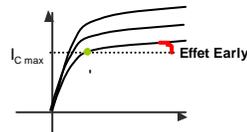
[*Absolute Maximum Ratings / Electrical Characteristics*]

Le transistor bipolaire n'a pas de capacité de surcharge.



Le courant max (avant destruction: **absolute maximum ratings**) est spécifié pour un fonctionnement en mode saturé:

- **IC max** : cette limite absolue est fixée par le **gain** min du dispositif (@ I_B & V_{CE} donnés !)
- **ICM** : valeur donnée pour un fonctionnement en impulsion (durée spécifiée, voir aussi S.O.A).



- ➔ **En pratique** : Ce qui intéresse l'utilisateur c'est le courant max qu'il pourra contrôler (couper) et pour lequel le gain et le V_{CEsat} sont bien spécifiés. Cette valeur sera voisine du niveau IC utilisé par le fabricant pour spécifier les paramètres dynamiques du transistor (voir tableau " **Electrical Characteristics** ")

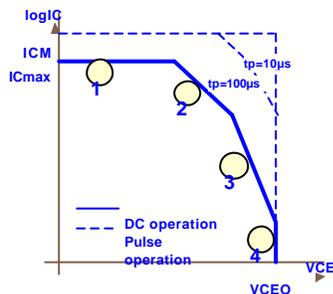
CARACTERISTIQUE STATIQUE

AIRE DE SECURITE

[*S.O.A: Safe Operating Area*]

Polarisation de base positive :

FBSOA (Forward Bias Safe Operating Area)



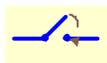
L'aire de sécurité est délimitée par les segments:

- 1 - Courant max (Gain et/ou section fils de connexion)
- 2 - Puissance max (P à $T_{case}=25^{\circ}C$)
- 3 - Second claquage (cf. caractéristique dynamique)
- 4 - Tension Max. (V_{CE0} car la tension de base est #0)

En régime impulsionnel l'aire de sécurité augmente et pour des impulsions courtes on obtient une **aire rectangulaire**

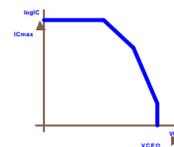
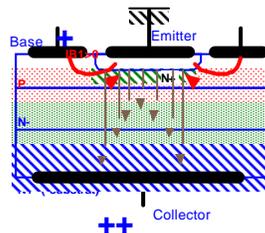


FERMETURE & OUVETURE D'UN TRANSISTOR BIPOLAIRE



CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE

MISE EN CONDUCTION (FERMETURE)



L'injection de trous dans la couche P et ensuite dans la zone N- va faire décroître rapidement la tension collecteur-émetteur. Le courant va s'établir dans le circuit sur les bords de la périphérie (où la ZCE s'étend en 1^{er} grâce à la tension qui apparaît aux bornes de la résistance émetteur-base).

La densité de courant dans ces zones sera très importante (**focalisation**) :

Si la tension VCE est encore élevée, cela peut produire des échauffements localisés [*Hot points*] et entraîner la destruction du composant par second claquage.

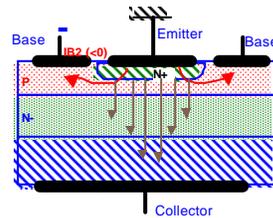
Il faut respecter l'aire de sécurité **F_{SOA}** à la mise en conduction.

En général la commutation est suffisamment rapide pour utiliser toute la zone rectangulaire délimitée par VCE0 et ICmax

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE



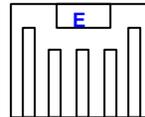
OUVERTURE



L'ouverture d'un transistor bipolaire se fait en faisant circuler un courant inverse dans la base (I_{B2}).

- 1- Le courant de base négatif extrait d'abord les charges positives de la zone N- présente sous la base. Les charges présentes sous l'émetteur continuent d'assurer la circulation du courant collecteur.
- 2- Pendant le temps de "déstockage" (t_s) les charges de la zone N- situées sous l'émetteur sont à leur tour progressivement absorbées vers la base.
- 3- La tension collecteur augmente. La ZCE s'étend d'abord en bordure de l'émetteur (effet de la résistance base-émetteur). Le courant se focalise sous la partie centrale de l'émetteur (risque de destruction par second claquage: $R \nearrow$ quand $T_j \nearrow$).

Solution technologique: **géométrie interdigitée**



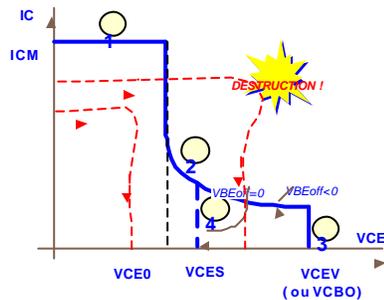
Doigts de Base

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE

AIRE DE SECURITE A L'OUVERTURE

Polarisation de base négative :

RBSOA (Reverse Bias Safe Operating Area)



L'aire de sécurité est délimitée par les segments:

- 1 - Courant max
- 2 - Second claquage
- 3 - Tension Max. (VCEV)
- 4 - L'aire de sécurité est réduite lorsque l'ouverture se fait sans tension négative sur la base. ($V_{BEoff}=0$)

A l'ouverture, il faut que le cycle IC-VCE reste à l'intérieur de la zone de sécurité RBSOA. (Cycle B)



CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE

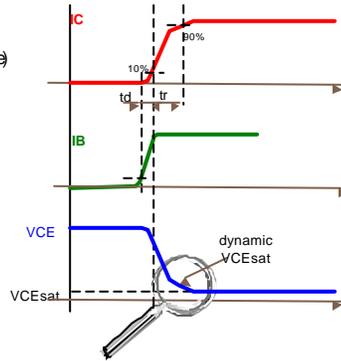
TEMPS DE COMMUTATION A LA FERMETURE

Définition (mesures sur charge résistive)

t_d : Delay time

t_r : Rise time

t_{on} : Turn-on time = $t_d + t_r$



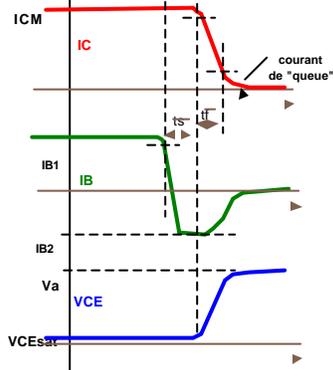
La tension collecteur-Emetteur n'atteint pas immédiatement la valeur V_{CEsat} .
 Il y a une phase transitoire appelée "Saturation dynamique" qui peut durer 2 à 3 μs et pendant laquelle la tension reste de l'ordre de 2 à 3V.
 Il faut tenir compte de ce phénomène pour évaluer les pertes.
 Ce paramètre dynamique est spécifié pour certains transistors.



CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE

TEMPS DE COMMUTATION A L'OUVERTURE (mesures sur charge résistive)

t_s : storage time
 t_f : Fall time

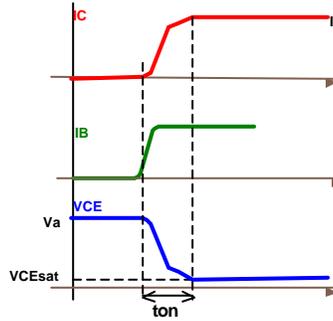
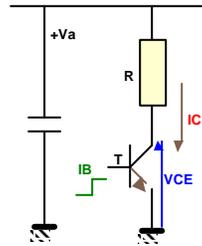


Le temps de "déstockage" t_s est relativement important vis à vis des autres temps de commutation (1 à 5 μs).
 t_s dépend du niveau de saturation du transistor.
 Il augmente avec la température (double de 25 à 125°C).

Le courant de queue est dû au temps de recombinaison des porteurs "piégés" sous l'émetteur (loin du contact de base).



CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE CARACTERISATION SUR CHARGE RESISTIVE



La fermeture surcharge résistive est utilisée pour la caractérisation et la spécification des transistors bipolaires.
Dans ce cas la forme du courant est l'image de la forme de la tension.
La commutation est rapide et les pertes sont relativement faibles .

$$E \cong \frac{1}{4} \cdot V_a \cdot I_R \cdot t_{ON} \quad \text{Rq surcharge inductive: } E \cong \frac{1}{2} \cdot V_a \cdot I_L \cdot t_{OFF}$$

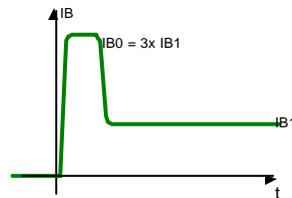
APPLICATIONS DES TRANSISTORS BIPOLAIRES

APPLICATION

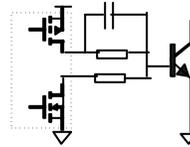
Commande de base à la fermeture

Le diC/dt (ou tr) dépend du temps de montée et de l'amplitude du courant base :
 Il faut "remplir" rapidement la zone N- de porteurs minoritaires pour faire décroître la résistance du collecteur le plus vite possible.
 Objectif : minimiser les pertes à la fermeture.
 Un courant de base avec un "overshoot" pendant la phase de commutation est recommandé. Ensuite il faut réduire l'amplitude au niveau requis pour maintenir la conduction ($IB1$).

Par exemple

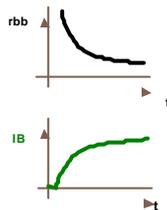
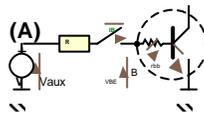


Exemple de circuit de commande:



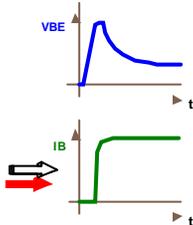
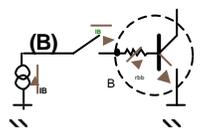
APPLICATION

Commande de base à la fermeture



La valeur de la résistance r_{bb} est élevée au début de la fermeture et décroît progressivement pendant les 1ères dizaines de nanosecondes.
 Si la cde de base est réalisée avec une faible tension (circuit A) le temps de montée du courant base est limité par ce comportement dynamique de la jonction base-émetteur.

Il faut utiliser un générateur de courant !



Avec un générateur de courant (circuit B) c'est l'étage de cde qui fixe le temps de montée du courant base.

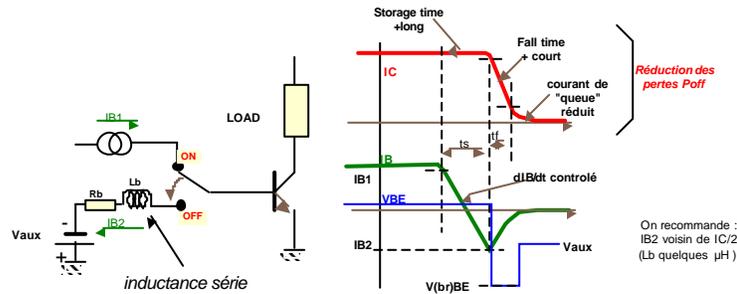


APPLICATION

Commande de base à l'ouverture

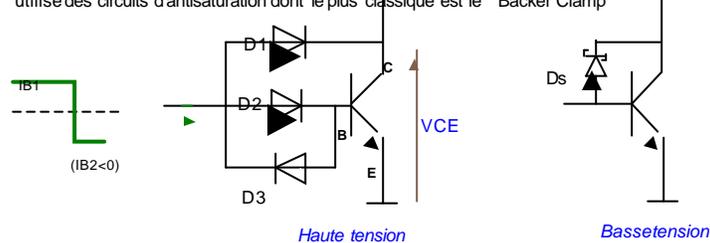
Il est préférable d'appliquer "en douceur" le courant négatif de base ($IB2$). Cela évite de focaliser trop rapidement le courant sous les doigts d'émetteur (commutation plus sûre) et donc d'extraire plus de charges ce qui réduit le tf (fall time) et le courant de queue = moins de pertes (**Poff**). En contre partie cela augmente le temps de déstockage (ts).

Cette technique est surtout utilisée pour les transistors HT (charge stockée élevée)



APPLICATION CIRCUIT ANTI-SATURATION

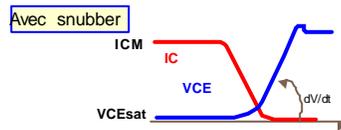
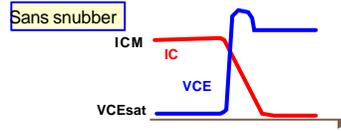
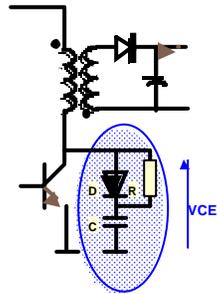
Pour réduire la quantité de porteurs minoritaires stockés dans la couche collecteur N- on utilise des circuits d'antisaturation dont le plus classique est le " Backer Clamp"



Lorsque la tension VCE passe en dessous d'un certain niveau, la diode $D1$ conduit et dérive une partie du courant base ($IB1$).
Le seuil de tension de la diode $D2$ est voisin de celui de $D1$: la tension V_{CB} est maintenue autour 0 Vce qui empêche la saturation du transistor ($V_{CE} \approx 1V$).
La diode $D3$ permet d'appliquer le courant négatif $IB2$ pour extraire les charges au moment du blocage.
REMARQUE:
La diode $D1$ doit tenir la tension d'alimentation (en général c'est une diode **Haute tension**)
Elle doit être plus **rapide** au blocage que la jonction B-C, pour éviter une surtension sur le circuit de commande au moment où le transistor s'ouvre.
La diode $D2$ doit avoir un faible V_F dynamique (V_{FP}) pour ne pas limiter le temps de montée du courant base à la mise en conduction du transistor.

APPLICATION

RESEAU D'AIDE A LA COMMUTATION (*) [Snubber]

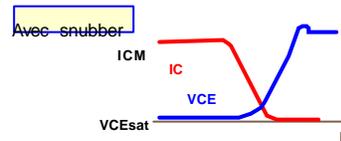
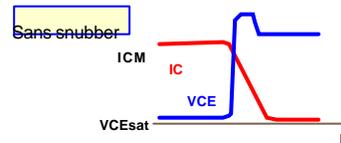
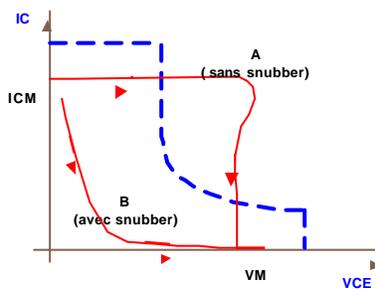


Le circuit RCD "retarde" l'application de la tension à l'ouverture du transistor.
Cela permet de réduire considérablement les pertes dans le transistor.
(les pertes sont dissipées dans la résistance R du snubber lors de la décharge du condensateur à la fermeture suivante du transistor.)

(*) ou Circuit d'aide à la commutation (C.A.L.C)

APPLICATION

RESEAU D'AIDE A LA COMMUTATION [Snubber]



Le réseau d'aide à la commutation permet d'utiliser des transistors ayant une aire de sécurité plus petite. (transistor+ rapide, réduction de coût..)

APPLICATION

Domaines d'application

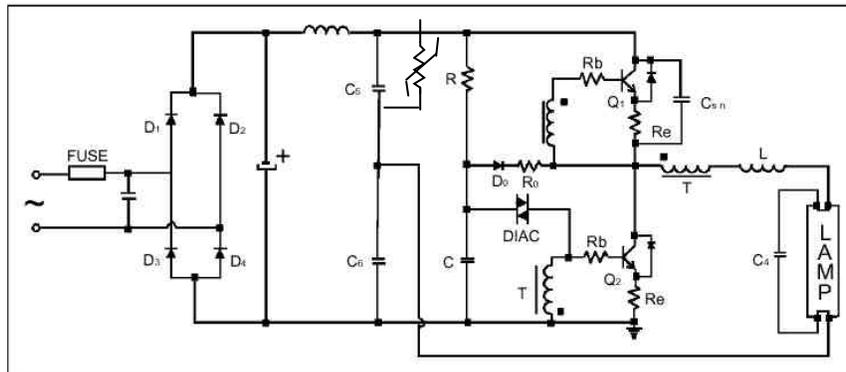
- **SMPS / Chargeurs:**
VCES: 700V - 1000V / IC: 5A- 30A
- **Télévision / Monitor :** Circuit de balayage horizontal.
VCES: 1500V / IC: 8A
- **Eclairage (Ballast électronique)**
VCES: 700V - 1000V / IC: 2A - 10A

Motifs d'utilisation

- **Commande en courant**
- **Faible chute de tension à l'état passant**
- **Contrôle linéaire**

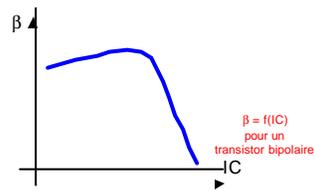
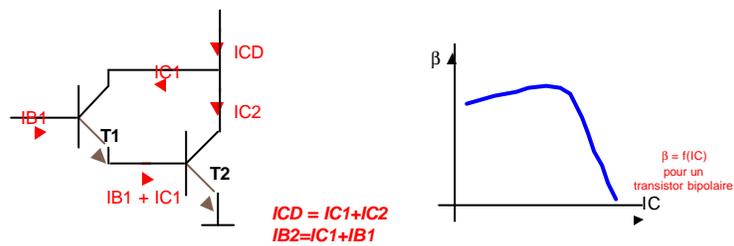
APPLICATION

Ballast électronique



LE DARLINGTON

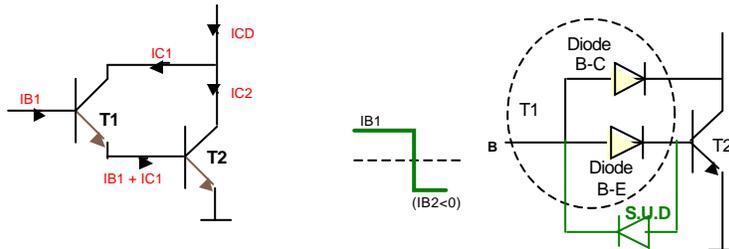
CONFIGURATION DU DARLINGTON



L'association des 2 transistors T1 et T2 permet d'obtenir un gain élevé :
 $I_{CD}/I_{B1} \approx \beta_D = \beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2$ (β_D = gain du darlington)

- Le montage Darlington est intéressant :
- pour les commutateurs à fort niveau de courant,
(utilisation du composant à forte densité de courant)
 - dans le cas de transistor haute tension.

FONCTIONNEMENT DU DARLINGTON



Le transistor T1 joue le rôle de circuit d'antisaturation pour T2:

- T1 fonctionne en régime sursaturé.
- T2 en régime non saturé.

Conséquences :

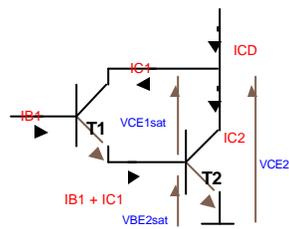
- La chute de tension à l'état passant sera + élevée qu'un transistor bipolaire.
- Le temps de commutation à l'ouverture (t_{off}) sera plus long.

Il faut d'abord évacuer les charges dans T1, ensuite ouvrir T2.

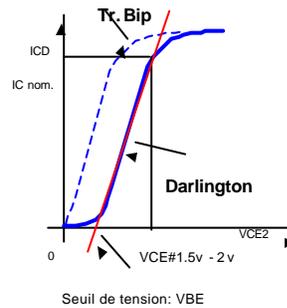
Une diode supplémentaire (S.U.D) est nécessaire pour accéder à la base de T2.

(Speed-Up diode)

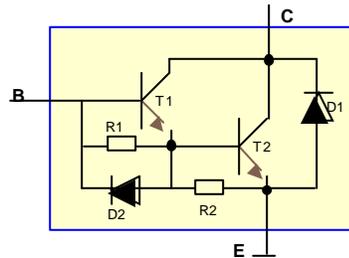
CONDUCTION



$$VCE2 = VCE1sat + VBE2$$



DARLINGTON INTEGRE



- **R2** est une résistance intégrée destinée à écouler le courant de fuite de T1 à la masse sans être amplifié par T2.
- **D2** est la diode "Speed-up" absolument nécessaire pour ouvrir rapidement T2.

R1 est une résistance "parasite". Elle est suffisamment élevée pour ne pas réduire le gain de T1.

D1 est une diode "parasite" (due à la réalisation de R2).

Ce n'est pas une diode rapide. Elle ne peut pas être utilisée comme diode de **roue libre**.

DARLINGTON :

Domaines d'application

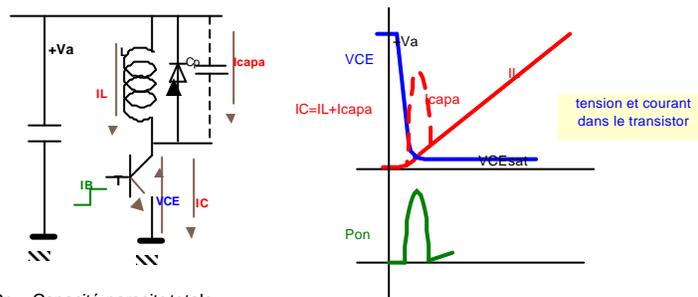
- Automobile : Circuit d'allumage.
500V / 10-15A
- Télévision/Monitor : Circuit de balayage horizontal.
1400V / 8A
- Applications Industrielles.
400V-600V / 100A.

BACK-UP



FERMETURE SUR CHARGE INDUCTIVE

1) FERMETURE AVEC UN COURANT INITIAL NUL



C_p = Capacité parasite totale
(Charge L + diode roue-libre)

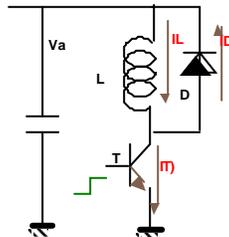
Au début de la commutation le courant dans l'inductance est nul. Il croît ensuite avec la pente V_a/L .
Les pertes sont dues essentiellement au courant de charge des capacités parasites C_p .

$$W_{on} = 1/2 C_p V_a^2$$



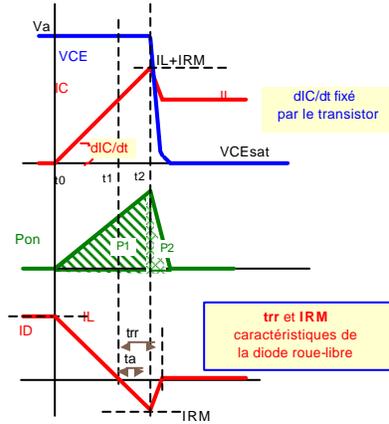
FERMETURE SUR CHARGE INDUCTIVE

2) FERMETURE AVEC UN COURANT INITIAL NON NUL ($= I_L$)

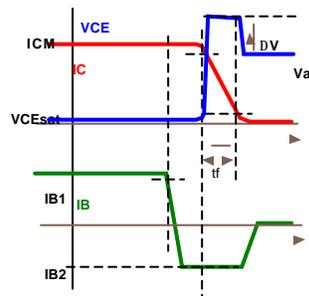


Quand le transistor se ferme, la diode roue-libre D conduit et "court-circuite" la charge. La tension VCE reste égale à la tension d'alimentation Va. Cet état subsiste jusqu'au blocage de la diode ($t=t_2$). Le courant dans le transistor atteint, à ce moment là, la valeur I_L+I_{RM} .
Pertes à la fermeture : $P_{on} = P_1 + P_2$
La partie la plus importante est :

$$P_1 = 1/2 (I_L+I_{RM})^2 \cdot V_a \cdot 1/(diC/dt) \cdot F$$



OUVERTURE SUR CHARGE INDUCTIVE



La décroissance du courant collecteur diC/dt ($= I_{CM}/t_f$) provoque une surtension ΔV due à l'inductance parasite (L_p). On doit ajouter également la surtension due au VF dynamique (VFP) de la diode roue-libre D :

$$\Delta V = L_p \cdot diC/dt + VFP$$

Pertes à l'ouverture :

$$W_{off} = 1/2 V_a \cdot I_{CM} \cdot t_f + 1/2 L_p \cdot I_{CM}^2$$

