

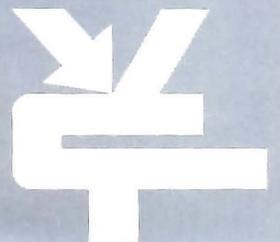
note d'application technique



Protection contre le claquage secondaire dans les transistors de puissance

par M. Hébert Service d'Applications

réf. : 55-D-074



ses@sem

Société Européenne de Semiconducteurs et de Microélectronique
Direction commerciale : 101 Bd Murat - 75-Paris 16^e - Tél. 525.75.75
Service commercial région Sud-Est : 38-St-Egrève - Tél. (76) 88.40.61

I - CLAQUAGE SECONDAIRE

Ce terme a donné lieu à diverses interprétations, parfois contradictoires. Jusqu'à une certaine époque, ce phénomène était resté mal connu et s'il était facile de le mettre en évidence, il était beaucoup plus mal aisé d'en expliquer le mécanisme. Depuis un certain temps déjà, des équipes de chercheurs de nationalités diverses se sont attaquées à ce problème. Bien que l'explication du phénomène ne semble pas encore avoir atteint sa phase définitive, les résultats publiés ont permis de bâtir une théorie qui se trouve assez bien vérifiée dans la pratique.

Le claquage secondaire (second breakdown) est un phénomène, généralement destructeur, provoqué par la formation localisée de points chauds dus au passage du courant dans une surface réduite. Le

claquage secondaire est un phénomène commun à tous les transistors bipolaires NPN et PNP ; son amplitude et le moment où il se produit varient selon la technologie, la structure et le matériau employés. Des influences extérieures (température, circuit de base etc ...) influent également sur le phénomène.

Le claquage secondaire est caractérisé par un rapprochement soudain des courbes $I_c = f(V_{ce})$ de l'axe des ordonnées tandis que se produit simultanément une augmentation rapide du courant collecteur. Cette brusque augmentation de courant ayant lieu alors que la tension V_{CE} conserve encore une tension relativement importante, peut détruire le transistor si le courant collecteur n'est pas limité (voir Fig.1). Comme on l'a dit plus haut, le claquage secondaire se manifeste dans tous les transistors, mais il prend une importance particulière dans les dispositifs de puissance où l'on rencontre des niveaux de puissance assez élevés.

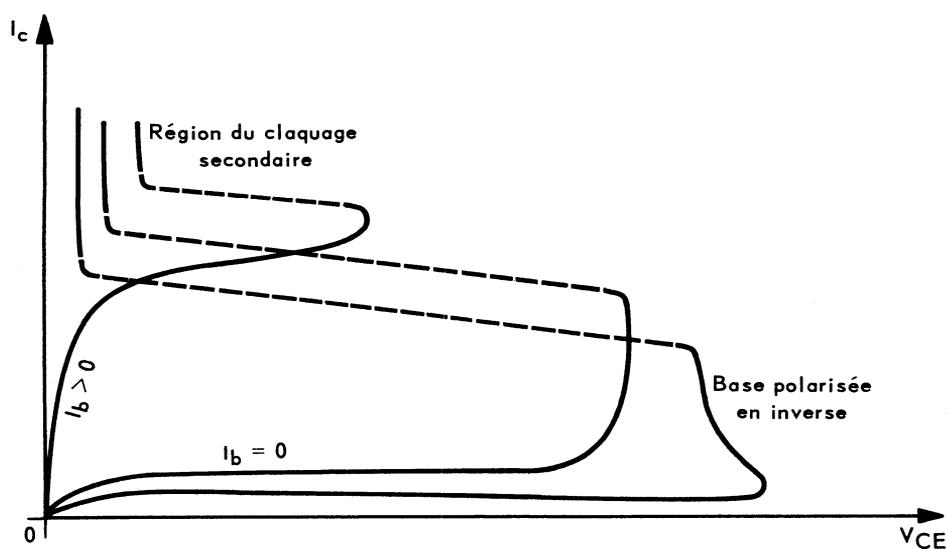


Figure 1

Dans un fonctionnement en impulsion, il y a toujours un peu d'énergie dissipée dans le transistor pendant les commutations. Suivant la quantité de celle-ci le phénomène peut, ou non, apparaître. Cependant on pense que pour qu'il se produise, il faut que certaines parties du transistor atteignent une température critique qui elle-même peut être fonction du dispositif. Le claquage secondaire apparaît donc physiquement comme provoqué par un emballement thermique localisé, dû à une trop grande densité de courant.

Ces densités de courant trop importantes, dépendent, entre autres :

- d'un manque d'homogénéité qui peut exister dans la structure du transistor,
- des anomalies qui se produisent parfois au cours des diffusions,
- du circuit de base et de sa polarisation.

Pour un transistor de surface relativement importante, les risques de non-homogénéité augmentent. Il en découle que chaque élément de surface du Silicium ne sera pas porté à une même température. Il se produit un dégagement de chaleur par effet Joule à l'endroit où il existe un manque d'homogénéité ; le phénomène peut devenir rapidement régénératif et le transistor être détruit si on ne limite pas le courant. Le niveau de courant auquel se manifeste le claquage secondaire diminue rapidement quand on augmente la tension V_{CE} . Par contre, la tenue d'un transistor au claquage secondaire augmente lorsque la durée d'application du courant et de la tension est brève. Ceci provient du fait que l'énergie dissipée dans la pastille diminue. Le claquage secondaire se manifeste plus aisément si l'épaisseur de la base du transistor est diminuée.

Quand la jonction émetteur-base est polarisée en inverse, le sens du champ électrique transversal est inversé. De ce fait le courant émetteur (qui décroît pour finir par s'annuler) est concentré dans une zone étroite située au voisinage du centre de la surface d'émetteur. Cette zone est, en principe, encore plus réduite que lorsque la jonction émetteur-base est polarisée en direct, ce qui veut dire que dans ce cas le claquage secondaire se produira pour des niveaux de puissance plus faibles que dans le premier cas. Lorsque l'on parle du claquage secondaire qui se produit lorsque la jonction base-émetteur est polarisée en inverse, on fait généralement appel à la notion d'énergie parce que, dans ce cas, la tension, le courant et le temps sont étroitement liés. L'amplitude du champ transversal de base dépend en grande partie de la tension de blocage de base et du courant. La tenue au claquage secondaire d'un transistor polarisé en inverse s'améliore si l'on augmente la résistance située entre base et émetteur ou si l'on diminue la tension entre ces deux électrodes. Ces impératifs sont exactement contraires à ceux requis pour obtenir un temps de coupure rapide et dans la pratique, il faudra donc réaliser un compromis entre ces deux exigences contradictoires.

II - AIRE DE SECURITE

L'aire de sécurité indique les limites $I_c = f(V_{CE})$ à observer pour conserver un fonctionnement fiable. Les courbes déterminant l'aire de sécurité indiquées dans les notices SESCO concernant le fonctionnement en continu (D.C.) ainsi que le fonctionnement en impulsions dont la largeur et le facteur de forme sont spécifiés. A l'aide de ces graphiques, l'utilisateur est à même de choisir le transistor répondant à son problème ; il peut réaliser le meilleur compromis entre les caractéristiques demandées au circuit et les possibilités du dispositif. L'aire de sécurité tient compte des facteurs thermiques et du phénomène de second claquage ; habituellement elle est donnée pour une polarisation base dans le sens direct.

L'aire de sécurité se présente sous la forme d'un graphique courant-tension comprenant une courbe de limitation en courant continu et des courbes limites déterminant le fonctionnement en impulsions. Les limites en continu sont déterminées en partie par le courant collecteur maximum admissible et l'hyperbole représentant la puissance dissipable maximale. Si ce graphique est présenté en coordonnées Log-Log on trouve d'abord une droite qui représente la limite thermique en continu et dont la pente est -1 . On utilise que la partie de cette droite comprise entre le courant collecteur maximum (point A de la Fig. 2) et une autre droite (point B de la Fig. 2) dont le coefficient de pente est plus élevé et qui est déterminé par le lieu des points où se produit le second claquage (partie BC de la Fig. 2). Pour finir la tension maximale collecteur-émetteur est limitée par le BV_{CEO} .

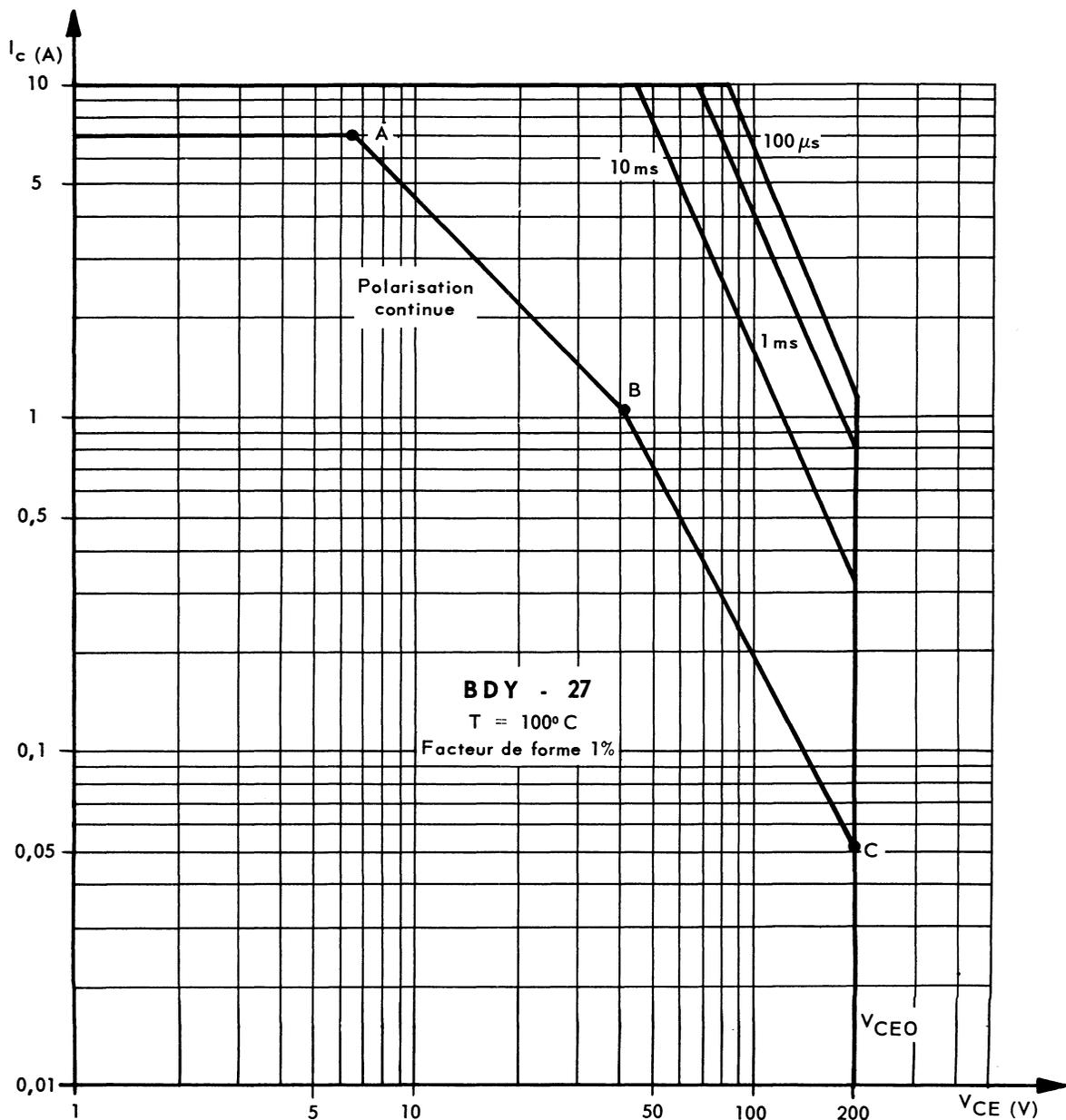


Figure 2

Lors d'un fonctionnement en impulsion, le niveau d'énergie auquel se manifeste le second claquage augmente quand la durée d'impulsion diminue. Ainsi qu'on l'a déjà dit ceci provient du fait que l'inertie thermique de la pastille et du boîtier associé ne permet pas à la jonction d'atteindre immédiatement la température correspondante. Ceci explique donc pourquoi, sur l'aire de sécurité, les courbes représentant le fonctionnement en impulsion permettent d'accepter des niveaux d'énergie de plus en plus élevés lorsque la durée d'impulsion diminue.

III - CAS DES CHARGES INDUCTIVES

On a constaté que le claquage secondaire se manifestait plus volontiers lorsque l'on commutait une charge présentant une composante inductive. Examinons la Figure 3 sur laquelle est représentée la caractéristique de sortie d'un transistor lorsque sa base est polarisée en inverse.

Dans la région I, le transistor, qui est bloqué, présente en sortie une forte résistance.

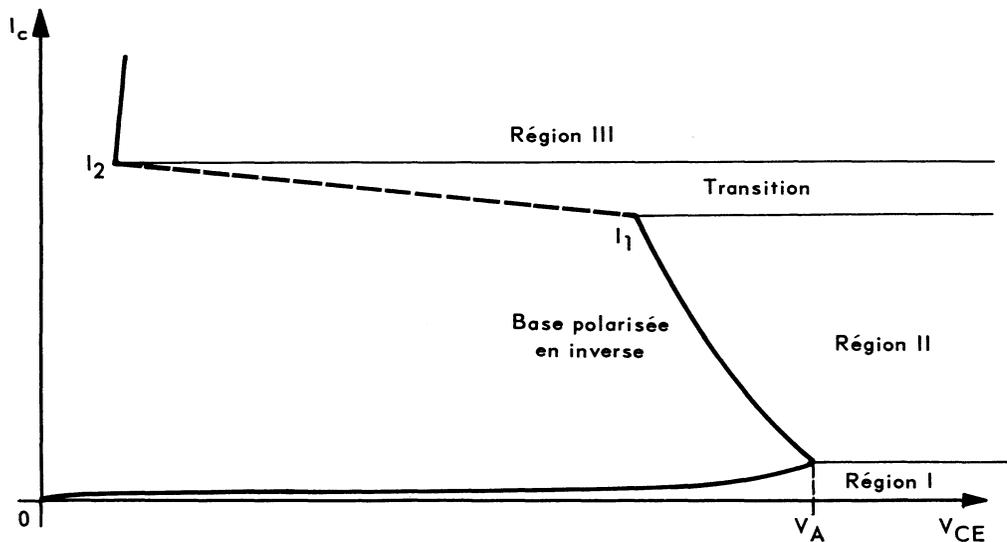


Figure 3

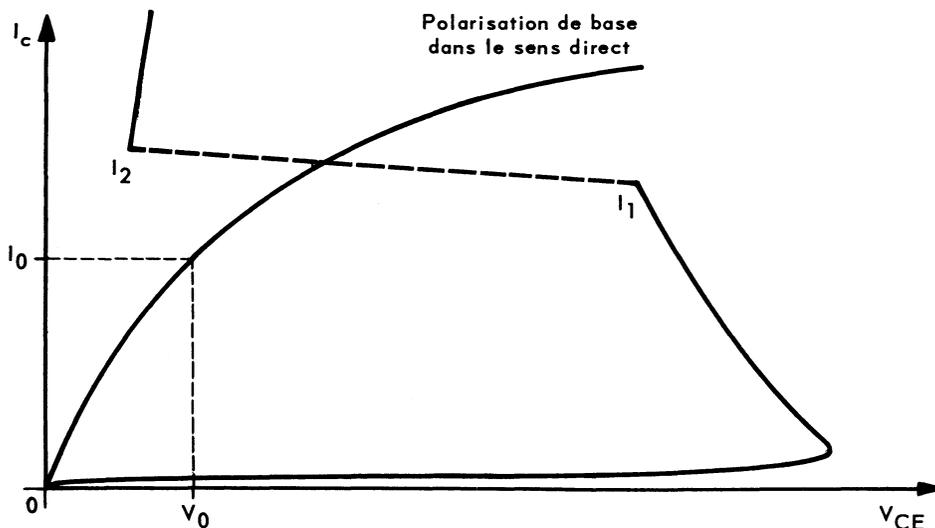


Figure 4

Au point V_A apparaît une résistance négative (premier claquage). Lorsque le courant atteint le point I_1 , un claquage brusque se produit et la caractéristique passe brusquement dans la région III, zone à faible résistance positive. Ce phénomène est appelé claquage secondaire. Sur le même type de caractéristique (Figure 4) on a tracé la caractéristique de sortie pour une polarisation base dans le sens direct. L'intersection de V_0 et de I_0 représente le point de fonctionnement au repos. I_0 doit être situé en dessous du courant de claquage I_2 . Si le transistor est brusquement bloqué avec une charge inductive dans son collecteur, le cyclogramme de blocage prend une forme telle que celle indiquée sur la Figure 5. L'allure du cyclogramme de blocage dépend du rapport L/R de la charge ainsi que de la quantité d'énergie emmagasinée dans l'inductance. L'augmentation de la tension au moment de la coupure est due au fait que le courant dans l'inductance ne peut pas changer instantanément. Dans le cas de la Figure 5, le transistor ne sera pas endommagé puisque son cyclogramme de fonctionnement reste inscrit dans l'aire de sécurité. Dans le cas de la Figure 6, par contre l'énergie emmagasinée dans l'inductance est telle que la surtension produite lors de la coupure atteint la région à résistance négative. Le transistor rentre en claquage secondaire et si l'énergie fournie par l'inductance excède les possibilités du transistor, celui-ci sera détruit.

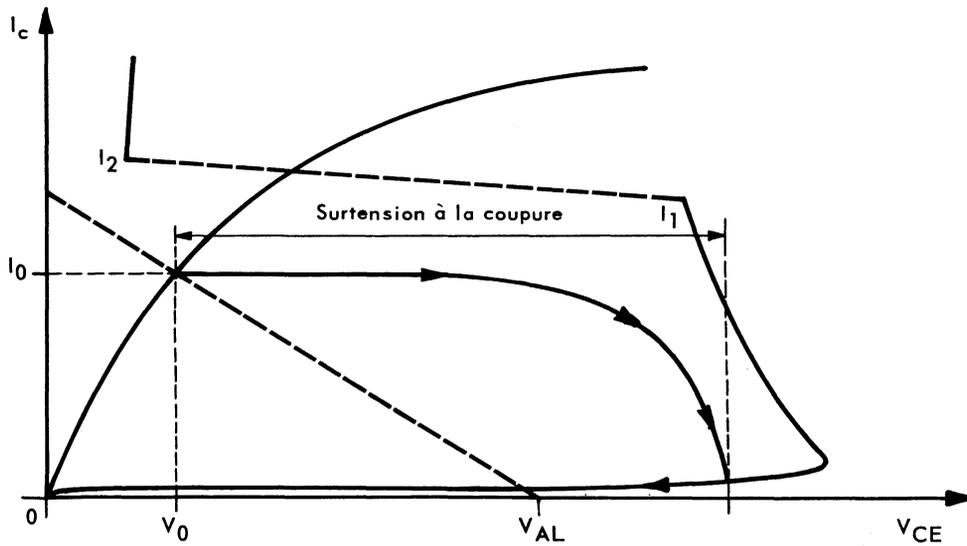


Figure 5

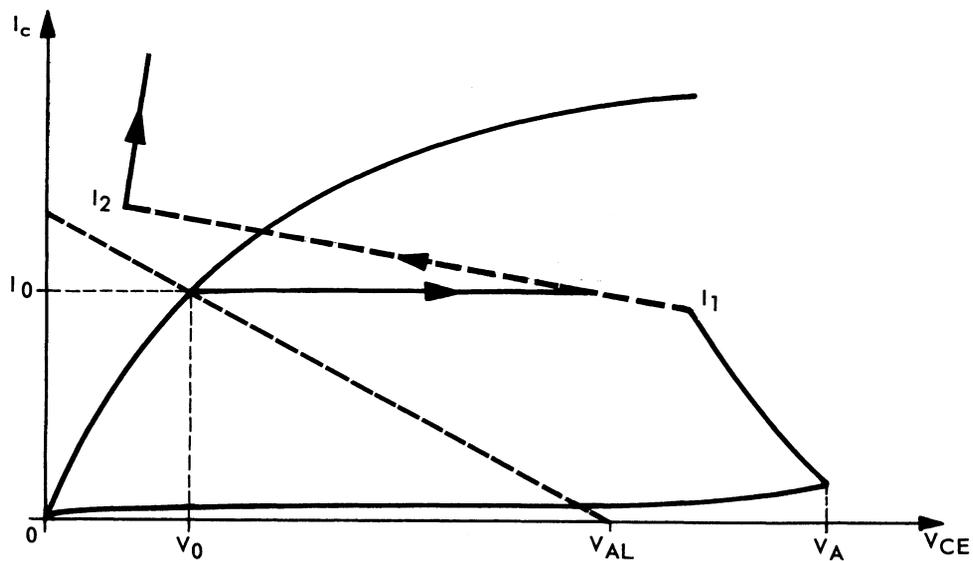


Figure 6

Comment l'utilisateur peut-il éviter le claquage secondaire ?
 La méthode la plus simple consiste à choisir un dispositif qui présente :

- un point de claquage I_2 plus élevé que le courant collecteur I_0 , ceci à la température maximale de fonctionnement. Il est absolument nécessaire de tenir compte de la température parce que le point I_2 diminue lorsque la température augmente. A la température ambiante, I_2 peut se situer au dessus de I_0 , mais à la température de jonction maximale l'inverse peut se produire,

- un point de premier claquage V_A suffisamment élevé de façon à ce que la droite de charge (pour une inductance) ne puisse pas atteindre cette partie de la caractéristique. Ce point dépend également de la température et se déplace vers la gauche lorsque la température augmente.

Les deux conditions énumérées ci-dessus permettent de choisir un dispositif en vue d'une application.

IV - QUELQUES MOYENS PERMETTANT LA SECURITE DE FONCTIONNEMENT AVEC DES CHARGES INDUCTIVES

Assez souvent, le claquage secondaire peut être évité en apportant de légères modifications au circuit de charge. Dans la majorité des cas, il suffit d'adjoindre au circuit inductif soit une diode de limitation ou une diode Zener, soit un réseau RC pour protéger le dispositif contre le claquage secondaire.

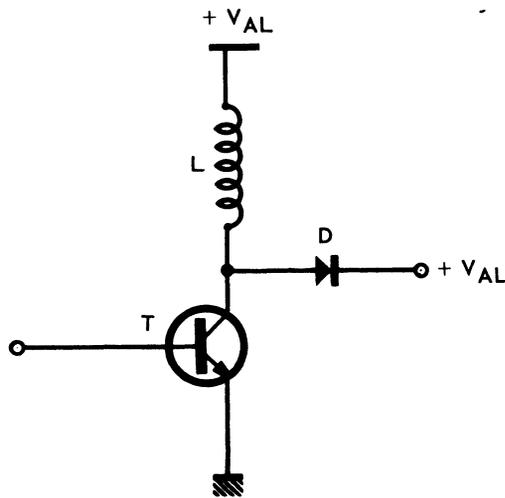


Figure 7

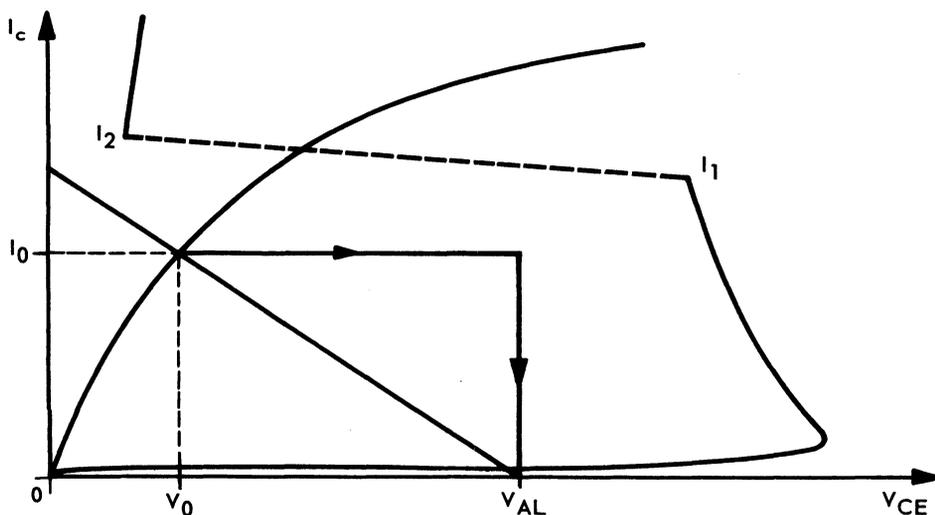


Figure 8

La figure 7 montre la plus simple de ces méthodes. La diode est située entre le collecteur et une tension V_{AL} . Le cyclogramme n'atteindra jamais la région à résistance V_{AL} négative si V_{AL} reste inférieure à la tension de claquage (voir figure 8). V_{AL} Quand le transistor conduit, la diode est polarisée en inverse et n'exerce aucune influence sur le circuit.

Une seconde méthode est indiquée sur la Figure 9. Une diode ordinaire D-2 et une diode Zener D-1 sont montées en série entre collecteur et masse. Lorsque le transistor est bloqué la tension collecteur se trouve limitée à V_z (tension de la diode Zener) que l'on choisit généralement inférieure à V_{AL} .

D2 empêche le passage d'un courant direct dans la diode Zener lorsque le transistor conduit. Notons qu'il y a passage d'un petit courant dans la charge quand le transistor est bloqué.

Dans certains cas il n'est pas possible d'utiliser une diode Zener car l'énergie à dissiper au blocage peut être trop élevée. La Figure 10 montre une façon d'utiliser un réseau R.C. Pendant la conduction du transistor, le condensateur C se charge à une tension $V_{AL} - V_{CE}$. Dans l'inductance L il circule un courant I_L .

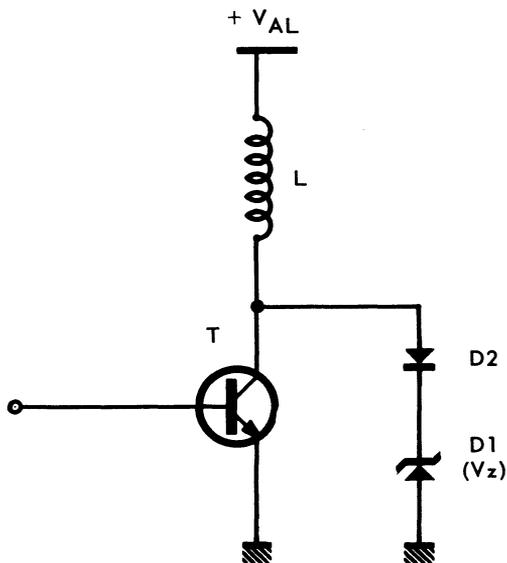


Figure 9

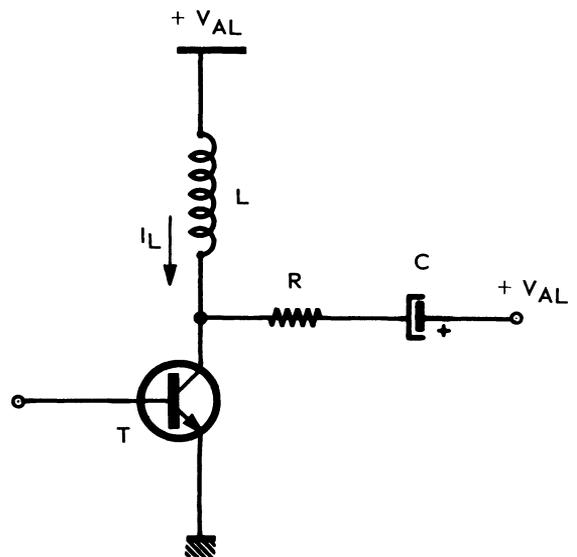


Figure 10

Lorsque le transistor commence à se bloquer, le courant dans l'inductance et la tension aux bornes de C ne peuvent pas changer instantanément. Le courant I_L sera employé à décharger la capacité C ; la tension collecteur-émetteur ne pourra pas atteindre V_{AL} tant que la capacité n'aura pas été complètement déchargée. L'allure du cyclogramme de blocage est indiquée sur la Figure 11 . La résistance R limite l'appel de courant collecteur au début de la conduction. Elle détermine également le temps que mettra C pour se charger à $V_{AL} - V_{CE}$.

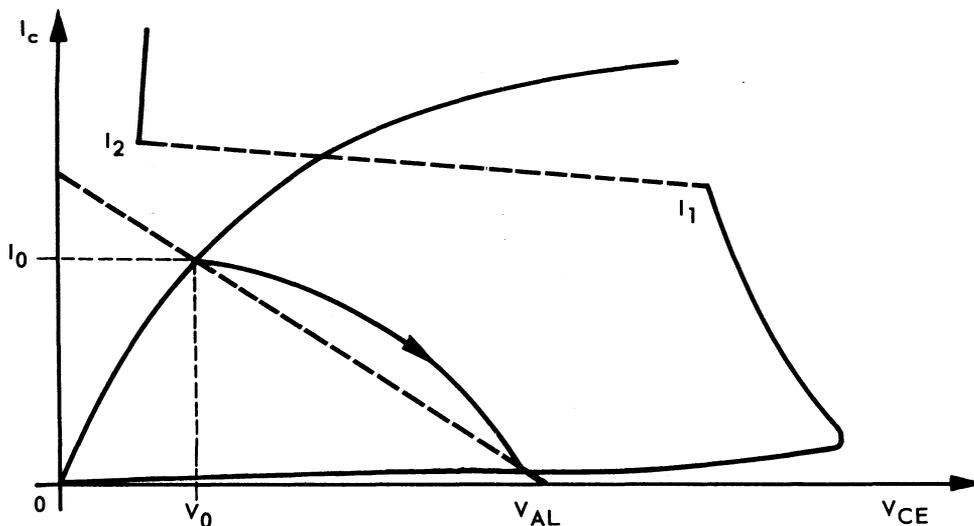


Figure 11

On peut placer en parallèle sur R une diode D comme indiqué sur la Figure 12. La résistance limitera toujours le courant dans la capacité C lors de la mise en conduction de T, mais R sera court-circuité par D lors du blocage. Les valeurs de R et de C sont à déterminer de telle façon que le cyclogramme de fonctionnement reste inscrit dans l'aire de sécurité.

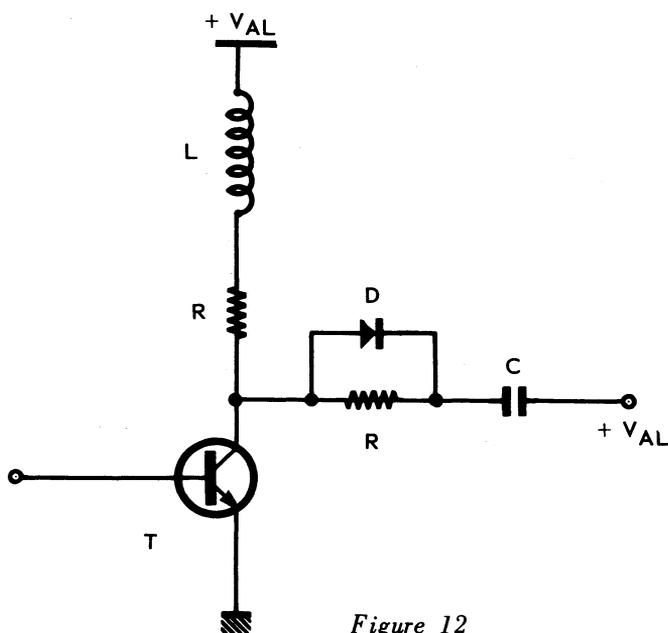


Figure 12

Citons pour terminer l'emploi d'une capacité montée en parallèle sur la charge. Le réseau exact est celui de la Figure 13. La charge comporte une inductance L dont la résistance ohmique est R. En parallèle on branche un réseau RC.

L'impédance globale du circuit situé dans le collecteur du transistor est :

$$Z = \frac{R \left[1 + j\omega \left(\frac{L}{R} + CR \right) - LC\omega^2 \right]}{1 + 2j\omega RC - LC\omega^2}$$

Cette expression devient égale à R à la condition que $RC = L/R$. De ce fait, et pour n'importe quelle fréquence, l'impédance de charge se résume au terme R pourvu que la relation $RC = L/R$ soit vérifiée. Dans ce cas, lorsque le transistor se bloquera, sa tension collecteur atteindra immédiatement la valeur de la tension d'alimentation sans présenter aucune surtension. Chacune des branches du réseau se comporte comme si elles avaient une tension rectangulaire à leurs bornes. Bien que dans chaque branche les courants varient exponentiellement, ceux-ci s'ajoutent pour produire une onde rectangulaire (voir Figure 14). Notons toutefois que le courant dans la branche inductive ne suit pas immédiatement le courant collecteur, mais il n'est pas possible d'effectuer ceci sans produire des surtensions.

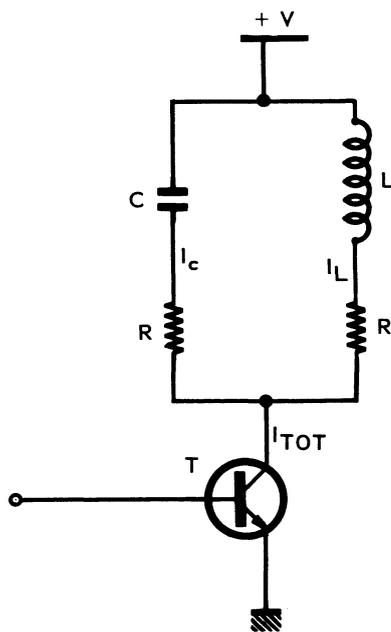


Figure 13

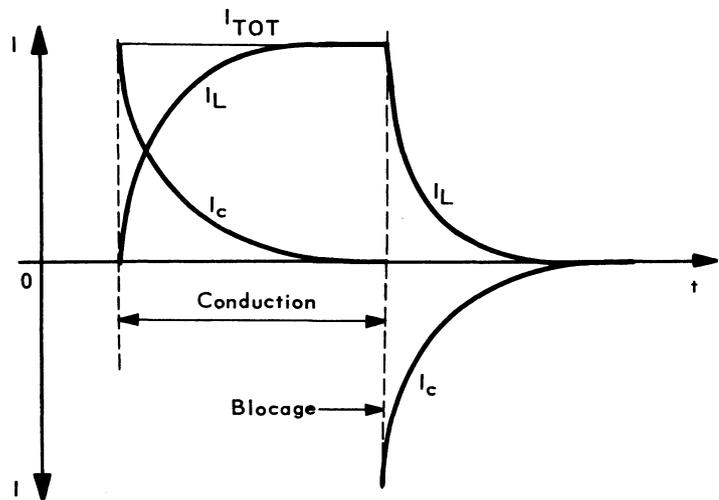


Figure 14

Dans certains cas et pour certaines valeurs d'inductance on peut arriver à déterminer des valeurs de capacités très importantes ; assez souvent il est possible de diminuer la valeur calculée par un facteur 2 ou 3. Evidemment, à ce moment la compensation n'est plus parfaite et il est nécessaire là encore de réaliser un compromis entre la valeur de la capacité et l'amplitude possible des surtensions.

V - EVALUATION DE LA DECHARGE D'UNE ENERGIE EMMAGASINEE DANS UN TRANSISTOR

Quand une inductance L dans laquelle circule un courant I_0 est déchargée dans un transistor présentant une caractéristique semblable à celle de la Figure 15 , il est possible d'établir un schéma équivalent en déchargeant l'inductance L dans un générateur de tension V_B . (Voir Figure 16) . La région à résistance négative de la caractéristique est remplacée par une impédance supposée rigoureusement nulle, pour la simplification de l'analyse du circuit.

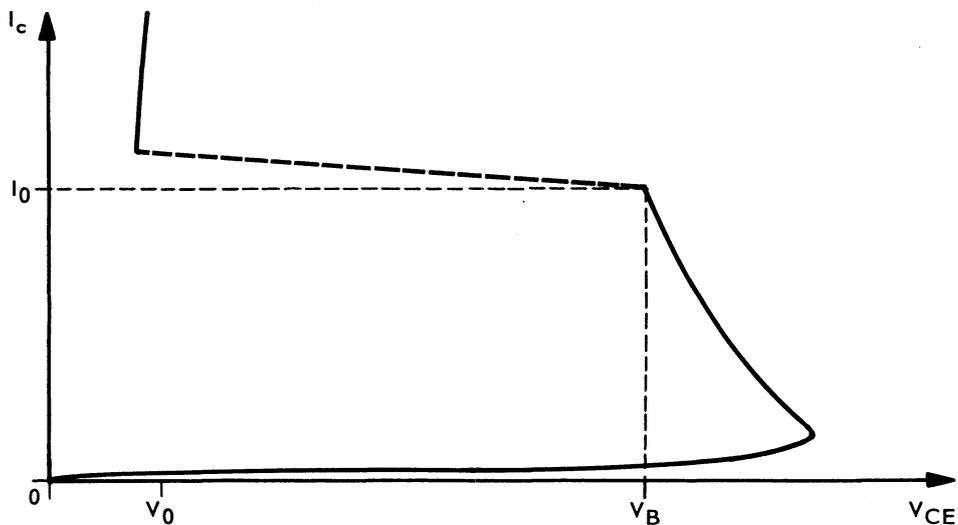


Figure 15

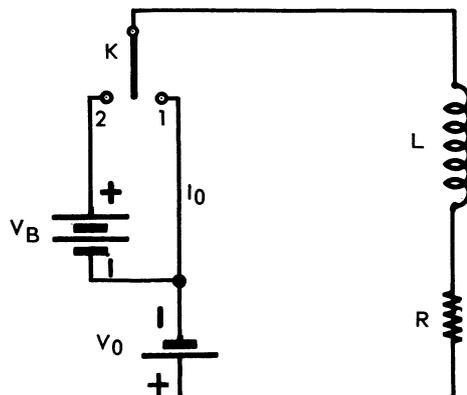


Figure 16

Après que le commutateur K soit passé de la position 1 à la position 2, le courant est donné par :

$$i = I_o e^{-\frac{R t}{L}} + \frac{V_o - V_B}{R} \left(1 - e^{-\frac{R t}{L}} \right) \quad (1)$$

Le temps t_1 nécessaire pour que le courant tombe à zéro est obtenu par¹:

$$t_1 = \frac{L}{R} \text{Log}_e \left(1 + \frac{R I_o}{V_B - V_o} \right) \quad (2)$$

L'énergie J absorbée par le transistor est l'intégrale de la puissance depuis le moment où le commutateur est fermé, jusqu'au temps t_1 :

$$J = \int_0^{t_1} i V_B .dt = \frac{V_B L I_o}{R} \left[1 - \frac{V_B - V_o}{R I_o} \text{Log}_e \left(1 + \frac{R I_o}{V_B - V_o} \right) \right] \quad (3)$$

L'examen de (2) et de (3) fait apparaître que le temps de décharge, t_1 ainsi que l'énergie absorbée par le transistor sont proportionnels à la valeur de l'inductance. J dépend également du courant I_o circulant dans l'inductance juste avant que l'on commute K_o , ainsi que de la tension V_B .

Bibliographie :

- H.S. Smith - Switch high loads with power transistors
Electronic Design - August 1967
- J.F. Young - The switching of inductive loads using transistors. B.C.E. Nov. 1963
- H.C. LIN - Transient operation of transistors with inductive load. I.R.E. Trans. July 1960

« Les informations techniques et schémas insérés dans cette publication sont donnés sans garantie quant à leur protection éventuelle par des brevets. »

« La reproduction de tout ou partie de ce document est autorisée moyennant l'indication complète de la source " Note d'Applications SESCOSEM ". »