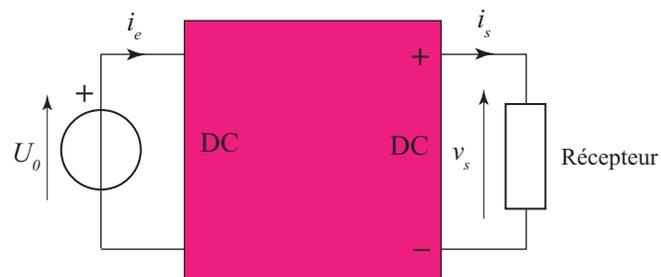


# Le hacheur série

## 1 Le hacheur série

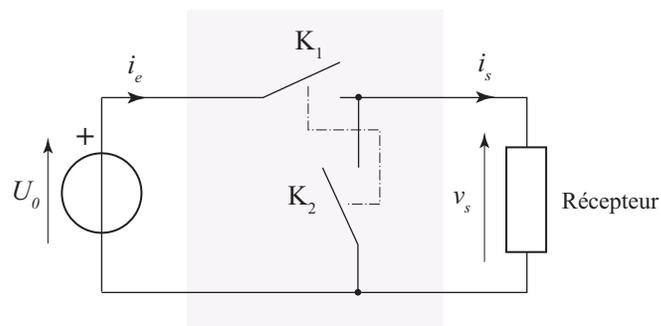
### 1.1 Généralités

Le hacheur est un dispositif permettant d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur -muni d'un filtre LC- alimenté par le réseau de distribution).



### 1.2 Principe du hacheur série

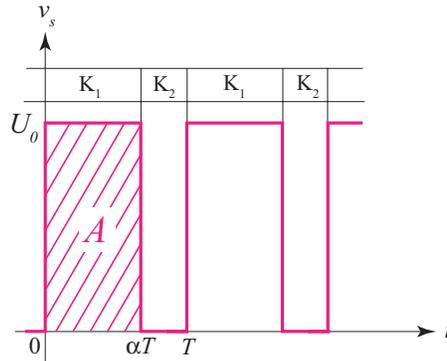
Pour faire varier la valeur moyenne de la tension  $v_s$  aux bornes du récepteur, on réalise l'équivalent du montage simplifié suivant.



Les interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  sont complémentaires :

- $K_1$  fermé,  $K_2$  ouvert :  $v_s = U_0$  ;
- $K_1$  ouvert,  $K_2$  fermé :  $v_s = 0$  ;

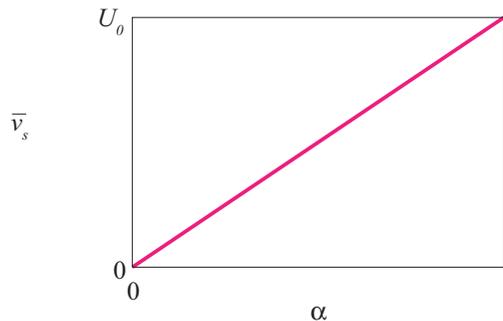
et sont actionnés périodiquement : sur une période  $T$  de fonctionnement du hacheur,  $K_1$  est fermé durant  $\alpha T$ .



La quantité sans unité  $\alpha$  constitue le **rapport cyclique** de la tension  $v_s$ . La valeur moyenne de  $v_s$  est donnée par  $\bar{v}_s = A/T$ ,  $A$  étant l'aire comprise entre  $v_s$  et l'axe des abscisses  $v_s = 0$ . Avec  $A = \alpha T U_0$ , il vient

$$\bar{v}_s = \alpha U_0$$

Quand on fait varier  $\alpha$  de 0 à 1,  $\bar{v}_s$  varie linéairement de 0 à  $U_0$ .

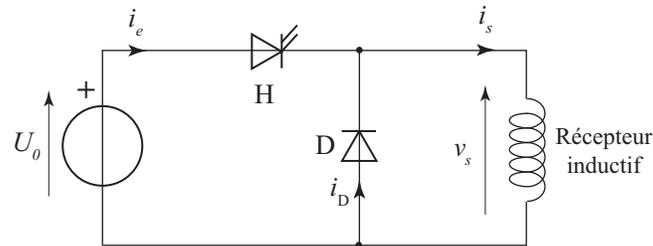


### 1.3 Réalisation des interrupteurs

Dans la suite on s'intéressera exclusivement au cas où le récepteur est inductif (par exemple l'induit d'un moteur à courant continu en série avec une inductance de lissage). La structure que l'on étudiera utilise une diode  $D$  dite de roue libre

pour jouer le rôle de  $K_2$  et un interrupteur électronique H, également unidirectionnel en courant, commandé à la fermeture et à l'ouverture<sup>1</sup> pour jouer le rôle de  $K_1$ . On parle de hacheur série car l'interrupteur commandé H est traversé par le courant appelé par le récepteur.

De 0 à  $\alpha T$ , H est fermé. On a alors  $v_s \simeq U_0$  et par conséquent D, polarisée en inverse, est bloquée. Lorsque H s'ouvre, à  $t = \alpha T$ , la continuité du courant  $i_s$  à travers le récepteur inductif est assurée par D qui devient aussitôt passante ( $v_s \simeq 0$ ) et le reste en principe jusqu'à  $t = T$ .



Cette structure de hacheur n'est pas réversible, ni en tension ni, les interrupteurs étant unidirectionnels, en courant. Le récepteur ne peut donc pas fournir de puissance à la source de tension  $U_0$ .

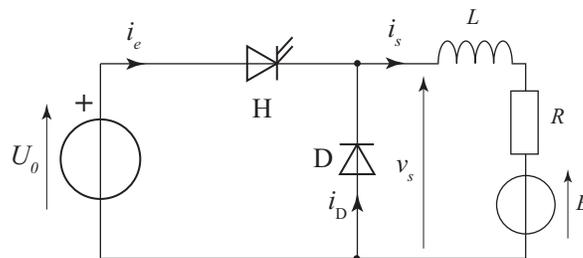
#### 1.4 Chronogrammes des courants

Le récepteur est modélisé par l'association en série d'une source de tension de f.e.m.  $E$ , d'une résistance  $R$  et d'une inductance  $L$  :

$R$  → chute de tension ohmique

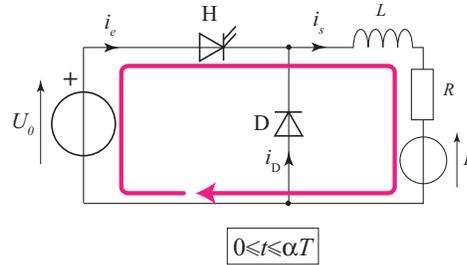
$L$  → chute de tension induite par les variations du flux du champ magnétique créé par le courant  $i_s$

$E$  → fem moyenne induite par les variations du flux du champ magnétique créé par les autres sources de champ magnétique



Les interrupteurs H et D sont supposés parfaits : tension nulle à l'état passant, courant nul à l'état bloqué.

- De 0 à  $\alpha T$ , H est passant et D est bloquée.



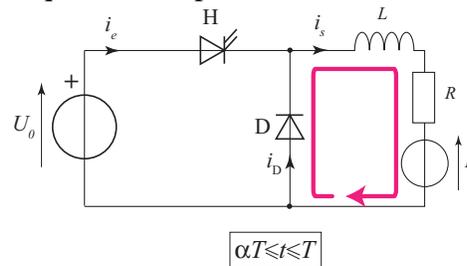
Par conséquent le courant  $i_D$  est nul et les courants  $i_e$  et  $i_s$  identiques et solutions de l'équation différentielle

$$U_0 - L \frac{di_s}{dt} - Ri_s - E = 0$$

soit

$$i_s(t) = i_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U_0 - E}{R} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{L}{R}$$

- De  $\alpha T$  à  $T$ , H est bloqué et D est passante.



Par conséquent le courant  $i_e$  est nul et les courants  $i_D$  et  $i_s$  identiques et solutions de l'équation différentielle

$$L \frac{di_s}{dt} + Ri_s + E = 0$$

soit

$$i_s(t) = i_1 e^{-\left(\frac{t-\alpha T}{\tau}\right)} - \frac{E}{R}$$

L'expression des constantes  $i_0$  et  $i_1$  en fonction des données du problème s'obtient en écrivant d'une part la continuité (au sens mathématique) entre les 2 expressions de  $i_s$  à l'instant  $t = \alpha T$  et d'autre part la périodicité de  $i_s$  en régime établi

$(i_s(t=0) = i_s(t=T))$ . On obtient

$$i_0 = \frac{U_0}{R} \left( \frac{e^{-\frac{T}{\tau}(1-\alpha)} - 1}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right)$$

$$i_1 = \frac{U_0}{R} \left( \frac{1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \right)$$

On voit donc que  $i_0$  est négatif et  $i_1$  positif : durant l'intervalle  $[0; \alpha T]$  le courant  $i_s$  est croissant et l'énergie stockée sous forme magnétique dans l'inductance  $(0, 5Li_s^2)$  augmente ; durant l'intervalle  $[\alpha T; T]$   $i_s$  est décroissant et l'inductance se décharge. On a

$$i_{s,min} = i_0 + \frac{U_0 - E}{R}$$

$$i_{s,max} = i_1 - \frac{E}{R}$$

La valeur moyenne du courant dans le récepteur s'obtient en écrivant

$$v_s = L \frac{di_s}{dt} + Ri_s + E$$

puis en prenant la valeur moyenne de chacun des 2 membres :

$$\overline{v_s} = L \overline{\frac{di_s}{dt}} + R\overline{i_s} + E$$

Or, la valeur moyenne d'une somme de fonctions est la somme des valeurs moyennes de ces fonctions :

$$\alpha U_0 = L \overline{\frac{di_s}{dt}} + R\overline{i_s} + E$$

Comme **la valeur moyenne de la dérivée d'une fonction périodique est nulle**, il vient

$$\overline{i_s} = \frac{\alpha U_0 - E}{R}$$

Remarquons que les interrupteurs H et D étant unidirectionnels en courant, le courant  $i_s$  moyen est nécessairement positif quel que soit  $\alpha$ . Ceci implique  $E < \alpha U_0$ .

En pratique, la période  $T$  de fonctionnement du hacheur est très petite devant la constante de temps  $\tau$  (fréquence de hachage élevée). A la limite où  $T/\tau \rightarrow 0$ ,

on a<sup>2</sup>

$$i_0 \simeq \frac{U_0}{R} \left( -(1-\alpha) - \frac{\alpha(1-\alpha)T}{2\tau} \right)$$

$$i_1 \simeq \frac{U_0}{R} \left( \alpha + \frac{\alpha(1-\alpha)T}{2\tau} \right)$$

Ainsi,

$$i_{s,max} \simeq \bar{i}_s + \frac{\Delta i_s}{2}$$

$$i_{s,min} \simeq \bar{i}_s - \frac{\Delta i_s}{2}$$

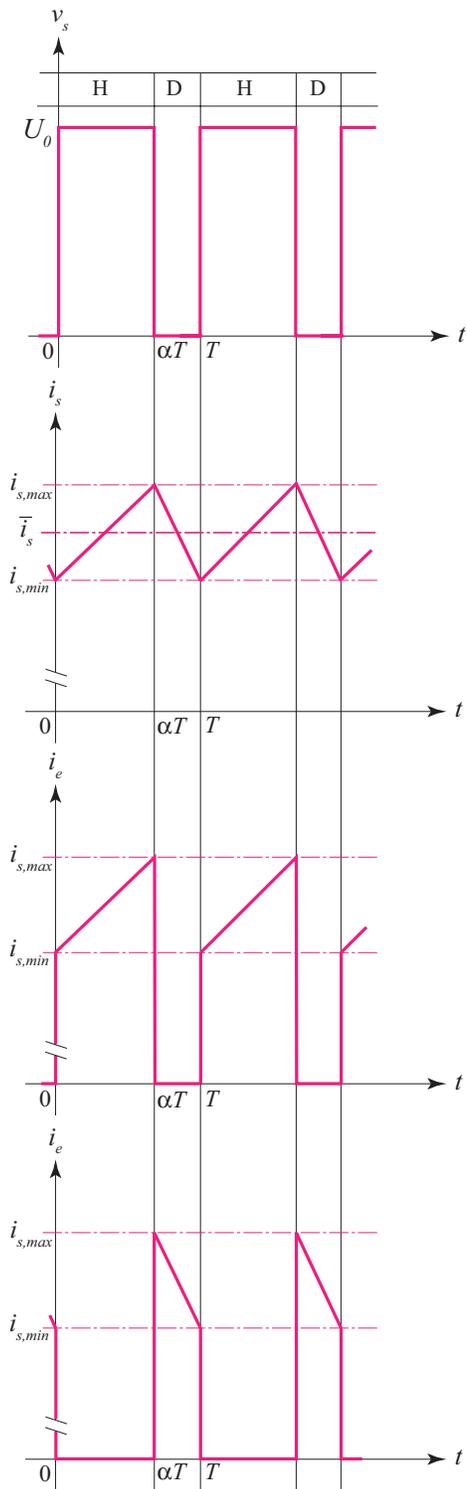
avec

$$\Delta i_s = \frac{U_0 T}{R \tau} \alpha (1 - \alpha)$$

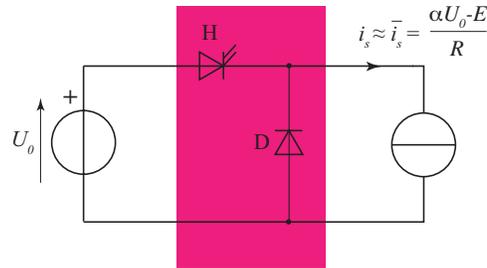
L'ondulation du courant  $\Delta i_s = i_{s,max} - i_{s,min}$  est maximale pour  $\alpha = 0,5$  et

$$\Delta i_{s,max} = \frac{U_0 T}{4R \tau} = \frac{U_0 T}{4L}$$

On voit donc que l'ondulation du courant dans le récepteur est d'autant plus faible que la période  $T$  de fonctionnement du hacheur est petite devant la constante de temps  $\tau$  du récepteur, d'où l'intérêt pratique d'utiliser une fréquence de hachage élevée. Parallèlement, dans la limite  $T/\tau \rightarrow 0$ , les branches d'exponentielle décrites par  $i_s$  tendent vers des segments de droites.



En pratique, l'ondulation relative  $\Delta i_s / \bar{i}_s$  du courant appelé par le récepteur n'excède pas quelques pourcents. Dans ces conditions, le récepteur réalise en bonne approximation un récepteur de courant continu (constant).



L'expression de  $\Delta i_s$  peut être encore simplifiée dans la mesure où la chute de tension ohmique  $Ri_s$  est négligeable devant la f.e.m.  $E$  du récepteur. En effet, dans ce cas on a

$$\bar{v}_s = \alpha U_0 = E + R\bar{i}_s \simeq E$$

Or,

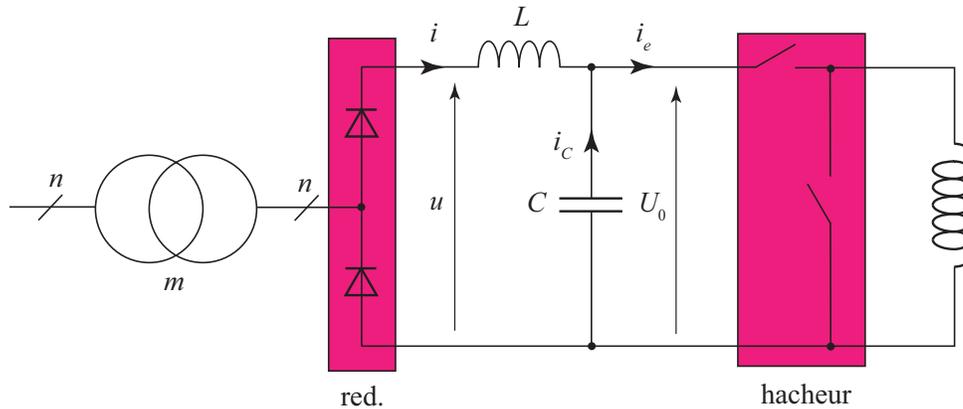
$$\Delta i_s = \frac{U_0 T}{R \tau} \alpha (1 - \alpha) = \frac{(1 - \alpha) U_0}{L} \alpha T = \frac{(U_0 - \alpha U_0)}{L} \alpha T$$

soit

$$\Delta i_s \simeq \frac{(U_0 - E)}{L} \alpha T$$

## 1.5 Considérations sur la source de tension continue

La source de tension délivrant la tension continue  $U_0$  doit pouvoir débiter un courant  $i_e$  subissant des sauts brutaux à l'ouverture et à la fermeture de H. Cette discontinuité pose donc un problème si la source de tension continue est inductive i.e. possède une inductance dans son modèle équivalent de Thévenin. A priori ce n'est pas le cas pour une batterie d'accumulateur. En revanche, lorsqu'on utilise un pont redresseur pour obtenir une source de tension continue à partir du réseau alternatif qui est par nature inductif, il faut intercaler entre le pont et le hacheur un filtre  $LC$  rendant le courant  $i$  débité par le pont à peu près constant.



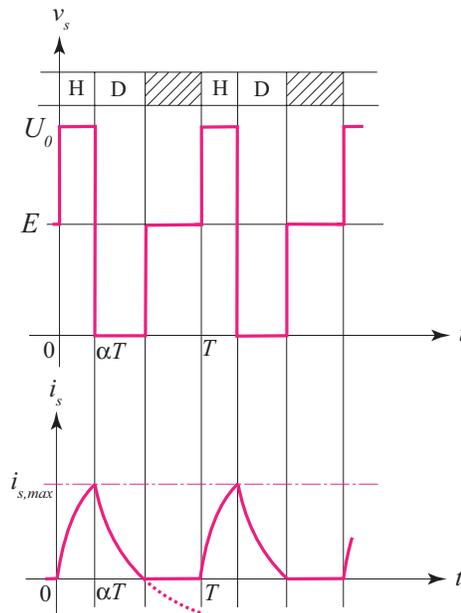
Pour comprendre l'effet du filtre  $LC$ , décomposons le courant continu  $i_e$  en un courant constant  $\bar{i}_e$  auquel s'ajoute un courant alternatif  $\tilde{i}_e$  de période  $T$  imposée par le hacheur. Pour le courant continu,  $L$  est un fil et  $C$  un interrupteur ouvert. Idéalement, pour le courant alternatif c'est le contraire<sup>4</sup>. Ainsi, idéalement,

- le courant débité par le pont est constant :  $i \simeq \bar{i}_e$  ;
- la composante alternative de  $i_e$  est fournie par le condensateur :  $i_c \simeq \tilde{i}_e$  ;
- la tension en entrée du pont est constante égale à  $U_0 \simeq \bar{u}$ .

## 1.6 Cas de la conduction discontinue

Les résultats précédents décrivent le fonctionnement normal du hacheur dans lequel le courant  $i_s$  à travers le récepteur ne s'annule jamais. On parle de conduction ininterrompue ou continue. Cependant, dans le cas où le récepteur est actif ( $E$  non nulle), si le rapport  $T/\tau$  n'est plus négligeable (c'est à dire lorsque la fréquence de fonctionnement du hacheur est trop basse ou que l'inductance  $L$  est trop faible) et que  $\bar{i}_s$  est faible (moteur à vide), le courant  $i_s$  peut s'annuler entre  $\alpha T$  et  $T$ , Dès lors,  $i_s$  reste nul, et par conséquent  $v_s = E$ , jusqu'à  $t = T$ .

<sup>4</sup>L'impédance d'une inductance tend vers l'infini tandis que celle d'un condensateur tend vers 0 lorsque la fréquence tend vers l'infini. En pratique il faut s'assurer que, pour la pulsation  $\omega = 2\pi/T$  du fondamental de  $i_e$ , l'impédance du condensateur  $C$  est négligeable devant celle de l'inductance  $L$ , ce qui se traduit par la condition  $LC\omega^2 \gg 1$ .



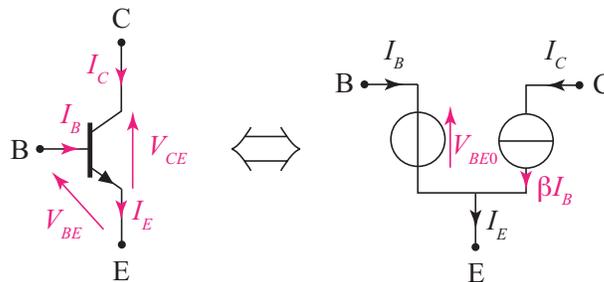
## 2 Réalisation d'un hacheur série à transistor bipolaire

### 2.1 Rappels sur le transistor bipolaire

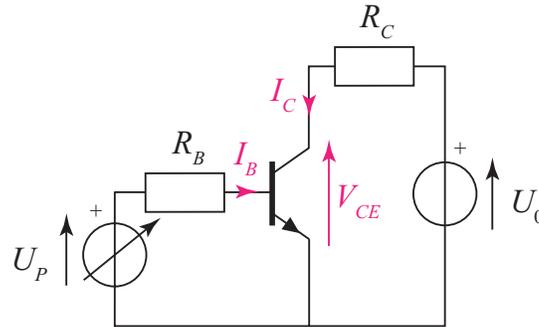
#### 2.1.1 Modèle électrique pour le courant continu

Un transistor bipolaire possède 3 bornes : la base (B), le collecteur (C) et l'émetteur (E). Les grandeurs  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$ ,  $V_{BE}$  et  $V_{CE}$  sont positives telles qu'elles sont fléchées et l'on a  $I_E = I_B + I_C$ .

Tant que la tension  $V_{BE}$  est inférieure à une certaine tension  $V_{BE0}$  tous les courants sont nuls : le transistor est dit **bloqué**. Sinon,  $V_{BE} = V_{BE0}$  et le courant  $I_C$  est tel que  $I_C = \beta I_B$ . Typiquement  $V_{BE0} = 0,6 \text{ V}$  et  $\beta$  est de l'ordre de 100.



### 2.1.2 Montage émetteur commun

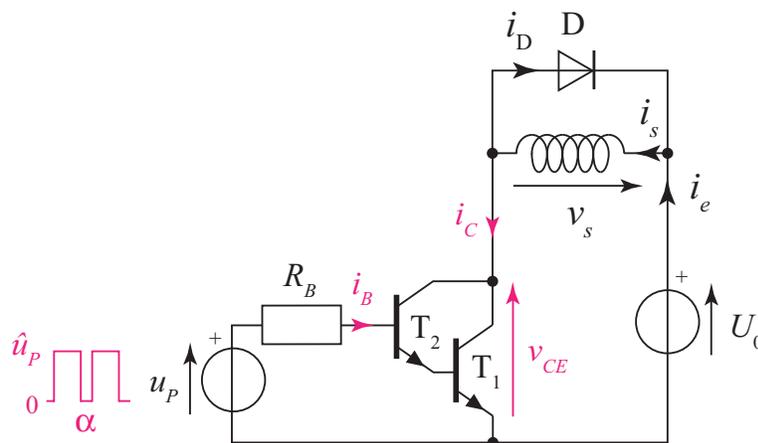


Le circuit ci-dessus représente le circuit généralement employé pour utiliser le transistor bipolaire en courant continu. La source de tension continue  $U_P$  débite le courant de base  $I_B$ . D'après la loi des mailles,  $U_P - R_B I_B - V_{BE0} = 0$ , d'où

$$I_B = \frac{U_P - V_{BE0}}{R_B}$$

La source de tension continu  $U_0$  débite alors le courant  $I_C = \beta I_B$ . D'après la loi des mailles  $U_0 - R_C I_C - V_{CE} = 0$ , d'où  $V_{CE} = U_0 - R_C I_C$ . Suivant la valeur de  $I_C$ , la tension  $V_{CE}$  peut varier entre 0 et  $U_0$ . Dans le cas où  $V_{CE} = 0$ , on dit que le transistor est **saturé** car le courant  $I_C$  est alors maximal et vaut  $I_C = U_0/R_C$ . A l'opposé, si  $V_{CE} = U_0$ , le transistor est **bloqué** car alors  $I_C = 0$  (et donc  $I_B$  et  $I_E$  sont également nuls). Avec les équations précédentes, on détermine les 2 valeurs extrêmes de  $U_P$  qui bloque et qui sature le transistor.

## 2.2 Hacheur série à transistor bipolaire



Généralement l'intensité du courant  $i_s$  appelé par le récepteur impose l'utilisation d'un transistor de puissance. Or ce dernier nécessite un courant de base à saturation encore trop élevé pour le générateur assurant la commande du transistor. Il faut donc en principe une interface entre le circuit de puissance et celui assurant la commande. Une solution simple consiste à utiliser 2 transistors montés en *darlington*. Ainsi, le courant  $i_B$  nécessaire pour saturer  $T_1$  sera environ  $\beta_2$  fois plus faible qu'avec  $T_1$  seul tandis que le courant collecteur de  $T_2$  sera environ  $\beta_1$  fois plus faible que  $i_C$ .

- De 0 à  $\alpha T$ ,  $u_P = \hat{u}_P$ . Le transistor de puissance  $T_1$  est saturé :  $v_{CE} \simeq 0$ . Ainsi  $v_s \simeq U_0$ ,  $i_e = i_s = i_C$  et  $i_D = 0$ .
- De  $\alpha T$  à  $T$ ,  $u_P = 0$ .  $T_1$  est bloqué :  $i_C = i_e = 0$ ,  $i_s = i_D$ ,  $v_s = 0$  et  $v_{CE} = U_0$ .

### 2.3 Choix des fréquences

Le choix de la fréquence de hachage  $f$  découle d'un compromis entre une faible ondulation relative du courant et un bon rendement du hacheur. En effet, en pratique les interrupteurs ne sont pas idéaux et occasionnent des pertes, notamment lors des commutations. Or plus la fréquence augmente, plus il y a de commutations par unité de temps, plus les pertes par commutation augmentent diminuant ainsi le rendement. Avec des transistors,  $f$  peut aller de 5 à 25 kHz.