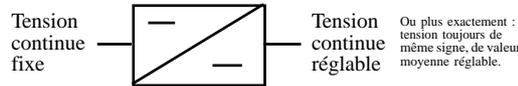


# Hacheur série

## 1 Définition et symbole

Le hacheur est un convertisseur statique continu-continu

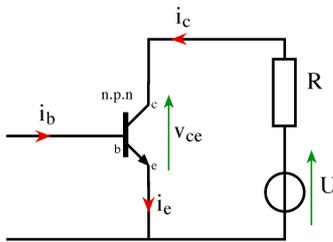
**Symbole :**



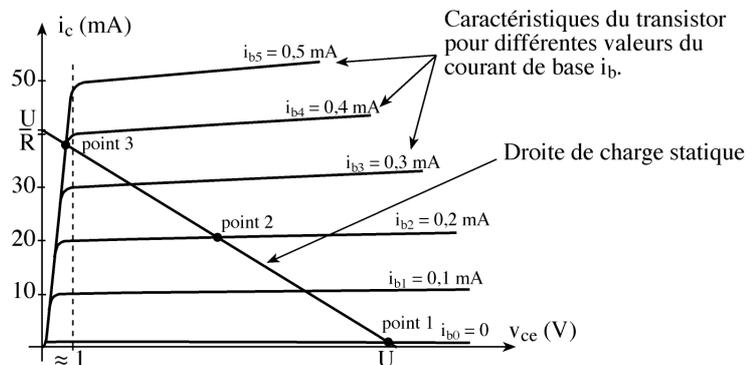
## 2 Le transistor bipolaire en commutation

Le transistor est le composant de base du hacheur. C'est lui qui va faire office d'interrupteur. Voici un bref aperçu de son fonctionnement.

### 2.1 Caractéristique du transistor associé à une charge résistive.



b : base, c : collecteur, e : émetteur  
 La flèche sur le collecteur indique le sens du courant collecteur-émetteur. Le courant de base est la commande. Le circuit collecteur-émetteur est le circuit de puissance.  
 Un faible courant de base commande un fort courant collecteur.



Loi des noeuds au transistor :  $i_e = i_c + i_b$

Loi des mailles :  $v_{ce} = U - R \cdot i_c$  cette équation permet de tracer la droite de charge statique.

Pour la tracer, il suffit de deux points  $(v_{ce}, i_c)$  :

$$v_{ce} = 0 \Rightarrow i_c = \frac{U}{R} \quad \text{point } (0, U/R)$$

$$i_c = 0 \Rightarrow v_{ce} = U \quad \text{point } (U, 0)$$

Pour un courant  $i_b$  donné, le courant  $i_c$  et la tension  $v_{ce}$  sont déterminés par le point de fonctionnement, c'est-à-dire le point d'intersection de la caractéristique  $i_c=f(v_{ce})$  du transistor et la droite de charge.

Sur la caractéristique, trois points d'intersection sont représentés :

- le point 2 correspond à un exemple du mode de fonctionnement en amplification ;
- les points 1 et 3 correspondent à deux situations extrêmes qui sont celles du mode de fonctionnement en commutation.

### 2.2 Mode de fonctionnement en amplification

- $0 < i_b < i_{b4}$  (ex. point 2) le courant à travers la charge est proportionnel au courant de base.

$i_c = \beta \cdot i_b$      $\beta$  est l'amplification en courant (autre symbole :  $\beta = h_{FE}$ ).

Le transistor est un amplificateur de courant.

### 2.3 Mode de fonctionnement en commutation

- $i_b = 0 \Rightarrow i_c = 0$  (point 1)    Aucun courant ne traverse la charge R.     $i_c \approx 0$

Le transistor est bloqué.    Il est équivalent à *un interrupteur ouvert*    

- $i_b > i_{b4}$  (point 3) Même si l'on augmente  $i_b$ , le point de fonctionnement reste au point 3.

$i_c = \frac{U - v_{ce}}{R} \approx \frac{U - 1}{R} \approx \frac{U}{R}$      $i_c \approx \frac{U}{R}$

Le transistor est saturé.    Il est équivalent à *un interrupteur fermé*.    

#### Conclusion :

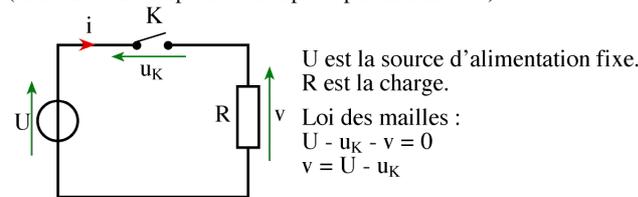
Dans ce mode de fonctionnement, le transistor est équivalent à un interrupteur unidirectionnel commandé à l'ouverture et à la fermeture.

C'est le fonctionnement utilisé pour le hacheur.



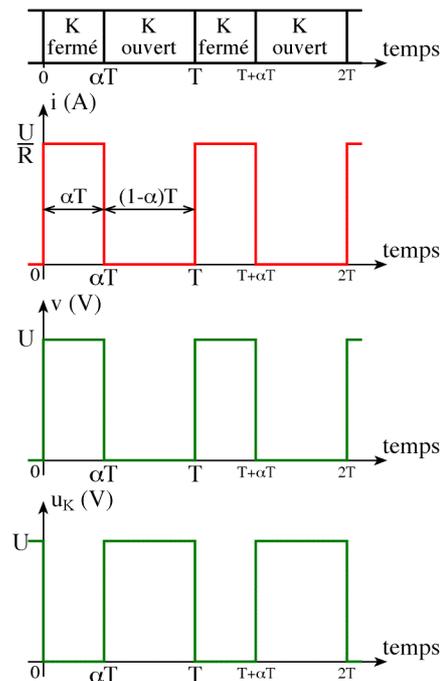
## 3 Principe du hacheur série

Montage de principe : débit sur une charge résistive  
(en réalité l'interrupteur est remplacé par un transistor)



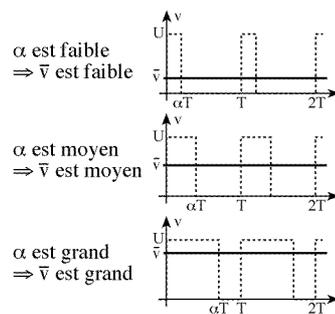
On choisit une période T et une fraction  $\alpha$  de cette période.  
 $\alpha$  s'appelle le rapport cyclique,  $0 < \alpha < 1$ , sans dimension.

- de 0 à  $\alpha T$  : K est fermé     $\Rightarrow$      $u_K = 0$   
 $v = U$   
 $i = \frac{v}{R} = \frac{U}{R}$
- de  $\alpha T$  à T : K est ouvert     $\Rightarrow$      $i = 0$   
 $v = Ri = 0$   
 $u_K = U$



**Commentaires :**

- La tension de sortie du hacheur (tension  $v$ ) n'est pas continue mais toujours positive. Lorsque la période est assez faible (fréquence de 100 à 1000 Hz) la charge ne « voit » pas les créneaux mais la valeur moyenne de la tension.
- le rapport cyclique  $\alpha$  peut être réglé. Par conséquent la valeur moyenne  $\bar{v}$  (ou  $\langle v \rangle$ ) de  $v$  va varier.
- il s'agit d'un hacheur série car l'interrupteur K est monté en série entre la source et la charge.



### 4 Valeur moyenne de la tension en sortie du hacheur

Exprimons la valeur moyenne de  $u$  en fonction du rapport cyclique  $\alpha$ .

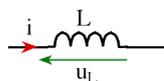
Pour cela nous calculons sa valeur moyenne sur une période :  $\bar{v} = \frac{\alpha T \cdot U + (1 - \alpha) T \cdot 0}{T} = \alpha U$

Valeur moyenne :  $\bar{v} = \alpha U$

### 5 Débit sur une charge inductive

#### 5.1 Propriété des inductances

Equation fondamentale :



$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

De cette équation nous pouvons démontrer les propriétés ci-dessous.

**En régime continu établi :** l'inductance se comporte comme un court-circuit.

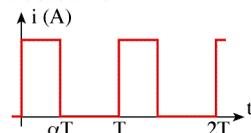
**En régime périodique établi :** la tension moyenne est nulle :  $\bar{u}_L = 0$

- En régime quelconque :** d'une façon générale:
- le courant dans une inductance ne peut pas subir de discontinuité.
  - l'inductance s'oppose aux variations du courant qui la traverse, et ce d'autant plus que :
    - L est grand ;
    - la tension aux bornes de l'inductance est plus faible.

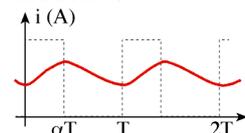
**Conclusion :**

Une inductance lisse le courant.

courant pour une charge résistive :



courant pour une charge inductive :

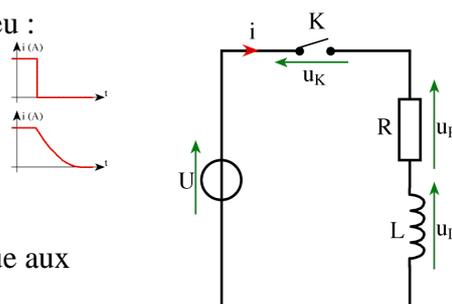


#### 5.2 Problème lié aux charges inductives

A la fermeture de K le courant s'établit.

A l'ouverture de K deux phénomènes contradictoires ont lieu :

- la commande qui veut annuler subitement le courant
- la bobine qui ne peut subir de discontinuité de courant



**Résultat du conflit :**

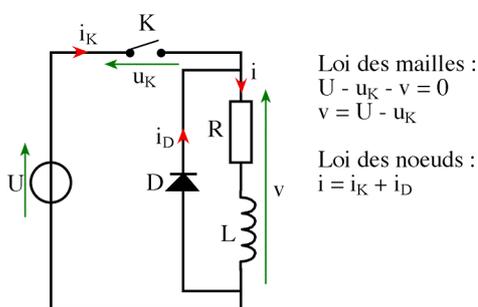
c'est la bobine qui « gagne » en provoquant un arc électrique aux bornes de l'interrupteur pour maintenir le courant.

**Conséquence :**

L'interrupteur qui est en réalité un transistor subit alors à chaque blocage une surtension qui peut être destructrice. Il faut prévoir un système qui permette le blocage normal du transistor.

**5.3 Solution et analyse du fonctionnement**

**Montage :**



Loi des mailles :  
 $U - u_K - v = 0$   
 $v = U - u_K$

Loi des noeuds :  
 $i = i_K + i_D$

**Analyse du fonctionnement :**

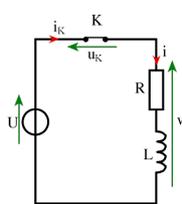
- de 0 à  $\alpha T$  : K est fermé.

La source U alimente la charge.  
 Le courant ne peut pas passer par la diode.

$u_K = 0 \Rightarrow v = U$   
 $i = i_K$  et  $i_D = 0$

Le courant augmente progressivement (la pente dépend de la valeur de L).

Montage équivalent



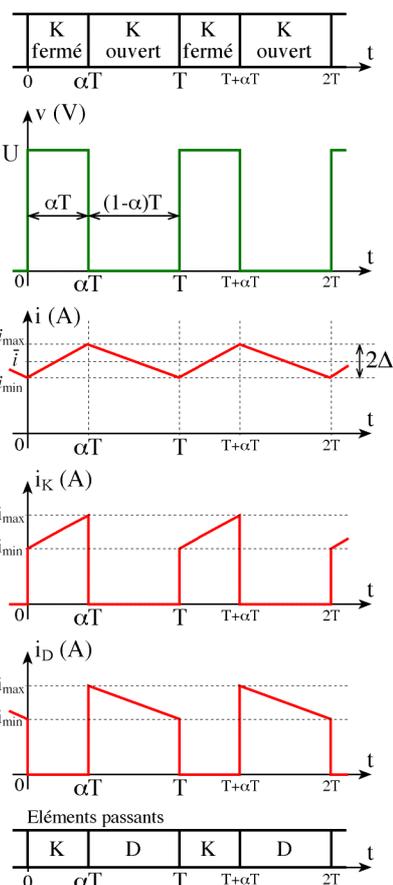
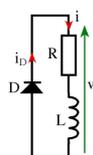
- de  $\alpha T$  à T : K est ouvert.

La bobine maintient le courant à travers la diode.

$v \approx 0 \Rightarrow u_K = U$   
 $i = i_D$  et  $i_K = 0$

Comme la charge n'est pas alimentée, le courant diminue progressivement.

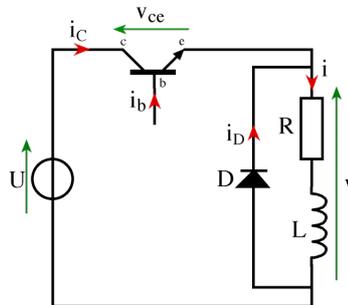
Montage équivalent



**Commentaires :**

- A l'ouverture de K, il n'y aura pas d'étincelle puisque le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode.
- D est appelé diode de roue libre car elle est active lorsque la charge n'est pas alimentée. Elle est nécessaire pour un bon fonctionnement du montage.
- La bobine lisse le courant. Plus L est grand, plus  $\Delta i$  sera petit (voir les oscillogrammes).

**Montage réel :**



L'interrupteur est remplacé par un transistor.

Le courant  $i_b$  commande la saturation (fermeture) ou le blocage (ouverture) du transistor.

**5.4 Ondulation du courant dans la charge**

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2}$$

Elle peut être mesurée à l'oscilloscope en visualisant la tension aux bornes d'une résistance.

Pour diminuer  $\Delta i$ , il faut augmenter l'inductance L ou/et la fréquence  $f$ .

**5.5 Courant moyen dans la charge**

Si on peut négliger la résistance de la charge on peut écrire :

$$\bar{i} = I \approx \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$$

Intensité moyenne dans le transistor :  $\bar{i}_K = I_K = \alpha I$

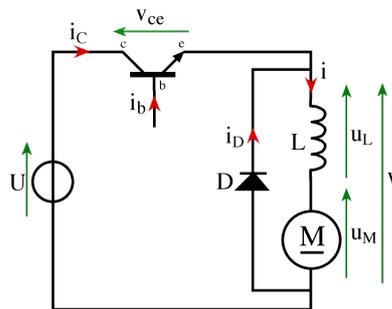
Intensité moyenne dans la diode :  $\bar{i}_D = I_D = (1 - \alpha)I$

**Remarque :** toute l'étude du paragraphe 5 a été faite en supposant la résistance R de la charge négligeable.

## 6 Application au moteur

Le hacheur série est souvent employé pour commander un moteur à courant continu. On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnel à la tension d'alimentation.

**Montage :**



**Commentaire :**

Pour un bon fonctionnement du moteur, il est préférable que le courant soit le plus régulier possible, d'où la présence d'une bobine de lissage. Si son inductance est suffisamment grande, on pourra considérer le courant comme constant ( $\Delta i \approx 0$ ).

Loi des mailles :  $v = u_M + u_L$

On passe aux valeurs moyennes :

$$\bar{v} = \bar{u}_M + \bar{u}_L$$

Et comme pour un signal périodique :

$$\bar{u}_L = 0$$

Nous obtenons pour le moteur :

$$u_M = E = \bar{v} = \alpha U$$

Finalement la f.é.m. du moteur et donc la vitesse peuvent être réglés grâce au rapport cyclique par la relation :

$$\boxed{E = \alpha U}$$

On définit la vitesse maximum pour  $\alpha = 1$  :

$$E = U = K' n_M$$

(on néglige les résistances de l'induit et de la bobine)

Pour une valeur de  $\alpha$  quelconque :

$$E = \alpha U = \alpha K' n_M \quad \text{et} \quad E = K' n$$

D'où la vitesse en fonction de  $\alpha$  :

$$\boxed{n = \alpha n_M}$$

Dans tous les résultats de ce paragraphe 6, nous avons négligé les résistances de l'induit et de la bobine.

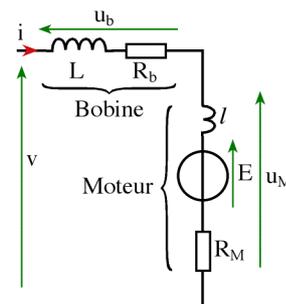
**Remarque**

Le modèle électrique complet du moteur et de la bobine de lissage est représenté ci-contre.

$$v = u_b + u_M = u_L + u_l + E + (R_M + R_b) \cdot i$$

En passant aux valeurs moyennes : ( $\bar{u}_L$  et  $\bar{u}_l$  sont nuls)

$$\bar{v} = E + R \cdot \bar{i} \quad \text{avec} \quad R = R_M + R_b$$



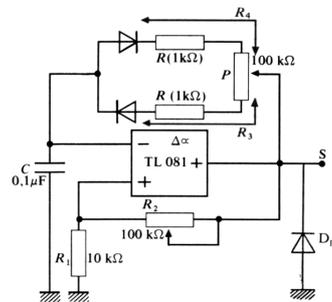
## 7 Commande du transistor

Pour alimenter la base du transistor, il faut réaliser un montage électronique délivrant un signal en créneaux avec un rapport cyclique réglable. Il s'agit d'un oscillateur.

Il existe plusieurs circuits intégrés réalisant cette fonction.

### Exemple 1 :

(extrait du livre Physique appliquée Terminale Génie électrotechnique - R. Mérat, R. Moreau - éd. Nathan Technique 1994)



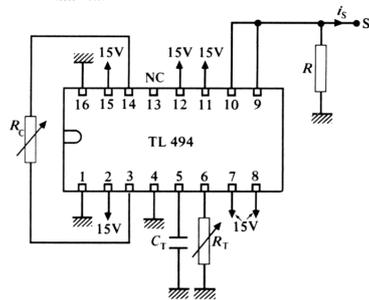
Le courant de sortie de l'AOP étant très faible (10 à 20 mA), il conviendra d'utiliser un transistor Darlington.

$$T = (R_3 + R_4) \ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$\alpha = \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

### Exemple 2 :

(extrait du livre Physique appliquée Terminale Génie électrotechnique - R. Mérat, R. Moreau - éd. Nathan Technique 1994)



$C_T = 0,33 \mu\text{F}$ ,  $R_C = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_T = 22 \text{ K}\Omega$ ,  
 $R = 1 \text{ k}\Omega/0,5\text{W}$ .

$R_C$  règle le rapport cyclique.

$R_T$  règle la fréquence.

$$f = \frac{1,1}{R_T \cdot C_T}$$