

C23 - Conversions continu - continu

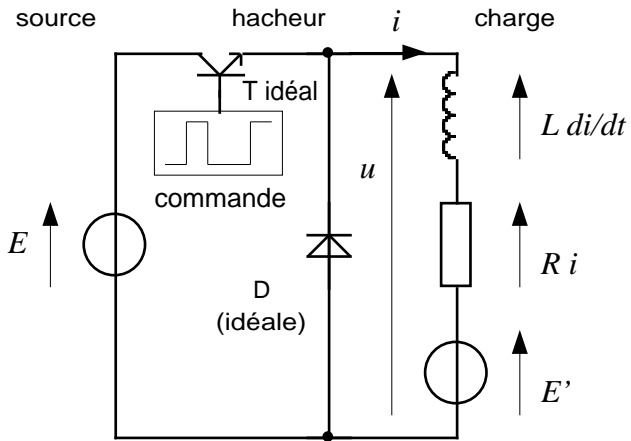
1ère partie : contrôle de vitesse des moteurs CC



Hacheur série (abaisseur de tension ou "dévolteur")

• Étude de la tension aux bornes de la charge (moteur CC en convention récepteur)

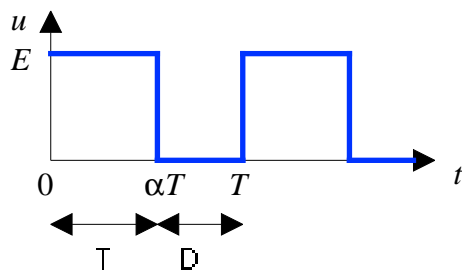
- Étude en valeur instantanée :



$$u(t) \text{ côté source : } \begin{cases} \text{de } t = 0 \text{ à } t = \alpha T : u(t) = E \\ \text{de } t = \alpha T \text{ à } t = T : u(t) = 0 \end{cases}$$

$$u(t) \text{ côté charge : } u = E' + Ri + L \frac{di}{dt}$$

- Étude en valeur moyenne :



$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{T} \int_0^T u dt = \alpha E \\ \bar{u} &= E' + R\bar{i} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E' = -R\bar{i} + \alpha E$$

NB1 : $\alpha < 1 \Rightarrow E' < E \Rightarrow$ le hacheur série est encore appelé "hacheur abaisseur de tension"

NB2 : comme pour un pont redresseur sur charge inductive (cf §C22), la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle en régime permanent, car :

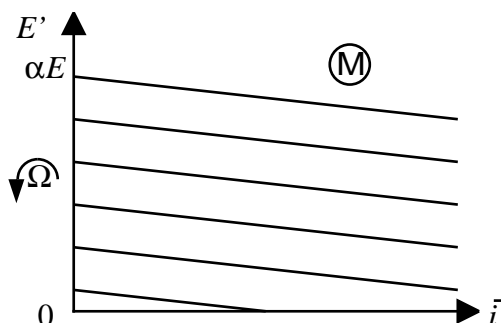
En moyenne et en régime permanent, on a : $\bar{u} = E' + R\bar{i} + L \frac{d\bar{i}}{dt}$

$$\text{Or, } \frac{L}{T} \int_0^T \frac{di}{dt} dt = \frac{L}{T} \int_0^T di = \frac{L}{T} [i(t)]_0^T = \frac{L}{T} [i(T) - i(0)] = 0$$

car, par définition du régime permanent, $i(T) \equiv i(0)$: le courant en fin de période doit être le même que le courant en début de période.

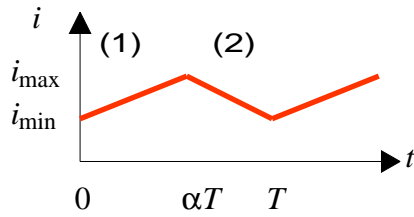
Donc : $\bar{u} = E' + R\bar{i}$

• Caractéristique statique de sortie :



! L'inductance (supposée très grande) est indispensable au fonctionnement du hacheur pour stocker l'énergie pendant la phase $u = 0$, mais n'apparaît pas dans le résultat final, en valeur moyenne.
NB : si l'inductance du moteur est insuffisante, on ajoute en série une inductance de "lissage", pour assurer la continuité du courant.

• **Étude du courant dans la charge (R négligée ⇒ E' ≈ αE) :**



$$0 \leq t \leq \alpha T: u \approx E' + L \frac{di}{dt} = E$$

$$\Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{E - E'}{L} = \frac{(1 - \alpha)E}{L} \Rightarrow i = \frac{(1 - \alpha)E}{L}t + I_{\min} \quad (1)$$

$$\alpha T \leq t \leq T: u \approx E' + L \frac{di}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{-E'}{L} = \frac{-\alpha E}{L} \Rightarrow i = \frac{-\alpha E}{L}(t - \alpha T) + I_{\max} \quad (2)$$

Ondulation de courant :

D'après l'équation (1), le courant, qui a atteint la valeur I_{\max} à l'instant $t = \alpha T$, est égal à :

$$\text{en } t = \alpha T \begin{cases} i = I_{\max} \\ i = \frac{(1 - \alpha)E}{L} \alpha T + I_{\min} \end{cases} \Rightarrow \Delta i = I_{\max} - I_{\min} = \frac{ET(1 - \alpha)\alpha}{L}$$

1ère conclusion : l'ondulation dépend du rapport cyclique, et :

$$\frac{d\Delta i}{d\alpha} = 0 \Leftrightarrow \frac{ET}{L}(1 - 2\alpha) = 0 \Leftrightarrow \alpha = \frac{1}{2}$$

L'ondulation de courant est maximale pour un rapport cyclique égal à 1/2 et vaut $\Delta i_{\max} = \frac{ET}{4L}$

2ème conclusion : pour réduire l'ondulation de courant il faut :

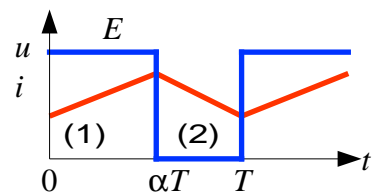
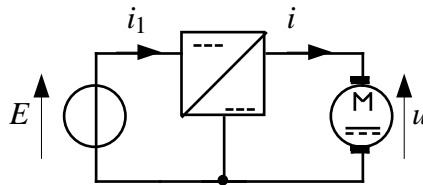
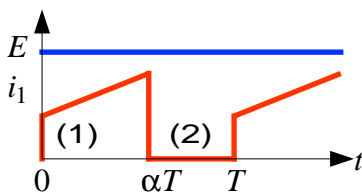
- réduire T , donc augmenter la fréquence de hachage. Mais on est limité par les temps de commutation des transistors (cf §C21). En règle générale, on choisit une fréquence de hachage supérieure à 20 kHz (donc inaudible, ce qui permet d'éviter des sifflements parasites désagréables), et n'excédant pas une centaine de kHz (pour éviter des temps et des pertes de commutation excessifs).

- augmenter L . Mais on est limité par le coût et l'encombrement d'une bobine trop importante. Quelques μH ou mH suffisent en général.

• **Bilan des puissances (hacheur idéal) :**

Soit $i_1(t)$ le courant fourni par la source et traversant le transistor .

Rappel : par définition, $P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t).i(t)dt$.



$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T E.i_1(t).dt = E \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} i_1(t).dt$$

(car $i_1 = 0$ pour $\alpha T < t < T$)

$$P_u = \frac{1}{T} \int_0^T u(t).i(t).dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E.i(t).dt = E \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} i_1(t).dt$$

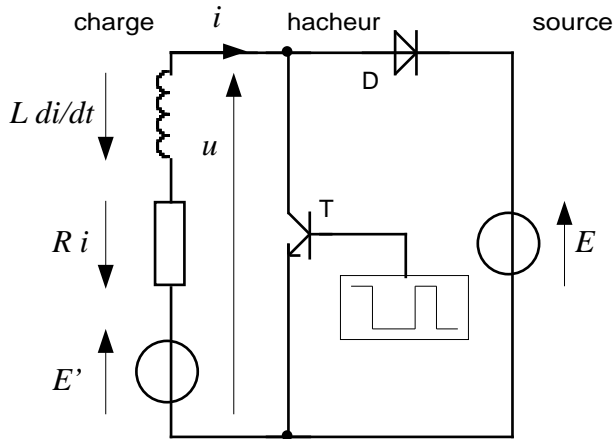
(car $i = i_1$ pour $0 < t < \alpha T$ et $E = 0$ pour $\alpha T < t < T$)

$$\Rightarrow P_a = P_u = E.\bar{i}_1 \Rightarrow \text{rendement} : \eta = \frac{P_u}{P_a} = 100\%$$

Hacheur parallèle (élévateur de tension ou "survolteur")

• Étude avec charge (génératrice CC) en convention générateur (u et i de même sens)

- Tension en valeur instantanée :



$u(t)$ côté source :

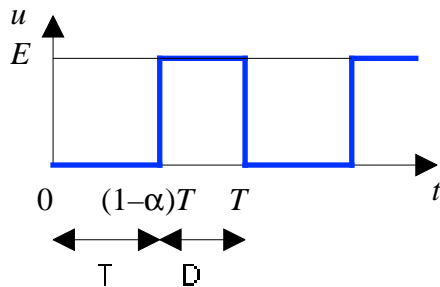
$$\begin{cases} \text{de } t = 0 \text{ à } t = (1 - \alpha)T : u(t) = 0 \\ \text{de } t = (1 - \alpha)T \text{ à } t = T : u(t) = E \end{cases}$$

$u(t)$ côté charge :

$$u = E' - Ri - L \frac{di}{dt}$$

NB : dans ce montage, la charge est génératrice (fournit l'énergie), la source est réceptrice (reçoit l'énergie). La source E doit donc être nécessairement une alimentation **réversible** (exemple : pont à thyristor fonctionnant en onduleur assisté – cf §C22 – ou batterie d'accumulateurs ou condensateur).

- Tension en valeur moyenne :

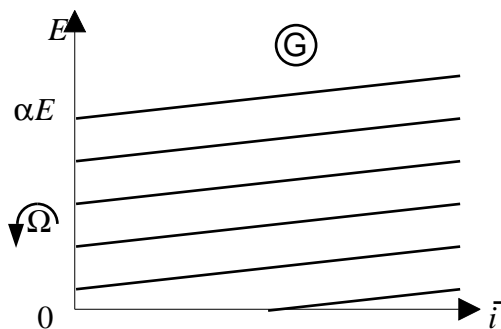


NB : $\alpha = \frac{\text{durée état "HAUT"}}{T}$

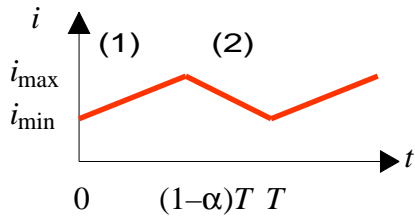
$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{T} \int_0^T u dt = \alpha E \\ \bar{u} &= E' - R\bar{i} \end{aligned} \right\} \Rightarrow E' = +R\bar{i} + \alpha E$$

NB : $E = \frac{E'}{\alpha}$ et $\alpha < 1 \Rightarrow E > E' \Rightarrow$ le hacheur parallèle est encore appelé "hacheur élévateur de tension"

Caractéristique de sortie :



Courant (R négligée $\Rightarrow E' \approx \alpha E$) :



$$(1) \quad 0 \leq t \leq (1-\alpha)T: \quad u \approx E' - L \frac{di}{dt} = 0$$

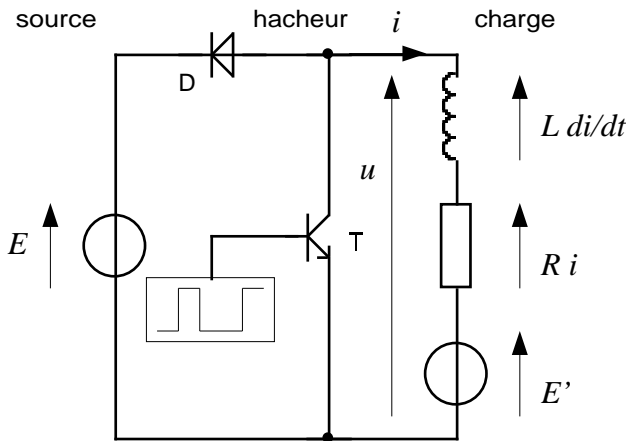
$$\Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{E'}{L} = \frac{\alpha E}{L} \Rightarrow i = \frac{\alpha E}{L} t + I_{\min}$$

$$(2) \quad (1-\alpha)T \leq t \leq T: \quad u \approx E' - L \frac{di}{dt} = E$$

$$\Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{E' - E}{L} = -\frac{(1-\alpha)E}{L} \Rightarrow i = -\frac{(1-\alpha)E}{L} (t - \alpha T) + I_{\max}$$

• Étude avec charge (génératrice CC) en convention récepteur (u et i de sens contraires)

- Tension en valeur instantanée :



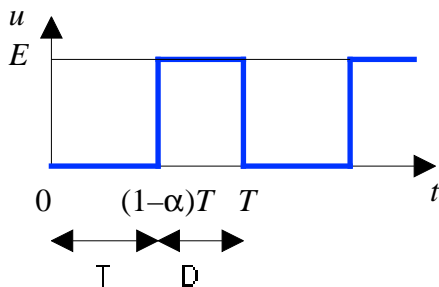
$u(t)$ côté source :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{de } t = 0 \text{ à } t = (1-\alpha)T : u(t) = 0 \\ \text{de } t = (1-\alpha)T \text{ à } t = T : u(t) = E \end{array} \right.$$

$u(t)$ côté charge :

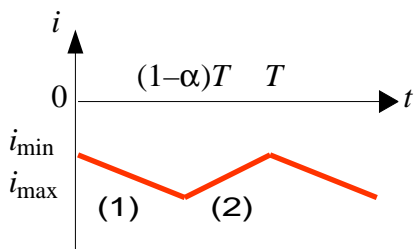
$$u = E' + Ri + L \frac{di}{dt}$$

- Tension en valeur moyenne :

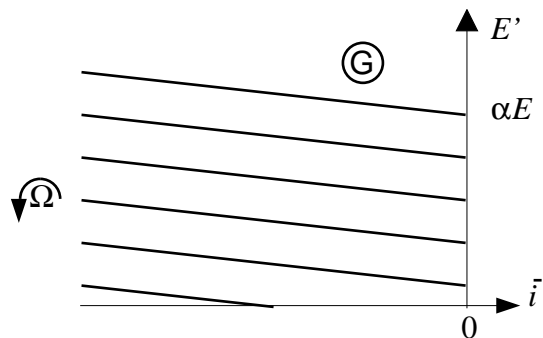


$$\left. \begin{array}{l} \bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt = \alpha E \\ \bar{u} = E' + R\bar{i} \end{array} \right\} \Rightarrow E' = -R\bar{i} + \alpha E$$

- Courant :



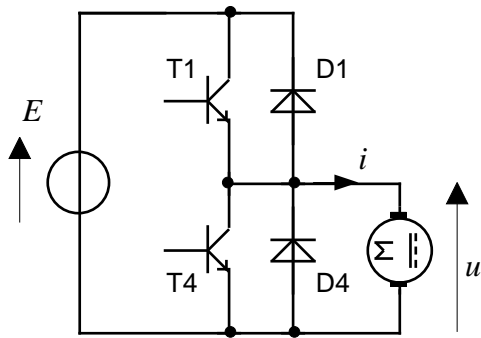
- Caractéristique de sortie :



Hacheur réversible en courant

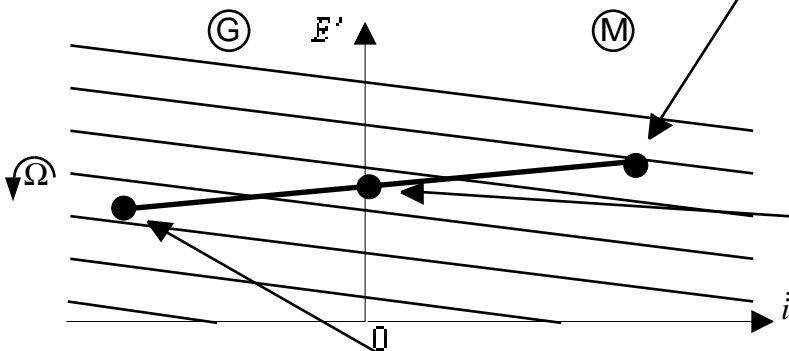
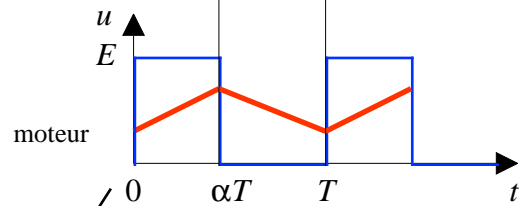
- **Étude avec charge (machine CC) en convention récepteur** : $\bar{u} = \alpha E = E' + Ri'$
 - si T₁, D₁ actifs : hacheur série, machine CC = moteur ; $\bar{u} > 0$; $\bar{i}' > 0$
 - si T₄, D₄ actifs : hacheur parallèle, machine CC = génératrice ; $\bar{u} > 0$; $\bar{i}' < 0$

principe de fonctionnement d'un interrupteur :

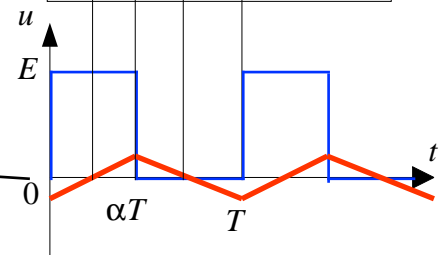


ouvert	fermé		
	T bloqué et D en inverse	T saturé T conduit	T saturé D conduit

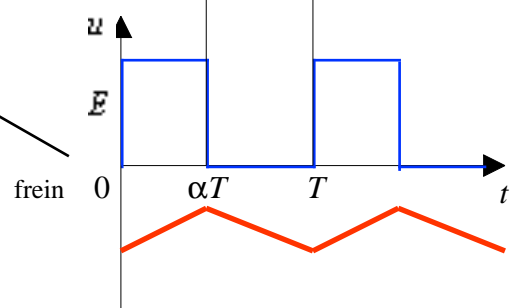
commande	T1	T4
conduction	T1	D4



T1	T4	commande		
D1	T1	D4	T4	conduction



commande	T1	T4
conduction	D1	T4

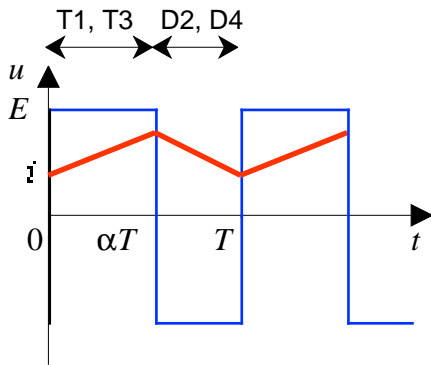
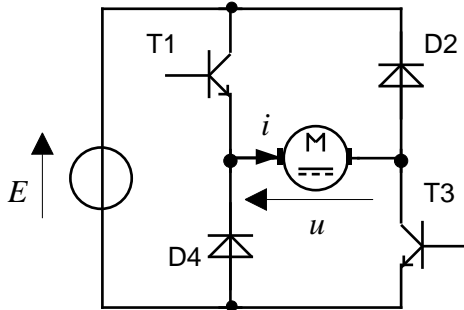


Exemple :
moteur / frein avec sens de rotation constant
(ex.: traction)

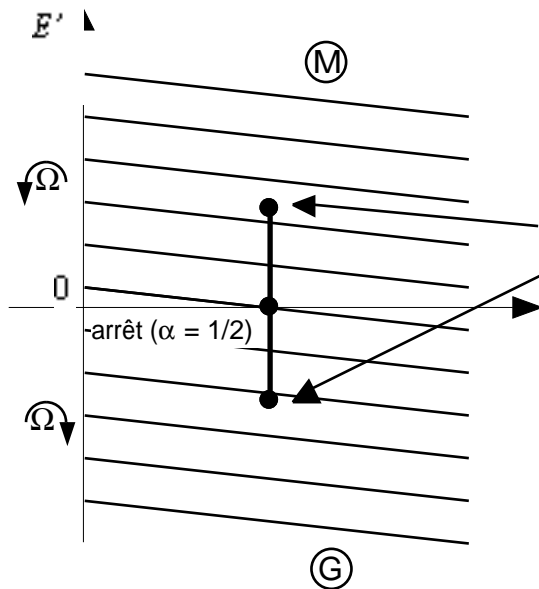
Hacheur réversible en tension

• **Étude avec charge (machine CC) en convention récepteur**

- si $\alpha > 1/2$: hacheur série, machine CC = moteur ; $\bar{u} > 0$; $\bar{i} > 0$
- si $\alpha < 1/2$: hacheur série, machine CC = moteur ; $\bar{u} < 0$; $\bar{i} > 0$



$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{T} \int_0^T u dt = (2\alpha - 1)E \\ \bar{u} &= E' + R\bar{i} \approx E' \end{aligned} \right\} E' \approx (2\alpha - 1)E$$

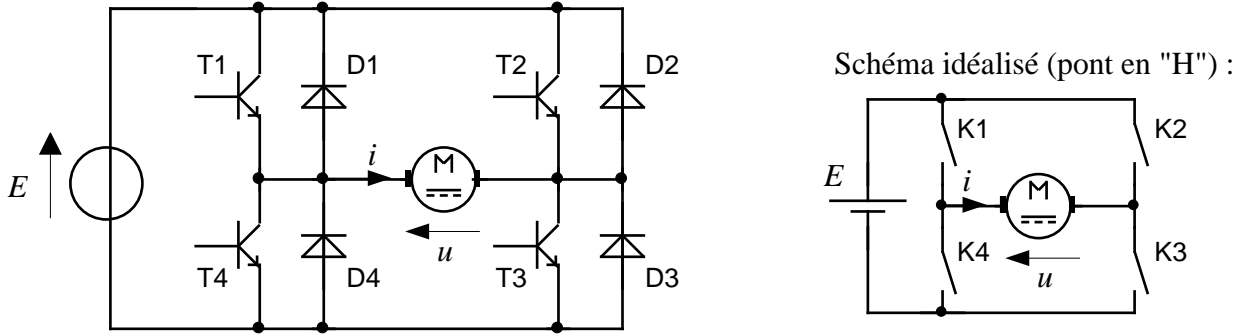


$1/2 \leq \alpha \leq 1$: $u > 0 \Rightarrow$ moteur
 $0 \leq \alpha \leq 1/2$: $u < 0 \Rightarrow$ génératrice

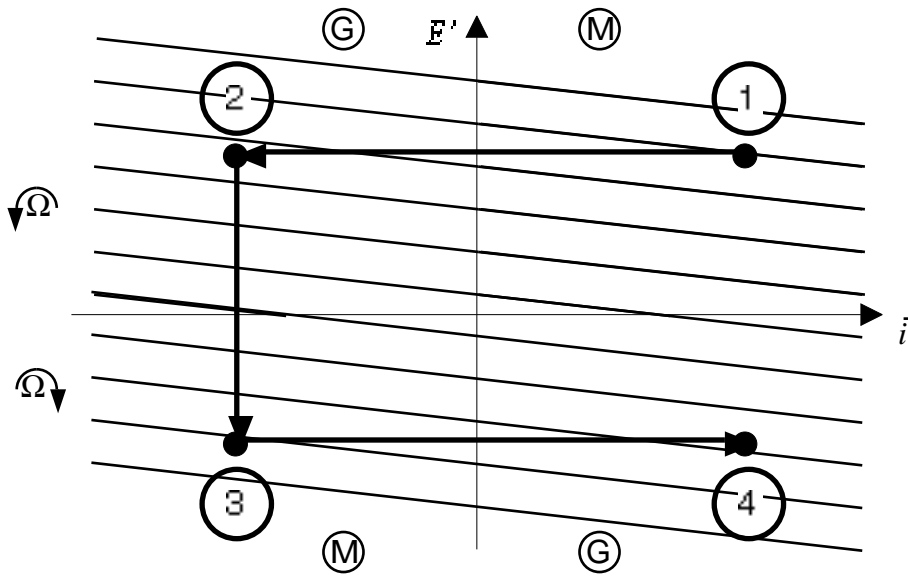
Exemple :

moteur / frein avec changement de sens de rotation (ex.: ascenseur)

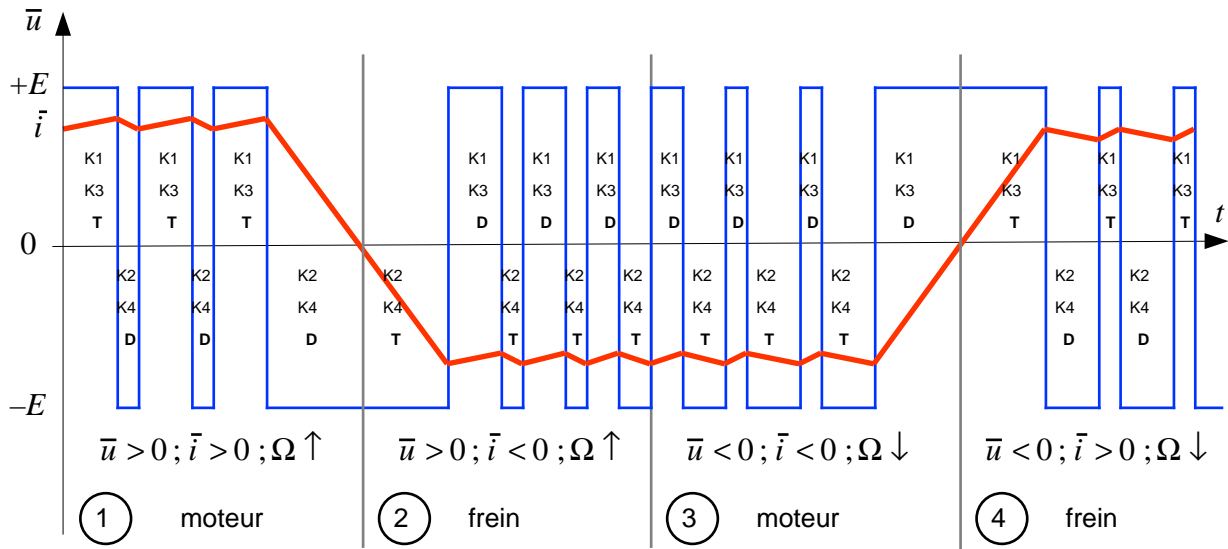
Hacheur réversible en courant et tension



Caractéristique statique "4 quadrants" :



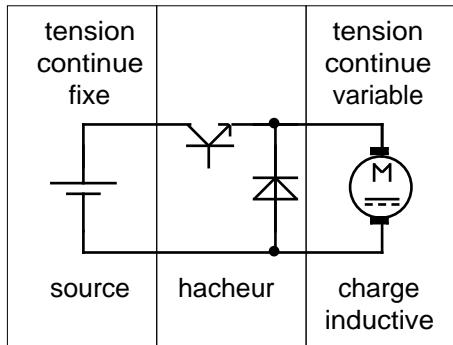
Exemple de fonctionnement :



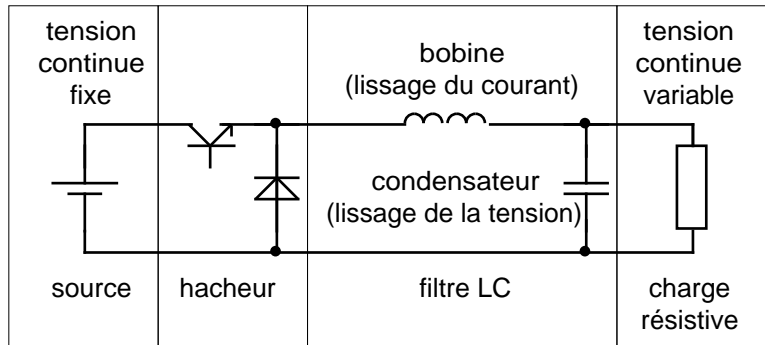
2ème partie : alimentations à découpage

• **Principe :**

→
variateur de vitesse moteur CC



alimentation à découpage



• **But : augmenter le rendement des alimentations continues fixes ou variables**

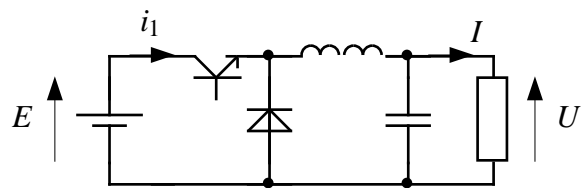
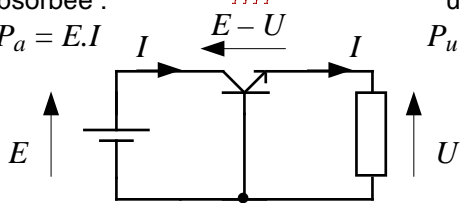
Alimentation linéaire
(à transistor "ballast")

Alimentation à découpage
(hacheur abaisseur de tension idéal : cf 1ère partie)

puissance dissipée par effet Joule : $P_d = (E-U).I$

puissance absorbée : $P_a = E.I$

puissance utile : $P_u = U.I$

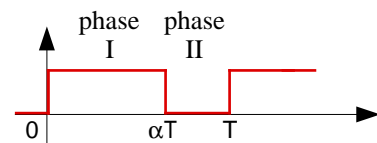


$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{U}{E} < 100\%$$

$$\eta = 100\%$$

• **Types**

Signal de commande du transistor (sauf push-pull) →

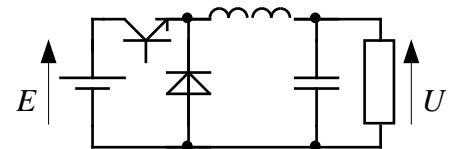


- Charge non isolée de la source :

Utilisation : convertisseurs DC/DC pour cartes électroniques (exemple : alimentation ±12V à partir d'une source unique +5V).

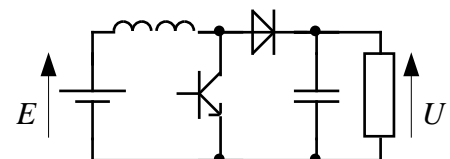
Step-down Hacheur série

$U = \alpha E$
abaisseur de tension

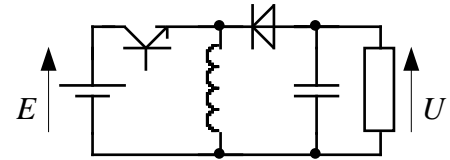


Step-up Hacheur parallèle

$U = \frac{E}{1-\alpha}$
élevateur de tension

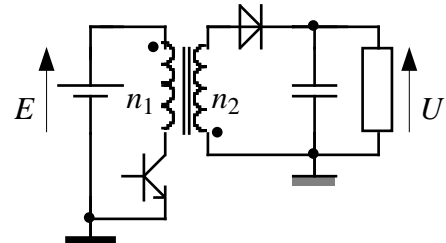


Invert Hacheur inductif $U = -\frac{\alpha}{1-\alpha} E$
 inverseur de tension



- *Charge isolée de la source* :
 Utilisation : alimentations stabilisées de puissance

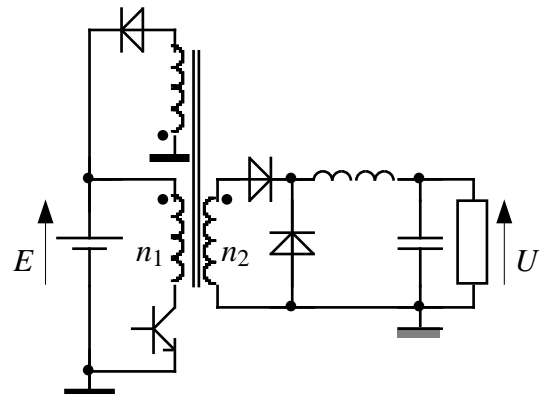
Flyback $U = \frac{n_2}{n_1} \frac{\alpha}{1-\alpha} E$



L'énergie est emmagasinée par le primaire dans le circuit magnétique pendant la phase I ; puis restituée par le secondaire pendant la phase II

Inconvénient : ce principe de fonctionnement, qui suppose que l'énergie est stockée transitoirement dans le circuit magnétique entre chaque phase de fonctionnement, limite la puissance de ces alimentations à une ou deux centaines de watts.

Forward $U = \frac{n_2}{n_1} \alpha E$



Contrairement au montage flyback, le primaire et le secondaire sont simultanément conducteurs. Un troisième enroulement est nécessaire pour assurer la désaturation du circuit magnétique.

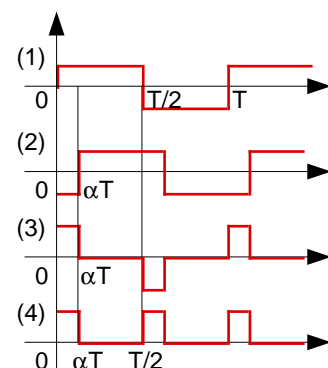
Avantage : puissance élevée.

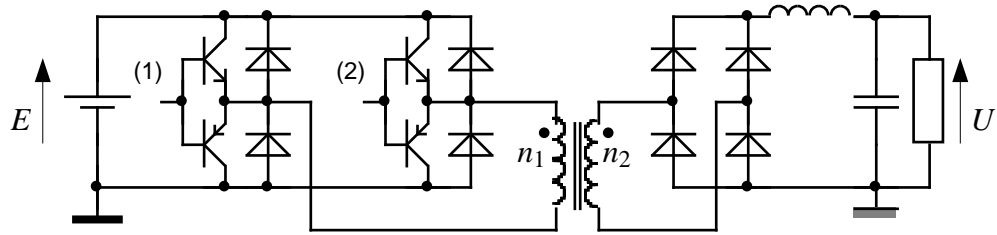
Push Pull Ampli classe D $U = 2 \frac{n_2}{n_1} \alpha E$ (onduleur en créneaux + redresseur + filtre LC)

commandes décalées des bases des paires NPN/PNP →

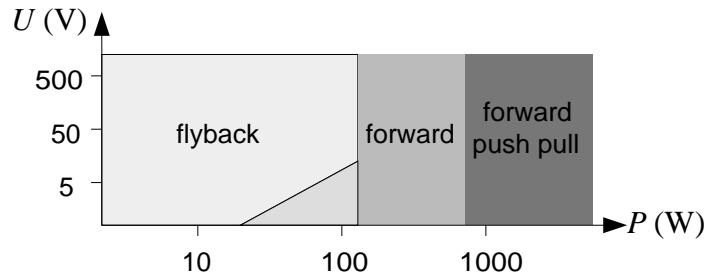
tension alternative en créneaux fournie au transformateur →

tension redressée →

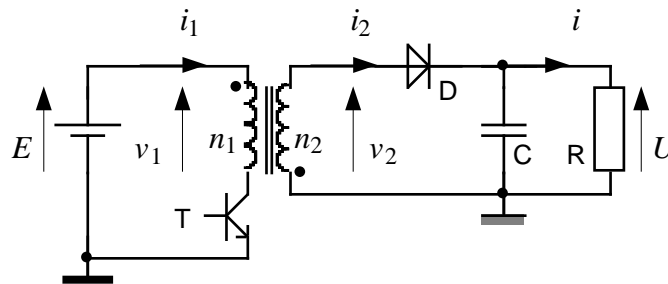




Choix d'un convertisseur :



• **Convertisseur Flyback : étude détaillée**



Le transformateur est constitué de deux enroulements, placés sur un même circuit magnétique, d'inductances $L_1 = \lambda.n_1^2$ et $L_2 = \lambda.n_2^2$ (où λ est un coefficient dépendant de la géométrie du bobinage et des caractéristiques du matériau magnétique – cf §C31).

Le sens de bobinage relatif de ces deux enroulements est inversé, de sorte que les courants i_1 et i_2 ont des effets magnétiques équivalents lorsqu'ils sont de même sens (cf §C24). On a donc :

$$v_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt} \text{ et } v_2 = -n_2 \frac{d\phi}{dt} \Leftrightarrow v_2 = -\frac{n_2}{n_1} v_1.$$

Le circuit magnétique comporte un entrefer suffisant pour n'être jamais saturé : les inductances de fuite des deux bobines sont négligeables (cf §C24). On néglige de même leurs résistances.

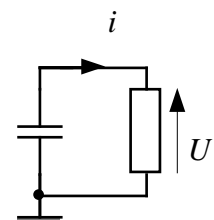
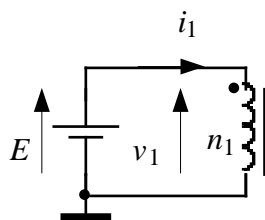
Enfin, la diode D et le transistor T sont supposés parfaits. Le condensateur C est de valeur suffisante pour maintenir aux bornes de la charge R une tension U constante et positive.

- Phase I (magnétisation) : T saturé pour $0 < t < \alpha T$

Charge de l'inductance primaire ; décharge du condensateur dans la charge.

$$E = L_1 \frac{di_1}{dt} \Rightarrow i_1 = \frac{E}{L_1} t + I_{1\min}$$

$$v_2 = -\frac{n_2}{n_1} E < 0 \Rightarrow D \text{ bloquée}$$



A la fin de la phase I, $i_1(t)$ atteint sa valeur maximale :

$$I_{1\max} = \frac{E}{L_1} \alpha T + I_{1\min} \quad (1)$$

- Ouverture du circuit primaire

La conservation du flux dans le circuit magnétique provoque l'apparition d'un courant au secondaire, dont la valeur initiale $I_{2\max}$ est telle que l'énergie magnétique soit conservée :

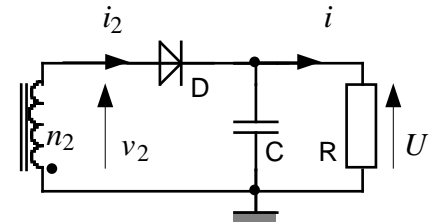
$$W = \frac{1}{2} L_1 I_{1\max}^2 = \frac{1}{2} L_2 I_{2\max}^2 \quad \text{avec } L_1 = \lambda \cdot n_1^2 \text{ et } L_2 = \lambda \cdot n_2^2 \Rightarrow I_{2\max} = I_{1\max} \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

- Phase II (démagnétisation) : T bloqué pour $\alpha T < t < T$

Décharge de l'inductance secondaire ; charge du condensateur.

$$U = v_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt} \Rightarrow i_2 = -\frac{U}{L_2} (t - \alpha T) + I_{2\max}$$

$$\text{NB : } v_1 = -\frac{n_1}{n_2} U$$



A la fin de la phase II, $i_2(t)$ atteint sa valeur minimale :

$$I_{2\min} = -\frac{U}{L_2} (T - \alpha T) + I_{2\max} \quad (3)$$

- Fermeture du circuit primaire

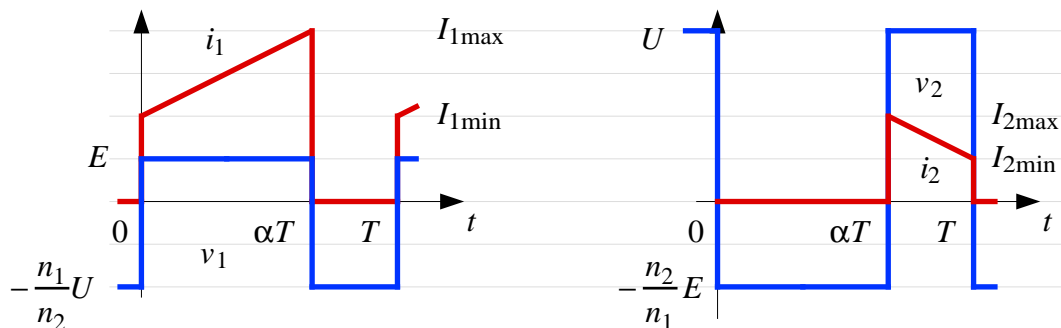
L'énergie magnétique est conservée :

$$W = \frac{1}{2} L_1 I_{1\min}^2 = \frac{1}{2} L_2 I_{2\min}^2 \Rightarrow I_{2\min} = I_{1\min} \frac{n_1}{n_2} \quad (4)$$

- Tension de sortie :

Des équations (1), (2), (3) et (4) on déduit la valeur de la tension de sortie : $U = \frac{n_2}{n_1} \frac{\alpha}{1 - \alpha} E$

- Exemple avec $\alpha = 2/3$; $n_2/n_1 = 2$ ($\Rightarrow U = 4E$) :



• **Avantages et inconvénients des alimentations à découpage**

- Avantages par rapport aux alimentations linéaires :


- Bon rendement
- Faible encombrement

- Inconvénients par rapport aux alimentations linéaires :

Protections contre courts-circuits et surtensions plus délicates à réaliser
CEM difficile à maîtriser

- Comparaison Flyback vs Forward

. Flyback : bobinage et condensateurs encombrants au-delà de 200 W

.  Ne fonctionne pas à vide ! En se chargeant constamment le condensateur peut atteindre des valeurs de tension élevées, qui provoquent son claquage.

. Forward : sorties basse tension fort courant possible.
+ complexe à réaliser (notamment le bobinage)

***** **COMPLEMENTS** *****

- Régime de démagnétisation totale :

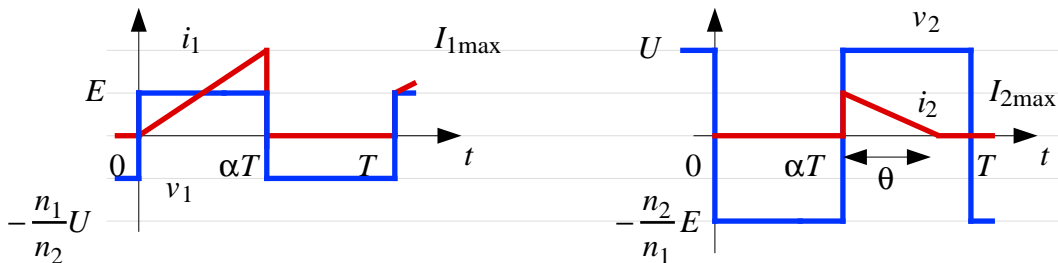
C'est un mode de fonctionnement particulier de l'alimentation flyback, appelé "mode interrompu". Il correspond au cas où le flux magnétique s'annule durant la phase II.

D'après l'équation (3), le courant i_2 peut s'annuler au bout d'un temps θ tel que : $\theta = \frac{L_2 I_{2max}}{U}$.

Avec : $I_{2max} = I_{1max} \frac{n_1}{n_2}$ (équation 2, conservation de l'énergie)

Et : $I_{1max} = \frac{E}{L_1} \alpha T$ (équation 1, où $I_{1min} = 0$)

La condition limite de non interruption est : $\theta < (1-\alpha)T$



Si l'on admet l'absence de pertes, la puissance délivrée à la charge est la même que la puissance fournie par la source. Cela permet de calculer la tension de sortie :

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E i_1(t) dt = \frac{1}{T} E \frac{E}{L_1} \left[\frac{t^2}{2} \right]_0^{\alpha T} = \frac{E^2 \alpha^2 T}{2L_1} = P_u = \frac{U^2}{R} \Rightarrow U = \alpha E \sqrt{\frac{RT}{2L_1}}$$

Ce qui permet de préciser la condition limite de non interruption : $\alpha < 1 - \frac{n_2}{n_1} \sqrt{\frac{2L_1}{RT}}$