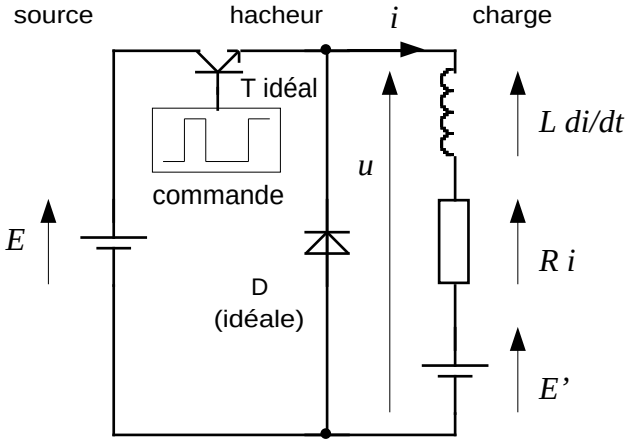
C23 - Conversions continu - continu

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 :



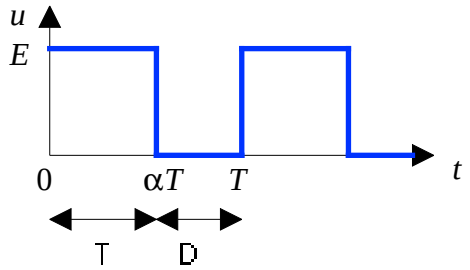
$u(t)$ côté source :

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

$u(t)$ côté charge :

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

- Étude en valeur moyenne :



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

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 : $\bar{u} = E' + \overline{R.i} + \overline{L\frac{di}{dt}}$

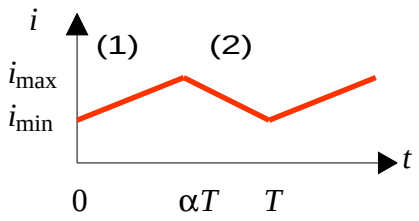
Or, $\frac{L}{T}\int_0^T \frac{di}{dt}dt = \frac{L}{T}\int_0^T di = \frac{L}{T}\left[i(t)\right]_0^T = \frac{L}{T}\left[i(T) - i(0)\right] = 0$

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

> ⚠ L'inductance 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.

• *Étude du courant dans la charge (R négligée) :*



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

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

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

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

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 :

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

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

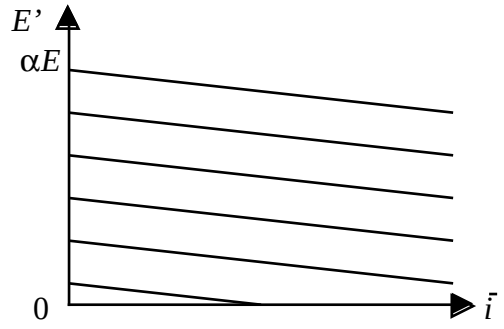
$$\frac{d\Delta i}{d\alpha} = 0 \Leftrightarrow \frac{ET}{L}(1-2\alpha) = 0 \Leftrightarrow \alpha = \frac{1}{2}$$

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

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.

• ***Caractéristique statique de sortie (R non négligée) :***

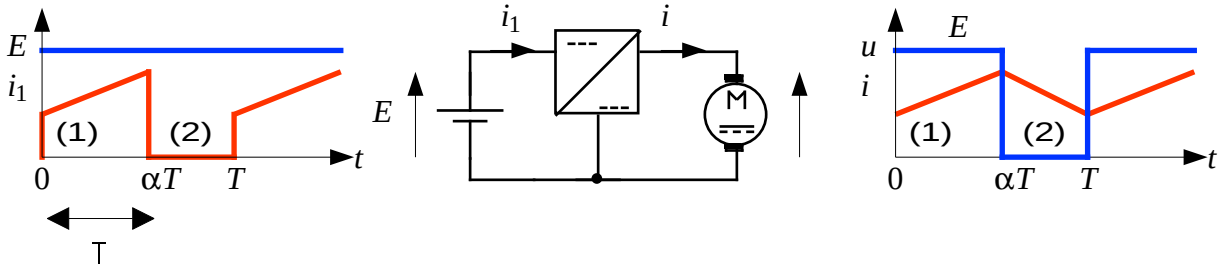


$$\bar{u} = \alpha E = E' + R\bar{i} \Rightarrow E' = -R\bar{i} + \alpha E$$

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

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

Rappel : par définition, la puissance est la valeur moyenne du produit instantané $v(t)i(t)$.



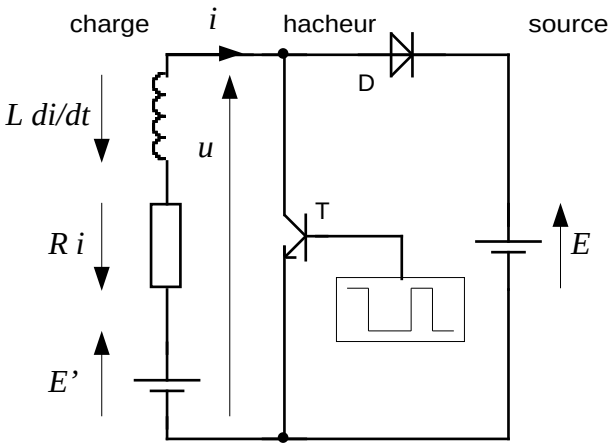
$$P_a = \frac{1}{T}\int_0^T E.i_1(t).dt = E.\bar{i}_1 \qquad P_u = \frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t).dt = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} E.i(t).dt = E.\bar{i}_1$$

$$\Rightarrow \text{rendement : } \eta = \frac{P_u}{P_a} = 100\%$$

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 :

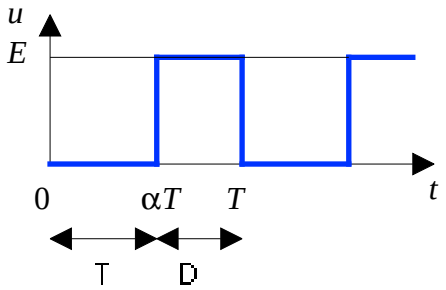
$$\begin{cases} \text{de } t = 0 \text{ à } t = \alpha T : u(t) = 0 \\ \text{de } t = \alpha T \text{ à } t = T : u(t) = E \end{cases}$$

$u(t)$ 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).

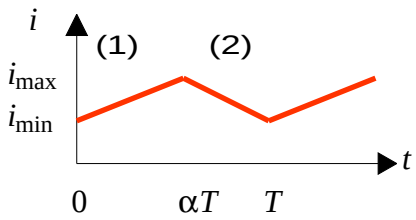
- Tension en valeur moyenne :



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

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

Courant (R négligée) :



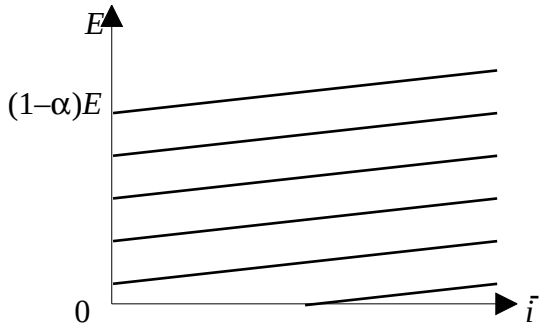
$$0 \le t \le \alpha T: \quad u \approx E' - L\frac{di}{dt} = 0$$

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

$$\alpha T \le t \le T: \quad u \approx E' - L\frac{di}{dt} = E$$

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

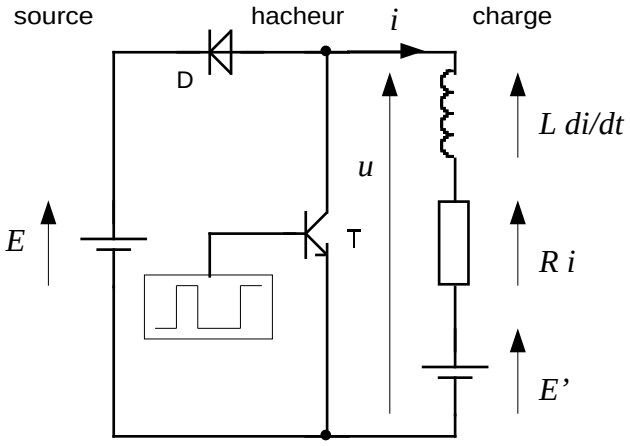
Caractéristique de sortie (R non négligée) :



$$\bar{u} = (1-\alpha)E = E' - R\bar{i} \Rightarrow E' = +R\bar{i} + (1-\alpha)E$$

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

- Tension en valeur instantanée :



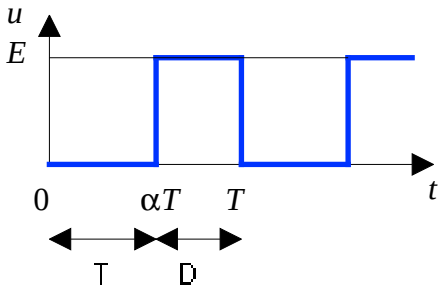
$u(t)$ côté source :

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

$u(t)$ côté charge :

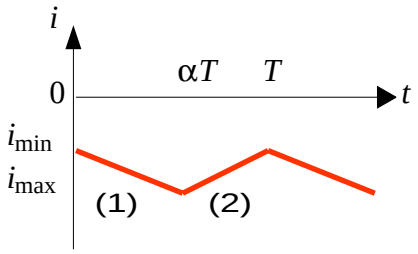
$$u = E' + Ri + L\frac{di}{dt}$$

- Tension en valeur moyenne :

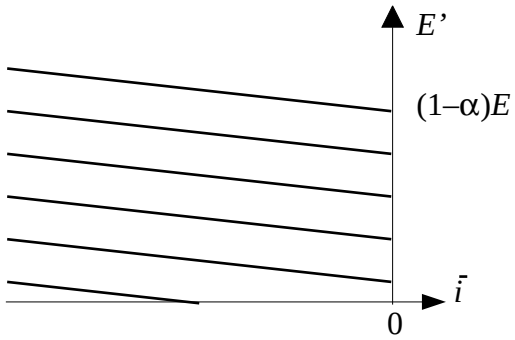


$$\left.\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{T}\int_0^T u\,dt = (1-\alpha)E \\ \bar{u} &= E' + R\bar{i} \approx E' \end{aligned}\right\} \quad E' = (1-\alpha)E$$

- Courant (R négligée) :



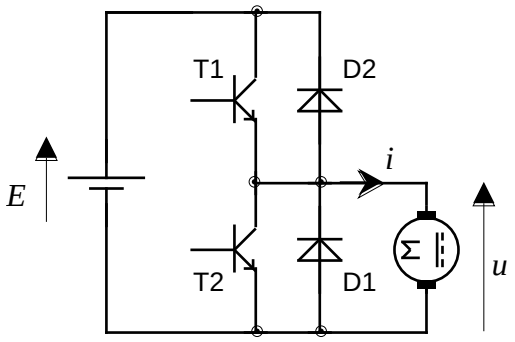
- Caractéristique de sortie (R non négligée) :



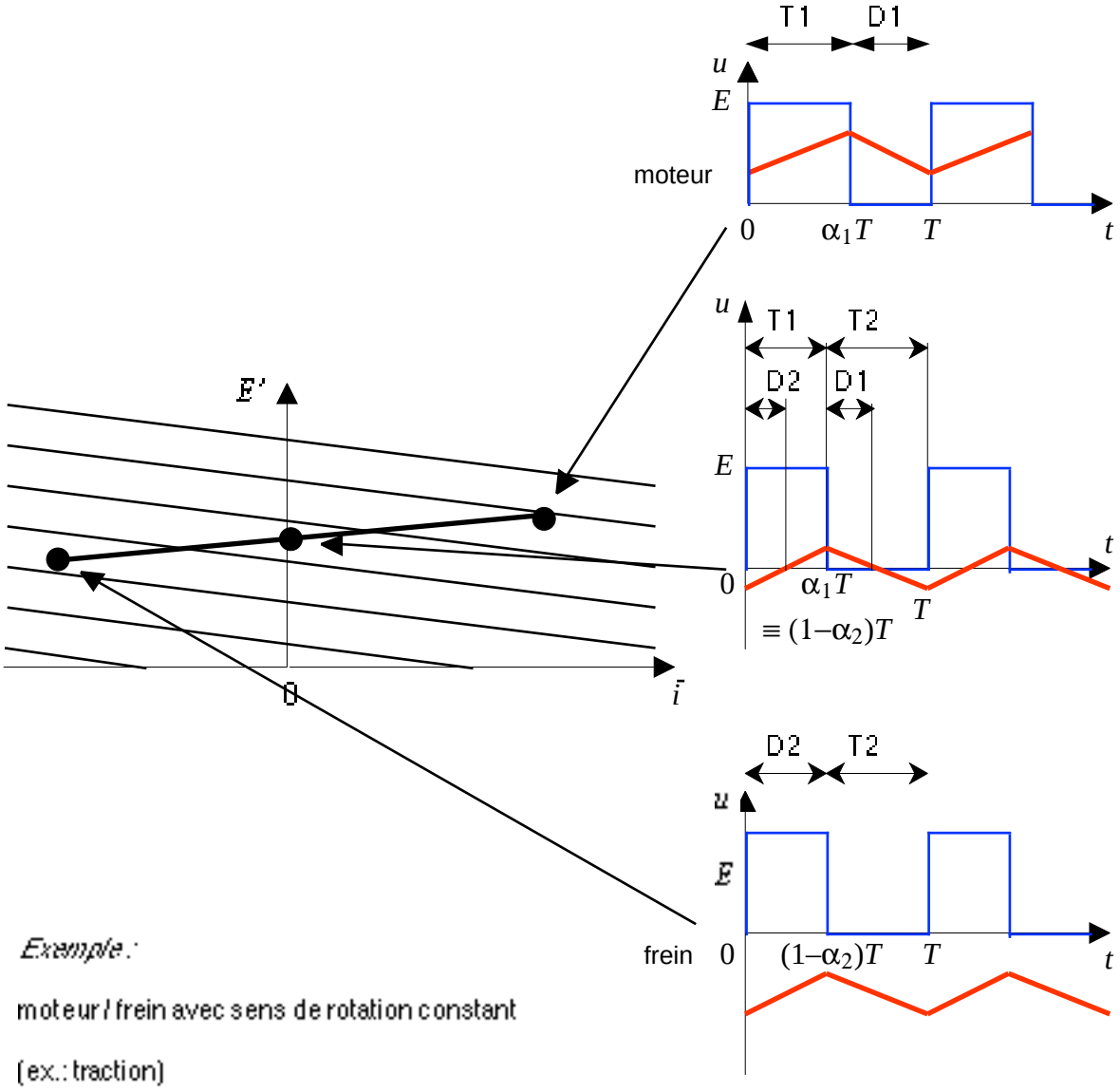
NB : en convention récepteur : $i < 0$ $\quad \bar{u} = (1-\alpha)E = E' + R\bar{i} \Rightarrow E' = -R\bar{i} + (1-\alpha)E$

Hacheur réversible en courant

- ***Étude avec charge (machine CC) en convention récepteur***
  - si T_1, D_1 actifs : hacheur série, machine CC = moteur ; $\bar{u} > 0$; $\bar{i} > 0$; $\Omega \uparrow$
  - si T_2, D_2 actifs : hacheur parallèle, machine CC = génératrice ; $\bar{u} > 0$; $\bar{i} < 0$; $\Omega \uparrow$

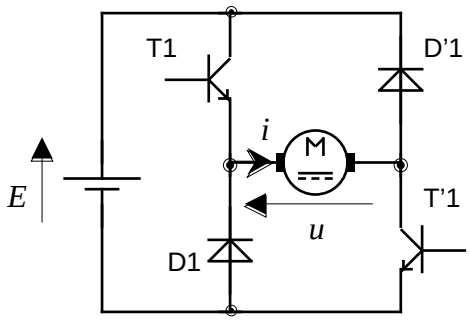


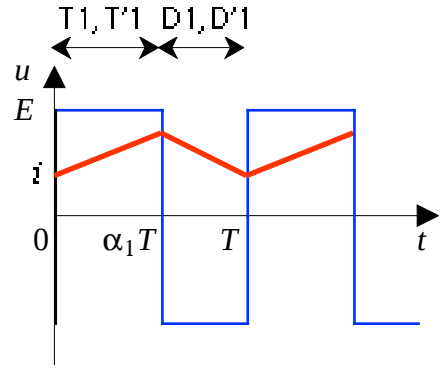
$$\bar{u} = E' + R\bar{i} = \begin{cases} \alpha_1 E \\ (1-\alpha_2)E \end{cases}$$



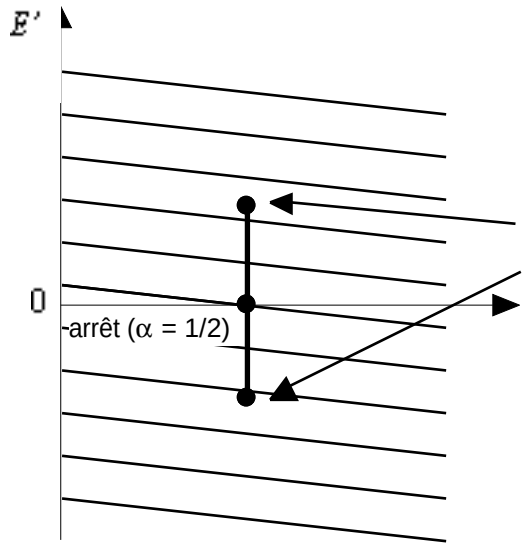
Hacheur réversible en tension

- ***Étude avec charge (machine CC) en convention récepteur***
  - si $\alpha > 1/2$: hacheur série, machine CC = moteur ; $\bar{u} > 0$; $\bar{i} > 0$; $\Omega \uparrow$
  - si $\alpha < 1/2$: hacheur série, machine CC = moteur ; $\bar{u} < 0$; $\bar{i} > 0$; $\Omega \downarrow$





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



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

Exemple :

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

Hacheur réversible en courant et tension

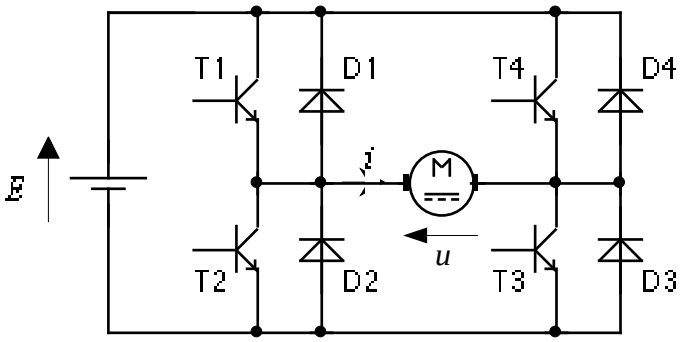
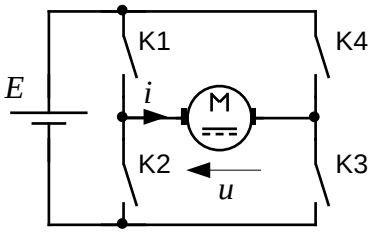
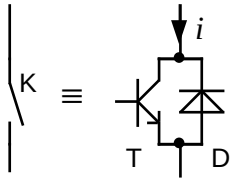


Schéma idéalisé (pont en "H") :

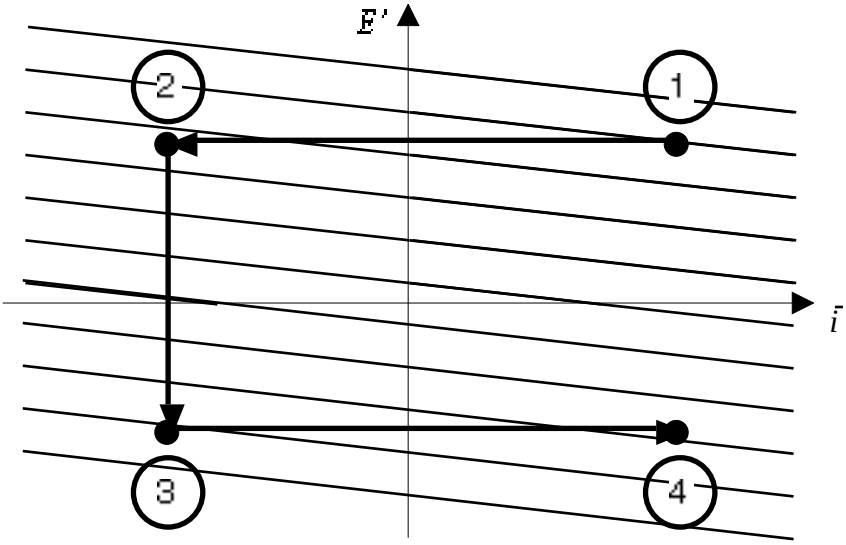


Principe de fonctionnement d'un interrupteur :

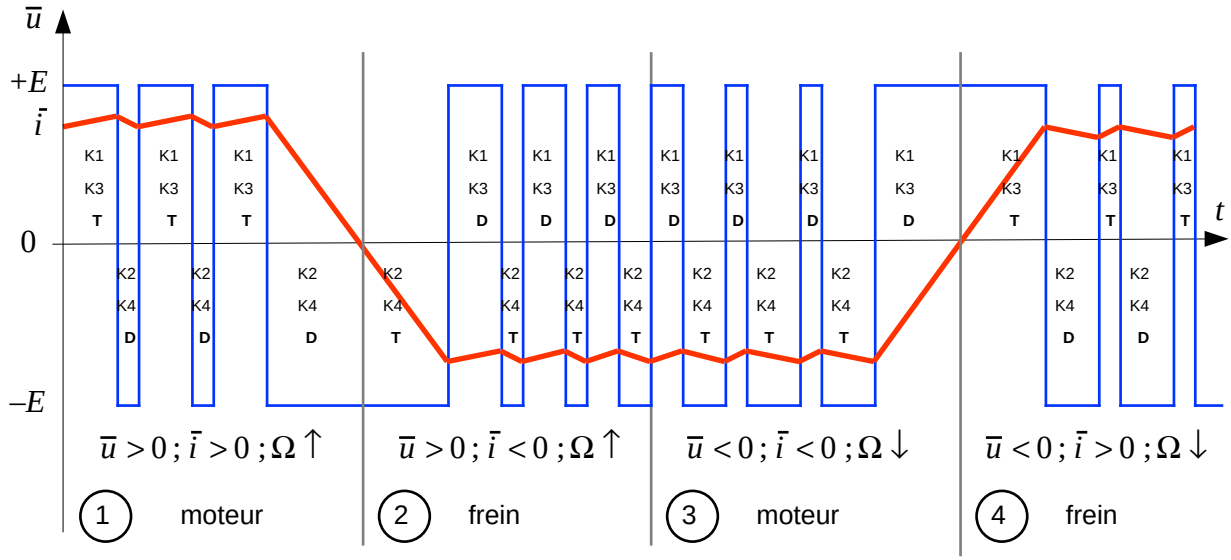


- ouvert ⇔ T bloqué et D en inverse
- fermé ⇔ T saturé :
  - si $i > 0$: T conduit
  - si $i < 0$: D conduit

Caractéristique statique "4 quadrants" :



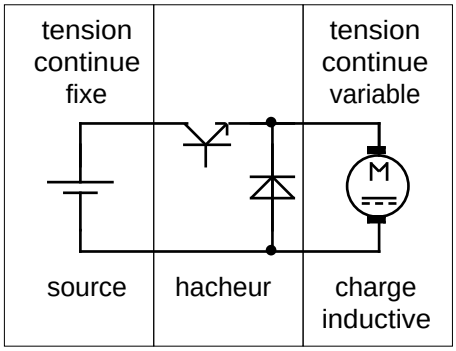
Exemple de fonctionnement :



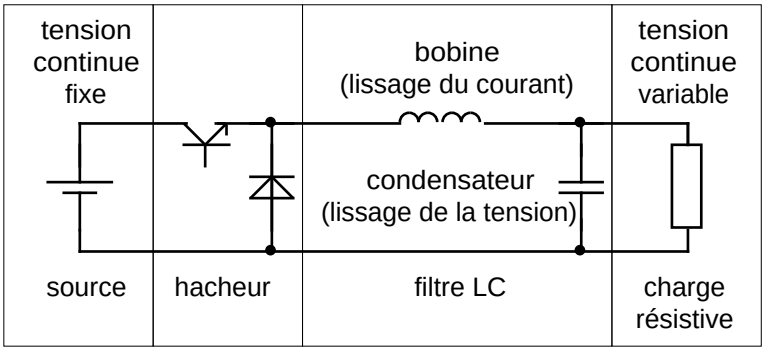
2ème partie : alimentations à découpage

• ***Principe*** : →

variateur de vitesse moteur CC



alimentation à découpage



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

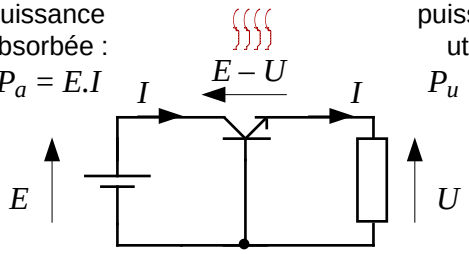
Alimentation linéaire (à transistor "ballast")

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

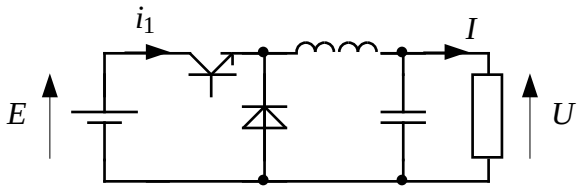
puissance dissipée par effet Joule : $P_d = (E–U).I$

puissance absorbée : $P_a = E.I$

puissance utile : $P_u = U.I$



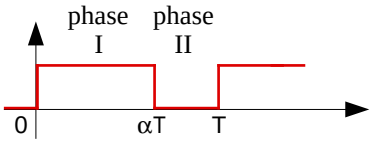
$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{U}{E} < 100\%$$



$\eta = 100\%$

• ***Types***

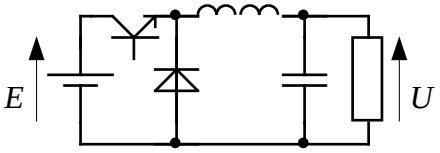
Signal de commande du transistor (sauf push-pull) →



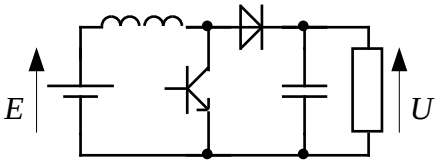
- *Charge non isolée de la source :*

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

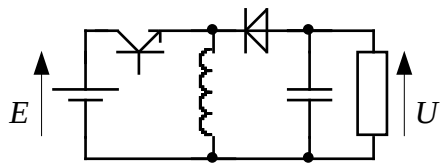


Step-up Hacheur parallèle $U = \dfrac{E}{1-\alpha}$ élévateur de tension



Invert Hacheur inductif $U = -\dfrac{\alpha}{1-\alpha}E$

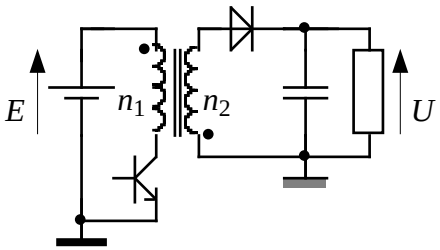
inverseur de tension



- Charge isolée de la source :

Utilisation : alimentations stabilisées de puisance

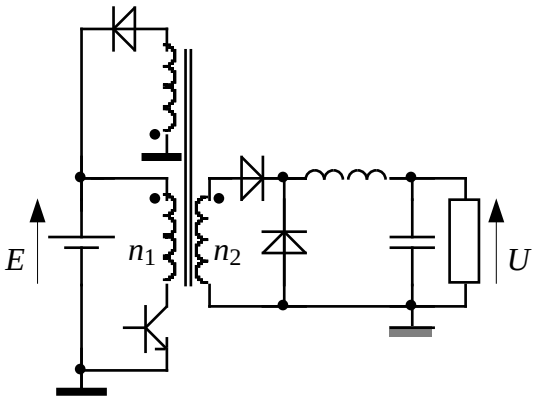
Flyback $U = \dfrac{n_2}{n_1}\dfrac{\alpha}{1-\alpha}E$



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.

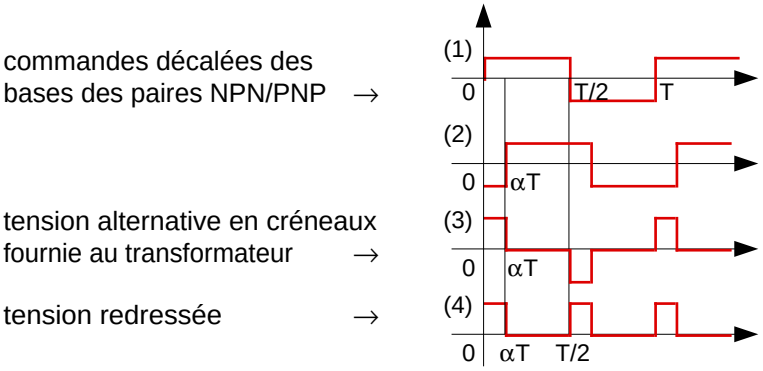
Forward $U = \dfrac{n_2}{n_1}\alpha E$

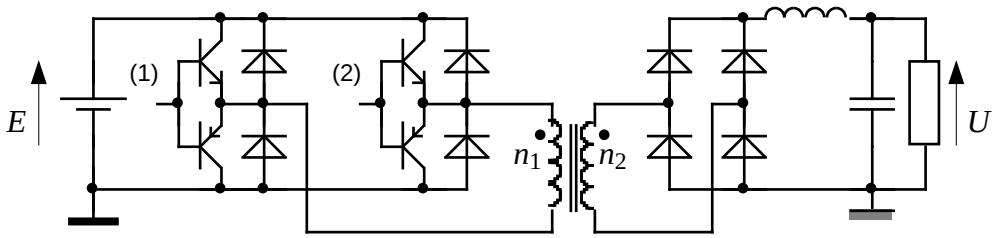


Contrairement au montage flyback, le primaire et le secondaire sont simultanément conducteurs. Un troisième enroulement est nécessaire pour assurer la désaturation du circuit magnétique.

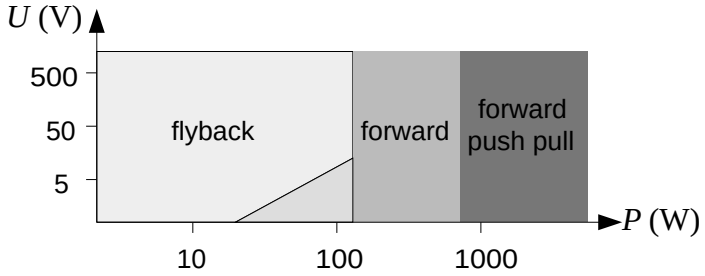
Avantage : puissance élevée.

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

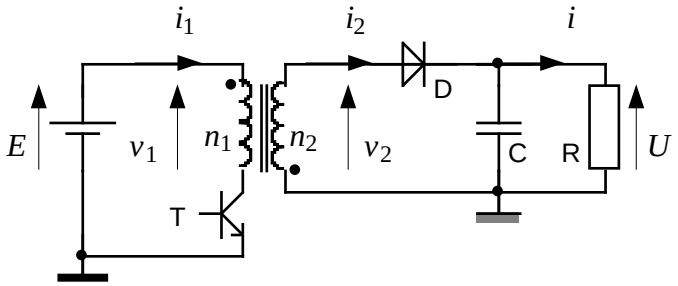




Choix d'un convertisseur :



• ***Convertisseur Flyback : étude détaillée***



Le transformateur est contitué 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 : $v_1 = n_1 \dfrac{d\varphi}{dt}$ et $v_2 = -n_2 \dfrac{d\varphi}{dt} \Leftrightarrow v_2 = -\dfrac{n_2}{n_1} v_1$.

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.

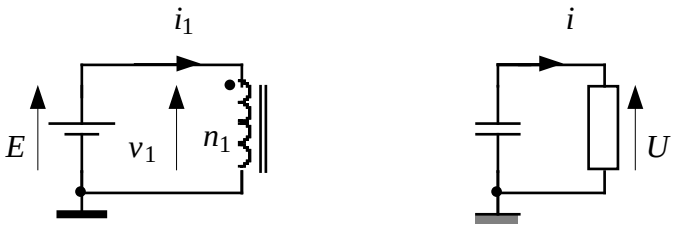
Enfin, la diode D et le transistor T sont supposés parfaits. Le condensateur C est de valeur suffisante pour maintenir aux bornes de la charge R une tension U constante et positive.

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

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

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

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



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

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

- *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 :

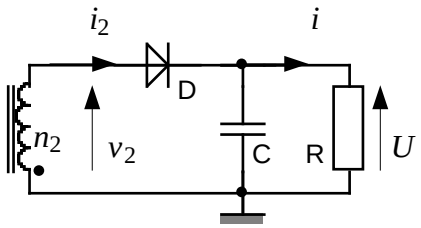
$$W = \frac{1}{2}L_1 I_{1\max}^2 = \frac{1}{2}L_2 I_{2\max}^2 \text{ avec } L_1 = \lambda.n_1^2 \text{ et } L_2 = \lambda.n_2^2 \Rightarrow I_{2\max} = I_{1\max}\frac{n_1}{n_2} \qquad (2)$$

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

Décharge de l'inductance secondaire ; charge du condensateur.

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

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



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

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

- *Fermeture du circuit primaire*

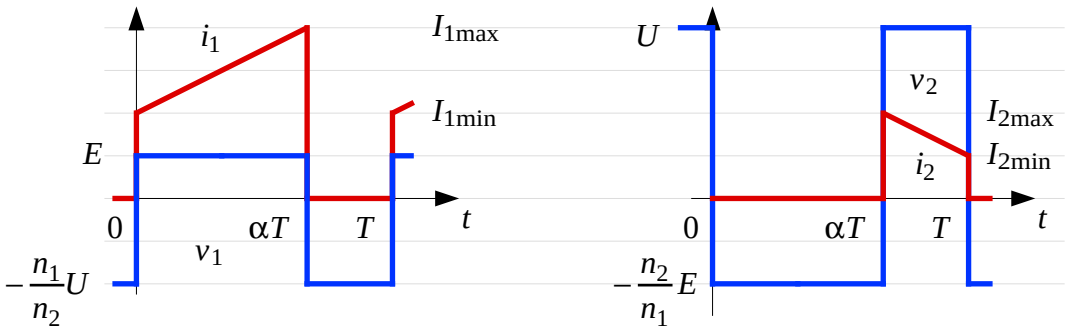
L'énergie magnétique est conservée :

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

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



- *Régime de démagnétisation totale :*

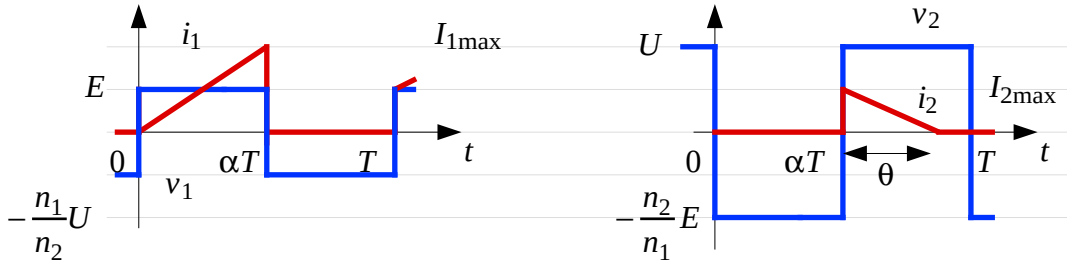
C'est un mode de fonctionnement particulier de l'alimentation flyback, appelé "mode interrompu". Il correspond au cas où le flux magnétique s'annule durant la phase II.

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

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

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

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 : $\alpha < 1 - \dfrac{n_2}{n_1}\sqrt{\dfrac{2L_1}{RT}}$

• ***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)