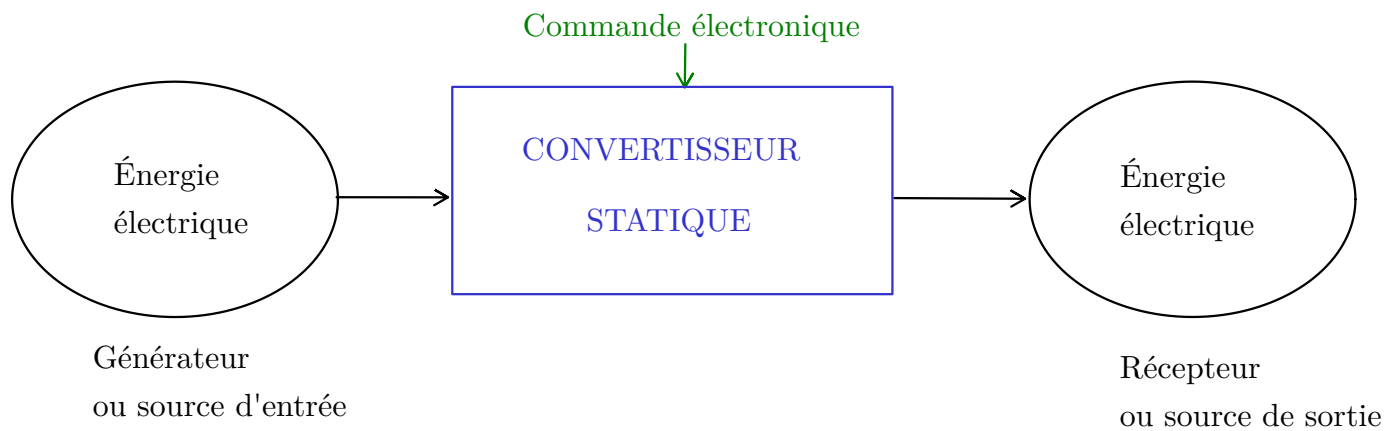


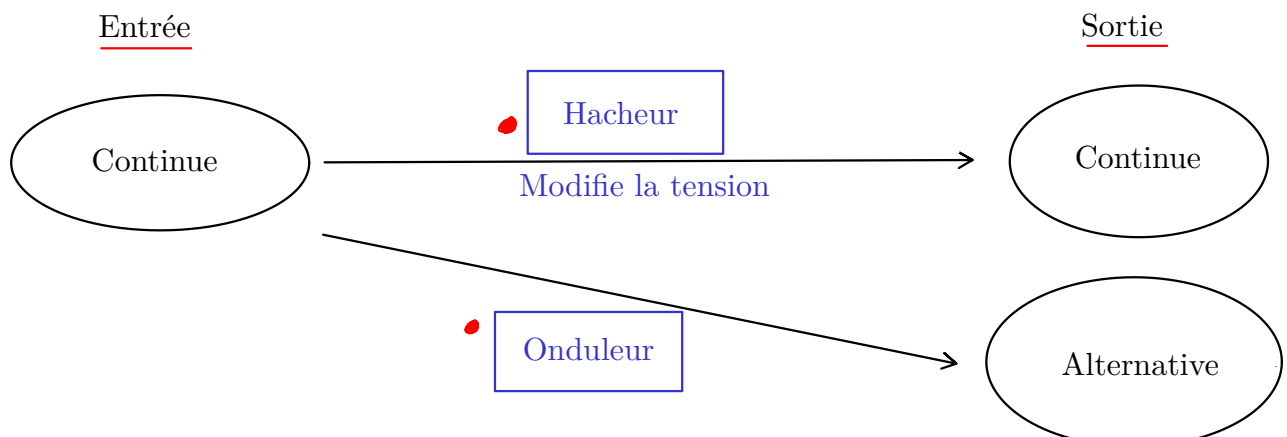
- Quelques kW
 - chauffage (électrique, pompe à chaleur)
 - moteurs électriques de machines
- Quelques 10kW
 - véhicules électriques (voitures)
- Quelques MW
 - trains, TGV (9MW)
 - éoliennes
- Quelques GW
 - centrales nucléaires

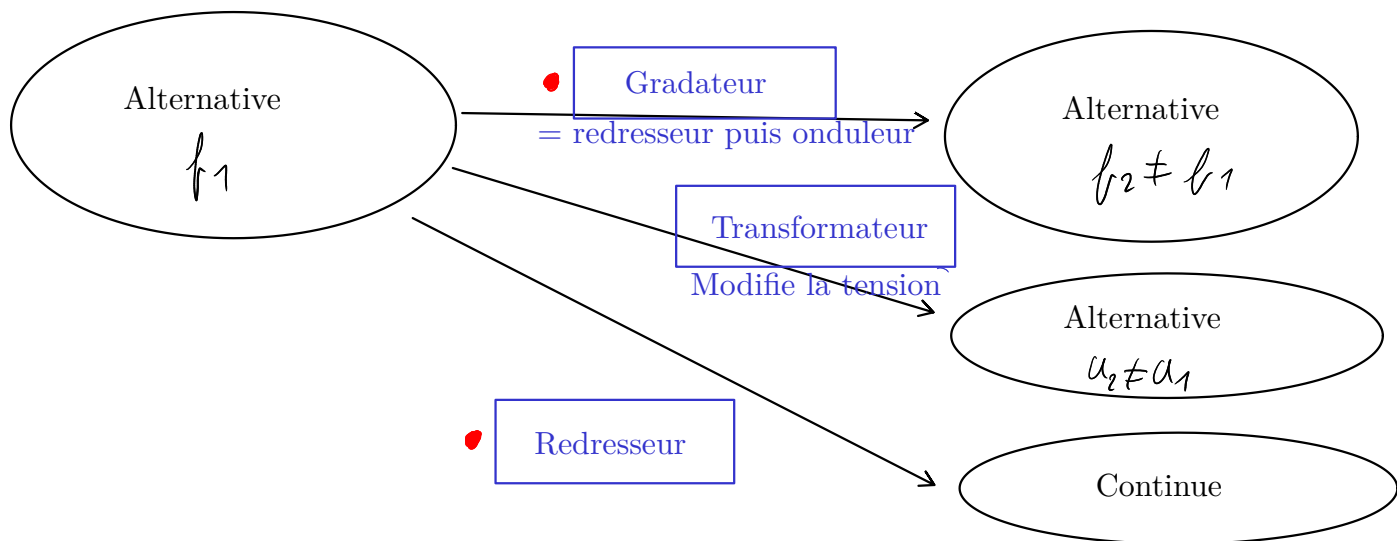
3) Structure d'un convertisseur



4) Divers convertisseurs

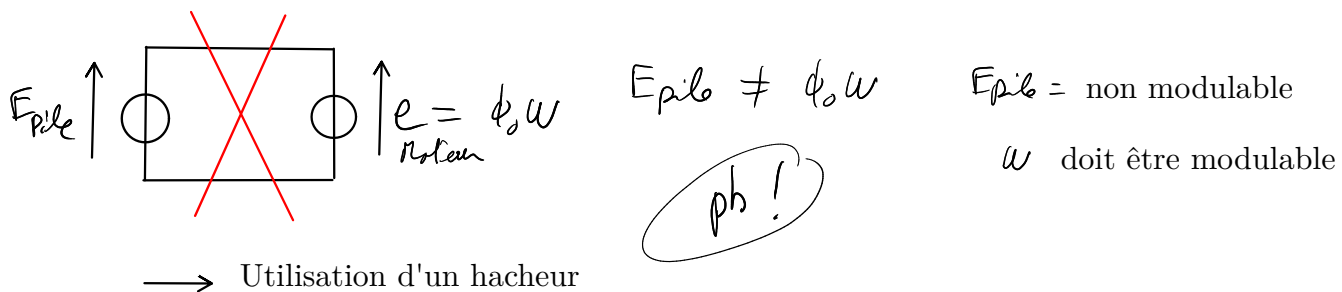
• : étudié dans ce chapitre



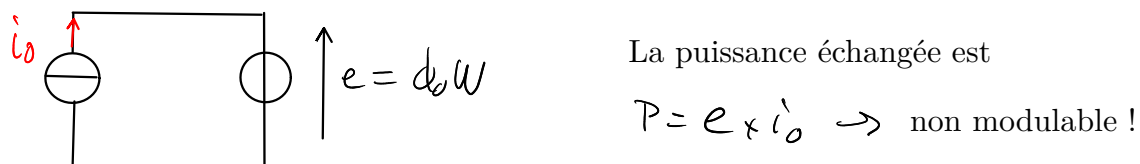


Exemples de problèmes posés qui nécessitent des convertisseurs :

(1) Moteur à courant continu alimenté par batterie ou pile



(2) Moteur électrique alimenté par une source de courant i_0

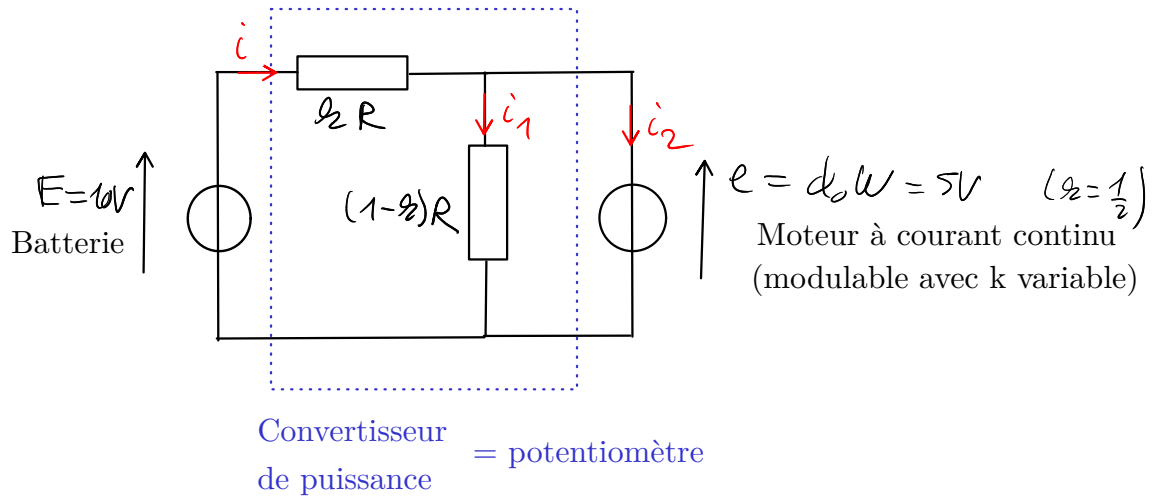


5) Exemples introductifs et problématique

Reprenons l'exemple ① avec une batterie de $E = 10V$ et une vitesse de rotation ω qui nécessite $e = d_b \omega = 5V$

Quel adaptateur de puissance peut-on proposer ?

Un pont diviseur de tension conviendrait-il ?



Ce montage fonctionne, mais :

$$\begin{cases}
 P_e = E \times i = (10V) \times i & \text{puissance donnée par la batterie} \\
 P_s = e \times i_2 = (5V) \times i_2 & \text{puissance récupérée par le moteur}
 \end{cases}$$

Or $i_2 < i$ (car $i_1 > 0$) donc $P_s < \frac{P_e}{2}$!

Moins de 50% de la puissance donnée par la source d'entrée est récupérée par la source de sortie !

Plus de 50% de la puissance est dissipée dans le convertisseur

→ Modifier une tension continue avec des résistances dissipe trop de puissance !

Il ne faut jamais utiliser de résistances dans les convertisseurs de puissance

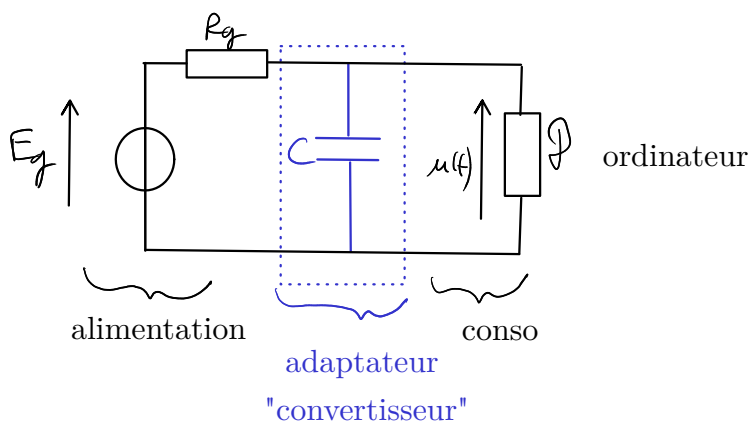
Quelle autre solution proposer alors ?

→ L'idée est d'utiliser un interrupteur pour ne laisser passer la puissance que 50% du temps (hacheur), et on interpose un condensateur C ou une inductance L pour stocker l'énergie entre les 2.

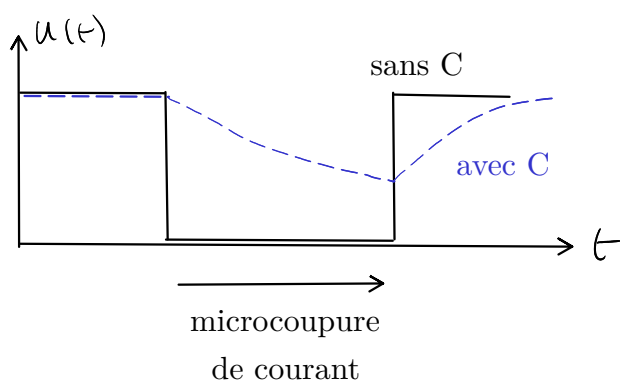
Autre exemple introductif :

Soit un ordinateur \mathcal{D} alimenté par une alimentation de tension E_g .

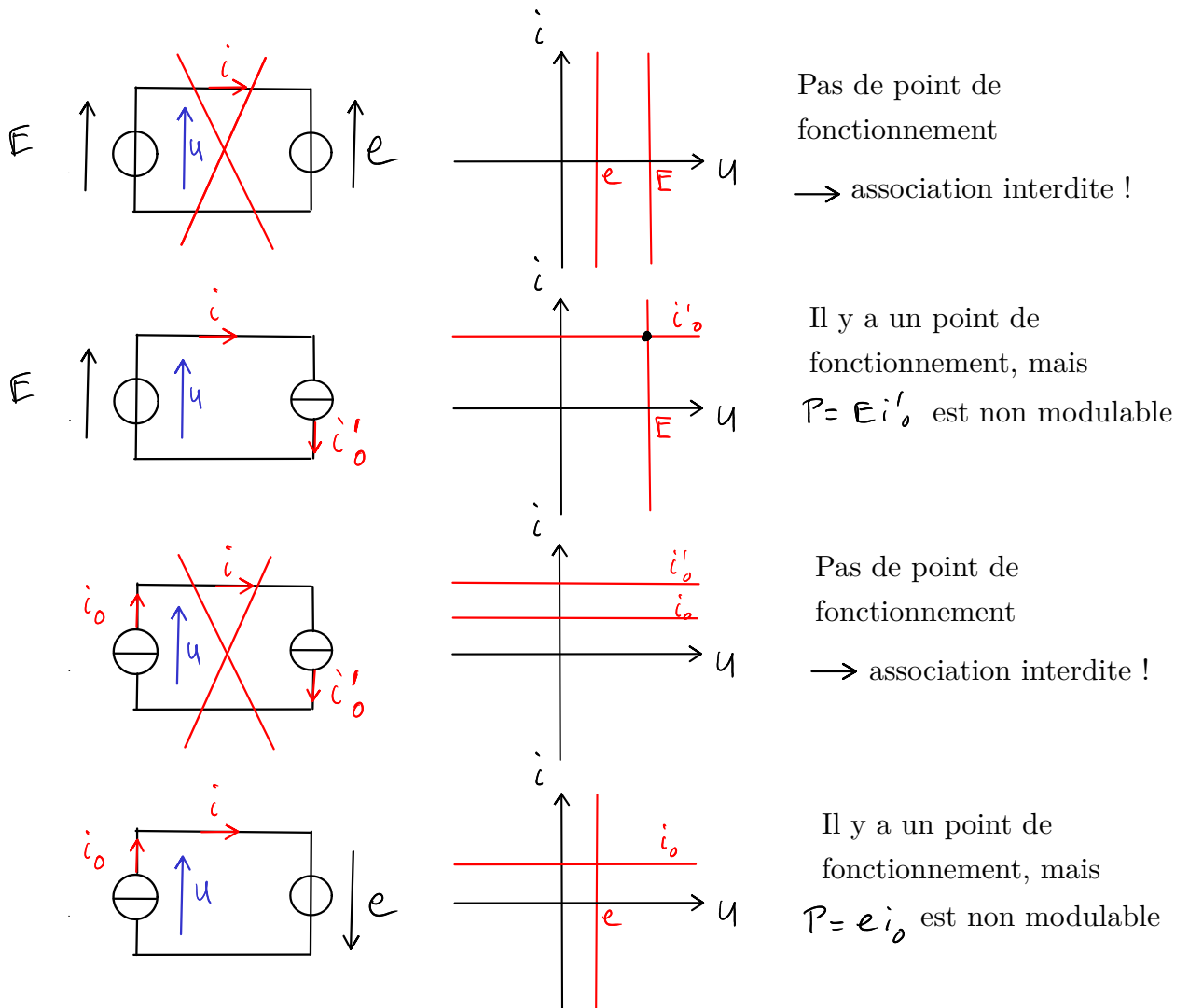
En cas de microcoupures de courant, l'ordinateur "plante" : quelle solution proposer ?



Intercaler un condensateur C permet de "lisser" les variations de la tension :



6) Règles d'associations possibles / impossibles



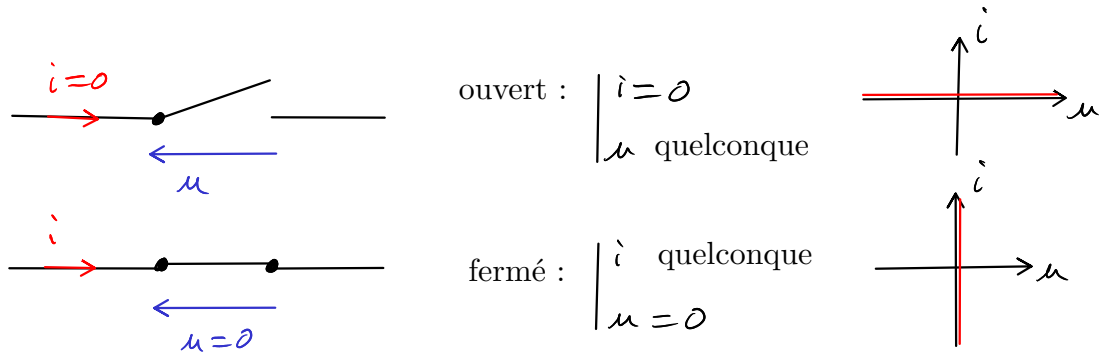
Les problèmes rencontrés pour les conversions entre deux sources de courant continu peuvent donc se classer en deux catégories :

- ↳ Les associations possibles entre source de tension et source de courant demandent une modulation de la puissance transférée : l'association directe entre ces deux sources est possible, mais on utilise des interrupteurs entre les deux pour moduler l'échange de puissance. Ce sont des convertisseurs directs.
- ↳ Les associations impossibles nécessitent, en plus des interrupteurs, d'intercaler des bobines ou condensateurs qui assurent le stockage intermédiaire de l'énergie. Ce sont des convertisseurs à accumulation.

Dans les deux cas, il faut utiliser des interrupteurs électroniques.

II) Interrupteurs électroniques

1) L'interrupteur idéal



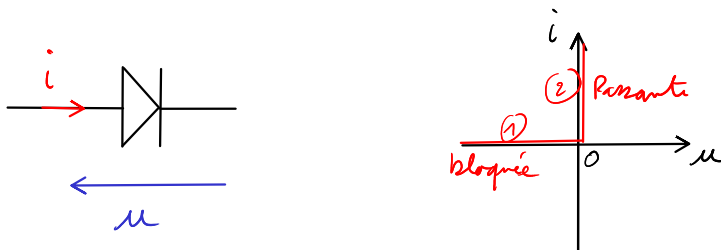
passage d'un état à l'autre : fermeture = blocage (b)
ouverture = amorçage (a)

On cherche à avoir des interrupteurs commandés électroniquement :

Certains interrupteurs ne fonctionnent que pour i dans un sens uniquement, ou u dans un seul sens.

2) Fonction de commutation spontanée

La diode peut jouer le rôle d'interrupteur, mais ne peut pas être commandée : sa commutation [passante \leftrightarrow bloquée] sera spontanée.



La diode passe ou bloque spontanément en fonction du sens, signe, de u et de i :

→ c'est une commutation spontanée.

Par contre : ● quand elle est passante, seule $i > 0$ est possible

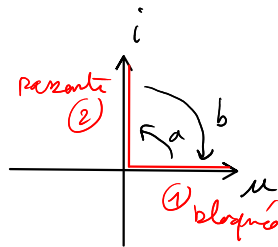
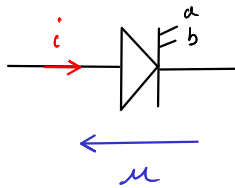
● pour qu'elle soit bloquée, il faut obligatoirement $u < 0$

→ C'est un interrupteur spontané à 2 segments ((1) et (2))

3) Fonction de commutation commandée

Nous pouvons citer un certain nombre d'interrupteurs commandés, comme le transistor, le thyristor, ...

Exemple du transistor :



a : amorçage

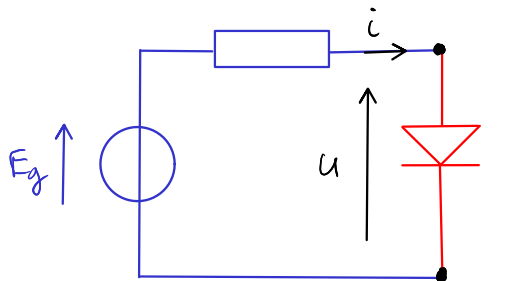
b : blocage

La commande (a, b) permet de contrôler le passage de passante à bloquée

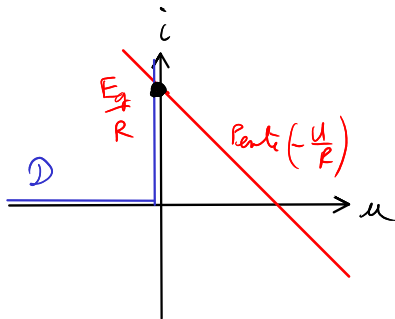
C'est un interrupteur commandé à deux segments (1 et 2)

Exemples de fonctionnement :

Diode



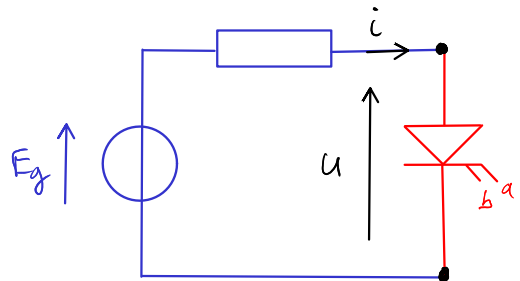
$$U = E_g - R i \quad \text{donc } i = \frac{E_g}{R} - \frac{U}{R}$$



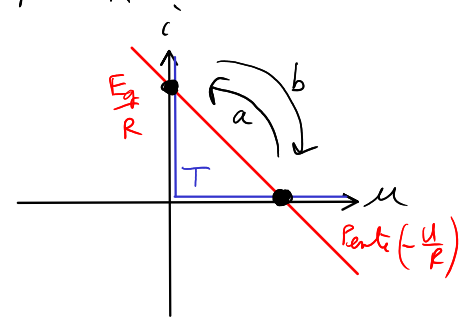
Il y a un seul point de fonctionnement •

(pas utilité d'une commande)

Transistor



$$i = \frac{E_g}{R} - \frac{U}{R}$$



Il y a deux points de fonctionnement • •

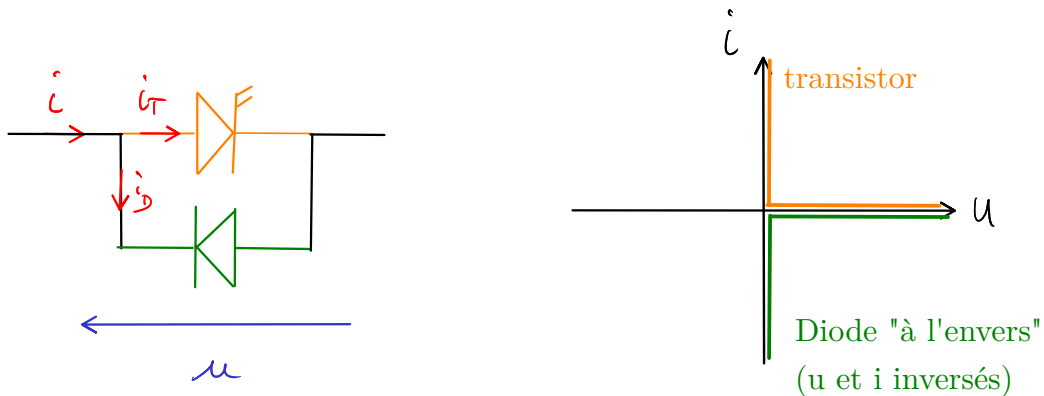
La commande permet de passer de l'un à l'autre.

Réalisation d'un interrupteur à 3 segments par association :

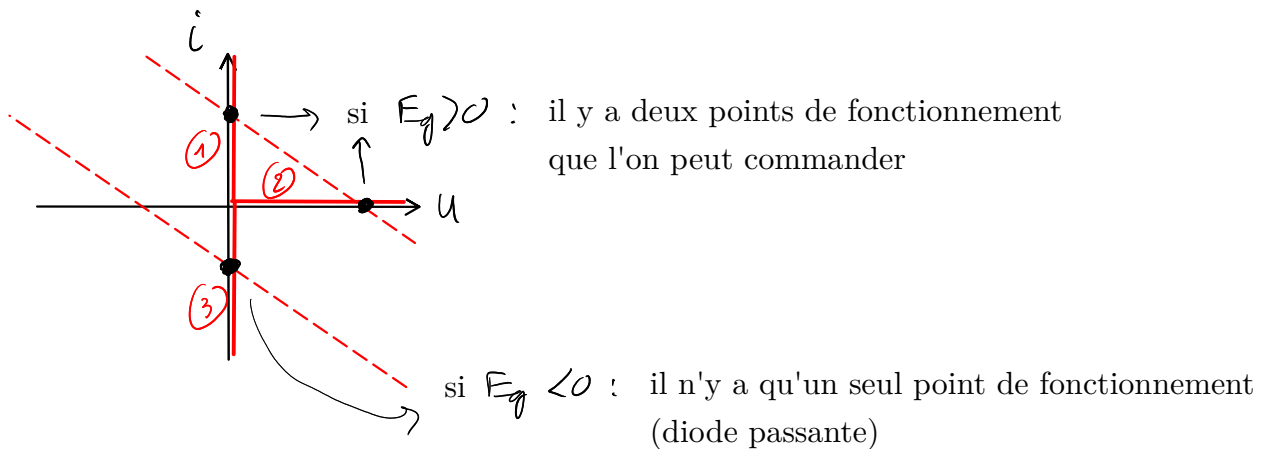
Dans les exemples précédents, il n'y a que deux segments :

i ne peut pas être négatif, et u ne peut prendre qu'un seul signe également quand l'interrupteur est bloqué.

En les associant en parallèle, il est possible d'élargir les possibilités :



La caractéristique globale est donc :



- caractéristique de l'interrupteur (3 segments ①, ②, ③)
- - - caractéristique d'un générateur réel (E_g, R) que l'on aurait placé en //
- points de fonctionnement

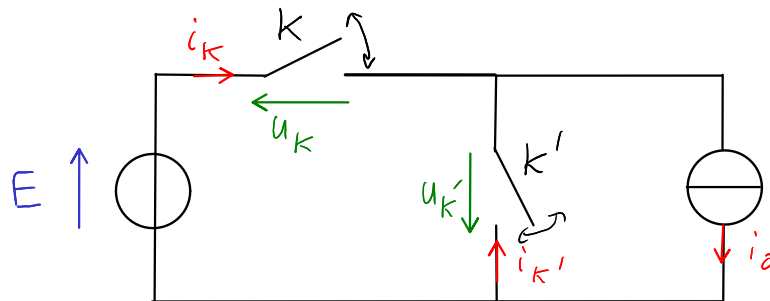
III) Les convertisseurs directs (entre sources continues)

Les convertisseurs directs sont utilisés pour moduler la puissance entre deux sources continues qui peuvent directement être associées, comme une source de tension continue avec une source de courant continu.

1) Le hacheur 2 quadrants (2 interrupteurs)

Prenons l'exemple d'un échange d'énergie entre une source de courant et une source de tension.

Un seul interrupteur ne suffit pas pour moduler l'échange !



Il n'est pas obligatoire d'intercaler une inductance ou un condensateur dans un convertisseur direct

Configurations interdites :

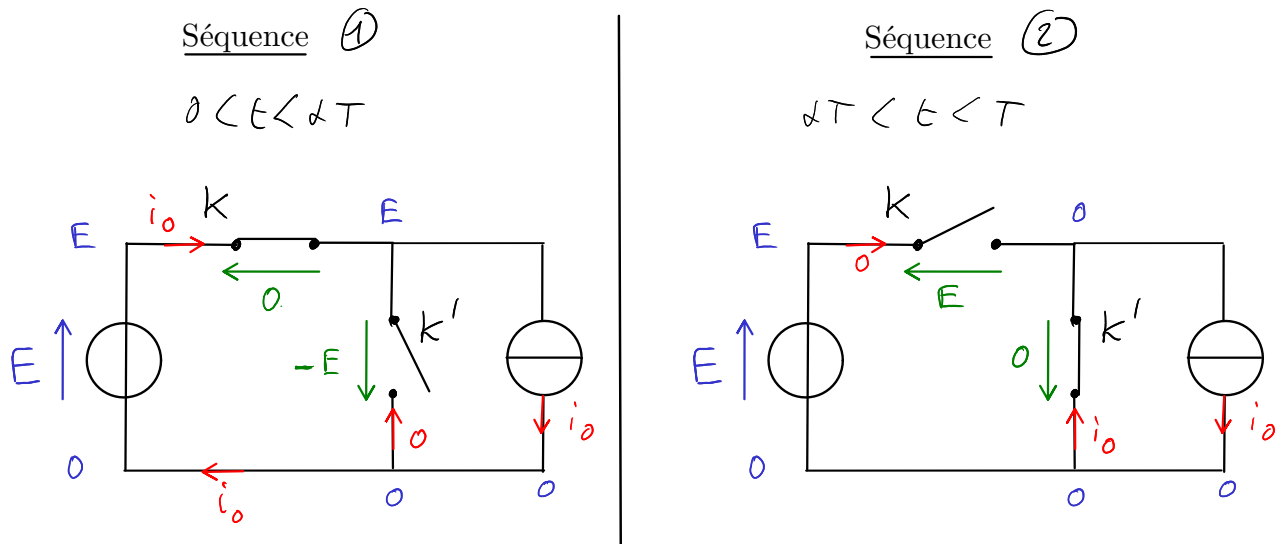
- K fermé et K' fermé : \rightarrow sinon, E est en court-circuit !
- K ouvert et K' ouvert : \rightarrow sinon, le courant i_0 imposé par la source de courant ne peut plus circuler

Séquences de fonctionnement :

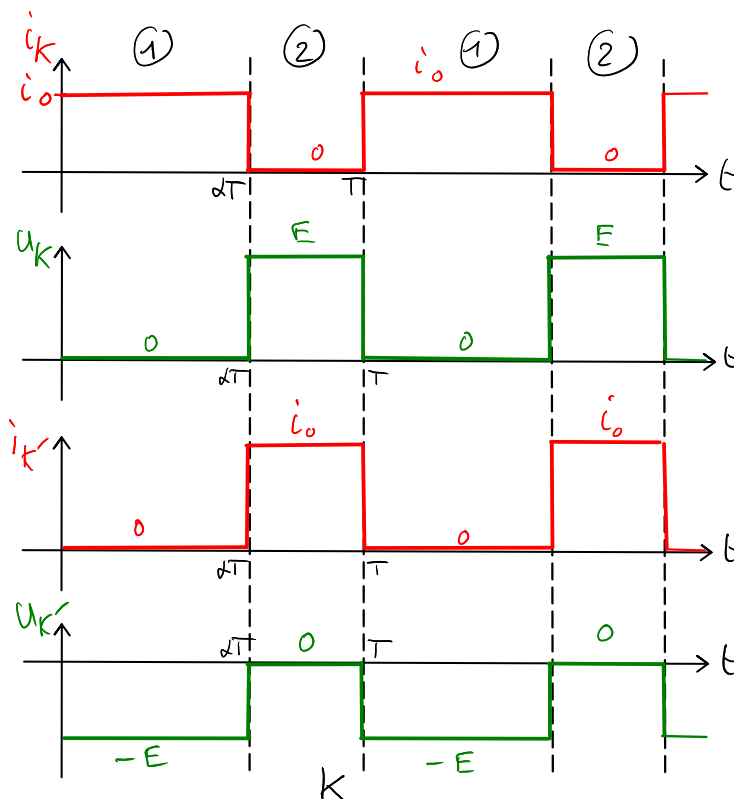
$0 < t < \Delta T$: K fermé et K' ouvert : l'échange entre les deux sources s'effectue

$\Delta T < t < T$: K ouvert et K' fermé : pas d'échange

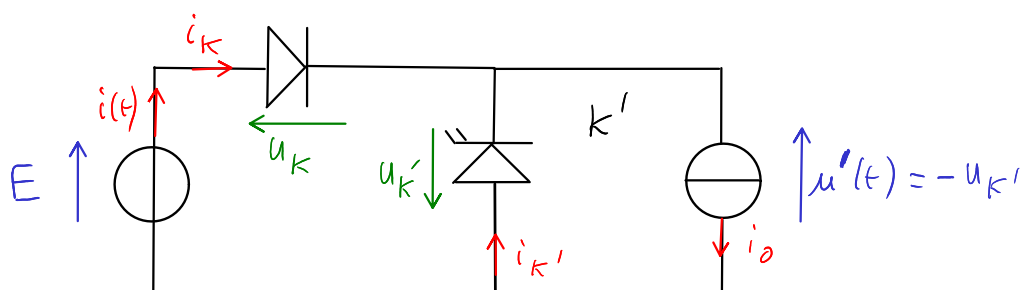
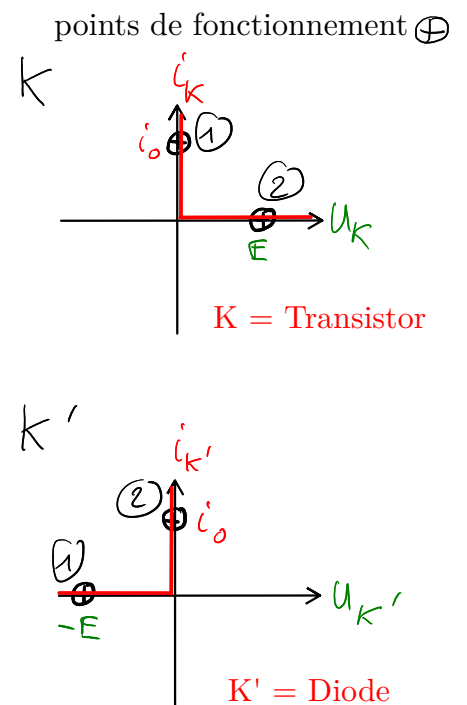
- $0 < \alpha \leq 1$ est appelé le rapport cyclique
- Les séquences sont reproduites périodiquement (période T)



Chronogrammes :



Caractéristiques :



→ Puissance moyenne donnée par la source de tension $E : (i(t) = i_0 \alpha)$

$$P_E = \frac{1}{T} \int_0^T E \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \left(\underbrace{E \cdot i_0 \cdot \alpha T}_{\text{échange}} + \underbrace{E \cdot 0 \cdot (1-\alpha) T}_{\text{repos}} \right)$$

$$P_E = \alpha E i_0$$

→ Puissance reçue par la source de courant $i_0 : (u'(t) = -E \alpha)$

$$P_{i_0} = \frac{1}{T} \int_0^T u'(t) \cdot i_0 dt = \frac{1}{T} \left(\underbrace{E \cdot i_0 \cdot \alpha T}_{\text{échange}} + \underbrace{E \cdot 0 \cdot (1-\alpha) T}_{\text{repos}} \right)$$

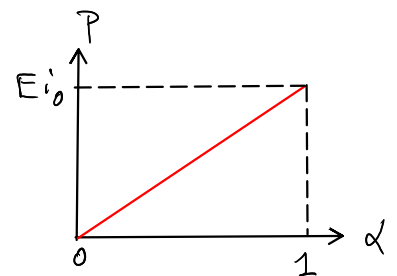
$$P_{i_0} = \alpha E i_0$$

La puissance échangée est donc

$$P_{\text{éd}} = \alpha E i_0, \text{ modulable à l'aide}$$

de la durée d'échange (rapport cyclique α)

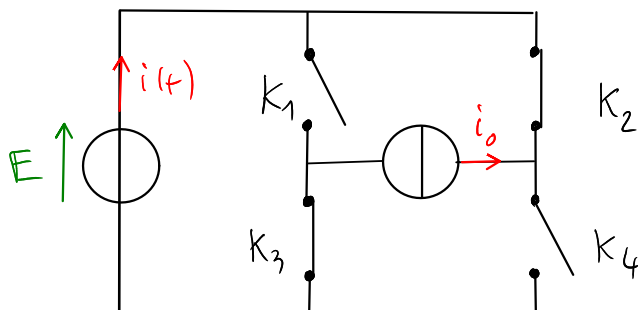
avec un rendement théorique de 100% (interrupteurs supposés idéaux!)



2) Le hacheur 4 quadrants

Dans l'exemple précédent, $i(t)$ sortant du générateur E est nécessairement positif = la source de tension donne l'énergie et la source de courant la reçoit.

Pour avoir la possibilité d'inverser le sens de l'échange (freinage régénératif par exemple par un échange batterie \leftrightarrow moteur électrique), il est nécessaire d'avoir 4 interrupteurs (4 quadrants) :



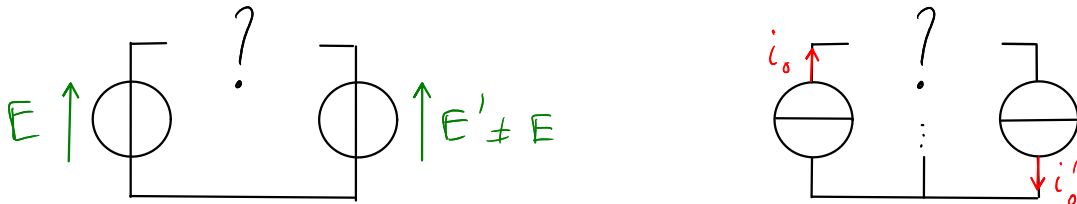
Dans la situation représentée ci-contre : $i(t) = -i_0$ donc la source tension reçoit de l'énergie

// (Détaillez les divers modes de fonctionnement ?) //

IV) Les convertisseurs à accumulation (entre sources continues)

Il n'est pas possible d'associer directement 2 sources de tension continue, ou 2 sources de courant continu -

Il est donc nécessaire d'intercaler un convertisseur :



Nous allons traiter le cas de l'association entre 2 sources de tension, qui est le cas le plus fréquent : par exemple une batterie E (fixe) peut alimenter un moteur à courant continu $e = d_0 U$ avec $e \neq E$.

Une association directe n'est pas possible : il faut donc interposer élément intermédiaire capable de stocker de l'énergie = inductance (stockage sous forme de courant) ou un condensateur (stockage sous forme de tension).

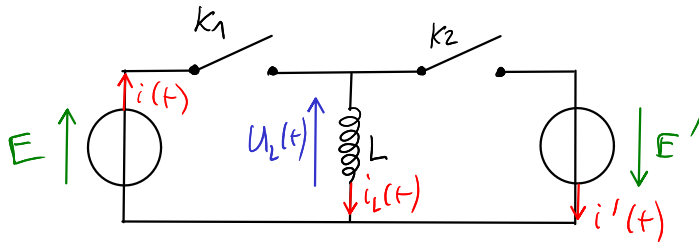
→ Pour 2 sources de courant i_0 et i'_0 : on stocke l'énergie dans des condensateurs. En effet, le condensateur impose continuité de la tension, mais peut subir des discontinuités de $i(t)$ et donc être associé alternativement à i_0 et i'_0 .

→ Pour 2 sources de tension E et E' : on stocke l'énergie dans des inductances. En effet, l'inductance impose continuité du courant mais peut subir des discontinuités de tension et peut donc être associé alternativement à i_0 et i'_0 .

Le fait de placer une tension U (E, E' ou autre...) aux bornes de L permet de stocker, on prélève son énergie $E = \frac{1}{2} Li^2 =$

Comme $u = L \frac{di}{dt}$: si $u > 0 \Rightarrow i(t) \uparrow \Rightarrow \{ \uparrow = \text{stockage d'énergie}$
 si $u < 0 \Rightarrow i(t) \downarrow \Rightarrow \{ \downarrow = \text{récupération de l'énergie}$

1) Le hacheur inverseur

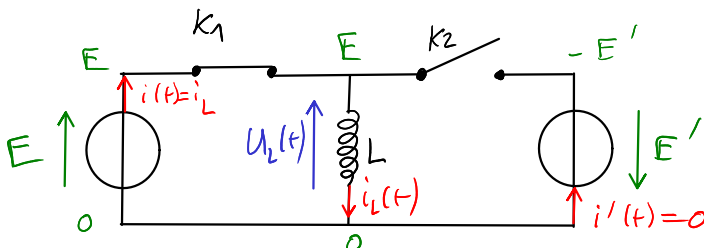


L est un élément de stockage d'énergie.

Configurations interdites :
 • K_1 et K_2 fermés = E en // à E' = court circuit
 • K_1 et K_2 ouverts : i_L ne peut pas circuler

Nous allons limiter l'étude au régime permanent (régime transitoire terminé) $\rightarrow i_L(0) \neq 0$

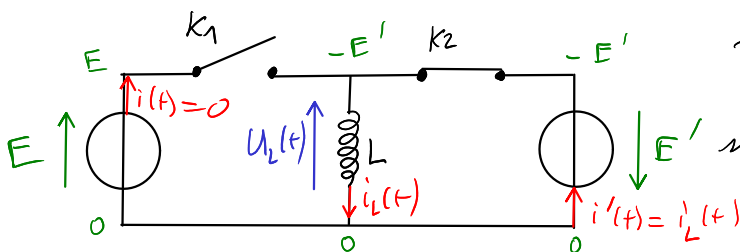
• Phase ① : K_1 fermé et K_2 ouvert



Phase d'accumulation d'énergie dans L de la part de E : $i_L(t) \uparrow$

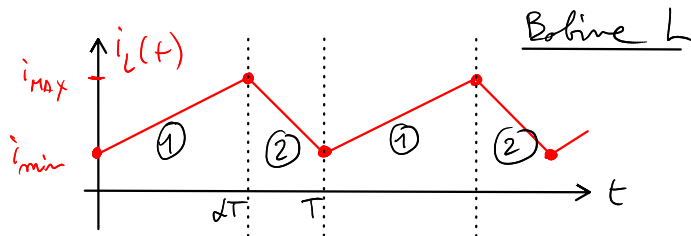
$$u_L = E = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow \frac{di_L(t)}{dt} = \frac{E}{L} \Rightarrow \boxed{i_L(t) = i_1 + \frac{E}{L} t \uparrow}$$

• Phase ② : K_1 ouvert et K_2 fermé

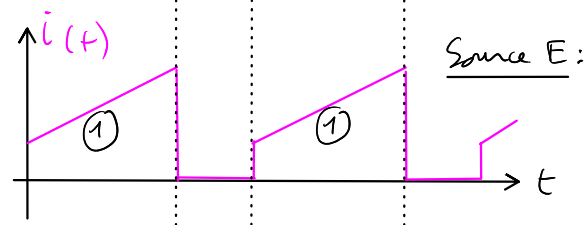


Phase de restitution de l'énergie stockée dans L à E' : $i_L(t) \downarrow$

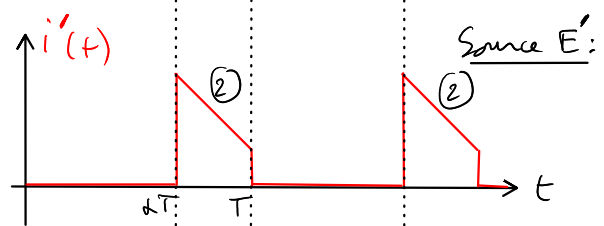
$$u_L = -E' = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow \frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{E'}{L} \Rightarrow \boxed{i_L(t) = i_2 - \frac{E'}{L} t \downarrow}$$



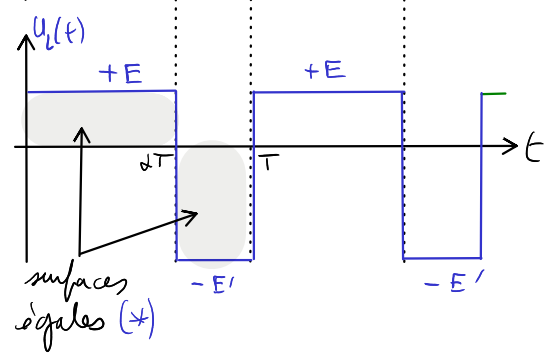
- ① pente $\left(\frac{E}{L}\right)$, durée αT
- ② pente $\left(-\frac{E'}{L}\right)$, durée $(1-\alpha)T$



① $i(t)$ stocke L en énergie



② $i'(t)$ récupère de l'énergie de L



$i_L(t)$ est continue (bobine) et T périodique, donc :

$$\Delta i = i_{max} - i_{min}$$

$$= \text{pente ①} \times \text{durée ①} = -\text{pente ②} \times \text{durée ②}$$

$$\Delta i = \frac{E}{L} \alpha T = \left| \frac{E'}{L} \right| (1-\alpha) T$$

et donc $E \alpha = E' (1-\alpha)$ soit $\alpha = \frac{E'}{E+E'}$ condition à respecter

Remarque: $u_L = L \frac{di_L}{dt}$ avec $i_L(t)$ fonction continue T périodique

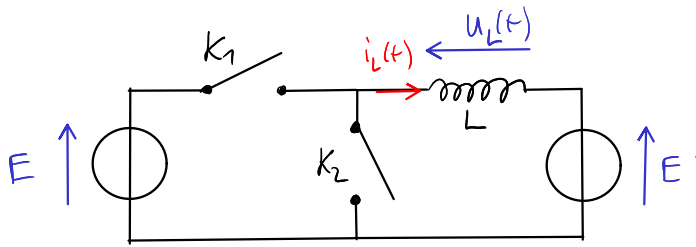
donc: $\int_0^T u_L(t) dt = L \int_0^T \frac{di_L}{dt} dt = L [i_L(t)]_0^T = 0$

$$E (\alpha T) - E' (1-\alpha) T = 0 \quad (*)$$

et $\langle u_L(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u_L(t) dt = 0$

2) Le hacheur dévolteur (ou hacheur série)

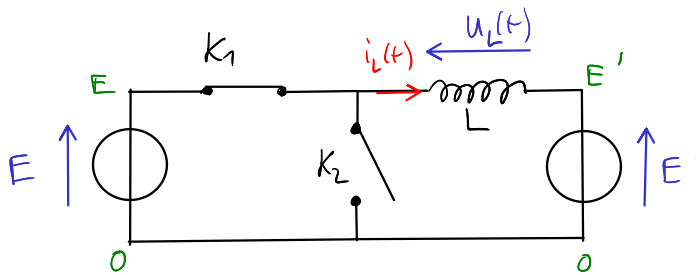
C'est le hacheur le plus courant
L est mise en série avec E' :



Configurations interdites :

- K_1 et K_2 fermés : court-circuit de E
- K_1 et K_2 ouverts : courant $i_L(t)$ bloqué

Séquence (1) : $0 < t < dT$ K_1 fermé et K_2 ouvert :

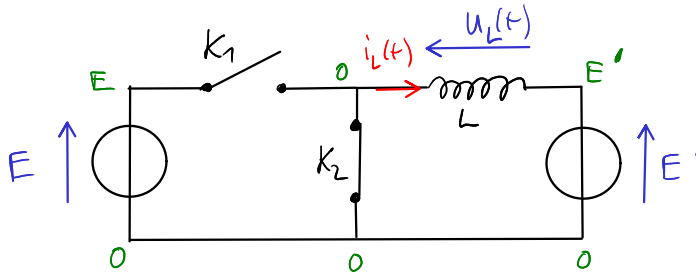


$$U_L(t) = E - E' = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

donc $\frac{di_L}{dt} = \frac{E - E'}{L}$

soit $i_L(t) = i_1 + \left(\frac{E - E'}{L}\right)t$ (1)

Séquence (2) : $dT < t < T$ K_1 ouvert et K_2 fermé :



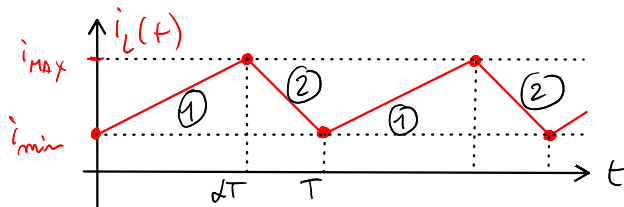
$$U_L(t) = -E' = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

donc $\frac{di_L}{dt} = -\frac{E'}{L}$

soit $i_L(t) = i_2 - \frac{E'}{L}t$ (2)

Remarque : $i_L(t)$ est continue (laine) et T périodique ;

$i_L(t)$ est décroissante affine sur la séquence (2), donc doit être croissante sur la séquence (1) : on doit donc avoir $E - E' < 0$ soit $E' < E$:
dévolteur



(1) Pente $\left(\frac{E - E'}{L}\right)$ durée dT

(2) Pente $\left(-\frac{E'}{L}\right)$ durée $(1-d)T$

$$\Delta i = i_{max} - i_{min} = \frac{E - E'}{L} dT = \left| -\frac{E'}{L} \right| (1-d)T$$

soit $(E - E')d = E'(1-d)$ et donc

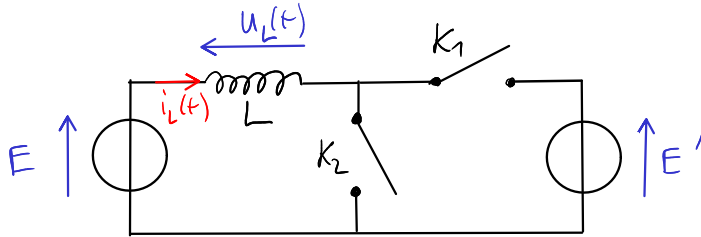
$$d = \frac{E'}{E}$$

$0 < d < 1$
et $E' < E$

3) Le hacheur survolteur (ou hacheur parallèle)

Le hacheur précédent ne fonction que si $E' < E$.

Dans le cas où $E' > E$, la bobine est placée du côté de E pour obtenir un survolteur :

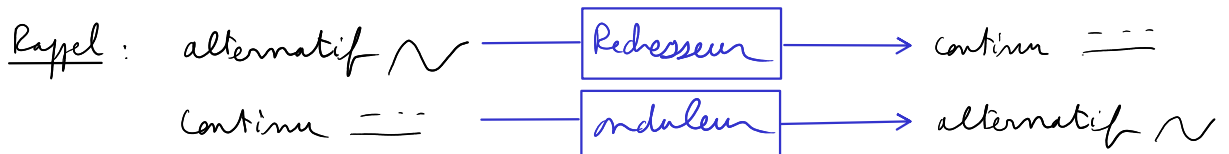


- Séquence ① : K_2 fermé et K_1 ouvert : établissement du courant dans L
- " ② : K_2 ouvert et K_1 fermé : récupération du courant par E'

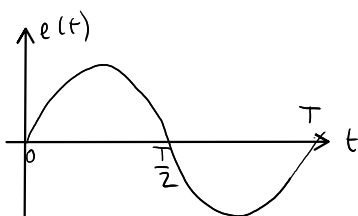
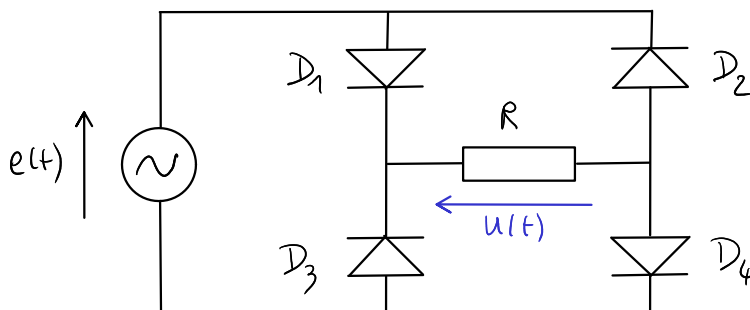
→ A faire en exercice

On obtient $d = \frac{E}{E'}$ et $E' > E$

V) Conversions alternatif ↔ Continu

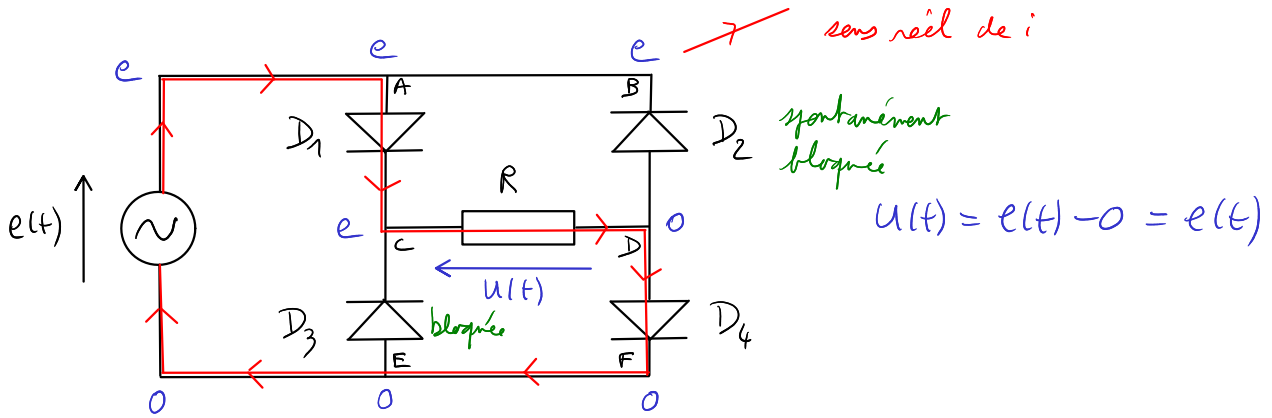


1) Le redresseur double alternance



$$e(t) = e_0 \sin \omega t \quad \rightarrow \quad u(t) = ?$$

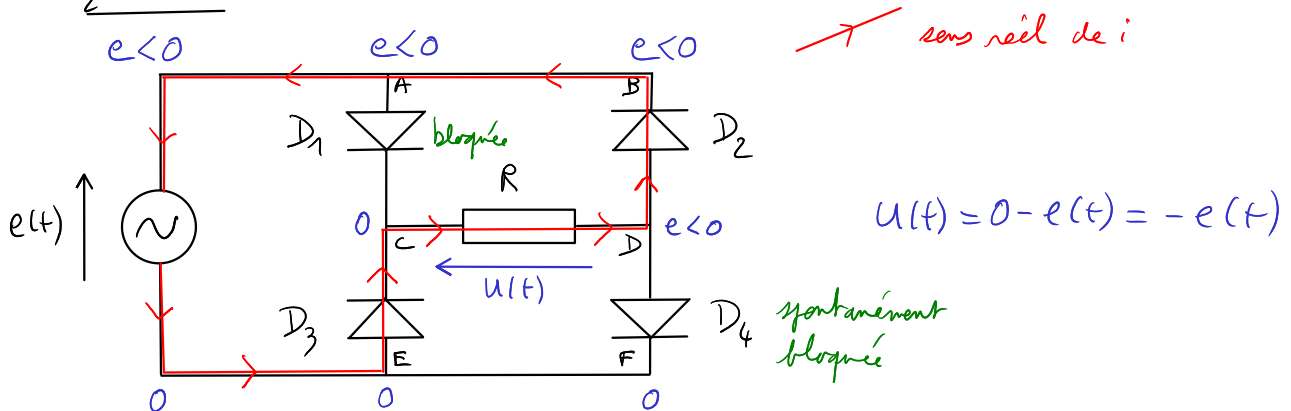
$0 < t < \frac{T}{2} :$ $e(t) > 0$ donc :



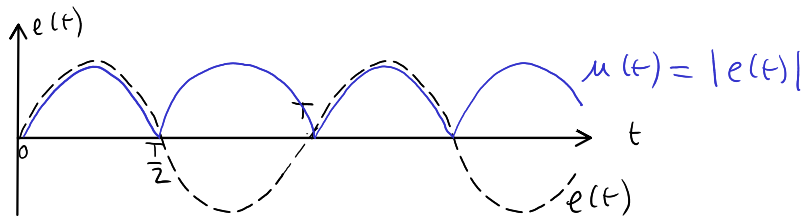
Pour trouver le passage du courant, il peut être plus simple de faire une analogie avec l'hydraulique : la tension est une hauteur d'eau, le courant est l'écoulement, et la diode un clapet anti-retour (sens passant = sens de la pointe du symbole).

* le courant arrive en A et ne peut passer que dans D_1 (D_2 à contre sens) puis dans R (D_3 à contre sens). En D, le potentiel est plus bas que en B : le courant ne peut donc pas "remonta" de D vers B. Ensuite le courant passant dans D_4 et ne peut pas "remonta" de B vers C ($e > 0$) : le courant finit son circuit au générateur.

$\frac{T}{2} < t < T$



Conclusion quand $e(t) > 0 \Rightarrow u(t) = e(t)$
 quand $e(t) < 0 \Rightarrow u(t) = -e(t)$ } donc $u(t) = |e(t)|$



Remarque : l'ajout d'un condensateur C avec R permet de lisser les variations de $u(t)$ pour diminuer l'ondulation

• $e(t) = A \sin(\omega t)$ $\langle e(t) \rangle = 0$

• $u(t) = |A \sin(\omega t)|$ $\langle u(t) \rangle = ?$

$$\langle u(t) \rangle = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} e_0 \sin \omega t \, dt \quad (\text{car } u(t) \text{ est maintenant } \frac{T}{2} \text{ p\u00e9riodique})$$

$$= \frac{2}{T} e_0 \left[-\frac{1}{\omega} \cos \omega t \right]_0^{T/2} = \frac{-2e_0}{\omega T} \left(\underbrace{\cos \frac{\omega T}{2}}_{-1} - \underbrace{\cos 0}_1 \right) \quad (\omega T = 2\pi)$$

$$= \frac{2e_0}{2\pi} \times 2$$

$$\langle u(t) \rangle = \frac{2e_0}{\pi} \neq 0$$

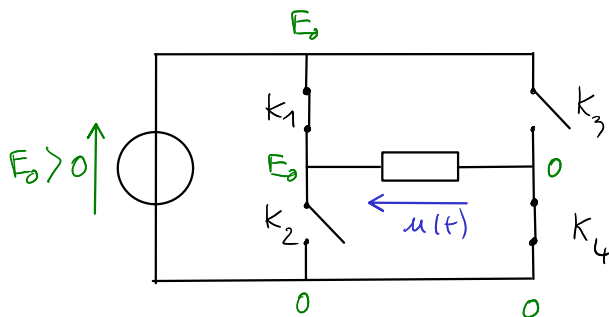
c'est la composante continue obtenue gr\u00e2ce au redresseur.

2) L'onduleur

a) Structure simple \u00e0 4 interrupteurs

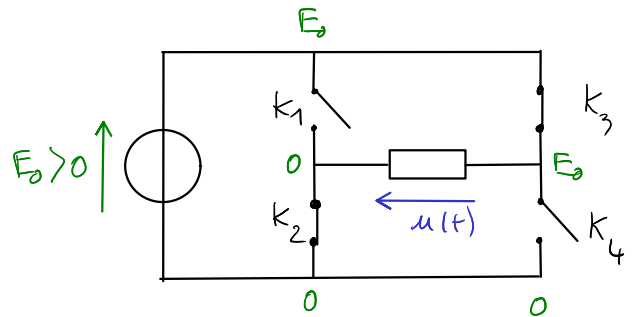
S\u00e9quence de commande :

① $0 < t < \frac{T}{2}$ | K_1 et K_4 ferm\u00e9s
 K_2 et K_3 ouverts

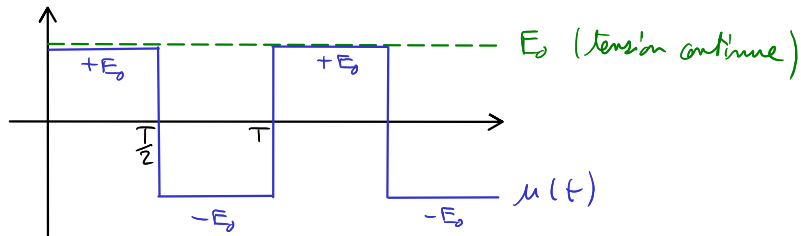


$$u(t) = E_0$$

② $\frac{T}{2} < t < T$ | K_1 et K_4 ouverts
 K_2 et K_3 ferm\u00e9s



$$u(t) = -E_0$$



La tension continue E_0 est transformée en tension créneau -

Une tension sinusoïdale peut ensuite être obtenue par filtrage (passe bas) du créneau. Toutefois, ce filtrage est difficile à effectuer car un créneau contient de nombreuses harmoniques. On lui préfère l'onduleur MLI

b) L'onduleur à Modulation de Largeur d'Impulsion (M.L.I.)

→ Expliqué en classe (A compléter !)