

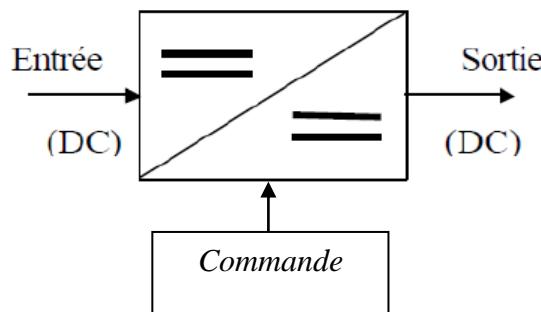
Chapitre 1 :

Les hacheurs

- Généralités.
- Hacheurs non réversibles.
- Hacheur réversible en courant.
- Hacheur réversible en tension.
- Hacheur réversible en courant et en tension.

I. Généralités :

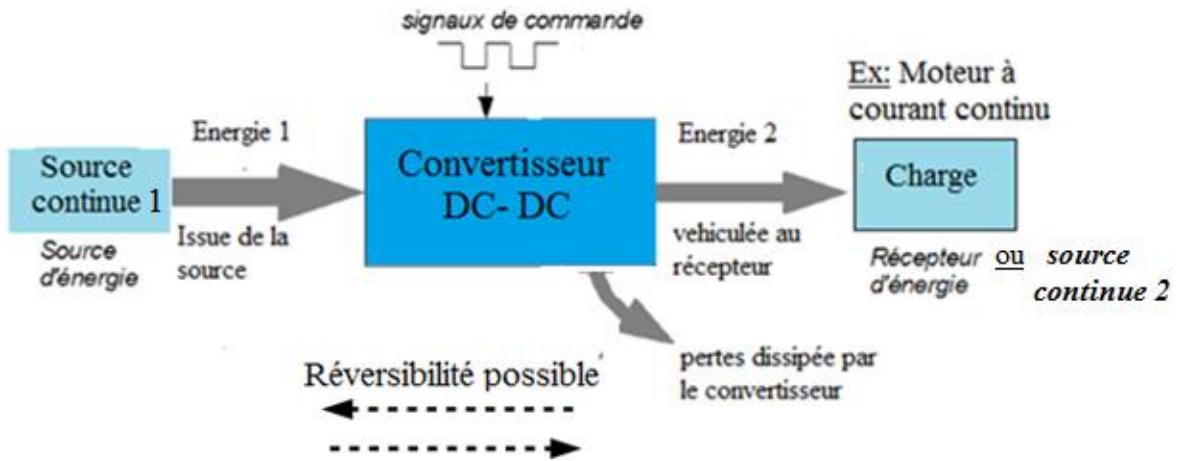
Les hacheurs assurent la conversion DC-DC (convertisseur continu-continu).



Ce sont des convertisseurs qui permettent, d'obtenir une tension ou un courant continu de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension ou courant continue fixe.

Les hacheurs sont principalement utilisés en industrie comme des variateurs de vitesse des machines à courant continu et aussi pour alimenter différents appareils électroniques.

La figure suivante représente le schéma synoptique d'un convertisseur statique DC-DC



Les interrupteurs semi-conducteurs de puissance utilisés pour la conversion DC/DC (Hacheurs) sont principalement des interrupteurs à ouverture et fermeture commandés tel que : les **GTO** (Gate Turn-Off) et les **Transistors** (bipolaire, MOSFET, IGBT)

➤ **Caractéristique statique idéal du transistor :**

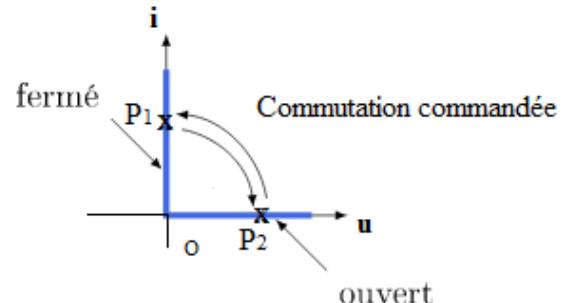
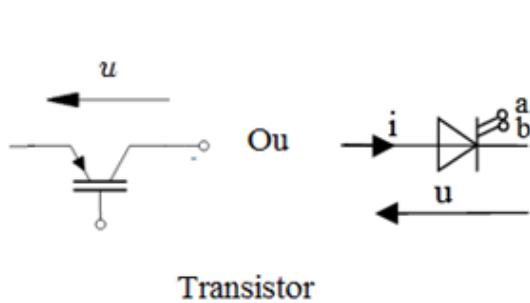
On considère que l'interrupteur est idéal c.a.d que la chute directe de tension en ouverture et le courant de fuite en fermeture sont négligeables.

Rappel :

On appelle **chute directe de tension**, la faible tension qu'on a à ses bornes lorsque l'interrupteur est **fermé** (passant).

On appelle **courant de fuite**, le faible courant qui le traverse lorsque l'interrupteur est **ouvert** (bloqué).

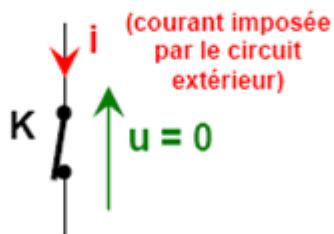
Les points de fonctionnement sont définis sur les deux segments de la caractéristique statique **idéal** de l'interrupteur.



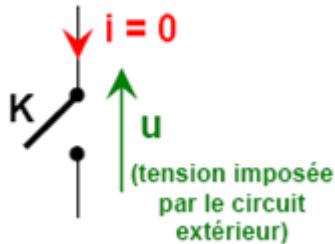
Caractéristique statique
idéale

Amorçage et blocage commandés dans le sens direct.

- Interrupteur fermé (position ON : $u = 0$) le point de fonctionnement en P1



- Interrupteur ouvert (position OFF : $i = 0$) le point de fonctionnement en P2



➤ Notion de pertes

En réalité et comme tout convertisseur de puissance, les composants de puissance utilisés dans la fonction de conversion DC-DC sont des sièges de pertes et donc d'échauffements.

Il existe principalement deux types de pertes :

Les pertes par conduction P_{cond} et Les pertes par commutation P_{com}

Ces deux types de pertes correspondent aux valeurs moyennes des puissances associées:

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int_T p_{kcond} dt = \frac{1}{T} W_{cond}$$

$$P_{com} = \frac{1}{T} \int_T p_{kcom} dt = \frac{1}{T} W_{com}$$

Avec

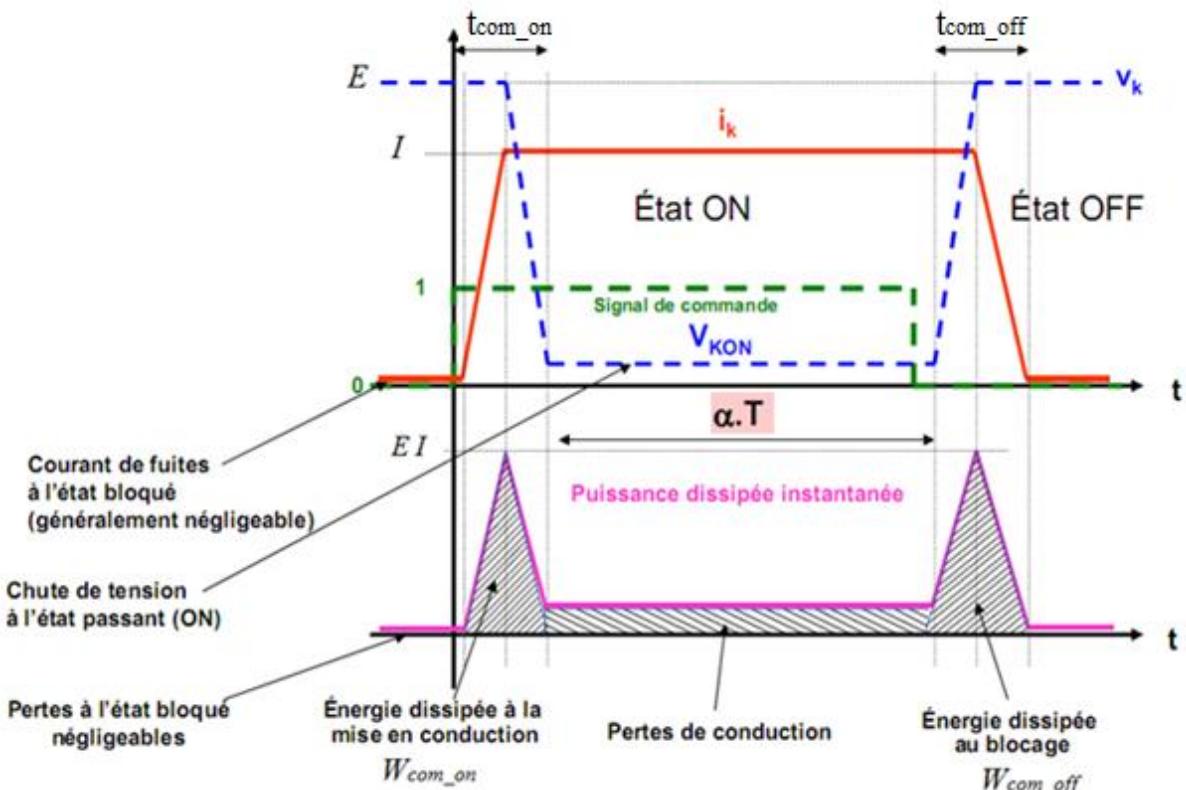
$$P_{com} = f W_{com}$$

Avec f fréquences de découpage ($f = \frac{1}{T}$)

W_{cond} : énergie consommée par le composant lors de la conduction.

W_{com} : énergie consommée par le composant lors de la commutation

Les pertes par commutation du transistor sont estimées comme suit :



$$W_{com_on} \approx \frac{1}{2} E I (t_{com_on})$$

$$W_{com_off} \approx \frac{1}{2} E I (t_{com_off})$$

Puisque $P_{com} = f W_{com}$ on trouve :

$$P_{com} = \frac{1}{2} f E I (t_{com_on} + t_{com_off})$$

Et les pertes par conductions sont estimées :

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int_{\alpha T} V_{kon} I dt = \alpha V_{kon} I$$

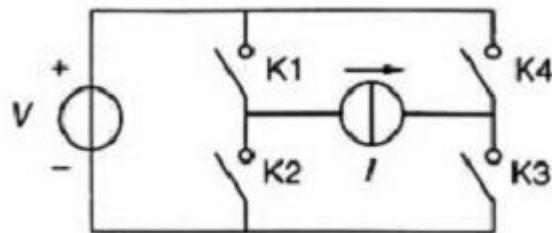
αT : Durée de conduction du transistor dans une période T.

➤ Structure de convertisseurs

On distingue les convertisseurs DC-DC directs et indirects.

- Structure des convertisseurs directs :

Les sources d'entrée et de sorties sont de nature différentes. Le convertisseur statique peut contenir, dans ce cas, que des interrupteurs à semi-conducteur.



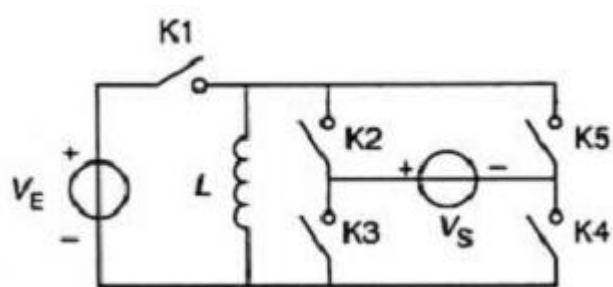
Convertisseur directe tension-courant



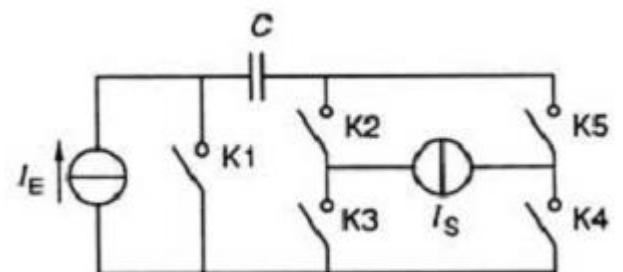
Convertisseur directe courant-tension

- Structure des convertisseurs indirects :

Les sources d'entrée et de sortie sont de nature identique, et pour les relier, il faut faire appel à des éléments de stockage (inductance L ou capacité C)

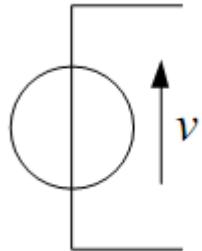


Convertisseur indirecte tension-tension

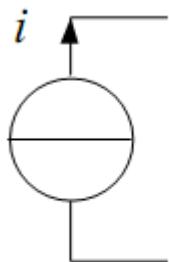


Convertisseur indirecte courant-courant

- **Source de tension** : considérer comme un dipôle assurant la continuité de la tension dans le cadre d'une commutation.



- **Source de courant** : considérer comme un dipôle imposant la continuité du courant dans le cadre d'une commutation.



NB :

Les inductances et les condensateurs sont considérés comme des *sources instantanées*. En effet :

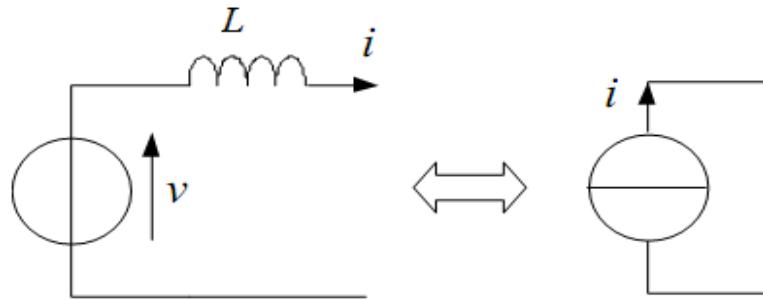
- L'inductance (source de courant instantanée) avec $u = L \frac{di}{dt}$: interdit tout discontinue de courant (s'oppose aux variations brusques du courant), sinon la tension u tend vers l'infinie. Elle est utilisée pour lisser le courant.
- Le condensateur (source de tension instantanée) avec $i = C \frac{du}{dt}$: assure la continuité de la tension (s'oppose aux variations brusques de tension). Elle est utilisée pour lisser la tension.

N.B : Les deux sources instantanées sont limitées à une certaine dynamique.

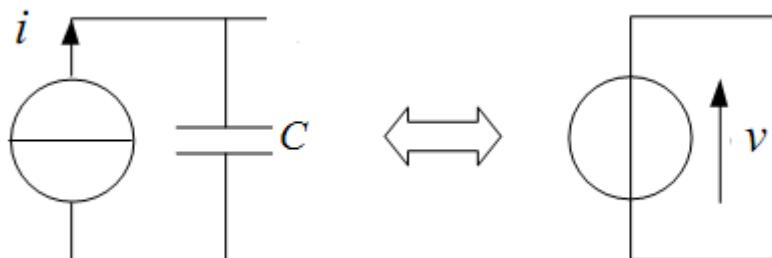
- **Changement de nature des sources :**

Pour pouvoir réaliser des CS convenablement on peut effectuer les changements de nature suivants :

- une inductance de valeurs suffisante placée en série avec une source de tension est l'équivalent d'une source de courant.



- un condensateur de capacité suffisante placée en parallèle avec une source de courant est l'équivalent d'une source de tension.



Remarque :

- Une source est réversible en tension si la tension à ses bornes peut changer de signe.
- Une source est réversible en courant si le courant qui la traverse peut s'inverser.

Exemples de réversibilité

- Une batterie d'accumulateurs se comporte en récepteur lors de la charge, en générateur lors de la décharge; on dit que c'est une *source de tension réversible en courant*.
- Le circuit de l'induit d'une machine à courant continu est assimilable à une f.é.m. en série avec une résistance et une inductance ; c'est donc *une source de courant réversible en tension et en courant*.

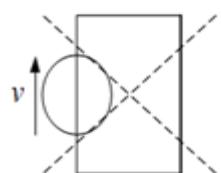
➤ **Règle d'interconnexion des sources**

Pour établir une configuration des convertisseurs statique, il faut respecter les trois règles suivantes

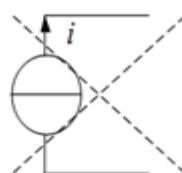
- 1/** Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte (*pour éviter les surintensités*).
- 2/** Une source de courant ne doit jamais être ouverte mais elle peut être court-circuitée (*pour éviter les surtensions*).
- 3/** Il ne faut jamais connecter deux sources de même nature. Cela revient à dire qu'il est possible de connecter deux sources de natures différentes.

Cela conduit à respecter les configurations assurant le transfert continu de l'énergie comme suit :

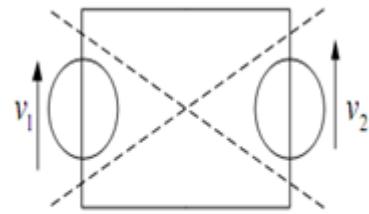
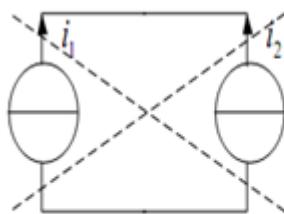
• **Configurations interdites**



*Ne pas court-circuiter
une source de tension*

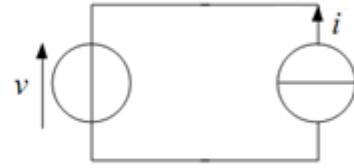
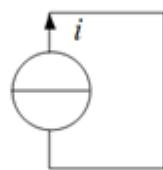
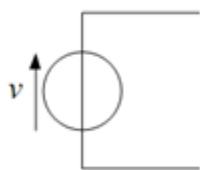


*Ne pas ouvrir une
source de courant*



Ne pas connecter deux sources de même nature

- **Configurations autorisées**



Aussi :

Il faut noter que pour connecter **deux sources de tension**, le convertisseur doit contenir un **élément inductif**. De même, pour connecter **deux sources de courant**, le convertisseur doit contenir un **élément capacitif**.

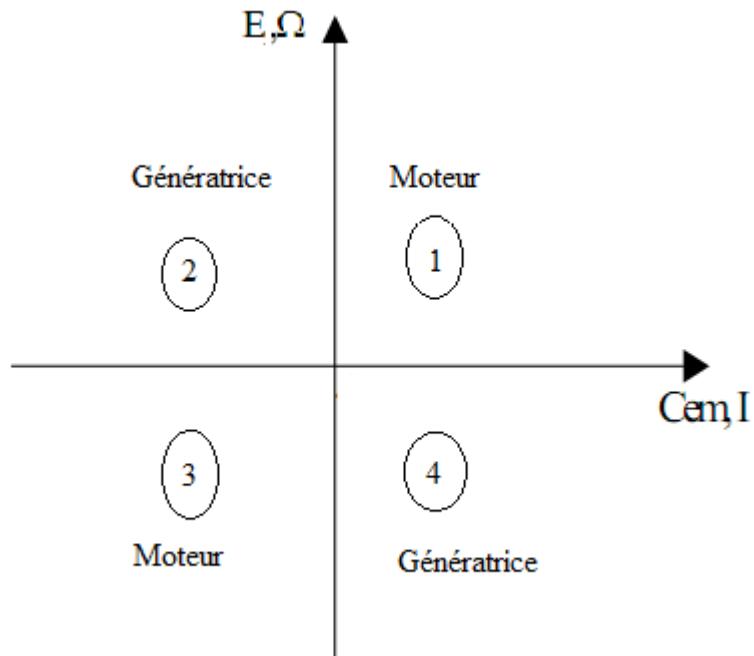
Selon la notion de Réversibilité, on distingue :

- Hacheurs non réversibles
- Hacheur réversible en courant,
- Hacheur réversible en tension,
- Hacheur réversible en courant et en tension.

II. Hacheur non réversible :

Les hacheurs non réversibles ou « hacheur à un quadrant » sont des structures qui permettent uniquement de fournir un courant et une tension **unidirectionnels** à une charge.

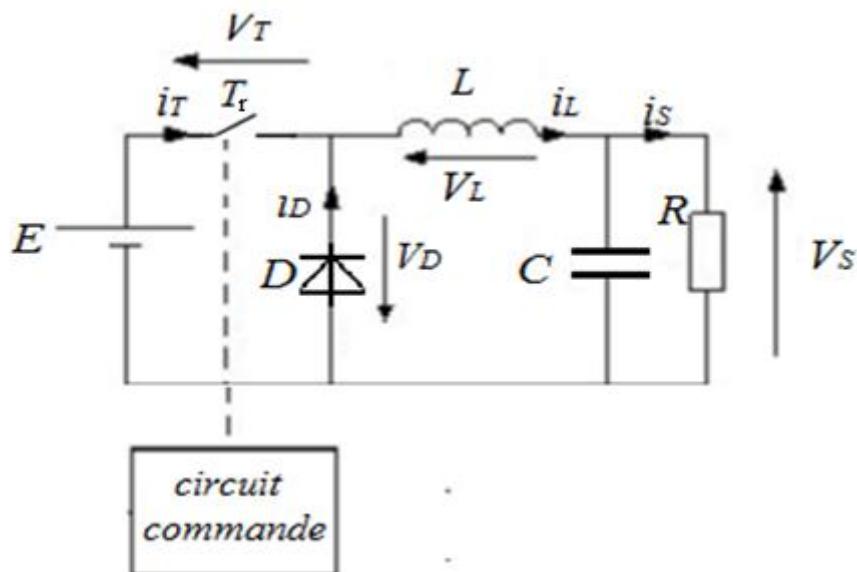
Exemple : Si la charge est un machine à courant continu, le hacheur assure **un seul sens de rotation et sans freinage** (courant de sortie et tension de sortie positifs $I_s > 0$ et $V_s > 0$).



On distingue parmi les hacheurs non réversibles : hacheur série, hacheur parallèle et hacheur série-parallèle.

II.1 Hacheur série ou abaisseur (Buck converter):

Le montage pratique des hacheurs série est représenté sur la figure suivante.



Ce montage contient un interrupteur T_r à amorçage et blocage commandés (transistors par exemple) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés. On considère que la charge est purement résistive de résistance R .

L'interrupteur Tr et D sont **complémentaire**.

L'interrupteur Tr est passant sur l'intervalle $[0, \alpha T]$ et la diode D est passante sur $[\alpha T, T]$, T : est la période.

α est le rapport cyclique ($0 < \alpha < 1$)

il s'exprime : $\alpha = \frac{\text{temps de conduction}}{\text{période de hachage}} = \frac{t_c}{T}$

Tr : passant sur $[0, \alpha T]$:

C'est la phase de magnétisation

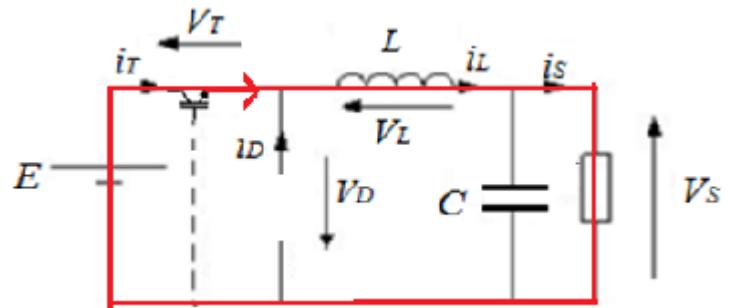
$$V_L = (E - V_s) > 0, \quad V_D = -E$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = E - V_s$$

Donc :

$$i_L(t) = \frac{E - V_s}{L} t + cst$$

Dans ce cas le courant est croissant



D : passante sur $[\alpha T, T]$:

C'est la phase de démagnétisation

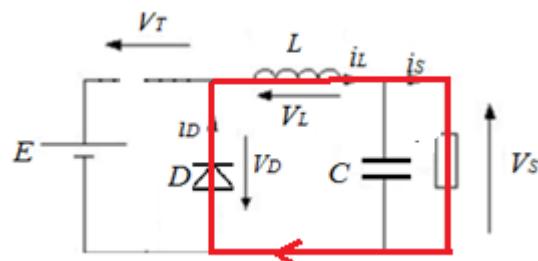
$$V_L = (-V_s) > 0, \quad V_T = E$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_s$$

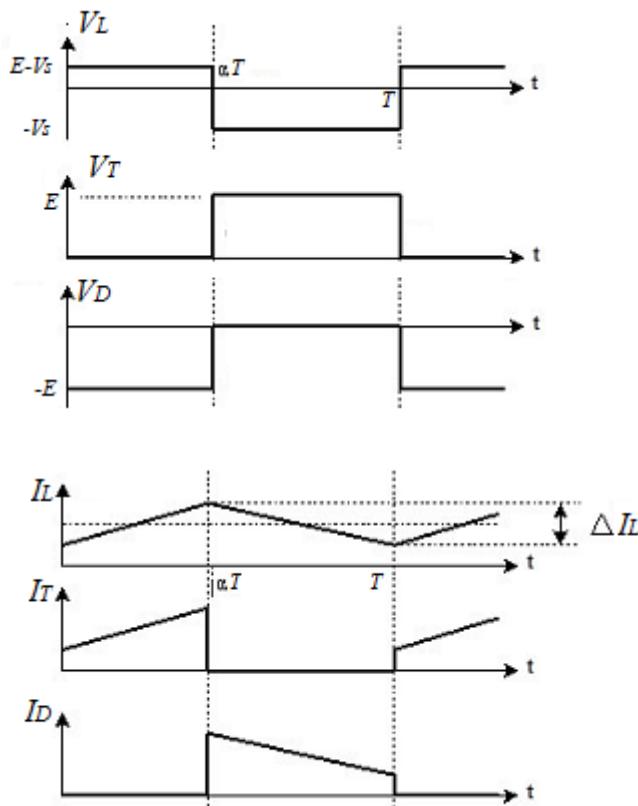
Donc :

$$i_L(t) = \frac{-V_s}{L} t + cst$$

Dans ce cas le courant est décroissant



Les allures dans le cas d'une conduction continue (conduction ininterrompue) c.à.d que la démagnétisation n'est pas complète (le coutant ne s'annule pas) :



La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance étant nulle :

$$V_{Lmoy} = 0 \text{ donc } V_{Lmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = 0$$

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} (E - V_s) dt - \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T V_s dt = 0$$

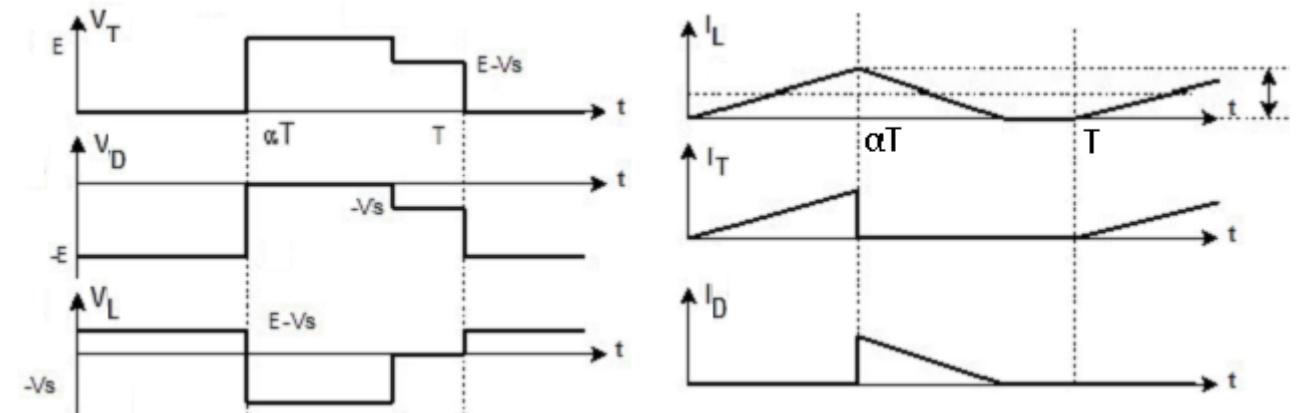
$$V_{Lmoy} = (\alpha E - V_s) = 0$$

Alors : $V_s = \alpha E$

V_s ne dépend que de α , ce qui facilite la commande (indépendante des autres grandeurs électriques).

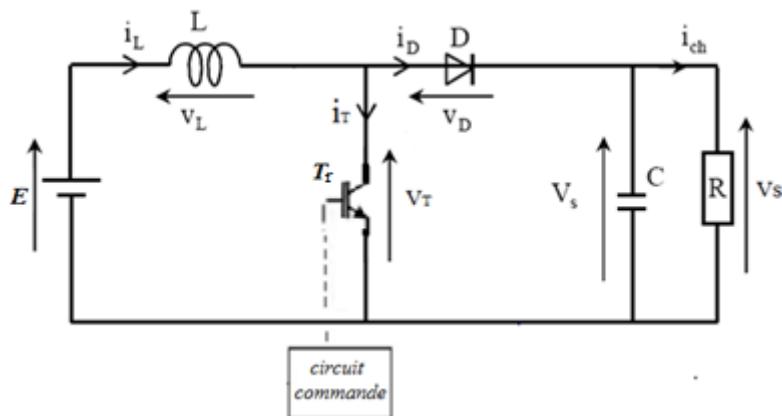
Dans le cas d'une **conduction discontinue (conduction interrompue)** :

Le courant s'annule avant la fin de la période, c'est-à-dire que la démagnétisation de l'inductance est complète lors des phases de décroissance du courant, dans ce cas, les interrupteurs se retrouvent ouverts dans cet intervalle.



II.2 Hacheur parallèle ou élévateur (Boost converter) :

Le montage de principe :



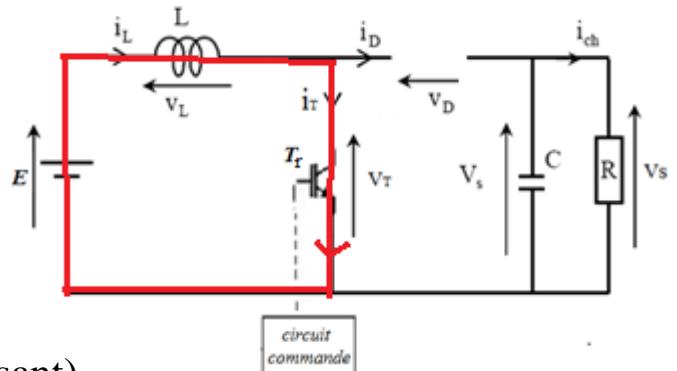
Tr est passant : [0, αT]

$$V_L = E, \quad V_D = -V_s$$

$$i_T = i_L \text{ et } i_D = 0$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = E$$

$$i_L(t) = \frac{E}{L} t + cst \quad (\text{courant croissant})$$



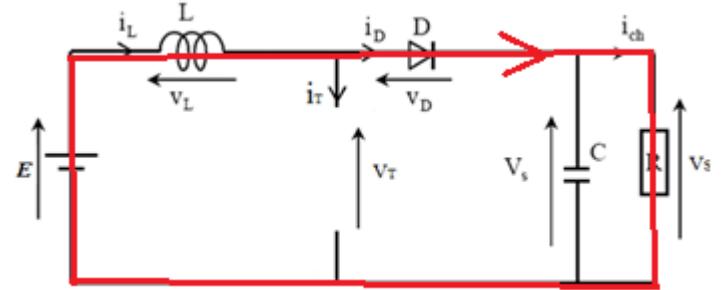
Lorsque T_r est bloqué et D passante : $[\alpha T, T]$

$$V_T = V_s, \quad V_L = E - V_s, \quad V_D = 0$$

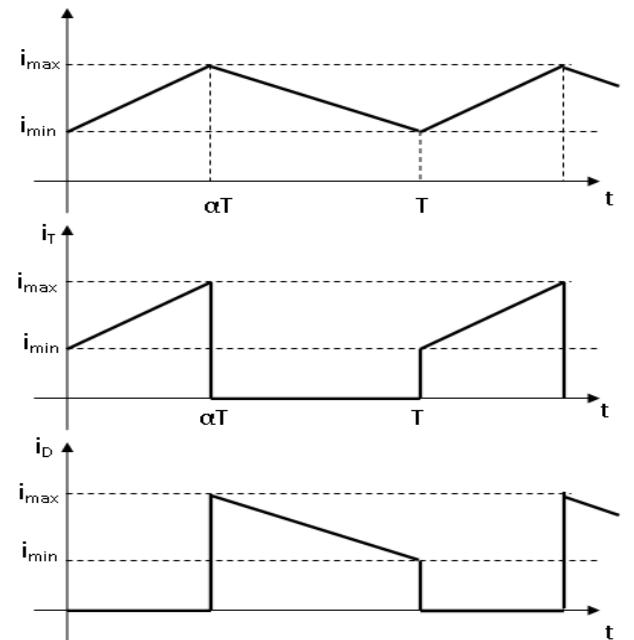
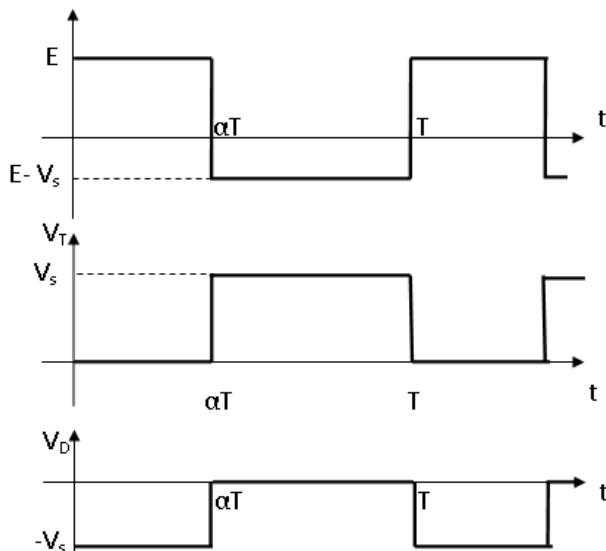
$$i_T = 0 \text{ et } i_D = i_L$$

$$\text{Aussi : } V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = E - V_s$$

$$i_L(t) = \frac{E - V_s}{L} t + cst$$



Les allures dans le cas d'une conduction continue (conduction ininterrompue) :



La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance étant nulle :

$$V_{Lmoy} = 0 \text{ donc } V_{Lmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = 0$$

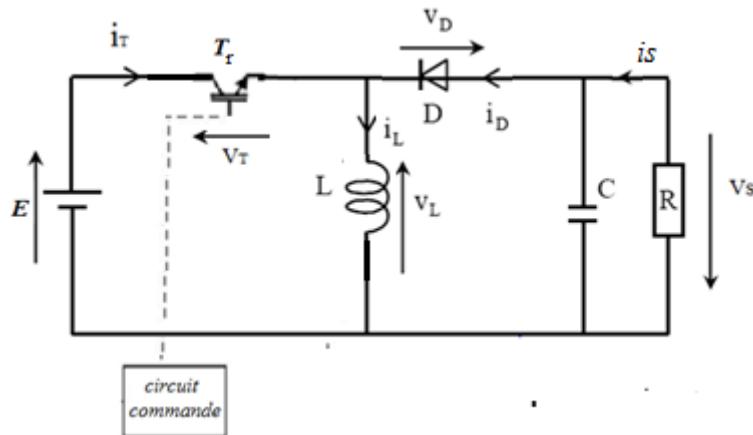
$$V_{Lmoy} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T (E - V_s) dt = 0$$

$$V_{Lmoy} = (\alpha E + (1 - \alpha)(E - V_s)) = 0$$

$$\text{Alors : } V_s = \frac{E}{1 - \alpha}$$

II.3 Hacheur série-parallèle ou à accumulateur inductive (buck boost) :

Appelé aussi hacheur à stockage, les interrupteur T_r et D sont complémentaire



Lorsque T_r est passant :

$$V_L(t) = E = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

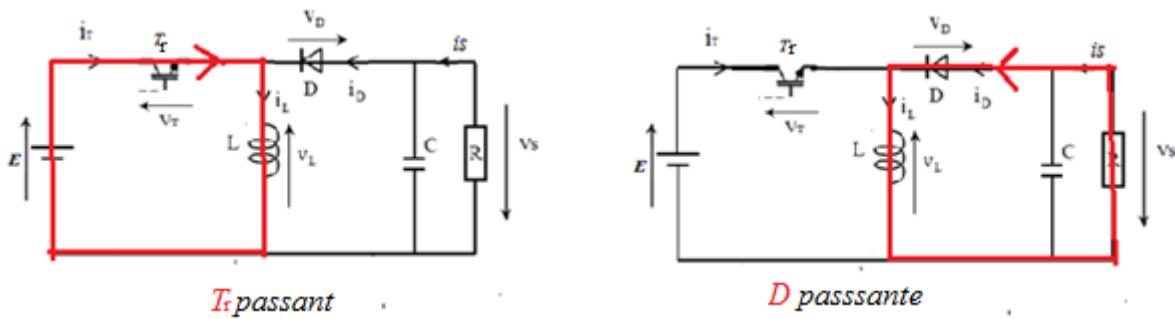
La dérivée est positive donc il y a stockage de l'énergie (énergie emmagasinée)

$$i_L(t) = \frac{E}{L} t + cst \quad (\text{courant croissant})$$

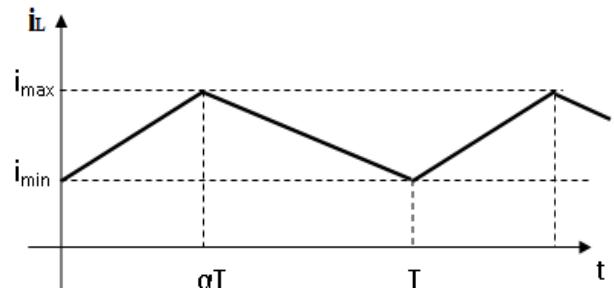
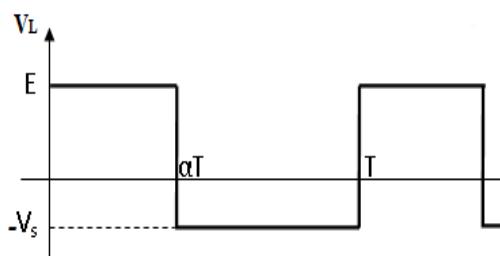
Lorsque la diode D est passante :

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_s$$

$$i_L(t) = \frac{-V_s}{L} t + cst \quad (\text{courant décroissant (démagnétisation)})$$



Les allures dans le cas d'une conduction continue (conduction ininterrompue) :



On sait que la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle

$$V_{Lmoy} = 0 \text{ donc } V_{Lmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = 0$$

$$V_{Lmoy} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T (-V_s) dt = 0$$

$$V_{Lmoy} = (\alpha E + (1 - \alpha) (-V_s)) = 0$$

Alors : $V_s = \frac{\alpha E}{1 - \alpha}$ et $I_s = \frac{\alpha E}{R(1 - \alpha)}$

Si $\alpha < 0.5$ donc $V_s < E$

Si $\alpha > 0.5$ donc $V_s > E$

Si $\alpha = 0.5$ donc $V_s = E$

L'alimentation avec hacheur à stockage inductif (buck-boost) permet donc de rendre la tension de sortie V_s inférieure ou supérieure à la tension d'entrée E .

Remarque :

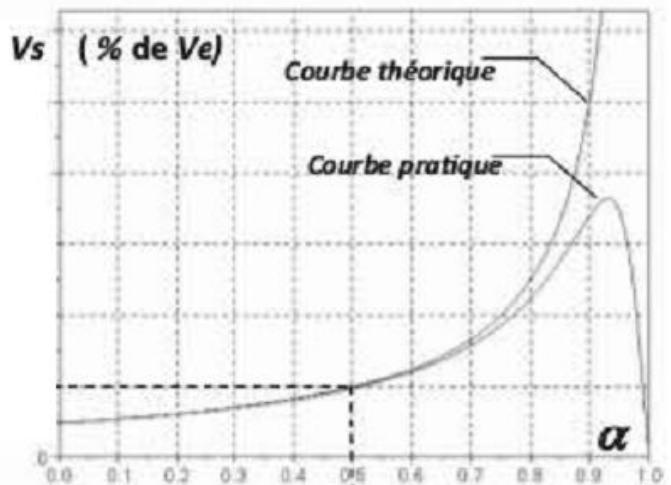
Les tension de sorties pour les hacheurs boost et Buck-Boost qui sont respectivement $V_s = \frac{E}{1 - \alpha}$ et $V_s = \frac{\alpha E}{1 - \alpha}$ tendent vers l'infinie pour $\alpha = 1$, ce qui donne une limite de formule entrée-sortie de ces hacheurs.

En effet pour les grande valeur de α , on néglige pas la résistance r_L série réellement existante dans la bobine, ce qui conduit à ne pas considérer la valeur moyenne la bobine nulle ($V_{Lmoy} = 0 + r_L i_{Lmoy}$).

En pratique les hacheurs de type boost et Buck-Boost sont généralement commandés avec un α qui dépasse pas 0.8.

Si on prend en considération la résistance r_L de la bobine, la tension de sortie s'exprime :

$$V_s = \frac{(1 - \alpha) E}{(1 - \alpha)^2 + \frac{r_L}{R}}$$



III. Hacheur réversible en courant:

Les hacheurs réversibles en courant ou « hacheur à deux quadrants » sont des structures qui présentent une réversibilité en courant uniquement (et irréversible en tension) c'est-à-dire qui permettent une inversion du courant de sortie et par conséquent une inversion du transfert de puissance.

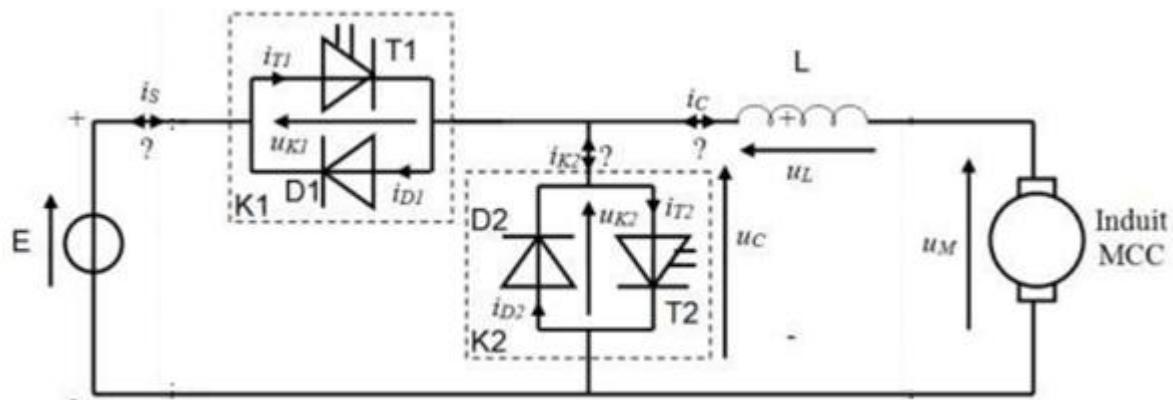
On doit posséder donc des interrupteurs permettant une réversibilité en courant

Exemple : Si la charge est un moteur à courant continu, le hacheur assure un fonctionnement moteur avec freinage (courant de sortie réversible $I_s > 0$ ou $I_s < 0$ et tension de sortie irréversible $V_s > 0$).

Remarque :

- Une source est réversible en tension si la tension à ses bornes peut changer de signe.
- Une source est réversible en courant si le courant qui la traverse peut s'inverser.

On considère le schéma d'un hacheur réversible en courant alimentant une MCC :



La bobine L est utilisée pour lisser le courant.

Les interrupteurs K_1 et K_2 sont complémentaires

L'interrupteur K_1 est commandé de 0 à αT et K_2 est commandé de αT à T .

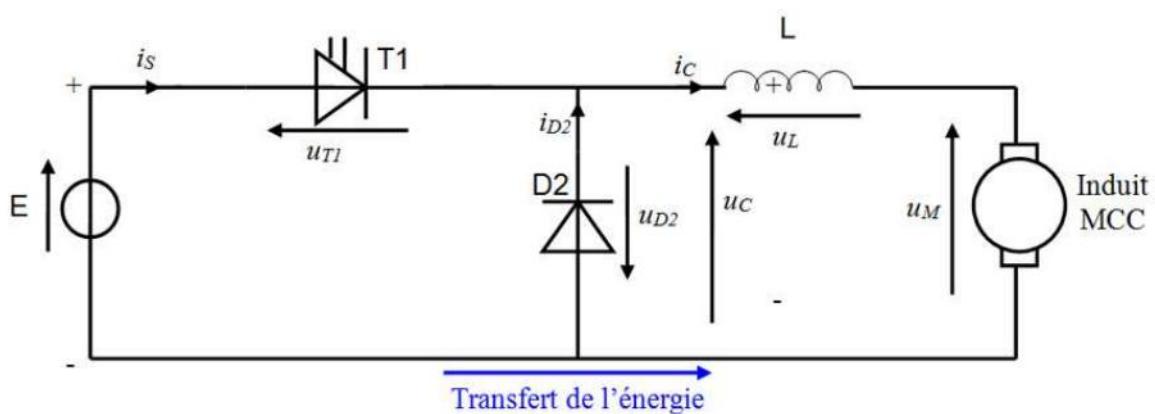
Il se trouve que :

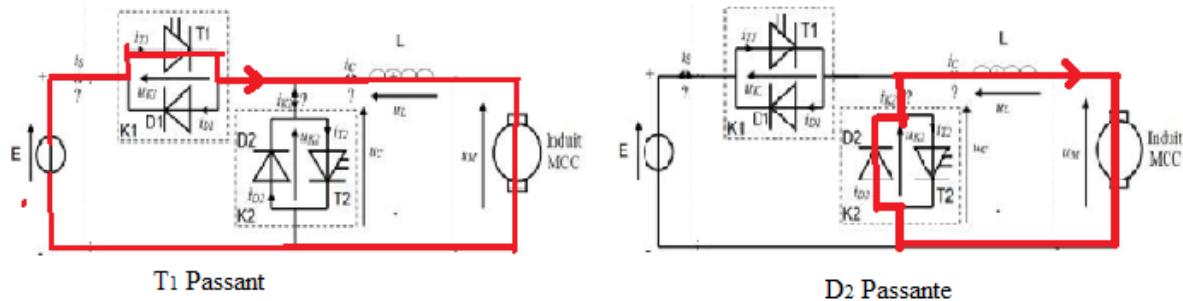
- Pour $0 < t < \alpha T$: T_1 est passant T_2 est bloqué
- Pour $\alpha T < t < T$: T_1 est bloqué T_2 est passant

Deux cas à considérer :

1er cas : le transfert de l'énergie s'effectue de la source vers la charge.
Fonctionnement moteur.

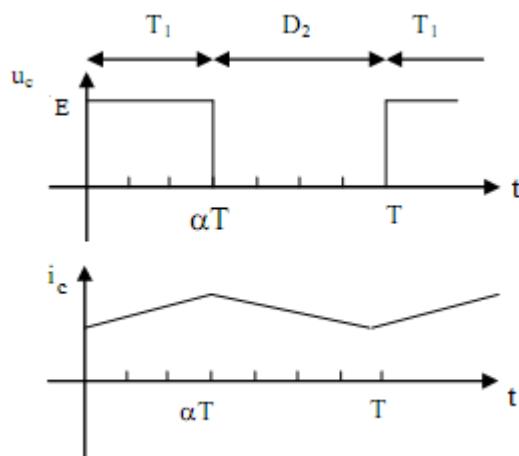
La conduction du courant est assurée par les interrupteurs T_1 et D_2 . Le montage fonctionne alors selon le schéma suivant





L'énergie va de la source de tension vers le moteur

On a alors les allures sur une période :



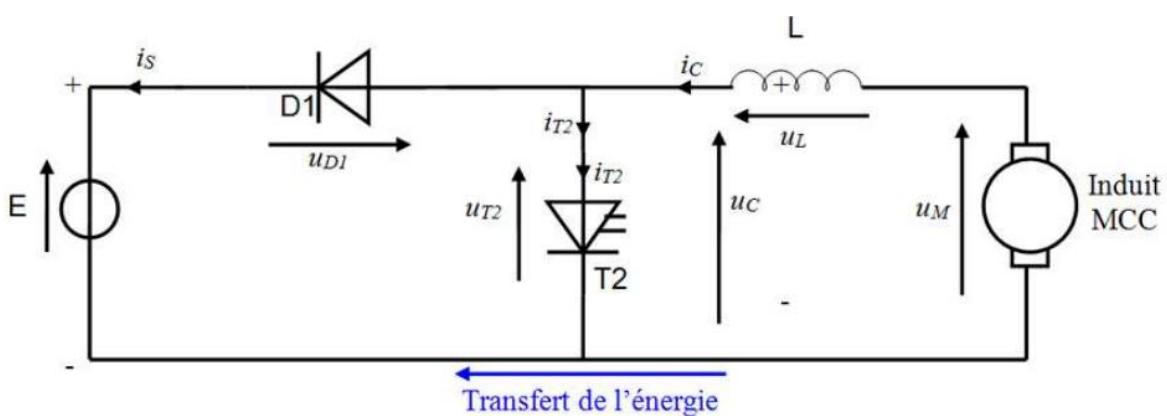
La valeur moyenne de U_C est $U_{cmoy} = \alpha E$

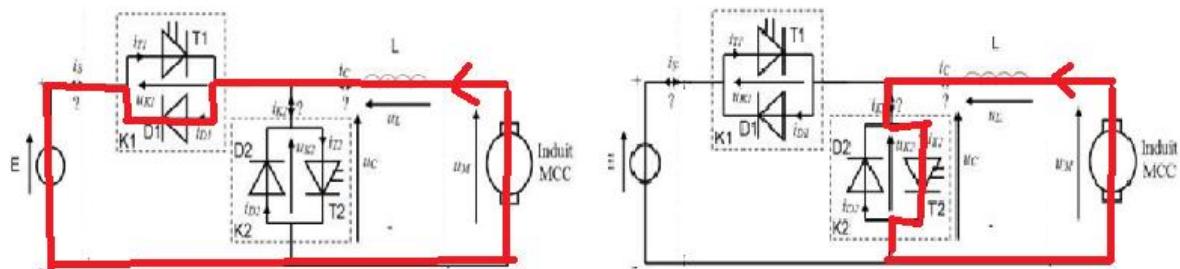
On a donc le courant **$i_C > 0$ et $u_C > 0$** : fonctionnement dans **le quadrant 1**

L'énergie va de la source de tension vers le récepteur de tension

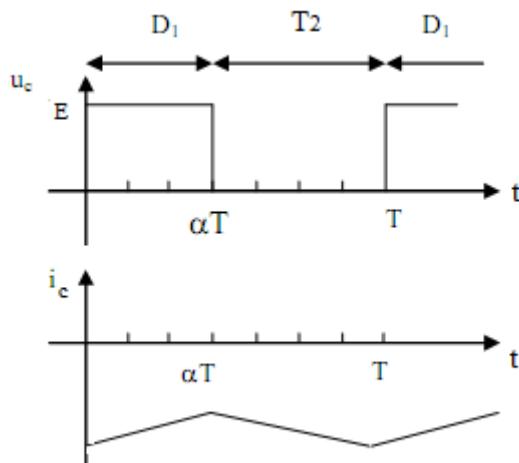
2ème cas : le transfert de l'énergie s'effectue de la charge vers la source. Fonctionnement génératrice.

La conduction du courant est assurée par les interrupteurs D1 et T2. Le montage fonctionne alors selon le schéma suivant :





On a alors les allures sur une période :



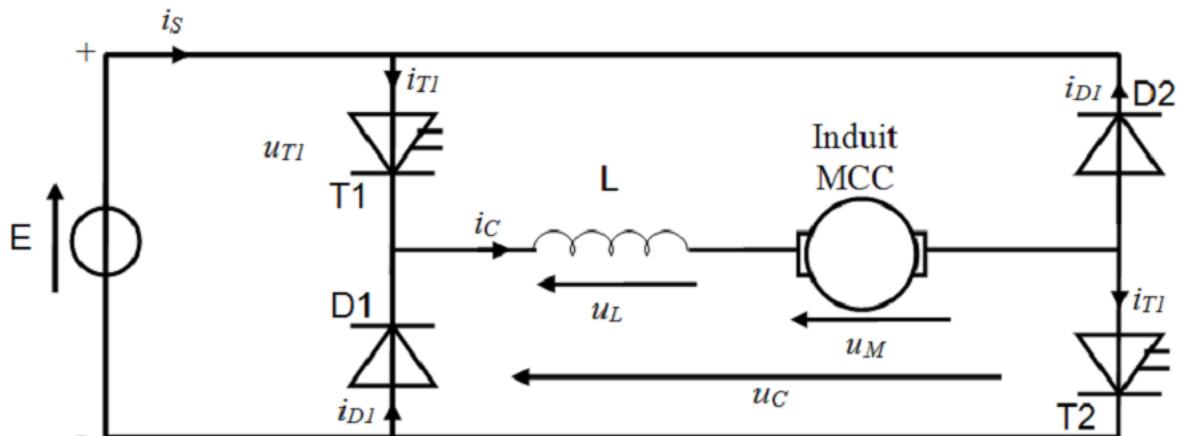
On a donc le courant $i_C < 0$ et $u_C > 0$: fonctionnement dans **le quadrant 2**
L'énergie va de la machine vers la source de tension

VI. Hacheur réversible en tension :

Les hacheurs réversibles en tension ou « hacheur à deux quadrants » aussi sont des structures qui présentent une réversibilité en tension uniquement (et irréversible en courant) c'est-à-dire qui permettent une inversion de la tension de sortie (de charge).

Exemple : Si la charge est un moteur à courant continu, le hacheur assure **deux sens de rotation** (courant de sortie irréversible $I_s > 0$ et tension de sortie réversible $V_s > 0$ ou $V_s < 0$).

On considère le schéma d'un hacheur réversible en tension alimentant une MCC :

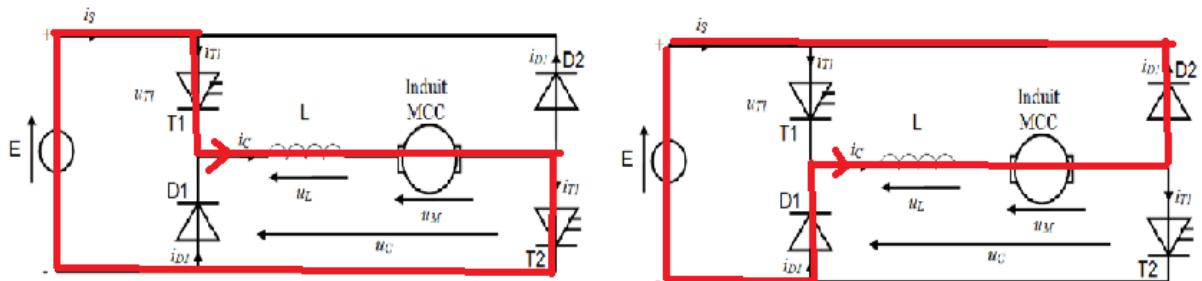


➤ Pour $0 < t < \alpha T$: **T₁, T₂ sont passants et D₁, D₂ sont bloquées**

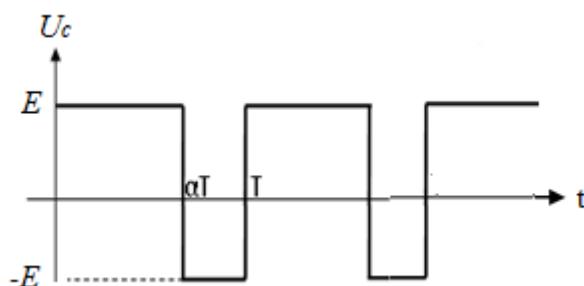
$$U_c = E$$

➤ Pour $\alpha T < t < T$: **T₁, T₂ sont bloqués et D₁, D₂ sont passantes**

$$U_c = -E$$



On obtient l'allure de U_c :



La valeur moyenne de U_c :

$$\begin{aligned} U_{cmoy} &= \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T (-E) dt \\ &= (\alpha E + (1 - \alpha)(-E)) \end{aligned}$$

$$U_{cmoy} = (2\alpha - 1) E$$

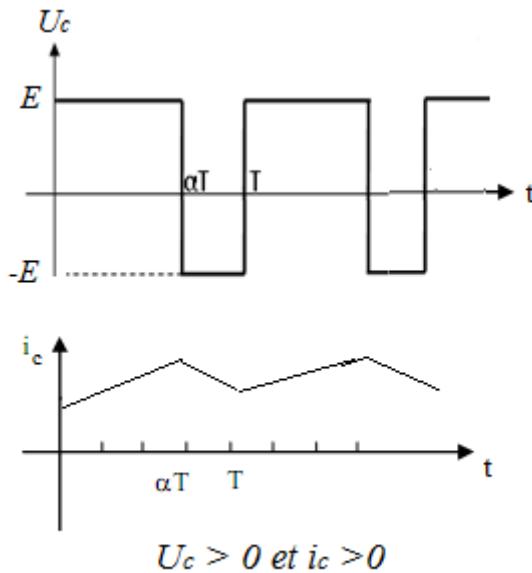
- Cas où $\alpha > 0,5$:

La tension moyenne de sortie est positive et le transfert d'énergie s'effectue de la source vers la charge (la machine à courant continu fonctionne en moteur).

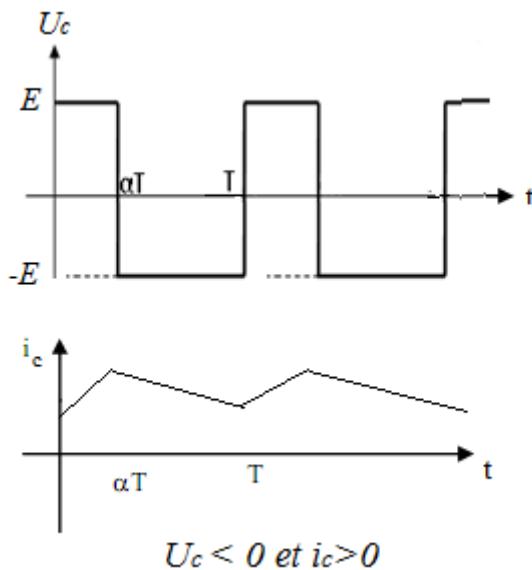
- Cas où $\alpha < 0,5$:

La tension moyenne de sortie est négative et le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source (la machine à courant continu fonctionne en génératrice).

Si $\alpha > 0,5$ (quadrant 1) en moteur



Si $\alpha < 0,5$ (quadrant 4) en freinage

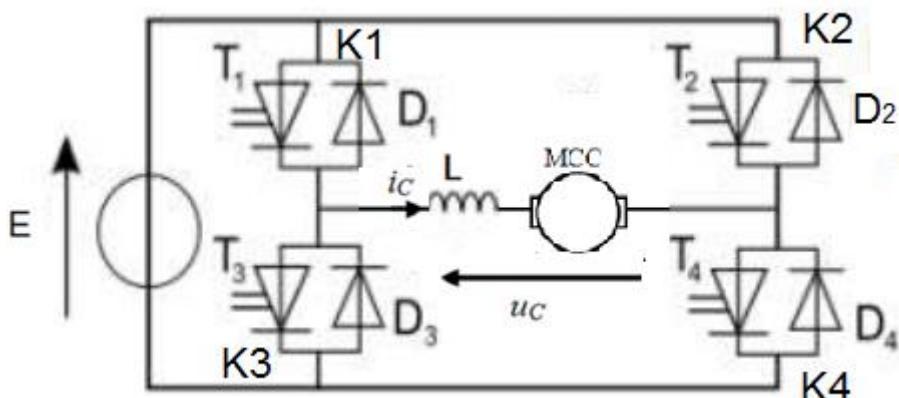


V. Hacheur réversible en courant et en tension :

Ce type de hacheur ou « hacheur à quatre quadrants » sont des structures complètement réversibles, aussi bien en courant et en tension, et ainsi donc en puissance.

Exemple : Si le convertisseur permet de fournir à un moteur à courant continu une tension positive ou négative et un courant positif ou négatif, il pourra alimenter cette machine dans les *deux sens de rotation* tout en *l'accélérant ou le freinant*. Le transfert de puissance *électromécanique sera ainsi totalement réversible*.

On considère le montage en pont « H » suivant :



Ce montage est constitué d'une source de tension continue E réversible en courant, d'une machine à courant continu (MCC) et son inductance de lissage L et de 4 interrupteurs électroniques $K1$, $K2$, $K3$, $K4$, chacun est constitué d'un transistor avec une diode montée en antiparallèle.

$K1$ et $K3$ sont complémentaires ainsi que $K2$ et $K4$.

➤ Pour $0 < t < \alpha T$: $K1$ et $K4$ sont passants

$$U_c = E$$

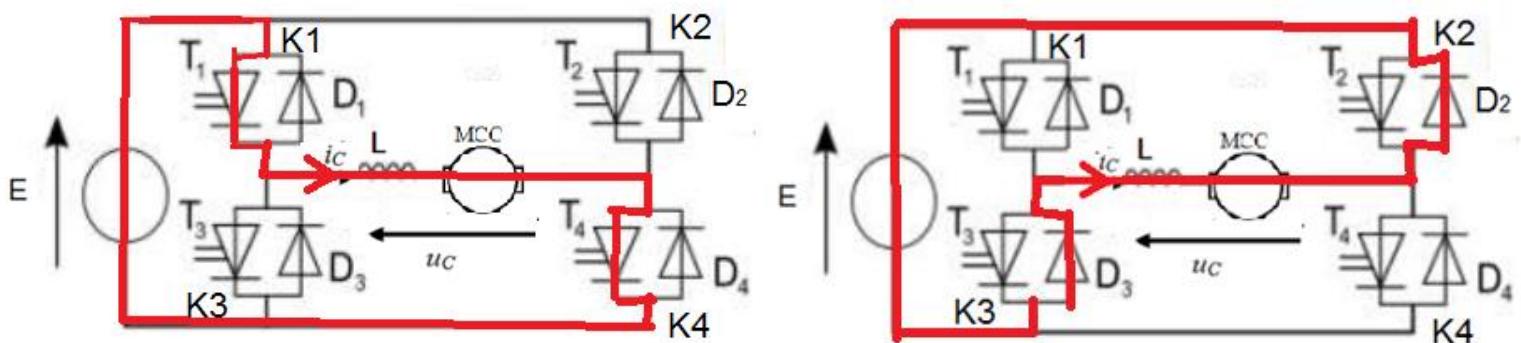
➤ Pour $\alpha T < t < T$: $K2$ est bloqué $K3$ est passant

$$U_c = -E$$

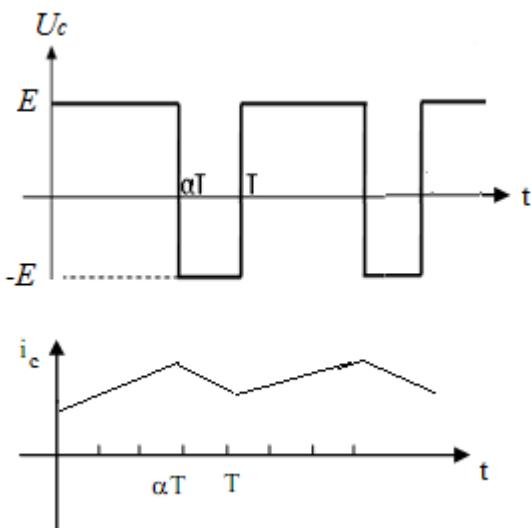
La valeur moyenne de U_c :

$$\begin{aligned}
 U_{cmoy} &= \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E \, dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T (-E) \, dt \\
 &= (\alpha E + (1 - \alpha) (-E)) \\
 U_{cmoy} &= (2\alpha - 1) E
 \end{aligned}$$

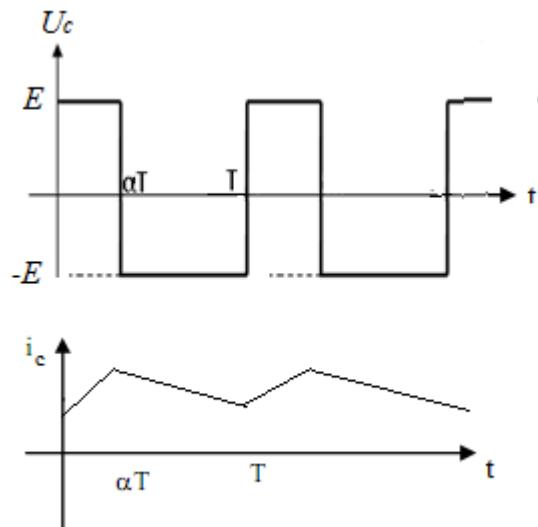
➤ Lorsque le courant i_c est positive $i_c > 0$:



- La machine fonctionne en moteur si $U_{cmoy} > 0$ ($\alpha > 0.5$)

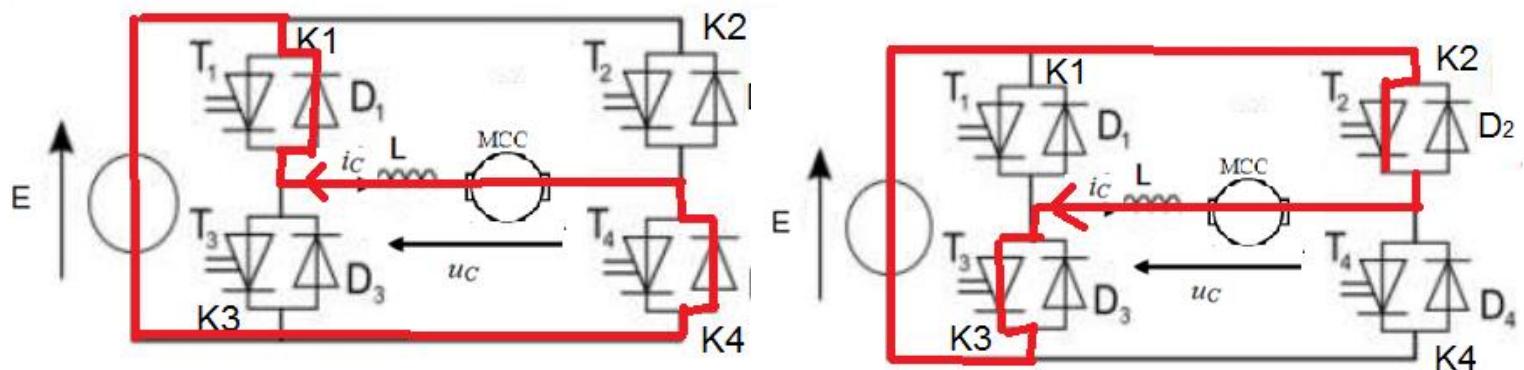


- La machine fonctionne en génératrice si $U_{cmoy} < 0$ ($\alpha < 0.5$)

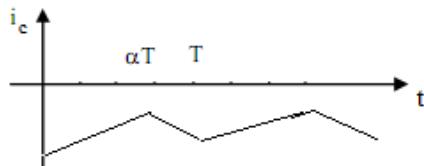
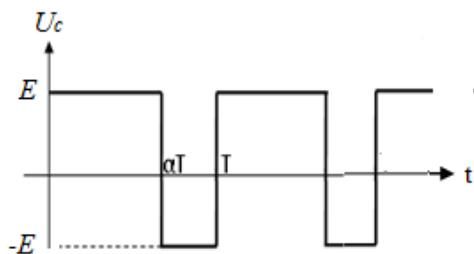


➤ **Lorsque le courant i_c est négatif $i_c < 0$:**

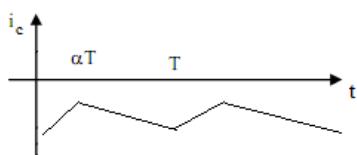
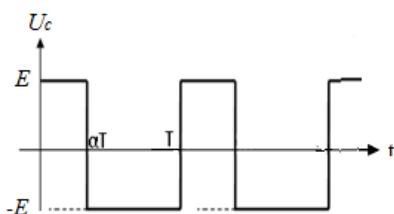
➤



- La machine fonctionne en génératrice si $U_{cmoy} > 0$ ($\alpha > 0.5$)



- La machine fonctionne en moteur si $U_{cmoy} \leq 0$ ($\alpha < 0.5$)



Il existe plusieurs techniques de commande d'un pont complet en H.

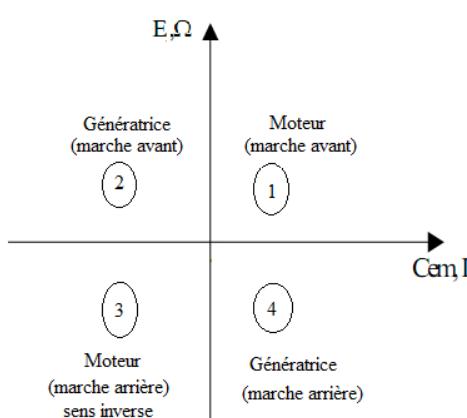
Ce montage assure un fonctionnement dans les 4 quadrants :

Quadrant 1 : la machine tourne en marche avant et fonctionne en moteur.

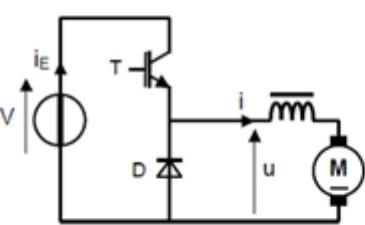
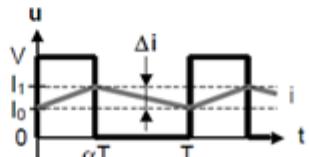
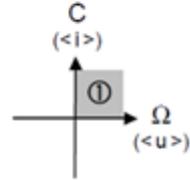
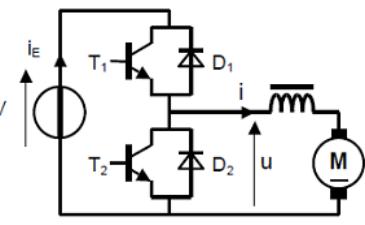
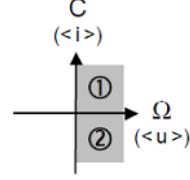
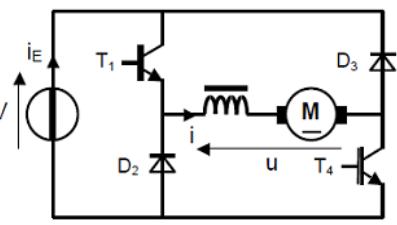
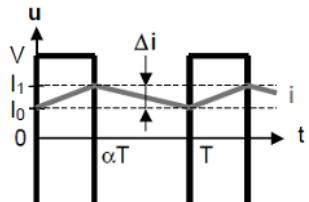
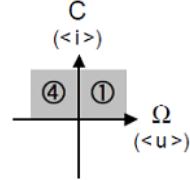
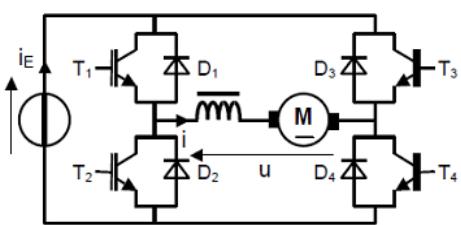
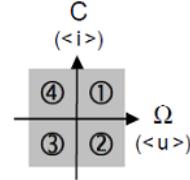
Quadrant 2 : la machine tourne en marche avant et fonctionne en génératrice.

Quadrant 3 : la machine tourne en marche arrière et fonctionne en moteur.

Quadrant 4 : la machine tourne en marche arrière et fonctionne en génératrice.



Récapitulation d'alimentation des moteurs à courant continu

	Structure	Formes d'ondes Relations fondamentales	Quadrants de fonctionnement
Hacheur série	 <p>$[0; \alpha T]$: T passant - D bloquée $[\alpha T; T]$: T bloqué - D passante</p>	 <p>Pour le hacheur série :</p> $i > 0$	 <p>1 sens de rotation sans freinage (par récupération d'énergie)</p>
Hacheur réversible en courant	 <p>Commande complémentaire des IGBTs</p>	<p>Pour le hacheur réversible en courant :</p> $i > 0 \text{ ou } i < 0$ <p>Dans les deux cas :</p> $\langle u \rangle = \alpha \cdot V$ $\Delta i = \frac{\alpha (1 - \alpha) \cdot V \cdot T}{L}$	 <p>1 sens de rotation avec freinage</p>
Hacheur réversible en tension	 <p>$[0; \alpha T]$: T₁, T₄ passants - D₂, D₃ bloquées $[\alpha T; T]$: T₁, T₄ bloqués - D₂, D₃ passantes</p>	 <p>Pour le hacheur réversible en tension :</p> $i > 0$	 <p>2 sens de rotation avec freinage à "vitesse constante" dans un sens (descente d'un treuil)</p>
Hacheur réversible en courant et en tension	 <p>Commande complémentaire des IGBTs</p>	<p>Pour le hacheur réversible en courant et en tension :</p> $i > 0 \text{ ou } i < 0$ <p>Dans les deux cas :</p> $\langle u \rangle = (2\alpha - 1) \cdot V$ $\Delta i = \frac{2\alpha (1 - \alpha) \cdot V \cdot T}{L}$	 <p>2 sens de rotation avec freinage</p>