

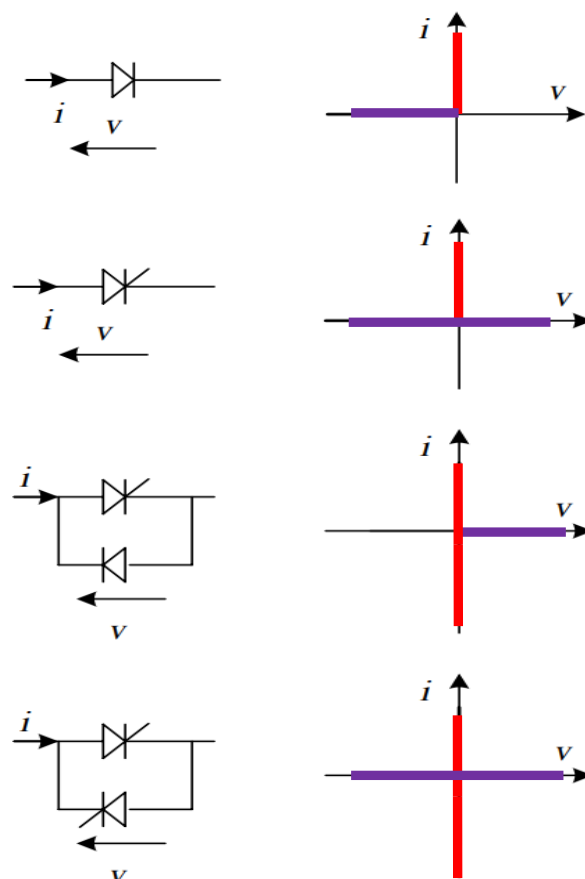
Chapitre 7LES CONVERTISSEURS DC/DC : LES HACHEURS**7-1 objectifs**

Étudier le fonctionnement et les caractéristiques d'un montage hacheur DC/DC sur des charges résistives et inductives.

**7-2-Introduction**

Les convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée... On distingue deux types de convertisseurs continu-continu. Ceux qui sont non isolés, que l'on appellera hacheurs, et ceux qui comportent un transformateur assurant l'isolation galvanique, que l'on appelle alimentations à découpage (cas des alimentations de PC...). Par la suite, nous n'étudierons que les premiers.

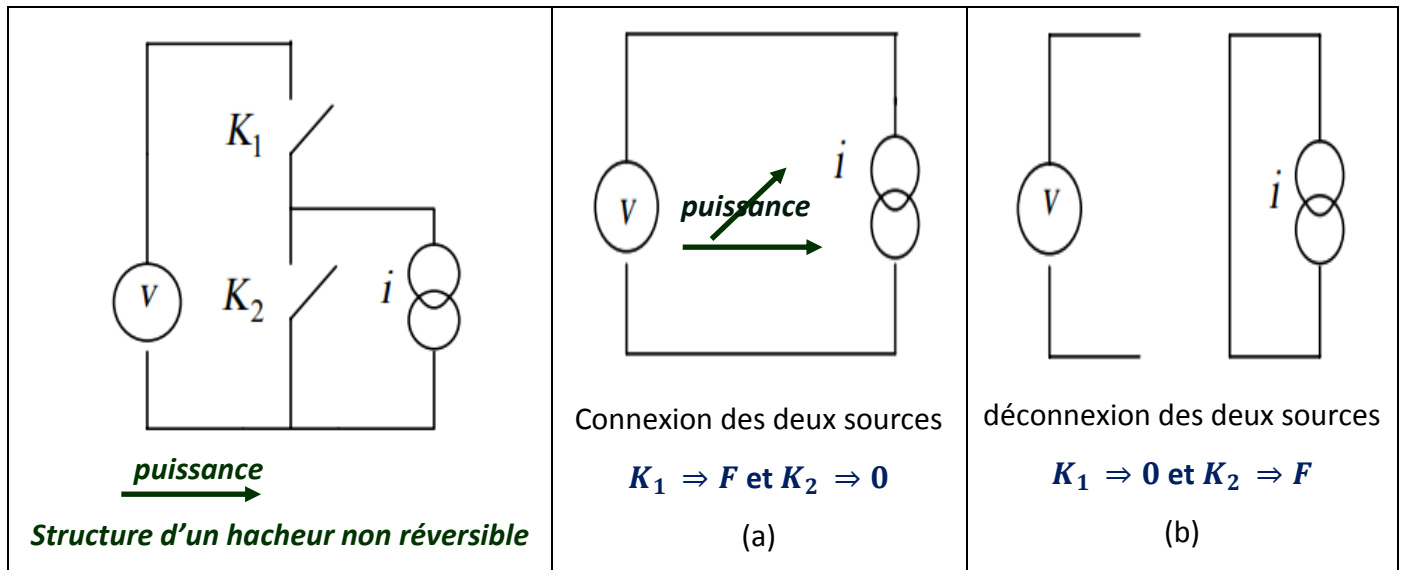
La structure des convertisseurs est basée sur la liaison d'une source de tension et une source de courant par des interrupteurs électroniques.

**7-3 Les interrupteurs**

**Caractéristiques idéales des interrupteurs.**

#### 7-4 structure:

La structure d'un hacheur dépend du sens de transfert de l'énergie. A titre d'exemple considérons les configuration **(a)** et **(b)**. Les deux sources sont directement liées **(a)** ou isolées **(b)**. On suppose que la puissance est transférée de la source de tension vers la source de courant. Dans cette situation  $K_1$  est un interrupteur commandable alors que  $K_2$  est une diode.



#### 7-5 Etude de quelques structures de hacheurs non réversibles

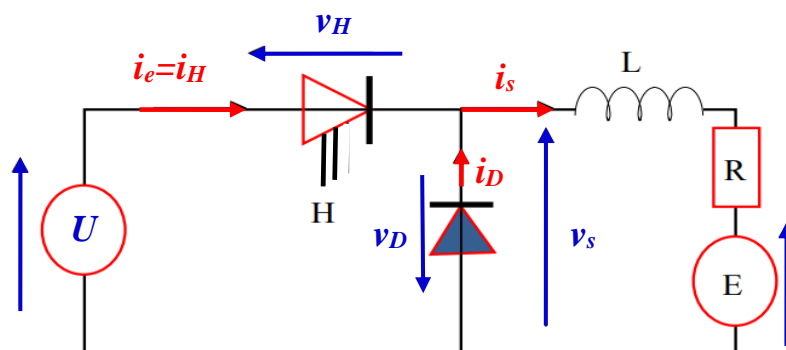
Nous allons nous intéresser, dans un premier temps aux structures les plus simples des hacheurs. Il s'agit de celles qui n'assurent pas la réversibilité, ni en tension, ni en courant. L'énergie ne peut donc aller que de la source vers la charge.

#### 7-6 Etude du fonctionnement en conduction continue

##### 7-6-1. Hacheur dévolteur (ou série)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (diode).

##### a- Montage



**Hacheur dévolteur (ou série).**

##### b-Analyse du fonctionnement :

◆  $0 \leq t \leq \alpha T$  : H est fermé

$v_H = 0$	$v_D = -U$	$i_e = i_H = i_s$	$v_s = U$
-----------	------------	-------------------	-----------

L'intensité du courant dans la charge  $i_s$  vérifier l'équation suivante :

$$L \cdot \frac{di_s}{dt} + R \cdot i_s + E = v_s = U \quad (1)$$

**Remarque** : en général les résistances de l'induit et l'inductance sont très faibles, donc on suppose que la chute de tension  $R \cdot i_s$  est nulle.

l'équation (1) devient :

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{U - E}{L} \Rightarrow \int_0^t di_s = \int_0^t \frac{U - E}{L} dt$$

$$i_s = \frac{U - E}{L} t + I_{min}$$

Calcul de  $I_{max}$ :

$$I_{max} = \frac{U - E}{L} \alpha T + I_{min}$$

#### ◆ $\alpha T \leq t \leq T$ : H est ouvert

Le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode de roue libre. Donc la diode assure la continuité du courant dans la charge.

$v_H = U$	$v_D = 0$	$i_e = i_H = 0$	$v_s = 0$
-----------	-----------	-----------------	-----------

L'intensité du courant dans la charge  $i_s$  vérifier l'équation suivante :

$$L \cdot \frac{di_s}{dt} + R \cdot i_s + E = 0 \quad (2)$$

l'équation (2) devient :

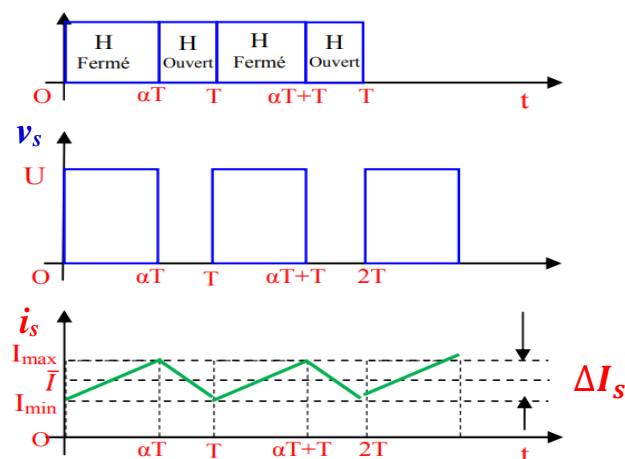
$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{E}{L} \Rightarrow \int_{\alpha T}^t di_s = \int_{\alpha T}^t -\frac{E}{L} dt$$

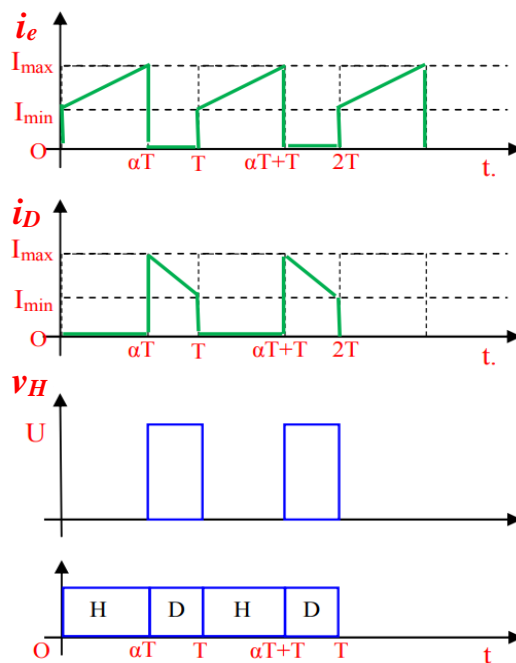
$$i_s = -\frac{E}{L} (t - \alpha T) + I_{max}$$

Calcul de  $I_{min}$ :

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

#### c- Formes d'ondes:

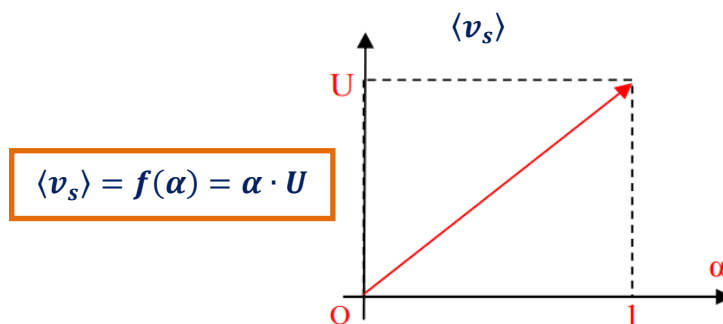




**d-Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :**

$$\langle v_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt = \alpha \cdot U$$

La valeur moyenne de la tension  $\langle v_s \rangle$  peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique  $\alpha$  quant on fait varier  $\alpha$  de 0 à 1,  $\langle v_s \rangle$  varie linéairement de 0 à  $U$ .



**Conclusion :**

Quelle que soit la nature de la charge, on aura  $\langle v_s \rangle = 0 \leq \alpha \cdot U \leq U$ . Le hacheur série est bien abaisseur de tension (hacheur dévolteur)

**Commentaires :**

La tension de sortie du hacheur n'est pas continue mais toujours positive. Lorsque la période est assez faible (fréquence de 100 à 1000 Hz) la charge ne « voit » pas les créneaux mais la valeur moyenne de la tension.

**e-Valeur moyenne du courant :**

$$\left\langle L \cdot \frac{di_s}{dt} \right\rangle + R \cdot \langle i_s \rangle + E = \langle v_s \rangle = \alpha \cdot U$$

$$\left\langle L \cdot \frac{di_s}{dt} \right\rangle = 0$$

$$\langle i_s \rangle = \frac{\alpha \cdot U - E}{R} = \frac{I_{min} + I_{max}}{2}$$

On peut déduire les valeurs moyennes des courants  $\langle i_H \rangle$  et  $\langle i_D \rangle$  en fonction de  $\langle i_s \rangle$ .

Intensité moyenne dans le Hacheur :  $\langle i_H \rangle = \alpha \cdot \langle i_s \rangle$

Intensité moyenne dans la diode :  $\langle i_D \rangle = (1 - \alpha) \cdot \langle i_s \rangle$

### **f-Ondulation du courant dans la charge :**

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta I_s = I_{max} - I_{min} = \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot U}{L \cdot f}$$

L'ondulation  $\Delta I_s$  est maximale pour

$$\frac{d\Delta I_s}{d\alpha} = 0 \Rightarrow \alpha = 0.5$$

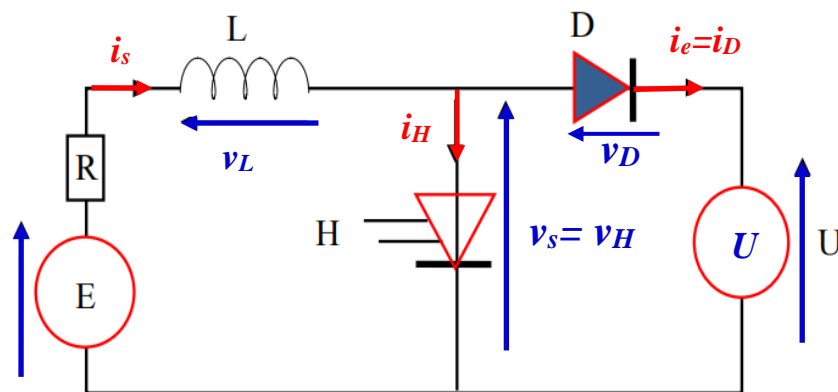
$$\Delta I_{smax} = \frac{U}{4 \cdot L \cdot f}$$

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

### **7-6-2 Hacheur parallèle (BOOST) :**

Ce montage permet de produire une tension moyenne  $U$  à partir d'une source de tension continue  $E$

#### **a- Montage**



*Hacheur survolteur (ou parallèle).*

#### **b-Analyse du fonctionnement :**

**Remarque :** en supposant la résistance  $R$  est négligeable.

◆  $0 \leq t \leq \alpha T$  : H est fermé

$i_H = i_s$	$v_D = -U$	$i_e = 0$	$v_H = v_s = 0$
-------------	------------	-----------	-----------------

L'intensité du courant dans la charge  $i_s$  vérifier l'équation suivante :

$$-L \cdot \frac{di_s}{dt} - R \cdot i_s + E = 0$$

$$i_s = \frac{E}{L} t + I_{min}$$

◆  $\alpha T \leq t \leq T$  : H est ouvert. L'inductance  $L$  se démagnétise et le courant  $i_s$  décroît :

Le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode de roue libre. Donc la diode assure la continuité du courant dans la charge.

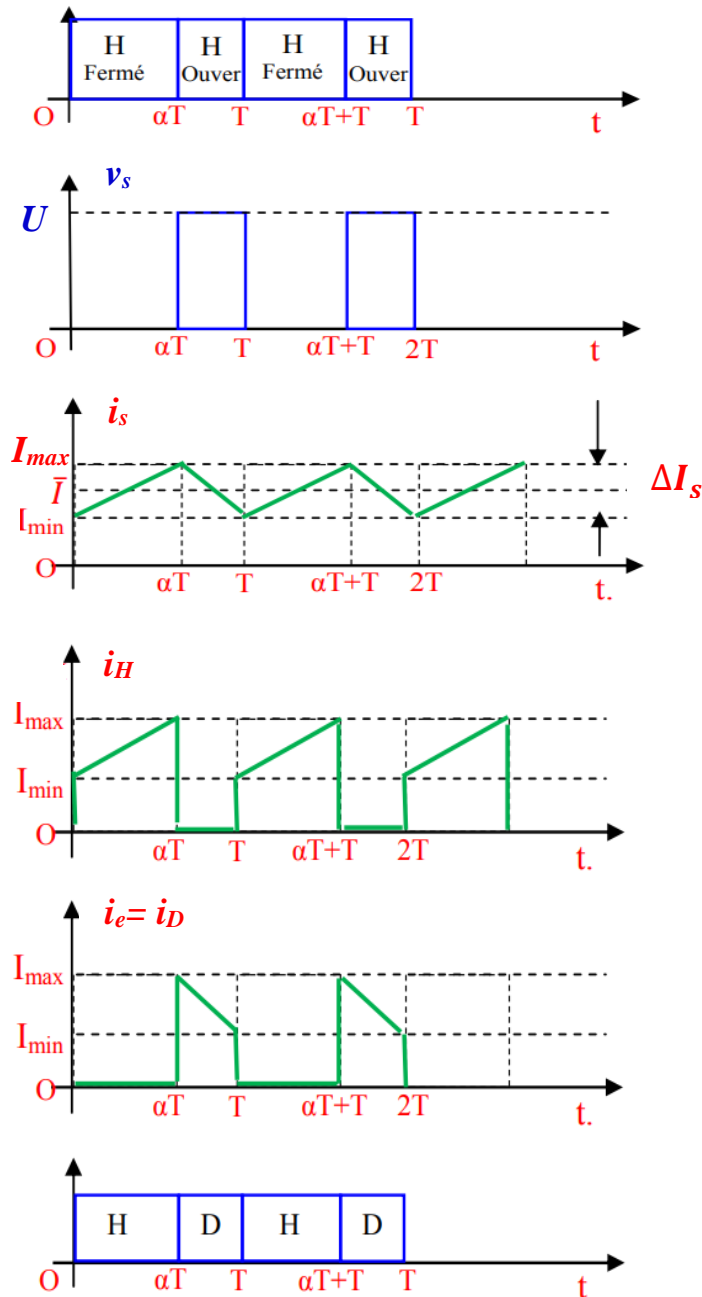
$v_D = 0$	$i_H = 0$	$i_e = i_D = i_s$	$v_H = v_s = U$
-----------	-----------	-------------------	-----------------

L'intensité du courant dans la charge  $i_s$  vérifier l'équation suivante :

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{E - U}{L}$$

$$i_s = \frac{E - U}{L} (t - \alpha T) + I_{max}$$

**c- Formes d'ondes:**



**c-Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :**

$$- \langle L \cdot \frac{di_s}{dt} \rangle + E = \langle v_s \rangle = E$$

$$\langle v_s \rangle = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T U dt = (1 - \alpha) \cdot U$$

on remplace  $\langle v_s \rangle = E \Rightarrow U = \frac{E}{(1 - \alpha)}$

Comme  $0 \leq \alpha \leq 1$  Le hacheur parallèle est élévateur de tension.

Le réglage de  $\alpha$  permet de faire varier la tension disponible aux bornes de la charge  $U$  :

### d-Ondulation du courant dans la charge :

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta I_s = I_{\max} - I_{\min} = \frac{\alpha \cdot E}{L \cdot f} = \frac{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot U}{L \cdot f}$$

On donne les séquences de conduction de H et D dans le chronogramme suivant :

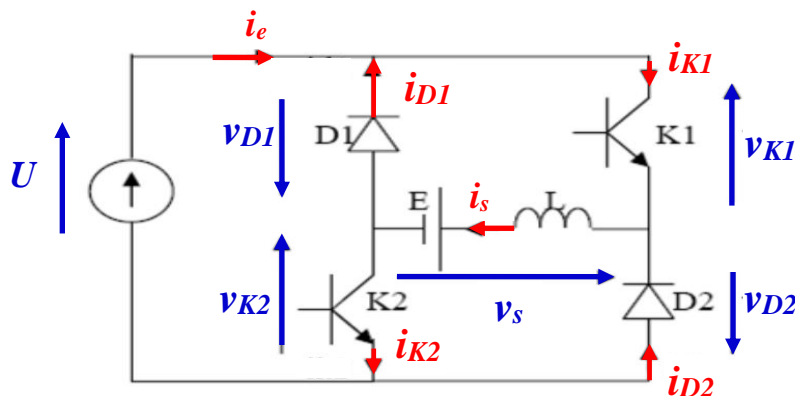
### Intérêt du hacheur parallèle :

Si on considère un moteur à courant continu entraînant une charge lourde (train par exemple) .lors d'une phase de freinage il est intéressant de récupérer l'énergie mécanique en le transformant en énergie électrique. La machine fonctionne en génératrice mais sa f.e.m décroît car sa vitesse diminue est inférieure à la tension du réseau qui alimente le moteur .Pour assurer le transfert d'énergie vers le réseau, il faut un hacheur survolteur.

## 7-7 Etude de quelques structures de hacheurs réversibles

**7-7-1 Hacheur à deux quadrants :** Les interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.  $K1$  et  $K2$  sont commandés simultanément avec le même état à la période  $T$ .

### a- Montage



**Hacheur à deux quadrants.**

### b-Analyse du fonctionnement :

- ◆  $0 \leq t \leq \alpha T$  :  $K1$  et  $K2$  sont fermés. (Transfert de l'énergie vers la charge)

$v_{D1} = v_{D2} = -U$	$v_{K1} = v_{K2} = 0$	$i_e = i_{K1} = i_{K2} = i_s$	$i_{D2} = i_{D1} = 0$	$v_s = U$
------------------------	-----------------------	-------------------------------	-----------------------	-----------

L'intensité du courant dans la charge  $i_s$  vérifie l'équation suivante :

$$L \cdot \frac{di_s}{dt} + E = v_s = U$$

$$i_s = \frac{U - E}{L} t + I_{\min}$$

- ◆  $\alpha T \leq t \leq T$  :  $K1$  et  $K2$  sont ouverts (Récupération de l'énergie)

Le blocage de  $K1$  et  $K2$  impose la circulation du courant emmagasiné dans la bobine à travers les diodes. Comme  $i_s = I_{\max} \neq 0$  dans  $L$ , celui-ci ne peut varier spontanément. La seule solution à la continuité de  $i_s$  est  $i_{D1} = i_{D2} = i_s = -i_e = I_{\max}$

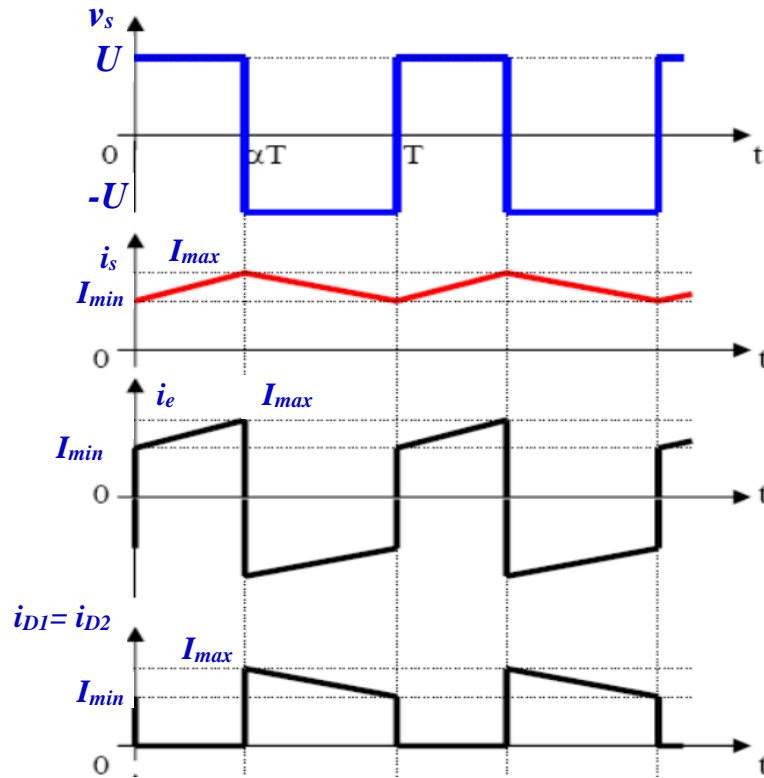
$v_{D1} = v_{D2} = 0$	$v_{K1} = v_{K2} = U$	$i_{D1} = i_{D2} = i_s = -i_e$	$i_{K2} = i_{K1} = 0$	$v_s = -U$
-----------------------	-----------------------	--------------------------------	-----------------------	------------

L'intensité du courant dans la charge  $i_s$  vérifier l'équation suivante :

$$L \cdot \frac{di_s}{dt} + E = -U$$

$$i_s = -\frac{U + E}{L}(t - \alpha T) + I_{max}$$

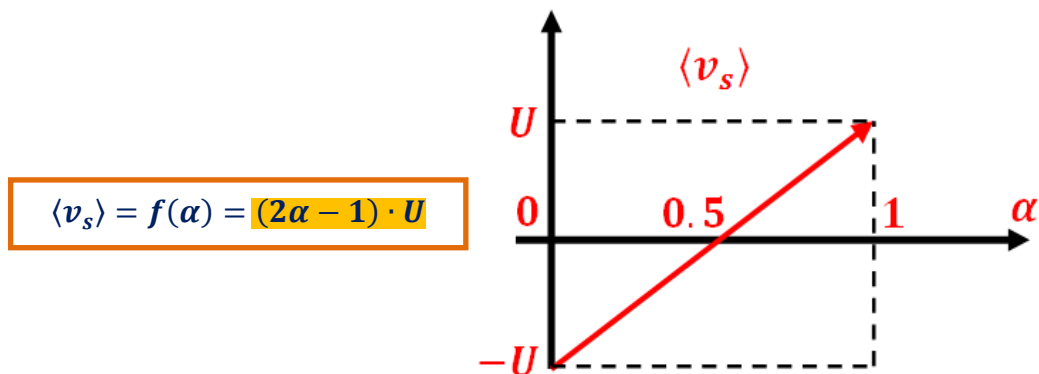
**c-Formes d'ondes en conduction continue :**



**d-Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :**

$$\langle v_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U dt = (2\alpha - 1) \cdot U$$

La valeur moyenne de la tension  $\langle v_s \rangle$  peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique  $\alpha$  quand on fait varier  $\alpha$  de **0** à **1**,  $\langle v_s \rangle$  varie linéairement de **-U** à **U**.



Le convertisseur est **réversible** deux quadrants car:  $i_s > 0, \langle v_s \rangle > 0$  ou  $\langle v_s \rangle < 0$

- $0.5 < \alpha \leq 1$ :  $\langle v_s \rangle > 0 \Rightarrow$  **Moteur**
- $0 \leq \alpha < 0.5$ :  $\langle v_s \rangle < 0 \Rightarrow$  **freinage**
- $\alpha = 0.5$ : **Arrêt**



**e-Valeur moyenne du courant :**

$$\langle i_s \rangle = \frac{(2\alpha - 1) \cdot U - E}{R}$$

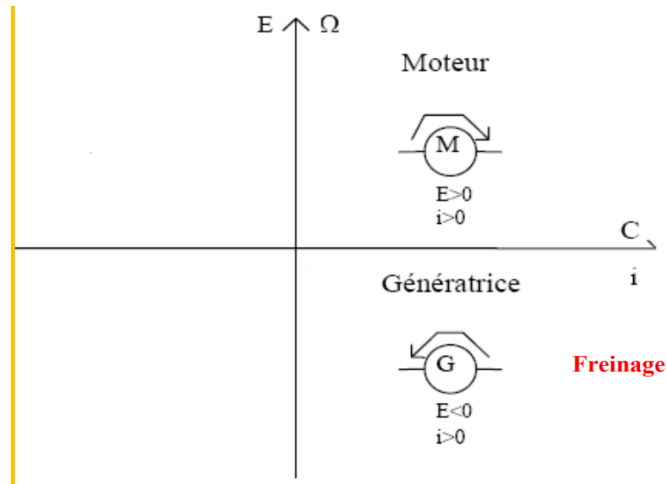
**f-Ondulation du courant dans la charge :**

Elle est donnée par la relation :

$$\Delta I_s = I_{max} - I_{min} = \frac{2\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot U}{L \cdot f}$$

**Remarque :**

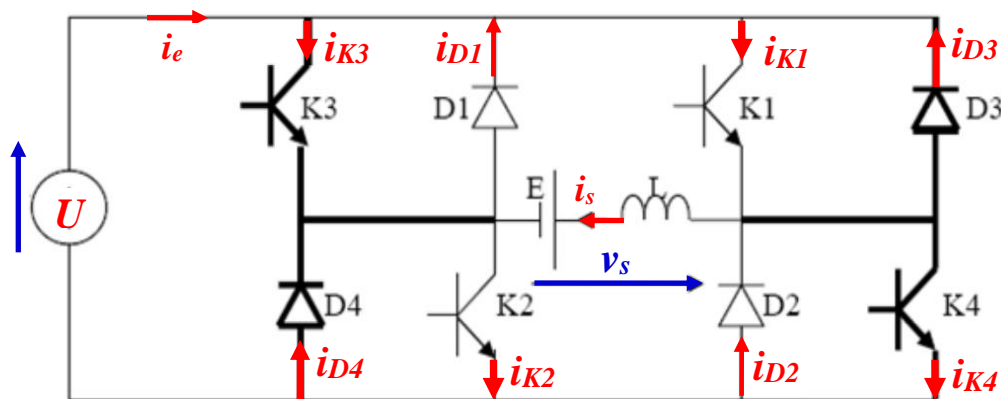
Variations de la tension de sortie deux fois plus grand, ce qui augmente l'ondulation du courant.



**7-7-2 Hacheur à quatre quadrants :**

Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tête bêche deux hacheurs réversibles deux quadrants ( $K1, K2, D1, D2$ ) et ( $K3, K4, D3, D4$ ). La tension peut être négative ou positive, le courant aussi.

**a-montage**



**Hacheur à deux quadrants.**

**b-Principe du fonctionnement :**

On dispose de 4 quadrants:

$\langle v_s \rangle > 0$  et  $\langle i_s \rangle > 0$ , Rotation dans le premier sens.

$\langle v_s \rangle < 0$  et  $\langle i_s \rangle > 0$ , Phase de freinage (récupération de l'énergie).

$\langle v_s \rangle < 0$  et  $\langle i_s \rangle < 0$ , Rotation dans le deuxième sens.

$\langle v_s \rangle > 0$  et  $\langle i_s \rangle < 0$ , Phase de freinage (récupération de l'énergie).

Stratégie de commande :

On procède ainsi : A chaque période  $T$  : On commande la fermeture de **K1** et **K2** pendant  $0 \leq t \leq \alpha T$ . Puis, On commande la fermeture de **K3** et **K4** pendant  $\alpha T \leq t \leq T$

Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$ ,

si  $\langle i_s \rangle > 0$ , il passe par **K1** et **K2** et  $v_s = U$  ;

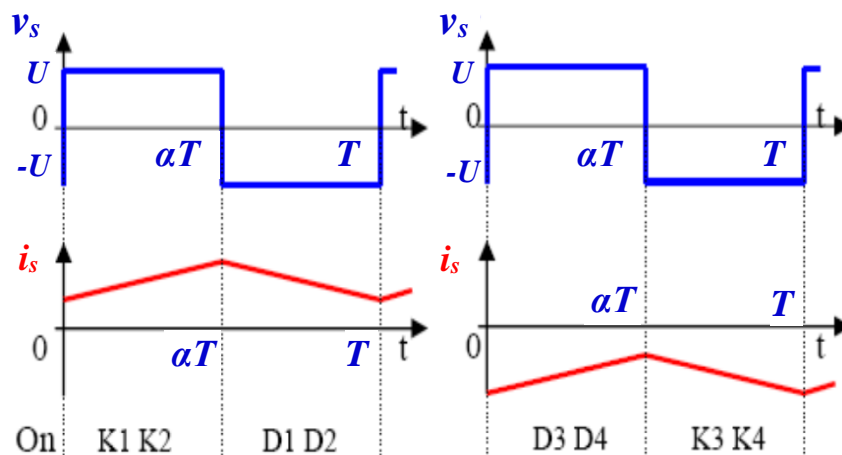
Si  $\langle i_s \rangle < 0$ , il passe par **D3** et **D4** et  $v_s = -U$ ;

Pour  $\alpha T \leq t \leq T$ ,

si  $\langle i_s \rangle > 0$ , il passe par **D1** et **D2** et  $v_s = -U$  ;

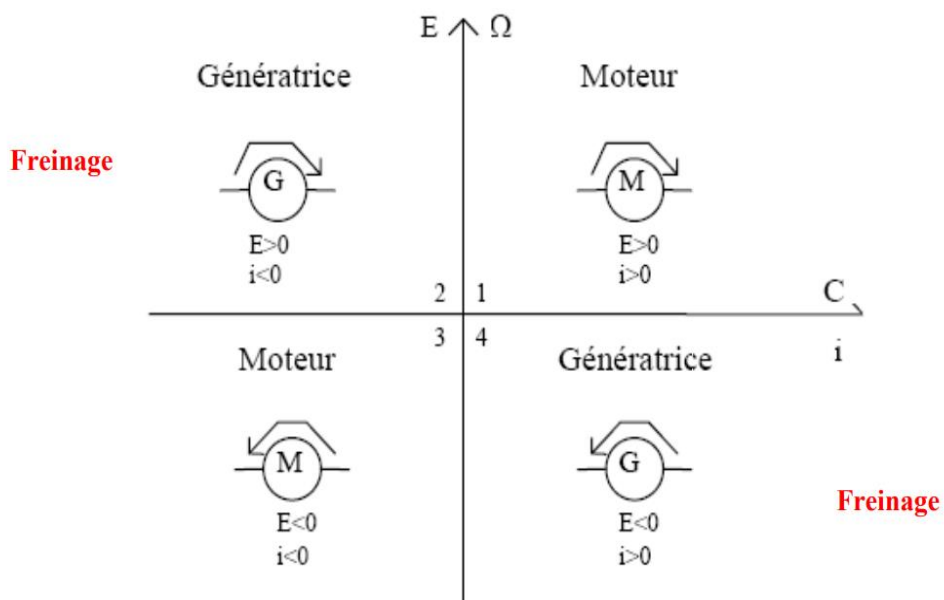
Si  $\langle i_s \rangle < 0$ , il passe par **K3** et **K4** et  $v_s = -U$ ;

### c-formes d'ondes



### Remarque :

Maintenant on peut avoir  $\langle v_s \rangle < 0$  (formule), le courant  $\langle i_s \rangle$  pouvant également être négatif donc on peut avoir un sens de rotation **néga**tif. Quand  $\alpha$  varie de **1** à **0**, la tension moyenne varie de  $-U$  à  $+U$ .

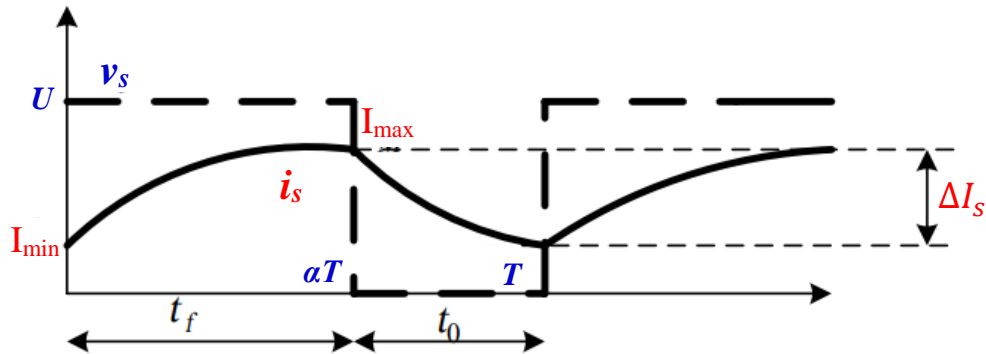


## 7-8 Etude du fonctionnement en conduction continue

**Remarque** : on néglige pas la chute de tension  $R \cdot i_s$ .

### a- Etude en valeurs instantanées

On prend l'origine des temps l'instant initial de chaque alternance.



*Courant et tension de la charge*

Pendant  $t_f$ , on a :

$$L \cdot \frac{di_s}{dt} + R \cdot i_s + E = v_s = U$$

Le courant  $i_s$  est régi par :

$$i_s = \left( I_{min} - \frac{U - E}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{U - E}{R}$$

Pendant  $t_o$ , on a :

$$L \cdot \frac{di_s}{dt} + R \cdot i_s + E = 0$$

Le courant  $i_s$  est régi par :

$$i_s = \left( I_{max} + \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{E}{R}$$

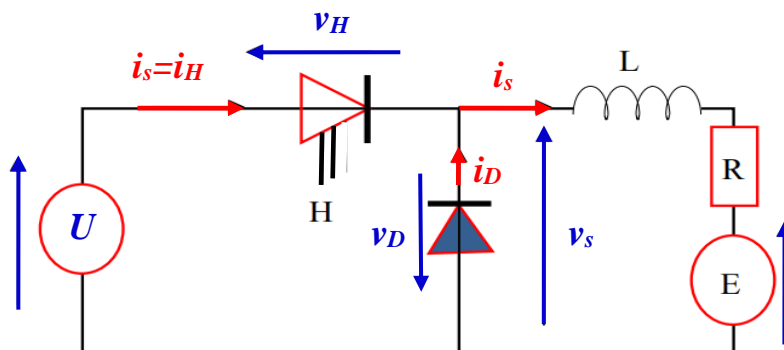
L'ondulation du courant est la différence des valeurs instantanées maximale  $I_{max}$  et minimale  $I_{min}$ .

$$i_s(t_f) = I_{max} = I_{min} e^{-\frac{t_f}{\tau}} + \frac{U - E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t_f}{\tau}} \right)$$

$$i_s(t_o) = I_{min} = I_{max} e^{-\frac{t_o}{\tau}} - \frac{E}{R} \left( 1 - e^{-\frac{t_o}{\tau}} \right)$$

## 7-9 Conduction discontinue :

### a-Montage



*Hacheur dévolteur (ou série).*

On suppose que la chute de tension  $R \cdot i_s$  est nulle

### b-Analyse du fonctionnement :

#### ◆ $0 \leq t \leq \alpha T$ : H est fermé

$v_H = 0$	$v_D = -U$	$i_e = i_H = i_s$	$v_s = U$
-----------	------------	-------------------	-----------

L'intensité du courant dans la charge  $i_s$  vérifie l'équation suivante :

$$L \cdot \frac{di_s}{dt} + E = v_s = U \Rightarrow i_s = \frac{U - E}{L} t$$

Calcul de  $I_{max}$ :

$$I_{max} = \frac{U - E}{L} \alpha T$$

#### ◆ $\alpha T \leq t \leq \beta T$ : H est ouvert

Le courant imposé par la bobine pourra passer par la diode de roue libre. Donc la diode assure la continuité du courant dans la charge.

$v_H = U$	$v_D = 0$	$i_e = i_H = 0$	$v_s = 0$
-----------	-----------	-----------------	-----------

L'intensité du courant dans la charge  $i_s$  vérifie l'équation suivante :

$$L \cdot \frac{di_s}{dt} + E = 0 \Rightarrow i_s = -\frac{E}{L} (t - \alpha T) + I_{max}$$

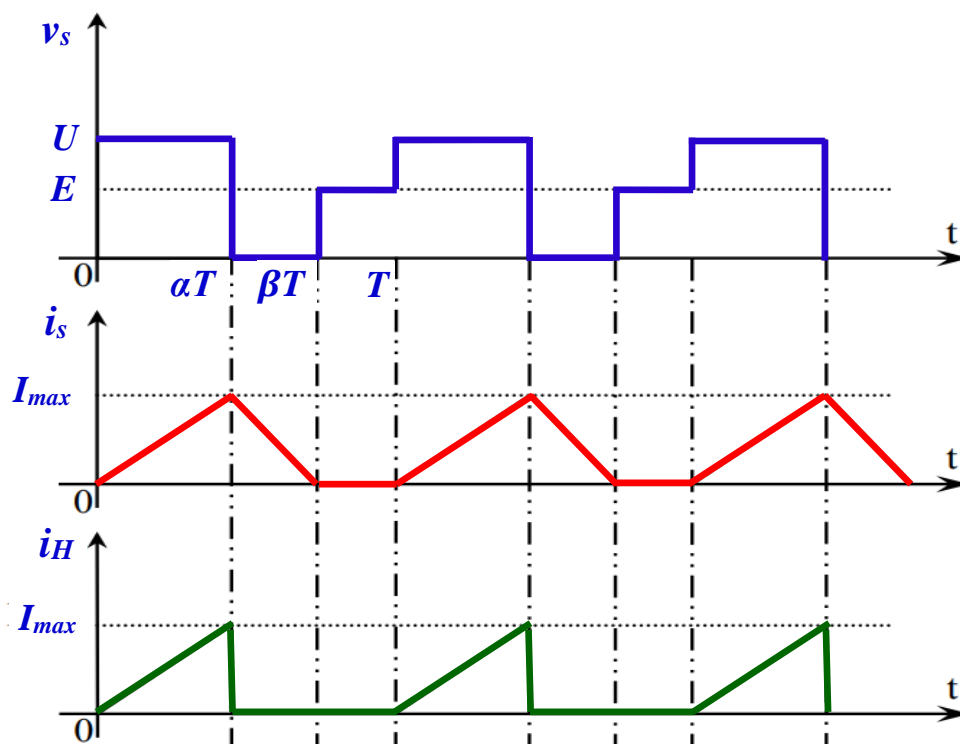
Calcul de  $I_{max}$ :

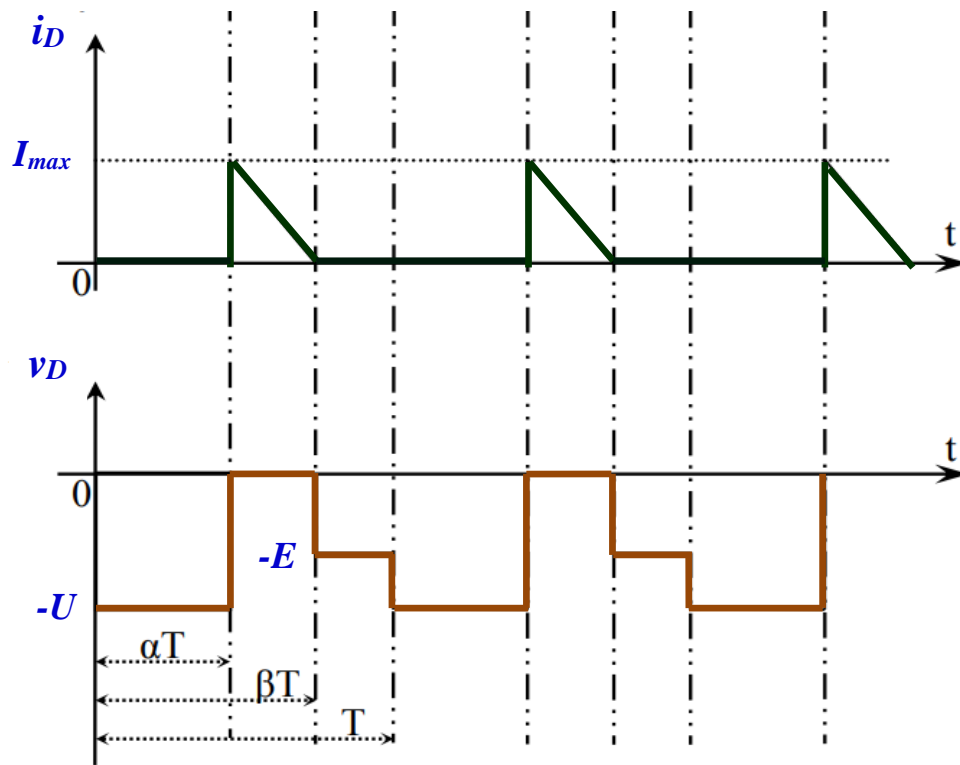
$$I_{max} = -\frac{E}{L} T(\beta - \alpha)$$

#### ◆ $\beta T \leq t \leq T$ : H est ouvert

$v_H = U - E$	$v_D = -E$	$i_e = i_H = i_D = i_s = 0$	$v_s = E$
---------------	------------	-----------------------------	-----------

### c-Formes d'ondes en conduction discontinue :





*d-Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :*

$$\langle v_s \rangle = E$$

*e-Valeur moyenne du courant :*

$$\langle i_s \rangle = \frac{\alpha^2}{2L} UT \left( \frac{U}{E} - 1 \right)$$

*f-Ondulation du courant dans la charge :*

Elle est donnée par la relation :  $I_{min} = 0$

$$\Delta I_s = I_{max} - I_{min} = I_{max}$$