

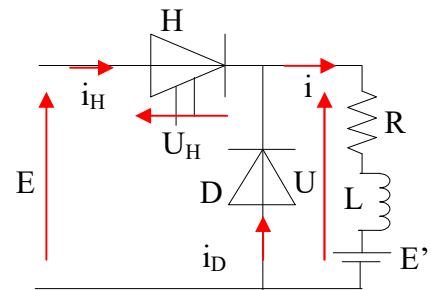
## 1. Introduction

Un hacheur est un convertisseur statique d'une tension continue fixe vers une tension continue réglable. On distingue trois types de convertisseurs continu-continu: le hacheur série, le hacheur parallèle et le hacheur série-parallèle (à accumulation). Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteurs électroniques commandables à l'ouverture et à la fermeture telle que les thyristors GTO, les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) ou transistors à effet de champ (MOSFET). Les interrupteurs électroniques unidirectionnels, quelle que soit leur nature, peuvent être représentés par le symbole ci contre:



## 2 Hacheur série (Buck)

La figure suivante montre un hacheur série, H est un interrupteur commandé et D une diode, qui permet de transférer de la puissance de la source, tension continue fixe E, à la charge, assimilée à un générateur de courant.



L'interrupteur H s'ouvre et se ferme périodiquement.

- H fermé de 0 à  $\alpha T$ ,
- H ouvert de  $\alpha T$  à T,
- $\alpha$  est le rapport cyclique ( $0 < \alpha < 1$ ) :  $\alpha = \frac{\text{durée de fermeture de H}}{\text{T période de hachage}}$

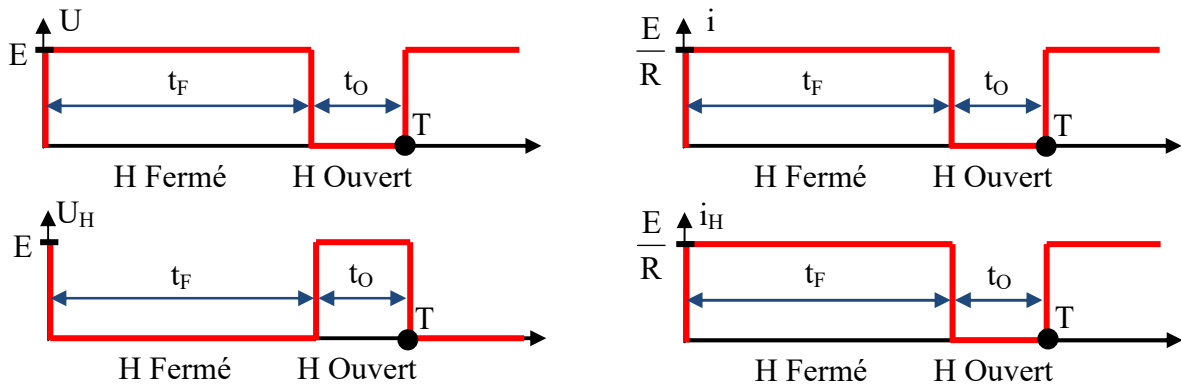
On appelle T la période du signal et  $f = \frac{1}{T}$  la fréquence de hachage.

Soit  $t_F$  la durée pendant laquelle l'interrupteur H est fermé et  $t_O$  le temps d'ouverture.

On suppose que : H est parfait ( $U_H = 0$  en conduction, les temps de commutation sont négligés) ; D est idéale ; et le régime est établi.

### 2.1 Charge résistive (Analyse du fonctionnement)

H	Fermé ( $0 \rightarrow \alpha T$ ) ( $t_F$ )	Ouvert ( $\alpha T \rightarrow T$ ) ( $t_O$ )
U	E	0
$U_H$	0	E
i	$\frac{E}{R}$	0
$i_H$	$\frac{E}{R}$	0



$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt \rightarrow U_{\text{moy}} = E\alpha$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{E\alpha}{R}$$

On conclut que le hacheur série fonctionne comme abaisseur de tension ou dévolteur

### 2.2 Charge résistive et inductive

Si H fermé: le courant dans la charge (accumulation de l'énergie).

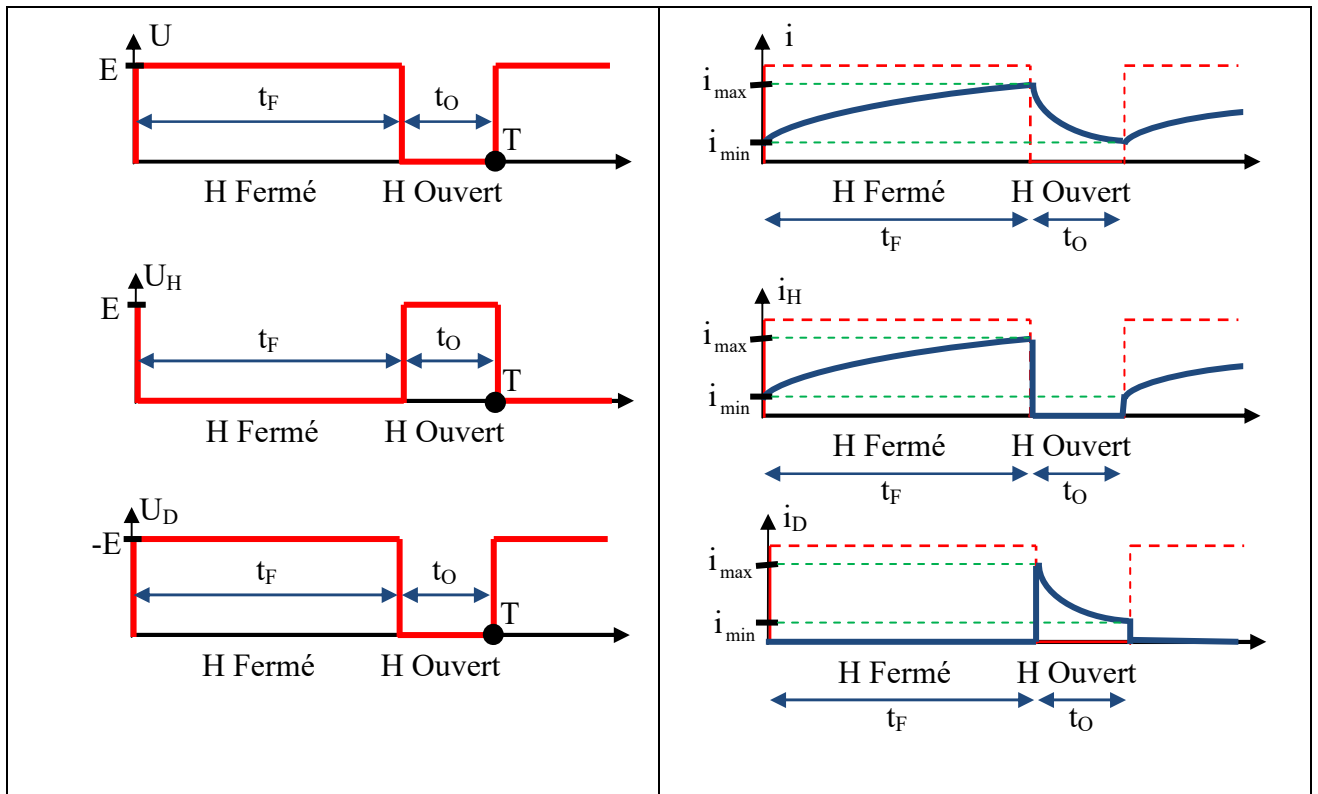
Si H ouvert: décharge d'inductance à travers la diode (période de roue libre).

H	Fermé ( $0 \rightarrow \alpha T$ ) ( $t_F$ )	Ouvert ( $\alpha T \rightarrow T$ ) ( $t_O$ )
D	D est bloquée	D est passante
U	E	0
$U_H$	0	E
$U_D$	-E	0
i	$U = Ri + \frac{Ldi}{dt} = E \rightarrow i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E}{R}$	$U = Ri + \frac{Ldi}{dt} = 0 \rightarrow i = A'e^{-\frac{R}{L}t}$
$i_H$	$i_H = i$	0
$i_D$	0	$i_D = i$

**NB:** Les constantes sont déterminées à partir des conditions initiales.

On suppose à  $t=0$ ,  $i(0)=i_{\text{min}}$  et  $t=\alpha T$ ,  $i(\alpha T)=i_{\text{max}}$

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt \rightarrow U_{\text{moy}} = E\alpha$$



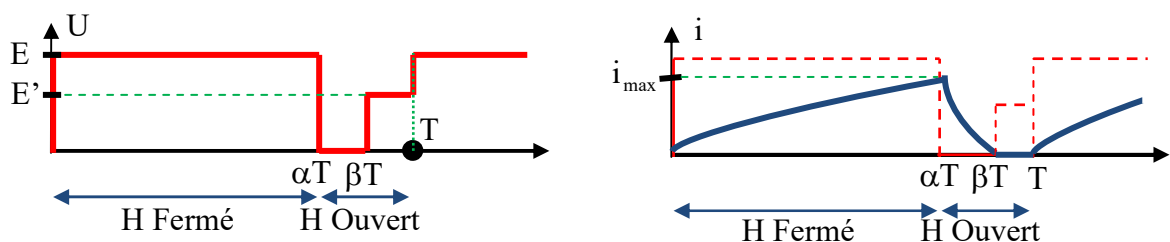
### 2.3 Charge résistive, inductive et f.e.m (E')

La charge est par exemple un moteur à courant continu (R, L et E'). On distingue donc deux types de fonctionnement selon que le courant dans la charge  $i$  est interrompu ou non.

#### 2.3.1 Fonctionnement à courant interrompu (conduction discontinue)

H	Fermé ( $0 \rightarrow \alpha T$ )	Ouvert ( $\alpha T \rightarrow \beta T$ )	Ouvert ( $\beta T \rightarrow T$ )
D	D est bloquée	D fermée	D ouverte
U	E	0	E'
i	$E' + Ri + \frac{Ldi}{dt} = E \rightarrow$ $i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E - E'}{R}$	$E' + Ri + \frac{Ldi}{dt} = 0 \rightarrow$ $i = A'e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{E'}{R}$	0
$i_H$	$i_H = i$	0	0
$i_D$	0	$i_D = i$	0

**NB :** On suppose à  $t=0$ ,  $i(0)=0$  et  $t=\alpha T$ ,  $i(\alpha T)=i_{max}$



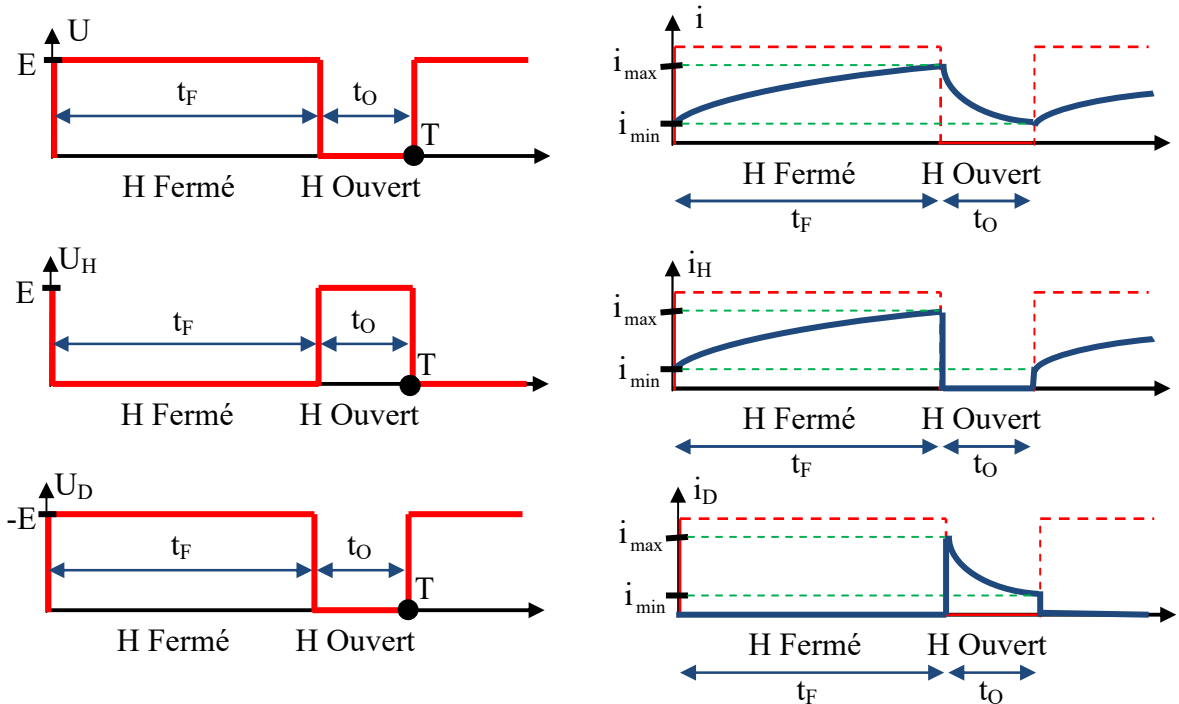
$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \int_{\beta T}^T E' dt \rightarrow U_{\text{moy}} = E\alpha + (1-\beta)E'$$

### 2.3.2 Fonctionnement à courant ininterrompu (conduction continue)

H	Fermé ( $0 \rightarrow \alpha T$ )	Ouvert ( $\alpha T \rightarrow T$ )
D	D est bloquée	D est passante
U	E	0
i	$E' + Ri + \frac{L di}{dt} = E \rightarrow$ $i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + \frac{E - E'}{R}$	$E' + Ri + \frac{L di}{dt} = 0 \rightarrow$ $i = Ae^{-\frac{R}{L}t} - \frac{E'}{R}$
$i_H$	$i_H = i$	0
$i_D$	0	$i_D = i$

**NB:** Les constantes sont déterminées à partir des conditions initiales.

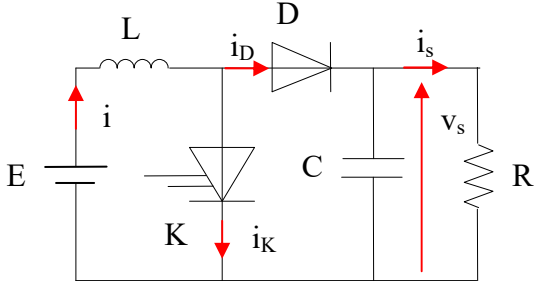
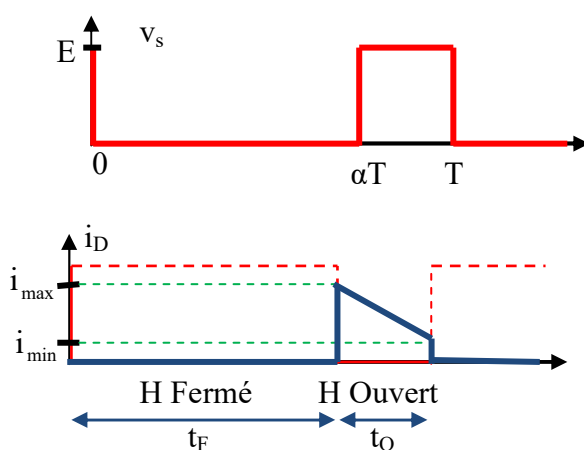
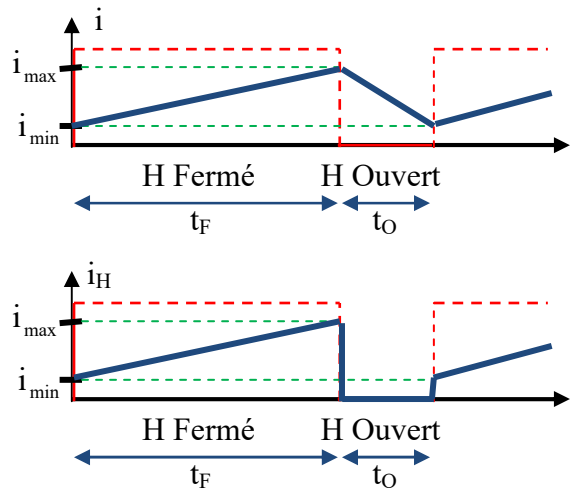
On suppose à  $t=0$ ,  $i(0)=i_{\min}$  et à  $t=\alpha T$ ,  $i(\alpha T)=i_{\max}$



$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt \rightarrow U_{\text{moy}} = E\alpha$$

### 3 Hacheur parallèle (Boost)

Il est composé essentiellement d'un interrupteur  $K$  (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode  $D$ . L'interrupteur  $K$  est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe  $T$  et de rapport cyclique variable  $\alpha$ . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand  $K$  est fermé  $D$  est ouverte ; et quand  $K$  est ouvert,  $D$  est fermée.

	<p>Pour <math>0 &lt; t &lt; \alpha T</math> : K fermé, D ouverte</p> $\frac{di}{dt} = \frac{E}{L} \Rightarrow i - I_{\min} = \frac{E}{L} t$ $i(\alpha T) = I_{\max}$ $I_{\max} - I_{\min} = \frac{E}{L} \alpha T$ <p>Pour <math>\alpha T &lt; t &lt; T</math> : K ouvert, D fermée</p> $\frac{di}{dt} = \frac{E - v_s}{L} \Rightarrow i - I_{\max} = \frac{E - v_s}{L} (t - \alpha T)$ $i(T) = I_{\min}$ $I_{\max} - I_{\min} = \frac{v_s - E}{L} (1 - \alpha) T$ <p>L'égalité des 2 expressions de l'ondulation de courant, nous donne :</p> $\frac{v_s}{E} = \frac{1}{1 - \alpha}$
	
<p>On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension.</p> <p><b>Danger:</b> si le rapport cyclique tend vers 1, la tension de sortie tend vers l'infini.</p>	

### 3 Hacheur série-parallèle (Buck-boost)

La tension de sortie du convertisseur Buck-Boost est négative par rapport à la tension d'entrée. Son amplitude peut être supérieure ou inférieure à celle de la tension d'entrée selon la valeur du rapport cyclique. C'est un abaisseur-élévateur-inverseur en tension.

	<p>Pour <math>0 &lt; t &lt; \alpha T</math> : K fermé, D ouverte</p> $\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} \Rightarrow i_L - I_{\min} = \frac{E}{L}t$ $i_L(\alpha T) = I_{\max}$ $I_{\max} - I_{\min} = \frac{E}{L}\alpha T$ <p>Pour <math>\alpha T &lt; t &lt; T</math> : K ouvert, D fermée</p> $\frac{di_L}{dt} = \frac{-v_S}{L} \Rightarrow i_L - I_{\max} = \frac{-v_S}{L}(t - \alpha T)$ $i_L(T) = I_{\min}$ $I_{\max} - I_{\min} = \frac{v_S}{L}(1 - \alpha)T$ <p>L'égalité des 2 expressions de l'ondulation de courant, nous donne :</p> $\frac{v_S}{E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$
	<p>C suffisamment grande pour maintenir la tension presque constante <math>v_S = V_S</math>. On peut retrouver le rapport de transformation autrement :</p> $v_{L\text{moy}} = E\alpha T + (-V_S)(1 - \alpha)T = 0$
<p>Le montage fonctionne en abaisseur de tension pour <math>\alpha &lt; 0.5</math> et en élévateur de tension pour <math>\alpha &gt; 0.5</math>.</p>	

#### 4 Hacheur 2 quadrants réversible en courant

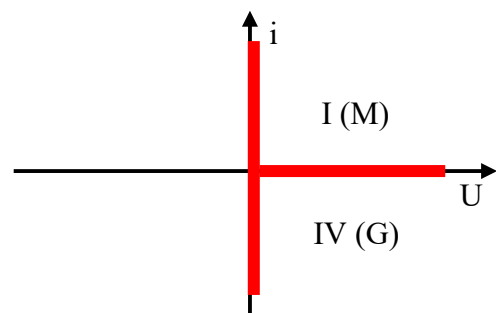
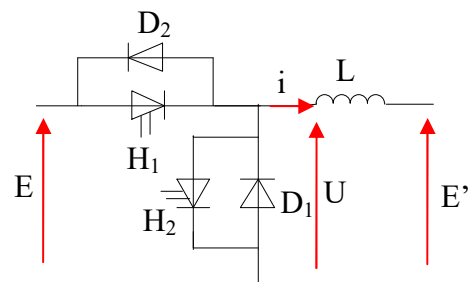
Un hacheur deux quadrants associe un hacheur série ( $H_1$  et  $D_1$ ) et un hacheur parallèle ( $H_2$  et  $D_2$ ). Il est réversible en courant mais pas en tension ; l'énergie est transférée de la source de tension continue vers la source de courant continu si  $I_s > 0$ , et réciproquement si  $I_s < 0$ .

- de  $t = 0$  à  $t = \alpha T$ ,  $K_1$  est fermé et  $K_2$  ouvert ; - de  $t = \alpha T$  à  $t = T$ ,  $K_1$  est ouvert et  $K_2$  fermé. On trouve :  $U_{\text{moy}} = \alpha E$

#### Exemple :

##### Moteur / frein avec sens de rotation constant.

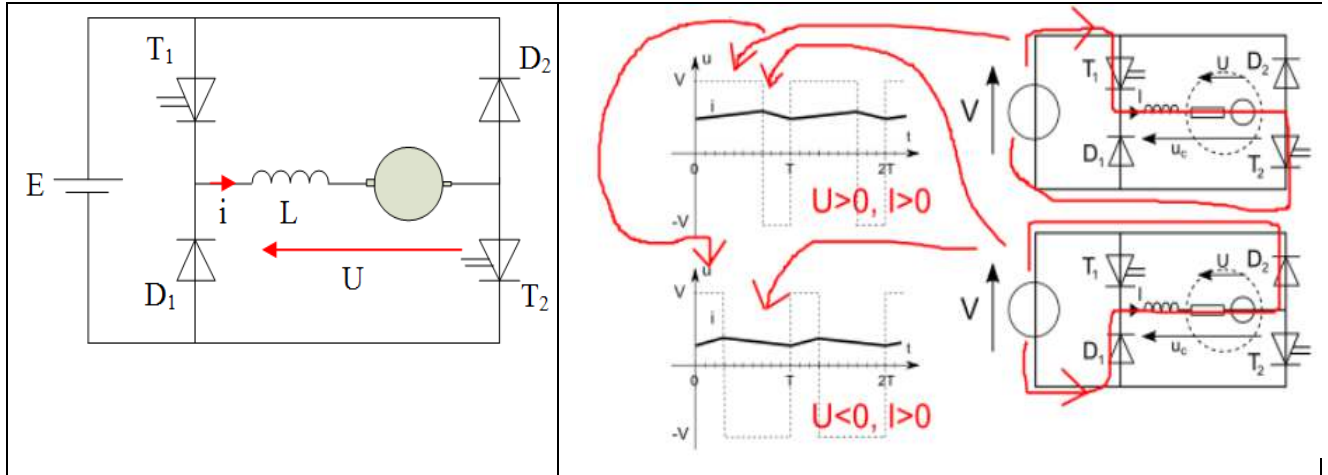
- si  $H_1, D_1$  passants : hacheur série, machine en mode moteur, ( $U_{\text{moy}} > 0$  &  $i_{\text{moy}} > 0 \rightarrow \Omega(+)$ )



- si  $H_2, D_2$  passants : hacheur parallèle, machine en mode génératrice ( $U_{moy} > 0$  &  $i_{moy} < 0$  →  $\Omega(+)$ )

**5. Hacheur 2 quadrants réversible en tension**

La structure ci-dessous permet la réversibilité en tension.

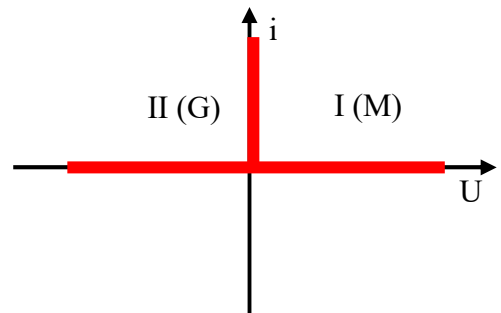


$$U_{moy} = (2\alpha - 1)E$$

**Exemple :**

**Moteur / frein** avec changement de sens de rotation.

- si  $\alpha > \frac{1}{2}$  : hacheur série, machine en mode moteur (



$$U_{moy} > 0 \text{ et } i_{moy} > 0 \rightarrow \Omega(+)$$

- si  $\alpha < \frac{1}{2}$  : hacheur série, machine en mode génératrice ( $U_{moy} < 0$  et  $i_{moy} > 0 \rightarrow \Omega(-)$ )

**6. Hacheur 4 quadrants réversible en tension et en courant**

Un hacheur quatre quadrants associe deux hacheurs demi-pont. Il est réversible en courant et en tension ;

- de 0 à  $\alpha T$ ,  $K_1$  et  $K_3$  fermés,  $K_2$  et  $K_4$  ouverts.
- de  $\alpha T$  à  $T$ ,  $K_1$  et  $K_3$  ouverts,  $K_2$  et  $K_4$  fermés.

