

## Chapitre 4. Convertisseurs DC-DC : Hacheurs série et parallèle

Éléments de puissance (thyristor GTO, transistor bipolaire, transistor MOSFET, transistor IGBT), Hacheur dévolteur et survolteur, avec charge R, RL et RLE.

### 4.1 Hacheur série : Abaisseur de tension ou dévolteur

**4.1.1 Définition :** Un Hacheur série associe une source de tension liée par intermittences à un récepteur de courant. Il est un convertisseur statique réglant le transfert d'énergie entre un générateur de tension continue est une source de courant continu où la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée.

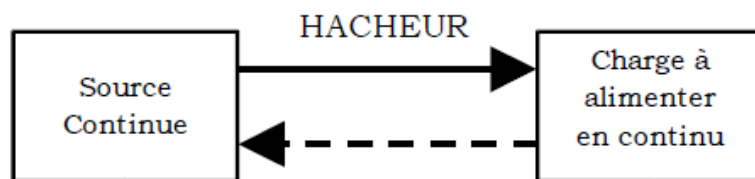


Figure 4.1 : Convertisseur continu-continu.

Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

**Exemple d'application :** le hacheur permet de faire varier et régler la vitesse des moteurs à courant continu.

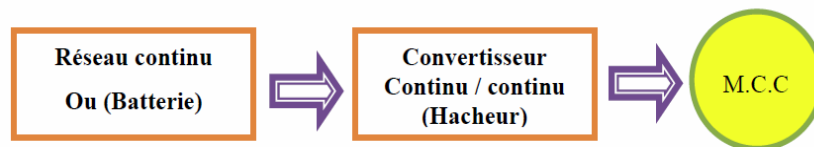


Figure 4.2 Transfert l'énergie entre un générateur de tension continue et un MCC

**4.1.2 Schème de principe :** Le schéma suivant transcrit les organes essentiels:

- Une source de tension continue  $U$  que l'on souhaite moduler.
- Un récepteur de courant parcourut par un courant  $i$  et présentant une tension de charge  $v_c$ .
- une cellule de commutation comporte un interrupteur  $H$  à **amorçage et à blocage commandés** (transistor bipolaire, transistor MOS, GTO...) et un interrupteur  $D$  à **blocage et amorçage spontanés** (diode):

L'interrupteur  $H$  commandé à la conduction d'une portion  $\alpha$  d'une période  $T$ .

L'interrupteur  $D$  conduisant le reste du temps.

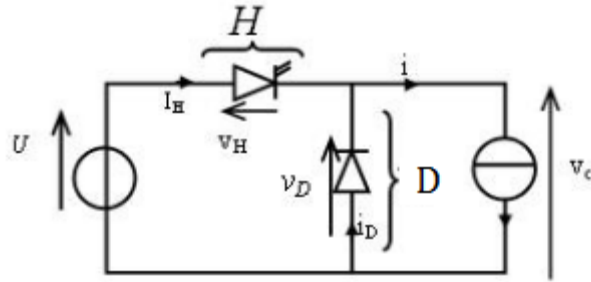


Figure 4.3 schéma de principe d'un Hacheur série

4.1.3 Hacheur série avec charge résistive : Soit le montage suivant avec H (GTO) est un interrupteur parfait :

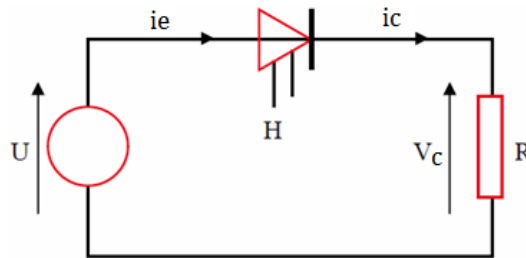


Figure 4.4 Hacheur série avec charge résistive

**Séquences de conduction :**

La tension de source est continue :  $v_e = U$

T: période de fonctionnement du thyristor H.

$\alpha$ : le rapport cyclique ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) avec :

$$\alpha = \frac{\text{durée de l'état passant de K}}{T}$$

On manœuvre H de manière périodique donc les séquences de fonctionnement sont les suivantes :

**$0 < t < \alpha T$ : H est fermé**

$$v_H = 0$$

$$v_c = U$$

$$i_c = i_e = \frac{U}{R}$$

**$\alpha T < t < T$ : H est ouvert**

$$v_H = U$$

$$v_c = 0$$

$$i_c = i_e = 0$$

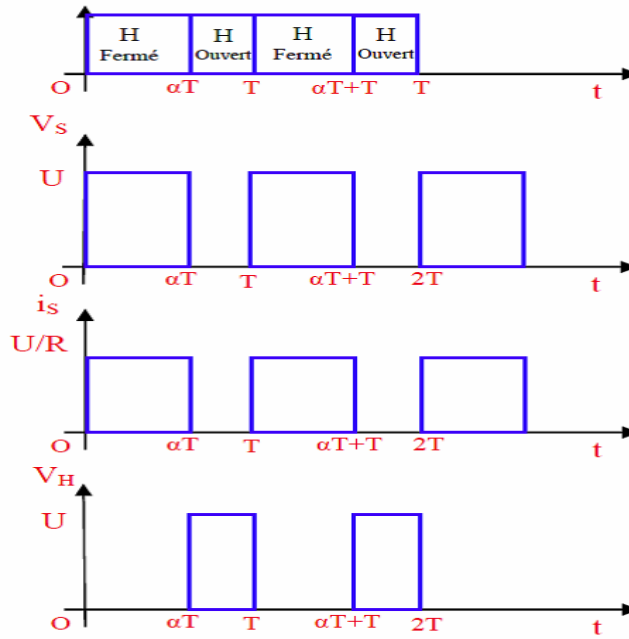


Figure 4.5 Forme d'ondes des grandeurs d'un Hacheur série charge résistive

Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :

$$v_{ch\ moy} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{ch}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt = \frac{U}{T} (\alpha T - 0)$$

$$v_{ch\ moy} = \alpha U$$

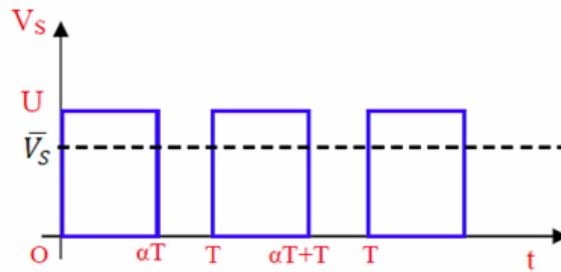


Figure 4.6 valeur moyenne de tension de charge

La valeur moyenne  $v_{ch\ moy}$  peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique  $\alpha$ .

Quand on fait varier  $\alpha$  de 0 à 1,  $v_{ch\ moy}$  varie linéairement de 0 à U.

$$v_{ch\ moy} = f(\alpha)$$

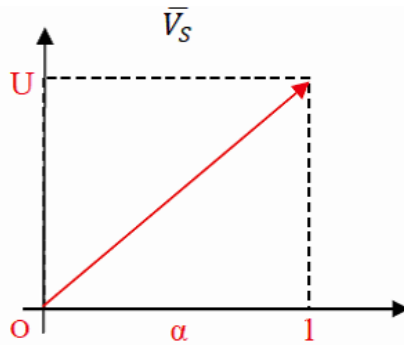


Figure 4.7 valeur en fonction du rapport cyclique  $\alpha$

#### 4.1.4 Hacheur série avec charge inductive RL :

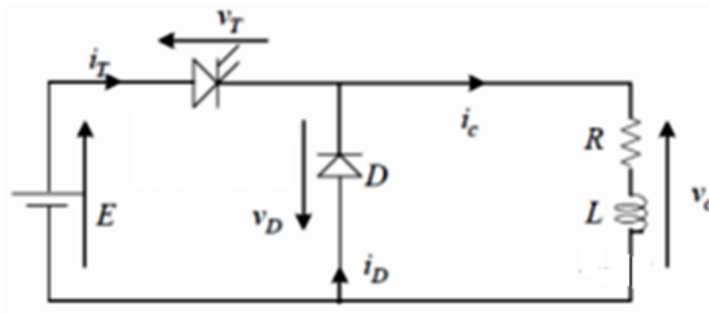


Figure 4.8 Hacheur série avec charge inductive

$0 < t < \alpha T$ : H est commandé à la fermeture, donc il va devenir passant et la diode  $D$  sera bloquée.

$$v_H = 0 \quad v_D = E$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = E \Rightarrow i_c(t) = \left( I_{min} - \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \quad \text{avec } I_{min} = I_0 = i_c(0)$$

A  $t = \alpha T$  le courant atteint sa valeur maximale:

$$I_{Max} = i_c(\alpha T) = \left( I_{min} - \frac{E}{R} \right) e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{R}$$

$\alpha T < t < T$ : H est ouvert et la diode de roue libre  $D$  devient passante. ce qui permet à l'inductance de libérer l'énergie électromagnétique qu'elle avait accumulée.

L'équation différentielle du courant de la charge sera la suivante :

$$v_D = 0 \quad v_H = E$$

$$v_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} = 0 \Rightarrow i_c(t) = I_{Max} e^{-\frac{(t-\alpha T)}{\tau}} \quad \text{avec } I_{Max} = i_c(\alpha T)$$

$$\text{D'ou } I_{min} = i_c(T) = I_{Max} e^{-\frac{(1-\alpha)T}{\tau}}$$

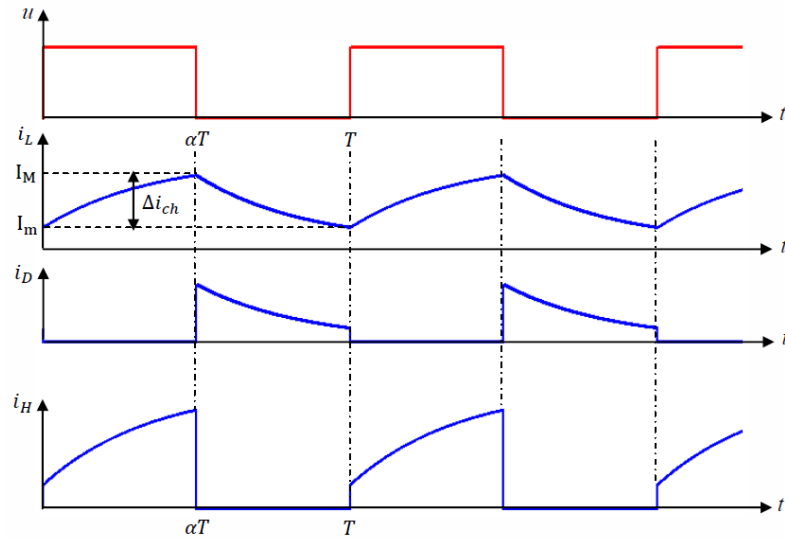
Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :

$$v_{c \text{ moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt$$

$$v_{c\ moy} = \alpha E$$

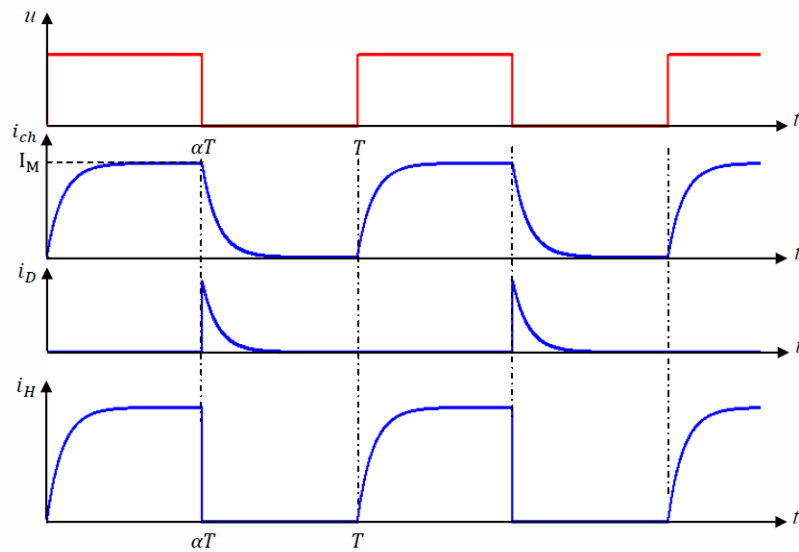
Ce hacheur est équivalent donc à un transformateur à courant continu avec  $\alpha$  comme rapport de transformation.

Donc l'allure des tensions et courants en **conduction continue** (charge RL avec DRL)



**Figure 4.9** Forme d'ondes des grandeurs d'un Hacheur série charge inductive en conduction continue

Et l'allure des Tensions et courants en **conduction discontinue** (charge RL avec DRL)



**Figure 4.10** Forme d'ondes des grandeurs d'un Hacheur série charge inductive en conduction discontinue

## 4.2 Hacheur parallèle : élévateur de tension

**4.2.1 Définition :** Le hacheur parallèle est un convertisseur statique réglant le transfert d'énergie entre une générateur de courant continu est un récepteur de tension continue.

Les rôles de générateur et de récepteur sont inversés entre la source de tension et la source de courant par rapport au hacheur série.

- Le générateur a la nature d'une source de courant continu constant d'amplitude  $i$  ; il est unidirectionnel en tension.
- Le récepteur a la nature d'une source de tension unidirectionnelle en courant et sa structure est telle que la tension à ses bornes peut être considérée comme constante et d'amplitude  $E$ .

Dans ce cas, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

**4.2.2 Schéma de principe :** Le hacheur parallèle permet d'élever la valeur d'une source de tension  $E$ . La source de tension est d'abord transformée en source de courant par ajout d'une inductance de lissage.

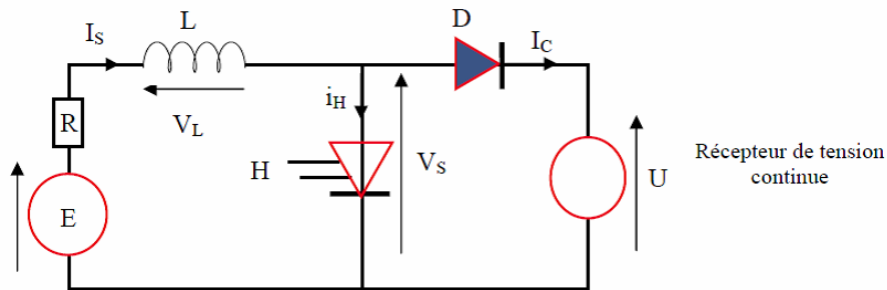


Figure 4.11 schéma de principe d'un Hacheur parallèle

- La première phase de fonctionnement (H fermé) permet de stocker de l'énergie dans la bobine, pendant ce temps la tension est maintenue constante dans la charge grâce au condensateur.
- La seconde phase de fonctionnement décharge la bobine en série avec la source de tension dans la charge lui offrant ainsi une tension supérieure à  $E$ .

**Séquences de conduction :** Les deux interrupteurs sont supposés parfaits et la résistance  $R$  est négligeable.

$0 < t < \alpha T$ : H est fermé ( $H=1$ ) donc  $v_H = 0$ , et la tension aux borne de la diode  $v_D = -U$  donc la diode est ploquée ( $D=0$ ).

$$i_s = i_H \quad \text{et} \quad i_c = 0$$

$$E - v_L - v_H = 0 \quad \Rightarrow \quad v_L = E \Rightarrow L \frac{di_s}{dt} = E \quad \Rightarrow \quad di_s = \frac{E}{L} dt$$

Par intégration on obtient :

$$\int_0^t di_s = \int_0^t \frac{E}{L} dt \Rightarrow i_s(t) = \frac{E}{L}t + I_{min}$$

L'intensité  $i_s(t)$  croît linéairement.

$\alpha T < t < T$ : H est ouvert ( $H=0$ ) donc  $i_H = 0$ , et la diode D devient passante forcément par le courant  $i_s(t)$ , donc :

$$v_D = 0, v_H = U \text{ et } i_c = i_s$$

$$E - v_L - v_D - U = 0 \Rightarrow v_L = E - U \Rightarrow \frac{di_s}{dt} = \frac{E - U}{L} \Rightarrow di_s = \frac{E - U}{L} dt$$

Par intégration on obtient :

$$\int_{\alpha T}^t di_s = \int_{\alpha T}^t \frac{E - U}{L} dt \Rightarrow i_s(t) = \frac{E - U}{L}(t - \alpha T) + I_{Max}$$

Le courant  $i_s(t)$  décroît linéairement de  $I_{max}$  à  $I_{min}$  (puisque  $E < U$ ).

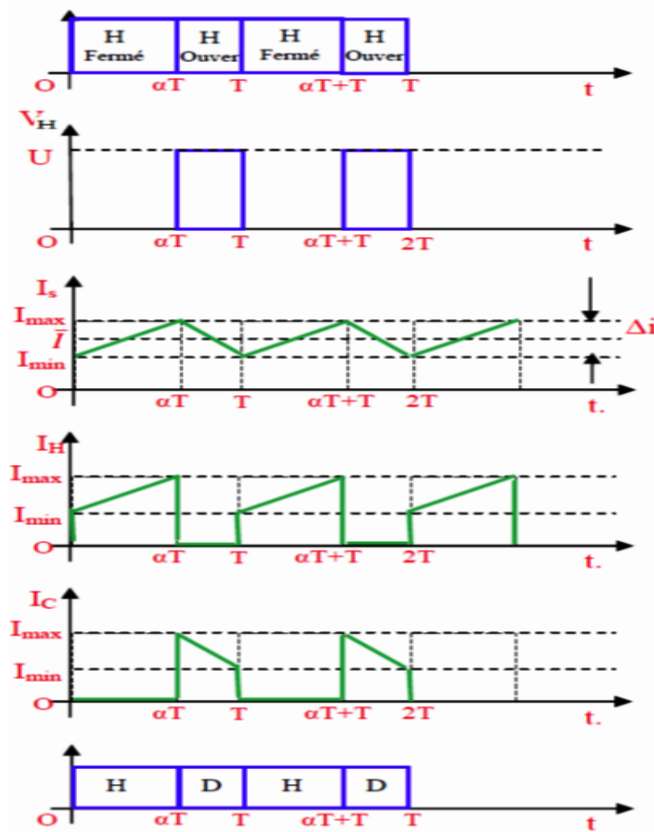


Figure 4.12 Forme d'ondes des grandeurs d'un Hacheur parallèle

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

La tension moyenne aux bornes de la bobine parcourue par un courant périodique est nulle :  $\langle v_L \rangle = 0$ . Pour retrouver la relation donnant la valeur de VC on supposera la tension VC maintenue constante (à l'aide d'un condensateur par exemple).

Ainsi, la valeur moyenne de  $v_D$  est  $\langle v_D \rangle = -\alpha V_C$ .

Par ailleurs la valeur moyenne de  $v_H$  est  $\langle v_H \rangle = \alpha v V_C$ .

La loi des mailles donne :

$$\begin{aligned} E &= v_L + v_D + v_C \\ \langle E \rangle &= \langle v_L + v_D + v_C \rangle \\ \langle E \rangle &= \langle v_L \rangle + \langle v_D \rangle + \langle v_C \rangle \\ E &= 0 - \alpha V_C + V_C \\ E &= (1 - \alpha) V_C \\ V_C &= \frac{E}{(1 - \alpha)} \end{aligned}$$

Où  $\alpha$  compris entre 0 et 1 la tension de sortie est toujours supérieure à  $V_e$ , le montage est élévateur de tension.

### 4.3 Hacheur abaisseur/élévateur (Buck/Boost)

Le convertisseur abaisseur/élévateur possède l'aptitude de fournir une tension en sortie plus ou moins élevée que celle appliquée en son entrée. Cela dépend de la valeur du rapport cyclique.

Le montage considéré est illustré sur la figure suivante :

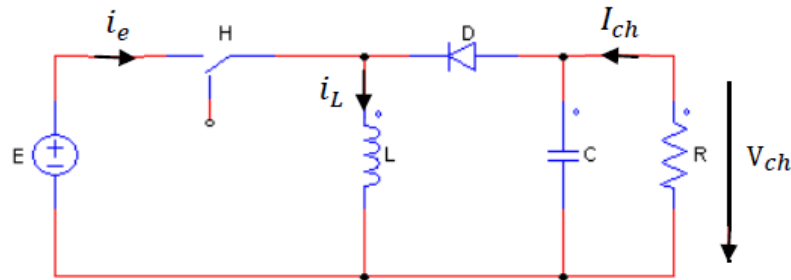


Figure 4.13 Hacheur Buck/Boost

**Séquences de conduction :** Rappelons que les mêmes hypothèses sont précédentes adoptés.

**$0 < t < \alpha T$  :** L'interrupteur  $H$  est commandé à la fermeture, donc il devient passant ( $v_H = 0$ ) et la diode  $D$  sera bloquée ( $v_D = -E$ ) :

$$i_D = 0 \quad i_e = i_L$$

$$v_L = E \Rightarrow L \frac{di_e}{dt} = E \quad \text{donc } i_e(t) = \frac{E}{L} t + I_{min} \text{ (croît linéairement)}$$

$$v_D = -(E + v_{ch})$$

**$\alpha T < t < T$  :**  $H$  est ouvert, la diode  $D$  devient alors conductrice ( $v_D = 0$ ) :

$$i_e = 0$$

$$i_L = i_D$$

$$v_L = -v_{ch} \Rightarrow L \frac{di_L}{dt} = -v_{ch} \text{ donc } i_L(t) = \frac{-v_{ch}}{L} t + I_{max} \text{ (décroit linéairement)}$$



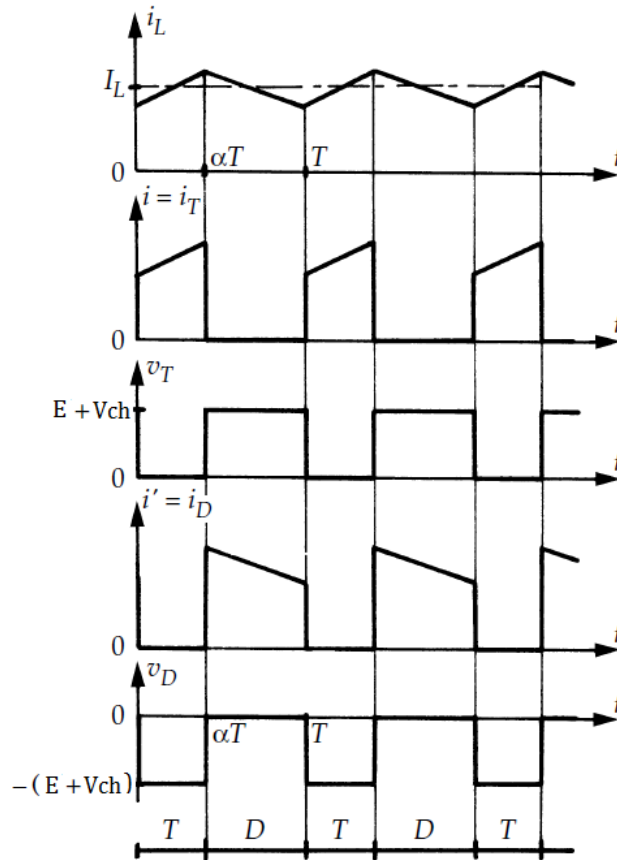


Figure 4.14 Forme d'ondes des grandeurs d'un Hacheur Buck/Boost

Pour déduire la valeur moyenne aux bornes de la charge, On peut calculer l'expression de la valeur moyenne de  $v_L$  :

$$\langle v_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_L dt$$

$$\langle v_L \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -v_{ch} dt = \alpha E - (1 - \alpha) V_{ch}$$

Et sachant que  $\langle v_L \rangle = 0$  on déduit :

$$\alpha E - (1 - \alpha) V_{ch} = 0 \Rightarrow V_{ch} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} E$$

D'après cette expression on constate que le hacheur buck/boost permet d'obtenir en sortie une tension qui sera, selon le rapport cyclique  $\alpha$ , plus faible (pour  $\alpha < 0,5$ ) ou plus élevée (pour  $\alpha > 0,5$ ) que la tension en entrée.