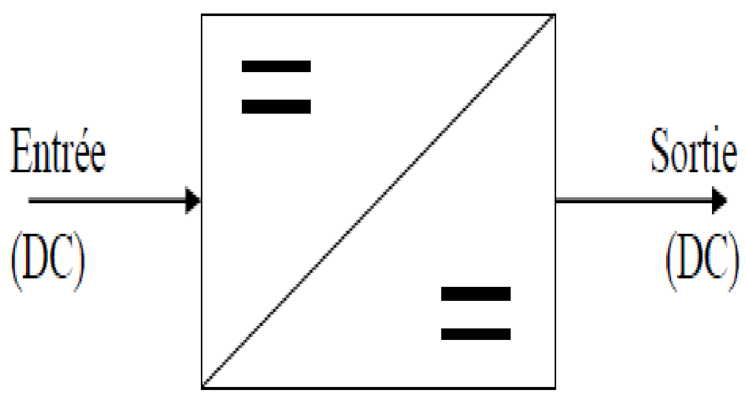
Université Internationale de Casablanca
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

Cours d'Electronique Industrielle

Assuré par Mme H.DAMMAH

Chapitre 2 :

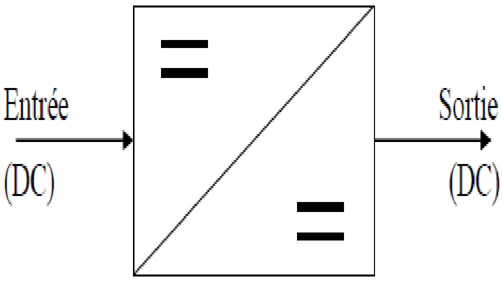
Les hacheurs : convertisseurs continu/continu



Année universitaire 2018/2019

I- Introduction

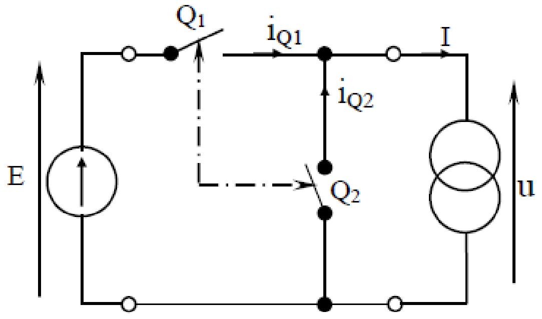
Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui permettent d'obtenir une tension continue constante et ce, avec un rendement voisin de l'unité. Ils jouent le même rôle que les transformateurs en courant alternatif.

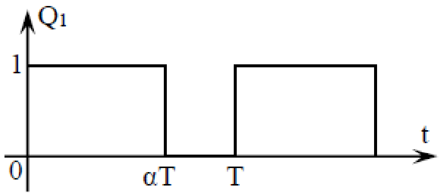


Ils sont principalement utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu ainsi que dans les alimentations à découpage à courant continu.
Ces convertisseurs permettent le contrôle du transfert d'énergie entre une source et une charge qui est, soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant).

II- Hacheur série
II-1- Principe

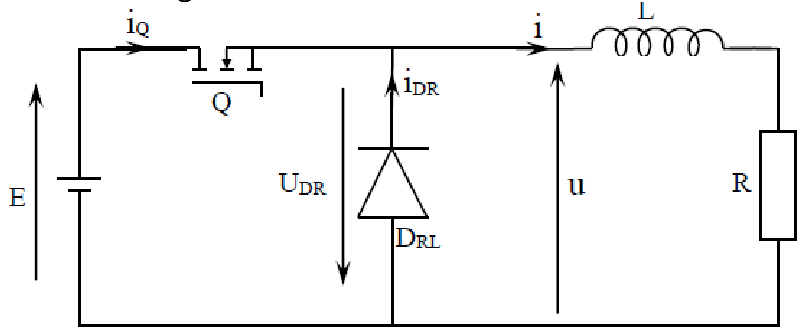
L'hacheur série commande le débit d'une source de tension continu U dans un récepteur de courant I.
Pour régler le transfert d'énergie, on applique aux interrupteurs une commande périodique.
La période de pulsation T de celle-ci peut-être choisie arbitrairement dans la mesure où la source et le récepteur que relie le variateur de courant continu se comportent comme des circuits à fréquence de commutation nulle.
L'interrupteur Q1 permet de relier l'entrée à la sortie, Q2 court-circuite la source de courant quand
Q1 est, ouvert $(Q_1 = \overline{Q_2})$. On définit α rapport cyclique.

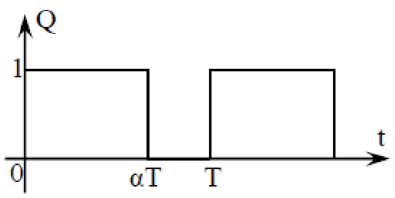




II-2- Etude d'un hacheur série charge inductive

II-2-1- Montage

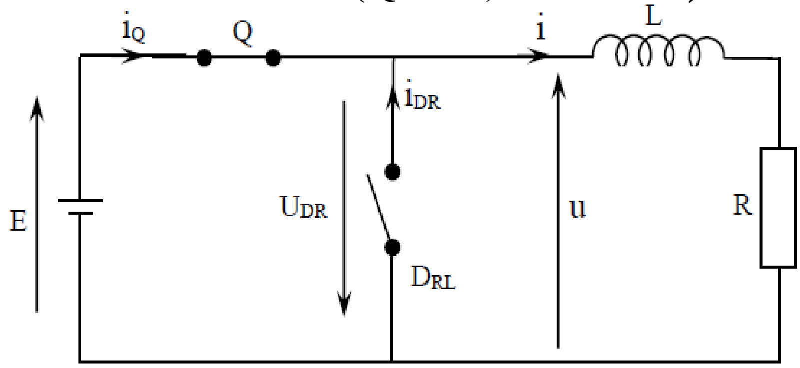




II-2-2- Analyse de fonctionnement

Nous pouvant décomposer cette analyse en deux parties distinctes :

- **1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, DRL ouverte).**



On' a : $U_{DR} = -E$

$u = E$

$i_Q = i$

$i_{DR} = 0$

et $E = Ri(t) + L\dfrac{di(t)}{dt}$

Déterminons le courant i(t) : on a

$$E = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \quad \text{avec } i(0) = I_{MIN} \ \text{ et } \ i(\alpha T) = I_{MAX}$$

Solution sans second membre

$$0 = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow Ri(t) = -L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow \frac{di(t)}{i(t)} = -\frac{R}{L}dt \Rightarrow \int\frac{di(t)}{i(t)} = \int -\frac{R}{L}dt$$

$$\text{donc } \log[i(t)] = -\frac{R}{L}t + K \Rightarrow \mathbf{i(t) = A\left[\exp-\left(\frac{R}{L}t\right)\right]}$$

Solution particulière (E = Ri(t))

$$\text{Donc} \quad \mathbf{i(t) = \frac{E}{R}}$$

Solution générale

$$i(t) = \frac{E}{R} + A\,e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{on pose } \tau = \frac{L}{R} \quad \text{donc} \quad \mathbf{i(t) = \frac{E}{R} + A\,e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

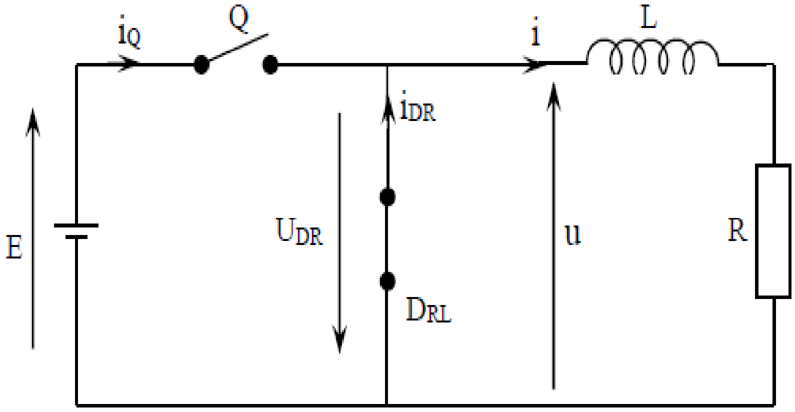
$$\text{à } \ t = 0 \quad \text{on a} \quad i(0) = I_{MIN} = \frac{E}{R} + A \quad \Rightarrow \quad A = I_{MIN} - \frac{E}{R}$$

$$\text{donc} \quad \mathbf{i(t) = \frac{E}{R} + \left(I_{MIN} - \frac{E}{R}\right)e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

Calcul de IMAX ?

$$\text{à } t = \alpha T \ \text{ on a } i(\alpha T) = I_{MAX} = \frac{E}{R} + \left(I_{MIN} - \frac{E}{R}\right)e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \Rightarrow I_{MAX} = I_{MIN}\,e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right)$$

- **2[éme] cas : $\alpha T < t < T$ (Q ouvert, DRL fermée).**



On' a : $U_{DR} = 0$
$u = 0$
$i_Q = 0$
$i_{DR} = i$
et $0 = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt}$

Déterminons le courant i(t) : on a

$$0 = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \quad \text{avec } i(T) = I_{MIN} \text{ et } i(\alpha T) = I_{MAX}$$

$$0 = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow Ri(t) = -L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow \frac{di(t)}{i(t)} = -\frac{R}{L}dt \Rightarrow \int\frac{di(t)}{i(t)} = \int -\frac{R}{L}dt$$

$$\text{donc} \quad \log[i(t)] = -\frac{R}{L}t + K \Rightarrow \mathbf{i(t) = A\,e^{-\frac{t}{\tau}}} \quad \text{avec} \quad \tau = \frac{L}{R}$$

$$\text{à} \quad t = \alpha T \quad \text{on a} \quad i(\alpha T) = I_{MAX} = A\,e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} \Rightarrow A = I_{MAX}\,e^{\frac{\alpha T}{\tau}}$$

$$\text{donc} \quad \mathbf{i(t) = I_{MAX}\ e^{-\frac{(t-\alpha T)}{\tau}}}$$

Calcul de IMIN ?

$$\text{à } t = T \text{ on a } i(T) = I_{MIN} = I_{MAX}\,e^{-\frac{(T-\alpha T)}{\tau}} \Rightarrow \mathbf{I_{MIN} = I_{MAX}\,e^{-\frac{T}{\tau}(1-\alpha)}}$$

II-2-3- Relation entre les tensions d’entrée et de sortie

On a

$$u(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow u(t)\,dt = Ri(t)\,dt + L\,di(t) \Rightarrow \int_0^T u(t)\,dt = \int_0^T Ri(t)\,dt + \int_0^T L\,di(t)$$

En régime établi, la tension moyenne aux bornes de l’inductance est, nulle

$$\text{Donc } U = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,dt = \frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} E\,dt = E\frac{\alpha T}{T} = \alpha E \Rightarrow \mathbf{U = \alpha E} \quad \text{et} \quad \mathbf{I = \frac{\alpha E}{R}}$$

Le hacheur série est, équivalent à un transformateur non réversible à courant continu de rapport de transformation α avec $\alpha \leq 1$.

II-2-4- Ondulation du courant

Il est, important pour un hacheur , d’apprécier l’importance de l’ondulation du courant.
On a :

$$I_{MAX} = I_{MIN}\,e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right) \quad (1)$$

$$I_{MAX} = I_{MIN}\,e^{\frac{T}{\tau}(1-\alpha)} \quad (2)$$

$$\text{donc } (1)\text{-}(2) = I_{MIN}\,e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{R}\left(1 - e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right) = I_{MIN}\,e^{\frac{T}{\tau}(1-\alpha)} = 0$$

$$\Rightarrow I_{MIN}\, e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\left(1-e^{\frac{T}{\tau}}\right)=-\frac{E}{R}\left(1-e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right) \quad \Rightarrow I_{MIN}=-\frac{E}{R}\frac{\left(1-e^{-\frac{\alpha T}{\tau}}\right)}{\left(1-e^{\frac{T}{\tau}}\right)}e^{\frac{\alpha T}{\tau}} \quad \Rightarrow I_{MIN}=\frac{E}{R}\frac{\left(1-e^{\frac{\alpha T}{\tau}}\right)}{\left(1-e^{\frac{T}{\tau}}\right)}$$

$$\text{donc} \quad I_{MIN}=\frac{E}{R}\frac{\left(1-e^{\frac{\alpha T}{\tau}}\right)}{\left(1-e^{\frac{T}{\tau}}\right)} \qquad \text{et} \qquad I_{MAX}=I_{MIN}\, e^{\frac{T}{\tau}(1-\alpha)}$$

On considère L très élevée donc $\tau \gg T$ donc les morceaux d'exponentielle sont des segments de droites ce qui permet un calcul simplifié des courant IMAX et IMIN (car $\varepsilon^{\varepsilon} = 1 + \varepsilon$ si $\varepsilon \gg 1$).

$$\text{Ce qui donne:} \quad I_{MIN}=\frac{\alpha E}{R} \quad \text{et} \quad I_{MAX}= I_{MIN}\left(1+\frac{T}{\tau}(1-\alpha)\right)$$

$$\text{Donc} \quad I_{MAX}=\frac{\alpha E}{R}\left(1+\frac{T}{\tau}(1-\alpha)\right)$$

Il est alors facile de calculer l'ondulation ΔI crête à crête:

$$\Delta I = I_{MAX}-I_{MIN}=\frac{\alpha E}{R}\left(1+\frac{T}{\tau}(1-\alpha)\right)-\frac{\alpha E}{R} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{\Delta I=\frac{\alpha E}{R}\,\frac{T}{\tau}(1-\alpha)}$$

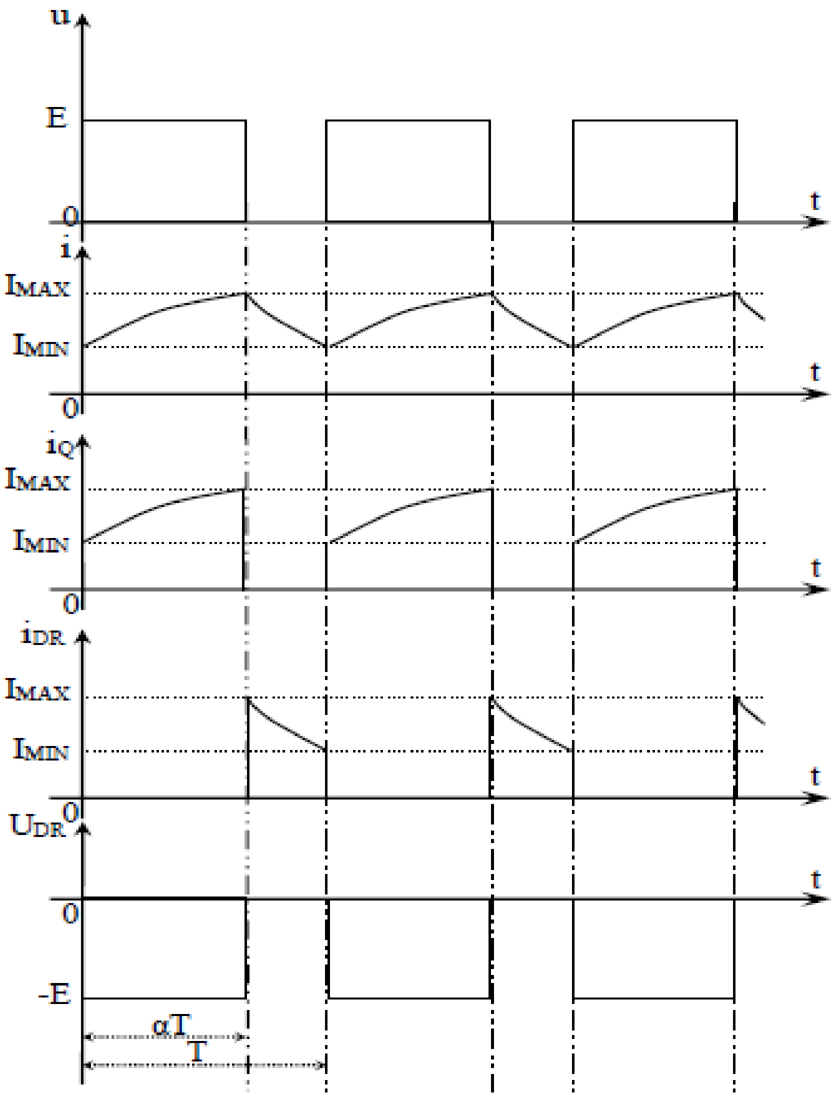
$$\text{Calcul de } \Delta I_{MAX}: \text{ on a } \tau=\frac{L}{R} \quad \Rightarrow \quad \Delta I=\frac{TE}{L}\alpha(1-\alpha) \quad \Rightarrow \quad \Delta I' =\frac{TE}{L}(1-2\alpha)=0$$

Donc ΔI est maximum pour α =0,5

$$\Rightarrow \quad \mathbf{\Delta I_{MAX}=\frac{TE}{4L}=\frac{E}{4Lf}}$$

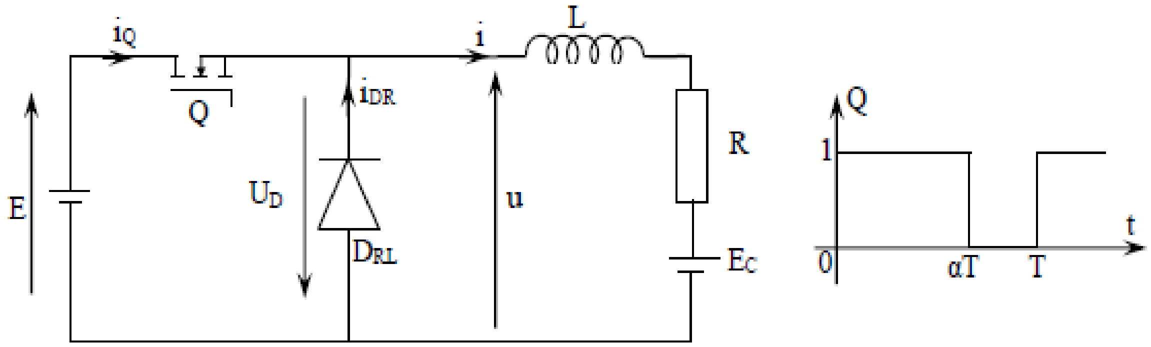
Ainsi, pour réduire l'ondulation du courant doit-on agir sur les paramètres suivants :
■ Augmentation de la fréquence de hachage f.
■ Augmentation de la constante de temps τ du récepteur.
■ Réduction de la durée relative des intervalles de coupure
En fin, dans le cas particulier où l'inductance est, infinie, on a IC = IMIN = IMAX.

II-2-5- Forme d'ondes des principales grandeurs



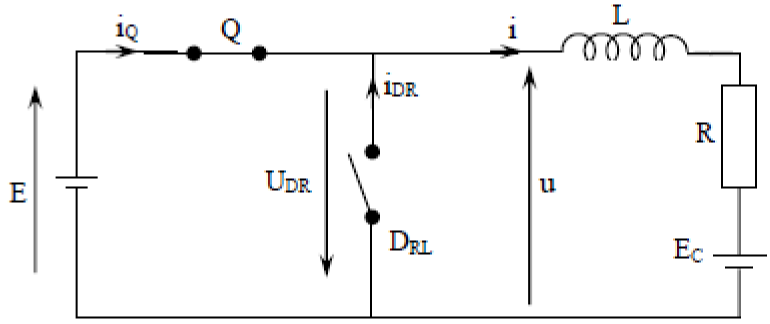
II-3-Etude d’un hacheur série charge R, Let EC.
Quand on alimente un récepteur qui comporte une f.e.m (E_C) la conduction peut être soit continue, soit discontinue.

II-3-1- Conduction continue :
II-3-1-1- Montage



II-3-1-2- Analyse du fonctionnement
Généralement l’inductance L de la source de courant, à une valeur suffisamment élevée pour que la valeur moyenne I du courant i(t), au-dessous de laquelle la conduction devient discontinue, soit telle qu’elle rend RI négligeable par rapport à U
Nous pouvons décomposer cette analyse en deux parties distinctes :

- **1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, DRL ouverte).**



On’ a : $U_{DR} = -E$
$u = E$
$i_Q = i$
$i_{DR} = 0$
et $E = E_c + Ri(t) + L\dfrac{di(t)}{dt}$

Déterminons le courant i(t) : on a $E >> Ri(t)$ donc $E = E_C + L\frac{di(t)}{dt}$ avec $i(0) = I_{MIN}$ et $i(\alpha T) = I_{MAX}$

$$E = E_C + L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow E - E_C = L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow di(t) = \frac{E - E_C}{L}dt \Rightarrow \int di(t) = \int \frac{E - E_C}{L}dt$$

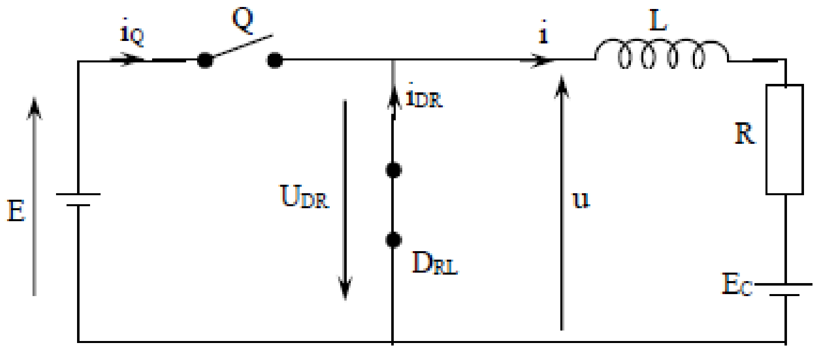
$$\text{donc } i(t) = \frac{E - E_C}{L}t + K \quad \text{à } t = 0 \quad \text{on a} \quad i(0) = I_{MIN} = K$$

$$\text{donc } \mathbf{i(t) = \frac{E - E_C}{L}t + I_{MIN}}$$

calcul de I_{MAX} ?

$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a } i(\alpha T) = I_{MAX} = \frac{E - E_C}{L}\alpha T + I_{MIN} \Rightarrow \mathbf{I_{MAX} = \frac{E - E_C}{L}\alpha T + I_{MIN}}$$

- **2[éme] cas : $\alpha T < t < T$ (Q ouvert, DRL fermée).**



On' a : $\mathbf{U_{DR} = 0}$
$\mathbf{u = 0}$
$\mathbf{i_Q = 0}$
$\mathbf{i_{DR} = i}$
et $\mathbf{0 = E_C + L\frac{di(t)}{dt}}$

Déterminons le courant i(t) : on a

$0 = E_C + L\frac{di(t)}{dt}$ avec $i(T) = I_{MIN}$ et $i(\alpha T) = I_{MAX}$

$$0 = E_C + L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow E_C = -L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow di(t) = -\frac{E_C}{L}dt \Rightarrow \int di(t) = \int -\frac{E_C}{L}dt$$

$$\text{donc } i(t) = -\frac{E_C}{L}t + K$$

$$\text{à } t = \alpha T \quad \text{on a} \quad i(\alpha T) = I_{MAX} = -\frac{E_C}{L}\alpha T + K \Rightarrow K = I_{MAX} + \frac{E_C}{L}\alpha T$$

$$\text{donc } i(t) = -\frac{E_C}{L}t + I_{MAX} + \frac{E_C}{L}\alpha T \Rightarrow i(t) = -\frac{E_C}{L}t + I_{MAX} + \frac{E_C}{L}\alpha T$$

$$\mathbf{i(t) = -\frac{E_C}{L}(t - \alpha T) + I_{MAX}}$$

Calcul de IMIN ?

$$\text{à } t = T \text{ on a } i(T) = I_{MIN} = -\frac{E_C}{L}T(1 - \alpha) + I_{MAX} \Rightarrow \mathbf{I_{MIN} = -\frac{E_C}{L}T(1 - \alpha) + I_{MAX}}$$

II-3-1-3- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie

Si u(t) désigne la tension aux bornes de la charge qui comporte une résistance R, une inductance L et EC (f.é.m) on a :

$$u(t)=E_c+Ri(t)+L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow u(t)\,dt=(E_c+Ri(t))\,dt+L\,di(t) \Rightarrow \int_0^T u(t)\,dt=\int_0^T (E_c+Ri(t))\,dt+\int_0^T L\,di(t)$$

En régime établi, la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, donc :

$$U=\frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,dt=\frac{1}{T}\int_0^{\alpha T} E\,dt=E\frac{\alpha T}{T}=\alpha E \Rightarrow \mathbf{U=\alpha E} \quad \text{et} \quad \mathbf{I=\frac{\alpha E-E_c}{R}}$$

II-3-1-4- Ondulation du courant

Il est, important pour un hacheur, d'apprécier l'importance de l'ondulation du courant.
On a :

$$\mathbf{I_{MAX}=\frac{E-E_c}{L}\alpha T+I_{MIN}} \qquad \mathbf{I_{MIN}=-\frac{E_c}{L}T(1-\alpha)+I_{MAX}}$$

$$\text{Donc on a}\quad \frac{E-E_c}{L}\alpha T=\frac{E_c}{L}T(1-\alpha) \Rightarrow \alpha E-\alpha E_c=E_c-\alpha E_c \Rightarrow \mathbf{E_c=\alpha E}$$

Donc

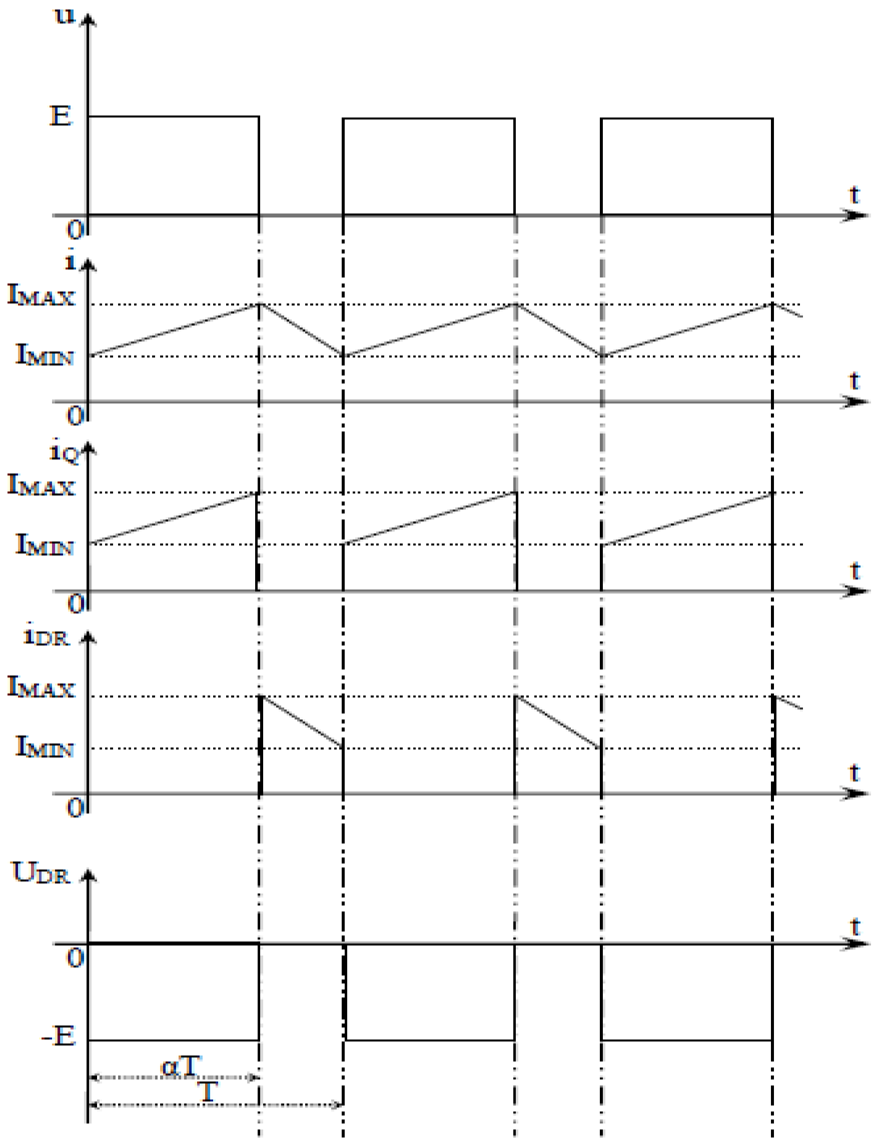
$$\Delta I=I_{MAX}-I_{MIN}=\frac{E}{L}T\,\alpha(1-\alpha) \Rightarrow \mathbf{\Delta I=\frac{E}{Lf}\alpha(1-\alpha)}$$

Comme on l'a montré, cette ondulation est, maximale pour $\alpha = 0{,}5$

$$\mathbf{\Delta I_{MAX}=\frac{T\,E}{4L}=\frac{E}{4Lf}}$$

Ainsi, pour réduire l'ondulation du courant doit-on agir sur la fréquence de hachage f.

II-3-1-5- Forme d'ondes des principales grandeurs

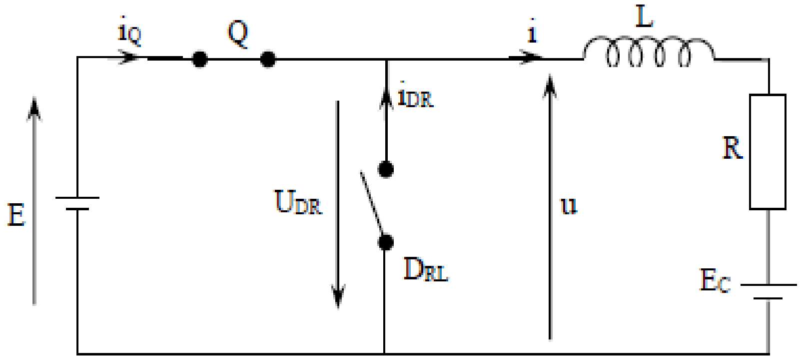


II-3-2- Conduction discontinue :

la conduction est, discontinue si la valeur minimale IMIN du courant s'annule à chaque période à $t = \beta T$ pour $\beta T \in [\ \alpha T,\ T\ ]$; soit $i(\beta T) = 0$.

II-3-2-1- Analyse du fonctionnement

■ 1er cas : 0 < t < αT (Q fermé, DRL ouverte).



On' a : $U_{DR} = -E$

$u = E$

$i_Q = i$

$i_{DR} = 0$

et $E = E_c + Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt}$

Déterminons le courant i(t) : on a

$$E \gg Ri(t) \text{ donc } E = E_c + L\frac{di(t)}{dt} \text{ avec } i(0) = 0 \text{ et } i(\alpha T) = I_{MAX}$$

$$E = E_c + L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow E - E_c = L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow di(t) = \frac{E - E_c}{L}dt \Rightarrow \int di(t) = \int \frac{E - E_c}{L}dt$$

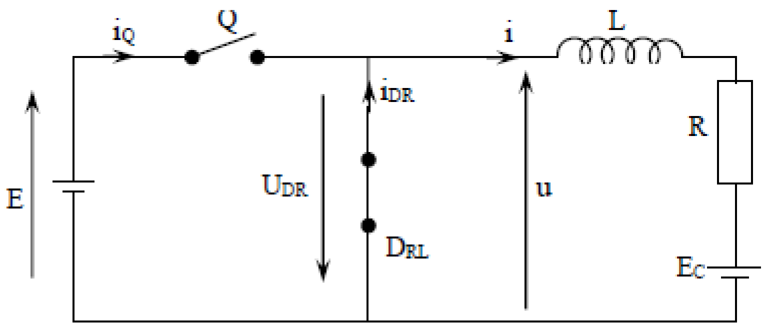
$$\text{donc } i(t) = \frac{E - E_c}{L}t + K \quad \text{à } t = 0 \quad \text{on a} \quad i(0) = 0 = K$$

$$\text{donc } i(t) = \frac{E - E_c}{L}t$$

Calcul de IMAX ?

$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a } i(\alpha T) = I_{MAX} = \frac{E - E_c}{L}\alpha T \quad \Rightarrow \quad I_{MAX} = \frac{E - E_c}{L}\alpha T$$

■ 2éme cas : αT < t < βT (Q ouvert, DRL fermée).



On' a : $U_{DR} = 0$

$u = 0$

$i_Q = 0$

$i_{DR} = i$

et $0 = E_c + L\frac{di(t)}{dt}$

Déterminons le courant i(t) : on a

$$0 = E_c + L\frac{di(t)}{dt} \text{ avec } i(T) = I_{MIN} \text{ et } i(\alpha T) = I_{MAX}$$

$$0 = E_C + L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow E_C = -L\frac{di(t)}{dt} \Rightarrow di(t) = -\frac{E_C}{L}dt \Rightarrow \int di(t) = \int -\frac{E_C}{L}dt$$

$$\text{donc } i(t) = -\frac{E_C}{L}t + K$$

$$\text{à } t = \alpha T \quad \text{on a} \quad i(\alpha T) = I_{MAX} = -\frac{E_C}{L}\alpha T + K \Rightarrow K = I_{MAX} + \frac{E_C}{L}\alpha T$$

$$\text{donc } i(t) = -\frac{E_C}{L}t + I_{MAX} + \frac{E_C}{L}\alpha T \Rightarrow i(t) = -\frac{E_C}{L}t + I_{MAX} + \frac{E_C}{L}\alpha T$$

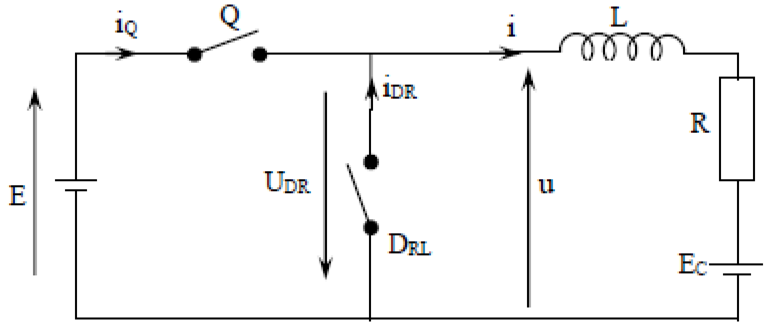
$$i(t) = -\frac{E_C}{L}(t - \alpha T) + I_{MAX}$$

Calcul de IMIN ?

$$\text{à } t = \beta T \text{ on a } i(\beta T) = 0 = -\frac{E_C}{L}T(\beta - \alpha) + I_{MAX}$$

$$\Rightarrow I_{MAX} = \frac{E_C}{L}T(\beta - \alpha)$$

■ **3éme cas : $\beta T < t < T$ (Q ouvert, DRL fermée).**



On' a : $U_{DR} = -E_C$
$u = E_C$
$i_Q = 0$
$i_{DR} = 0$
et $i = 0$

II-3-2-2- Ondulation du courant

Il est important, pour un hacheur , d'apprécier l'importance de l'ondulation du courant.

$$\text{On a : } \quad I_{MAX} = \frac{E_C}{L}T(\beta - \alpha) = \frac{(E - E_C)}{L}\alpha T \quad \text{et} \quad I_{MIN} = 0$$

$$\text{donc} \quad \Delta I = I_{MAX} - I_{MIN} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Delta I = I_{MAX}$$

II-3-2-3- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie

$$\text{On a} \quad I_{MAX} = \frac{Ec}{L}T(\beta - \alpha) = \frac{(E\text{-}Ec)}{L}\alpha T \quad \Rightarrow \quad Ec\beta - Ec\alpha = E\alpha - Ec\alpha \quad \Rightarrow \quad Ec\beta = E\alpha$$

$$\text{Donc} \quad \beta = \alpha\frac{E}{Ec}$$

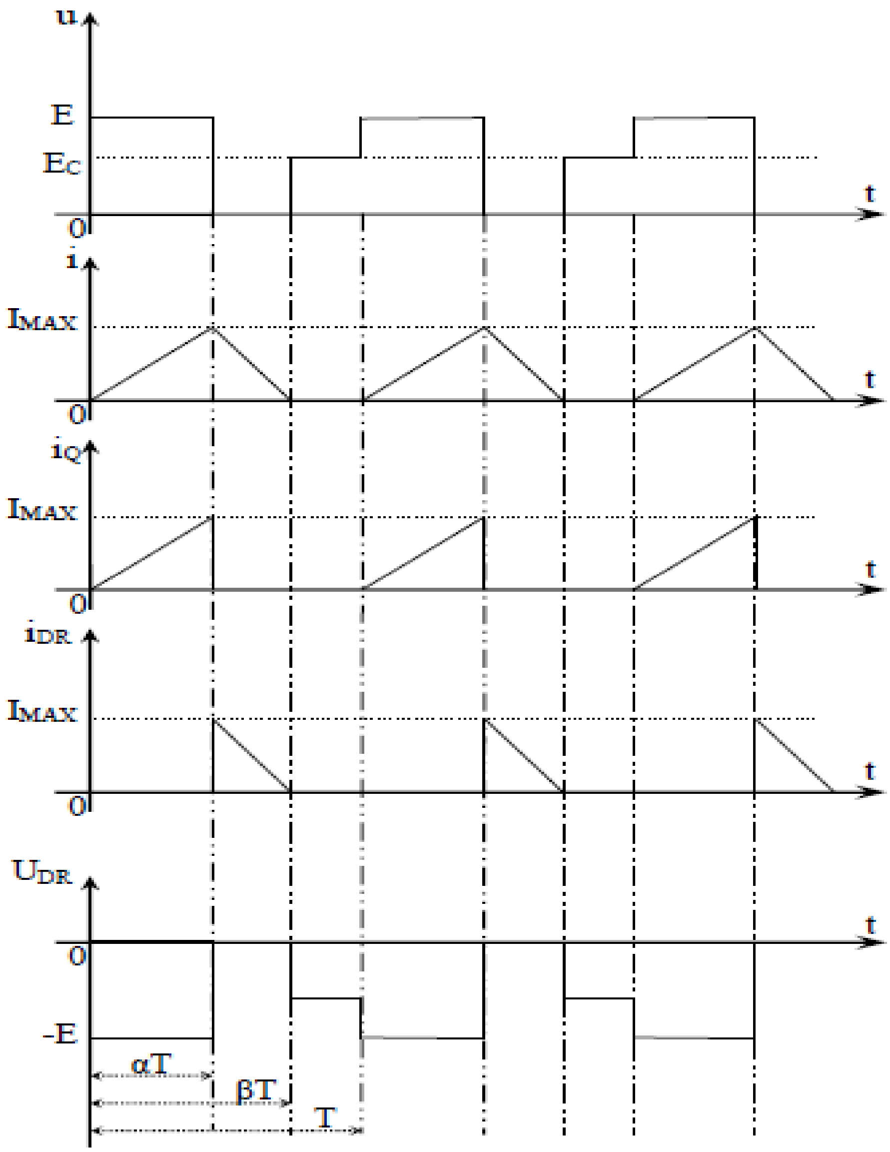
Il est, alors possible de calculer la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge on a :

$$U\,T = E\alpha T + (T - \beta T)Ec \;\Rightarrow\; U = E\alpha + (1-\beta)Ec \quad \text{on a } \beta = \alpha\frac{E}{Ec}$$

$$\text{donc } U = E\alpha + \left(1 - \alpha\frac{E}{E_C}\right)E_C = E\alpha + E_C - E\alpha$$

$$\Rightarrow \quad U = Ec$$

II-3-2-4- Forme d'ondes des principales grandeurs



II-3-2-5- Valeur moyenne du courant i(t).

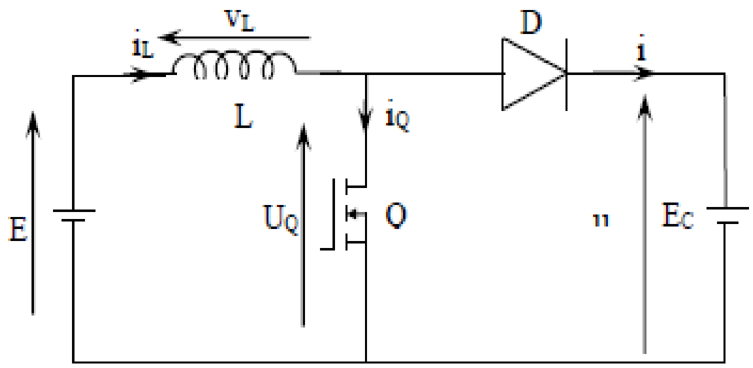
On peut également calculer la valeur moyenne du courant puisque le graphe est un triangle on a :

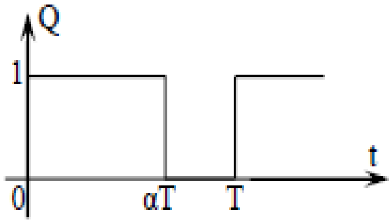
$$I\,T = I_{MAX}\frac{\beta}{2}T \quad \text{avec} \quad I_{MAX} = \frac{E - E_C}{L}\alpha T \quad \Rightarrow \quad I = \frac{(E - E_C)}{2L}\alpha\beta T \quad \text{de plus on a} \quad \beta = \alpha\frac{E}{E_C}$$

$$\Rightarrow I = \frac{\alpha^2}{2L}E\,T\left(\frac{E}{E_C} - 1\right)$$

III- Hacheur parallèle ou élévateur de tension
III-1-Principe
Le hacheur parallèle permet de varier le courant fourni par une source de courant I dans un récepteur de tension U.
Ce hacheur est, constitué d’un interrupteur à ouverture commandée en parallèle avec le récepteur et d’un interrupteur à fermeture et ouverture spontanée entre la source et le récepteur.

II-2-Montage





Dans ce cas , E est, une f.é.m comme dans le cas précédent mais elle est, à présent en série avec une inductance L (dans un premier temps on néglige sa résistance propre R) donc une source de courant qui débitent dans une source de tension E_C et que la diode D empêche tout retour de courant vers la source.

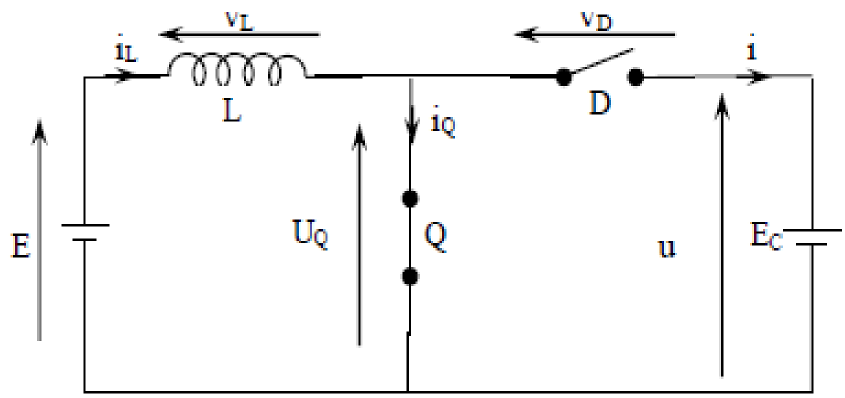
III-3-Etude d’un hacheur parallèle
III-3-1- Conduction continue
Généralement l’inductance L de la source de courant, à une valeur suffisamment élevée pour que la valeur moyenne I_L du courant $i_L(t)$, au dessous de laquelle la conduction devient discontinu, soit telle qu’elle rend RI_L négligeable par rapport à E.

III-3-1-1- Analyse du fonctionnement
Nous pouvant décomposer cette analyse en deux parties distinctes :

■1^er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, D ouverte).

Université Internationale de Casablanca

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES



On' a : $U_Q = 0$

$v_D = -E_C$

$i_Q = i_L$

$i_D = 0$

et $E = v_L = L\dfrac{di_L(t)}{dt}$

Déterminons le courant $i_L(t)$: on a $E \gg Ri_L(t)$ donc $E = L\dfrac{di_L(t)}{dt}$ avec $i_L(0) = I_{LMIN}$ et $i_L(\alpha T) = I_{LMAX}$

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

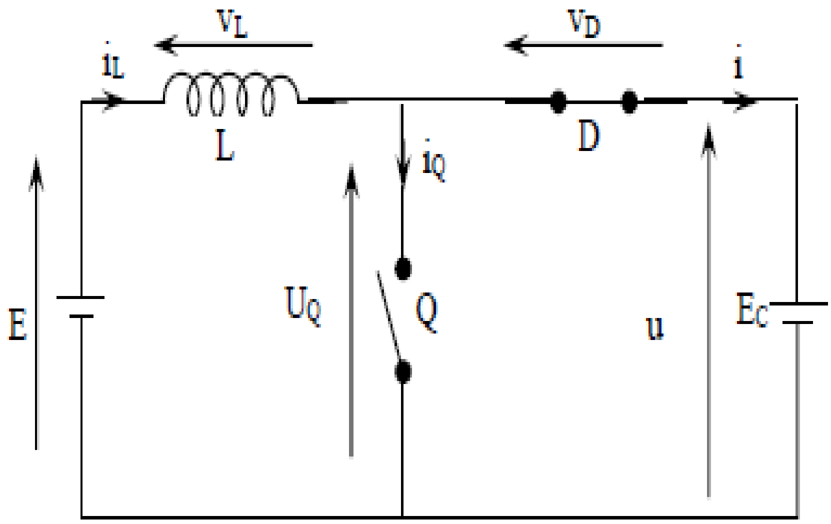
$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E}{L}t + K \qquad \text{à } t = 0 \quad \text{on a} \quad i_L(0) = I_{LMIN} = K$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_{LMIN}$$

calcul de I_{LMAX} ?

$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a } i(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E}{L}\alpha T + I_{LMIN} \qquad I_{LMAX} = \frac{E}{L}\alpha T + I_{LMIN}$$

■**2^{éme} cas : $\alpha T < t < T$ (Q ouvert, D fermée).**



On' a : $U_Q = E_C$

$v_D = 0$

$i_Q = 0$

$i_D = i_L$

et $v_L = E - E_C = L\dfrac{di_L(t)}{dt}$

Déterminons le courant $i_L(t)$:

$$E = E_c + L\frac{di_L(t)}{dt} \quad \text{avec } i_L(\alpha T) = I_{LMAX} \text{ et } i_L(T) = I_{LMIN}$$

$$E = E_c + L\frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow E - E_c = -L\frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow di_L(t) = \frac{E - E_c}{L}dt \Rightarrow \int di_L(t) = \int \frac{E - E_c}{L}dt$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E - E_c}{L}t + K$$

$$\text{à } t = \alpha T \quad \text{on a} \quad i_L(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E - E_c}{L}\alpha T + K \Rightarrow K = I_{LMAX} - \frac{E - E_c}{L}\alpha T$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E - E_c}{L}t + I_{LMAX} - \frac{E - E_c}{L}\alpha T \Rightarrow i_L(t) = \frac{E - E_c}{L}(t - \alpha T) + I_{LMAX}$$

calcul de I_{LMIN} ?

$$\text{à } t = T \text{ on a } i_L(T) = I_{LMIN} = \frac{E - E_c}{L}T(1 - \alpha) + I_{LMAX} \Rightarrow I_{LMIN} = \frac{E - E_c}{L}T(1 - \alpha) + I_{LMAX}$$

III-3-1-2- Ondulation du courant dans l'inductance

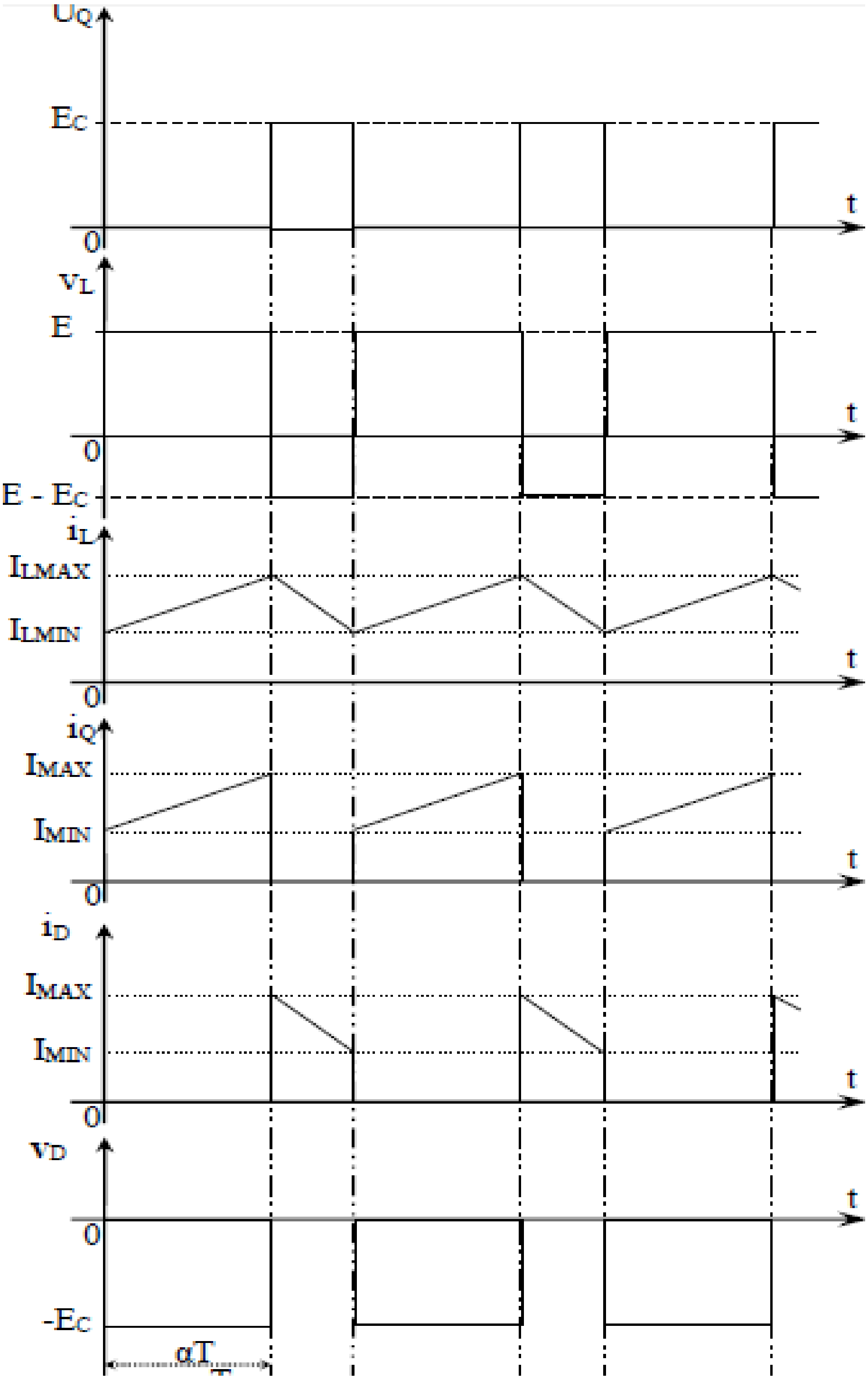
Il est important, pour un hacheur parallèle, d'apprécier l'importance de l'ondulation du courant dans l'inductance.

On a :

$$I_{LMAX} = \frac{E}{L}\alpha T + I_{LMIN} \qquad \text{Donc on a} \qquad I_{LMAX} - I_{LMIN} = \frac{E}{L}\alpha T$$

$$\Rightarrow \Delta I_L = I_{LMAX} - I_{LMIN} = \frac{E}{L}\alpha T \Rightarrow \Delta I_L = \frac{E}{Lf}\alpha$$

III-3-1-3- Forme d'ondes des principales grandeurs


U_Q
E_C
0
t
v_L
E
0
t
E - E_C
i_L
I_{LMAX}
I_{LMIN}
0
t
i_Q
I_{MAX}
I_{MIN}
0
t
i_D
I_{MAX}
I_{MIN}
0
t
v_D
0
t
$-E_C$
αT

III-3-1-4- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie

En régime établi, la tension moyenne aux bornes de l'inductance est, nulle. Donc :

$$U_L = \frac{1}{T}\int_0^T u_L(t)\,dt = 0 = \frac{1}{T}\left[(E\alpha T) + (T - \alpha T)(E - E_C)\right] = (E\alpha) + (1-\alpha)(E - E_C) = E\alpha + E - E_C - \alpha E + \alpha E_C = 0$$

$$E - E_C + \alpha E_C = 0 \Rightarrow E_C(1-\alpha) = E \quad \Rightarrow \quad E_C = \frac{E}{(1-\alpha)}$$

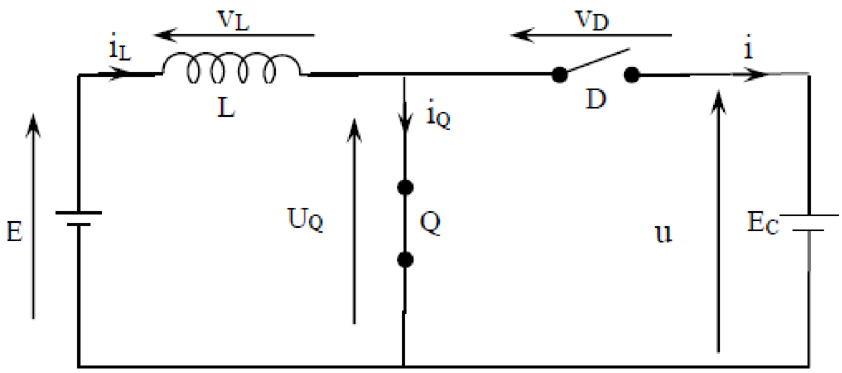
III-3-3- Conduction discontinue :

La conduction est, discontinue si la valeur minimale I_{LMIN} du courant s'annule à chaque période à $t = \beta T$ pour $\beta T \in [\,\alpha T, T\,]$; soit $i(\beta T) = 0$.

III-3-3-1- Analyse de fonctionnement

Nous pouvant décomposer cette analyse en 3 parties distinctes :

■1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, D ouverte)



On' a : $U_Q = 0$

$v_D = -E_C$

$i_Q = i_L$

$i_D = 0$

et $E = v_L = L\dfrac{di_L(t)}{dt}$

Déterminons le courant $i_L(t)$:

$$E \gg R i_L(t) \text{ donc } E = L\frac{di_L(t)}{dt} \quad \text{avec } i_L(0) = I_{LMIN} \text{ et } i_L(\alpha T) = I_{LMAX}$$

$$E = L\frac{di_L(t)}{dt} \quad \Rightarrow \quad di_L(t) = \frac{E}{L}dt \quad \Rightarrow \quad \int di_L(t) = \int \frac{E}{L}dt$$

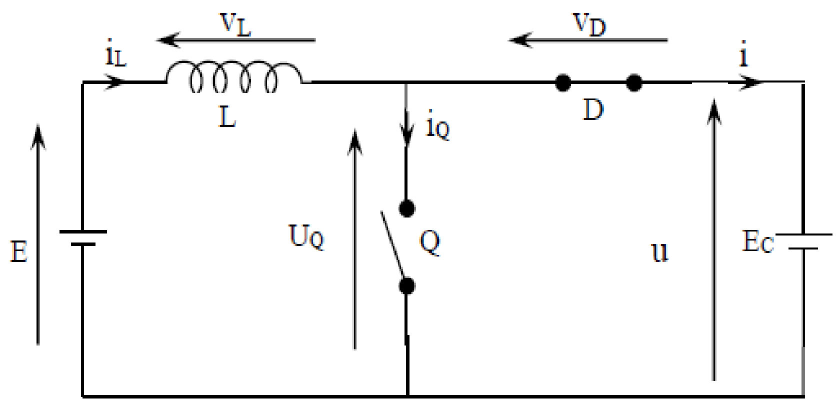
$$\text{donc} \quad i_L(t) = \frac{E}{L}t + K \qquad \text{à} \quad t = 0 \quad \text{on a} \quad i_L(0) = I_{LMIN} = K = 0$$

$$\text{donc} \quad \mathbf{i_L(t) = \frac{E}{L}t}$$

Calcul de I_{LMAX} ?

à $t = \alpha T$ on a $i(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E}{L} \alpha T$ $\quad$ $\mathbf{I_{LMAX} = \frac{E}{L} \alpha T}$

■ **2éme cas : α T < t < β T (Q ouvert, D fermée).**



On' a : $U_Q = E_C$

$v_D = 0$

$i_Q = 0$

$i_D = i_L$

et $v_L = E - E_C = L\frac{di_L(t)}{dt}$

Déterminons le courant $i_L(t)$: on a $E = E_C + L\frac{di_L(t)}{dt}$ avec $i_L(\alpha T) = I_{LMAX}$ et $i_L(\beta T) = 0$

$$E = E_C + L\frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow E - E_C = -L\frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow di_L(t) = \frac{E - E_C}{L}dt \Rightarrow \int di_L(t) = \int \frac{E - E_C}{L}dt$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E - E_C}{L}t + K$$

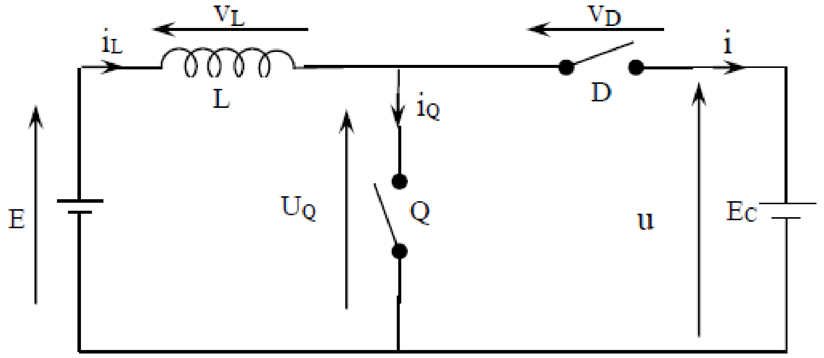
$$\text{à } t = \alpha T \quad \text{on a} \quad i_L(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E - E_C}{L}\alpha T + K \Rightarrow K = I_{LMAX} - \frac{E - E_C}{L}\alpha T$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E - E_C}{L}t + I_{LMAX} - \frac{E - E_C}{L}\alpha T \Rightarrow \mathbf{i_L(t) = \frac{E - E_C}{L}(t - \alpha T) + I_{LMAX}}$$

calcul de I_{LMAX} ?

$$\text{à } t = \beta T \text{ on a } i_L(\beta T) = 0 = \frac{E - E_C}{L}T(\beta - \alpha) + I_{LMAX} \Rightarrow \mathbf{I_{LMAX} = \frac{E_C - E}{L}T(\beta - \alpha)}$$

■ **3éme cas : β T < t < T (Q ouvert, D fermée).**



On' a : $U_Q = E$

$v_D = E - Ec$

$i_Q = 0$

$i_D = 0$

$i_L = 0$

et $v_L = 0$

III-3-2-2- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie

On a $I_{MAX} = \frac{Ec - E}{L} T(\beta - \alpha) = \frac{E}{L}\alpha T \quad \Rightarrow \quad Ec\beta - Ec\alpha - E\beta + E\alpha = E\alpha \quad \Rightarrow \quad Ec(\beta - \alpha) = E\beta$

$$\text{Donc} \quad Ec = \frac{\beta}{\beta - \alpha} E \quad \text{et} \quad \beta = \alpha \frac{Ec}{Ec - E}$$

III-3-2-3- Valeur moyenne du courant i(t).

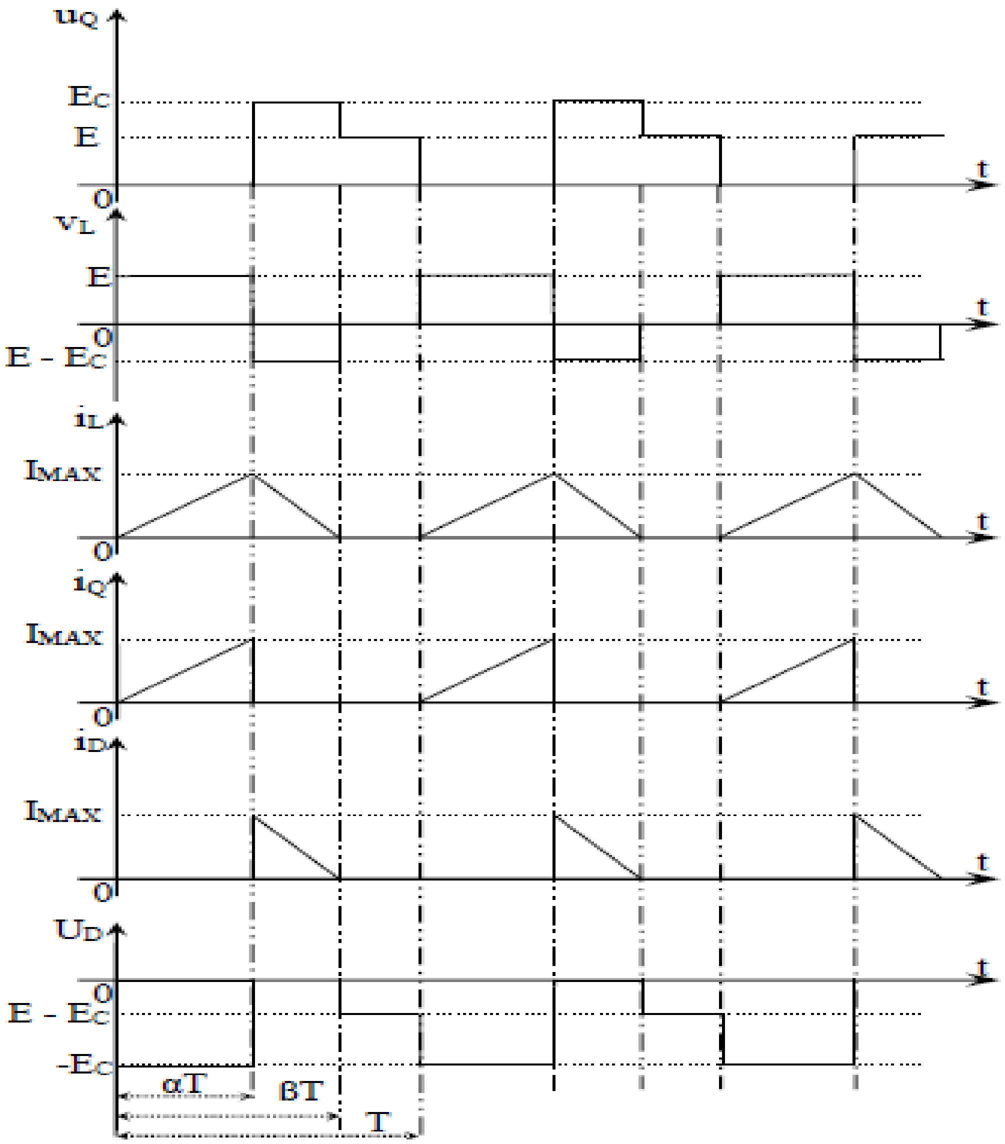
On peut également calculer la valeur moyenne du courant puisque le graphe est un triangle on a :

$$I\,T = I_{MAX}\frac{\beta}{2}T \quad \text{avec} \quad I_{MAX} = \frac{Ec - E}{L}T(\beta - \alpha) \quad \Rightarrow \quad I = \frac{(Ec - E)}{2L}T\beta(\beta - \alpha) \quad \text{de plus on a} \quad \beta = \alpha\frac{Ec}{Ec - E}$$

$$\Rightarrow I = \frac{(Ec - E)T}{2L}\alpha\frac{Ec}{Ec - E}\left(\alpha\frac{Ec}{Ec - E} - \alpha\right) \Rightarrow I = \frac{T}{2L}\alpha Ec\left(\frac{\alpha E}{Ec - E}\right) \Rightarrow I = \frac{T}{2L}\alpha\left(\frac{\alpha E}{1 - \frac{E}{Ec}}\right)$$

$$\Rightarrow I = \frac{\alpha^2}{2L}E\,T\left(\frac{1}{1 - \frac{E}{Ec}}\right)$$

III-3-2-4- Forme d'ondes des principales grandeurs



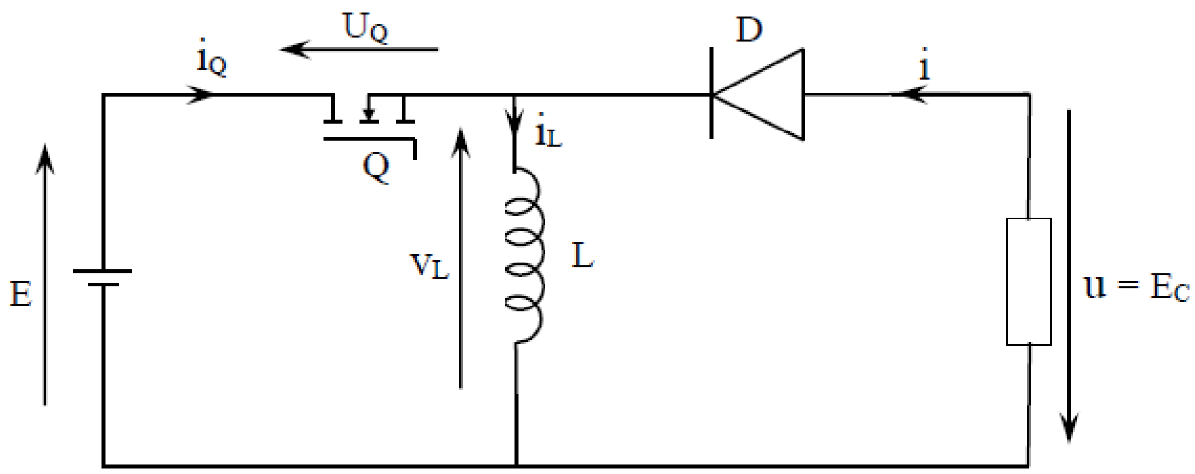
IV- Hacheur à accumulation d'énergie

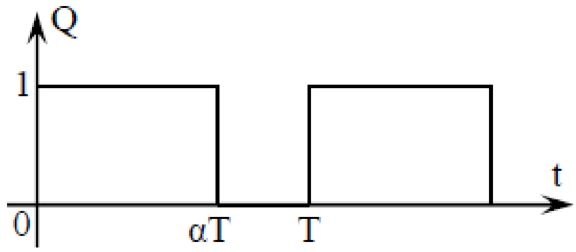
IV-1-Principe

Un autre type de hacheur peut être obtenu par une modification de la structure ; au lieu de partir de la configuration : source de tension + commutateur + source de courant, on intercale, entre les deux, un dispositif qui stocke temporairement l'énergie transférée ou une partie de celle-ci : source 1 + commutateur + élément de stockage + commutateur + source 2.

Cette structure est nommé un hacheur série-parallèle et permettra de réaliser une conversion indirecte d'énergie entre deux générateurs (ou sources) de même type.

IV-2-Montage





IV-3-Etude d'un hacheur à accumulation d'énergie

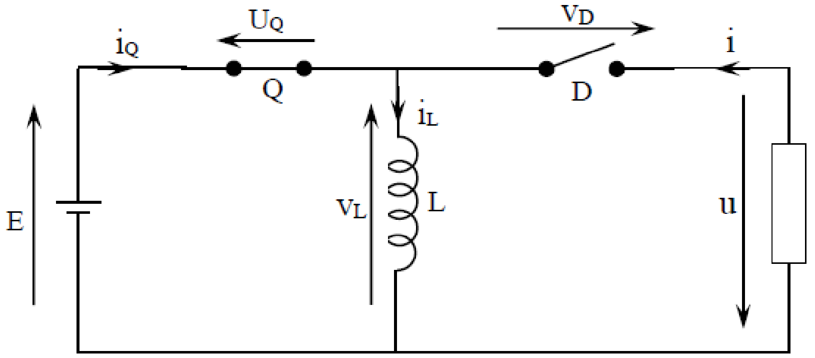
Comme dans ce qui précède, on étudie le système dans le cadre d'une approximation :

- La charge est, supposée être à tension constante umoy = EC.
- L'inductance de stockage L est, dépourvue de résistance (non-dissipation de l'énergie stockée).

IV-3-1- Analyse du fonctionnement

Les deux phases de fonctionnement sont :

■1er phase : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, D ouverte).



On' a : $U_Q = 0$

$v_D = -E_C - E$

$i_Q = i_L$

$i_D = 0$

et $E = v_L = L\dfrac{di_L(t)}{dt}$

Déterminons le courant iL (t) : on a

$$E >> Ri_L(t) \text{ donc } E = L\frac{di_L(t)}{dt} \text{ avec } i_L(0) = I_{LMIN} \text{ et } i_L(\alpha T) = I_{LMAX}$$

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

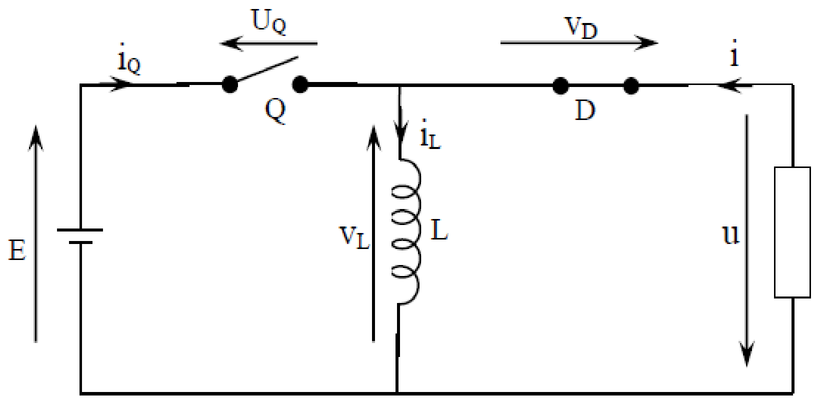
$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E}{L}t + K \quad \text{à } t = 0 \text{ on a } i_L(0) = I_{LMIN} = K$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E}{L}t + I_{LMIN}$$

calcul de I_{LMAX} ?

$$\text{à } t = \alpha T \text{ on a } i(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E}{L}\alpha T + I_{LMIN} \qquad \mathbf{I_{LMAX} = \frac{E}{L}\alpha T + I_{LMIN}}$$

■2[éme] cas : α T < t < T (Q ouvert, D fermée).



On' a : $U_Q = E_C + E$

$\mathbf{V_D = 0}$

$\mathbf{i_Q = 0}$

$\mathbf{i_D = i_L}$

et $\mathbf{V_L = -E_C = L\frac{di_L(t)}{dt}}$

Déterminons le courant $i_L(t)$: on a

$$E = E_C + L\frac{di_L(t)}{dt} \quad \text{avec } i_L(\alpha T) = I_{LMAX} \text{ et } i_L(T) = I_{LMIN}$$

$$E = E_C + L\frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow E - E_C = -L\frac{di_L(t)}{dt} \Rightarrow di_L(t) = \frac{E - E_C}{L}dt \Rightarrow \int di_L(t) = \int \frac{E - E_C}{L}dt$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E - E_C}{L}t + K$$

$$\text{à } t = \alpha T \quad \text{on a} \quad i_L(\alpha T) = I_{LMAX} = \frac{E - E_C}{L}\alpha T + K \Rightarrow K = I_{LMAX} - \frac{E - E_C}{L}\alpha T$$

$$\text{donc } i_L(t) = \frac{E - E_C}{L}t + I_{LMAX} - \frac{E - E_C}{L}\alpha T \Rightarrow \mathbf{i_L(t) = \frac{E - E_C}{L}(t - \alpha T) + I_{LMAX}}$$

calcul de I_{LMIN} ?

$$\text{à } t = T \text{ on a } i_L(T) = I_{LMIN} = \frac{E - E_C}{L}T(1-\alpha) + I_{LMAX} \Rightarrow \mathbf{I_{LMIN} = \frac{E - E_C}{L}T(1-\alpha) + I_{LMAX}}$$

IV-3-2- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie

En régime établi, la tension moyenne aux bornes de l'inductance est, nulle.

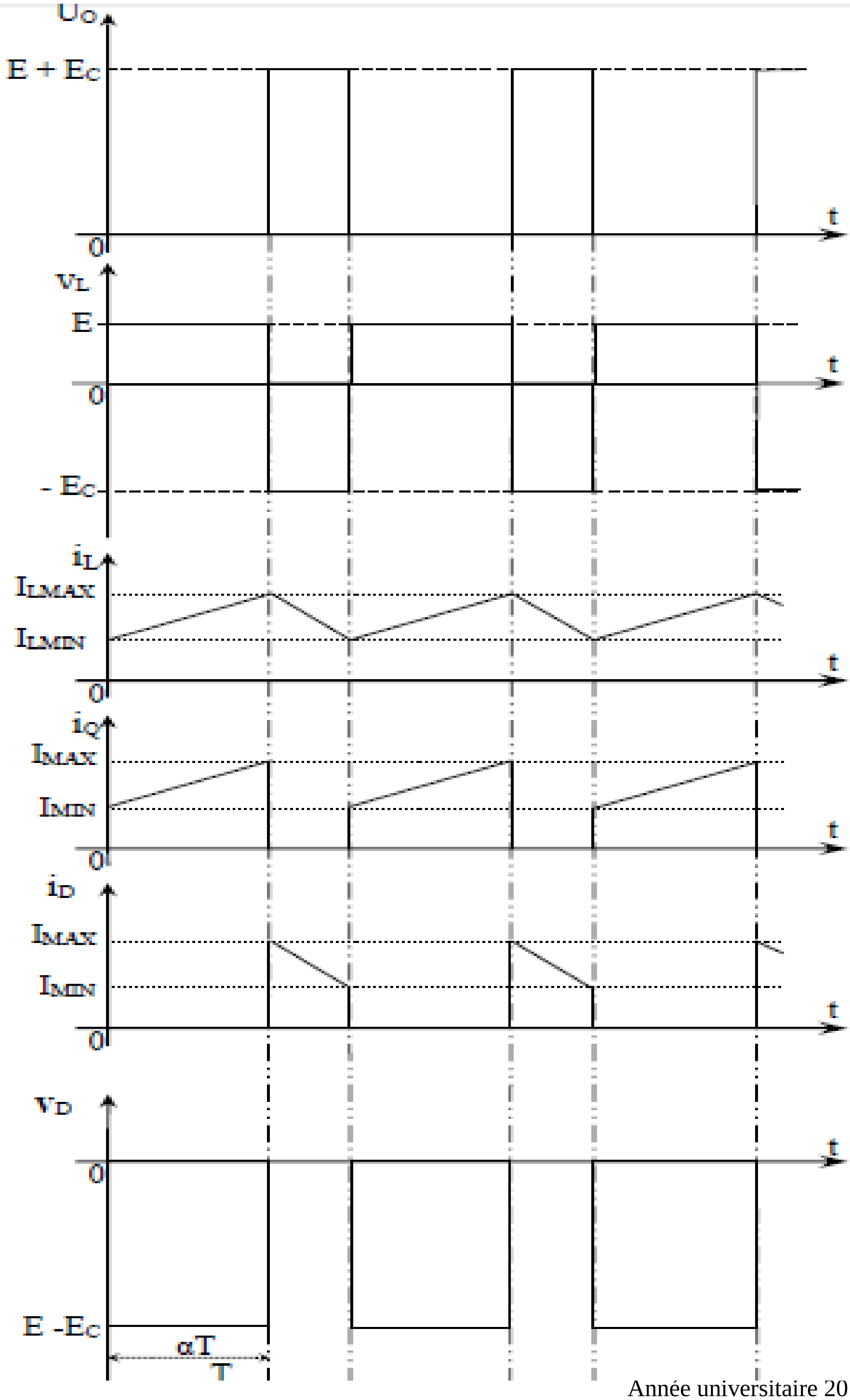
Donc :

$$U_L = \frac{1}{T}\int_0^T u_L(t)\,dt = 0 = \frac{1}{T}[(E\alpha T) + (T - \alpha T)(-E_C)] = (E\alpha) + (1-\alpha)(-E_C) = E\alpha - E_C + \alpha E_C = 0$$

$$\Rightarrow E_C(1-\alpha) = \alpha E \quad \Rightarrow \quad \mathbf{\frac{E_C}{E} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}}$$

Si le rapport cyclique est, inférieur à 0,5 : abaisseur.
Si le rapport cyclique est, supérieur à 0,5 : élévateur.

IV-3-3- Forme d'ondes des principales grandeurs


UO
E + EC
t
0
VL
E
-EC
iL
ILMAX
ILMIN
iQ
IMAX
IMIN
iD
VD
E -EC
αT
T

V- Transfert d'énergie et réversibilité

V-1- Calcule de puissance

Dans les cas précédents hacheur série et hacheur parallèle la puissance moyenne disponible à la charge est, celle qui a été prise à la source, le rendement étant égal à un. Cette puissance varie avec le rapport cyclique α.

<u>Hacheur série :</u>

On a démontré que :

$$E_C = \alpha E \quad , \quad I_Q = \alpha \frac{I_{MAX} + I_{MIN}}{2} \quad \text{et} \quad I = \frac{I_{MAX} + I_{MIN}}{2} = \frac{I_Q}{\alpha}$$

Donc la puissance moyenne prise à la source :

$$P_1 = E\, I_Q = E\, \alpha\, I = P_2 \quad \text{Car } P_2 = E_C\, I = \alpha\, E\, I$$

<u>Hacheur survolteur :</u>

On a démontré que :

$$E_C = \frac{E}{1-\alpha} \quad , \quad I_L = \frac{I_{MAX} + I_{MIN}}{2} \quad \text{et} \quad I = (1-\alpha)\frac{I_{MAX} + I_{MIN}}{2} = I_L\,(1-\alpha)$$

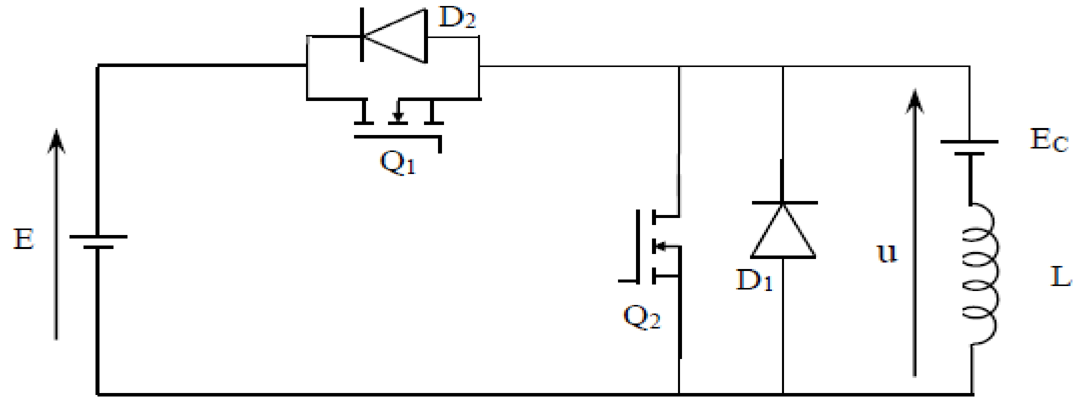
Donc la puissance moyenne prise à la source :

$$P_1 = E\, I_L = E\, \frac{I}{1-\alpha} = P_2 \quad \text{Car } P_2 = E_C\, I = \frac{E}{1-\alpha}\, I$$

Dans les deux cas les transferts d'énergie s'effectuent de la source vers la charge pour toute valeur du rapport cyclique.
Si on veut un transfert d'énergie en sens inverse il sera donc nécessaire d'associer deux structures du type précédent et en outre, d'adopter pour chacune d'elle une politique de gestion de la commande.

V-2- Hacheurs réversibles en courant

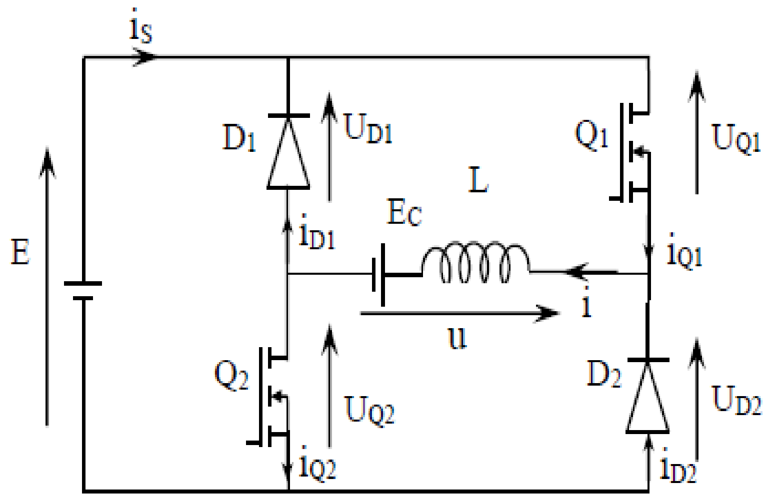
V-2-1- Montage

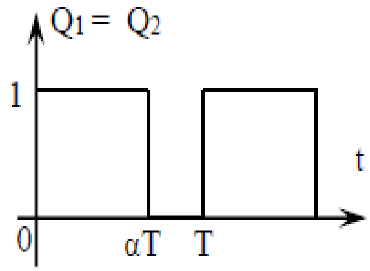


V-2-2-Etude d'un hacheur réversible en courant
On peut, sur cette structure, envisager différents types de fonctionnement :
■1^er^ phase: Q_1 est commandé et Q_2 non commandé (ouvert), D_1 concernée et D_2 ne l'est, pas. C'est, le fonctionnement en hacheur série.
■2^éme^ phase: Q_2 est commandé et Q_1 non commandé (ouvert), D_2 concernée et D_1 ne l'est, pas. C'est, le fonctionnement en hacheur parallèle.

V-3- Hacheurs réversibles en tension

V-3-1- Montage





V-3-2-Etude d'un hacheur réversible en tension
On peut, sur cette structure, envisager différents types de fonctionnement :
■ 1^er^ phase $0 < t < \alpha T$: Q1 et Q2 sont commandés (fermés), D1 et D2 sont ouvertes. C'est, le fonctionnement en hacheur série.
■ 2^éme^ phase $\alpha T < t < T$: Q1 et Q2 ne sont pas commandés (ouverts), D1 et D2 sont fermées. C'est, le fonctionnement en hacheur parallèle.

V-3-3- Relation entre les tensions d'entrée et de sortie
En régime établi, la tension moyenne aux bornes de l'inductance est, nulle.

Donc :

$$U = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,dt = \frac{1}{T}\left[(E\alpha T) + (T - \alpha T)(-E)\right] = (E\alpha) + (1-\alpha)(-E) = E\alpha - E + \alpha E$$

$$\Rightarrow \quad \mathbf{U = E(2\alpha - 1)}$$