

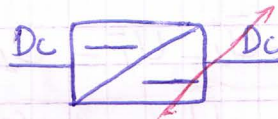
Convertisseurs

Courant Continu - Courant Continu

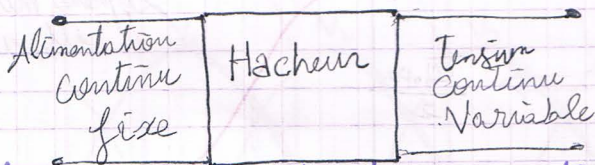
Chapitre II

Les hacheurs (choppers)

Conversion Continu - Continu
Dc to Dc Converter



Rôle :



Le hacheur permet d'obtenir une tension de valeur moyenne réglable à partir d'une tension continue constante.

Utilisation :

Le Hacheur est utilisé essentiellement pour réaliser :

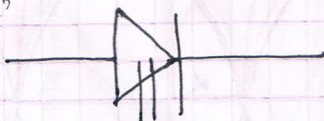
- des Variateur de vitesse pour MCC

Ex : Traction électrique à CC.

- alimentation à découpage.

Mot hacheur : découpeur

Symbole :

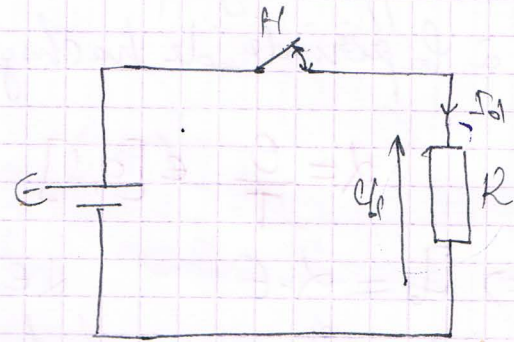


Un hacheur est constitué par un ensemble d'éléments semi-conducteurs modélisé par un interrupteur commandable à l'ouverture et à la fermeture.

1) Hacheur série ou dévolteur = abaisseur de tension - Stép- down chopper -

Quel est le principe du hacheur série ?

Le fonctionnement du hacheur est basé sur l'ouverture et la fermeture cyclique d'un interrupteur statique placé entre la charge et la source.



a) Débit sur une résistance pure :

① Si H est fermé.

$$U_d = E, \quad I_d = \frac{E}{R}$$

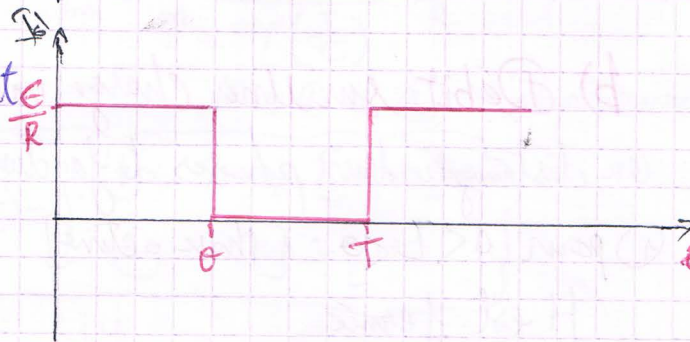
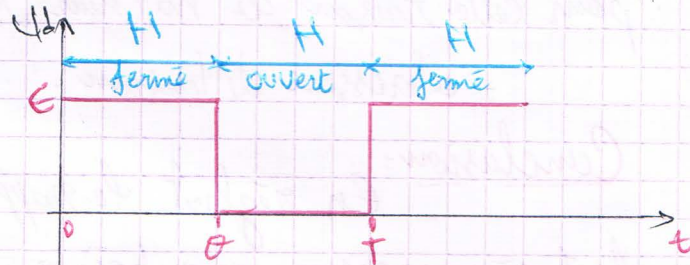
② Si H est ouvert.

$$U_d = 0, \quad I_d = 0$$

Le hacheur est commandé périodiquement sur une période T .

// H est fermé sur $[0, \theta]$

// H est ouvert, sur $[\theta, T]$



La valeur moyenne de la tension de sortie :

$$\bar{U}_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_d(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^\theta E dt$$

$$\bar{U}_d = \frac{E}{T} \cdot \theta = \frac{\theta}{T} \cdot E$$

θ : durée de conduction du hacheur

T : période du hachage.

La valeur moyenne $\bar{U}_d$ varie en faisant varier :

- La durée de conduction θ à fréquence de hachage fixe
- La fréquence de hachage à durée de conduction fixe
- fréquence de hachage et durée de conduction variables

Rapport Cyclique du hacheur: duty cycle of chopper

Le rapport cyclique α du hacheur est le rapport de la durée de conduction à la période de hachage

$$\alpha = \frac{\text{durée de conduction}}{\text{période de hachage}}$$

$$\alpha = \frac{\theta}{T} \in [0, 1]$$

$$\Rightarrow \bar{U}_d = \alpha \cdot E \quad \alpha \in [0, 1] \Rightarrow \boxed{\bar{U}_d \leq E}$$

pour cette raison le hacheur série est appelé: hacheur dévolteur = abaisseur de tension.

Conclusion:

En réglant le rapport cyclique du hacheur, on règle la tension moyenne aux bornes de la charge.

→ le hacheur contrôle le transfert de la puissance.

b) Débit sur une charge inductive:

on distingue deux phases de fonctionnement

① pour $0 < t < \theta$: [phase active]

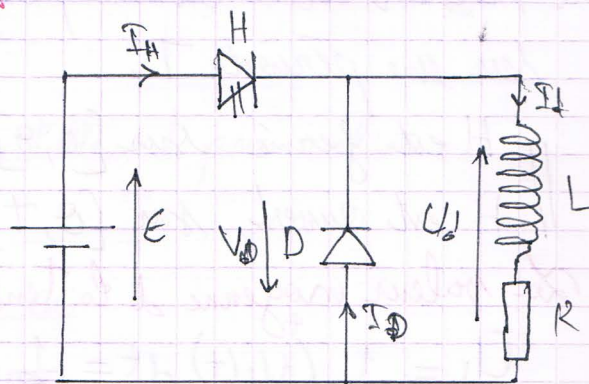
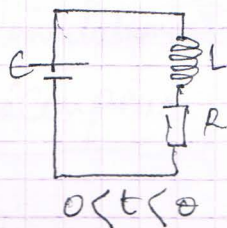
H est fermée

$V_D = -E < 0 \Rightarrow D$ est bloquée

// $U_d = E$

$$R I_d + L \frac{dI_d}{dt} = E.$$

La solution de cette équation est de la forme:



$$I_d(t) = A \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) + \frac{E}{R}$$

/ $\tau = \frac{L}{R}$; Constante du temps électrique de la charge.

$$\boxed{I_d(0) = I_{d\min}}$$

$$I_d(0) = A + \frac{E}{R} = I_{d\min}$$

$$\Rightarrow A = I_{d\min} - \frac{E}{R}$$

d'où

$$\boxed{I_d(t) = \left(I_{d\min} - \frac{E}{R}\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) + \frac{E}{R}} \quad (1)$$

$$\text{A } t = \theta \Rightarrow I_d(\theta) = I_{d\max}$$

$0 < t < \theta$

$$\boxed{I_{d\max} = \left(I_{d\min} - \frac{E}{R}\right) \exp\left(\frac{-\theta}{\tau}\right) + \frac{E}{R}} \quad (1)$$

pour : $0 < t < T$ [Phase de roue libre]

H est bloquée

D est passante

$$\parallel U_d = 0$$

$$R I_d + L \frac{dI_d}{dt} = 0 \Rightarrow I_d(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$$I_d(0) = I_{dmax} = A \exp\left(-\frac{0}{\tau}\right) \Rightarrow A = I_{dmax} \cdot \exp\left(\frac{0}{\tau}\right)$$

$$\Rightarrow I_d(t) = I_{dmax} \cdot \exp\left(-\frac{t-0}{\tau}\right) \quad 0 < t < T \quad (2)$$

A $t = T \Rightarrow I_d(t) = I_{dmin}$

$$I_{dmin} = I_{dmax} \exp\left(-\frac{T-0}{\tau}\right) \quad (2')$$

de (1) et (2) :

$$I_{dmax} = \frac{1 - \exp\left(-\frac{0}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)} \cdot \frac{E}{R}, \quad I_{dmin} = \frac{1 - \exp\left(\frac{0}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(\frac{T}{\tau}\right)} \cdot \frac{E}{R}$$

En remplaçant I_{dmin} et I_{dmax} par leur valeur dans (1) et (2), l'expression du courant dans la charge :

$$I_d(t) = \begin{cases} (1) & \text{sur } [0, 0] \\ (2) & \text{sur } [0, T] \end{cases}$$

La valeur moyenne de la tension U_d :

$$\bar{U}_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_d(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^0 E d\theta$$

$$\bar{U}_d = \frac{0}{T} E \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{0}{T}$$

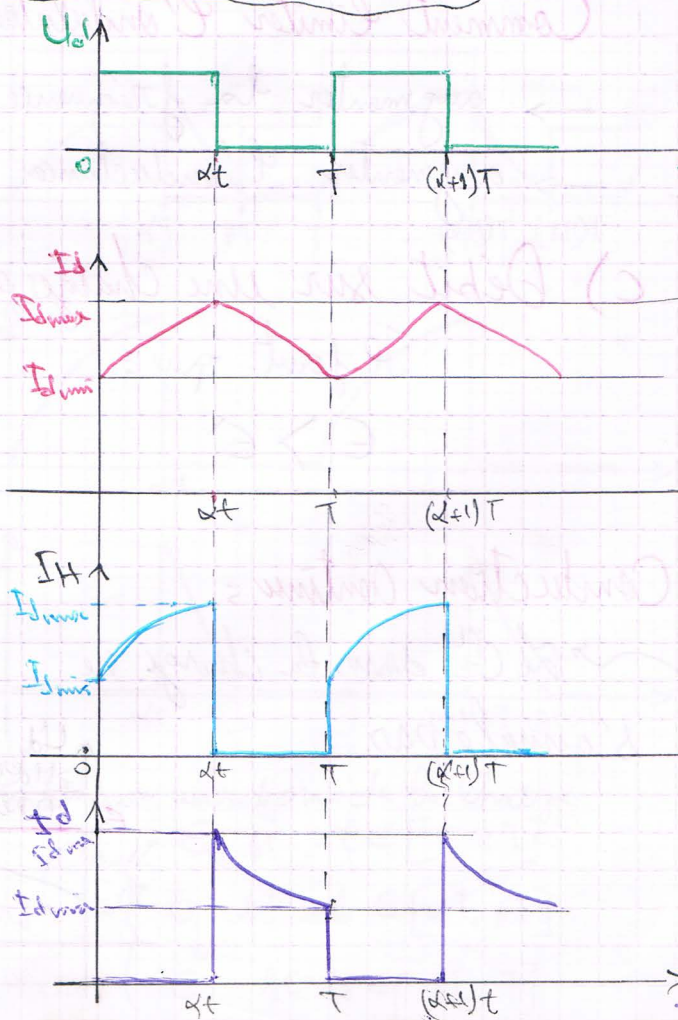
$$\bar{U}_d = \alpha E$$

La valeur moyenne de $C^{KE} I_d$:

$$\bar{U}_d = R \bar{I}_d + L \frac{d\bar{I}_d}{dt} \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow \bar{I}_d = \frac{\bar{U}_d}{R}$$

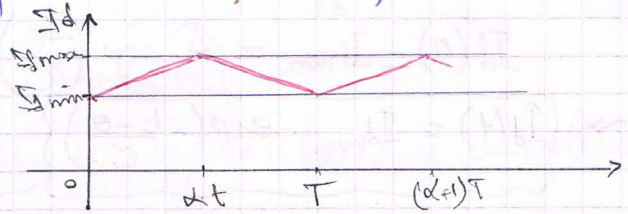
$$\Rightarrow \bar{I}_d = \frac{E}{R} \cdot \alpha$$



L'ondulation du courant :

si L est suffisamment grande :

$$\left. \begin{array}{l} \tau = \frac{L}{R} \gg T \\ \tau \gg 0 \\ \tau \gg T - 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{L'exponentielle peut \u00eatre confondue avec} \\ \text{une tangente en l'un de ses point} \end{array}$$



Expression de l'ondulation :

$$\exp\left(-\frac{0}{\tau}\right) \simeq 1 - \frac{0}{\tau}, \quad \exp\left(\frac{0}{\tau}\right) \simeq 1 + \frac{0}{\tau}$$

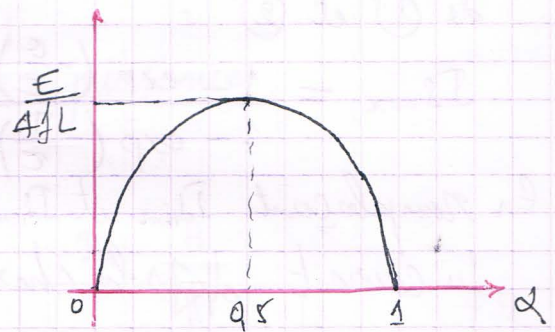
$$\exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) \simeq 1 - \frac{T}{\tau}, \quad \exp\left(\frac{T}{\tau}\right) \simeq 1 + \frac{T}{\tau}$$

$$I_{dmin} = \frac{\alpha E}{R}$$

$$I_{dmax} = I_{dmin} \left(1 + (1 - \alpha) \frac{T}{\tau}\right)$$

$$\Rightarrow \Delta I = I_{dmax} - I_{dmin} = \frac{E \cdot T}{L} \alpha (1 - \alpha)$$

$$\boxed{\Delta I = \frac{E}{L} \alpha (1 - \alpha)}$$



Comment limiter l'ondulation du courant ?

- augmenter la fr\u00e9quence de hachage f
- augmenter l'inductance de lissage.

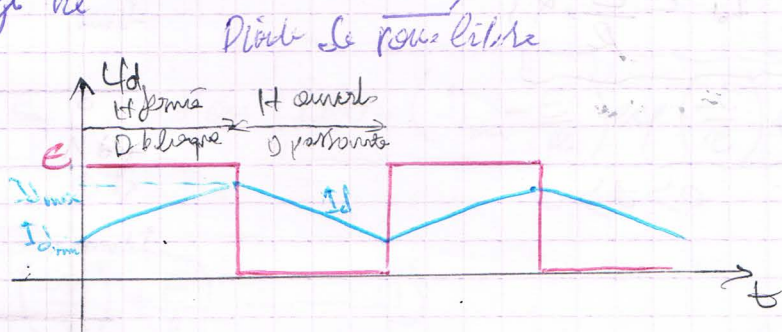
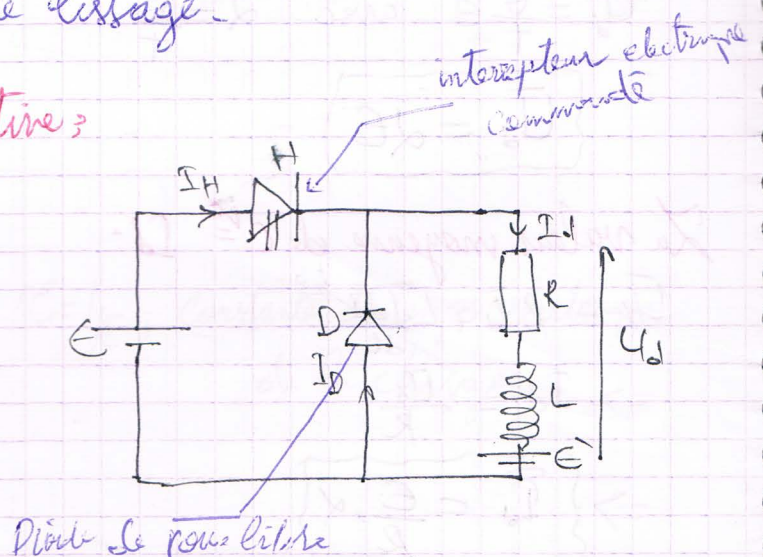
c) D\u00e9bit sur une charge active :

Il faut que :

$$E > E'$$

Conduction continue :

→ Le C^r dans la charge ne s'annule pas



La valeur moyenne de U_d

$$\bar{U}_d = \frac{1}{T} \int_0^T U_d(t) dt = \alpha E$$

La valeur moyenne de $C^{ct} I_d$

$$\bar{U}_d = R \bar{I}_d + L \frac{d\bar{I}_d}{dt} + E'$$

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{U}_d - E'}{R} = \frac{\alpha E - E'}{R}$$

Expression de C^{ct} dans la charge

$t \in [0, \alpha T]$ // H fermé
D bloquée

$$U_d = E$$

$$R I_d + L \frac{dI_d}{dt} + E' = E$$

La solution de cette eqt est:

$$I_d(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{E - E'}{R}$$

$$I_d(0) = I_{dmin}$$

$$\Rightarrow A = I_{dmin} - \frac{E - E'}{R}$$

$$\text{donc } I_d(t) = \left(I_{dmin} - \frac{E - E'}{R}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{E - E'}{R}$$

$$t \in [0, \alpha T]$$

La valeur maximale de C^{ct} est calculée par

$$I_{dmax} = I_d(\alpha T) = \left(I_{dmin} - \frac{E - E'}{R}\right) \exp\left(-\frac{\alpha T}{\tau}\right) + \frac{E - E'}{R}$$

$t \in [\alpha T, T]$ // H ouvert
D passante

$$U_d = 0$$

$$R I_d + L \frac{dI_d}{dt} + E' = 0$$

La solution est de la forme:

$$I_d(t) = A' \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \frac{E'}{R}$$

$$\text{avec } I_d(\alpha T) = I_{dmax}$$

$$I_{dmax} = A' \exp\left(-\frac{\alpha T}{\tau}\right) - \frac{E'}{R}$$

$$A' = \left(I_{dmax} + \frac{E'}{R}\right) \exp\left(\frac{\alpha T}{\tau}\right)$$

d'où:

$$I_d(t) = \left(I_{dmax} + \frac{E'}{R}\right) \exp\left(-\frac{t - \alpha T}{\tau}\right) - \frac{E'}{R}$$

$$t \in [\alpha T, T]$$

La valeur minimal de C^{ct} est donnée par

$$I_{dmin} = I_d(T) = \left(I_{dmax} + \frac{E'}{R}\right) \exp\left(-\frac{T(1-\alpha)}{\tau}\right) - \frac{E'}{R}$$

de ① et ②

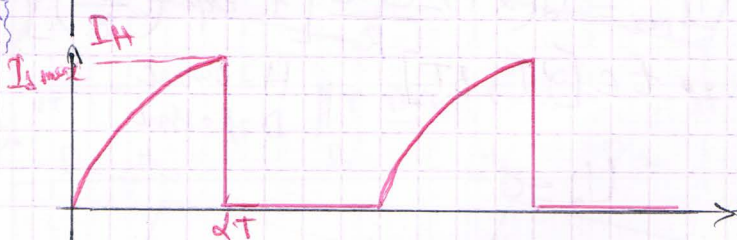
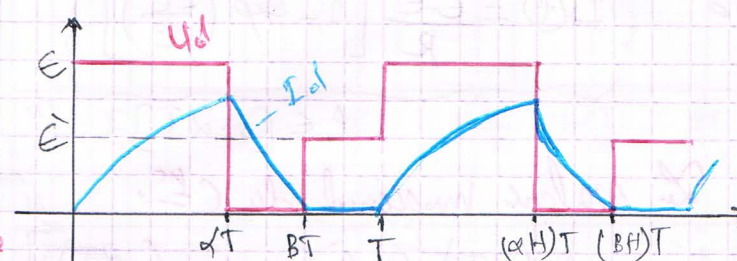
$$I_{dmax} = \frac{E}{R} \frac{1 - \exp\left(-\frac{\alpha T}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)} - \frac{E'}{R}$$

$$I_{dmin} = \frac{E}{R} \frac{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau}\right)} - \frac{E'}{R}$$

Conduction discontinue

Durant la phase de repos libre de C^{ct} de charge s'annule à l'instant B.T

$$\alpha < B < 1$$



En fonction aux bornes de la charge

$$U_d = \begin{cases} E & \text{si } t \in [0, \alpha T] \\ 0 & \text{si } t \in [\alpha T, B.T] \\ E' & \text{si } t \in [B.T, T] \end{cases}$$

La valeur moyenne de U_d :

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T} \int_{\beta T}^T E' dt$$

$$\bar{U}_d = \alpha E + (1-\beta)E'$$

Expression du CTE sur une période :

$t \in [0, \alpha T]$: $\parallel$ H fermée
D bloquée

$$U_d = E$$

$$R I_d + L \frac{dI_d}{dt} + E' = E$$

$I_d(0) = 0$
La solution est de la forme :

$$I_d(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{E-E'}{R}$$

Calcul de A :

$$I_d(0) = 0 = A + \frac{E-E'}{R}$$

$$A = -\frac{E-E'}{R}$$

d'où :

$$I_d(t) = \frac{E-E'}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

$t \in [0, \alpha T]$

La valeur maximale du CTE :

$$I_{d\max} = I_d(\alpha T) = \frac{E-E'}{R} \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha T}{\tau}\right) \right]$$

$t \in [\alpha T, \beta T]$: $\parallel$ H ouverte
D passante

$$U_d = 0$$

$$R I_d + L \frac{dI_d}{dt} + E' = 0$$

La solution est :

$$I_d(t) = A' \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \frac{E'}{R}$$

$$I_d(\beta T) = I_{d\max}$$

$$\Rightarrow I_{d\max} = A' \exp\left(-\frac{\beta T}{\tau}\right) - \frac{E'}{R}$$

$$\Rightarrow A' = \left(I_{d\max} + \frac{E'}{R} \right) \exp\left(\frac{\beta T}{\tau}\right)$$

d'où

$$I_d(t) = \left(I_{d\max} + \frac{E'}{R} \right) \exp\left(-\frac{t-\beta T}{\tau}\right) - \frac{E'}{R}$$

$$t \in [\alpha T, \beta T]$$

calcul de B :

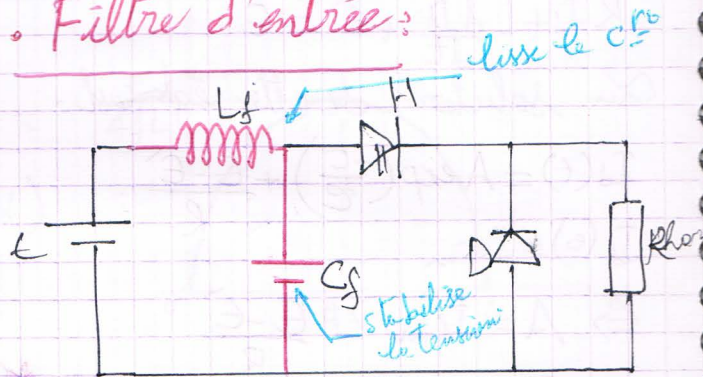
$$I_d(\beta T) = 0$$

$$\left(I_{d\max} + \frac{E'}{R} \right) \exp\left(-\frac{(\beta-\alpha)T}{\tau}\right) - \frac{E'}{R} = 0$$

$$\left(\frac{E-E'}{R} (1 - \exp(-\frac{\alpha T}{\tau})) + \frac{E'}{R} \right) \exp\left(-\frac{(\beta-\alpha)T}{\tau}\right) - \frac{E'}{R} = 0$$

$$\boxed{B = \alpha + \frac{\tau}{T} \ln \left[\frac{E}{E'} - \frac{E-E'}{E'} \exp\left(-\frac{\alpha T}{\tau}\right) \right]}$$

Filtre d'entrée :

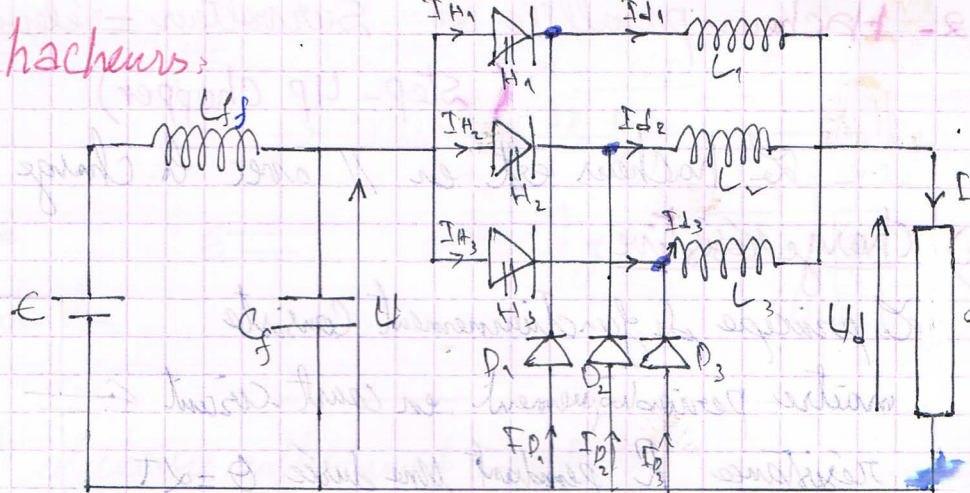


pour réduire les surtension provoquées par l'impédance interne de la source on introduit un filtre entre la source et le hacheur.

Entrelacement des hacheurs :

- Groupement -

$$n=3$$

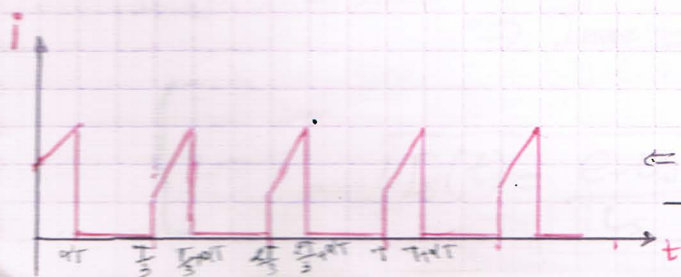
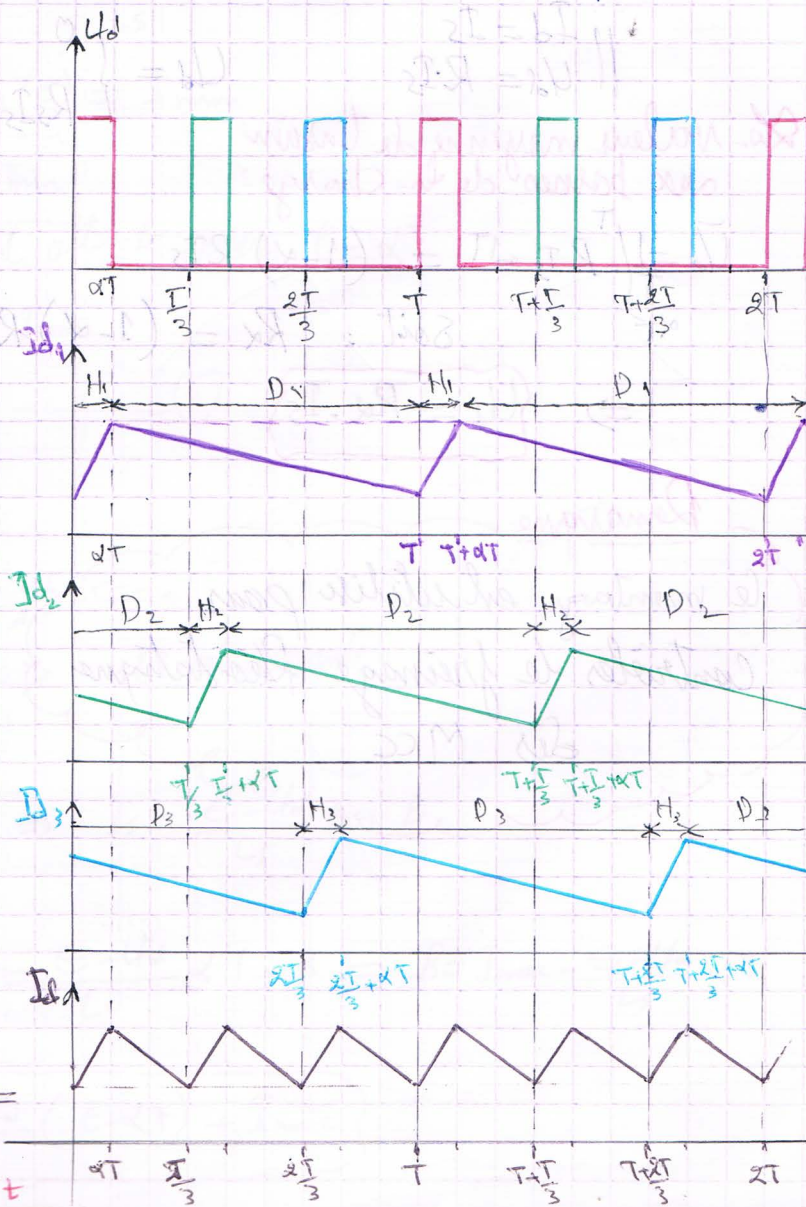


Il est possible :

Hacheur de puissance

- ① de Multiplier la fréquence vue par la source et par la charge
- ② augmenter la puissance disponible à la sortie du hacheur.

En faisant recours à l'entrelacement de plusieurs hacheurs c'est à dire faire fonctionner n hacheurs de même période T et rapport cyclique D et leurs commandes sont régulièrement décalées de $\frac{T}{n}$ les une par rapport aux autres.

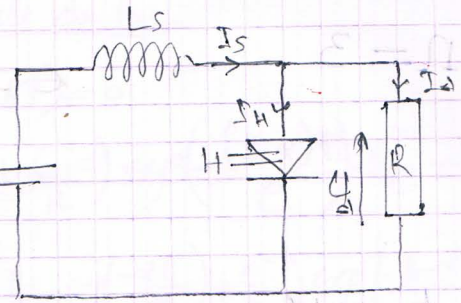


2. Hacheur parallèle ou : Survolteur = éleveur de tension : (step-up chopper)

- Le hacheur est en // avec la charge

a) Charge résistive :

Le principe de fonctionnement consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance R pendant une durée $\theta = \alpha T$.



L_s est choisie suffisamment grande pour garantir un C^T $I_s = \text{const}$
fonctionnement du montage :

• $0 < t < \alpha T$ H : fermé ← phase de roue libre

$$\begin{aligned} U_d &= 0 \\ I_d &= 0 \end{aligned}$$

• $\alpha T < t < T$ H : ouvert ← phase active

$$\begin{aligned} I_d &= I_s \\ U_d &= R \cdot I_s \end{aligned}$$

$$U_d = \begin{cases} 0 & \text{pour } t \in [0, \alpha T] \\ R_s I_s & \text{pour } t \in [\alpha T, T] \end{cases}$$

La valeur moyenne de tension aux bornes de la charge :

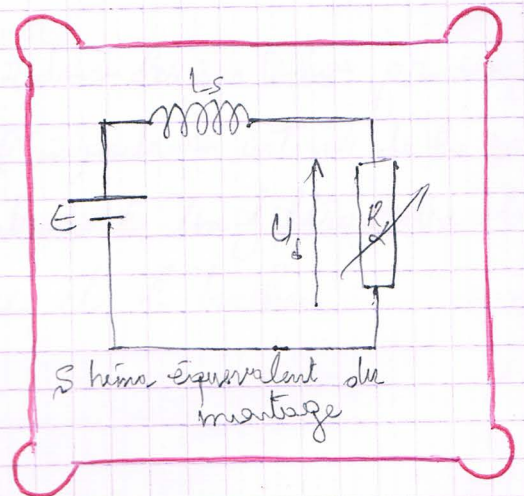
$$\bar{U}_d = \frac{1}{T} \int_0^T R I_s dt = (1 - \alpha) R I_s$$

$$\text{Soit : } R_\alpha = (1 - \alpha) R$$

$$\Rightarrow \boxed{U_d = R_\alpha \cdot I_s}$$

Remarque

Le montage est utilisé pour contrôler le freinage rhéostatique des MCC



b) Débit sur une charge quelconque:

Le rôle de :

C : maintenir une tension constante aux bornes de la charge.

D : empêcher la décharge de C en amont de montage.

Supposition : $C \Rightarrow U_d$ constant

Fonctionnement

• $t \in [0, \alpha T]$: H ferme

$\Rightarrow U_D = -U_d < 0 \Rightarrow D$ est bloquée

$$\Rightarrow E = L_s \frac{dI_s}{dt} \Rightarrow \frac{dI_s}{dt} = \frac{E}{L_s}$$

$$I_s(t) = \frac{E}{L_s} t + A \quad I_s(0) = I_{\min}$$

$$I_s(t) = \frac{E}{L_s} t + I_{\min}$$

La valeur maximale du CH est atteinte pour $t = \alpha T$

$$I_{\max} = I_s(\alpha T) = \frac{E}{L_s} \alpha T + I_{\min}$$

$$I_{\max} = I_{\min} = \frac{E}{L_s} \alpha T \quad (1)$$

• $t \in [\alpha T, T]$: H ouvert

$$U_H = E - U_{L_s} \gg 0, \quad U_{L_s} = L_s \frac{dI_s}{dt} \ll 0$$

$$U_D = U_H - U_d \gg 0 \Rightarrow D \text{ est passante}$$

$$E = L_s \frac{dI_s}{dt} + U_d$$

$$\frac{dI_s}{dt} = \frac{E - U_d}{L_s} \Rightarrow I_s = \frac{E - U_d}{L_s} t + B$$

$$I_s(\alpha T) = I_{\max}$$

$$\Rightarrow I_{\max} = \frac{E - U_d}{L_s} \alpha T + B \Rightarrow B = I_{\max} - \frac{E - U_d}{L_s} \alpha T$$

{

$$I_s(t) = \frac{E - U_d}{L_s} (t - \alpha T) + I_{\max}$$

Le C^{st} prend sa valeur minimale à $t=T$

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

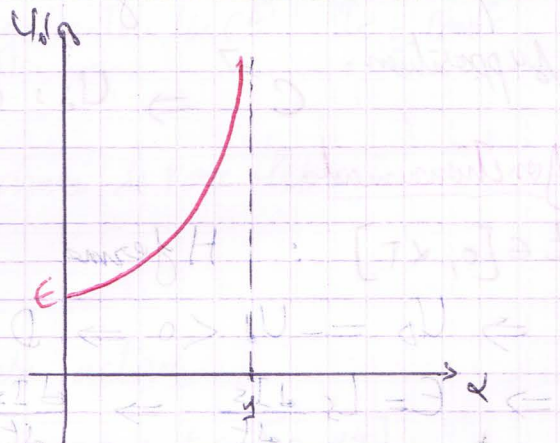
$$I_{max} - I_{min} = - \frac{E - U_d}{L_s} T(1-\alpha) \quad (2)$$

$$(1) = (2) \Rightarrow \frac{E}{L_s} 2T = - \frac{E - U_d}{L_s} T(1-\alpha)$$

$$\Rightarrow \boxed{U_d = \frac{E}{1-\alpha}}$$

$$\forall \alpha \in [0, 1[\quad U_d > E$$

$\Rightarrow$ C'est un hacheur élévateur de tension = survolteur.



Remarque:

Il ne faut jamais travailler en voisinage de 1 ne rapproche pas $\alpha = 1$

Bilan des puissances:

• La puissance fournie par la source

$$P_s = \frac{1}{T_0} \int E \cdot I_s dt = E \bar{I}_s$$

• La puissance absorbée par la charge $||C =$ puissance absorbée par la charge.

$$P_d = U_d \cdot \bar{I}_d = U_d \cdot \bar{I}_D$$

On négligeant les pertes $\Rightarrow P_s = P_d$

$$E \cdot \bar{I}_s = U_d \cdot \bar{I}_d = \frac{E}{1-\alpha} \bar{I}_D$$

$$\Rightarrow \bar{I}_D = (1-\alpha) \bar{I}_s$$

$$\bar{I}_D = \bar{I}_c + \bar{I}_d$$

$$\bar{I}_b = \bar{I}_d$$

$$\bar{I}_d = (1-\alpha) \bar{I}_s$$

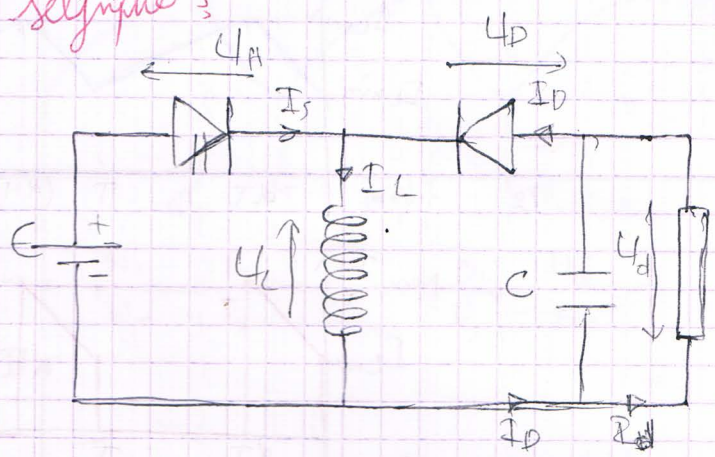
$$\text{si } \bar{I}_b = \bar{I}_s = \text{Constant} \Rightarrow \bar{I}_b = (1-\alpha) \bar{I}_s$$

$$\forall \alpha \in [0, 1] \Rightarrow \bar{I}_d < \bar{I}_s$$

3. Hacheur à accumulation sélective :

Montage :

Accumulation sélective signifie que l'inductance L emmagasine de l'énergie provenant de la source puis elle la restitue à la charge.



Fonctionnement :

* $t \in [0, \alpha T]$: H est fermé

$U_D = -(U_L + U_C) \leq 0 \Rightarrow D$ reste bloquée

$$U_L = E ; \quad L \frac{dI_L}{dt} \Rightarrow I_L(t) = \frac{E}{L} t + I_{Lmin}$$

Le courant I_L prend sa valeur maximale à $t = \alpha T$.

$$\Rightarrow I_{Lmax} = I_L(\alpha T) = \frac{E \alpha T}{L} + I_{Lmin}$$

$$I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{E \alpha T}{L} \quad \text{--- (1)}$$

* $t \in [\alpha T, T]$; H ouvert

$U_L = L \frac{dI_L}{dt} \ll 0 \Rightarrow U_D \gg 0 \Rightarrow D$ entre en conduction

$$\Rightarrow U_D = -U_C = L \frac{dI_L}{dt} \Rightarrow I_L = -\frac{U_D}{L} (t - \alpha T) + I_{Lmax}$$

Ce I_L prend sa valeur minimale à $t = T$

$$\Rightarrow I_{Lmin} : I_L(T) = -\frac{U_D}{L} T(1 - \alpha) + I_{Lmax}$$

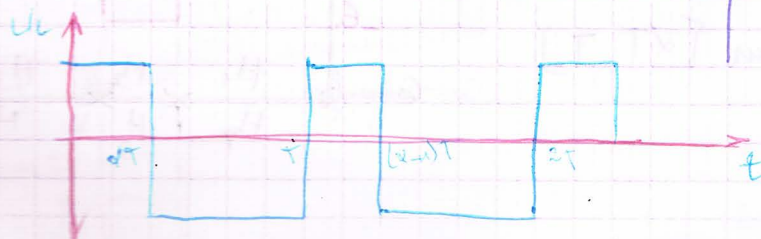
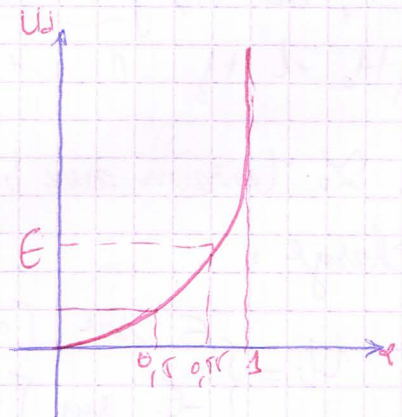
$$\Rightarrow I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{U_D}{L} T(1 - \alpha) \quad \text{--- (2)}$$

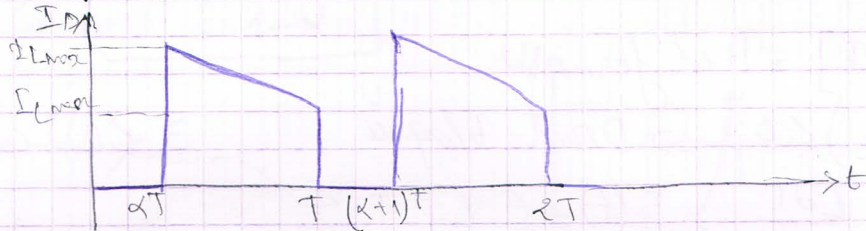
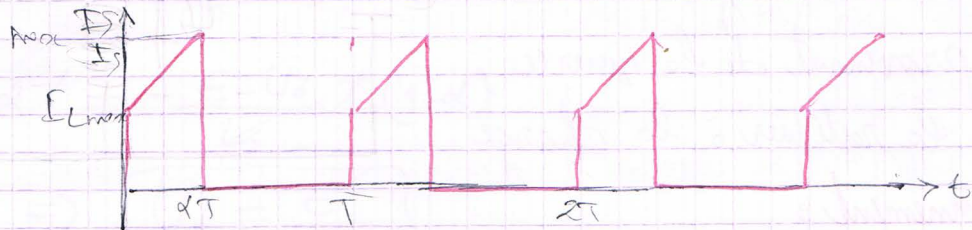
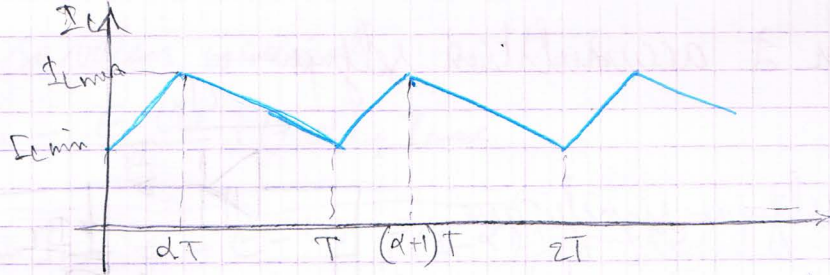
$$(1) = (2) \Rightarrow \frac{E \alpha T}{L} = \frac{U_D}{L} T(1 - \alpha)$$

$$\Rightarrow U_D = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E$$

Si $\alpha < \frac{1}{2} \rightarrow$ le hacheur est abaisseur de tension

Si $\alpha > \frac{1}{2} \rightarrow$ " " éleveur " "





Calcul de $\bar{I}_s$

$$\left. \begin{aligned} P_s &= E \bar{I}_s \\ P_d &= U_d \bar{I}_d \end{aligned} \right\} \Rightarrow E \bar{I}_s = U_d \bar{I}_d = \frac{\alpha E \bar{I}_d}{1-\alpha} \Rightarrow \bar{I}_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} \bar{I}_d$$

Hacheur réversible en pont

La structure en pont H permet la réversibilité en C^t et en tension.

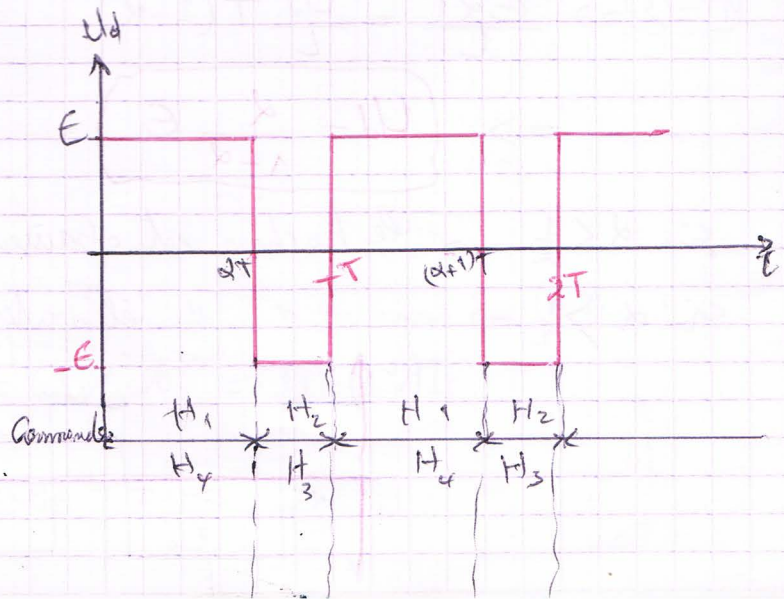
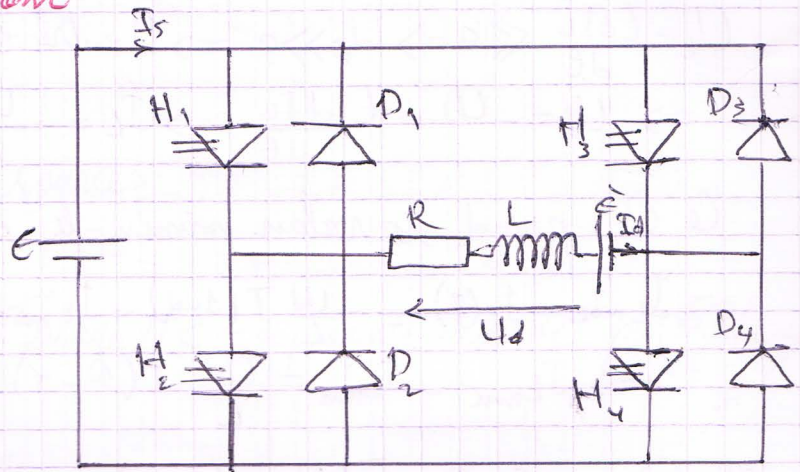
• Fonctionnement :

La commande :

H_1 et H_4 fermes sur $[0, \alpha T]$
 H_2 et H_3 " " $[\alpha T, T]$

• La tension aux bornes de la charge :

$$U_d = \begin{cases} E & \text{sur } [0, \alpha T] \\ -E & \text{sur } [\alpha T, T] \end{cases}$$



La valeur moyenne de U_d :

$$\bar{U}_d = \frac{1}{T} \left[\int_0^{\alpha T} E dt + \int_{\alpha T}^T (-E) dt \right]$$

$$= E\alpha - (1-\alpha)E$$

$$\Rightarrow \boxed{\bar{U}_d = (2\alpha - 1)E}$$

si $\alpha < \frac{1}{2} \Rightarrow \bar{U}_d < 0$ } réversibilité
 si $\alpha > \frac{1}{2} \Rightarrow \bar{U}_d > 0$ } en tension

Expression du C^{re} I_d :

$t \in [0, \alpha T]$

H_1 fermé, H_4 fermé

$U_d = E$

$I_s = I_d$

$$RI_d + L \frac{dI_d}{dt} + E' = E$$

$$\Rightarrow I_d(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{E-E'}{R}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$I_d(0) = I_{dmin} \Rightarrow A + \frac{E-E'}{R} = I_{dmin}$$

$$\Rightarrow A = I_{dmin} - \frac{E-E'}{R}$$

$$\text{d'où: } \boxed{I_d(t) = \left(I_{dmin} - \frac{E-E'}{R}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \frac{E-E'}{R}, t \in [0, \alpha T]}$$

La valeur maximale de I_d est donnée par:

$$I_{dmax} = I_d(\alpha T) = \left(I_{dmin} - \frac{E-E'}{R}\right) \exp\left(-\frac{\alpha T}{\tau}\right) + \frac{E-E'}{R} \quad \text{--- (1)}$$

si $I_d(t) > 0$, il passe par H_1 et H_4

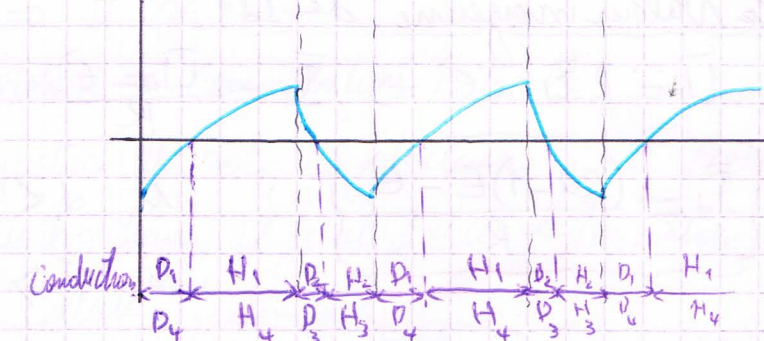
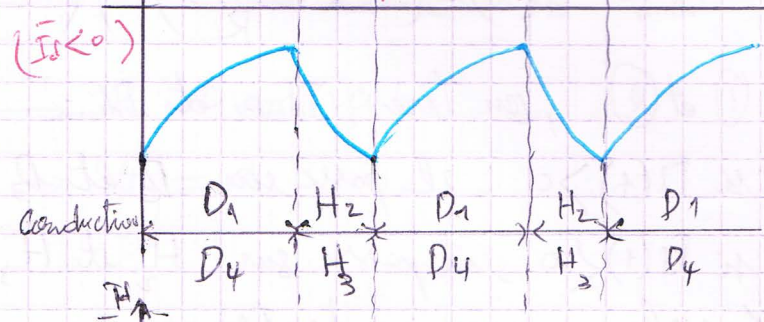
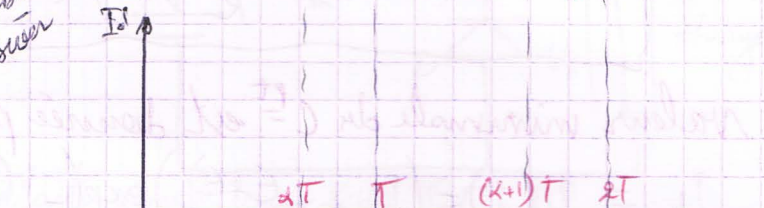
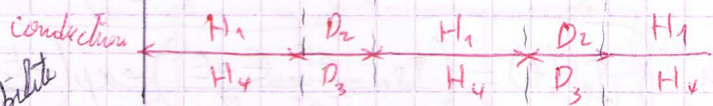
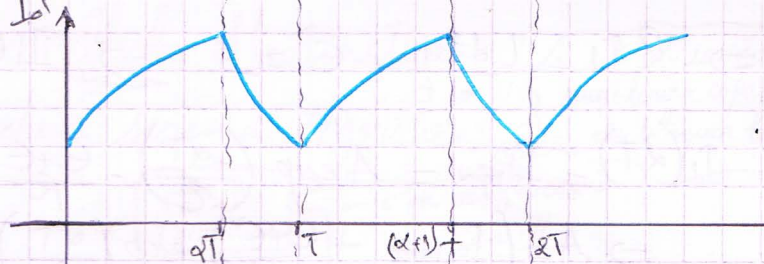
si $I_d(t) < 0$, " " " D_1 et D_4

$t \in [\alpha T, T]$

H_2 fermé, H_3 fermé

$U_d = -E$

$I_s = -I_d$



$$\Rightarrow R I_d + L \frac{dI_d}{dt} + E = E \Rightarrow I_d(t) = A \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) - \frac{E+E'}{R}$$

$$I_d(\alpha T) = I_{dmax} = A \exp\left(\frac{-\alpha T}{\tau}\right) - \frac{E+E'}{R}$$

$$\Rightarrow A = \left(I_{dmax} + \frac{E+E'}{R} \right) \exp\left(\frac{\alpha T}{\tau}\right)$$

d'où
$$I_d(t) = \left(I_{dmax} + \frac{E+E'}{R} \right) \exp\left(\frac{-t - \alpha T}{\tau}\right) - \frac{E+E'}{R}, \quad t \in [\alpha T, T]$$

La valeur minimale de i_d est donnée par :

$$I_{dmin} = I_d(t) = \left(I_{dmax} + \frac{E+E'}{R} \right) \exp\left(-\frac{(1-\alpha)T}{\tau}\right) - \frac{E+E'}{R} \quad \text{--- (2)}$$

de (1) et (2), on tire I_{dmax} et I_{dmin}

// si $I_d(t) > 0$, il passe sur D_2 et D_3

// si $I_d(t) < 0$, il passe sur H_2 et H_3

La valeur moyenne de I_d :

$$\bar{U}_d = R \bar{I}_d + E' \Rightarrow \bar{I}_d = \frac{\bar{U}_d - E'}{R}$$

$$\bar{I}_d = \frac{(2\alpha - 1)E - E'}{R}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{si } \alpha < \frac{1}{2} \Rightarrow \bar{I}_d < 0 \\ \text{si } \alpha > \frac{1}{2} \Rightarrow \bar{I}_d > 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Reversibilité} \\ \text{en courant} \end{array}$$

Blocage d'un $\uparrow$