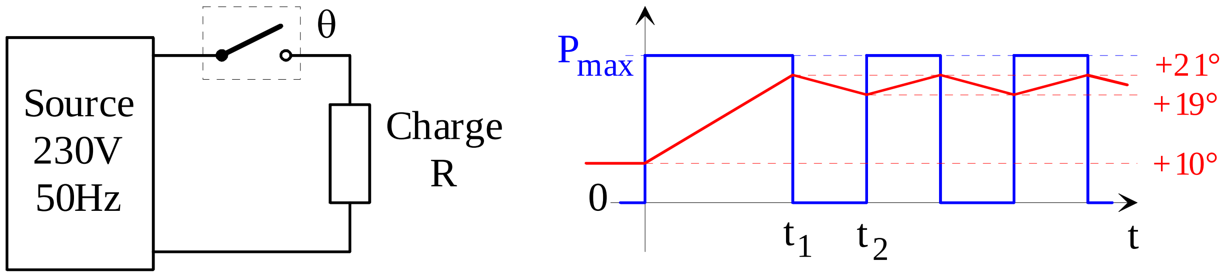
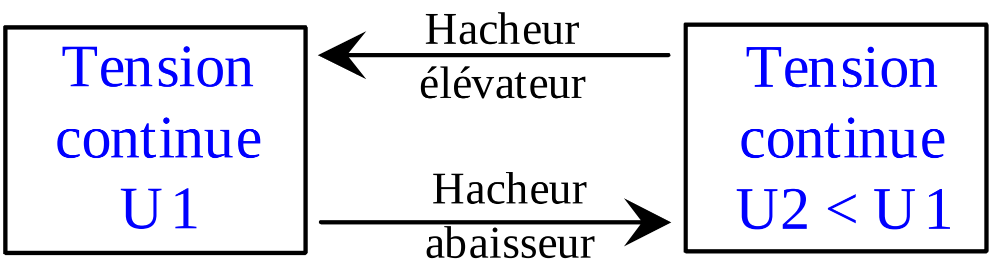
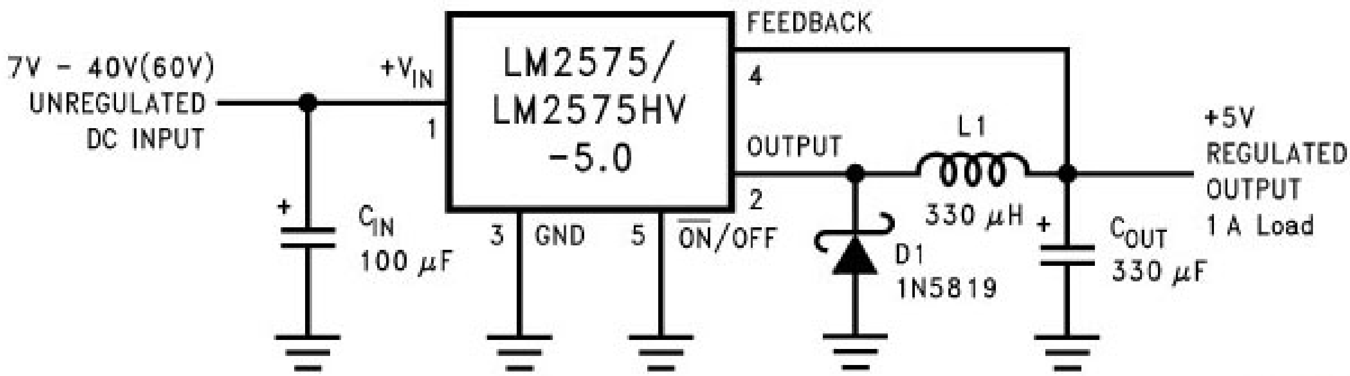
Fonctionnement du radiateur – Cycle S1



Les convertisseurs DC-DC : la fonction hacheur

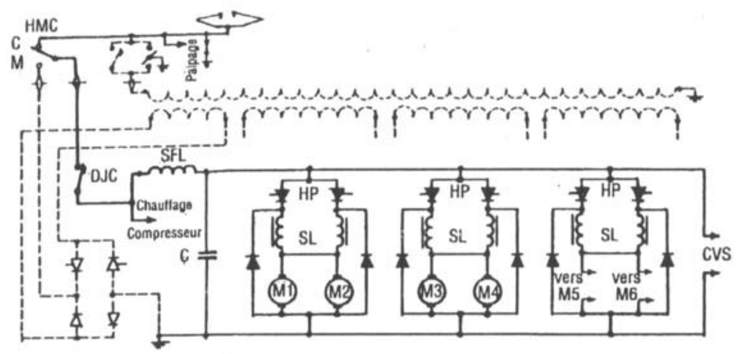


Exemple : Alimentation continue +5V à découpage

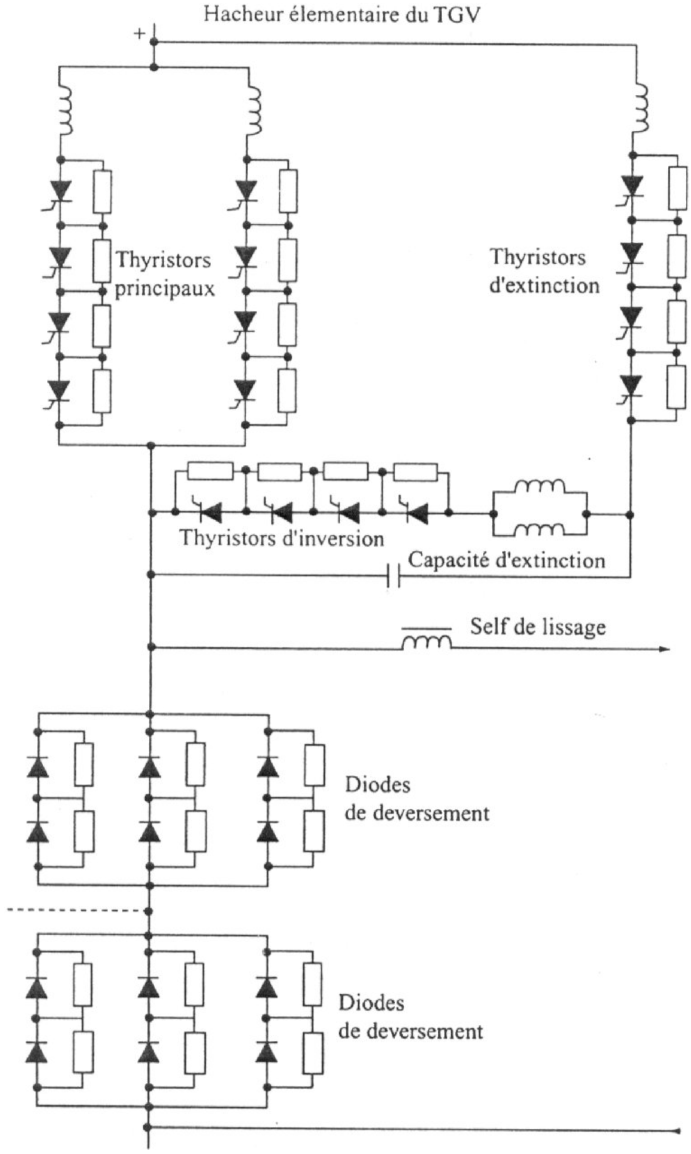


En forte puissance : la chaîne de traction du TGV PSE

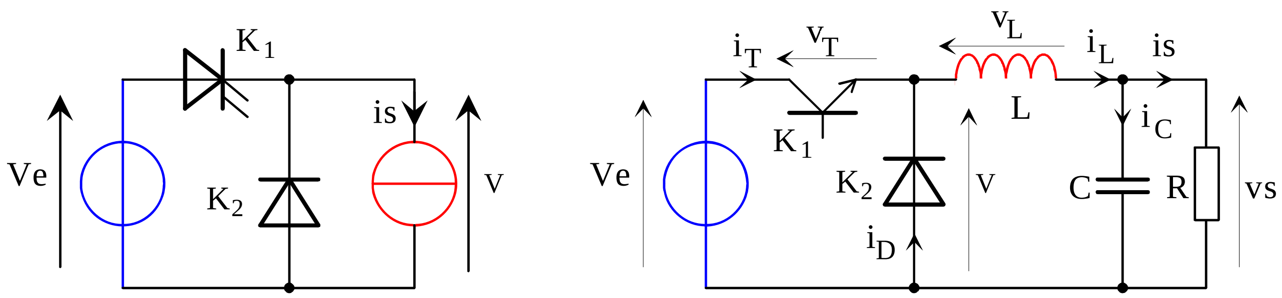
- TP transformateur
- RT redresseur de traction
- HP hacheur de traction
- HE hacheur d'excitation
- M moteur de traction
- RF résistance de freinage
- BA batterie
- CVS convertisseur statique des auxiliaires
- SL self de lissage



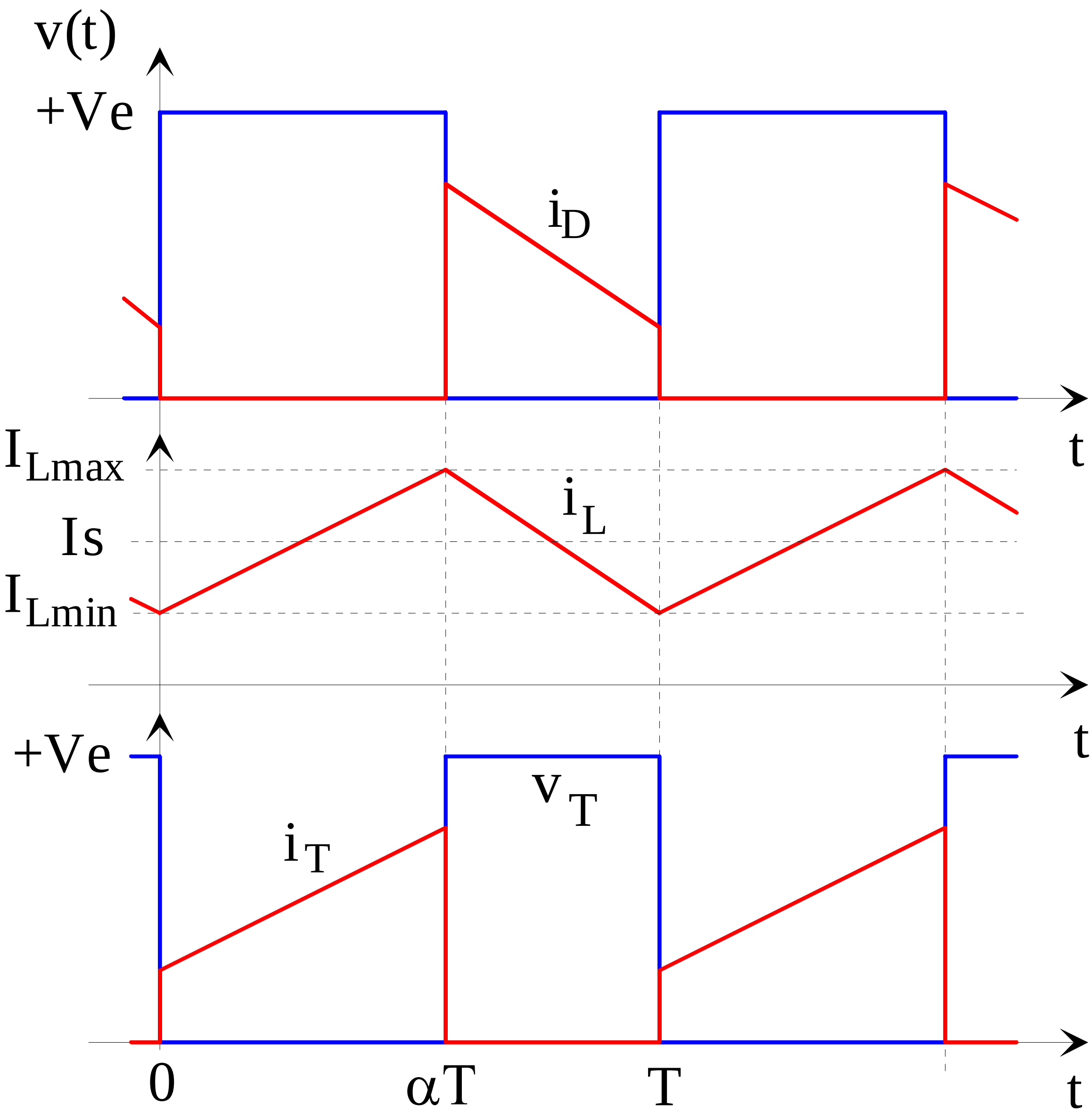
Hacheur élementaire du TGV



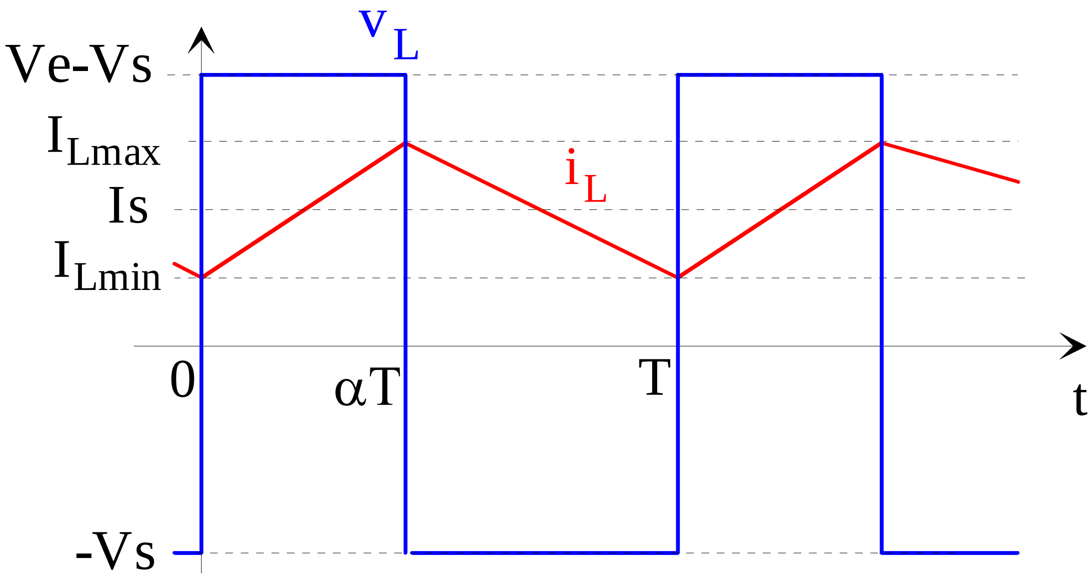
Le hacheur série



Formes d'ondes



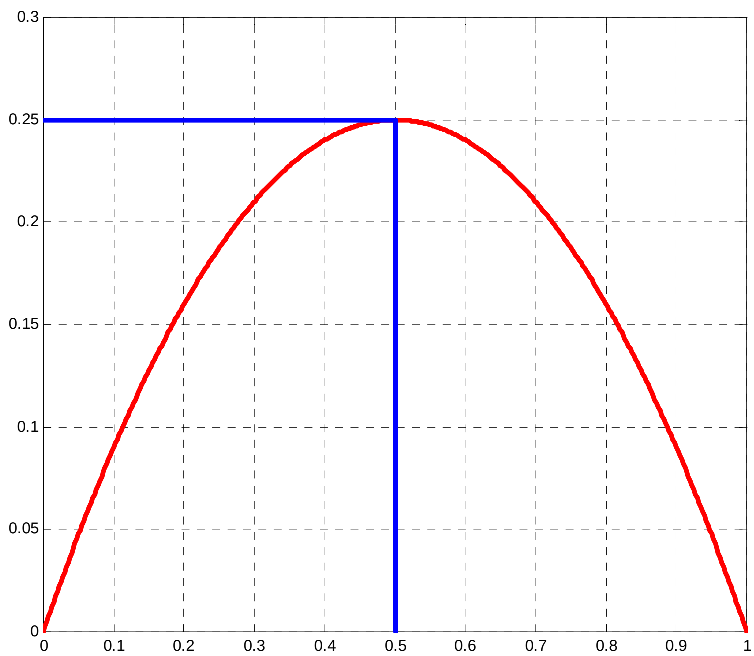
Tension et courant de l'inductance



Ondulation du courant

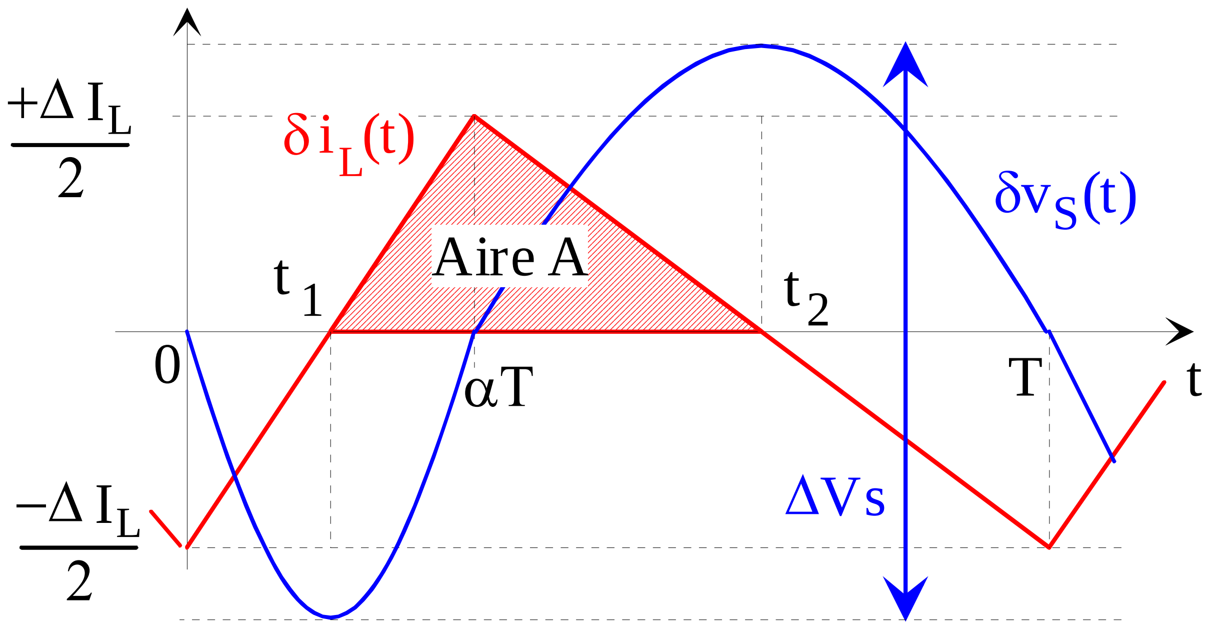
$$\Delta I_L = I_{L\max} - I_{L\min} = \frac{Ve - Vs}{L} \cdot \alpha T = \frac{Ve}{LF} \cdot \alpha(1-\alpha)$$

Evolution de ΔI_L en fonction de α



Ondulation de la tension

$$i_L(t) = i_C(t) + is(t) = I_{Lmoy} + \partial i_L(t)$$



$$\Delta Vs = V_{C\max} - V_{C\min} = \partial v_C(t_2) - \partial v_C(t_1)$$

$$\Delta Vs = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial v_C(t)}{dt} \cdot dt = \frac{1}{C} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \partial i_L(t) \cdot dt$$

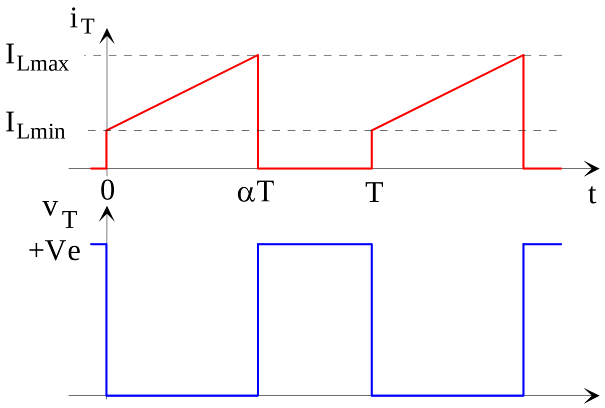
$$\Delta Vs = \frac{1}{C}\left(\frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{\alpha T}{2} \cdot \frac{1}{2} + \frac{\Delta I_L}{2} \cdot \frac{(1-\alpha)T}{2} \cdot \frac{1}{2}\right) = \frac{\Delta I_L}{8CF}$$

$$\boxed{\Delta Vs = \frac{Ve}{8LCF^2} \cdot \alpha(1-\alpha)}$$

Maximale pour $\alpha = \frac{1}{2}$ et $\Delta Vs_{max} = \frac{Ve}{32LCF^2}$

Contraintes sur les interrupteurs du hacheur BUCK

Interrupteur K1 : le transistor



$$I_{T\max} = I_{L\max} = \langle i_L \rangle + \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$= Is + \alpha \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{Ve}{2LF}$$

$$I_{Tmoy} = \alpha \cdot Is = Ie_{moy}!$$

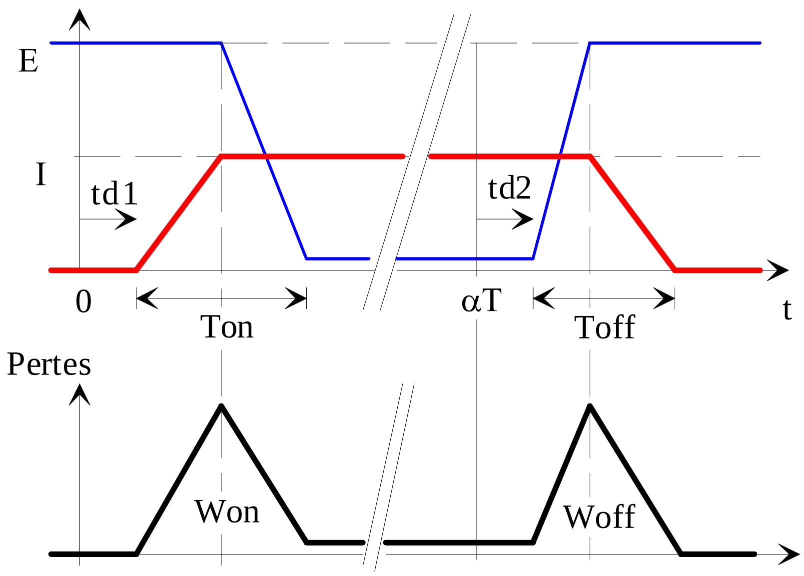
$$V_{Tmax} = +Ve$$

$$I_{Teff} = \sqrt{\left(Is^2 + \frac{\Delta I_L{}^2}{12}\right) \cdot \alpha}$$

Pertes statiques du MOSFET : $P_0 = R_{DSon} \cdot I^2_{DS(RMS)}$.

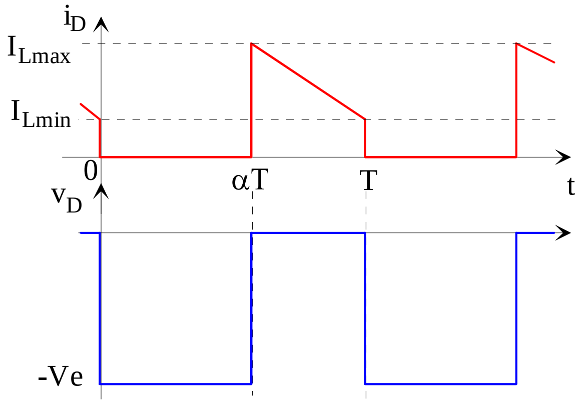
Pertes statiques du bipolaire : $P_0 = R_D \cdot I^2_{C(RMS)} + V_{CEsat} \cdot I_{C(AV)}$

Pertes dynamiques : $P_D = \left(\frac{1}{2} Ve \cdot I_{L\min} \cdot t_{on} + \frac{1}{2} Ve \cdot I_{L\max} \cdot t_{off}\right) \times F$.



Contraintes sur les interrupteurs du hacheur BUCK

Interrupteur K2 : la diode



$$I_{D\max} = I_{FRM} = \langle i_L \rangle + \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$= Is + \alpha \cdot (1-\alpha) \cdot \frac{Ve}{2LF}$$

$$I_{Dmoy} = I_{F(AV)} = (1-\alpha) \cdot Is$$

$$V_{D\,inv\,max} = V_{RRM} = +Ve$$

$$I_{Deff} = \sqrt{\left(Is^2 + \frac{\Delta I_L{}^2}{12}\right) \cdot (1-\alpha)}$$

Pertes statiques dans la diode : $P_0 = R_D \cdot I^2_{F(RMS)} + V_{D0} \cdot I_{F(AV)}$

Pertes dynamiques au blocage : $P_r = F \cdot V_e \cdot Q_{rr}$

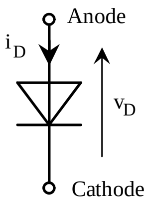
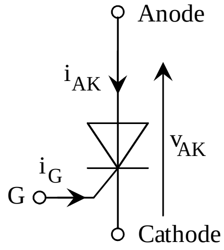
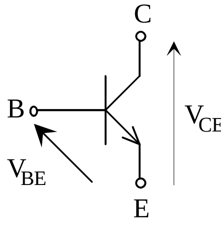
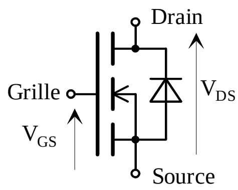
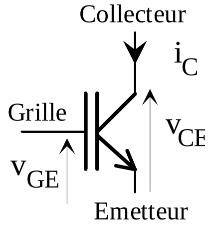
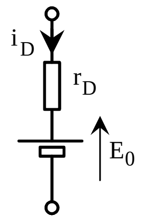
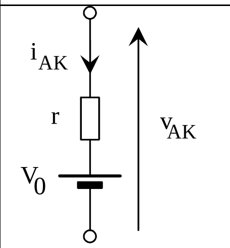
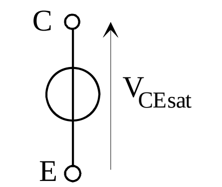
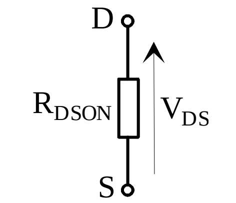
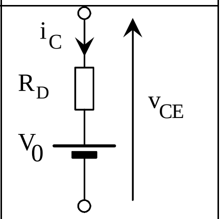
Facteurs de dimensionnement du hacheur BUCK

Pour le transistor $$Fd = \frac{V_{T\max} \cdot I_{T\max}}{Ps} = \frac{Ve \cdot I_{L\max}}{Vs \cdot Is} \approx \frac{1}{\alpha}$$

Pour la diode $$Fd = \frac{V_{RRM} \cdot I_{F(AV)}}{Ps} = \frac{Ve \cdot (1-\alpha) Is}{Vs \cdot Is} = \frac{(1-\alpha)}{\alpha}$$

Choix des composants semi-conducteurs de puissance

Critère statique :

Composant	Diode	Thyristor	Bipolaire	MOSFET	IGBT
Symbole					
Schéma équivalent					
E =	0,2 à 0,8 V	0,8 à 3 V	0,4 à 2 V	= 0	1 V à 5 V
R =	1 mΩ à 1 Ω	50 mΩ à 2 Ω	≈ 0	1 mΩ à 10 Ω	50 mΩ à 2 Ω

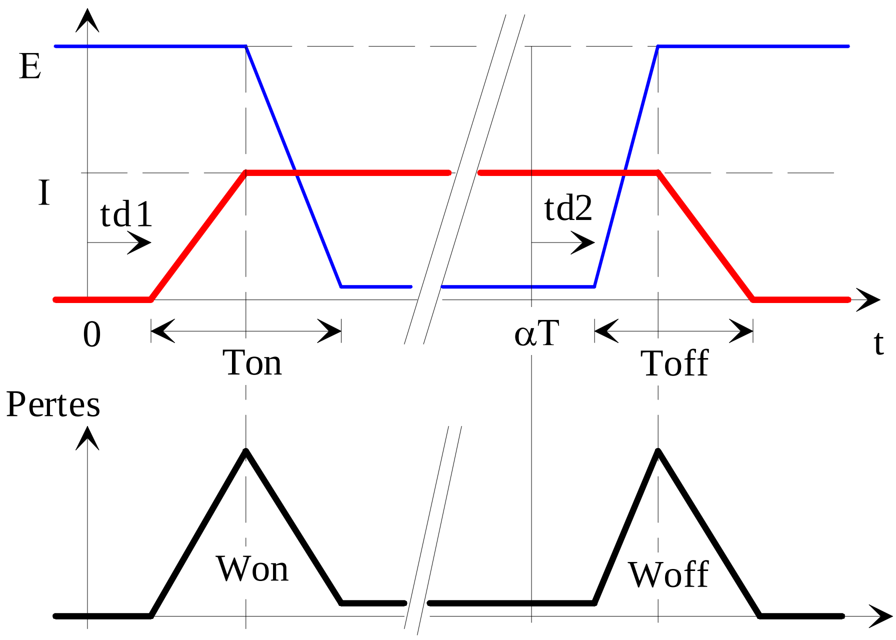
Les pertes statiques valent : $P_0 = R \cdot I_{EFF}^2 + E \cdot I_{MOY}$

Critère dynamique :

- Energies dissipées :

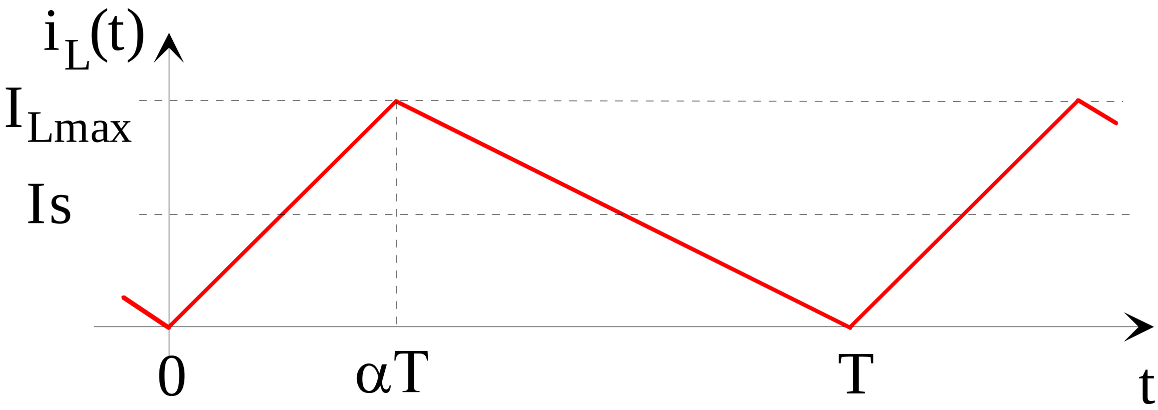
$$W_{on} = \frac{1}{2} \cdot E \cdot I \cdot T_{on}$$

$$W_{off} = \frac{1}{2} \cdot E \cdot I \cdot T_{off}$$

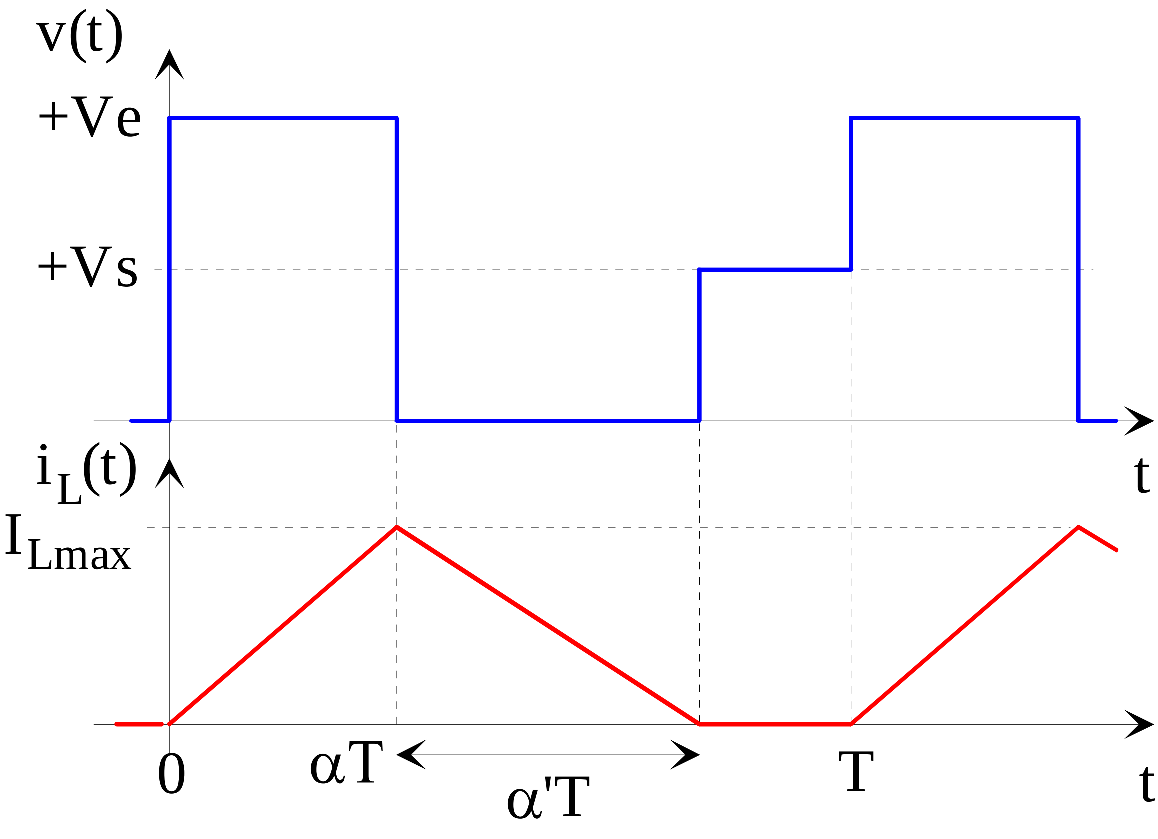


- Pertes dynamiques : $P_D = (W_{on} + W_{off}) \times F_{découpage}$

Fonctionnement en limite de conduction continue



Fonctionnement en conduction discontinue

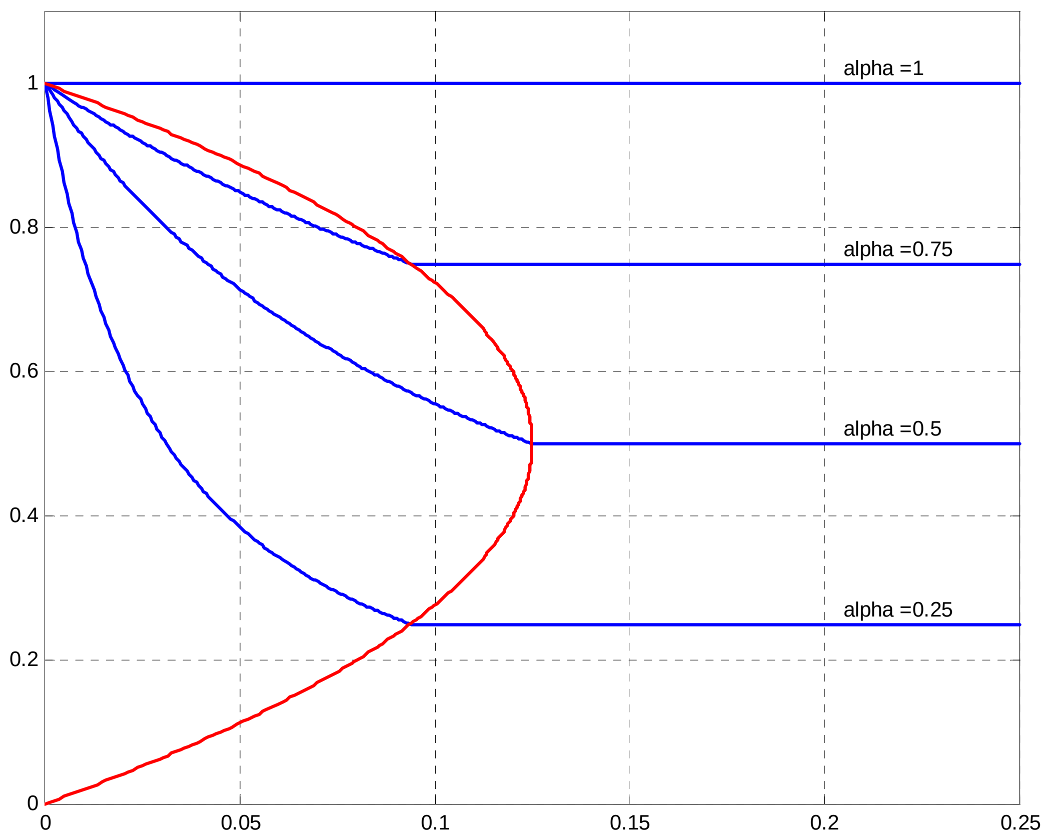


Caractéristique de sortie

Tension normalisée ou tension réduite : $y = \frac{Vs}{Ve}$

Courant de charge normalisé ou réduit : $x = \frac{L\,F}{Ve} \cdot Is$

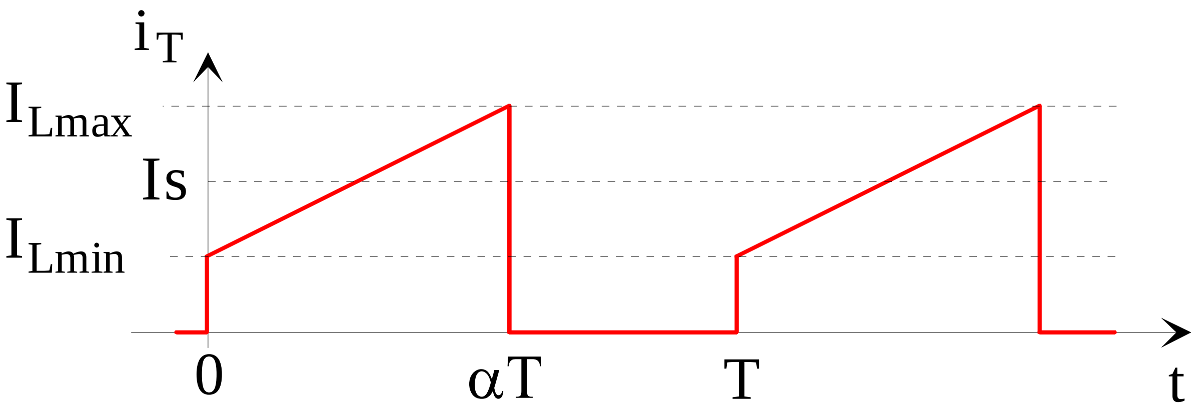
$$y = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot x}{\alpha^2}}$$

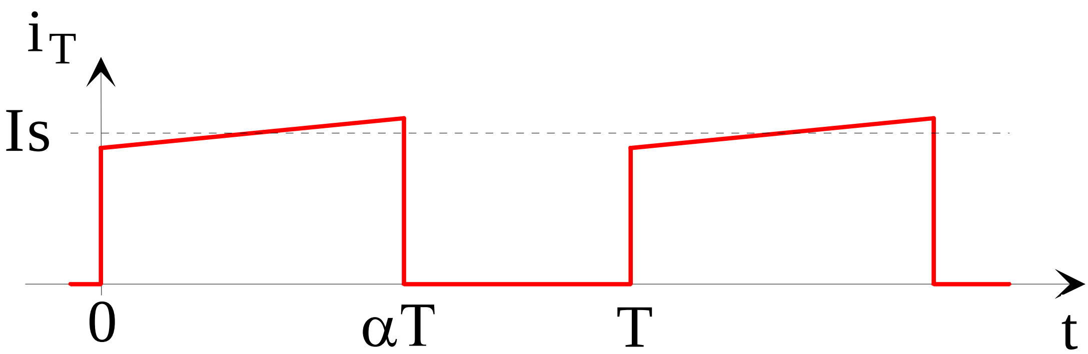


$$Is_{limite} = \frac{\Delta I_L}{2} = \frac{Ve}{2LF} \cdot \alpha(1-\alpha) \;;\; x_{limite} = \frac{y(1-y)}{2} \;;\; \begin{cases} x_{limite} = \frac{\alpha(1-\alpha)}{2} \\ y_{limite} = \alpha \end{cases}$$

Etude du filtre d'entrée du hacheur série

Courant d'entrée du hacheur série :





Harmoniques du courant $i_T(t)$

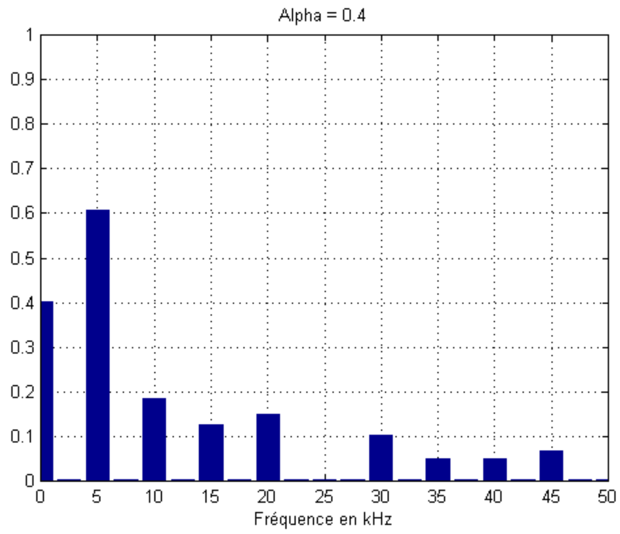
$$i_T(\theta)=\langle i_T\rangle+\sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n\theta)+\sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n\theta)$$

$$\forall n \in \angle^*,\ a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i_T(\theta)\cdot \cos(n\theta)\cdot d\theta \ \text{ et } \ b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} i_T(\theta)\cdot \sin(n\theta)\cdot d\theta .$$

$$a_n = \frac{Is}{\pi}\cdot \int_0^{2\alpha\pi} \cos(n\,\theta)\cdot d\theta = \frac{Is}{n\,\pi}\cdot \left[\sin(n\,\theta)\right]_0^{2\alpha\pi} = \frac{Is}{n\,\pi}\cdot \sin(2\,\alpha\,n\,\pi)$$

$$b_n = \frac{Is}{\pi}\int_0^{2\alpha\pi} \sin(n\,\theta)\cdot d\theta = \frac{Is}{n\,\pi}\left[-\cos(n\,\theta)\right]_0^{2\alpha\pi} = \frac{Is}{n\,\pi}\left[1-\cos(2\,\alpha\,n\,\pi)\right]$$

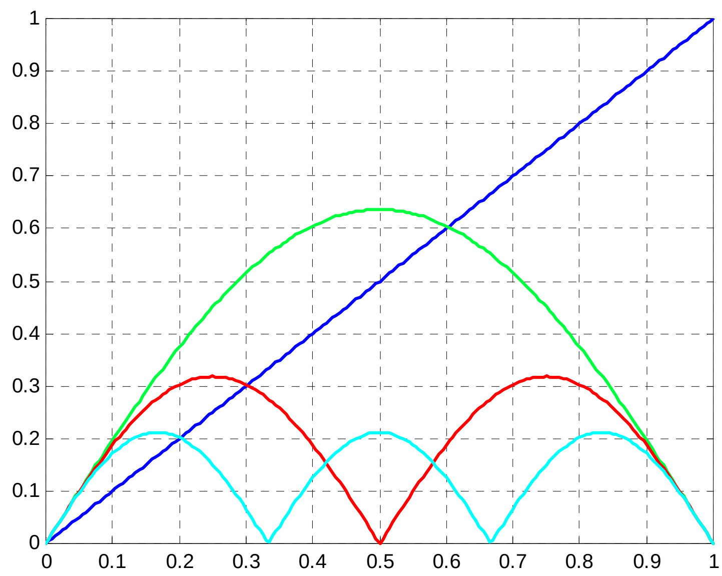
Exemple pour α = 0,4



Evolution des harmoniques en fonction de α

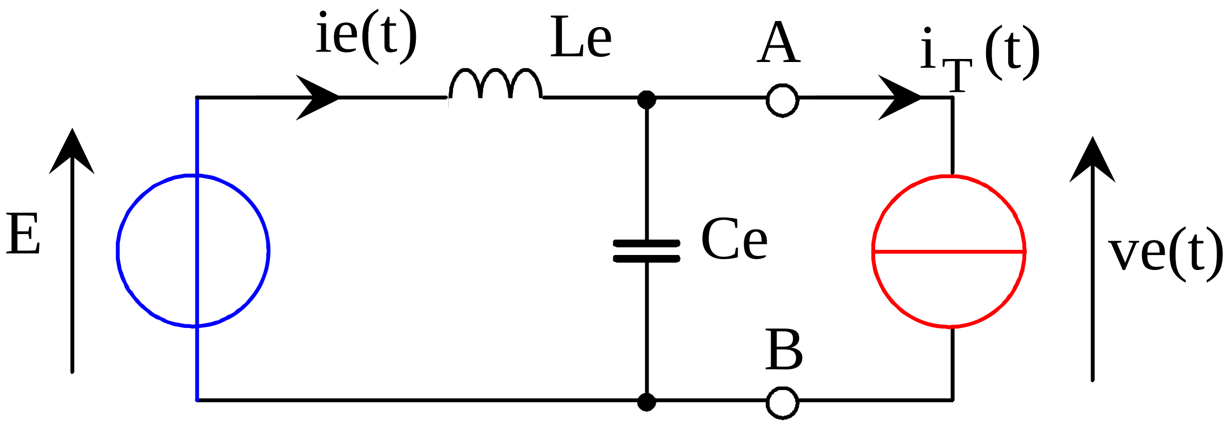
$$c_n = \frac{Is}{n\,\pi}\sqrt{2\cdot(1-\cos(2\,n\,\alpha\,\pi))} \Rightarrow c_n = \frac{2\,Is}{n\,\pi}\left|\sin(n\,\alpha\,\pi)\right|$$

Amplitude normalisée $y_n = \frac{c_n}{Is} = \frac{\hat{I}_n}{Is} = \frac{\sqrt{2}\cdot I_{n\,eff}}{Is}$ en fonction de α :



$$y_{1\,max} = \frac{2}{1\,\pi} = 0{,}636 \; ; \; y_{2\,max} = \frac{2}{2\,\pi} = 0{,}318 \; ; \; y_{3\,max} = \frac{2}{3\,\pi} = 0{,}212$$

Fonction de transfert du filtre d'entrée



L'impédance interne de la source E est nulle pour chaque harmonique.

$$\underline{Ve} = \underline{Z_{Le}} \cdot \underline{Ie} = \left(\underline{Z_{Le}} \,//\, \underline{Z_{Ce}}\right) \cdot \underline{Ie}$$

<u>Avec ω = 2πF et Ω = n ω pour n≥1, la fonction de transfert est donnée par :</u>

$$\frac{\underline{Ie(j\Omega)}}{\underline{I_T(j\Omega)}} = \frac{\underline{Z_{Ce}}}{\underline{Z_{Le}} + \underline{Z_{Ce}}} = \frac{1}{j\,Ce\,\Omega} \cdot \frac{1}{j\,Le\,\Omega + \dfrac{1}{j\,Ce\,\Omega}} = \frac{1}{1 - Le\,Ce\,\Omega^2}$$

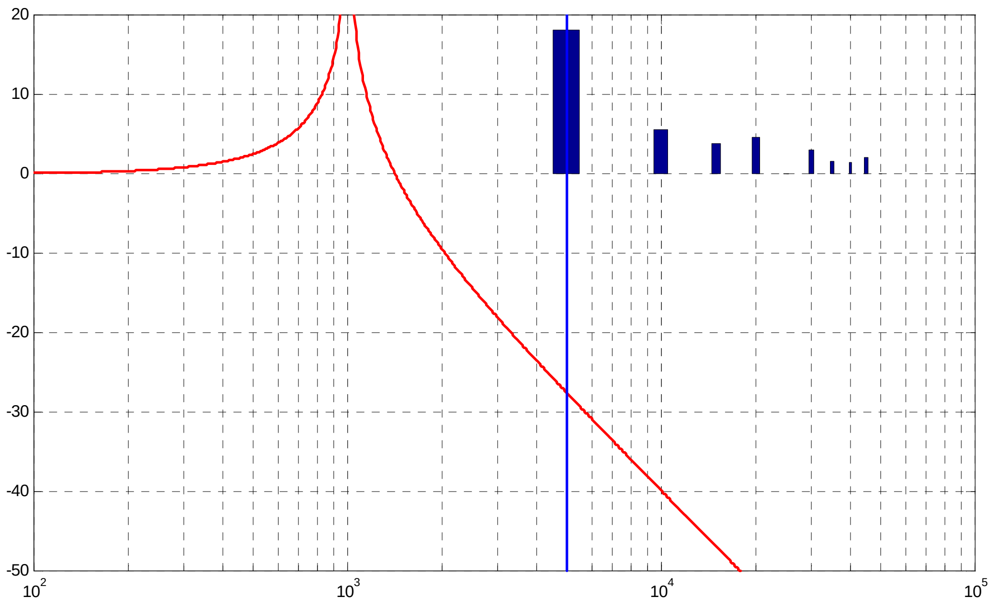
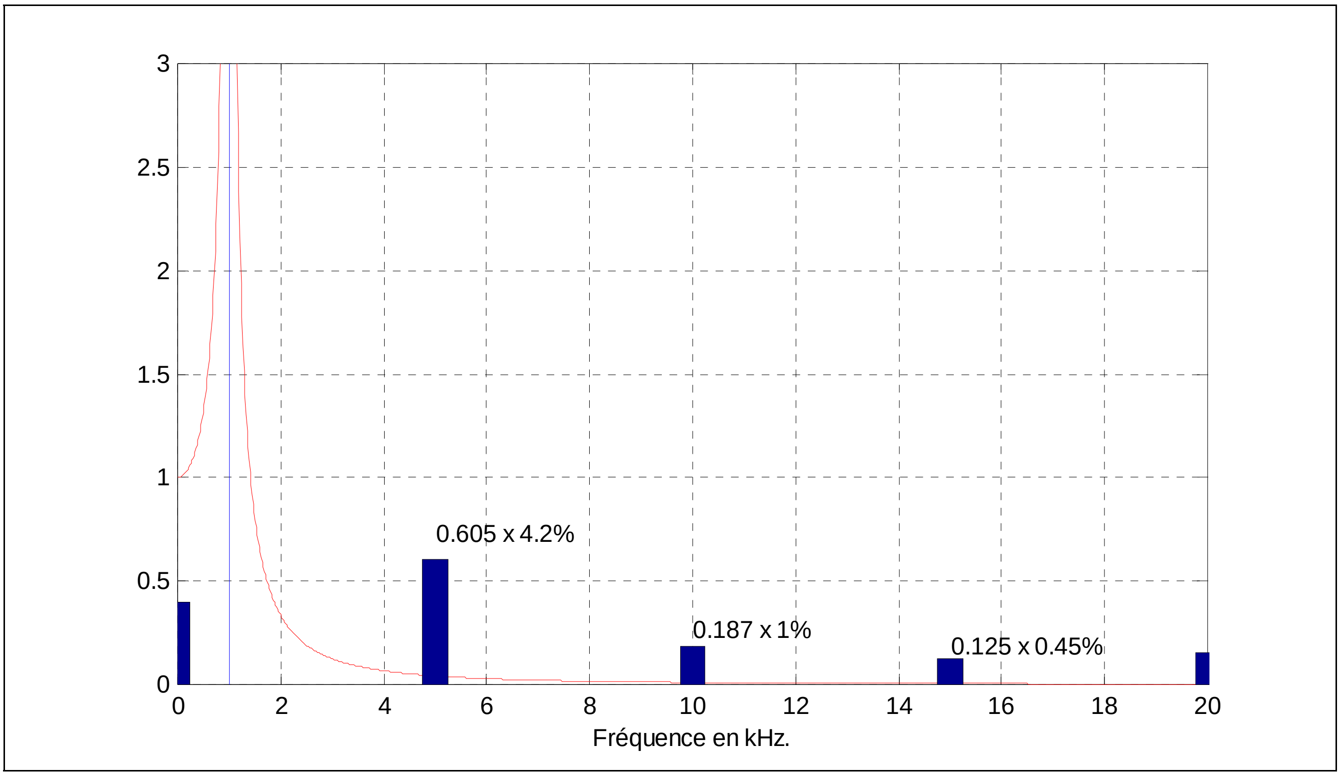
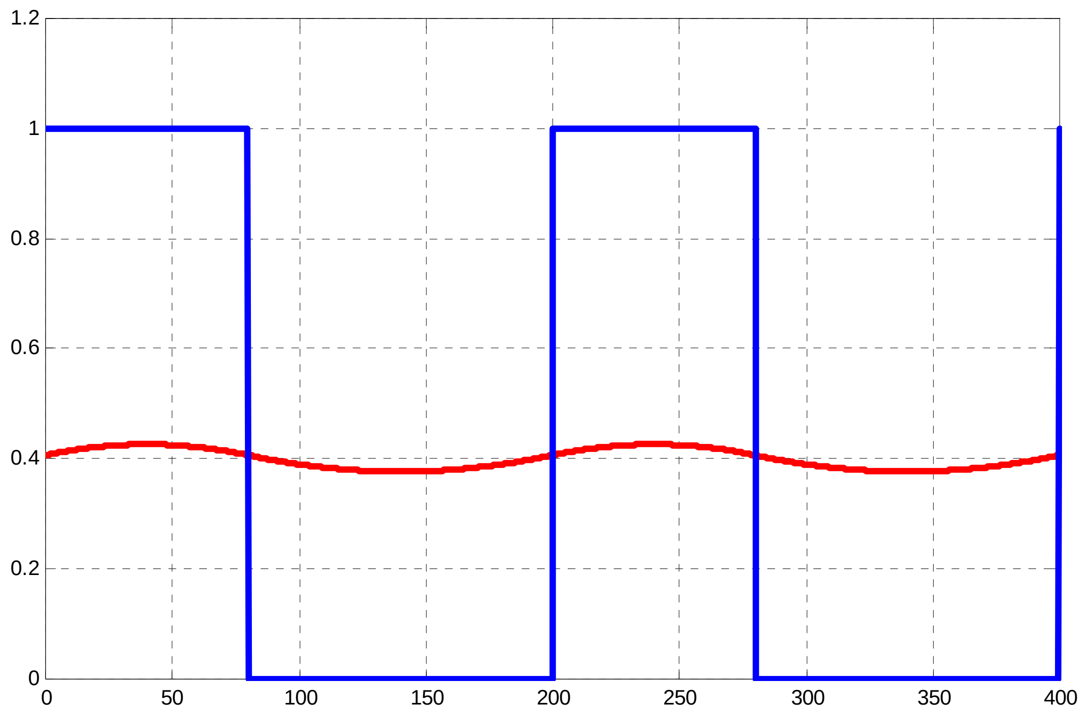


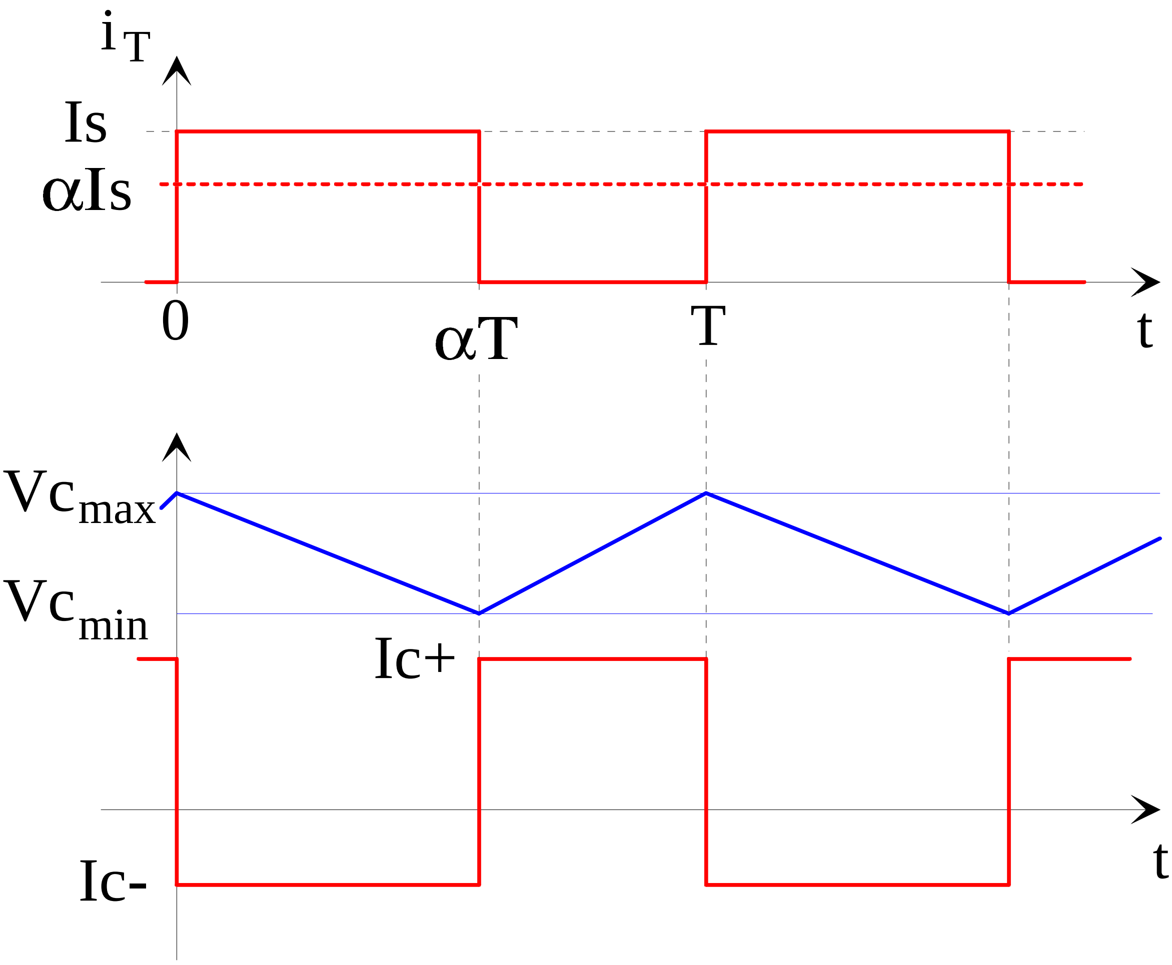
Diagramme de fréquence du filtre d'entrée



Courant après le filtre d'entrée :



Approche simplifiée du calcul du condensateur d'entrée



<u>L'ondulation de la tension aux bornes du condensateur vaut :</u>

$$\Delta Vc = Vc_{max} - Vc_{min} = \frac{Is}{Ce}(1-\alpha)\alpha T = \frac{Is}{Ce \cdot F}\alpha(1-\alpha)$$

$$\text{avec } \Delta Vc \leq \Delta Vc_{max} = \Delta Vc\left(\alpha = \frac{1}{2}\right) = \frac{Is}{4 \cdot Ce \cdot F}$$

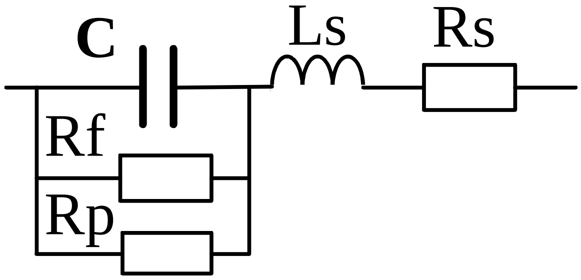
<u>Le courant efficace dans le condensateur vaut :</u>

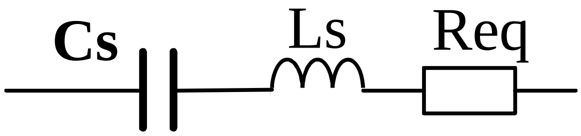
$$Iceff = \sqrt{\left(Is^2 + Is\Delta I_L + \frac{\Delta I_L{}^2}{3}\right)\alpha - \left(Is + \frac{\Delta I_L}{2}\right)^2 \alpha^2}$$

$$\text{Si } \Delta I_L \approx 0 \text{, alors } Iceff = Is\sqrt{\alpha(1-\alpha)}$$

Notes sur le condensateur

Schémas équivalents d'un condensateur :

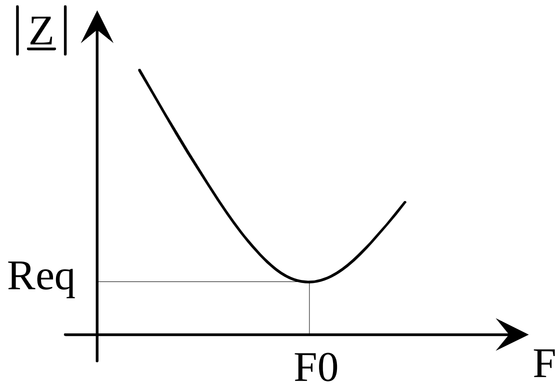




- *Rf* : résistance de fuite de l'isolant
- *Rp* : résistance correspondante aux pertes diélectriques sous tension variable

$$\mathrm{Cs} = \mathrm{C} \times \left[1 + \frac{1}{(\mathrm{RC}\omega)^2}\right] \text{ et } \mathrm{ESR} = \mathrm{Rs} + \frac{\mathrm{R}}{(\mathrm{RC}\omega)^2} \text{ avec } \mathrm{R} = \frac{\mathrm{Rf} \cdot \mathrm{Rp}}{\mathrm{Rf} + \mathrm{Rp}}$$

Variation de l'impédance en fonction de la fréquence



- Si ESR << $\dfrac{1}{2\pi CF}$ alors $\Delta V_C \cong \dfrac{\Delta I_C}{2\pi CF}$
- Si ESR >> $\dfrac{1}{2\pi CF}$ alors $\Delta V_C \cong ESR \cdot \Delta I_C$
- Si ESR $\cong \dfrac{1}{2\pi CF}$ alors $\Delta V_C \cong \sqrt{\left(\dfrac{1}{2\pi CF}\right)^2 + (ESR)^2} \cdot \Delta I_C$