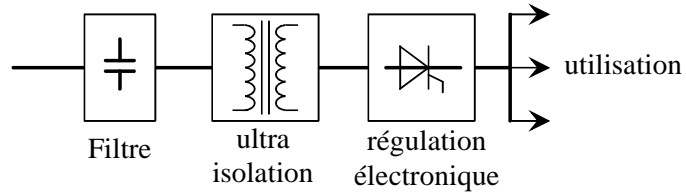
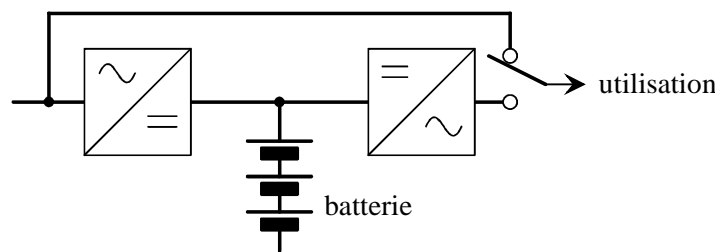


Les alimentations sans coupures

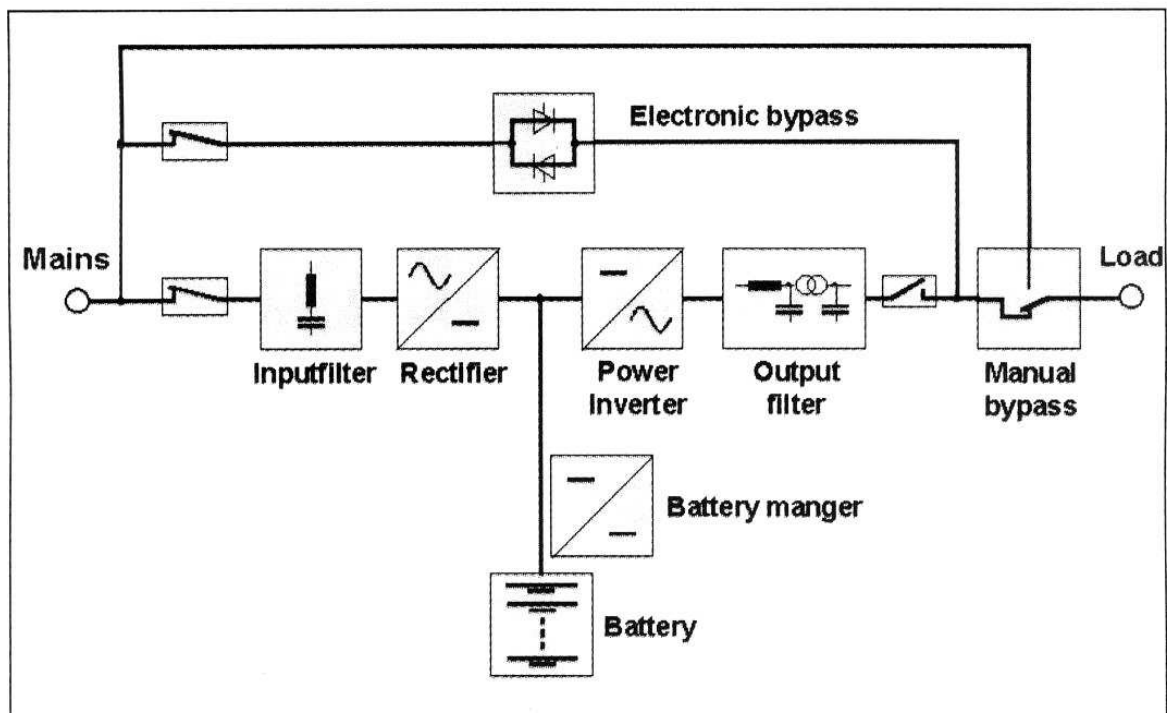
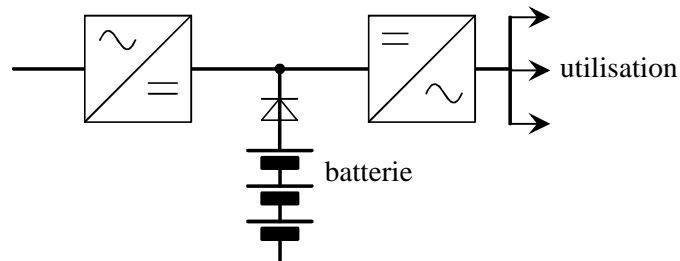
ON LINE sans autonomie



OFF LINE avec autonomie

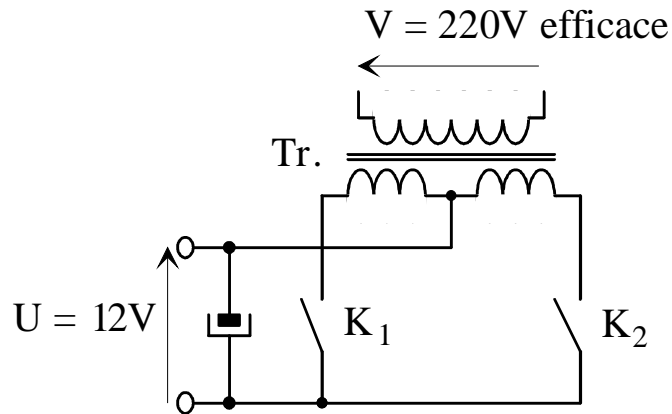


ON LINE avec autonomie

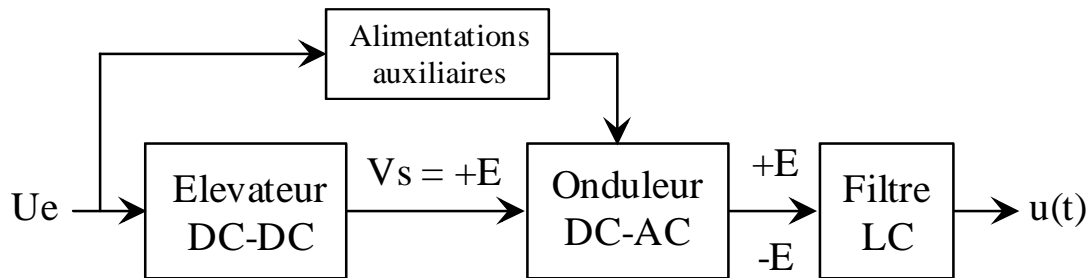


Solutions technologiques

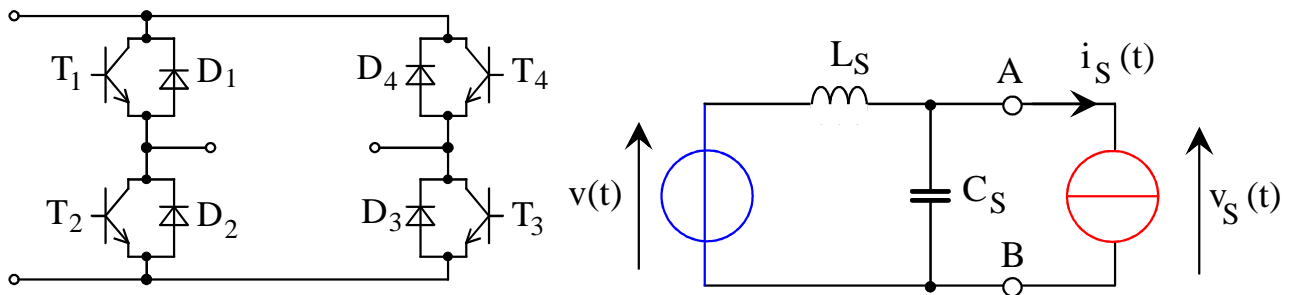
Transformateur à point milieu :



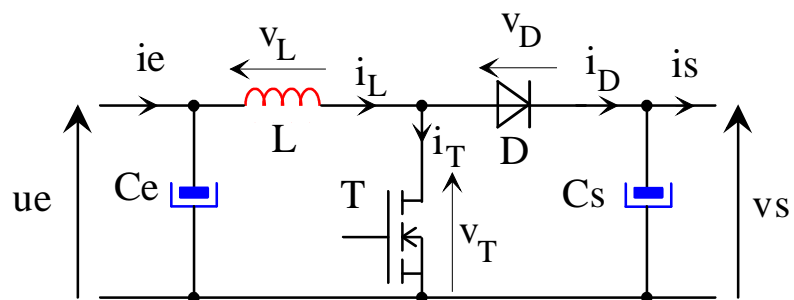
Convertisseur élévateur + onduleur :



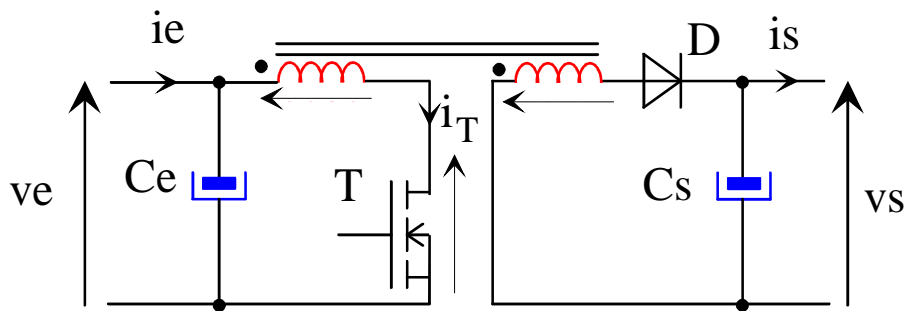
L'onduleur monophasé en pont complet :



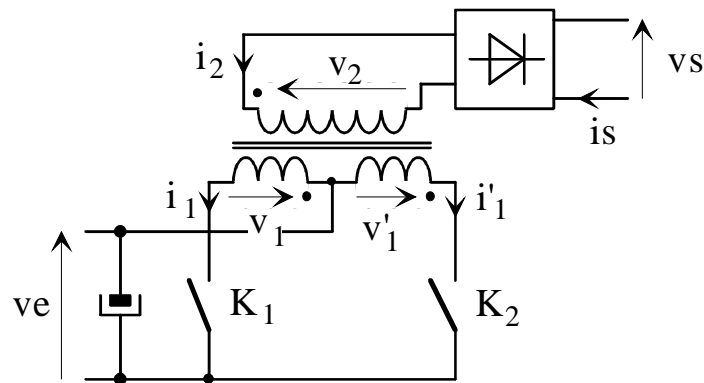
Elévateur de type BOOST :



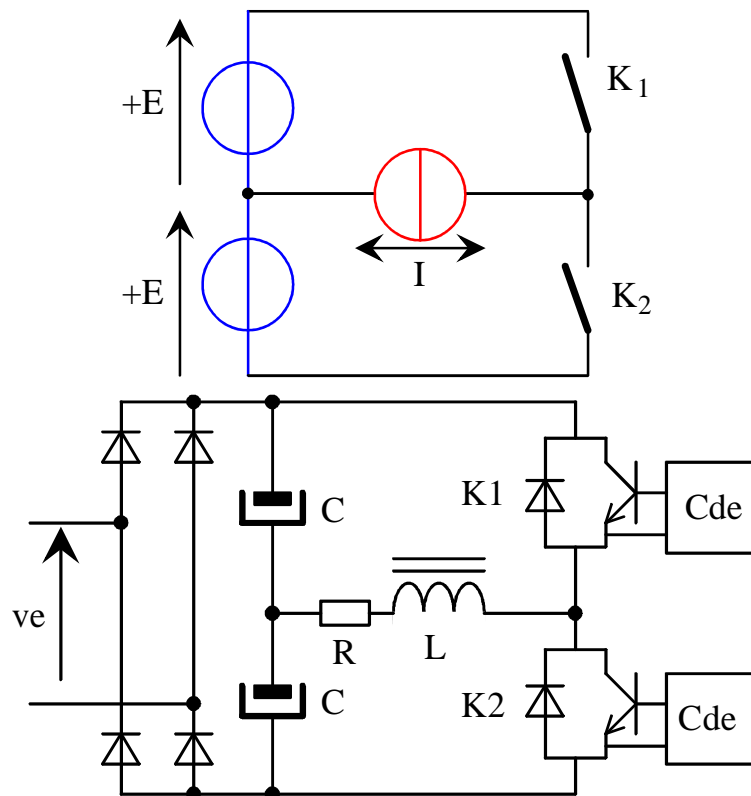
Elévateur de type BOOST à inductance couplée (FLYBACK) :



Elévateur de type onduleur PM :

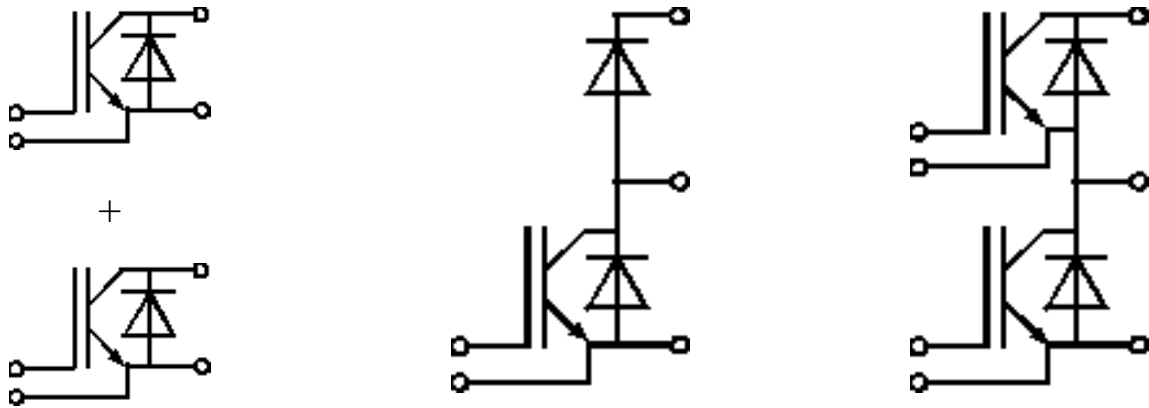


Source à point milieux :

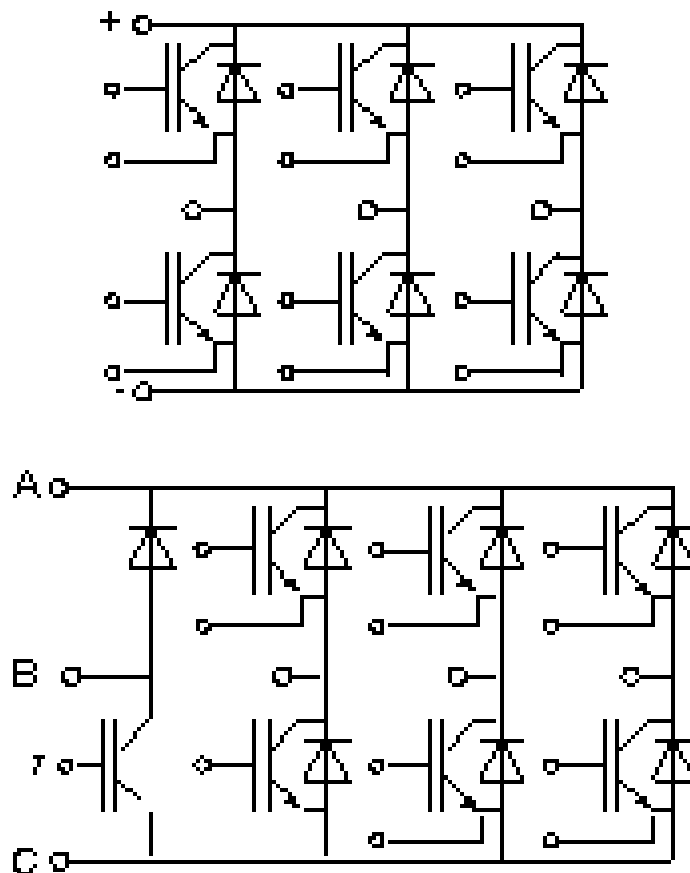


Solutions technologiques

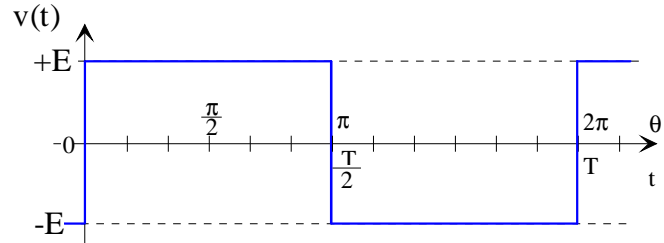
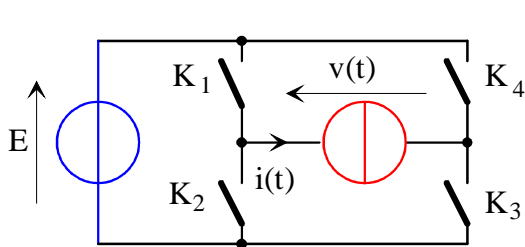
Bras de pont commercialisés pour un onduleur monophasé :



Bras de pont commercialisés pour un onduleur triphasé :



Commande pleine onde ou en onde carrée



Calcul des harmoniques :

Avec $\theta = \omega t$, $\omega = 2 \pi F$, v est une fonction de période 2π , impaire : $v(-\theta) = -v(\theta)$.

Série de Fourier de v : $S_v(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n\theta)$

Propriété : $v(\theta + \pi) = -v(\theta)$, soit $\sin[n(\theta + \pi)] = -\sin(n\theta)$ (si $b_n \neq 0$), soit $n(\theta + \pi) = n\theta + \pi + 2k\pi$, $k \in \mathbb{N}$

D'où la relation $n = 2k + 1$, avec $k \in \mathbb{N}$, donc n impair.

LES COEFFICIENTS D'INDICES PAIRS SONT NULS : $\forall k \in \mathbb{N}^*$, $b_{2k} = 0$

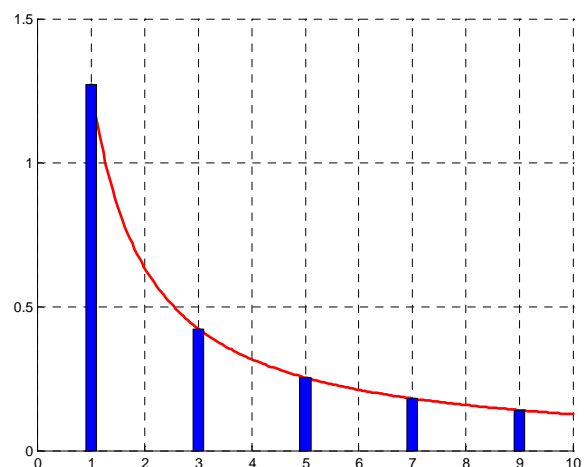
$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(\theta) \cdot \sin(n\theta) \cdot d\theta$. Or $v(\theta) \cdot \sin(n\theta)$ est de période π , donc

$$b_{2k+1} = \frac{2E}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \sin[(2k+1)\theta] \cdot d\theta$$

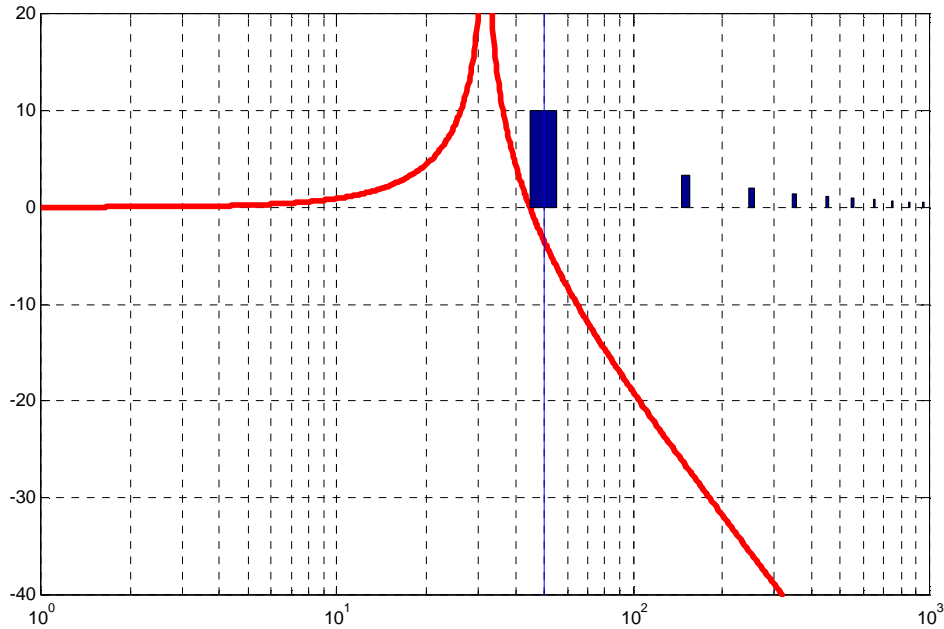
$$\begin{cases} \forall k \in \mathbb{N}^*, b_{2k} = 0 \\ \forall k \in \mathbb{N}, b_{2k+1} = \frac{4E}{(2k+1)\pi} \end{cases}$$

$$S_v(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{4E}{(2k+1)\pi} \sin[(2k+1)\omega t]$$

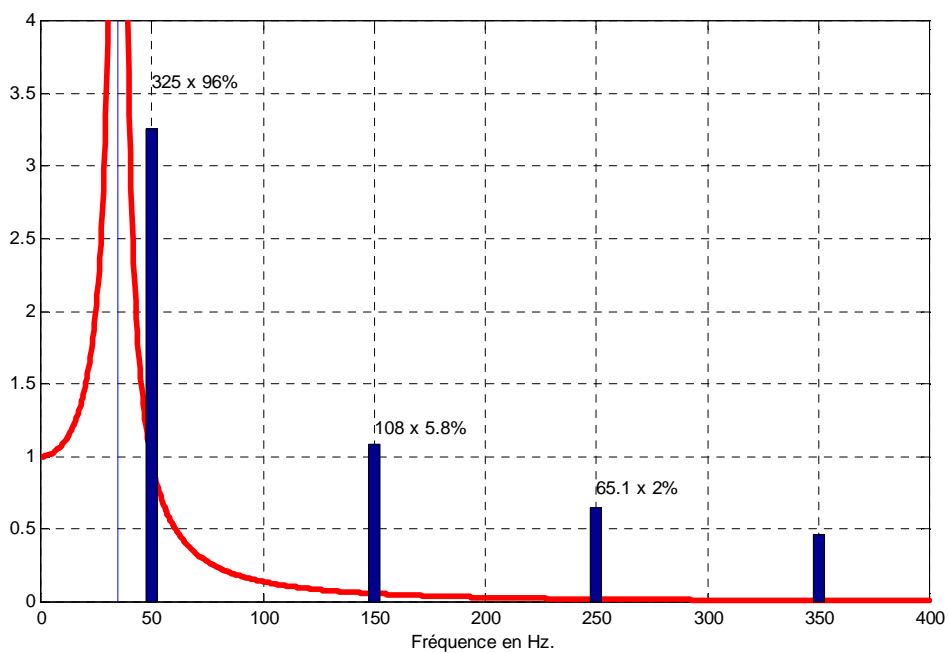
Spectre de la tension de sortie →



Filtrage des harmoniques de la tension

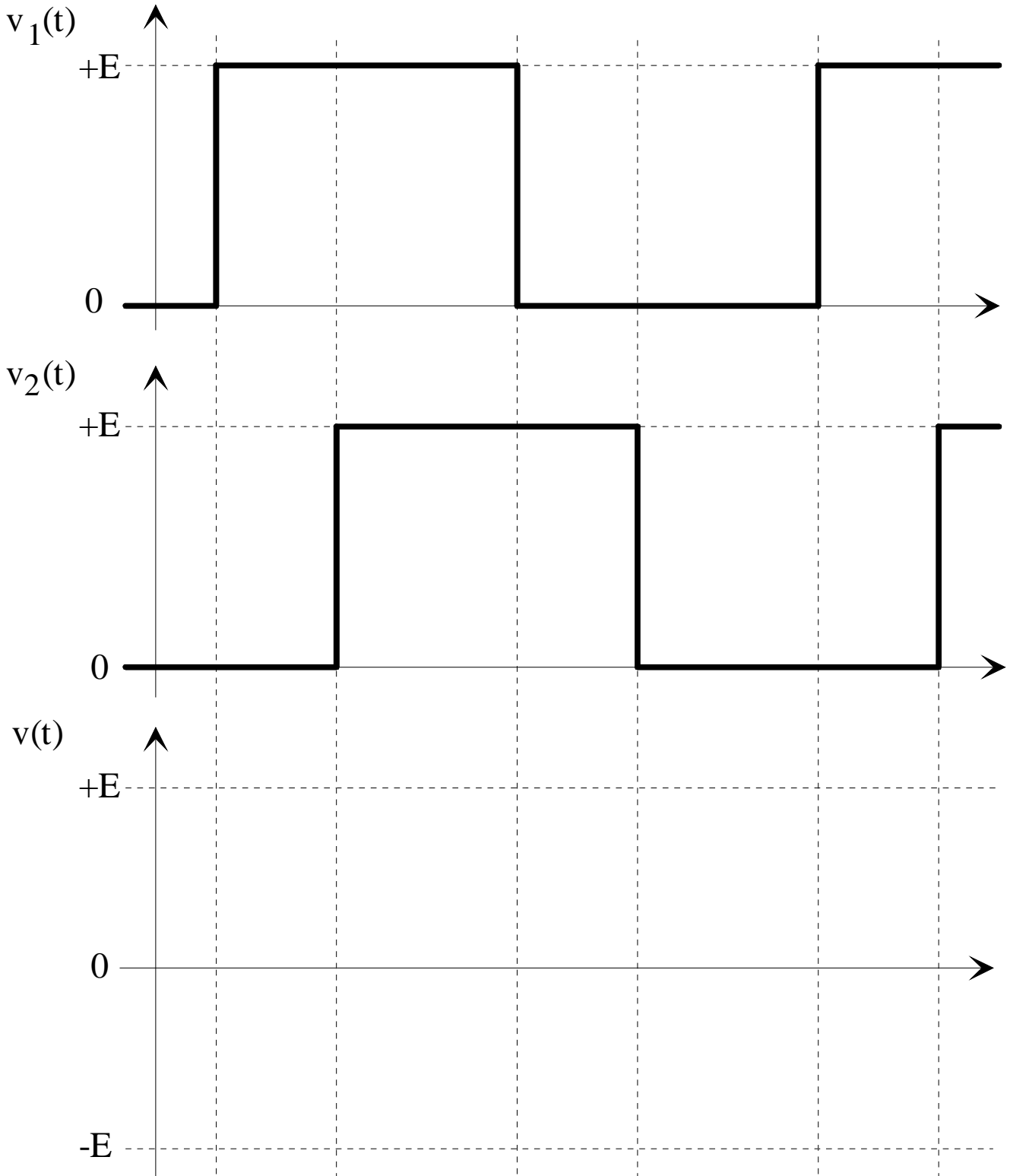


Rang	Fréquence	Amplitude	Atténuation	Gain en dB	Résiduel
n = 1	50 Hz	V1 = 325 V	H1 = 0.96	G1 = -0,3 dB	312 V
n = 3	150 Hz	V3 = 108 V	H3 = 5,76 %	G3 = -24 dB	6 V
n = 5	250 Hz	V5 = 65 V	H5 = 2 %	G4 = - 34 dB	1,3 V



Commande décalée

Définition de la tension de sortie :



Harmoniques de la tension de sortie

Développement en série :

$$V_{1\text{eff}} = \frac{|b_n|}{\sqrt{2}} = \frac{\hat{V}_1}{\sqrt{2}} = E \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \left| \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \right| \quad \hat{V}_{2k+1} = \frac{4E}{(2k+1)\pi} \cdot \left| \sin\left(\frac{(2k+1)\beta}{2}\right) \right|$$

Valeur efficace :

$$V_{\text{eff}} = E \sqrt{\frac{\beta}{\pi}}$$

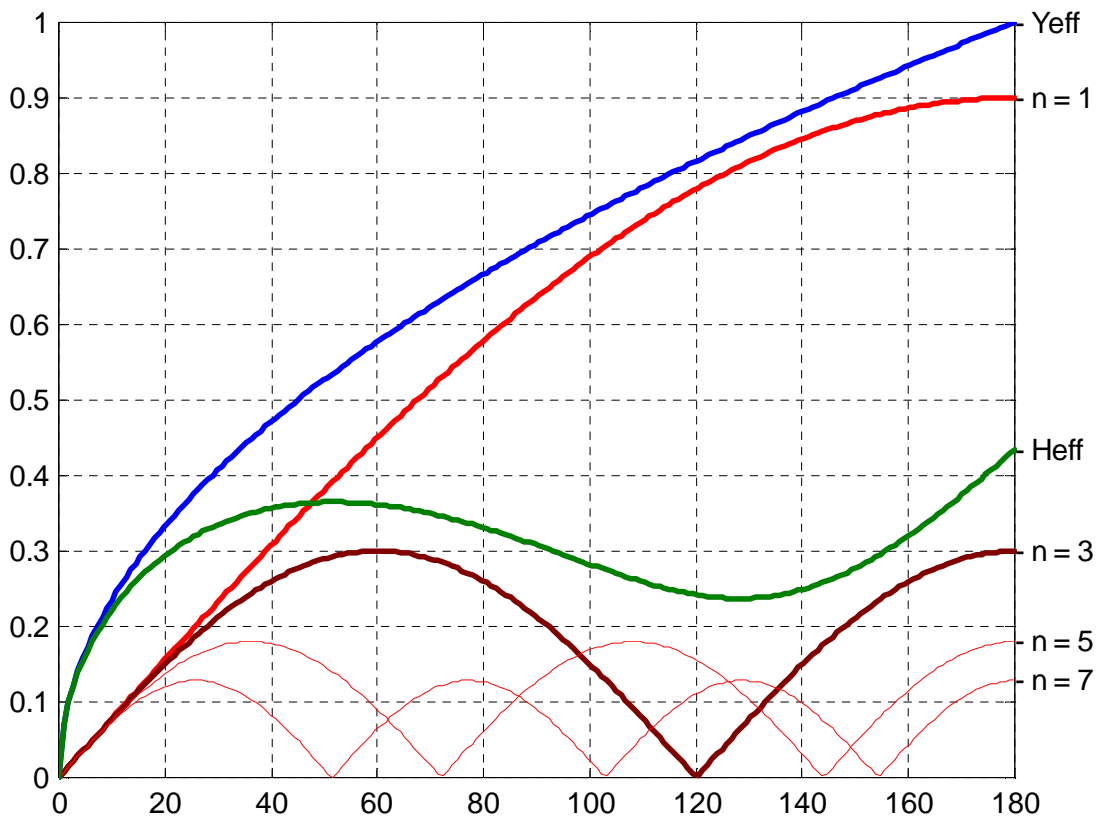
Valeur efficace des harmoniques :

$$V_{H\text{eff}} = \sqrt{V_{\text{eff}}^2 - V_{1\text{eff}}^2} = \sqrt{\sum_{n>1} V_{n\text{eff}}^2}$$

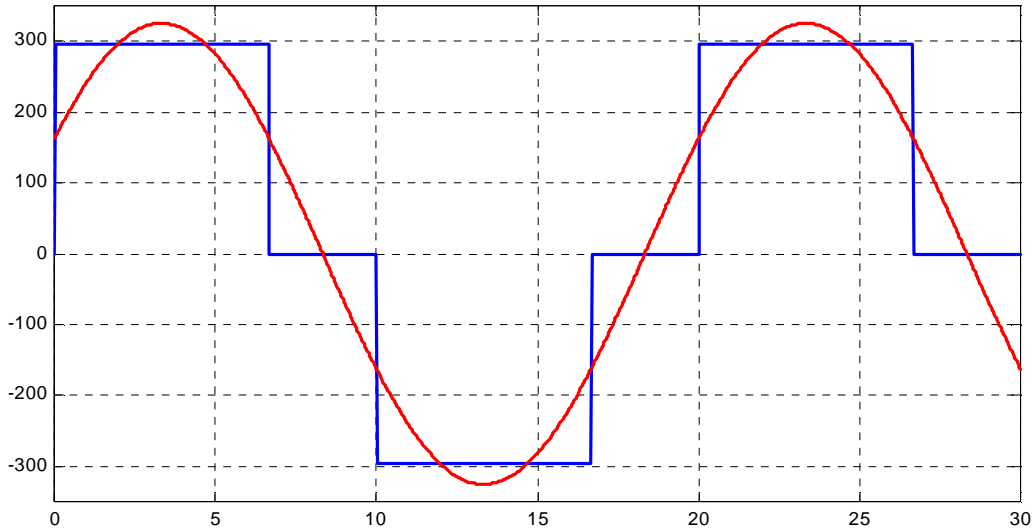
Taux de Distorsion Harmonique :

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{V_{\text{eff}}^2 - V_{1\text{eff}}^2}{V_{1\text{eff}}^2}}$$

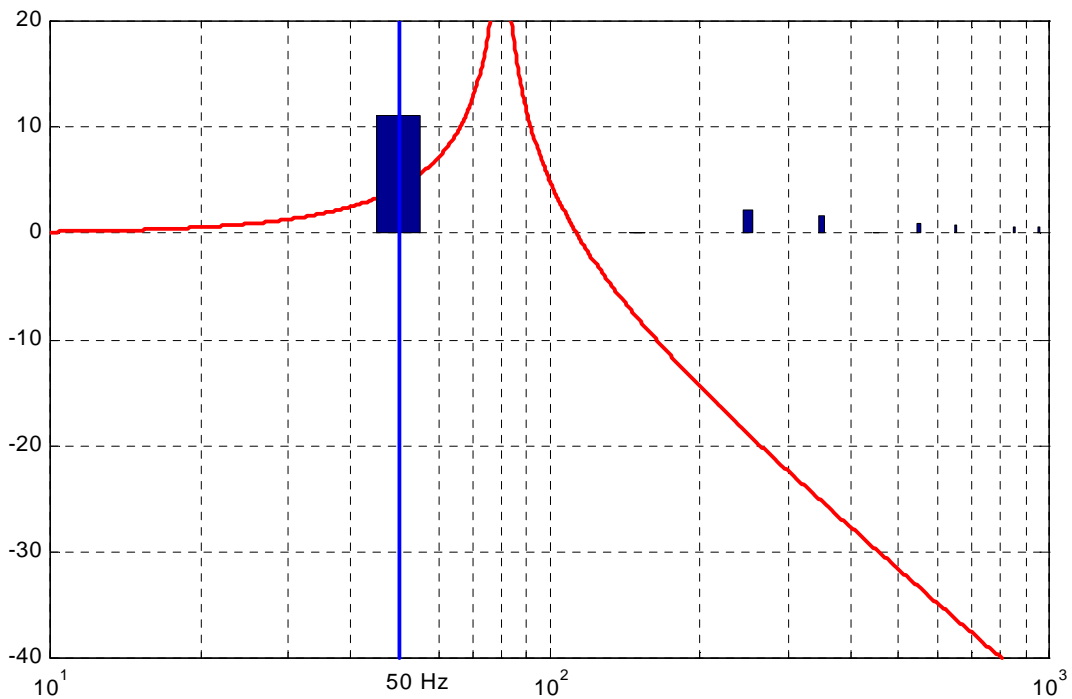
Evolution des harmoniques en fonction de β en $^\circ$:



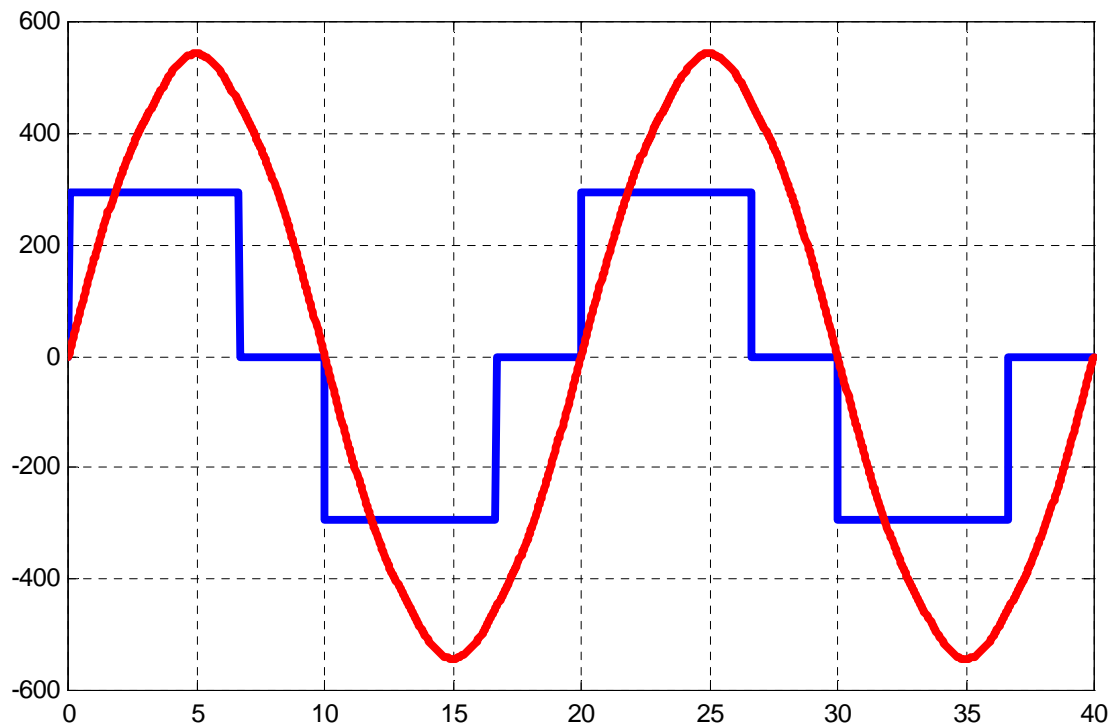
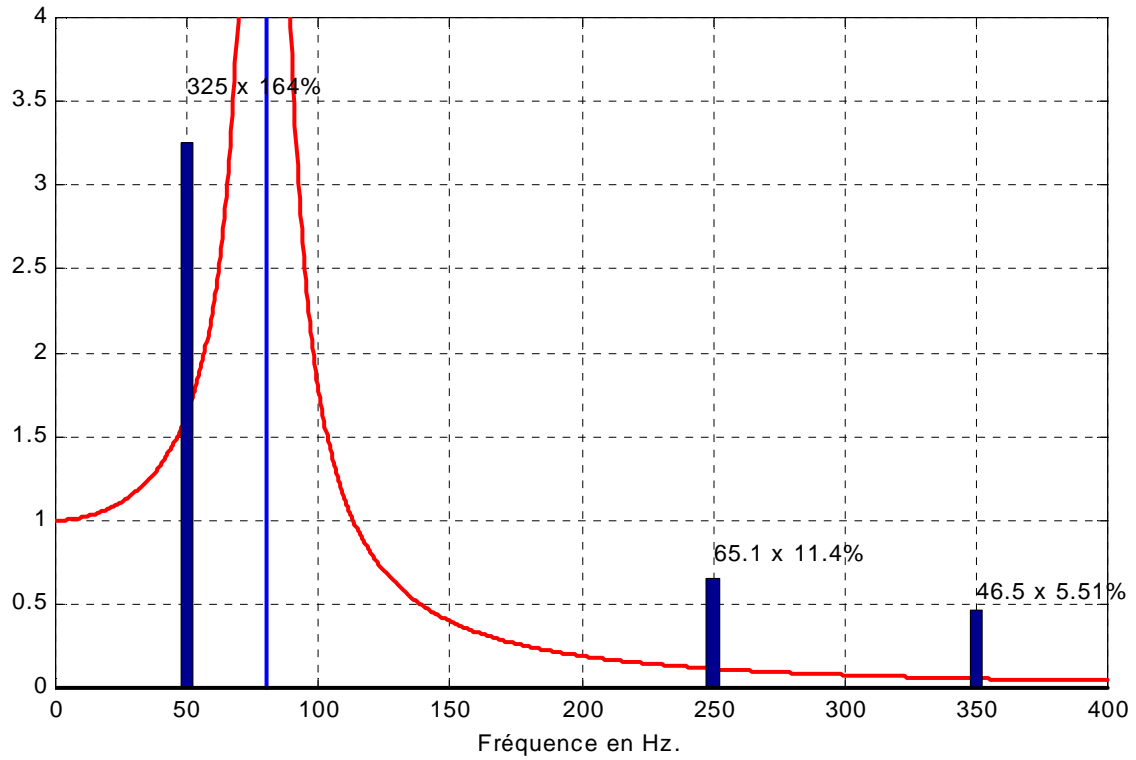
Etude du cas $\beta = 120^\circ$



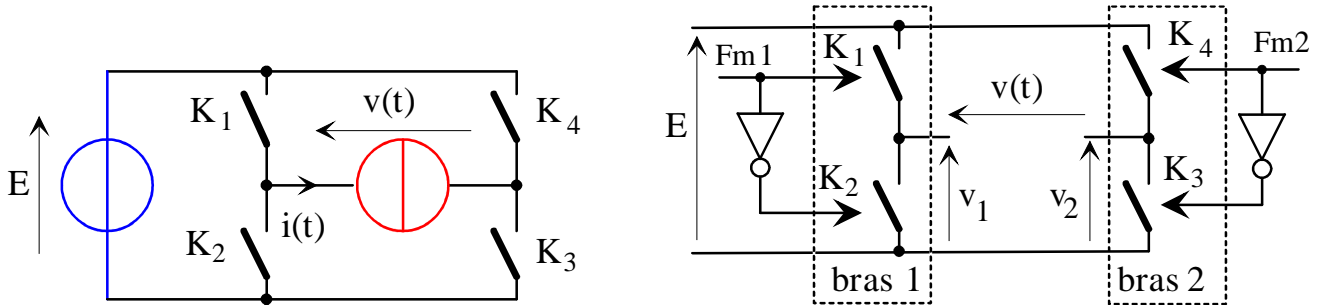
Rang	Fréquence	Amplitude	Atténuation	Gain en dB	Résiduel
n = 1	50 Hz	V1 = 325 V	H1 = 164 %	G1 = +4,3 dB	534 V
n = 3	150 Hz	V3 = 0 V			0 V
n = 5	250 Hz	V5 = 65 V	H5 = 11,4 %	G5 = - 19 dB	7,4 V
n = 7	350 Hz	V7 = 46,5 V	H7 = 5,5 %	G7 = -25 dB	2,5 V



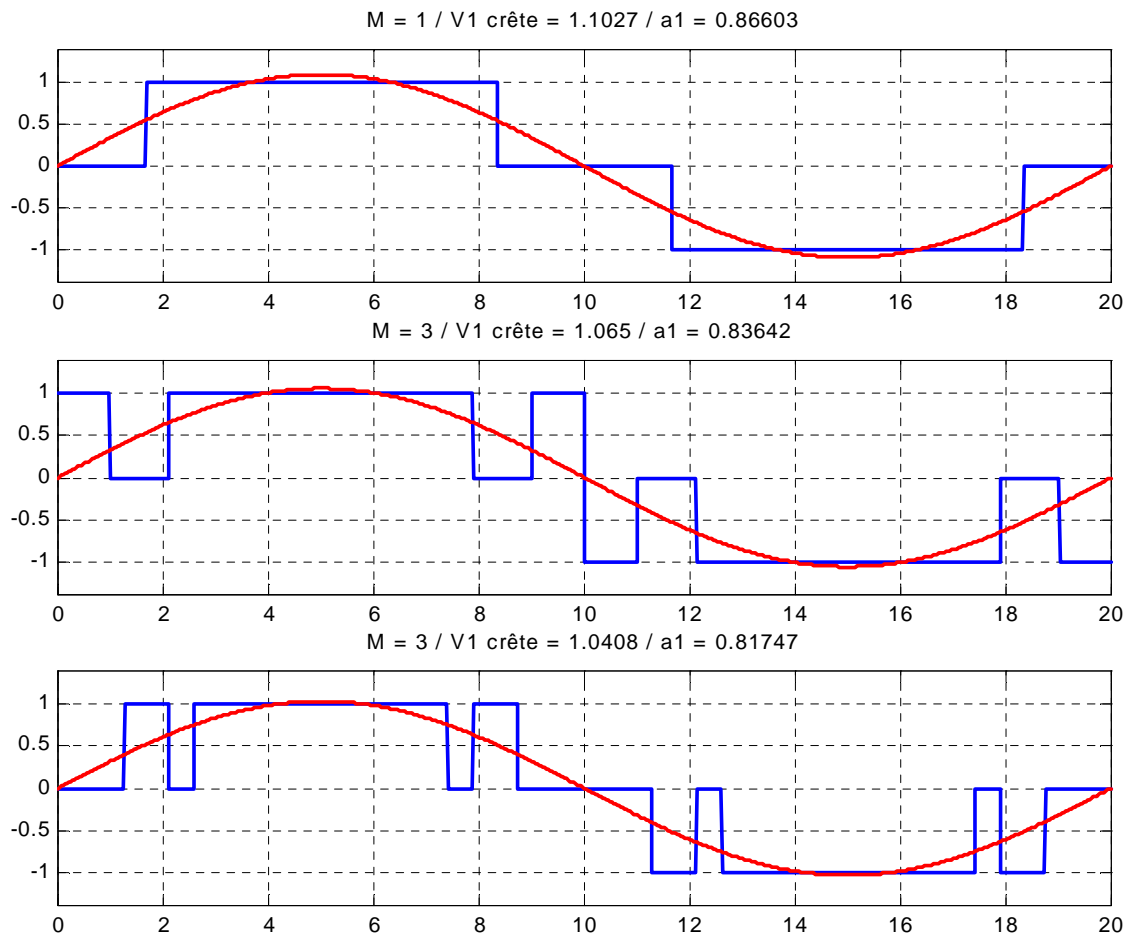
Filtrage de la tension de sortie



Calcul des instants de commutation – Onduleur en pont



Tension de sortie :



- 1) $\alpha_1 = 30^\circ$, pas d'harmonique 3;
- 2) $\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 17^\circ 9$, $\alpha_3 = 38^\circ$, pas d'harmoniques 3 et 5;
- 3) $\alpha_1 = 22^\circ 7$, $\alpha_2 = 37^\circ 85$, $\alpha_3 = 46^\circ 8$, pas d'harmoniques 3, 5 et 7.

Construction du signal – Fonctions de modulations

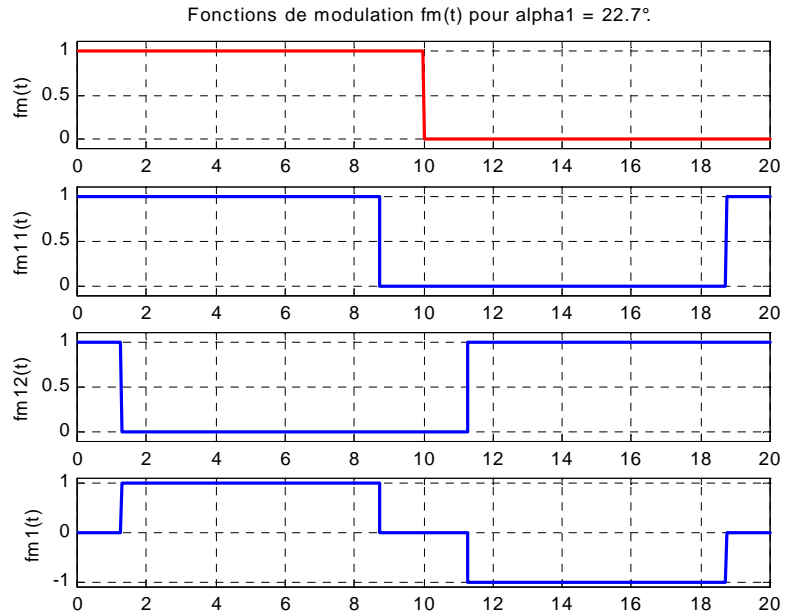
Exemple :

$$\alpha_1 = 22,7^\circ$$

$$fm11(\theta) = fm(\theta - \alpha_1)$$

$$fm12(\theta) = fm(\theta + \pi + \alpha_1)$$

$$fm1 = fm11 - fm12$$



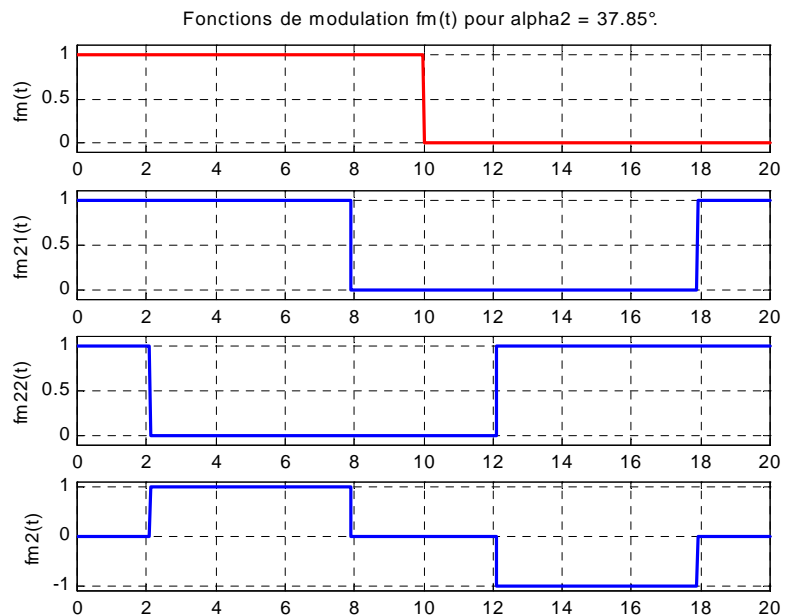
Exemple :

$$\alpha_2 = 37,85^\circ$$

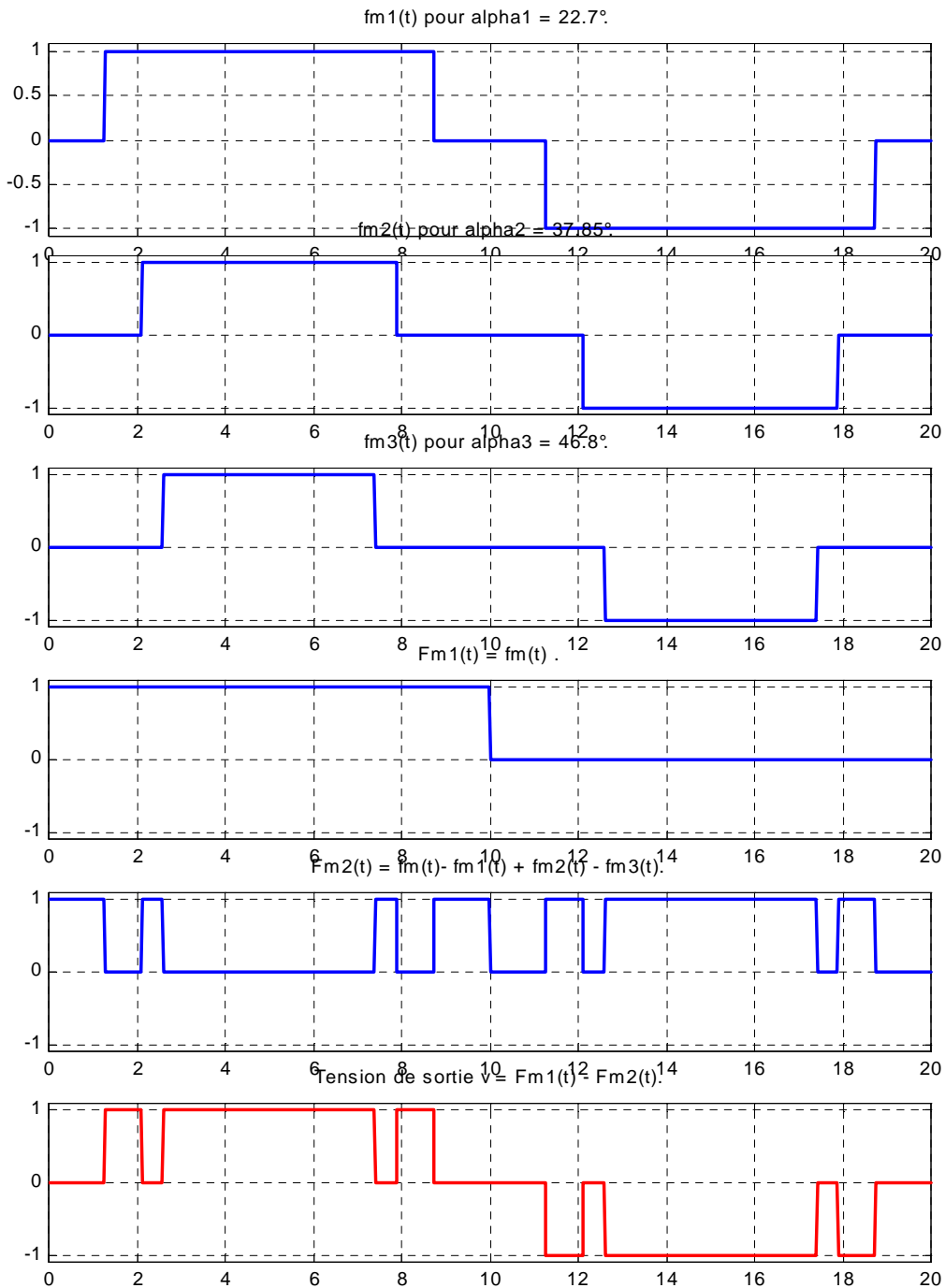
$$fm21(\theta) = fm(\theta - \alpha_2)$$

$$fm22(\theta) = fm(\theta + \pi + \alpha_2)$$

$$fm2 = fm21 - fm22$$



Construction du signal - Onduleur en pont



$$F_{m1}(t) = f_m \text{ et } F_{m2}(t) = f_m - f_{m1} + f_{m2} - f_{m3}$$

Expression des harmoniques - Onduleur en pont

La fonction de modulation est donnée de façon générale par la formule :

$$Fm2(t) = fm(t) + \sum_{i=1}^{i=M} (-1)^i \cdot fmi(t)$$

avec M le nombre d'angle de commutations par quart de période. Il y aura donc $4 \times M + 2$ commutations par période T. La fonction de base fm(t), fonction carrée à rapport cyclique $\frac{1}{2}$ évoluant entre 0 et +1, a pour développement en série de Fourier : $fm(t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \sin(n\omega t)$.

La fonction de base fmi(t) = fmi1(t) - fmi2(t) = fm(t - t1) - fm(t + t1 + T/2) a pour développement en série de Fourier :

$$fmi(t) = \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \{\sin(n\omega t - n\alpha_i) - \sin(n\omega t + n\alpha_i + n\pi)\}$$

Or pour $n = 2k + 1$, $n\pi = (2k + 1)\pi = 2k\pi + \pi = \pi$, donc le sinus change de signe.

$$fmi(t) = \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \{\sin(n\omega t - n\alpha_i) + \sin(n\omega t + n\alpha_i)\}$$

Avec la relation $\sin(p) + \sin(q) = 2 \cdot \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$, on obtient :

$$fmi(t) = \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot \cos(n\alpha_i) \cdot \sin(n\omega t)$$

En reportant dans l'expression précédente, on obtient la décomposition harmonique de la fonction Fm2 :

$$Fm2(t) = fm(t) - \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot \left[\sum_{i=1}^{i=M} (-1)^i \cdot \cos(n\alpha_i) \right] \cdot \sin(n\omega t)$$

La décomposition de la tension de sortie vaut alors :

$$v(t) = +E [Fm1(t) - Fm2(t)] = \sum_{n=2k+1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n\omega t) \text{ et } b_n = \frac{4E}{n\pi} \left[\sum_{i=1}^{i=M} (-1)^i \cdot \cos(n\alpha_i) \right]$$

L'expression générale des harmoniques s'établit aisément à partir de la décomposition en signal carré élémentaire du signal modulé. On obtient alors :

$$V_{n\text{eff}} = \frac{|b_n|}{\sqrt{2}} = V_{0\text{eff}} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left| -\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) - \cos(n\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(n\alpha_M) \right|$$

avec $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ($n = 2k + 1$) et $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_M \leq \frac{\pi}{2}$. V_n est la valeur efficace de l'harmonique de rang

n et $V_{0\text{eff}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E$ l'amplitude efficace maximale dans le cas pleine onde.

Elimination des harmoniques de tension – Onduleur en pont

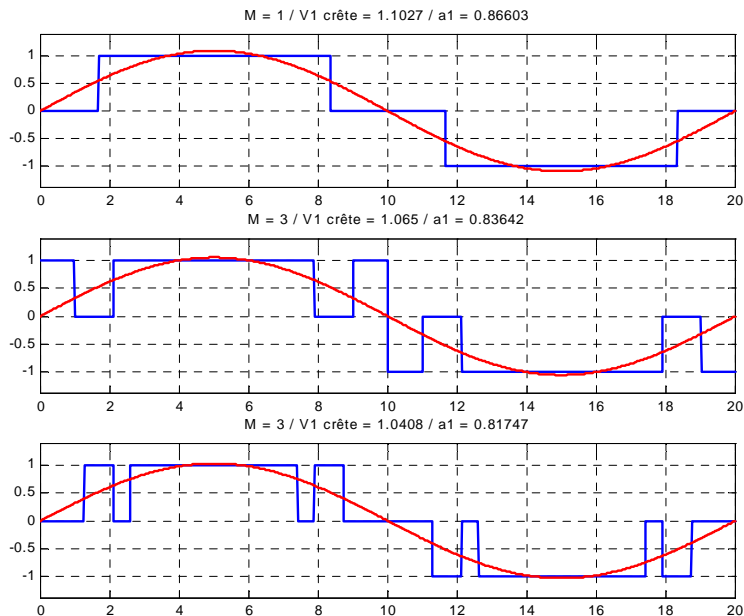
Expression des harmoniques :

$$V_n = V_{10} \cdot \frac{1}{n} \cdot \left| -\cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) - \cos(n\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(n\alpha_M) \right|$$

avec $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ($n = 2k + 1$) et $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_M \leq \frac{\pi}{2}$.

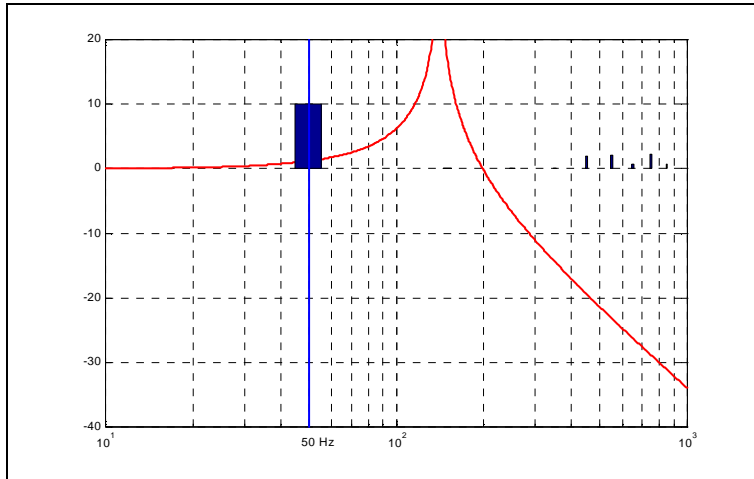
Elimination des harmoniques :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| -\cos(1\alpha_1) + \cos(1\alpha_2) - \cos(1\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(1\alpha_M) \right| = \frac{V_1}{V_{10}} \\ -\cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) - \cos(3\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(3\alpha_M) = 0 \\ -\cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) - \cos(5\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(5\alpha_M) = 0 \\ \dots\dots\dots \\ -\cos((2M-1)\alpha_1) + \cos((2M-1)\alpha_2) \dots + (-1)^M \cos((2M-1)\alpha_M) = 0 \end{array} \right.$$



- 1) $\alpha_1 = 30^\circ$, pas d'harmonique 3;
- 2) $\alpha_1 = 0^\circ$, $\alpha_2 = 17^\circ 9$, $\alpha_3 = 38^\circ$, pas d'harmoniques 3 et 5;
- 3) $\alpha_1 = 22^\circ 7$, $\alpha_2 = 37^\circ 85$, $\alpha_3 = 46^\circ 8$, pas d'harmoniques 3, 5 et 7.

Filtrage des harmoniques – Onduleur en pont



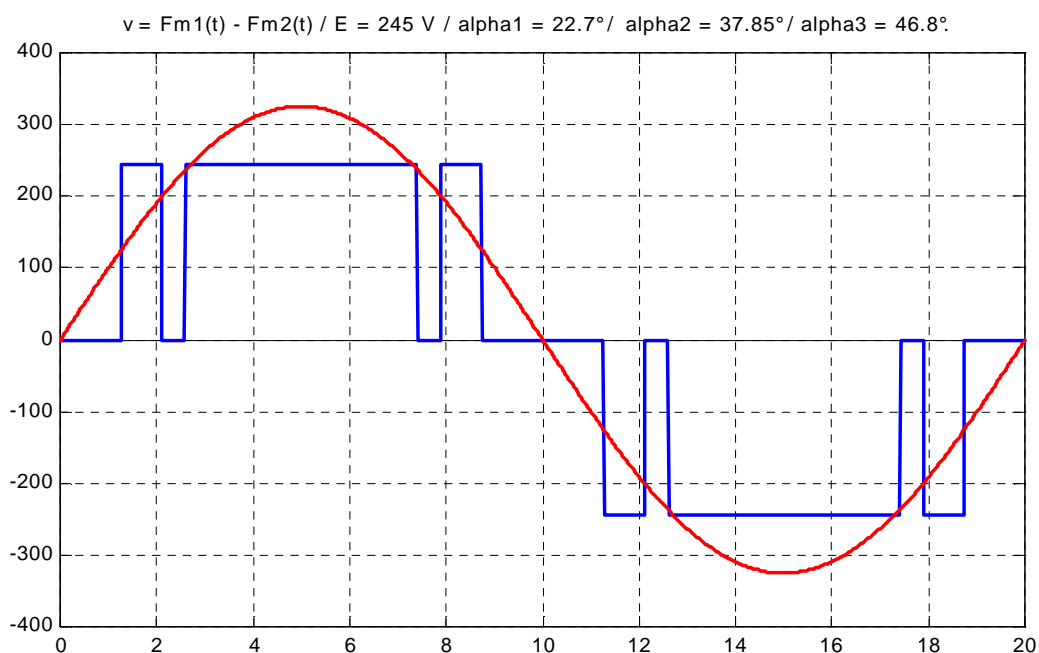
Valeurs de L et de C
pour $f_0 = 140$ Hz :

L	C
1 H – Imax	1,3 μ F 400V AC
100 mH – Imax	13 μ F 400V AC
10 mH – Imax	130 μ F 400V AC
20 mH - Imax	64,6 μ F 400V AC

Amplitude des harmoniques pour $F_0 = 140$ Hz et $E = 245$ V :

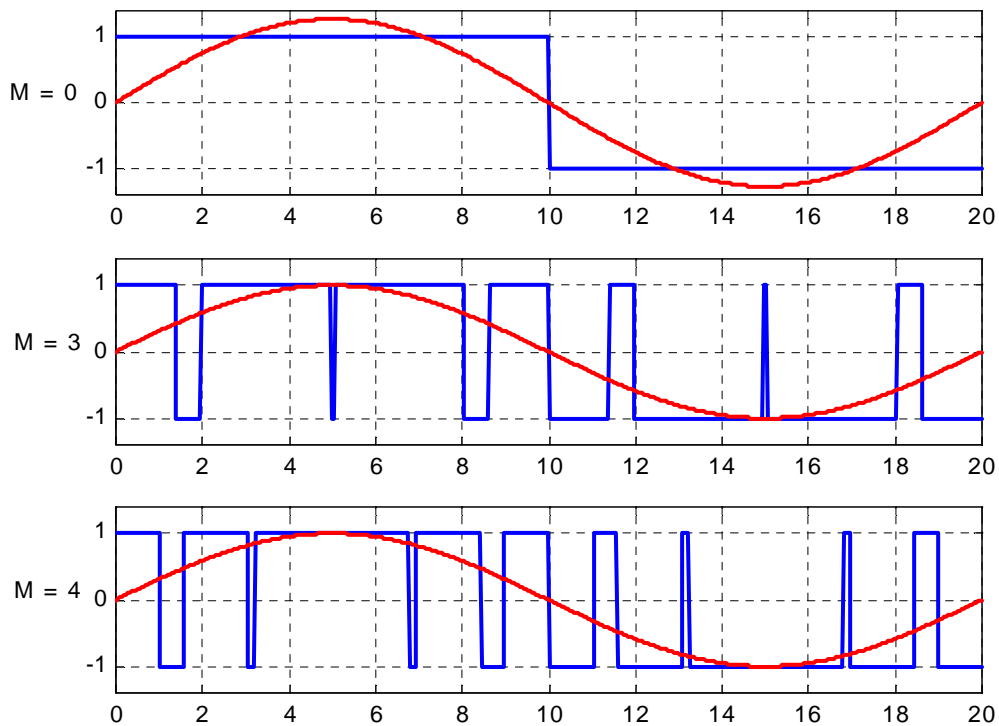
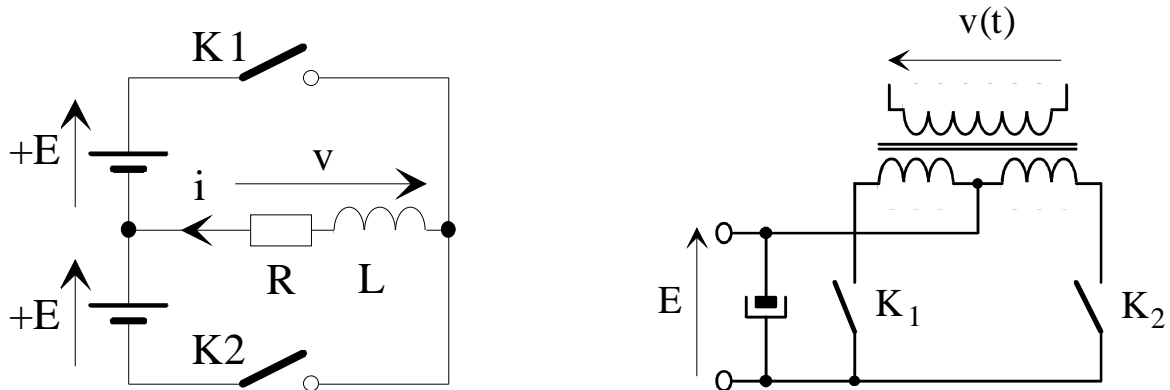
Rang	Fréquence	Tension efficace	Atténuation	Gain en dB	Résiduel
n = 1	50 Hz	V1 = 230 V	H1 = 114 %	G1 = +1,2 dB	263 V
n = 3	150 Hz	V3 = 0 V			0 V
n = 5	250 Hz	V5 = 0 V			0 V
n = 7	350 Hz	V7 = 0 V			0 V
n = 9	450 Hz	V9 = 42,9 V	H9 = 10 %	G9 = -19 dB	4,6 V

Tension avant et après le filtre de sortie :



Calcul des instants de commutation Onduleur en demi-pont

Onduleur en demi-pont :



- 1) pas de commutation supplémentaire : commande en onde carrée ;
- 2) 3 commutations par quart de période : $\alpha_1 = 25^\circ 0$, $\alpha_2 = 35^\circ 5$, $\alpha_3 = 89^\circ 1$;
- 3) 4 commutations : $\alpha_1 = 18^\circ 6$, $\alpha_2 = 28^\circ 3$, $\alpha_3 = 55^\circ 2$, $\alpha_4 = 57^\circ 9$.

Fonctions de modulation – Onduleur en demi-pont

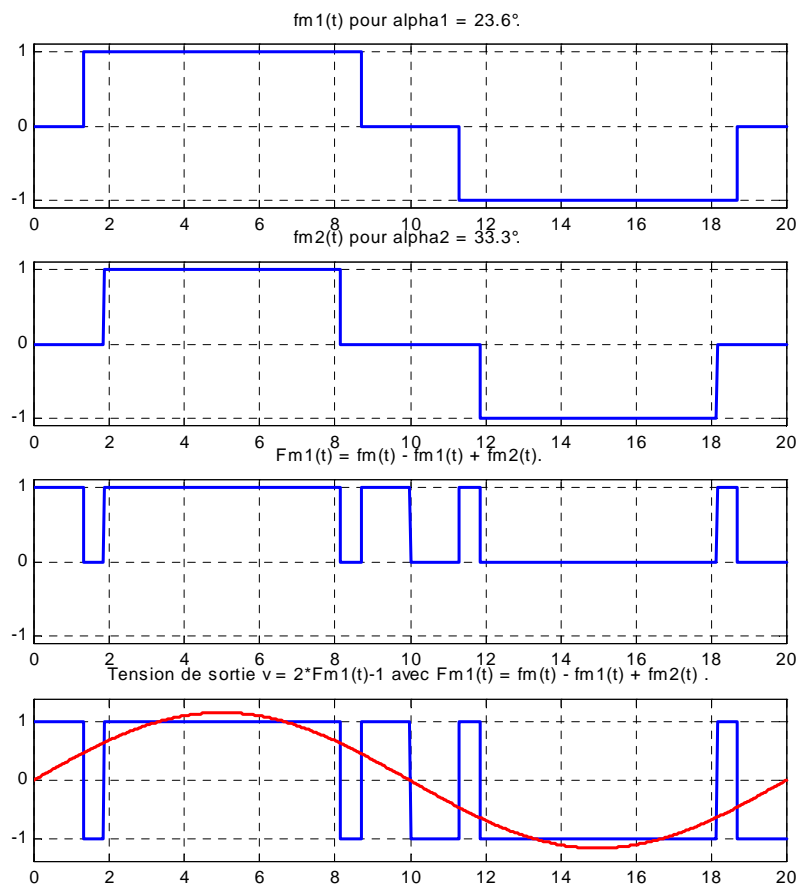
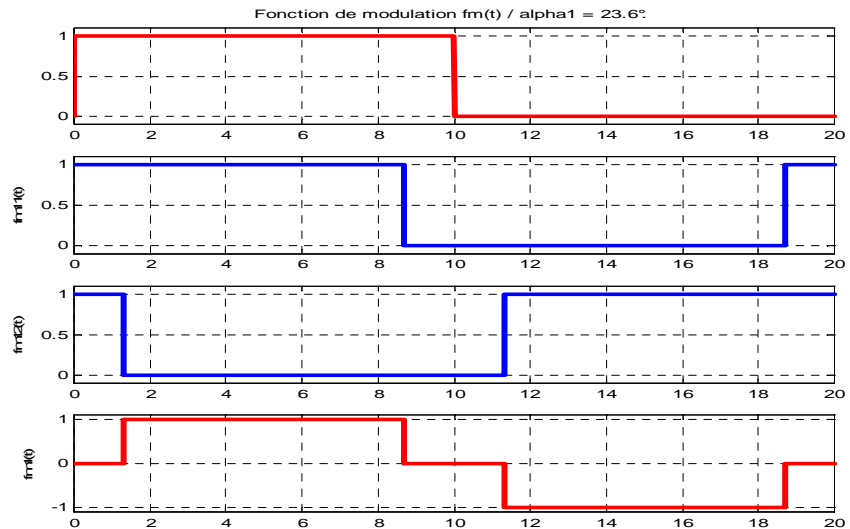
Exemple :

$$\alpha_1 = 23,6^\circ$$

$$fm11(\theta) = fm(\theta - \alpha_1)$$

$$fm12(\theta) = fm(\theta + \pi + \alpha_1)$$

$$fm1 = fm11 - fm12$$



$$Fm1(t) = 1 - Fm2(t) = fm(t) - fm1(t) + fm2(t)$$

Expression des harmoniques – Onduleur en demi-pont

La fonction de modulation est donnée de façon générale par la formule :

$$Fm1(t) = \overline{Fm2(t)} = fm(t) + \sum_{i=1}^{i=M} (-1)^i \cdot fmi(t)$$

avec M le nombre d'angle de commutations par quart de période. Il y aura donc $4 \times M + 2$ commutations par période T. La fonction de base fm(t), fonction carrée à rapport cyclique $\frac{1}{2}$ évoluant entre 0 et +1, a pour développement en série de Fourier : $fm(t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \sin(n\omega t)$.

La fonction de base fmi(t) = fmi1(t) - fmi2(t) = fm(t - t1) - fm(t + t1 + T/2) a pour développement :

$$fmi(t) = \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \{\sin(n\omega t - n\alpha_i) - \sin(n\omega t + n\alpha_i + n\pi)\}$$

Or pour $n = 2k + 1$, $n\pi = (2k + 1)\pi = 2k\pi + \pi = \pi$, donc le sinus change de signe.

$$fmi(t) = \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \cdot \{\sin(n\omega t - n\alpha_i) + \sin(n\omega t + n\alpha_i)\}$$

Avec la relation $\sin(p) + \sin(q) = 2 \cdot \sin\left(\frac{p+q}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{p-q}{2}\right)$, on obtient :

$$fmi(t) = \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot \cos(n\alpha_i) \cdot \sin(n\omega t)$$

En reportant dans l'expression de $Fm1(t) = fm(t) + \sum_{i=1}^{i=M} (-1)^i \left\{ \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot \cos(n\alpha_i) \cdot \sin(n\omega t) \right\}$, On obtient la décomposition harmonique de la fonction de modulation :

$$Fm1(t) = \frac{1}{2} + \sum_{n=2k+1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot \left[\frac{1}{2} + \sum_{i=1}^{i=M} (-1)^i \cdot \cos(n\alpha_i) \right] \cdot \sin(n\omega t)$$

La tension de tension de sortie vaut alors :

$$v(t) = +E(2 Fm1(t) - 1) = \sum_{n=2k+1} b_n \cdot \sin(n\omega t) \text{ et } b_n = \frac{4E}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{i=M} (-1)^i \cdot \cos(n\alpha_i) \right]$$

$$V_{n\text{eff}} = \frac{|b_n|}{\sqrt{2}} = V_{0\text{eff}} \cdot \frac{2}{n} \cdot \left| \frac{1}{2} - \cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) - \cos(n\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(n\alpha_M) \right|$$

avec $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ($n = 2k + 1$) et $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_M \leq \frac{\pi}{2}$. V_n est la valeur efficace de l'harmonique de rang n

et $V_{0\text{eff}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E$ l'amplitude efficace maximale dans le cas pleine onde.

Elimination des premiers harmoniques de tension – Onduleur en demi-pont

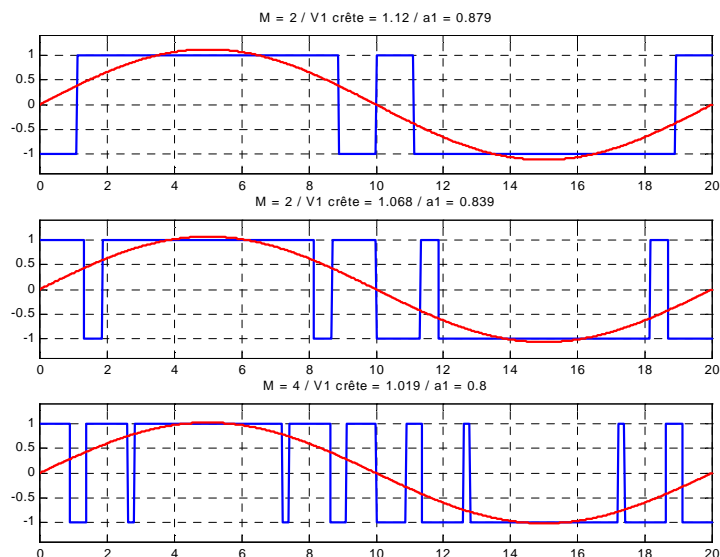
Expression des harmoniques :

$$V_n = V_{10} \cdot \frac{2}{n} \cdot \left| \frac{1}{2} - \cos(n\alpha_1) + \cos(n\alpha_2) - \cos(n\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(n\alpha_M) \right|$$

avec $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ($n = 2k + 1$) et $0 \leq \alpha_1 \leq \alpha_2 \leq \dots \leq \alpha_M \leq \frac{\pi}{2}$.

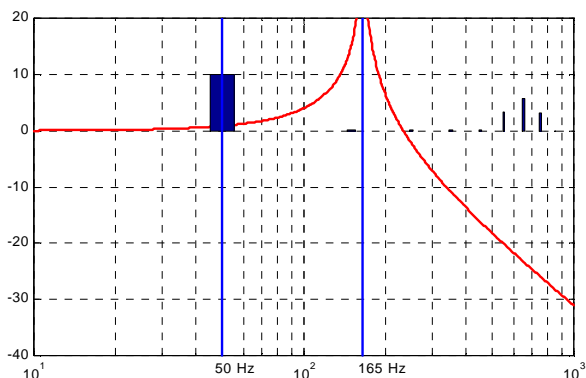
Système d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} - \cos(1\alpha_1) + \cos(1\alpha_2) - \cos(1\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(1\alpha_M) = \frac{V_1}{2 \cdot V_{10}} \\ \frac{1}{2} - \cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) - \cos(3\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(3\alpha_M) = 0 \\ \frac{1}{2} - \cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) - \cos(5\alpha_3) + \dots + (-1)^M \cos(5\alpha_M) = 0 \\ \dots \dots \dots \\ \frac{1}{2} - \cos((2M-1)\alpha_1) + \cos((2M-1)\alpha_2) \dots + (-1)^M \cos((2M-1)\alpha_M) = 0 \end{array} \right.$$



- 1) $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 20^\circ$, pas d'harmonique 3 ;
- 2) $\alpha_1 = 23^\circ 6', \alpha_2 = 33^\circ 3'$, pas d'harmoniques 3 et 5 ;
- 3) $\alpha_1 = 15^\circ 9', \alpha_2 = 24^\circ 8', \alpha_3 = 46^\circ 9', \alpha_4 = 50^\circ 4'$, pas d'harmoniques 3, 5, 7 et 9.

Filtrage des harmoniques – Onduleur en demi-pont



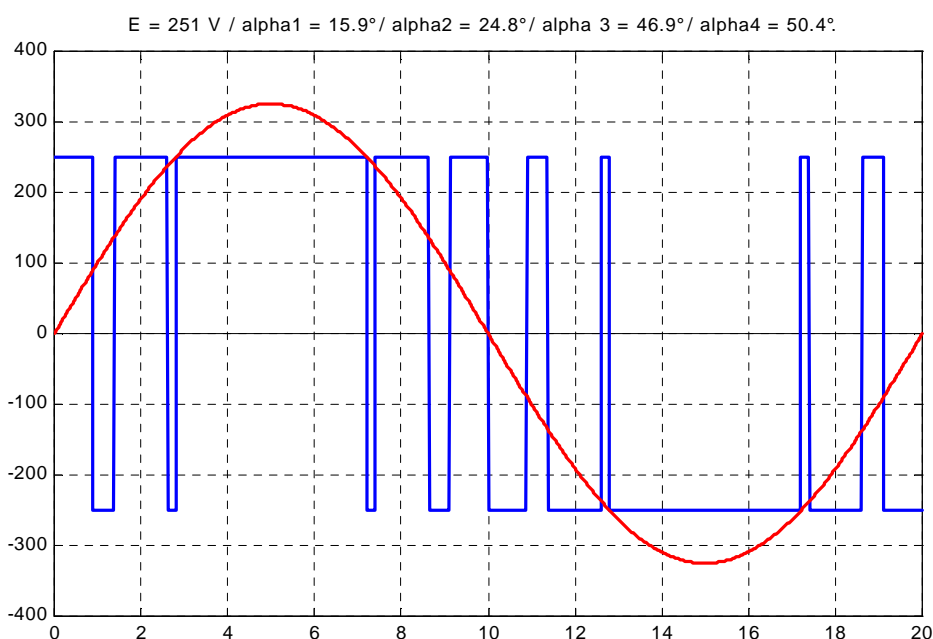
Valeurs de L et de C
pour $f_0 = 165$ Hz :

L	C
1 H – I _{max}	930 nF 400V AC
100 mH – I _{max}	9,3 μF 400V AC
10 mH – I _{max}	93 μF 400V AC
20 mH - I _{max}	46,5 μF 400V AC

Amplitude des harmoniques pour $F_0 = 165$ Hz et $E = 250$ V :

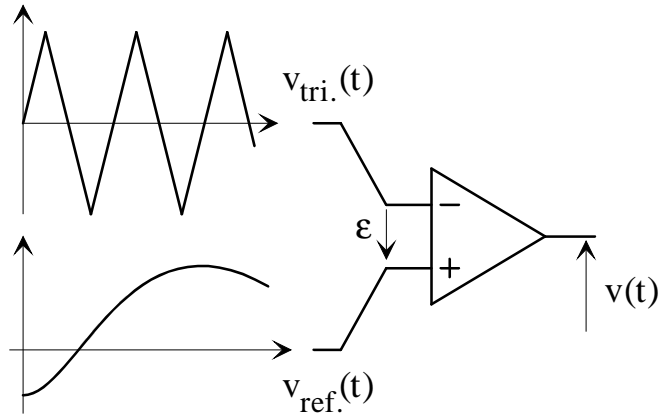
Rang	Fréquence	Tension efficace	Atténuation	Gain en dB	Résiduel
n = 1	50 Hz	V1 = 230 V	H1 = 110 %	G1 = +0,8 dB	253 V
n = 3	150 Hz	V3 = 0 V			0 V
n = 5	250 Hz	V5 = 0 V			0 V
n = 7	350 Hz	V7 = 0 V			0 V
n = 9	450 Hz	V9 = 0 V			0 V
n = 11	550 Hz	V11 = 77,8 V	H11 = 9,9 %	G11 = -20 dB	7,69 V

Tension avant et après le filtre de sortie :

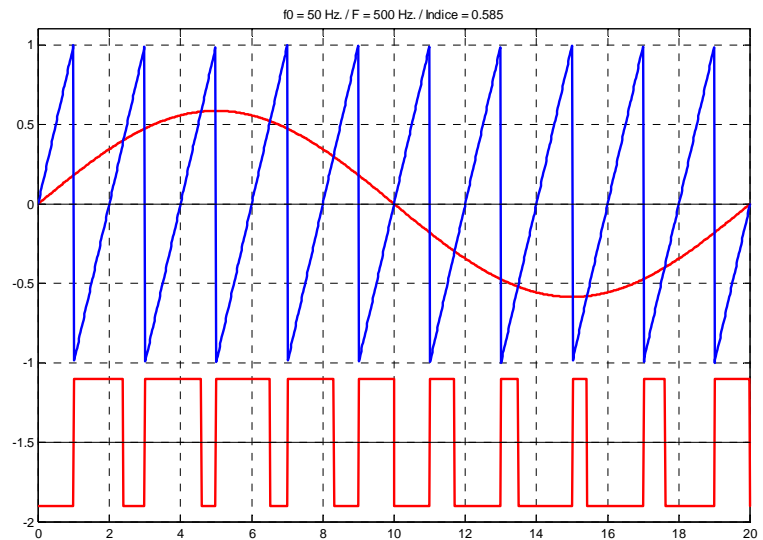


La Modulation de Largeur d'Impulsions – MLI (ou PWM)

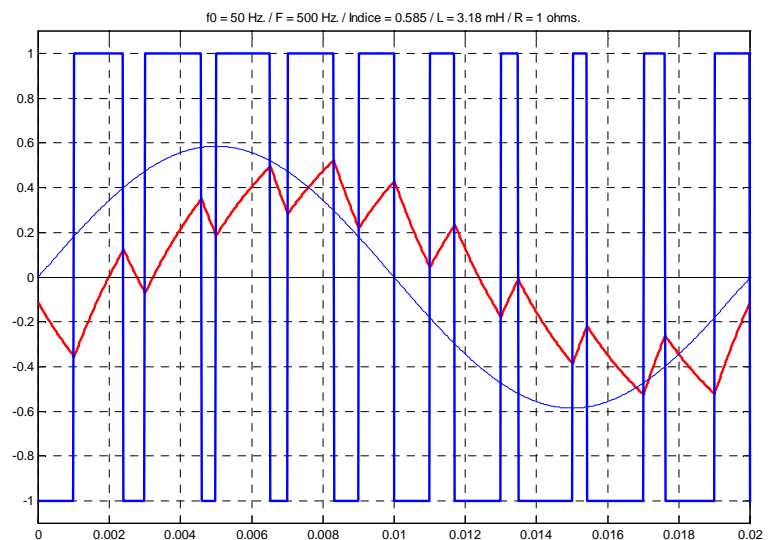
M.L.I. à fréquence fixe :



Allure de la tension M.L.I. :



Courant dans la charge :



Spectre de la M.L.I.

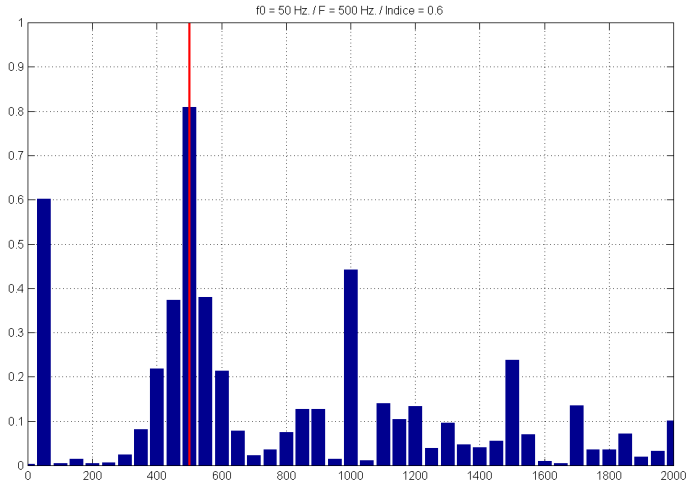
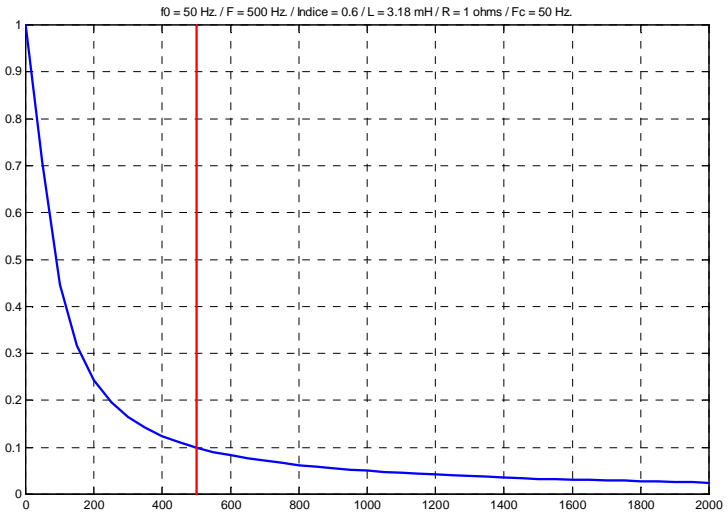
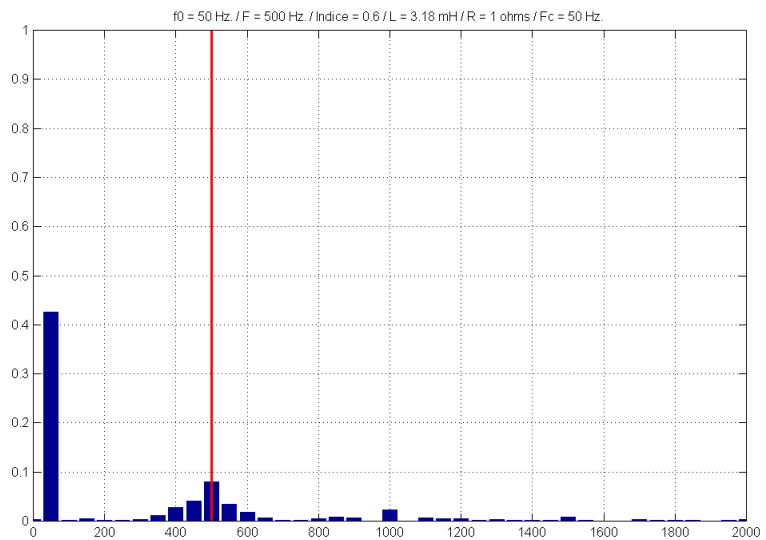


Diagramme d'amplitude du circuit R-L



Spectre du courant dans la charge R-L

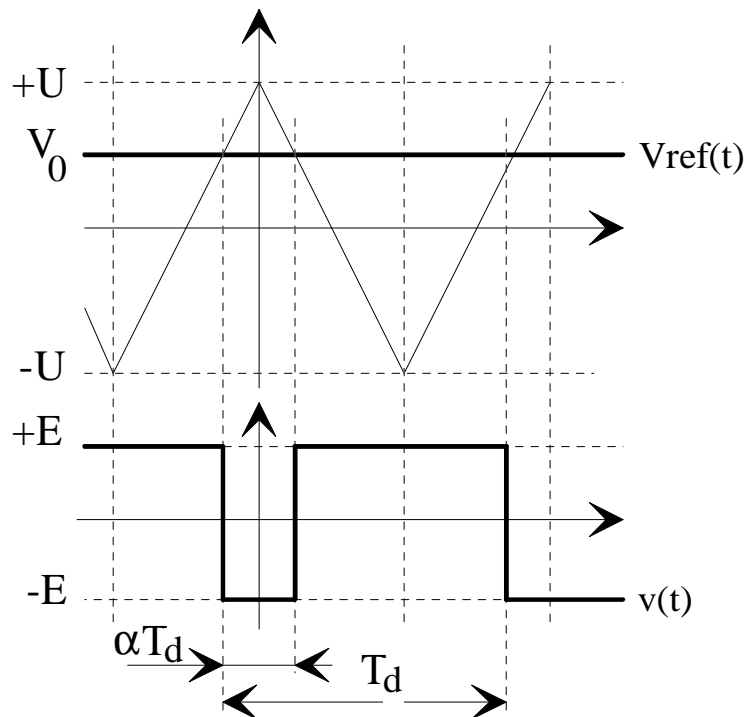


Calculs des Harmoniques

Hypothèse :

$v_{\text{ref}}(t)$ est constant, , sur la période T_d . $v_{\text{ref}}(t) = V_0$

alors $v(t)$ = signal carré de rapport cyclique $\alpha = \frac{1}{2} + \frac{V_0}{2U}$



Expressions :

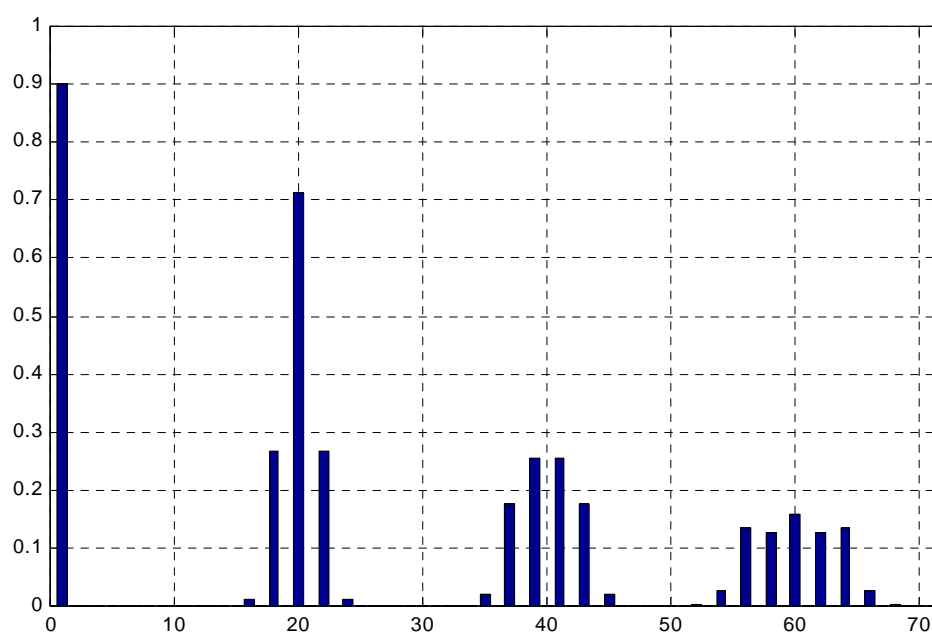
$$\begin{aligned} \frac{v(t)}{E} &= m \cdot \sin(\omega t + \varphi) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \cdot J_0\left(\frac{n\pi}{2} m\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cdot \cos(\omega_d t) \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} J_{2k}\left(\frac{n\pi}{2} m\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \left(\begin{aligned} &\cos([n\omega_d + 2k\omega]t + 2k\varphi) \\ &+ \cos([n\omega_d - 2k\omega]t - 2k\varphi) \end{aligned} \right) \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} J_{2k-1}\left(\frac{n\pi}{2} m\right) \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \left(\begin{aligned} &\sin([n\omega_d + (2k-1)\omega]t + (2k-1)\varphi) \\ &+ \sin([n\omega_d - (2k-1)\omega]t - (2k-1)\varphi) \end{aligned} \right) \end{aligned}$$

avec $J_n(y)$, fonctions de Bessel de première espèce d'ordre n .

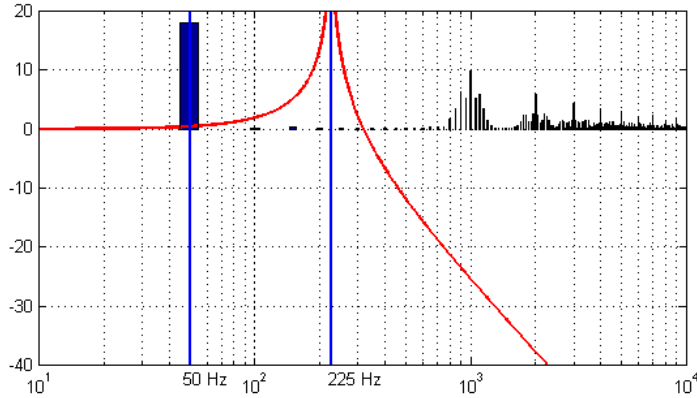
Composantes harmoniques du signal

	Fréquence :	Amplitude :	Phase :
Fondamental	ω	m	φ
Harmoniques groupe 1	$n \cdot \omega_d$	$\frac{4}{n\pi} \cdot J_0\left(n \frac{\pi}{2} m\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$	$\frac{\pi}{2}$
Harmoniques groupe 2	$n \cdot \omega_d \pm 2k \cdot \omega$	$\frac{4}{n\pi} J_{2k}\left(n \frac{\pi}{2} m\right) \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right)$	$\frac{\pi}{2} \pm 2k \cdot \varphi$
Harmoniques groupe 3	$n \cdot \omega_d \pm (2k - 1) \cdot \omega$	$\frac{4}{n\pi} J_{2k-1}\left(n \frac{\pi}{2} m\right) \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right)$	$\pm (2k - 1) \cdot \varphi$

Spectre de la tension M.L.I. : (pour $m = 0,9$ et $\omega_d = 20 \cdot \omega$)



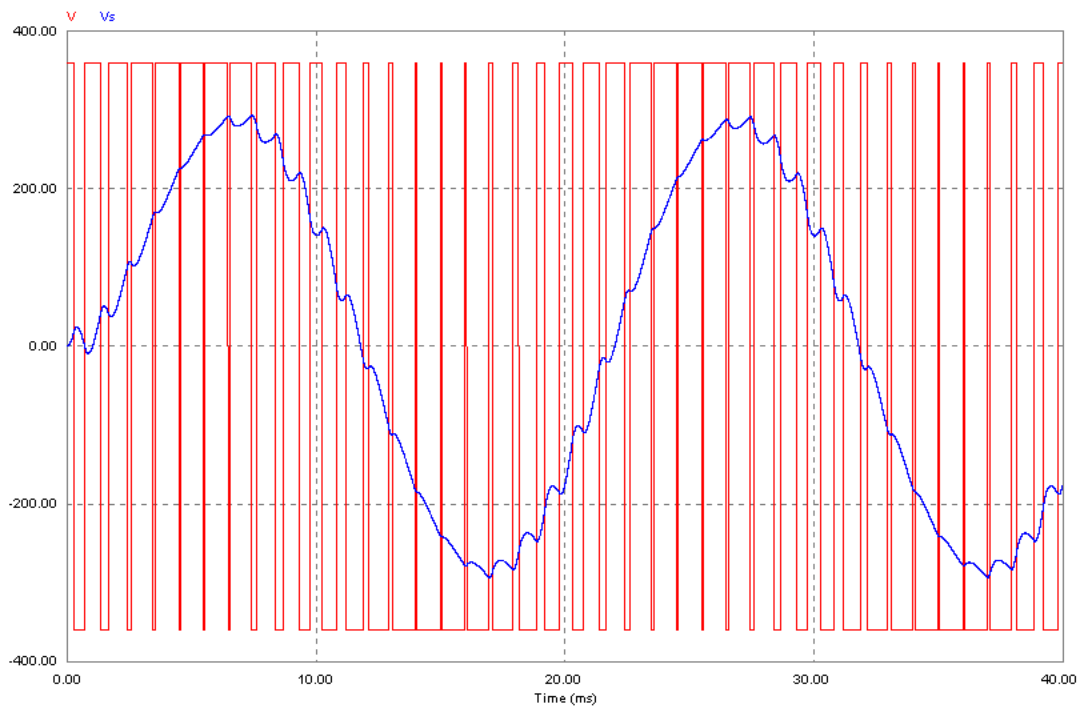
Filtrage des harmoniques – PWM à fréquence fixe



Valeurs de L et de C
pour $f_0 = 225$ Hz :

L	C
1 H – I _{max}	500 nF 400V AC
100 mH – I _{max}	5 μ F 400V AC
10 mH – I _{max}	50 μ F 400V AC
20 mH - I _{max}	25 μ F 400V AC

Tension avant et après le filtre de sortie :



$E = 361$ V – $L_s = 20$ mH – $C_s = 25$ μ F – $R_s = 10$ Ω (psim\mli_fixe1.sch).