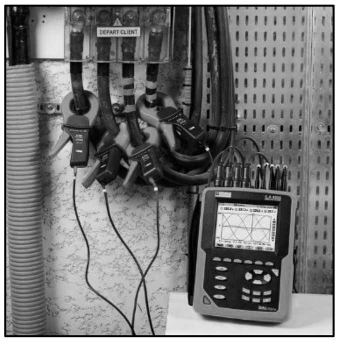
Chapitre 7 : Qualité de transmission d'énergie électrique

I. Introduction



La transmission de l'énergie électrique repose sur la circulation de la tension et du courant dans les lignes. Cependant, la présence de charges non linéaires, telles que les variateurs de vitesse utilisés en milieu industriel, peut engendrer des perturbations affectant la qualité du réseau.

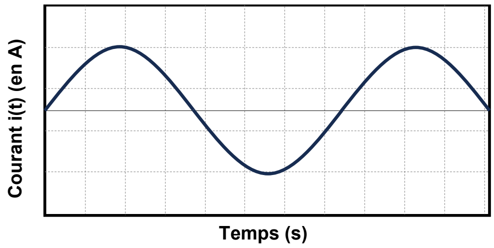


Figure 1

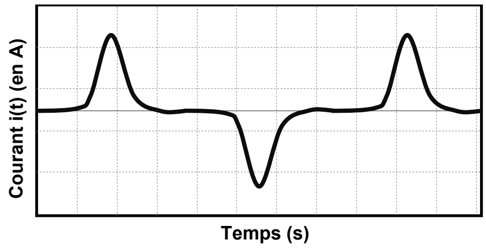


Figure 2

Un réseau de transmission est dit idéal lorsque la tension et le courant présentent une forme parfaitement sinusoïdale (figure 1). En revanche, lorsque ces signaux s'écartent de cette forme, le réseau est considéré comme perturbé et comporte des composantes harmoniques (figure 2).

II. Représentation spectrale des signaux électriques

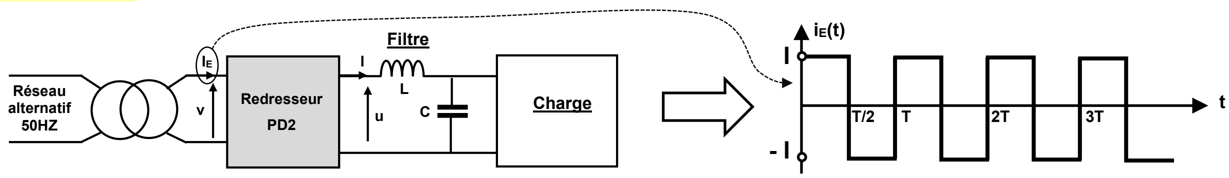
1. Série de fourrier d'une fonction périodique

Joseph Fourier a démontré que tout signal périodique, qu'il soit de nature électrique ou autre, peut être représenté comme la somme infinie de composantes sinusoïdales : c'est le principe de la série de Fourier.

Propriété : Toute fonction périodique **s(t)** de période **T** (fréquence $f = \frac{1}{T}$) peut s'exprimer sous la forme :

$s(t) = \mathbf{a_0} + \sum_{n=1}^{+\infty} \mathbf{a_n} \cos(n.\omega\, t) + \mathbf{b_n} \sin(n.\omega\, t)$		
$\mathbf{a_0} = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{s(t)\ dt}$ (*C'est la valeur moyenne*)	$\mathbf{a_n} = \frac{2}{T} \int_0^T \mathbf{s(t).\ cos(n.\omega\ t)\ dt}$	$\mathbf{b_n} = \frac{2}{T} \int_0^T \mathbf{s(t).\ sin(n.\omega\ t)\ dt}$

Exemple 1 : le courant provient d'un redresseur PD2



Le calcul des différents coefficients de Fourier, appliqué au signal de courant $\mathbf{i_E(t)}$, est présenté dans le tableau ci-après :

$\mathbf{a_0} = \mathbf{0}$	$\mathbf{a_n} = \mathbf{0}$	$b_n = \frac{2\,I}{n\,\pi}(1 - \cos(n\,\pi))$ ➔ Si n paire $\mathbf{b_n} = \mathbf{0}$ si n impaire $\mathbf{b_n} = \frac{4\,I}{(2k+1)\,\pi}$ ➔ $n = 2k + 1$

Ainsi, d'après le développement en série de Fourier, le signal de courant à l'entrée peut s'exprimer sous la forme :

$$\mathbf{i_E(t)} = \frac{\mathbf{4\,I}}{\boldsymbol{\pi}} \sum_{k=0}^{+\infty} \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2k+1}} \ \mathbf{sin((2k+1).\omega\ t)}$$

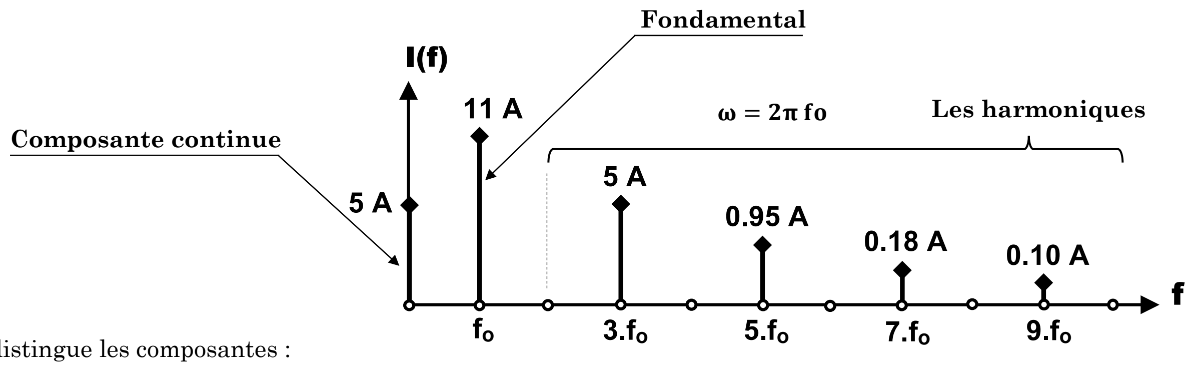
⚠ **Remarque :** *Dans le programme de CPGE, l'expression de cette série est fournie. Il n'est donc pas demandé de la calculer, mais uniquement de savoir l'exploiter dans des situations données, comme par exemple dans le cas de l'onduleur (chapitre suivant).*

2. Représentation fréquentielle : Notion de spectre

Une représentation temporelle d'un signal ne permet pas toujours de bien mettre en évidence toutes ses caractéristiques. En revanche, son spectre constitue une représentation dans le domaine fréquentiel, où chaque fréquence est associée à une amplitude correspondante. Cette approche offre une vision plus précise et détaillée de la répartition des composantes fréquentielles du signal.

Exemple : soit $i_E(t) = \mathbf{5} + \mathbf{11}.\sin(\boldsymbol{\omega} t) + \mathbf{5}.\sin(\mathbf{3.\omega}\ t) + \mathbf{0{,}95}.\sin(\mathbf{5.\omega}\ t) + \mathbf{0{,}18}.\sin(\mathbf{7.\omega}\ t) + \mathbf{0{,}10}.\sin(\mathbf{9.\omega}\ t)$

Le spectre du signal du courant $\mathbf{i_E(t)}$ est le suivant :



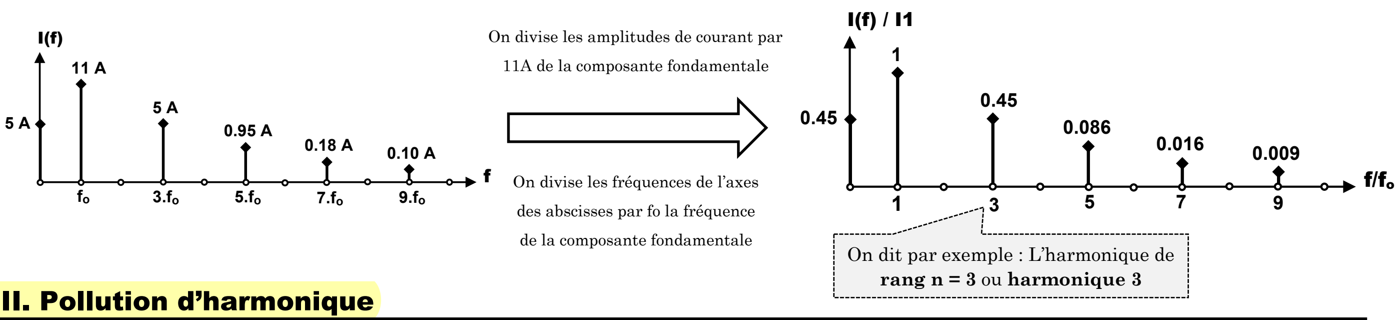
On distingue les composantes :

- **Composante continue :** Partie constante d'un signal (**valeur moyenne**), localisée à la fréquence **f = 0 Hz**.
- **Fondamentale :** Composante principale du signal, généralement **recherchée**, ayant pour fréquence la fréquence fondamentale f_o, ainsi représentant la plus **grande part** de son énergie de la totalité du signal.
- **Harmoniques : Composantes indésirables dans un réseau**, dont les fréquences sont des **multiples entiers** de la fréquence fondamentale f_o. Elles dégradent la qualité de transmission, le rendement et la durée de vie d'un système

> ⚠ **Remarque** : *Un signal alternatif* ***dépourvu d'harmoniques*** *est un signal* ***parfaitement sinusoïdal****, ce qui correspond au cas idéal* ***recherché pratiquement****.*

3. Représentation fréquentielle – Spectre normalisé

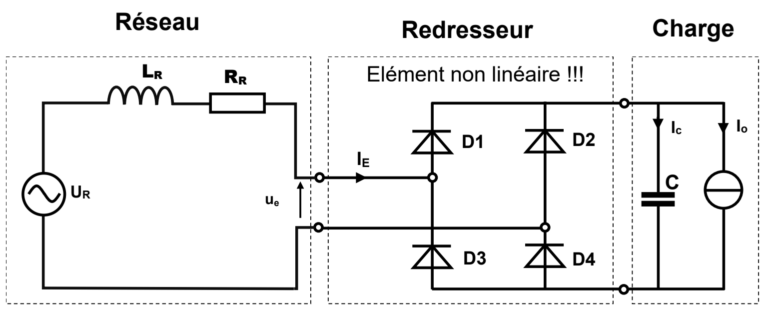
Le spectre normalisé est obtenu en rapportant l'amplitude de chaque harmonique à celle du fondamental, et en exprimant également les fréquences en multiples de la fréquence fondamentale. Cette normalisation permet de représenter toutes les harmoniques à l'échelle du fondamental, facilitant ainsi la comparaison et l'analyse spectrale.



III. Pollution d'harmonique

1. Définition

La pollution harmonique désigne la présence de composantes de fréquence multiples de la fondamentale dans un signal électrique, généralement causée par des charges non linéaires. Elle déforme la forme d'onde sinusoïdale, augmente les pertes, réduit le rendement et peut perturber le fonctionnement ou endommager les équipements électriques sensibles.



La figure 1 illustre la simulation du schéma précédent (page 58), présentant le courant d'entrée du redresseur **i_E(t)** à la fois sous sa forme temporelle et sous son spectre fréquentiel :

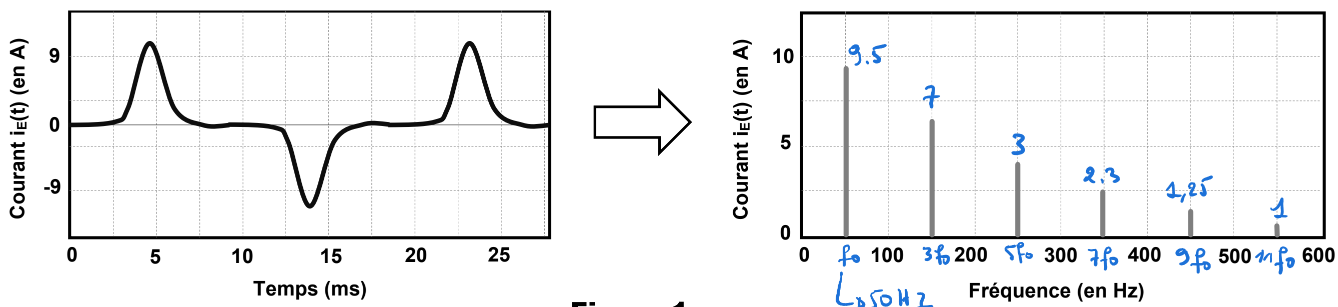


Figure 1

Remarque : L'analyse temporelle et fréquentielle montre que le courant i(t) contient de nombreuses composantes harmoniques (Pollution d'harmonique), traduisant une distorsion importante engendrée par le redresseur, ce qui dégrade la qualité du réseau électrique.

D'après le spectre, la fréquence fondamentale du signal est 50 Hz et le courant **i_E(t)** peut alors s'exprimer sous la forme :

On note : $f_0 = 50 Hz$ et que $\omega_0 = 2\pi f_0$

$\Rightarrow$ $i_e(t) = 9.5 \sin(\omega_0 t) + 7 \sin(3\omega_0 t) + 3 \sin(5\omega_0 t) + 2.3 \sin(7\omega_0 t) + 1,25 \sin(9\omega_0 t) + 1 \sin(11\omega_0 t)$

2. Valeur efficace d'une grandeur alternative non sinusoïdale

La valeur efficace (**RMS**) d'un signal est la racine carrée de la moyenne de son carré. Selon la relation de **Parseval**, elle s'exprime via les composantes harmoniques. Pour un signal déformé, on calcul celle du signal global et du fondamental pour déterminer le taux de **distorsion harmonique THD** (on va le définir par la suite).

Si la série de fourrier de **i_E(t)** est : $i_E(t) = \langle i_E \rangle + I_{1\,max}\sin(\omega.t) + I_{2\,max}\sin(2\omega.t) + I_{3\,max}\sin(3\omega.t) + \ldots + I_{n\,max}\sin(n\omega.t)$

La valeur efficace I_E de **i_E(t)** s'exprime alors par : $I_E = \sqrt{(\langle i_E \rangle)^2 + \left(\frac{I_{1\,max}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{2\,max}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3\,max}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \ldots + \left(\frac{I_{n\,max}}{\sqrt{2}}\right)^2}$

Exemple 2 : La valeurs efficaces des composantes harmoniques.

A partir de la figure 2, L'expression de courant est le suivant :

$$i_E(t) = 9{,}5\sin(\omega.t) + 7\sin(3\omega.t) + 3\sin(5\omega.t) + 2{,}3\sin(7\omega.t) + 1{,}25\sin(9\omega.t) + \sin(11\omega.t)$$

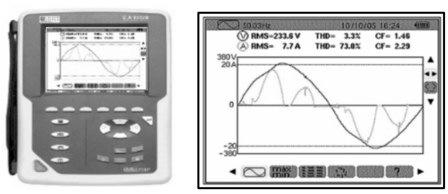
- L'expression de la composante fondamentale, notée **i_{E1}(t)**, est : $i_{E1}(t) = \mathbf{9{,}5 . \sin(\omega.t)}$
- La valeur efficace du courant fondamental, notée **I_{E1}**, est donnée par : $I_{E_1} = \frac{I_{E1\,max}}{\sqrt{2}} \Rightarrow I_{E_1} = \frac{9.5}{\sqrt{2}} \Rightarrow I_{E_1} = 6{,}71$

La valeur efficace de courant i_E(t) selon la relation de Parseval, notée I_E, est :

donc :

$I_E = \sqrt{\left(\frac{9.5}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{7}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2,3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{1,25}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} \Rightarrow$ d'où : $I_E = 8{,}83\ A$

3. Taux de distorsion harmonique THD



Le calcul du **THD** (**taux de distorsion harmonique**) permet d'évaluer la présence d'harmoniques dans un signal. Un **THD** nul indique l'absence totale d'harmoniques et donc une forme d'onde parfaitement sinusoïdale sur le réseau électrique.

Taux de distorsion harmonique s'exprime par (cas du courant **i_E(t)** précédent) : $THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{+\infty}(I_{Ei})^2}{I_{E1}^{\ 2}}} = \sqrt{\frac{I_E^{\ 2} - I_{E1}^{\ 2}}{I_{E1}^{\ 2}}}$

où **I_{E1}** est la valeur efficace du fondamental de **i_E(t)** et **I_E** est la valeur efficace du courant **i_E(t)**.

Pour le courant $i_E(t)$, le taux de distorsion harmonique (**THD**) est donné par : On a : $I_E = 8,83$ A et $I_{E1} = 6,71$ A

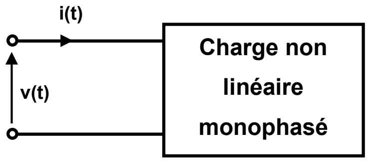
d'où : $THD = \sqrt{\dfrac{I_E^2 - I_{E1}^2}{I_{E1}^2}} \Rightarrow THD = \sqrt{\dfrac{8,83^2 - 6,71^2}{6,71^2}} \Rightarrow \boxed{THD = 85,5\ \%}$ ⇒ le courant $i_E(t)$ est très riche en harmoniques ⚠

IV. Puissance électrique dans le régime déformé

1. Puissances active P, réactive Q, déformante D et apparente S

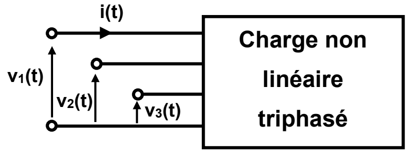
En régime déformé, la tension u(t) est **purement sinusoïdale** à la fréquence fondamentale $\mathbf{f_0}$, tandis que le courant i(t) contient la **fondamentale** et des **harmoniques** d'ordre n (fréquences multiples de $\mathbf{f_0}$). Cette situation se produit notamment lorsqu'une charge **non linéaire** est connectée au réseau (redresseurs, alimentations à découpage, variateurs, etc.).

On se focalise notre étude sur le cas suivante :



- Tension simple v(t) est alternative sinusoïdale : $\mathbf{v(t) = V\sqrt{2}\sin(\omega_0 t)}$
- Le courant i(t) est alternatif de même période que **v(t)** :

$$i(t) = i_1(t) + i_h(t) = I_1\sqrt{2}\ \sin(\omega_0 t - \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n\sqrt{2}\sin(n\omega_0 t - \varphi_n)$$



On distingue les différentes puissances suivantes :

Puissances	Charge monophasée	Charge triphasée
Puissance active **P**	$P = V.\ I_1\ .\cos(\varphi_1)$	$P = 3V.\ I_1 .\cos(\varphi_1)$
Puissance réactive **Q**	$Q = V.\ I_1\ .\sin(\varphi_1)$	$Q = 3V.\ I_1 .\sin(\varphi_1)$
Puissance déformante **D**	$D = V.\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}$ ou $D = V.\sqrt{I^2 - I_1^2}.$	$D = 3V.\sqrt{I^2 - I_1^2}.$
Puissance apparente **S**	$S = V.\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$ ou $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$	$S = 3V.\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$ ou $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$

Le facteur de puissance pour des charges non linaires : $f_p = \frac{P}{S} \Rightarrow \boxed{f_p = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + THD^2}}}$

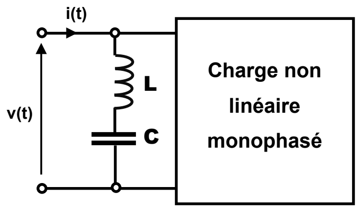
2. Effets de la pollution harmonique

La présence d'harmoniques dans le courant et/ou la tension, générées par des charges non linéaires, entraîne plusieurs conséquences :

- **Réduction du facteur de puissance fp**, due à l'augmentation de la puissance déformante D.
- **Accroissement des pertes Joule** dans les conducteurs de distribution ($R_{ligne} \cdot I^2$) en raison de l'élévation du courant efficace total.
- **Vieillissement prématuré de l'isolement des composants du réseau**, réduisant leur durée de vie et la fiabilité globale de l'installation.
- **Apparition de courants homopolaires dans le conducteur neutre**, provoquant un courant de neutre non nul.

3. Filtre anti-harmonique

Parmi les solutions de réduction de la pollution harmonique, les filtres anti-harmoniques se distinguent par leur efficacité pour améliorer la qualité de l'énergie en milieu industriel. Notre étude se focalise seulement sur le filtre passif LC, dimensionné par calcul des valeurs optimales de L et C.



On souhaite supprimer **l'harmonique d'ordre n**, donc : $\underline{v_n} = \underline{Z_n}.\underline{I_n} = 0 \Rightarrow \mathbf{\underline{Z_n} = 0} \Rightarrow j.L_n.n.\omega_o + \frac{1}{j.C_n.n.\omega_o} = 0$

Alors la relation pour calculer L et C : $\boxed{L_n\,C_n = \frac{1}{(n.\ 2\pi.\ f)^2}}$

Avec : **f** est La fréquence de la composante fondamentale et **n** est le rang de l'harmonique à supprimer (Ex : **n = 3**)

Références bibliographiques :

- 🕮 **Christophe FRANÇOIS**, Les grandes fonctions de la chaîne d'énergie - IUT, BTS, CPGE, FRANCE : Ellipses, 2016
- 🕮 **Azan, J.-L., Gyzelinck, J.-C., Le Gall, F., Meunier, J., & Torrus, A. (2015)**. Sciences appliquées – BTS électrotechnique
- **Piou Michel**. Electronique de puissance (PowerElecPro : Ch6 – Puissance et harmoniques 1~ et 3~) [PDF]. France, 2010.
- **RENAUT T.,** Pollution harmonique du réseau électrique du Queen Mary 2, mémoire Supélec, 2001.