

Faculté des Sciences et Techniques de Fès



Département de Génie Industriel



LST de Génie Industriel

Projet de Fin d'Etudes

Etude et Analyse des harmoniques générées dans le réseau électrique

Lieu : RADEEF

Référence : 03/14GI

Préparé par :

- SALAMI GOUYA Nassirou
- ELMAALMY Youness

Soutenu le 11 Juin 2014 devant le jury composé de :

- Pr TAHRI Driss (Encadrant FST)
- Pr l'H. HAMEDI (Examinateur)
- Pr. N. EL OUAZZANI (Examinateur)
- Mr. EL MOKHTARI Mohamed (Encadrant Société)

REMERCIEMENTS

Louange à ALLAH Seigneur de l'Univers. Que la paix et la bénédiction d'ALLAH soient sur l'ultime Prophète, MOUHAMAD (SAW). Nous rendons grâce à ALLAH, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux pour nous avoir permis d'arriver au terme de ce stage sans aucune difficulté à signaler.

Sans oublier les efforts qu'ils ne cessent de ménager pour nous voir réussir, nous remercions grandement nos parents.

On tient vivement à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur MOHAMED EL MOKHTARI Chef de la Division Moyenne Tension et Grands Comptes Electricité, notre encadrant, pour ces conseils, son aide et pour l'intérêt qu'il a manifesté durant toute la période de notre stage.

Par ailleurs nos remerciements vont également à Monsieur IDRIS TAHHRI notre encadrant de FST pour ces précieuses aides, ça bonne humeur permanente et son chaleureux accueil.

Enfin nous adressons nos sincères et chaleureux remerciements au corps administratif et professoral de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès qui travaillent en symbiose pour nous assurer un enseignement solide de qualité.

SOMMAIRE

Liste des figures	5
INTRODUCTION GENERALE	6
Partie I : Présentation de la RADEEF	7
I. Historique et évolution de la RADEEF	8
II. Fiche technique de la RADEEF	9
III. Organigramme de la RADEEF	10
IV. Identification des services.....	11
IV.1 La Direction Générale	11
IV.2 Département Electricité	11
IV.2.1 Equipe maintenance des postes	11
IV.2.2 Service maintenance des lignes.....	14
IV.2.2.1 Types des lignes	14
IV.2.2.2 Le rôle du service maintenance des lignes	14
Partie II : Thème réalisé Etude des phénomènes harmoniques	16
I. Description du phénomène.....	17
II. L'analyse de Fourier	18
1. Expressions Mathématiques.....	18
2. Parité des fonctions.....	19
III. Harmoniques et charges électriques.....	20
III.1 Courant absorbé par les charges non linéaires.....	20
III.2 Charges non linéaires symétriques.....	21
III.3 Charges triphasées.....	21
III.4 Charges monophasées.....	24
III.5 Caractérisation d'une charge "non linéaire"	25
IV. Causes et conséquences des harmoniques.....	27
IV.1 causes des harmoniques.....	27
IV.2 Les effets indésirables des harmoniques	27
IV.2.1 Les effets instantanés	28
IV.2.2 Effets à long terme	28
V. Les solutions générales aux harmoniques	30
V.1. Filtration passive	30
V-1-1 Les filtres résonants	31
V-1-2 Les filtres amortis	31
V-2 Filtrage actif	32
V-2-1 Le filtre actif parallèle (F.A.P)	33
V-2-2 Le filtre actif série (F.A.S)	33

	V-2-3 La combinaison parallèle série actifs	34
	V-2-4 Avantages des filtres actifs	34
	V-3 Choix de filtre approprié à utiliser	35
VI.	Le cas pratique	36
	VI.1 Applications	36
	VI.1.1 Première application	36
	VI.1.2 Deuxième application	38
	VI.2 Solutions proposées	40
VII.	Aspects normatifs.....	43
VIII.	Conclusion Générale	44
IX.	Annexe.....	45

Liste des figures

Figure 1 : L'organigramme de la RADEEF	10
Figure 2 : Poste de transformation	12
Figure 3 : Transformateur de puissance	13
Figure 4 : Image d'une onde déformée	17
Figure 5 : Exemple de charge non linéaire quelconque	20
Figure 6 Charge triphasé	22
Figure 7 : Pont redresseur triphasé avec filtrage capacitif	22
figure 8: ALLURE du courant absorbé	23
Figure 9 : Spectres harmoniques du courant absorbé	23
Figure 10 : Allure du courant absorbé	24
Figure 11 : Redresseur monophasé avec filtrage capacitif	24
Figure 12 : Spectre harmonique du courant absorbé	25
Figure 13 : Quelques exemples d'appareils comportant un redresseur monophasé avec filtrage capacitif	25
Figure 14 : Courant absorbé par un récepteur triphasé	29
Figure 15 : SHUNT résonant	31
Figure 16 : Filtre amorti	32
Figure 17 : Filtre actif parallèle	33
Figure 18 Filtre actif série	34
Figure 19 Combinaison parallèle série actifs	34
Figure 20 Onde du fondamental	36
Figure 21 : Spectre de rang 1	37
Figure 22 : Onde des harmoniques des rangs 3,7 ,13 et 21	37
Figure 23 : Spectre des harmoniques des rangs 1, 3,7 ,13 et 21	38
Figure 24 : courant harmonique de rang 13 toléré	39
Figure 25 : courant harmonique toléré de rang 6	39

INTRODUCTION GENERALE

C'est toujours dans un souci potentiel de former des licenciés hautement qualifié dans plusieurs filières, dont entre autres Génie Industrielle, que la Faculté des Sciences et Techniques de Fès accorde une importance majeure aux stages effectués au sein des entités socio-économiques.

C'est ainsi que nous avons eu la possibilité d'effectuer notre projet de fin d'études au sein de la Régie Autonome de Distribution des Eaux et Electricité de Fès (RADEEF). Tout au long de ces 8 semaines nous avons été amenés d'une part à suivre les différentes équipes du département d'exploitation d'électricité afin de prendre connaissance des tâches quotidiennes et parallèlement nous avons pu mener des recherches sur les problèmes des harmoniques en basse fréquence sous le guide de nos encadrants.

Dans le présent rapport, on retracera notre parcours qui n'a pu être que bénéfique et avantageux pour nous autant sur le plan professionnel que social. Ainsi, nous allons commencer dans le 1^{er} chapitre par une présentation de la structure d'accueil. Dans le 2^{ème} chapitre, sa 1^{ère} partie sera consacrée à l'étude des phénomènes harmoniques, leurs origines, leurs causes, leurs conséquences ainsi que la détermination des solutions permettant de réduire les effets indésirables, tandis que sa 2^{ème} partie, sera focalisée sur les applications harmoniques faites au sein de la RADEEF. Nous terminerons enfin par une conclusion Générale.

Partie I

PRÉSENTATION DE LA RADEEF

I. Historique et évolution de la RDEEF

La Régie Autonome intercommunale de Distribution d'Eau et d'Electricité de la wilaya de Fès (RADEEF) est un établissement public à caractère industriel et commercial, doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière, placé sous la tutelle du Ministère de l'Intérieur.

La RADEEF a été créée par délibération du conseil municipal de la ville de Fès en date du 30 avril et 29 août 1969 en vertu du Dahir n° 1.59.315 du 23 Juin 1960 relatif à l'Organisation communale, et ce après l'expiration du contrat de concession dont bénéficiait la Compagnie Fassie d'Electricité (CFE) au titre de la distribution de l'énergie électrique.

Par arrêté du 25 Décembre 1969, le Ministre de l'Intérieur a approuvé la délibération du conseil communal de la ville de Fès en date du 29 Août 1969 concernant la création de la RADEEF, fixant la dotation initiale établissant son règlement intérieur ainsi que son cahier des charges.

En Janvier 1970, la RADEEF s'est substituée, d'une part à la « Compagnie Fassie d'Electricité » pour la gestion du réseau électrique, et d'autre part à la ville de Fès pour la gestion du réseau d'eau potable.

La dotation en capital de la Régie, à sa création, fut constituée par l'apport initial auquel se sont ajoutés la valeur des installations, du matériel et du stock remis par la ville ainsi que les fonds détenus pour le compte de celle-ci par l'ancien concessionnaire.

Par la suite, la RADEEF a été transformée en Régie Intercommunale suite à l'arrêté du Ministre de l'Intérieur n°3211 du 02-10-1985 portant autorisation de créer le nouveau syndicat des communes pour la gestion du Service de l'Eau potable dans 19 communes.

La Régie est donc chargée d'assurer, à l'intérieur de son périmètre d'action, le service public de distribution d'eau et d'électricité, elle est également chargée de l'exploitation des captages et adductions d'eau appartenant à la ville.

A compter du 1er Janvier 1996, la RADEEF a été chargée de la gestion du réseau d'assainissement liquide de la ville de Fès en vertu de l'arrêté du Ministre de l'Intérieur n° 2806-95 du 3 Juin 1996 approuvant les délibérations du conseil de la Communauté Urbaine de Fès et des conseils communaux relevant de cette

communauté, lesquelles délibérations ont chargé la RADEEF de la gestion du réseau d'assainissement liquide de la ville de Fès.

Par ailleurs, la RADEEF est assujettie au contrôle des finances de l'Etat en vertu du Dahir n° 1-03-195 du 11 Novembre 2003 portant promulgation de la loi N° 69-00 relative au contrôle financier de l'Etat sur les entreprises publiques et autre organismes.

Actuellement, la RADEEF assure la distribution de l'eau et de l'électricité ainsi que la gestion du réseau d'assainissement liquide à l'intérieur de la ville de Fès et de la commune Ain Chkef. Elle est en outre chargée de la distribution de l'eau potable dans les communes urbaines de Sefrou et Bhalil ainsi que dans les communes rurales suivantes : Bir Tam-Tam, Ras Tabouda, Sidi Harazem, Ain Timgnai, OuledTayeb, Douar Ait Taleb et Douar Ait El Kadi.

II. FICHE TECHNIQUE DE LA RADEEF

Dénomination : Régie Autonome intercommunale de Distribution D'Eau et d'Electricité de FES.

Siège social: 10, rue Mohammed El KAGHAT B.P:2007, FES.

Date de création : 1er Janvier 1970.

Forme juridique : établissement Public à caractère Commercial doté l'autonomie financier.

Exercice comptable : du 1^{er} janvier au 31 décembre.

L'activité : la production, la distribution de l'eau potable et l'assainissement liquide et la distribution d'électricité.

Principale fournisseur : ONEE.

L'effectif : 1109 agents.

Téléphone : 05-35-62-50-15.

Fax : 05-35-62-07-95.

E-mail : dg@radeef.ma

III. Organigramme de la RADEEF

La gestion de la R.A.D.E.E.F est comme toute entreprise publique, est assurée par deux catégories d'organe:

Catégories décisionnelles: conseil d'administration et le comité de direction.

Catégories exécutives: le directeur qui gère de son rôle tous les services.

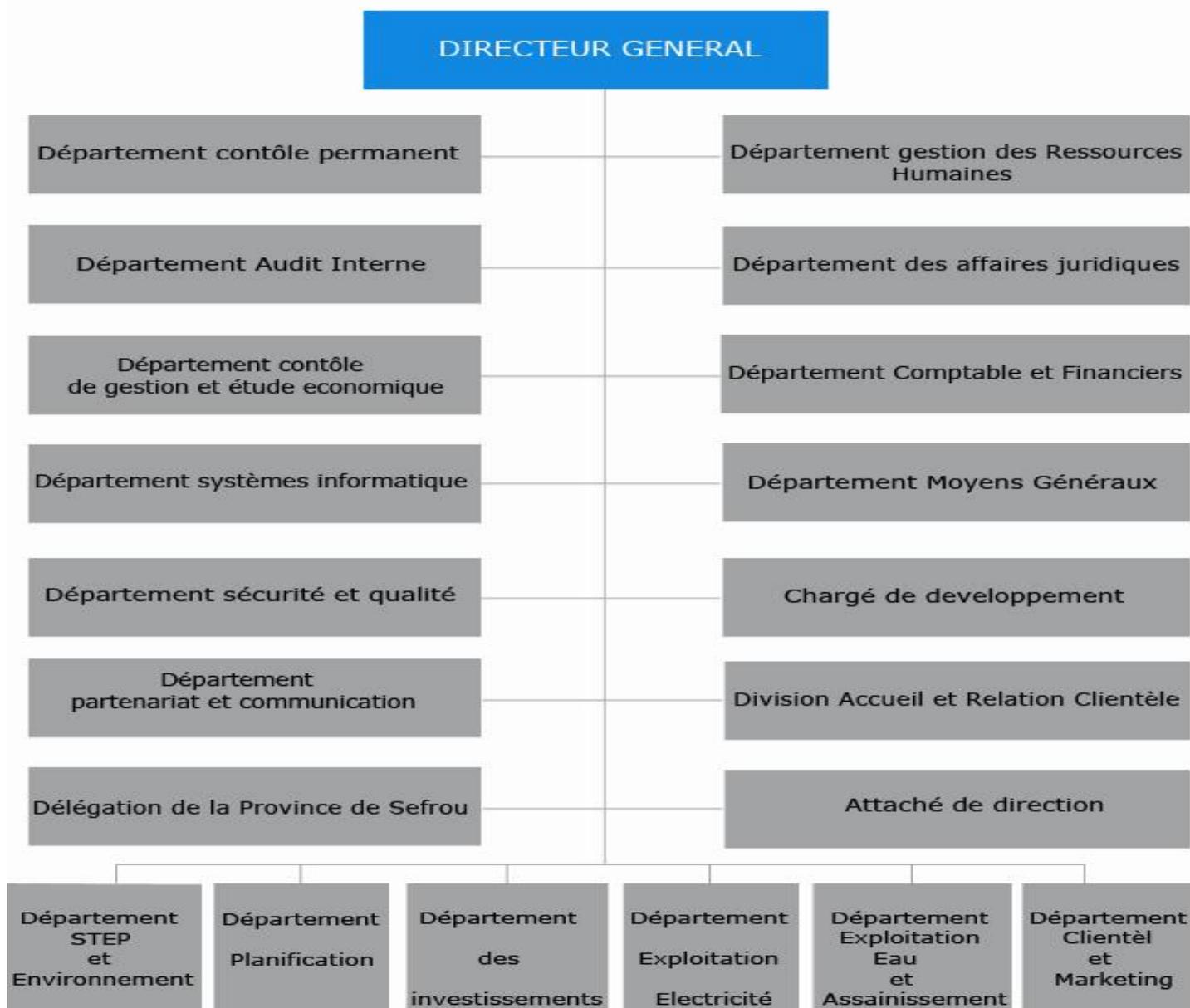


FIGURE 1 : L'organigramme de la RADEEF

IV. Identification des services

IV.1 La Direction Générale

La Direction Générale est dirigée par un Directeur Général qui assure sous l'autorité et le contrôle du conseil d'administration et le comité de Direction Générale, le fonctionnement et la gestion de la Régie, ainsi vient sous sa gérance plusieurs Départements et Divisions dont entre autres notre département d'accueil :

IV.2 Département Electricité

Son rôle consiste à maintenir les performances des installations et accroître la sécurité d'alimentation, de réaliser les extensions nécessaires pour faire face à l'accroissement des besoins. Il est composé de deux grandes équipes :

IV.2.1 Equipe maintenance des postes

Le rôle de cette équipe consiste à :

- Aménager et entretenir les postes de distribution.
- Changer les transformateurs MT/BT.
- Confectionner les boîtes de jonction et d'extrémité.
- Entretien quotidiennement les postes MT/BT.
- Réparer les défauts au niveau des postes.
- Analyser et injecter l'huile dans les transformateurs.

Lors de notre stage au sein de ce service, nous avons pu assister au raccordement de 6 condensateurs au poste source Fès Amont. Ces condensateurs permettront de minimiser le coût de la consommation en diminuant les pertes.

Nous avons eu aussi l'occasion avec cette équipe, d'assister à un déplacement d'un câble MT, ce qui a suscité sa découpe, et afin de le rassembler, ils avaient utilisé des boites de jonction. Ce genre de boite permet la continuité des câbles après leur découpe.

★Description d'un poste de transformation :

Un poste de transformation se compose des éléments suivants :

Le passage en coupure : formé par deux cellules munie chacune par un interrupteur à grand pouvoir de coupure, shunté en haut par un jeu de barres. Sur la première on raccorde le câble d'arrivé et sur le deuxième on raccorde le câble de départ

La protection du transformateur : elle est constituée par un interrupteur à haute pouvoir de coupure 3fusibles calibrés suivant la puissance de transformateur ,3 relais électromagnétique réglables suivant la puissance du transformateur.



FIGURE 2 : Poste de transformation

✦ *Le transformateur de puissance :*

Il est constitué principalement par 3 enroulements primaires et 3 enroulements secondaires le tout est placé à l'intérieur d'une cuve baignée dans l'huile diélectrique pour l'isolation des enroulements et pour le refroidissement.



FIGURE 3: Transformateur de puissance

✦ *Le tableau urbain :*

Il recueille la BT directement du transformateur et la répartit avec un jeu de barres en plusieurs nourrices qui seront protégés par des fusibles calibrés ou des disjoncteurs à relais magnétothermique.

IV.2.2 Service maintenance des lignes

IV.2.2.1 TYPES DES LIGNES

On distingue deux types de ligne :

❖ ***les lignes aériennes*** avec 53% du réseau de la R.A.D.E.E.F et qui sont utilisées dans les cas suivants :

- Les transferts à grande distance (ex : depuis les centres hydrauliques ou thermiques jusqu'aux centres d'utilisations).
- L'interconnexion entre les lignes de transfert dans le but de répartir la charge entre les différentes sources.
- La distribution depuis les postes de transformation principaux jusqu'aux postes secondaires et aux abonnés.

❖ ***les lignes souterraines*** qui sont utilisées à chaque fois que les lignes aériennes sont inappropriées ou dangereuses, elles représentent 47% du réseau.

Ces deux types peuvent transmettre la moyenne et la basse tension selon les statistiques suivantes :

❖ ***Lignes moyenne tension*** : La structure actuelle du réseau moyenne tension est dans sa majorité en 20kV avec un schéma qui prend en compte la minimisation des pertes. On y retrouve 480,00 km de réseau moyenne tension 20kV.

❖ ***Lignes basse tension*** : Le réseau basse tension est de type radial et couvre pratiquement tout le territoire urbain.

La longueur totale est de l'ordre de 1576,00 km dont 60% est en B2. La reconversion de tout le réseau B1 (127/220V) en B2 (220/380V) est en cours de réalisation.

IV.2.2.2 LE RÔLE DU SERVICE MAINTENANCE DES LIGNES

Le rôle de ce service consiste à :

- l'entretien des lignes aériennes MT/BT.
- La reconversion du réseau B1 (110/220V) en B2 (220/380V). Mais avant d'effectuer le changement il faut faire plusieurs modifications et réparations dans le réseau tel que :
 - Entretenir les boîtes réseau, la recherche des masses et leur séparation et changer les câbles endommagés.

- Avertir les services intéressés pour le changement des transformateurs.
- Avertir les services d'éclairage public pour le repérage du neutre.

- Renouvellement des poteaux bois et poteaux béton en mauvais état.
- Entretien des groupes électrogènes.
- Assurer l'inventaire du matériel.

Partie II

THÈME RÉALISÉ ETUDE DES PHÉNOMÈNES HARMONIQUES

I. DESCRIPTION DU PHENOMENE

Les réseaux électriques ainsi que la quasi-totalité des appareils raccordés à ce dernier sont soumis à de nombreuses perturbations de puis l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels les thyristors, les triacs, ou les transistors de forte puissance.

Ces composants ont permis le développement de convertisseurs statiques qui assurent le réglage et la transformation de l'énergie électrique d'une forme à une autre. Ces convertisseurs vis-à-vis du réseau sont vus comme étant des charges non linéaires. Ils injectent des courants harmoniques dans le réseau électrique.

Une harmonique est une onde multiple produite par une autre onde. Cette dernière a une amplitude et une fréquence. La fréquence fondamentale utilisée dans nos réseaux électriques est de 50 Hz. Les harmoniques ont une valeur correspondant à des multiples pairs ou impairs de la 50Hz. Ainsi, la fréquence de la cinquième harmonique est de 250Hz ($5 \times 50\text{Hz}$). Son amplitude peut se mesurer en volts ou en ampères.

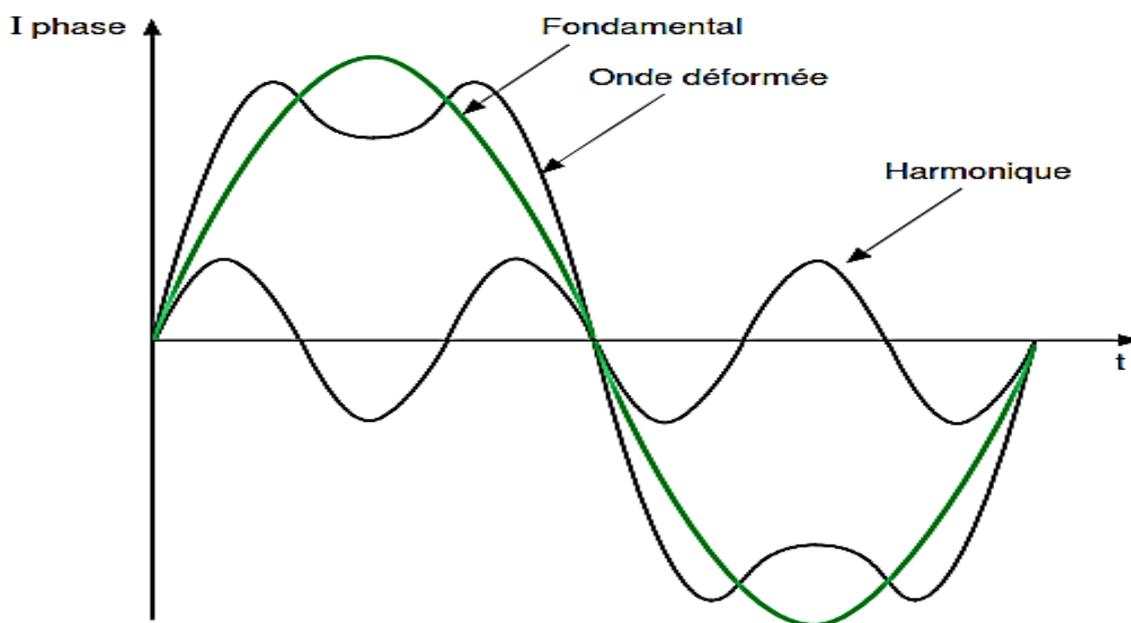


FIGURE 4 : *Image d'une onde déformée.*

II. L'ANALYSE DE FOURIER

L'analyse de Fourier permet la décomposition de la forme d'onde non sinusoïdale de courant en somme de signaux sinusoïdaux, avec différentes fréquences et amplitudes. Les figures (2, 3 et 4) de la partie annexe sont des fonctions très couramment rencontrées dans le domaine du génie électrique et sont toutes décomposables en série de Fourier.

1. Expressions Mathématiques :

La forme la plus couramment utilisée de la décomposition en série de Fourier d'une fonction $f(t)$ est la forme algébrique suivante :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$

Où n est un entier naturel et $\omega = \frac{2\pi}{T}$

a_0 : est une constante qui représente la moyenne de la fonction.

Le calcul des coefficients a_n , b_n se fait à partir des relations suivantes:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt$$

2. Parité des fonctions

Le calcul des coefficients de la décomposition en série de Fourier d'une fonction $f(t)$ se simplifie lorsque la fonction à décomposer est paire ou impaire.

- Pour les fonctions paire où $f(t)=f(-t)$, il en résulte que :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt = 0 \end{array} \right.$$

La décomposition en série de Fourier d'une fonction paire ne contient que des termes en cosinus avec éventuellement *la moyenne* a_0 .

- Pour le cas des fonctions impaires $\langle f(-t)=-f(t) \rangle$, il en résulte que :

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = 0 \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt = 0 \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt \end{array} \right.$$

La décomposition en série de Fourier d'une fonction impaire ne contient que des termes en sinus. De plus, elle ne possède pas la constante a_0 .

On trouve en annexe le calcul des coefficients de Fourier pour la détermination des amplitudes des harmoniques du courant absorbé par un redresseur triphasé idéal.

III. Harmoniques et charges électriques

III. 1 Courant absorbé par les charges non linéaires

Les courants harmoniques sont générés par les charges non-linéaires, c'est-à-dire, absorbant un courant n'ayant pas la même forme que la tension qui les alimente. Les charges de ce type les plus courantes sont celles à base de circuits redresseurs.

Une charge non-linéaire quelconque, comme celle représentée sur la **figure 5**, absorbe un courant qui contient tous les rangs d'harmoniques, pairs et impairs. L'allure du courant absorbé, dont les deux demi-alternances sont différentes, ainsi que son spectre harmonique sont représentés en annexe sur les **figures 3 et 4**.

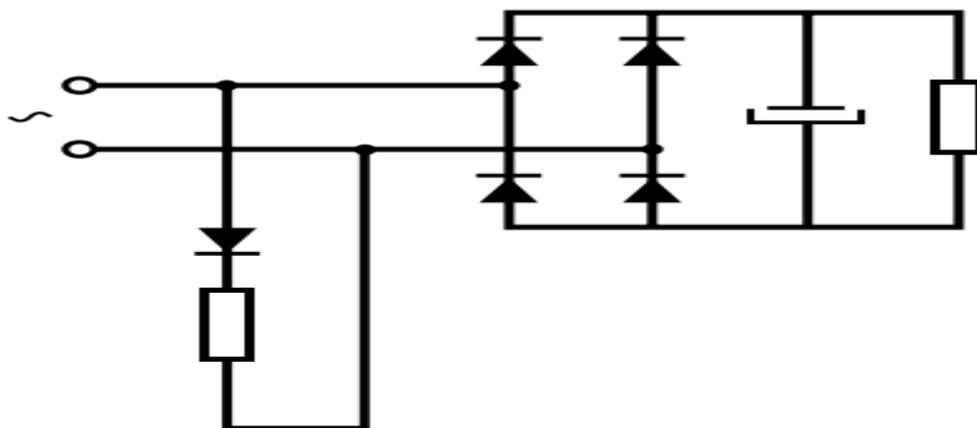


FIGURE 5 : Exemple de charge non linéaire quelconque (non symétrique).

III. 2 Charges non linéaires symétriques

La plupart des charges connectées au réseau sont toutefois symétriques, c'est-à-dire que les demi-alternances de courant sont égales et opposées. Ceci peut s'exprimer mathématiquement par la relation : $f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$.

Dans ce cas, les harmoniques de rangs pairs sont nuls. En effet, en supposant que le courant comporte une harmonique de rang 2, il est possible d'écrire par exemple :

$$I(\omega t) = I_1 \sin(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t).$$

On a donc :

$$I(\omega t + \pi) = I_1 \sin(\omega t + \pi) + I_2 \sin 2(\omega t + \pi)$$

$$I(\omega t + \pi) = -I_1 \sin \omega t + I_2 \sin 2\omega t$$

Ceci ne peut être égal à $-I(\omega t)$ que si I_2 (amplitude de l'harmonique 2) est nulle. Le raisonnement peut être étendu à tous les harmoniques de rang pair.

III. 3 Charges triphasées

Considérons une charge triphasée non linéaire, équilibrée, symétrique, sans raccordement au neutre, comme représentée sur la **figure 6**. Supposons que les courants absorbés par cette charge contiennent de l'harmonique 3. Les courants harmoniques de rang 3 de chacune des phases peuvent s'écrire de la manière suivante :

$$i_{r3} = I \sin 3\omega t$$

$$i_{s3} = I_3 \sin(\omega t - 2\pi/3) = I_3 \sin(3\omega t - 2\pi) = i_{r3}$$

$$i_{t3} = I_3 \sin(\omega t - 4\pi/3) = I_3 \sin(3\omega t - 4\pi) = i_{r3}$$

Les courants harmoniques de rang 3 des trois phases sont donc égaux. Or, en l'absence de conducteur de neutre, $i_r + i_s + i_t = 0$. La somme des courants harmoniques de rang 3 en particulier doit être nulle, ce qui n'est possible que si chacune des composantes est nulle.

Les charges triphasées, équilibrées, symétriques, ne génèrent donc pas d'harmonique de rang 3. Le raisonnement peut s'étendre à tous les harmoniques de rangs multiples de 3. Les courants harmoniques non nuls sont donc de rang 5, 7, 11, 13, ...

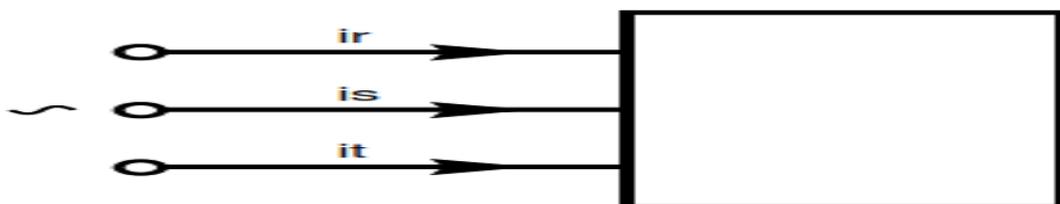


FIGURE 6 : Charge triphasé

Ce résultat est illustré par le schéma constitué d'un redresseur à diodes avec filtrage capacitif (cf. fig. 7), dont le courant absorbé est représenté par la courbe de la figure 8 et son spectre sur la figure 9.

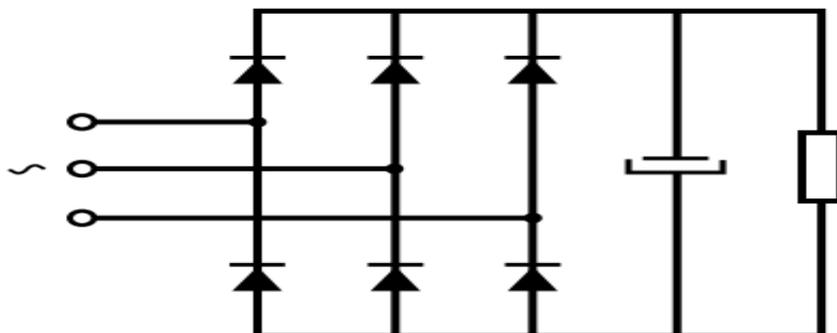


FIGURE 7 : Pont redresseur triphasé avec filtrage capacitif.

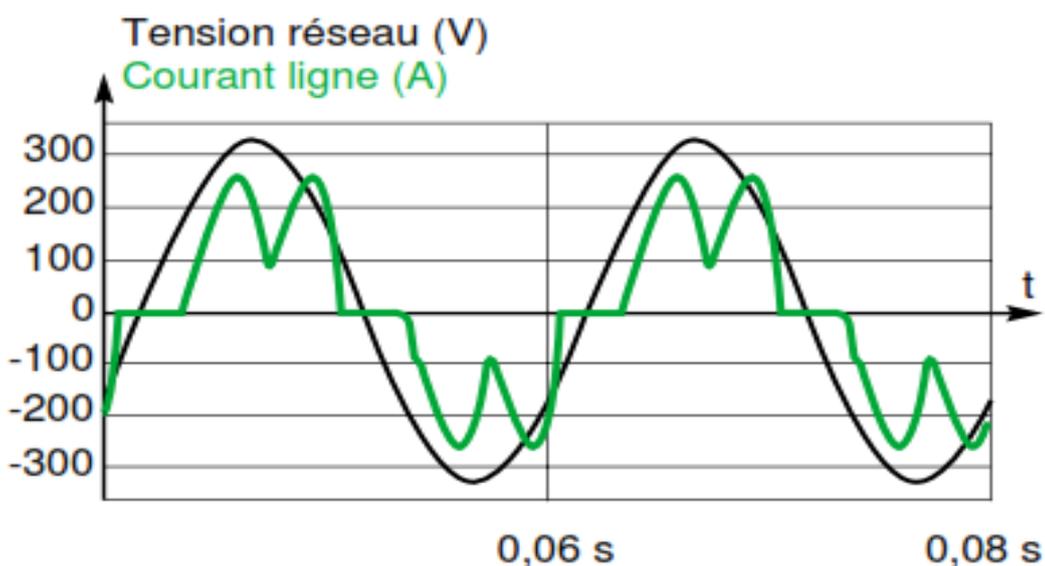


FIGURE 8 : Allure du courant absorbé par le schéma de la figure précédente

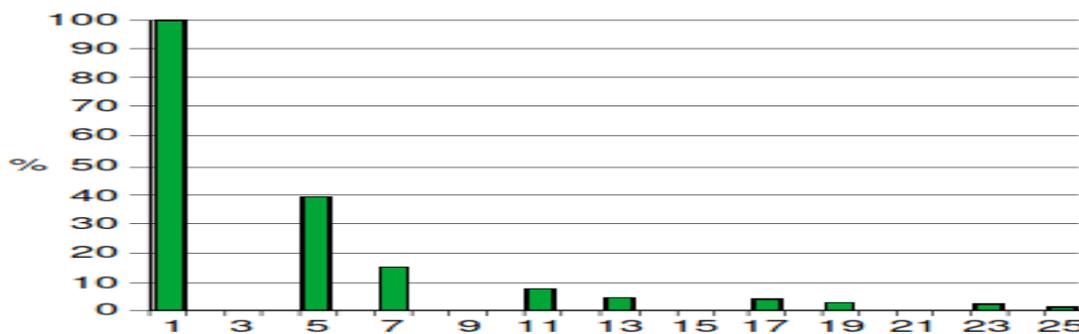


FIGURE 9 : Spectres harmoniques du courant absorbé par le circuit de la figure 6

III. 4 Charges monophasées

Rappelons que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques de rang pair. Le spectre étant en général décroissant, l'harmonique de rang 3 est donc l'harmonique prépondérant pour les charges monophasées. Ainsi, pour les charges très répandues de type redresseur monophasé à diodes avec filtrage capacitif (cf. fig. 11), l'harmonique de rang 3 peut atteindre 80 % du fondamental. La forme de l'onde du courant qu'elles absorbent et son spectre harmonique sont représentés par les figures 10 et 12.

De nombreux appareils, dans tous les domaines d'activités, comportent un circuit de ce type (cf. fig. 13). Ce sont les principaux générateurs d'harmonique de rang 3.

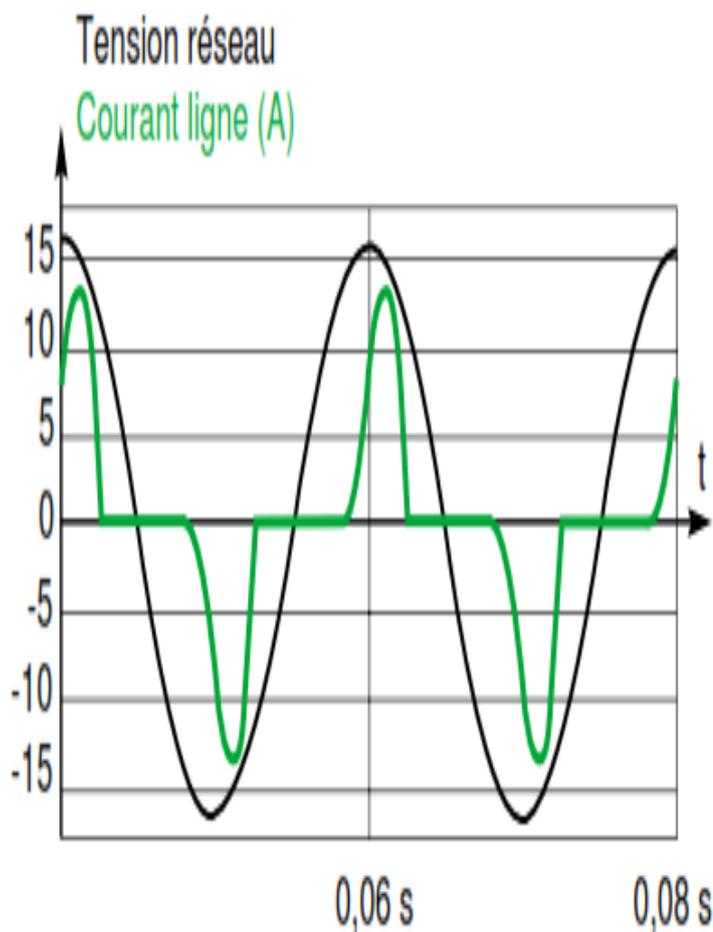


FIGURE 10 : Allure du courant absorbé par le schéma de la figure précédente.

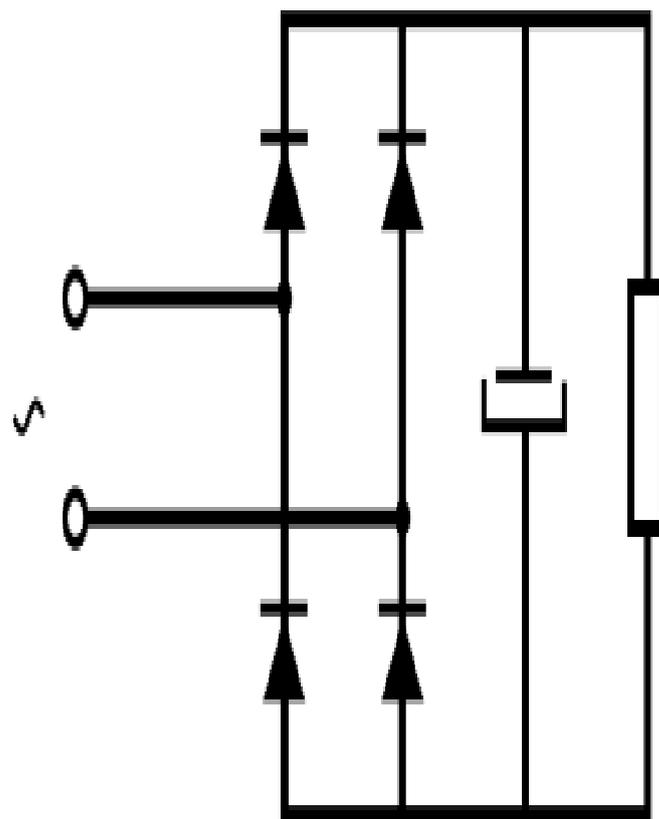


FIGURE 11 : Redresseur monophasé avec filtrage capacitif.

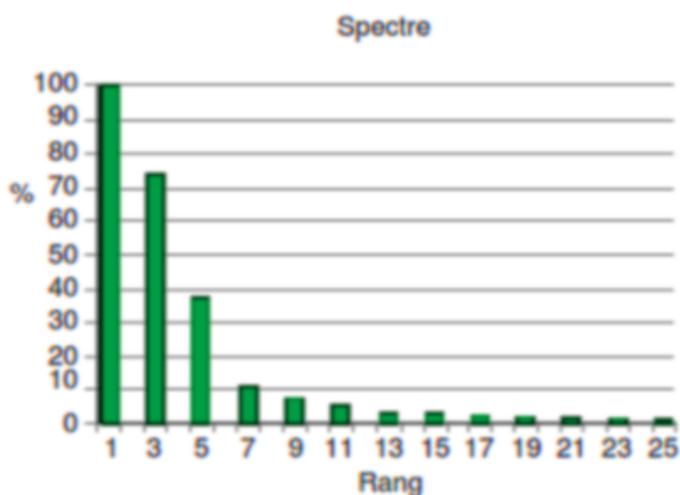


Fig. 12: Spectre harmonique du courant absorbé par le schéma de la figure 9.

Domaine d'activité	Appareils
Domestique	TV, hi-fi, vidéo, fours à micro-ondes, ...
Tertiaire	Micro-ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, télécopieurs, ...
Industriel	Alimentations à découpage, variateurs de vitesse

Fig. 13: Quelques exemples d'appareils comportant un redresseur monophasé avec filtrage capacitif.

III.5 Caractérisation d'une charge "non linéaire"

Une charge non linéaire est alimentée par une tension de forme :

$$v(t) = V \cdot \sin(\omega t)$$

Elle absorbe un courant $i(t)$ non sinusoïdal de forme :

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

- De valeur efficace : $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$
- De fondamental : $i(t) = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_1)$

↳ Expressions de ses puissances par phase

Apparente S : $S = V I$

Active P : $P = V I_1 \cos \varphi_1$

Réactive Q : $Q = V I_1 \sin \varphi_1$

$$\left. \begin{array}{l} S = V I \\ P = V I_1 \cos \varphi_1 \\ Q = V I_1 \sin \varphi_1 \end{array} \right\} \sqrt{P^2 + Q^2} = V I_1 = S_i < S$$

Il existe de la puissance déformante D :

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad \rightarrow \quad D = \sqrt{S^2 - S_1^2}$$

La puissance déformante est liée aux harmoniques de courant.

↳ Expressions des grandeurs utiles de caractérisation

L'une des solutions destinées à déceler la présence d'harmoniques est le calcul du taux de distorsion harmonique. Lorsque le THD est égal à zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau.

Le taux de distorsion harmonique :

$$THD = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}$$

Le facteur de puissance f_p est le suivant:

$$f_p = \frac{P}{S}$$

On définit le facteur de déplacement :

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Le facteur de crête F_c :

L'une des caractéristiques permettant d'identifier un signal déformé est son facteur de crête (F_c). Dans le cas d'un signal sinusoïdal, non déformé, ce dernier correspond à :

$$F_c = \frac{I_{\max}}{I_{\text{eff}}} = \sqrt{2} = 1,414$$

Lorsque le courant est déformé, le facteur de crête est supérieur à cette valeur.

↳ Expressions de, S et Fp en relations avec THD

La puissance déformante D : $D = \sqrt{S^2 - S_1^2}$ \longrightarrow $D = S_1 T_{dh}$

La puissance apparente S : $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$ \longrightarrow $S = S_1 \sqrt{1 + (T_{dh})^2}$

Le facteur de puissance f_p : $f_p = \frac{P}{S}$ \longrightarrow $f_p = \frac{\cos\phi_1}{\sqrt{1 + (T_{dh})^2}}$

IV. Causes et conséquences des harmoniques

IV.1 causes des harmoniques

Les dispositifs électroniques de puissance intégrés dans les équipements sont la principale cause des harmoniques. Pour alimenter les composants électroniques en courant continu, l'équipement dispose d'une alimentation à découpage avec un redresseur à l'entrée qui génère des courants harmoniques. Il s'agit, par exemple d'ordinateurs, de variateurs de vitesse, etc.

Les autres charges causent une distorsion du courant à cause de leur mode de fonctionnement et génèrent aussi des harmoniques. Il s'agit par exemple des lampes fluorescentes, des lampes à décharger, des machines à souder et des dispositifs comportant un cœur magnétique qui peut être saturé.

Toutes les charges qui provoquent une distorsion du courant sinusoïdal normal créent des harmoniques, et sont appelées des charges non linéaires.

IV.2 Les effets indésirables des harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

- soit des effets instantanés.
- soit des effets à terme dus aux échauffements.

IV.2.1 Les effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Il s'agit de :

a. Pertes énergétiques

Les courants harmoniques provoquent dans les conducteurs et équipements des pertes supplémentaires par effet Joule.

b. La perturbation des lignes à courant faible

Les appareils à courant faible se voient perturber lorsqu'on les utilise à côté d'une ligne de distribution électrique ayant une forte puissance. C'est le cas par exemple des téléphones portables, on entend mal.

c. Déclenchements intempestifs et arrêts d'installation

Les disjoncteurs d'une installation sont soumis à des pointes de courant dues aux harmoniques. Ces pointes de courants peuvent provoquer des déclenchements intempestifs, et induire des pertes de production ainsi que des coûts liés au temps de remise en marche de l'installation.

d. Vibrations, bruits

Les courants harmoniques génèrent des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances). Des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes. Ils peuvent entraîner une destruction du matériel.

IV.2.2 Effets à long terme

Ils se manifestent après une longue exposition au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil.

a) Echauffement, vieillissement

Il y'a risque de résonance avec le circuit amont (inductance réseau), suite à la circulation de certains rangs harmoniques. Ce phénomène peut entraîner un

facteur d'amplification du courant dans le condensateur provoquant sa surcharge et pouvant conduire à son claquage.

b) Les échauffements dans les conducteurs et équipements électriques

Les conducteurs électriques véhiculent les courants harmoniques qui produisent, par effet Joule, un échauffement des conducteurs au même titre que le courant fondamental. Malheureusement, les harmoniques ne contribuant pas au transfert de la puissance active, ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance de l'installation.

➔ Les condensateurs sont particulièrement sensibles à la circulation des courants harmoniques du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang des harmoniques présents dans le signal déformé.

c) Conséquences sur le conducteur de neutre

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Ceci n'est pas le cas des systèmes comportant une charge non linéaire.

En effet, les courants homopolaires des harmoniques de rang multiple de 3 vont s'additionner dans le conducteur neutre. L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble du neutre.

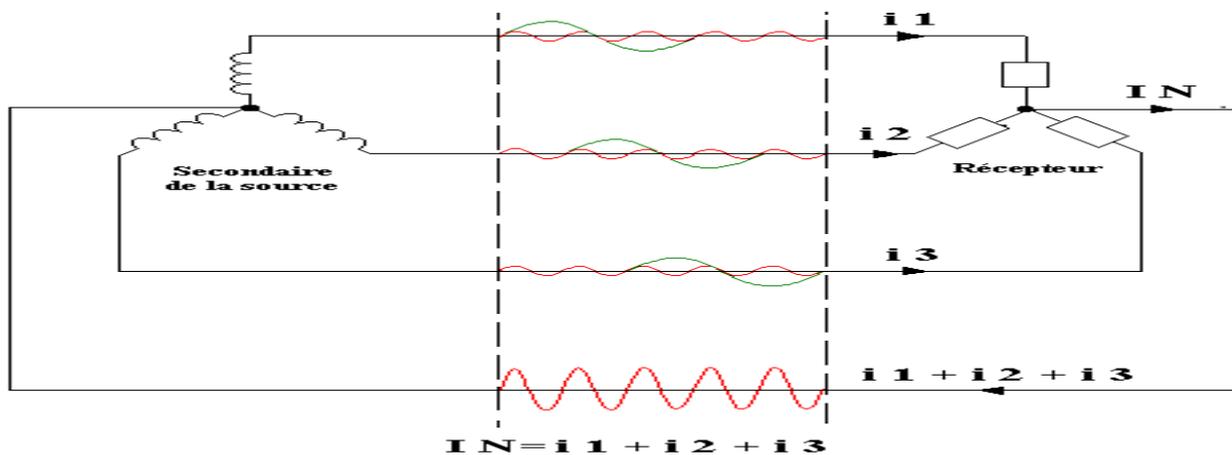


FIGURE14 : Courant absorbé par un récepteur triphasé

V. LES SOLUTIONS GENERALES AUX HARMONIQUES

Étant donné que les harmoniques sont des ondes ayant une fréquence et une amplitude, la solution la plus efficace est de les filtrer en utilisant des techniques de filtration passive ou active.

V.1. Filtration passive

Le principe est de "piéger" les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Un filtre comprend donc une série de "gradins" qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés.

On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Il convient également de coordonner ses caractéristiques avec les besoins en puissance réactive des charges. Enfin, il est souvent difficile de concevoir des filtres de manière à éviter un facteur de puissance avancé (capacitif) pour certaines conditions de charge.

Cette solution est d'une efficacité moyenne et sa conception dépend entièrement de la source d'énergie et des charges concernées : elle n'offre que très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité. Son utilisation peut créer des résonances, qui dépendent des caractéristiques spécifiques du réseau.

Note : lorsqu'il est bien conçu, ce type de filtre peut aussi être utilisé pour éliminer la distorsion harmonique déjà présente sur le réseau électrique du distributeur d'énergie, sous réserve d'un surdimensionnement significatif pour l'absorption des harmoniques issus du réseau.

Il existe deux classes de filtres passifs permettant de réduire les harmoniques :

V-1-1 Les filtres résonants

Le shunt résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et **accordés sur un rang** d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court-circuit pour

l'harmonique considéré. Selon le rang de l'harmonique à éliminer, la fréquence d'accord (f_r) sera:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

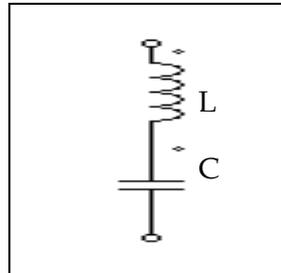


FIGURE 15 : *shunt résonant*

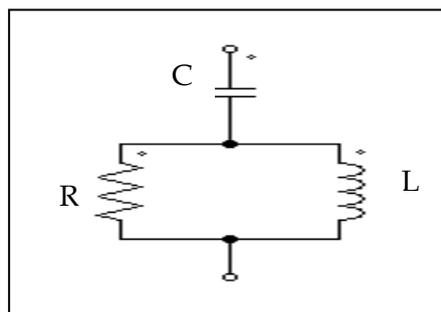
En principe, on trouvera autant de shunts résonants que d'harmoniques à éliminer. Pratiquement la lourdeur de cette solution et le risque de voir apparaître des résonances avec les autres inductances du réseau sur d'autres fréquences conduisent à limiter à deux ces types de filtres. L'emploi de filtre shunt résonant impose les précautions suivantes :

- ✓ S'assurer que la fréquence d'antirésonance soit suffisamment éloignée du rang harmonique à piéger pour ne pas amplifier la déformation de la tension à cette fréquence.
- ✓ Penser que l'existence d'harmoniques préexistants sur le réseau peut entraîner un échauffement supplémentaire des condensateurs.

V-1-2 Les filtres amortis

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance, appelé **résistance d'amortissement**. Il est utilisé lorsque les performances demandées au système de filtrage ne sont pas trop élevées. Il permet de filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre, et non une fréquence particulière. C'est un filtre passe-haut d'ordre 2. La fréquence d'accord f et la fréquence d'antirésonance f_{ar} d'un filtre amorti sont données par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C}} \quad f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L')C}}$$

FIGURE 16 : *Filtre amorti*

En notant : L : l'inductance du filtre amorti, et L' : L'inductance équivalente du réseau amont et C : La capacité des condensateurs. Ce dispositif (filtrage passif) empêche les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- Équipements volumineux,
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

V-2 : Filtrage actif

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées (filtrage actif).

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors **GTO** et les transistors **IGBT**, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations des réseaux électriques, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtre appelée **filtres actifs**. Le but de ces filtres est d'engendrer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension soit rendue sinusoïdaux. Le filtre actif est connecté en **série** ou en **parallèle** suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

V-2-1 Le filtre actif parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la fig (27), se comporte comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

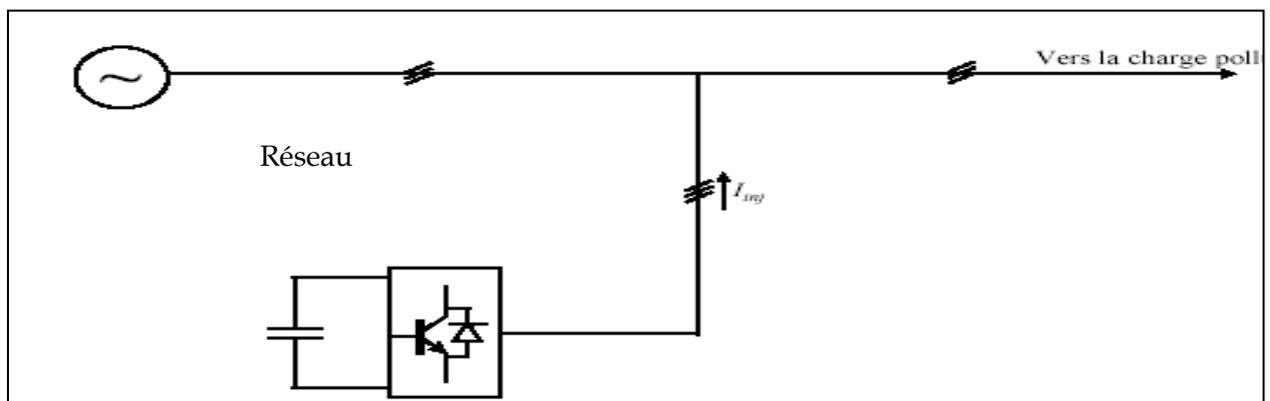


FIGURE 17 : *Filtre actif parallèle.*

V-2-2 Le filtre actif série (F.A.S)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la (fig. 28), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

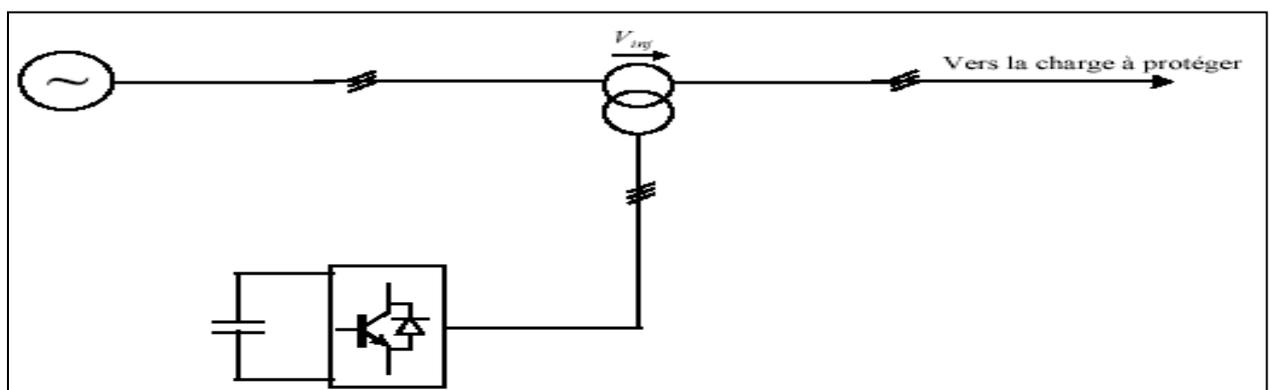


FIGURE 18 : *Filtre actif série.*

V-2-3 La combinaison parallèle série actifs

La combinaison parallèle série actifs, aussi appelée **Unified Power Quality Conditioner (UPQC)**, résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure (19). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

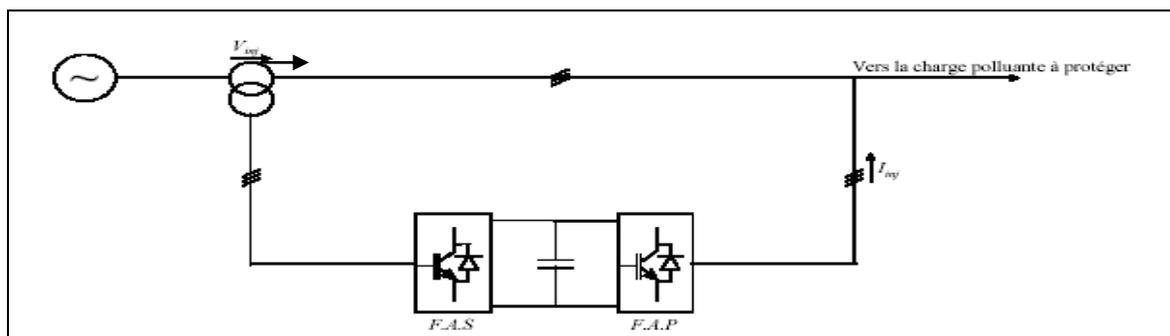


FIGURE 19: *Combinaison parallèle série actifs (UPQC)[2].*

V-2-4 Avantages des filtres actifs

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau :
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante)
 - Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif.
 - Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
 - Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau, qui existe avec le filtre passif, est supprimé.
 - Un compensateur actif peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge. De même, un compensateur actif de tension type série peut protéger des condensateurs ou des filtres passifs contre une distorsion de tension provenant du réseau amont.
 - La compensation d'énergie réactive à 50 Hz est possible, mais elle est coûteuse, par rapport à une solution passive. Le filtrage actif est donc plus intéressant sur des charges ne nécessitant pas de la compensation réactive.

V-3 Choix de filtre approprié à utiliser

- Le filtre passif permet à la fois :
 - la compensation d'énergie réactive.
 - une grande capacité de filtrage en courant.

L'installation où est placé le filtre doit présenter une stabilité suffisante, avec peu de fluctuation de charge. Si la puissance réactive fournie est importante, il est conseillé de mettre hors tension le filtre passif pendant les périodes de faible charge. L'étude de raccordement d'un filtre doit tenir compte de la présence éventuelle d'une batterie de compensation et peut conduire à sa suppression.

- Le filtre actif permet le filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence. Il s'adapte à n'importe quelle charge.
- Le filtre hybride réunit l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs.

Le filtrage passif est une solution lourde et non exempte de risque. Une alternative forte séduisante est l'utilisation de compensateurs actifs. Ces dispositifs utilisent une structure de type convertisseur statique de puissance. Ainsi, grâce aux progrès des semi-conducteurs, les convertisseurs, qui sont habituellement des pollueurs harmoniques, sont capables d'être des dépollueurs efficaces et auto-adaptatifs.

VI. Le cas pratique

VI.1 Applications

L'étude menée au sein de la RADEEF avec un certain nombre de données nous a permis de visualiser pratiquement le comportement du courant fondamental sans courant harmonique et avec les harmoniques des rangs 3, 7, 13 et 21 (ce sont les harmoniques les plus répandus sur le réseau BT de la RADEEF).

Ces rangs précités sont ceux qui produisent des effets néfastes sur les réseaux électriques de la RADEEF. Un analyseur de réseau a été utilisé afin de déceler ces harmoniques.

Des analyses ont été menées au préalable par les équipes de la RADEEF afin de pouvoir cerner les problèmes de la qualité d'énergie. Une application en

EXCEL a été crée en collaboration avec les agents de la LYDEC pour pouvoir visualiser (dans un but purement éducatif pour les stagiaires) les courbes théoriques des tensions ainsi que celle des courants.

VI.1.1 Première application

On découvre ci-dessous la première partie de ces travaux pratiques en fonction des valeurs des courants maximal et efficace:

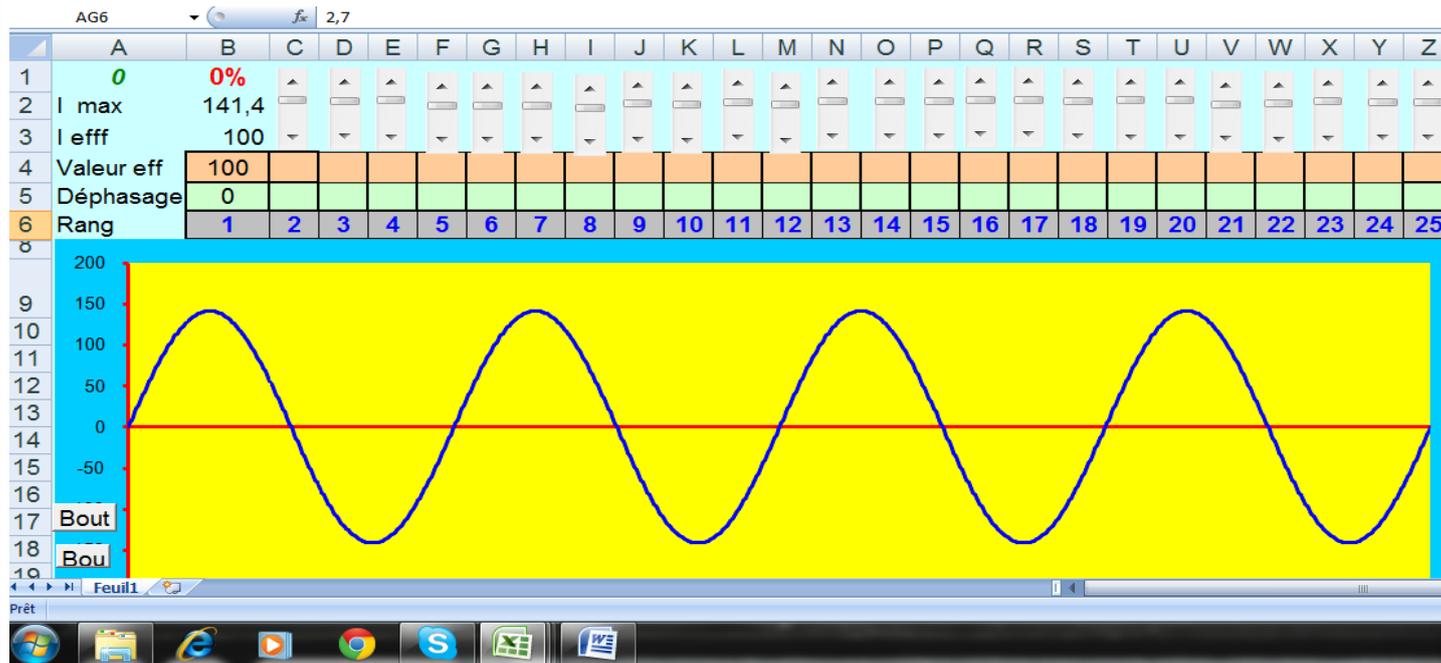


FIGURE 20 : Onde du fondamental

Cette onde du fondamental a pour caractéristiques :

$I_{max} = 141,4 \text{ A}$; $I_{eff} = 100 \text{ A}$; $valeur_{eff} = 100 \text{ A}$ et $THD= 0\%$.

THD de valeur 0% indique la non présence des harmoniques sur le réseau.

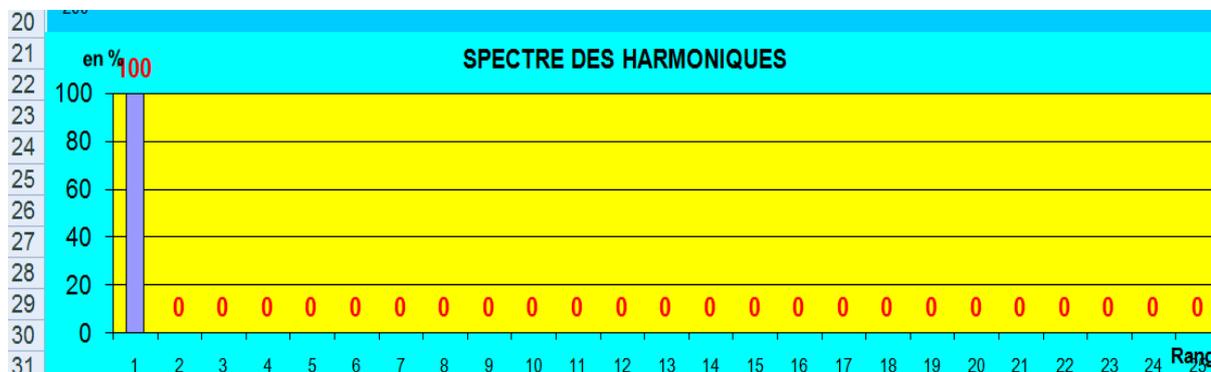


FIGURE 21 : spectre de rang 1

C'est le spectre de l'onde du fondamental ci-dessus, il possède une efficacité de 100%

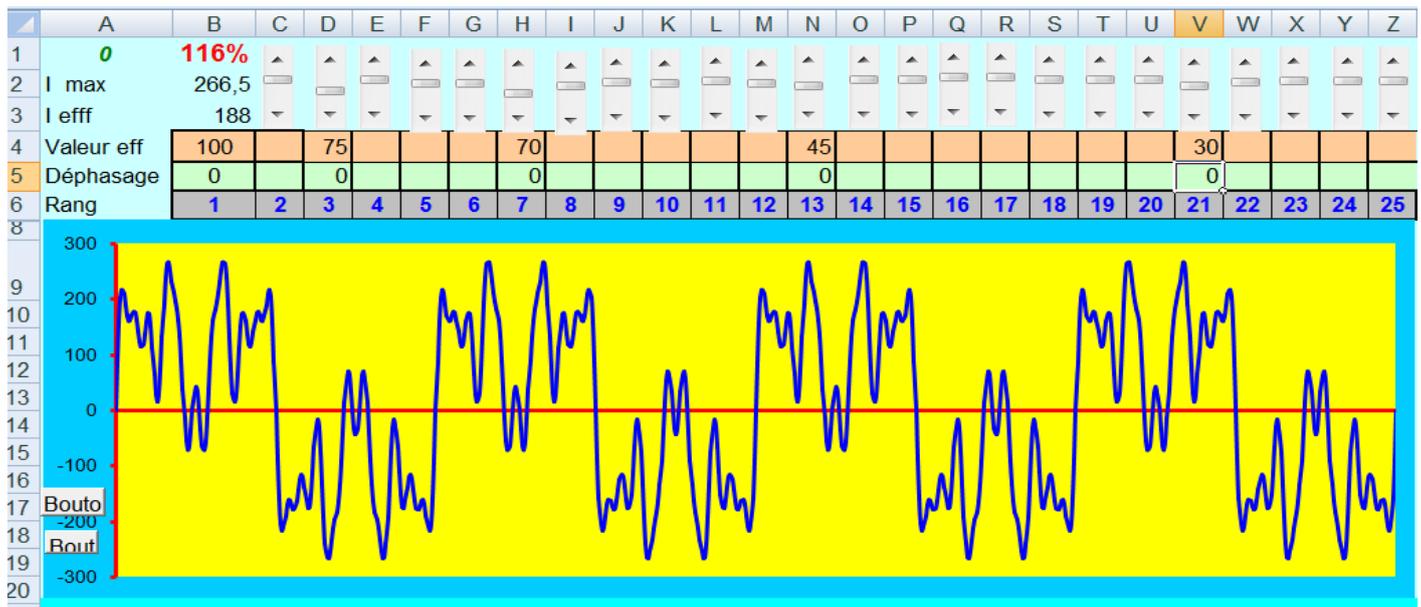


FIGURE 22: Onde des harmoniques des rangs 3,7 ,13 et 21

On constate que les perturbations dues aux harmoniques de ces rangs ont entraîné la déformation de l'onde du fondamental. Cela va en effet porter préjudice au fonctionnement du réseau. On remarque également que les caractéristiques du fondamental sont élevées à :

$$I_{max} = 266A ; I_{eff} = 188 A, 5A \text{ et THD}=116\%$$

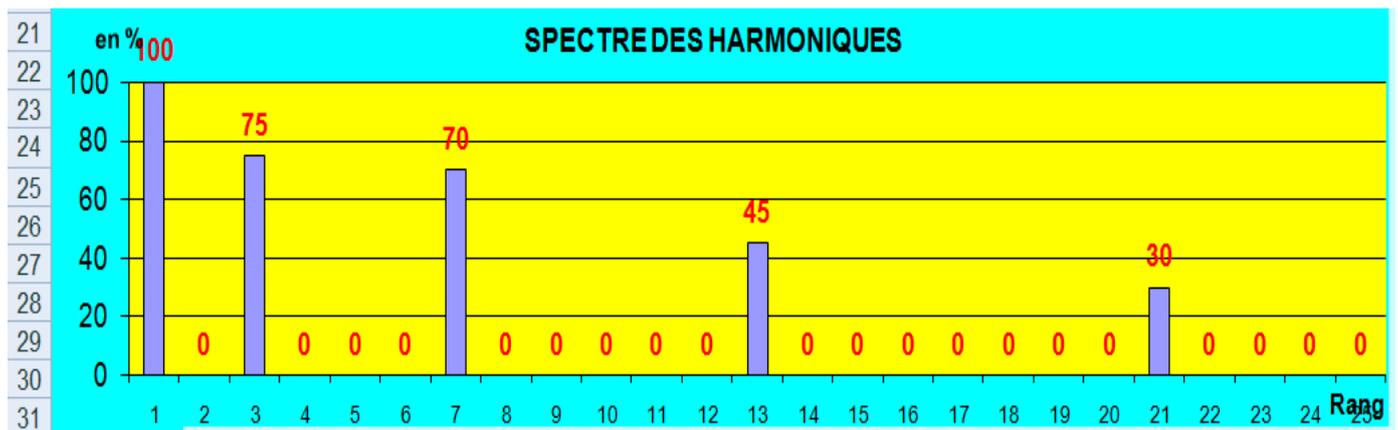


FIGURE 23: Spectre des harmoniques des rangs 1, 3,7 ,13 et 21.

L'harmonique de rang 3 possédant à lui seul un THD de 75% produit des effets les plus néfastes sur le réseau, c'est le plus difficile à combattre.

On constate avec la présence de ces courants harmoniques une variation croissante du courant max, ainsi la valeur du courant efficace donc une augmentation du taux de distorsion harmonique ce qui a entraîné la déformation de la sinusoïde du fondamental (fonctionnement normal). En définitif l'existence de ces courants harmoniques sur un réseau électrique peut produire de nombreuses perturbations des appareils qui lui sont raccordés et subissent les conséquences décrits précédemment.

VI.1.2 Deuxième application

La deuxième partie traite la variation des courants harmoniques tolérés d'un appareil en fonction des rangs et des indications fixés par le constructeur tels que la puissance souscrite et la tension contractuelle.

Ainsi pour une puissance fixée à 1000 KVA et une tension de 400V, on constate une variation décroissante du courant harmonique toléré en fonction des rangs impairs (1, 3, 7, 13,21).

	A	B	C	D
1	LES TOLERANCES SUIVANTES SONT DONC COMMUNIQUEES			
2	A TITRE INDICATIF			
3	PAR LES DISTRIBUTEURS			
4				
5				
6	PUISSANCE SOUSCRITE	1000	KVA	
7	TENSION CONTRACTUELLE	400	Volts	
8	RANG DU COURANT HARMONIQUE	13		
9	COURANT HARMONIQUE TOLERE	43,30	A	
10	PS>100 KVA	$I_{hn} = k_n \frac{P_{Souscrite}}{\sqrt{3} * U_c}$		

FIGURE 24: Courant harmonique toléré de rang 13

TENSION CONTRACTUELLE		
LES TOLERANCES SUIVANTES SONT DONC COMMUNIQUEES A TITRE INDICATIF PAR LES DISTRIBUTEURS		
PUISSANCE SOUSCRITE	1000	KVA
TENSION CONTRACTUELLE	400	Volts
RANG DU COURANT HARMONIQUE	6	
COURANT HARMONIQUE TOLERE	7,22	A
PS>100 KVA	$I_{hn} = k_n \frac{P_{Souscrite}}{\sqrt{3} * U_c}$	

FIGURE 25 : courant harmonique toléré de rang 6

Pour les rangs pairs à partir du rang 6, le courant harmonique toléré reste constant.

V.2 Solutions proposées

Après l'étude pratique qui nous a permis de constater l'existence de ces rangs harmoniques capable de perturber le fonctionnement du réseau de la RADEEF, il nous a été demandé de proposer des solutions pour y remédier. Ainsi nous avons suggéré deux solutions de filtrage qui nous paraissent idéales pour lutter contre ce fléau.



Les Filtres Actifs Bluewave éliminent la distorsion harmonique des charges non linéaires et améliorent le facteur de puissance du système.

Les filtres actifs **Bluewave** détectent la distorsion harmonique des charges non linéaire et injectent des courants réactifs et harmoniques en opposition de phase afin de rétablir un réseau sinusoïdal optimal et un facteur de puissance=1.

Le prix de ce filtre est 30 000,00 DH

Cette solution idéale consiste à :

- ✓ Restaurer des réseaux faibles.
- ✓ Augmenter la capacité du réseau.
- ✓ Augmenter la puissance génératrice.
- ✓ Répondre aux recommandations lors de rénovation
- ✓ Sécuriser les environnements sensibles
- ✓ Réaliser des économies d'énergie

TENSION SECTEUR

- ✓ 380-480V AC 50-60 Hz
- ✓ 500-690V AC 50-60 Hz

Gamme de puissance

190 A, 250 A, 310 A ,400A .

Jusqu'à 4 unités peuvent être installées en parallèle pour les variateurs forts puissances.

Niveau de protection

- ✓ IP 00, IP 21, IP 5



Les Filtres Passifs NF-HPHF offrent une solution pratique pour réduire les harmoniques sur des réseaux avec une haute concentration de charges non linéaires reliées au même transformateur. Comme pour les convertisseurs multi-pulses, les filtres passifs NF-HPHF ont un fonctionnement qui dépend de la charge et de la stabilité du réseau.

Le prix de ce filtre est 20 000,00 DH

Sa solution idéale consiste à :

- ✓ Sécuriser les environnements sensibles
- ✓ Les réseaux déficients
- ✓ Réduire les distorsions harmoniques réseau
- ✓ Les variateurs isolés du réseau

TENSION SECTEUR

- ✓ 500-690V AC 50-60 Hz

Gamme de puissance

- ✓ 250 KW-1 ,4 MW

Niveau de protection

- ✓ IP 21, IP 54

COÛT DES SOLUTIONS

Les prix utilisés dans cette partie sont ceux de l'année 2013

Les coûts des pertes par effet d'harmonique sont celles de 2013. Vu la période du projet et le manque de données concernant 2014. La différence ne sera pas trop grande entre les 2 années.

Les postes de distribution de la RADEEF sont en nombre d'environ 1200 postes MT/BT. Cependant, les postes les plus touchés par les harmoniques sont au nombre de 700 (d'après une étude menée par la RADEEF). Il faut, donc 700 filtres.

➤ Variante ACTIF (BLUEWAVE)

Le coût d'un filtre **Bluewave** est 30 000,00 DH.

Donc il faut $700 * 30\ 000 = 21\ 000\ 000,00$ DH.

Les coûts d'énergie perdue à cause des harmoniques : 1 860 000,00 DH

Le ratio Bénéfice /coût (RBC) = $\frac{1860000}{21000000} \times 100 = 8,86\%$

Temps de retour est : 11 ans et 3 mois.

➤ Variante PASSIF (NF-HPHF)

Le coût d'un filtre **NF-HPHF** est 20 000,00 DH.

Donc il faut $700 * 20\ 000 = 14\ 000\ 000,00$ DH.

Les coûts d'énergie perdue à cause des harmoniques : 1 860 000,00 DH

Le ratio Bénéfice /coût (RBC) = $\frac{1860000}{14000000} \times 100 = 13,30\%$

Temps de retour est : 7 ans et 6 mois.

VII. Aspects normatifs

Pour limiter ces problèmes d'harmoniques, les centrales ont majoritairement adopté les textes normatifs et réglementaires sur la qualité du courant ; à défaut, leur non-respect entraîne l'interdiction de raccordement d'une nouvelle installation ou des pénalités.

a. Valeurs données à titre indicatif

- machines synchrones : distorsion en courant statorique admissible = 1,3 à 1,4 % ;
- machines asynchrones : distorsion en courant statorique admissible = 1,5 à 3,5%.
- câbles : distorsion admissible en tension âme écran= 10 % ;
- condensateurs de puissance : distorsion encourant = 83 % ce qui donne une surcharge de 30% (1,3 I nominale) la surcharge en tension pouvant atteindre 10% .
- électronique sensible : distorsion en tension 5%, taux individuel 3% suivant le matériel.

b. Limites normalisées

La série des normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) définissent certaines limites concernant les harmoniques, notamment :

- CEI 61000-3-2 qui définit des limites d'émission de courant harmonique par les appareils consommant moins de 16 A par phase (sauf certaines catégories d'appareils - voir la norme). Le cas des appareils consommant au-delà de 16 A est examiné dans le rapport technique CEI 61000-3-4 et devrait être précisé par une norme CEI 61000-3-12 en préparation.
- CEI 61000-2-2 qui définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension (confère annexe. **fig.30**).
- CEI 61000-2-4 qui définit les niveaux de compatibilité dans les réseaux d'installations industrielles. Rappelons qu'un niveau de compatibilité n'est pas une limite absolue ; il peut être dépassé avec un faible pourcentage.

Conclusion Générale

Pratiquement, tous les équipements électriques et électroniques modernes possèdent un système de contrôle de puissance. Il en résulte une charge non linéaire. Les charges linéaires sont relativement rares. Ce sont ces équipements qui causent la plupart des problèmes rencontrés dans l'industrie, surtout de part leur nombre et de la production d'harmonique de rang trois.

Suite à l'augmentation du nombre des équipements et sans l'application de normes sévères, il est probable que la pollution harmonique continuera à augmenter. C'est un risque pour les entreprises, qui est peut être géré par des investissements appropriés dès la conception, lors de l'achat des équipements et pour la maintenance.

Ce stage a parfaitement répondu à nos attentes vu l'importance des dégâts occasionnés par les harmoniques et l'application des normes des CEM très sévères. Il nous a permis de découvrir un univers que ne nous connaissions finalement que très peu mais pour lequel nous portons un immense intérêt.

Nous pensons que les cours d'électrotechnique qui nous été enseignés en S4 ont eu une importance capitale au bon déroulement du stage. En effet sans ces notions de base, nous aurions sûrement été déboussolés et nous n'aurions pas pu découvrir des nombreuses choses enseignées. Nos compétences en mathématique nous ont également été très utiles car nous étions souvent confrontés à utiliser la décomposition en Série de Fourier.

En somme, nous avons trouvé la mission de la réalisation de ce projet très intéressante et enrichissante puisqu'il s'agissait pour nous d'un domaine inconnu où nous aimerions approfondir nos compétences.

ANNEXES

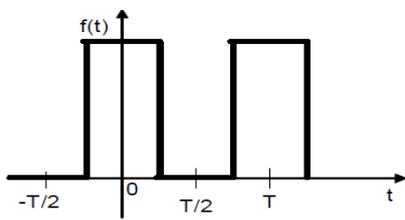


Fig2.1 : fonction

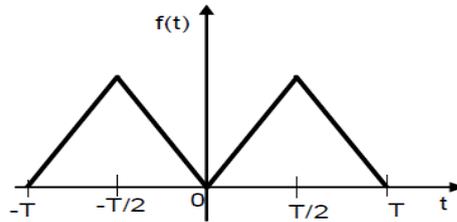


Fig2.2 : fonction triangle

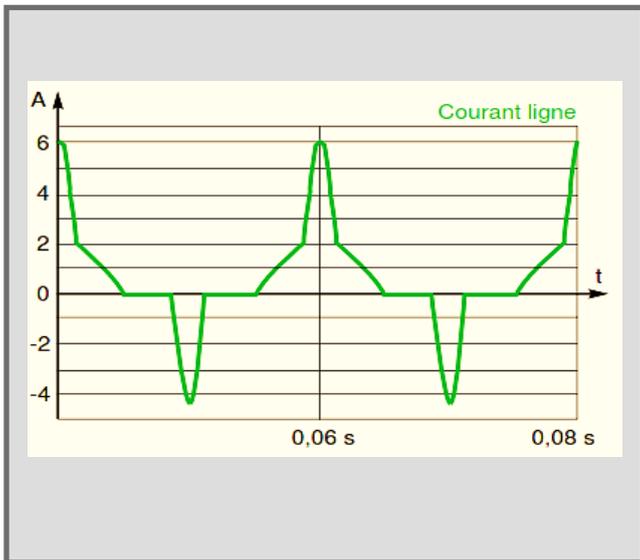


Fig. 3: allure du courant absorbé.

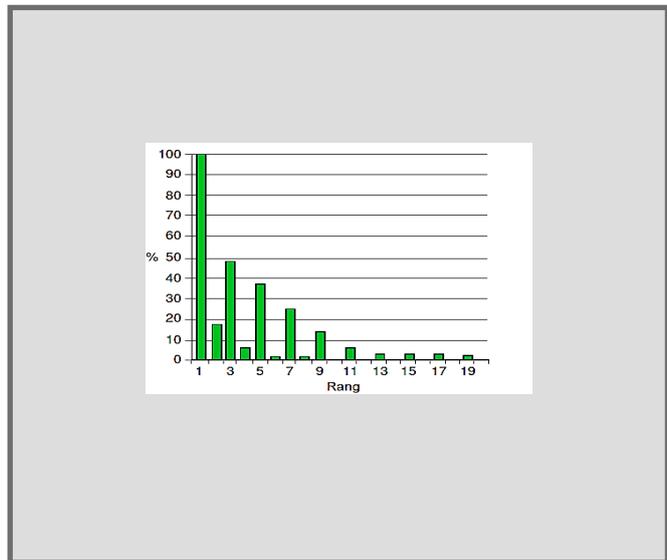


Fig. 4: spectre du courant absorbé.

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+0,5 \times 25/n$				

Fig. 5 niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (CEI 61000-2-2).

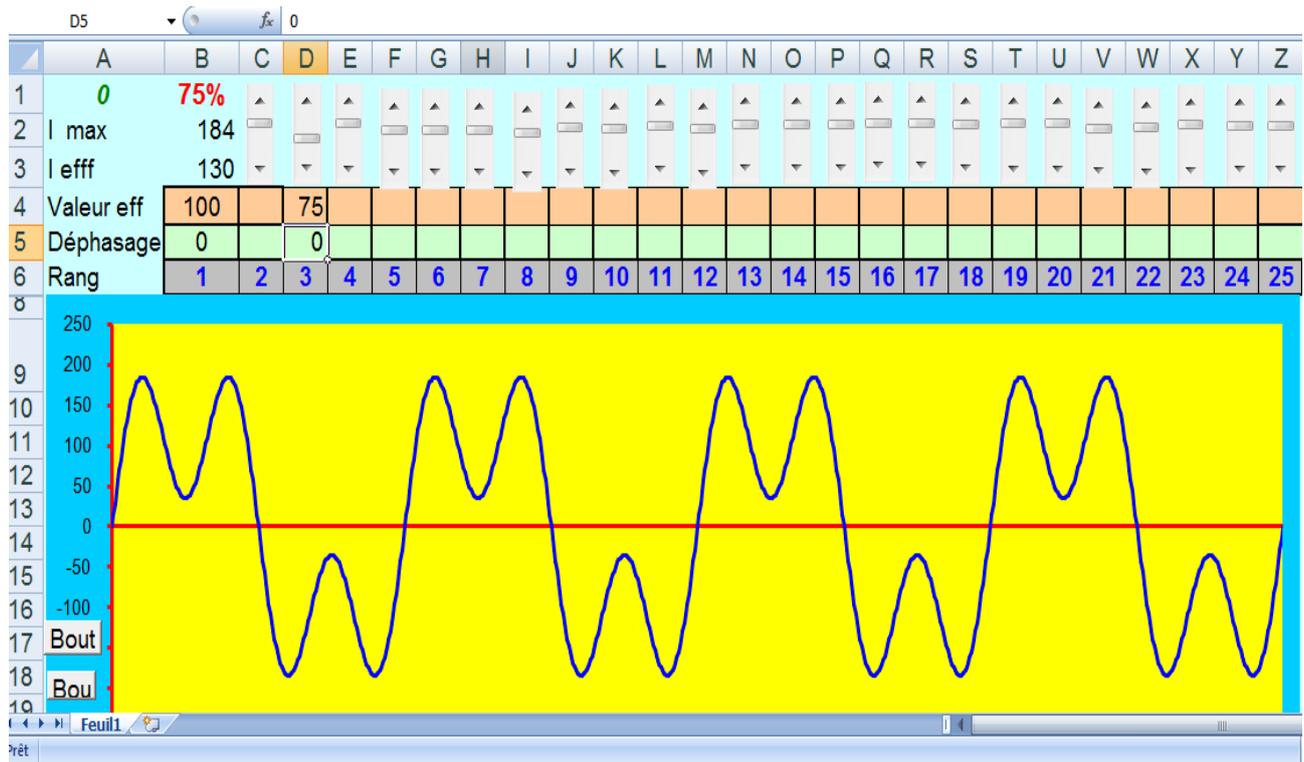
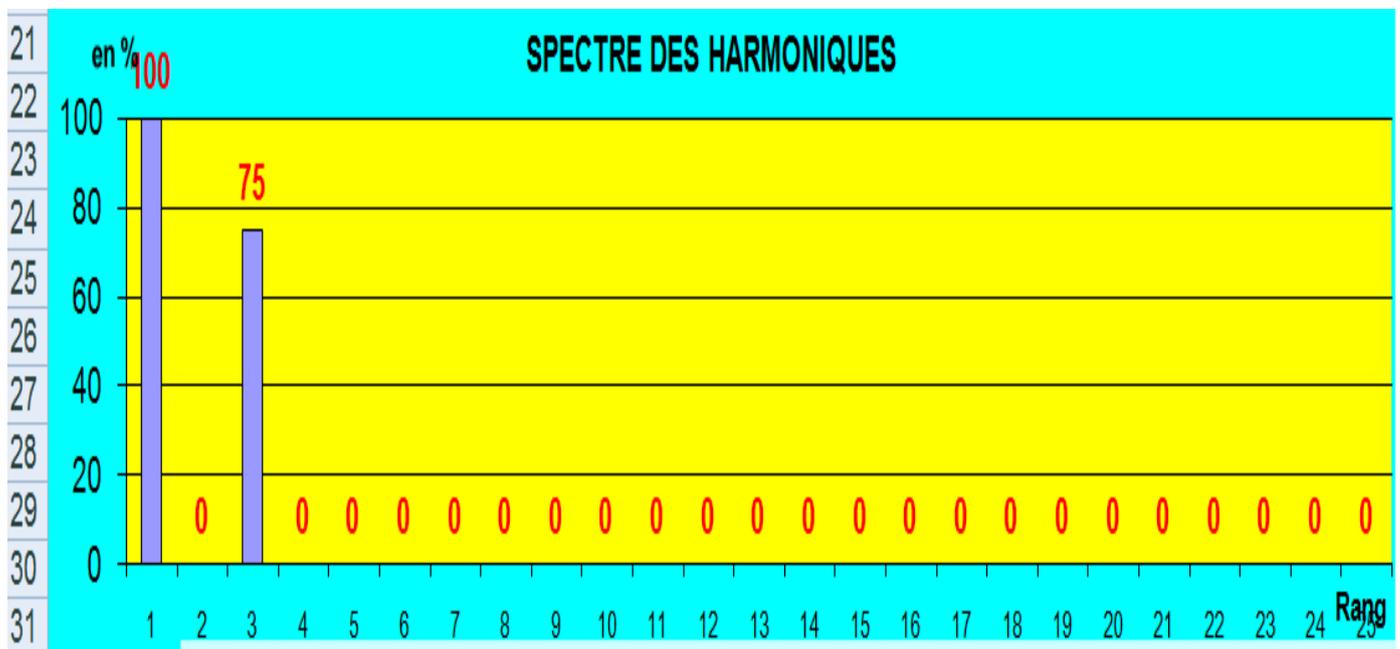


Fig 6: onde en présence d'harmonique du rang 3



Visualisée avec : $I_{eff} = 130A, I_{max} = 184A$ et $THD=75\%$

Fig .7 : Spectre des harmoniques des rangs 1 et 3

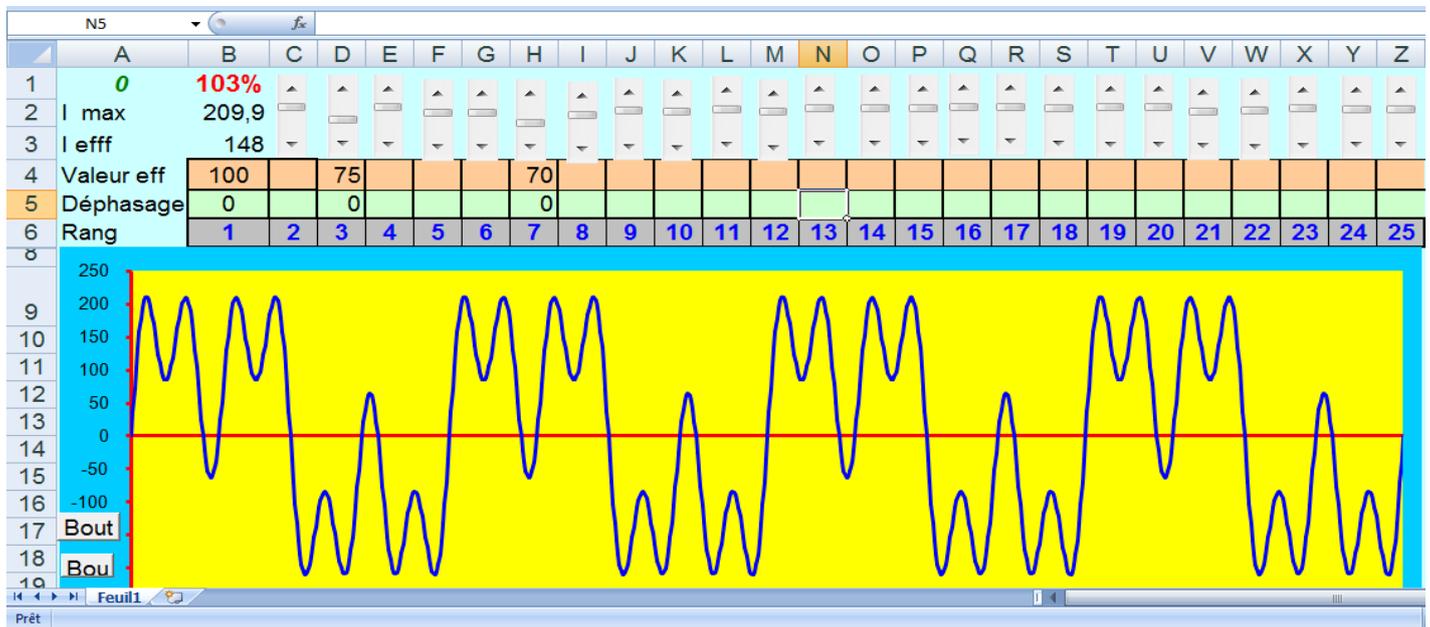


Fig8: onde des harmoniques de rangs 1 ,3 et 7

visualisée avec : $I_{max} = 209,9 \text{ A}$, $I_{eff} = 148 \text{ A}$, THD=103%

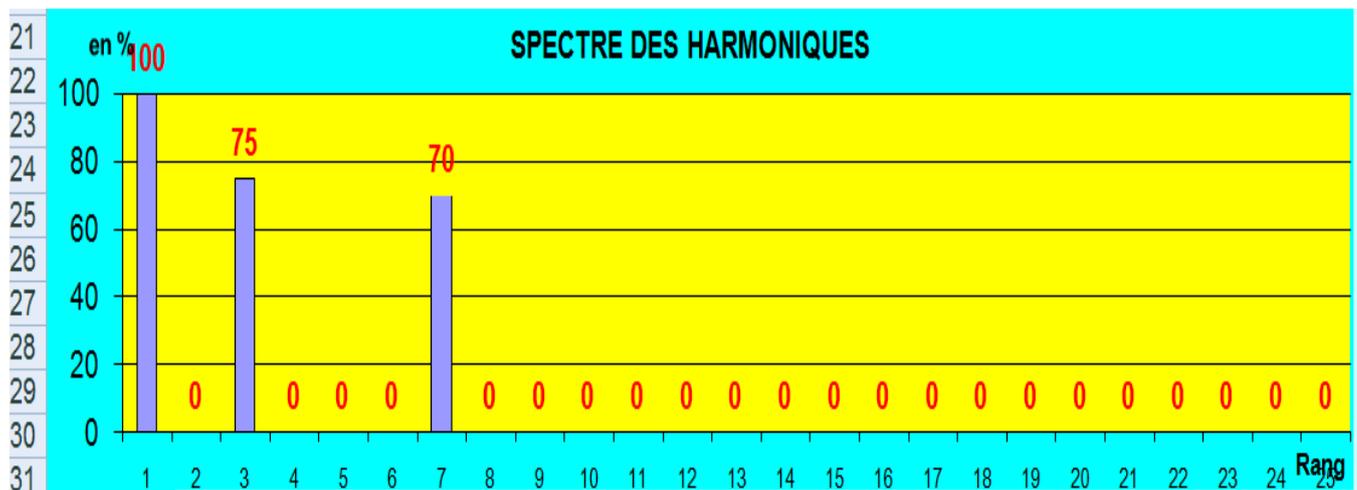


Fig9 : Spectre des harmoniques des rangs 1,3 et 7

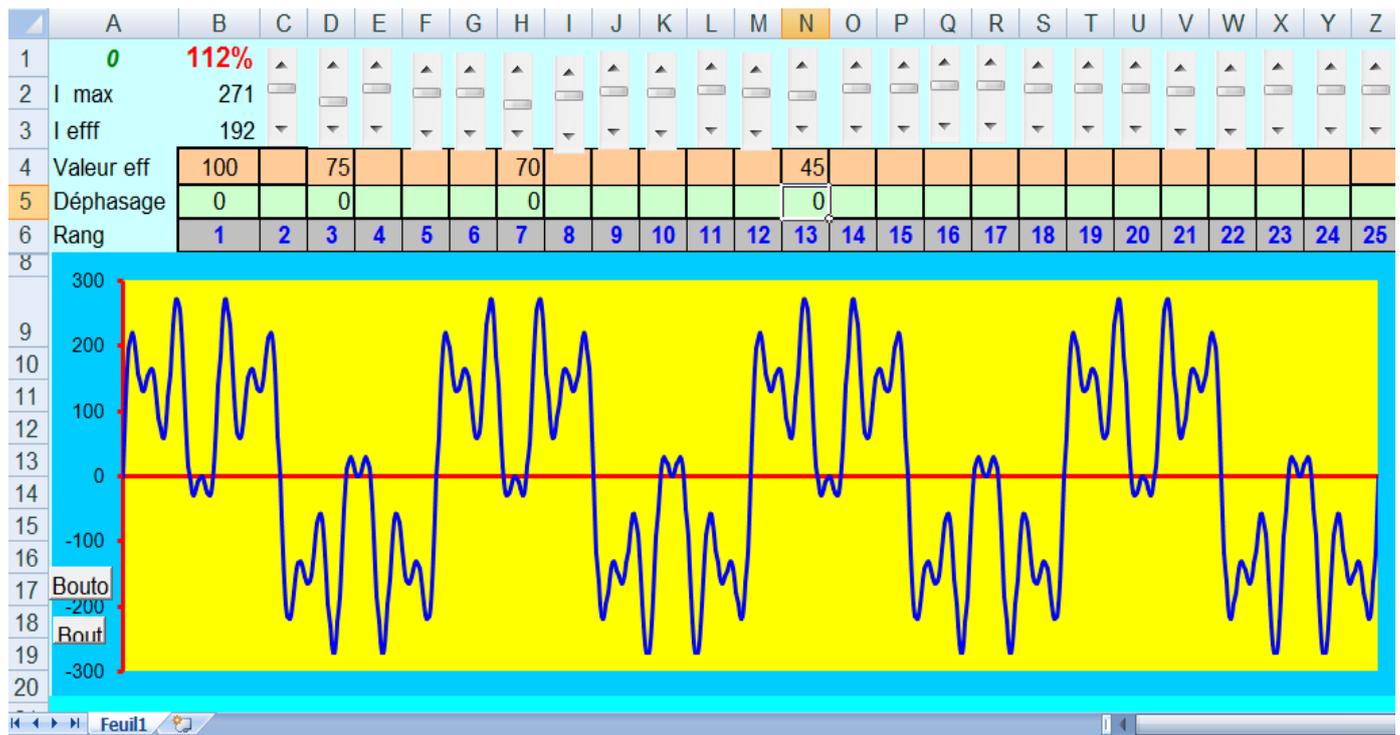


Fig.10: onde des harmoniques de rangs 1 ,3 ,7 et 13

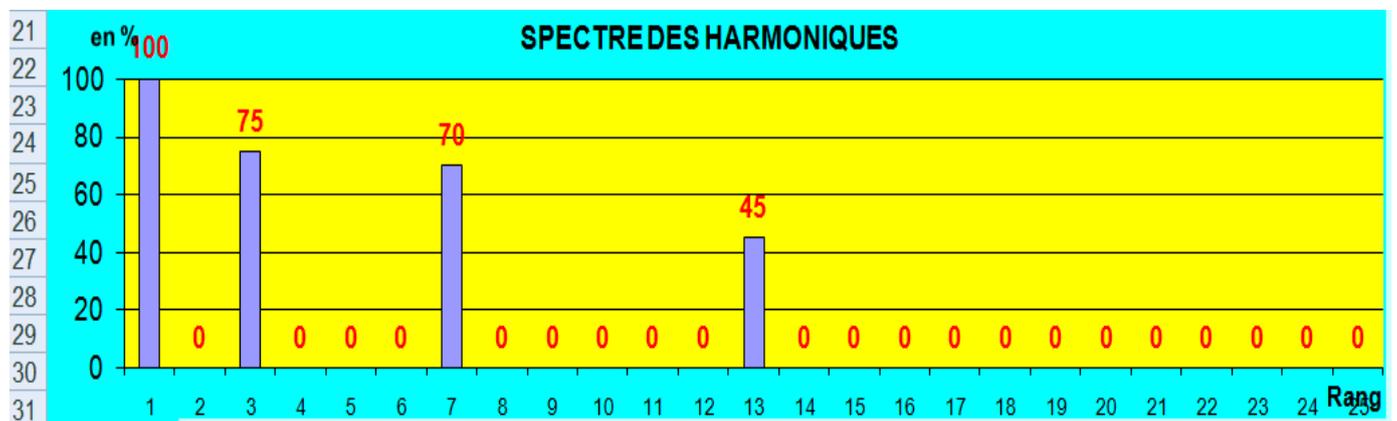


Fig.11 : Spectre des harmoniques des rangs 1, 3,7 et 13

BIIBLIOGRAPHIE

- Cahier de Schneider 152 et 202
- <https://www.wikipedia.org/wiki/harmonique>
- Les harmoniques et les installations électriques.A.KOUYOUMDJIAN05/98
(Réf. MD1HRM1F)
- <http://www.iufmrese.cict.fr/liste/Doclidie/Harmoniques.htm>
- J.L. COCQUERELLE C.E. M ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE
EDITIONS TECHNIP