



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES
Génie Electrique

RAPPORT DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

**Etude et analyse des harmoniques
générés dans le réseau électrique**

MT & BT

Réalisé par :

Zineb HAOUATE
Lamyae ELOGRI

Encadré par :

Pr Najia ES-SBAI (FST FES)

Mr Ahmed AMDA (RADEEF)

Soutenu le 16 Juin 2015 devant le jury

Pr Najia ES-SBAI (FST FES)

Pr Abdellah MECHAQRANE (FST FES)

Pr JORIO Mohammed (FST FES)

Dédicaces

Nous dédions ce travail :

A nos très chers parents, sources inépuisables d'amour et de tendresse, en reconnaissance des sacrifices consentis avec dévouement pour notre éducation et notre formation.

A nos amis et à toute notre famille ainsi qu'à tous ceux qui nous sont chers veuillez trouver ici le symbole de l'amour et l'intime attachement que vous nous portez.

A notre parrain et à tous ceux qui étaient près de nous au cours de ce stage, surtout à nos très chers professeurs qui sont la source de notre inspiration qu'ils trouvent dans ce travail les sincères témoignages de notre profonde affectation et de notre haute considération.

Remerciements

En présentant ce travail à la soutenance, nous souhaitons au préalable accomplir l'agréable devoir d'exprimer nos profondes reconnaissances à tous ceux qui ont prêté leur bienveillance à la réalisation de notre travail.

Avant tout nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre professeur Madame ES-SBAI Najia, d'avoir accepté de nous encadrer et de nous orienter durant l'élaboration de ce modeste travail. Vous nous avez apporté un grand soutien tout au long de notre stage.

Nous remercions aussi notre encadrant professionnel Mr. ELMOKHTARI Mohamed pour sa sympathie, sa disponibilité et sa critique constructive sans laquelle notre rapport n'aurait pas le même résultat.

Nos remerciements vont aussi à Pr JORIO Mohammed, responsable de la filière LST GE et à tous les professeurs qui ont contribué à notre formation.

Nos profondes gratitude, notre profond respect, et nos vifs remerciements pour les professeurs : Abdellah MECHAQRANE et JORIO Mohammed, nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous faites en acceptant de juger notre travail.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Liste des Tableaux..... | 6 |
| Liste des abréviations..... | 7 |
| Introduction générale | 8 |
| Chapitre I :Présentation de la RADEEF | 9 |
| I. Evolution de la RADEEF :..... | 10 |
| II. Fiche Technique de la RADEEF :..... | 10 |
| III. Organigramme générale de la RADEEF : | 11 |
| IV. Département d'exploitation d'électricité : | 11 |
| 1. Division conduite et gestion réseau :..... | 12 |
| Chapitre II :Etude des phénomènes d'Harmonique | 14 |
| I. Description du phénomène: | 15 |
| 1. Définition des harmoniques :..... | 15 |
| 2. Origine des harmoniques :..... | 16 |
| II. L'analyse de Fourier :..... | 16 |
| III. Harmoniques et charges Electriques : | 17 |
| 1. Charges linéaires et non linéaires : | 17 |
| 2. Courant absorbé par les charges non linéaires :..... | 20 |
| 3. Exemples de charges non-linéaires :..... | 21 |
| 4. Les types de charges non linéaires : | 21 |
| 5. Caractérisation d'une charge non linéaire : | 25 |
| IV. Causes et conséquences des harmoniques : | 28 |
| 1. Causes des harmoniques :..... | 28 |
| 2. Effets des harmoniques : | 28 |
| V. Les solutions Générales aux Harmoniques : | 30 |
| 1. Filtres passifs :..... | 30 |
| 2. Filtres actifs:..... | 32 |
| 3. Choix de filtre approprié à utiliser..... | 35 |
| Chapitre III :Cas pratique dans la RADEEF | 37 |
| I. Applications :..... | 37 |
| I.1.Première application : | 38 |
| I.2.deuxième application : | 40 |
| II. Solutions proposées :..... | 41 |
| III. Etude financière :..... | 42 |
| Conclusion générale..... | 43 |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1: Organigramme de la RADEEF | 11 |
| Figure 2: Département exploitation électricité | 12 |
| Figure 3: Distorsion de H1 (la fondamentale) par H3 (Harmonique de troisième rang) | 16 |
| Figure 4: Onde du courant pour une charge linéaire | 18 |
| Figure 5: Schéma équivalent pour une analyse harmonique | 19 |
| Figure 6: Onde du courant pour une charge non linéaire. | 19 |
| Figure 7: Schéma explicative du courant déformé | 20 |
| Figure 8: Influence des Harmoniques sur l'amplitude du signal | 21 |
| Figure 9: Histogramme d'amplitude en fonction du rang d'harmonique. | 21 |
| Figure 10: Exemples des équipements non linéaires. | 21 |
| Figure 11: Exemple d'alternances symétriques | 22 |
| Figure 12: Charge triphasée | 22 |
| Figure 13: Redresseur triphasé avec condensateur en tête | 23 |
| Figure 14: Allure du courant absorbé par le redresseur. | 23 |
| Figure 15: Histogramme des harmoniques pour un redresseur triphasé | 24 |
| Figure 16: Schéma redresseur monophasé | 24 |
| Figure 17: Allure du courant absorbé..... | 25 |
| Figure 18: Spectre des harmoniques d'une charge monophasé (ordinateur)..... | 25 |
| Figure 19: Puissance en absence d'harmonique. | 26 |
| Figure 20: Puissance apparente en présence d'harmonique. | 27 |
| Figure 21: Addition des courants harmoniques de rang trois dans le neutre. | 30 |
| Figure 22: Structure du filtre résonant. | 31 |
| Figure 23: Structure du filtre amorti. | 31 |
| Figure 24: Différents types de filtre actif. | 32 |
| Figure 25: Montage d'un filtre actif parallèle..... | 33 |
| Figure 26: Montage d'un filtre actif en série. | 33 |
| Figure 27: Combinaison parallèle-série actif (UPQC)..... | 34 |
| Figure 28: Onde fondamentale. | 37 |
| Figure 29: Spectre de rang 1. | 38 |
| Figure 30: Onde des harmoniques des rangs 3, 7, 13,21..... | 38 |
| Figure 31: Spectre des harmoniques des rangs 1, 3, 7, 13,21. | 39 |
| Figure 32: Courant harmonique toléré de rang 3. | 40 |

Liste des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1: Quelques exemples d'appareils comportant un redresseur monophasé..... | 25 |
| Tableau 2: Avantages et inconvénients de filtre passif | 32 |
| Tableau 3: Avantages et inconvénients de filtre actif | 34 |
| Tableau 4: Principales caractéristiques de filtre passif et actif. | 41 |
| Tableau 5: Etude financière des filtres actif et passif..... | 42 |
| Tableau 6: Eléments de comparaison entre les deux filtrages | 42 |

Liste des abréviations

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

BCC : Bureau Central de Conduite.

PA : Postes Asservis.

BT : Basse Tension , $50 \leq U_n \leq 1000$.

HTA : Haute Tension de classe A, $1000 \leq U_n \leq 50000$.

SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition (télésurveillance et acquisition de données).

VAD : voltampère déformant.

Hz : Hertz.

THD : taux de distorsion harmonique.

FP : Facteur de Puissance.

F_c : Facteur de crête.

FAP : filtre actif parallèle.

FAS : filtre actif série.

UPQC : Unified Power Quality Conditioner (combinaison parallèle série actif).

LYDEC : Lyonnaise des Eaux de Casablanca.

KVA : kilo voltampère.

IP : indice de protection.

MT : moyenne tension.

RBC : ratio Bénéfice /coût.

S : Puissance apparente.

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

D : Puissance déformante

Introduction Générale

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

Depuis de nombreuses années, les distributeurs d'énergie électrique s'efforcent de garantir la qualité d'électricité fournie. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique de puissance prend une place prépondérante dans les systèmes de conversion de l'énergie et qui a entraîné une dégradation et des perturbations de la qualité de courant dans les installations électriques. On trouve parmi ces perturbations extérieures les harmoniques. L'objectif de ce projet est d'évaluer la pollution harmonique causée par ces équipements au sein d'un réseau électrique et de proposer des solutions pour les atténuer.

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 encadrant.

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, 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. Ainsi, le 3^{ème} chapitre, sera focalisé sur les applications harmoniques faites au sein de la RADEEF. Nous terminerons enfin par une conclusion générale.

Chapitre I :

Présentation de la

RADEEF

Dans cette partie, nous donnons une présentation générale de la RADEEF afin de clarifier le contexte de fonctionnement interne de cet établissement. Pour cela, nous commençons par la création, l'organigramme, et les activités de la RADEEF.

I. Evolution de la RADEEF :

La Régie Autonome intercommunale de Distribution d'Eau et d'Electricité de la ville de Fès (R.A.D.E.E.F) est un établissement public à caractère industriel et commercial, doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière. Elle a été créée par la délibération du conseil municipal de la ville de Fès en date du 30 Avril 1969 et avait comme mission principale la gestion du réseau électrique de la ville. A partir de 1970, la régie assurait aussi la distribution de l'eau potable. En 1993, la régie a commencé l'étude, la réalisation ainsi que l'entretien liquide du réseau d'assainissement. Par conséquent, la R.A.D.E.E.F réponds aux besoins de la population en matière d'eau potable et d'électricité. Elle s'occupe de la gestion du patrimoine dans le but d'offrir un service de qualité aux clients ou aux abonnés. La régie bénéficie d'un monopole d'Etat dans les zones urbaines de Fès puisqu'elle assure ses besoins en Eau et en Electricité à partir de l'Office National de l'Electricité et de l'Eau potable (ONEE).

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 de l'autonomie financière.

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.

Principal 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 générale de la RADEEF :

Il est à noter qu'à la RADEEF il existe, selon l'importance des tâches et des effectifs, des divisions et des services. Cependant ils sont tous pilotés par la direction générale. Les divisions sont plus importantes que les services en termes de tâches et d'effectif. L'organigramme général de la RADEEF se présente comme suit [4]:

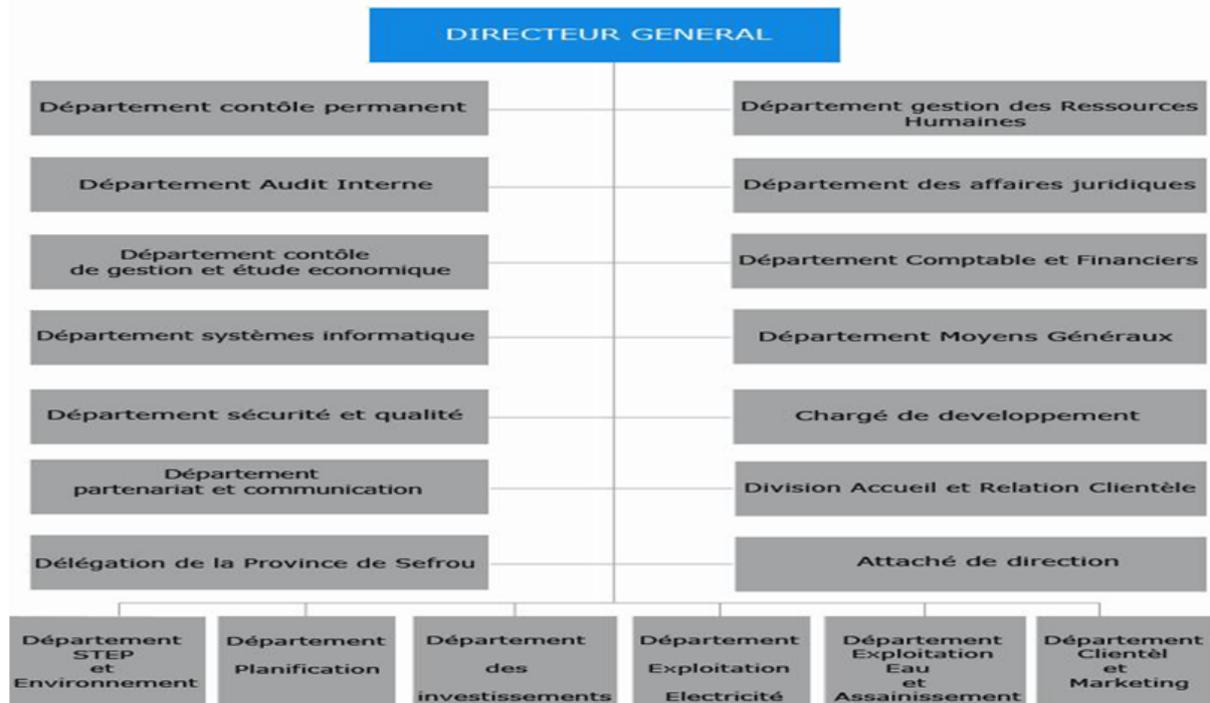


Figure 1: Organigramme de la RADEEF

IV- Département d'exploitation d'électricité :

Ce département est chargé d'assurer en quantité et en qualité la distribution d'électricité selon le besoin de la ville de Fès. Le département d'exploitation électricité a connu de profondes mutations, grâce à la réalisation du projet innovant BCC (Bureau Central de Conduite). Cette innovation permet, à partir d'un bureau central de conduite, de gérer en temps réel l'ensemble du réseau d'électricité moyenne tension de la ville de Fès. Cet accès à distance est réalisé par l'intermédiaire des postes asservis(PA), ces derniers permettant au BCC de commander tous les postes réseaux qui sont éloignés [4].

Le département d'exploitation d'électricité s'occupe principalement des travaux d'exploitation électricité, de la gestion du réseau électrique et assure aussi la mise en conformité de l'éclairage public de la ville de Fès.

Ce département est formé de quatre divisions :

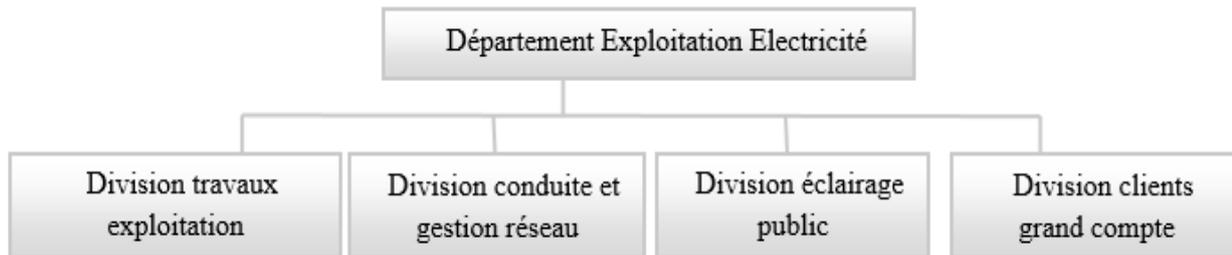


Figure 2: Département exploitation électricité

1. Division conduite et gestion réseau :

Notre stage s'est déroulé dans la division conduite et gestion réseau, cette division se compose de 3 services :

1- Service conduite du réseau: il est chargé des interventions rapides basses et moyennes tension et ses activités principales sont : la recherche des défauts, la réparation des défauts HTA & BT et les dépannages simples. Ce service se compose de 5 bureaux :

a. Bureau des réclamations: est chargé de la réception des réclamations téléphoniques des abonnés et de la coordination avec le bureau intervention rapide.

b. Bureau intervention BT : dont les tâches il ya les interventions sur le réseau HTA/BT, les réparations des défauts HTA/BT, le contrôle des charges et des tensions des départs BT ainsi que la réparation des fils coupés.

c. Bureau opérateur HTA : s'occupe de la réception des nouveaux postes HTA/BT et de l'établissement des réseaux HTA en cas de déclenchement ainsi que du suivi des défauts signalés par la télégestion en coordination avec le BCC.

d. Bureau Central de Conduite BCC : Ses activités principales sont :

- La supervision des réseaux HTA.
- Suivi des puissances appelées.
- Commande à distance des postes HTA/BT.

e. Bureau administrateur système SCADA: est un bureau de télésurveillance et acquisition de données (SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition) il assure les tâches suivantes:

- Administration du système SCADA.
- Mise à jour des bases de données du système SCADA.
- Développement des programmes informatique relatifs à la télégestion du réseau.
- Configuration des équipements de téléconduite.
- Elaboration des consignes d'exploitations des postes télécommandés.

2- Service mesure & protection : a pour mission de vérifier quotidiennement les postes sources et les réglages des protections et la recherche des défauts HTA & BT.

3- Service Télécoms : ce service a plusieurs tâches à savoir : la surveillance du réseau radio, la maintenance la réparation et installation des équipements radiocommunication, la gestion du parc radiocommunication et la programmation des émissions/réceptions radio administratif.

V- Conclusion :

Dans cette partie, nous avons présenté l'organigramme et la fiche technique de la RADEEF et le département exploitation électricité dont lequel on a effectué notre stage et qui nous a aidées à traiter notre sujet.

Chapitre II :

Etude des phénomènes d'Harmonique

Dans ce chapitre, nous étudions la problématique de la propagation des harmoniques dans les réseaux de distribution; notamment l'impact de cette propagation sur les différents secteurs (industriel, domestique, tertiaire), ainsi que les différentes solutions pour les atténuer.

I. Description du phénomène:

Ces dernières décennies, l'utilisation croissante dans l'industrie des équipements d'électronique de puissance et l'informatique contribuent à la dégradation de la qualité de l'énergie dans le réseau électrique. En effet, les convertisseurs statiques (les redresseurs, les gradateurs, les cycloconvertisseurs) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Principalement l'utilisation de ces convertisseurs dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la « qualité » du courant et de la tension des réseaux de distribution. Ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale, ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, la circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique [1].

Plusieurs solutions ont été présentées pour dépolluer les réseaux électriques de tout type de perturbation de courant et de tension à savoir: les harmoniques, les déséquilibres, les composantes réactives et les creux de tension.

1. Définition des harmoniques :

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier (k) de la fréquence du réseau de distribution, appelée fréquence fondamentale de 50 Hz. Lorsqu'elles sont combinées à la tension ou au courant fondamental sinusoïdal, les harmoniques provoquent la distorsion de la forme d'onde de la tension ou du courant (voir figure 3).

Les harmoniques sont généralement notées H_k , où k est le rang de l'harmonique [2].

Sur la figure 3, nous donnons un exemple représentant un signal déformé résultant de l'addition de l'onde fondamentale H_1 (50HZ) et l'Harmonique de rang 3 H_3 ($3 \cdot 50\text{HZ}$).

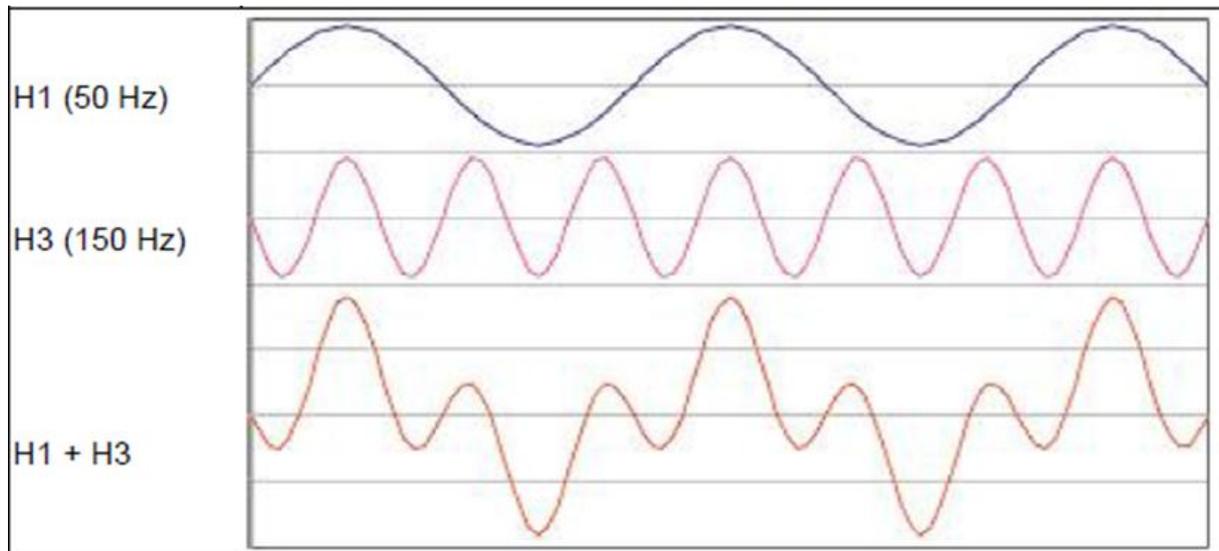


Figure 3: Distorsion de H1 (la fondamentale) par H3 (Harmonique de troisième rang)

2. Origine des harmoniques :

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique du réseau électrique est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques. En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques. Ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peuvent entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les équipements alimentés par le même réseau électrique [3].

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 [4]. Tout signal périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f :

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

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

a_0 est une constante qui représente la moyenne de la fonction

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \end{array} \right. \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt$$

avec : $\omega = 2\pi f_0$ où f_0 : fréquence fondamentale

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 impair [4].

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

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T_0}{2}} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{4}{T_0} \int_0^{\frac{T_0}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

La décomposition en série de Fourier d'une fonction paire ne contient que des termes en cosinus avec éventuellement la moyenne a_0 [4].

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

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) dt = 0 \\ a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt = 0 \\ b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{4}{T_0} \int_0^{\frac{T_0}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt \end{array} \right. \quad (4)$$

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 .

III. Harmoniques et charges Electriques :

1. Charges linéaires et non linéaires :

Le réseau électrique fournit aux charges une tension sinusoïdale de 50 Hz. La forme d'onde du courant fourni par la source en réponse aux besoins de la charge dépend du type de charge.

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires),
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

a. Charges linéaires :

Le courant absorbé est sinusoïdal avec la même fréquence que la tension. Le courant peut être en retard (déphasage, angle ϕ) par rapport à la tension.

La loi d'Ohm définit une relation linéaire entre la tension et le courant ($U = ZI$) avec un coefficient constant, l'impédance de charge. Le rapport entre le courant et la tension est

linéaire [2]. C'est parce qu'elles sont conformes à cette loi qu'on nomme linéaires des charges telles que :

- ✓ Les ampoules classiques
- ✓ Les systèmes de chauffage
- ✓ Les charges résistives
- ✓ les moteurs
- ✓ les transformateurs, etc.

Le cas illustré à la figure 4 correspond à une charge linéaire (la forme de l'onde du courant et de la tension est des sinusoïdes parfaites). Lorsqu'on applique une tension sinusoïdale à un élément linéaire, le courant résultant est également sinusoïdale [5].

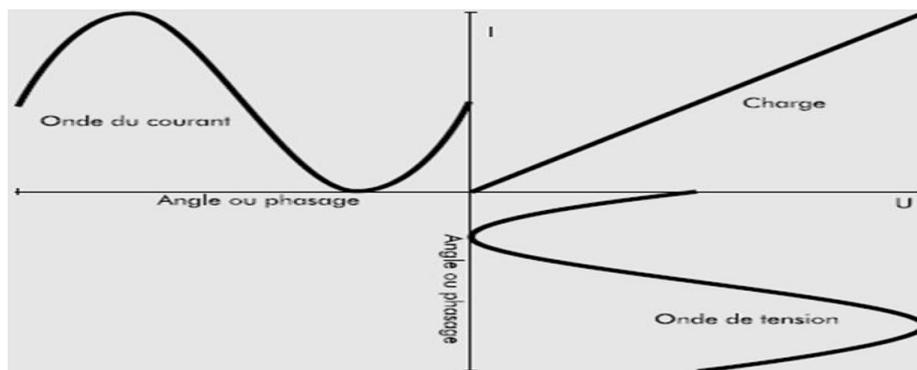


Figure 4: Onde du courant pour une charge linéaire

b. Charges non linéaires :

Le point commun de tous les équipements modernes est qu'ils fonctionnent selon un mode qualifié de «non linéaire», d'où leur appellation (logique) de «charges non linéaires»

On peut expliquer cela physiquement à travers le phénomène de résonance, car une charge non linéaire est un récepteur RLC, qui combine l'effet capacitive, résistive et inductive [6].

La figure suivante représente les composantes (RLC) d'un récepteur non linéaire :

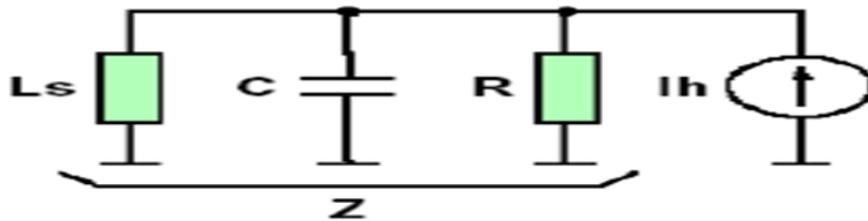


Figure 5: Schéma équivalent pour une analyse harmonique

L_s : inductance de l'alimentation

C : capacité de compensation

R : résistance des charges linéaires

i_h : courant harmonique

L'expression de l'impédance Z du circuit ci-dessus montre l'association sur le réseau d'éléments inductif et capacitif entraînant l'apparition de phénomènes de résonance. Ceux-ci se manifestent par des variations d'impédances qui vont modifier les courants et tensions sur le réseau [10].

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (5)$$

Le modèle de l'impédance globale du réseau, en y incluant les charges perturbatrices, nous permet d'analyser les fréquences dites de résonance. Dans ce cas, on a alors une fréquence de résonance du circuit et l'impédance atteint un maximum. Il ya donc apparition d'harmoniques et de fortes distorsions des signaux.

La loi d'Ohm ($u = Z \cdot i$) définissant le rapport entre la tension totale et le courant n'est plus valide car l'impédance de la charge varie au cours d'une période, Le rapport entre le courant et la tension n'est pas linéaire [2].

La figure suivante explique que lorsqu'une charge non linéaire est soumise à une tension sinusoïdale, elle absorbe un courant dit « déformé », d'où il n'y a plus la proportionnalité entre le courant et la tension, ainsi que le montre la figure 6.

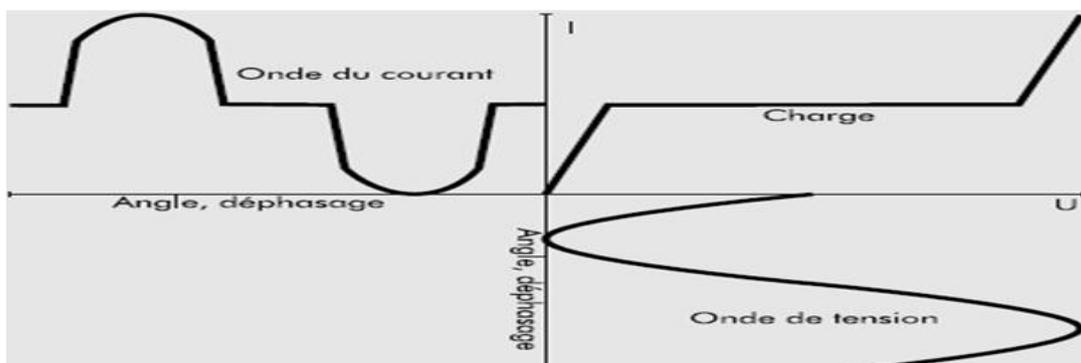


Figure 6: Onde du courant pour une charge non linéaire.

2. Courant absorbé par les charges non linéaires :

Les courants pollués ne sont pas sinusoïdaux, car ils sont réclamés par les charges non linéaires pour leur fonctionnement. Tout courant dont la forme d'onde n'est pas sinusoïdale résulte toujours de l'addition :

- ❖ d'une composante continue
- ❖ d'un courant sinusoïdal appelé, composante fondamentale, à une fréquence de 50 Hz.
- ❖ de courants sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples (pairs ou/et impairs) de la fréquence du courant initial, ces courants sinusoïdaux sont appelés «harmoniques». Chaque harmonique est nommée par son «rang» c'est à dire par le multiple de la fréquence du courant initial [7].

La figure 7 montre le résultat de la somme des harmoniques de différents rangs H2, H3, H4 et H5.

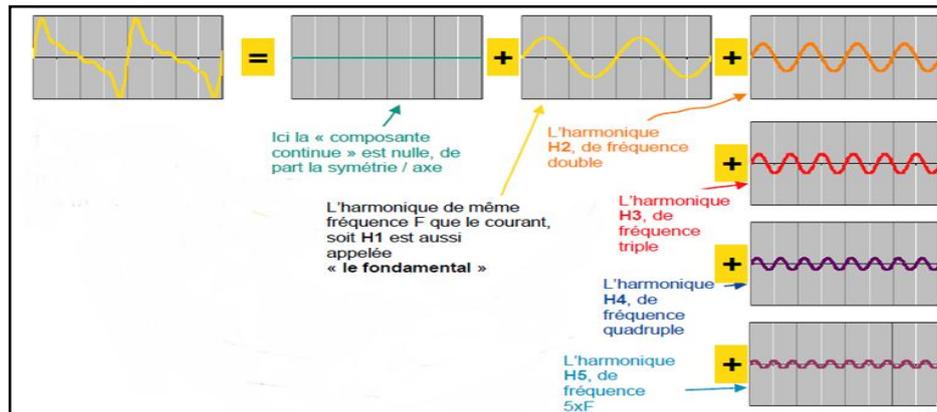


Figure 7: Schéma explicative du courant déformé

On remarque que l'onde résultante ou onde déformée est plus complexe, l'onde déformée n'est pas sinusoïdale.

Définir le rang harmonique n'est pas suffisant pour caractériser l'influence des harmoniques, en effet, il est important de connaître l'amplitude de chaque harmonique. L'expression se fait en % et la référence (100%) est l'harmonique fondamentale H1.

La figure ci-dessous montre la relation entre l'harmonique et l'amplitude, on voit bien que l'amplitude diminue lorsque le rang d'harmonique augmente, il devient quelque pourcent de la fondamentale.

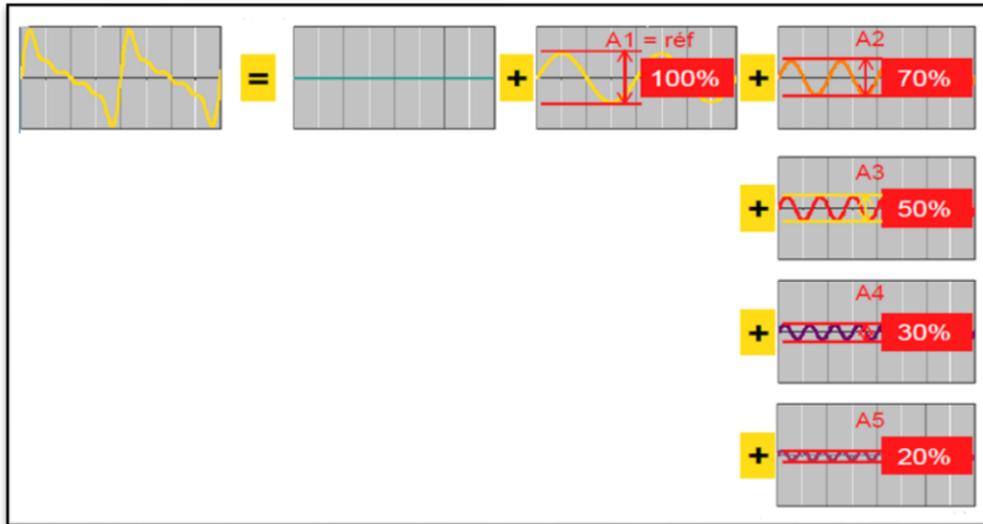


Figure 8: Influence des Harmoniques sur l'amplitude du signal [7].

La figure 9 ci-dessous est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental. Le taux de l'harmonique de rang n est donné par la formule : $T_{harmonique} = 100 * \frac{A_n}{A_1}$

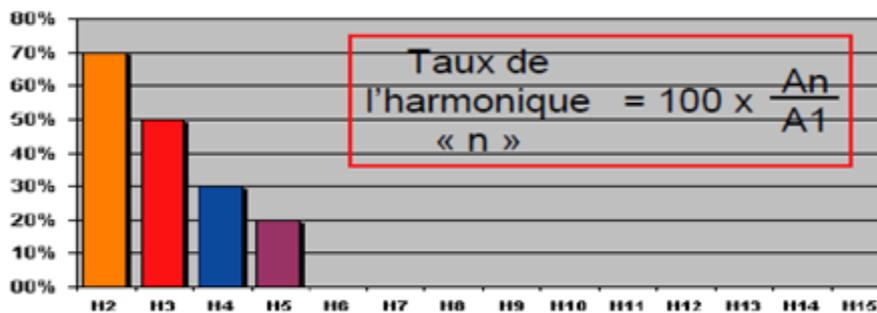


Figure 9: Histogramme représentant le changement d'amplitude en fonction du rang d'harmonique.

On remarque que lorsque le rang d'harmonique augmente, l'amplitude diminue.

2. Exemples de charges non-linéaires :

Nous citons quelques équipements générateurs de pollution harmonique dans les différents secteurs [8] :

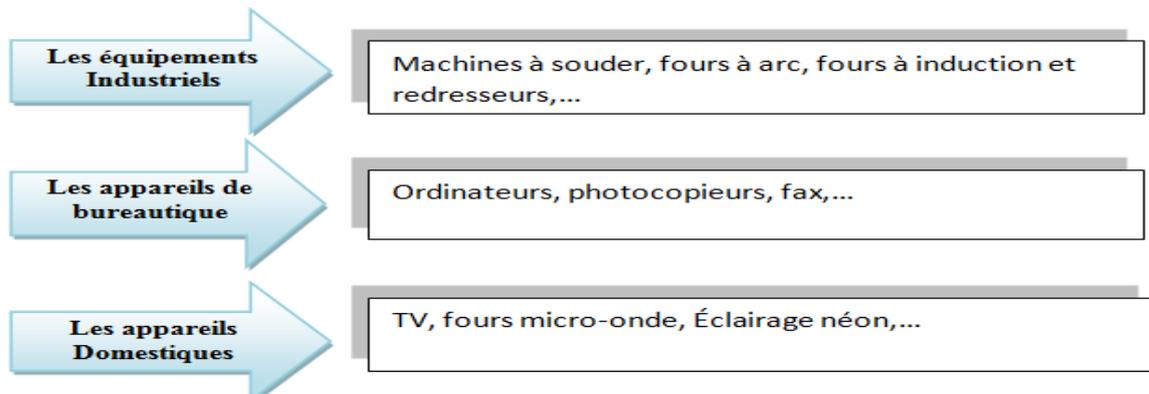


Figure 10: Exemples des équipements non linéaires.

4. Les types de charges non linéaires :

Il ya trois types de charges non linéaires : les charges non linéaires symétriques, les charges non linéaires triphasées, et les charges non linéaires monophasées.

4.1. Les charges non linéaires symétriques :

La plupart des charges non linéaires connectées au réseau sont dites «symétriques», c'est à dire avec des alternances égales et opposées mais aussi des demi-alternances symétriques.

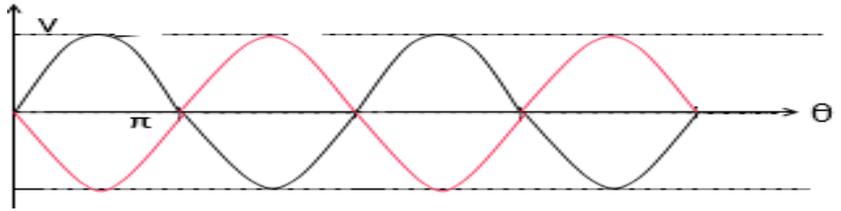


Figure 11: Exemple d'alternances symétriques [2].

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 :

$$I(\omega t) = I_1 \sin(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t). \quad (6)$$

On a donc :

$$I(\omega t + \pi) = I_1 \sin(\omega t + \pi) + I_2 \sin(2(\omega t + \pi)). \quad (7)$$

$$I(\omega t + \pi) = -I_1 \sin(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t). \quad (8)$$

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.

4.2. Les charges non linéaires triphasées :

Considérons une charge triphasée non linéaire, équilibrée, symétrique, sans raccordement au neutre, comme représentée sur la figure 12.

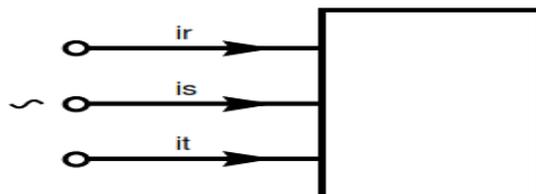


Figure 12: Charge triphasée [4].

Supposons que les courants absorbés par cette charge contiennent de l'harmonique 3. dans les systèmes triphasés, chaque tension entre phases présente un déphasage de 120° , ce qui provoque un déphasage de 120° pour le courant par phase. Les courants harmoniques de rang 3 de chacune des phases peuvent s'écrire de la manière suivante :

$$i_{r3} = I_3 \sin(3\omega t) \quad (9)$$

$$i_{s3} = I_3 \sin 3(\omega t - 2\pi/3) = I_3 \sin(3\omega t - 2\pi) = i_{r3} \quad (10)$$

$$i_{t3} = I_3 \sin 3(\omega t - 4\pi/3) = I_3 \sin(3\omega t - 4\pi) = i_{r3} \quad (11)$$

Les courants harmoniques de rang 3 des trois phases sont donc égaux $i_{r3} = i_{s3} = i_{t3}$. Or, en absence de conducteur de neutre, $i_r + i_s + i_t = 0$. La somme des courants harmoniques de rang 3 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, ... Il est donc nécessaire de faire particulièrement attention à ce type d'harmoniques dans les installations ayant un neutre distribué (applications commerciales et d'infrastructure) [4].

Comme exemple pour expliquer le comportement physique d'une charge non linéaire triphasée, on considère le cas d'un variateur de vitesse pour un moteur asynchrone [6]. La figure 13 représente le schéma d'un redresseur triphasé alimenté par les courants (i_1, i_2, i_3) , avec un condensateur.

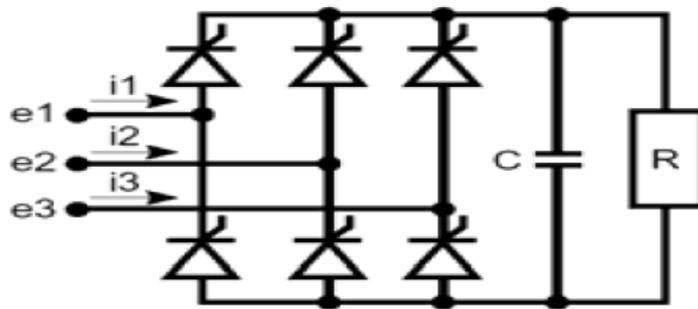


Figure 13: Redresseur triphasé avec condensateur en tête [6].

La courbe suivante [6] montre que lorsqu'on a un redresseur chargé par un condensateur, la forme du courant devient déformée par rapport à la tension, est composée de pointes élevées et fines liées à la charge du condensateur.

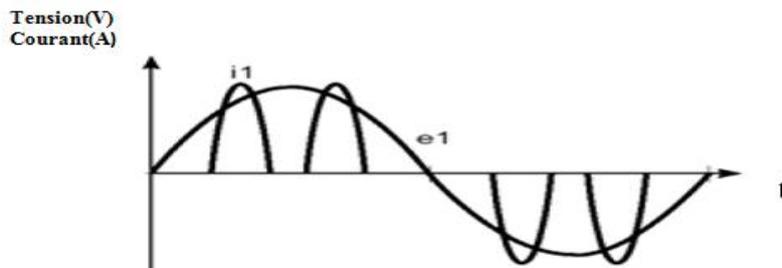


Figure 14: Allure du courant absorbé par le redresseur.

La figure 15 présente l'histogramme d'une charge non linéaire triphasée pour différents rangs d'harmoniques.

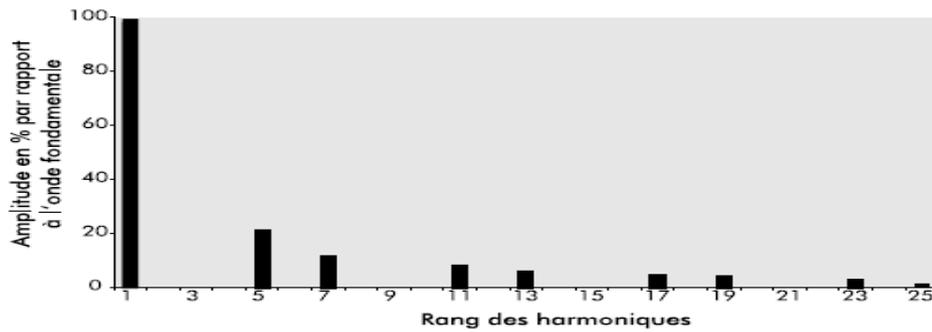


Figure 15: Histogramme des harmoniques pour un redresseur triphasé [5].

On constate que les rangs impairs multiples de 3 ne figurent pas sur l'histogramme alors que les autres rangs impairs (5, 7, 11, 13...) sont nuls et leur amplitude diminue avec l'augmentation du rang de l'harmonique.

4.3. Les charges non linéaires monophasées :

Les charges monophasées sont un cas particulier d'une charge triphasée, 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 [9].

Comme exemple d'une charge non linéaire monophasée, nous donnons sur la figure 16 l'exemple d'un redresseur d'alimentation à découpage comme l'ordinateur ou l'électroménager.

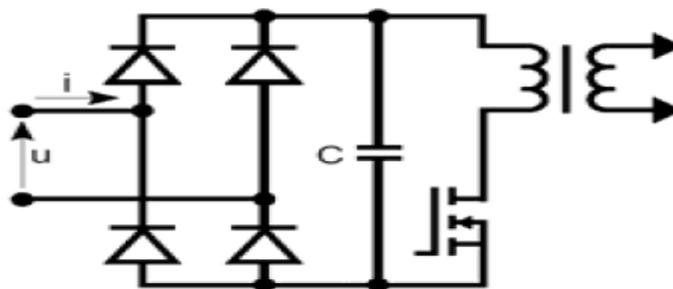


Figure 16: Schéma redresseur monophasé [6].

L'allure suivante (figure 17) montre la non linéarité de l'onde du courant due au condensateur, le courant n'est plus à l'image de la tension.

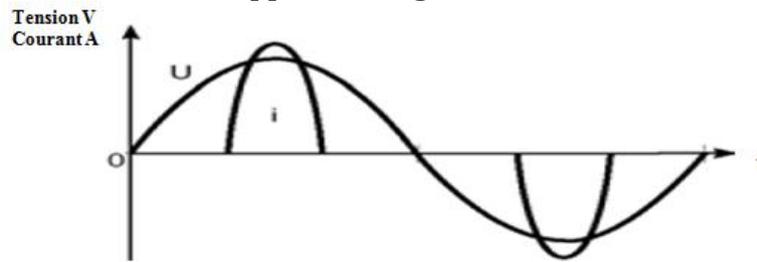


Figure 17: Allure du courant absorbé [6].

L'histogramme suivant montre que les charges très répandues de type redresseur monophasé à diodes sont les principaux générateur de l'harmonique de rang 3 et les multiples du rang 3 peut atteindre jusqu'à 85% de l'harmonique fondamentale.

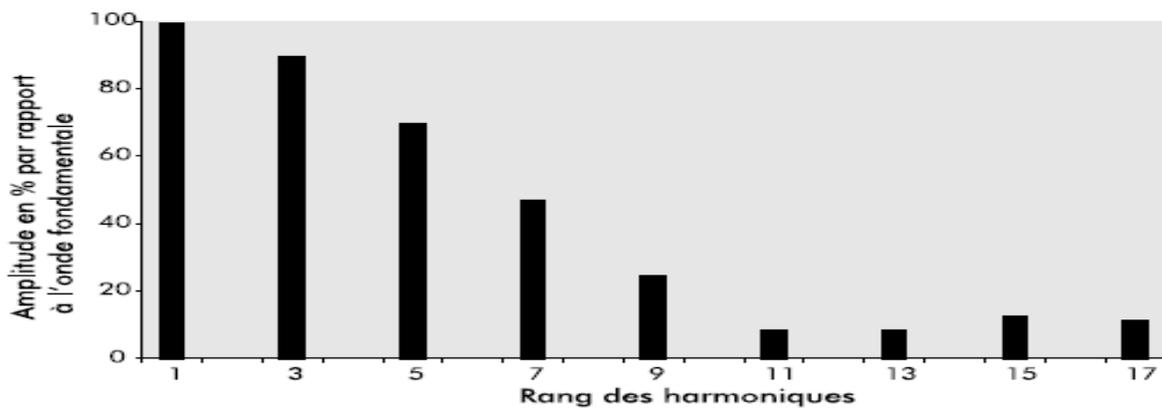


Figure 18: Spectre des harmoniques d'une charge monophasé (ordinateur) [5].

Le tableau ci-dessous donne des exemples des charges monophasées qui provoquent une distorsion du courant sinusoïdal normal et qui créent des harmoniques.

| 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 |

Tableau 1: Quelques exemples d'appareils comportant un redresseur monophasé.

5. Caractérisation d'une charge non linéaire :

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

$$v(t) = V \cdot \sin(\omega t) \quad (12)$$

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

$$i(t) = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \phi_n) \quad (13)$$

De valeur efficace [4]: $I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}$ (14)

De fondamental [4]: $i(t) = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi_1)$ (15)

5.1. Expressions de ses puissances par phase :

a. En absence d'Harmonique :

Entre les bornes d'une charge linéaire triphasée équilibrée alimentée par une tension entre phases U et un courant I, où le déphasage entre U et I est ϕ , les valeurs de puissance sont [2] :

- Puissance apparente : $S = UI$, en KVA ;
- Puissance active : $P = S \cos \phi$, en kW ;
- Puissance réactive : $Q = S \sin \phi$, en KVAR.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (16)$$

La figure montre que dans l'absence des harmoniques, la formule de la puissance apparente reste valable et le facteur de puissance est tout simplement $\cos \phi$.

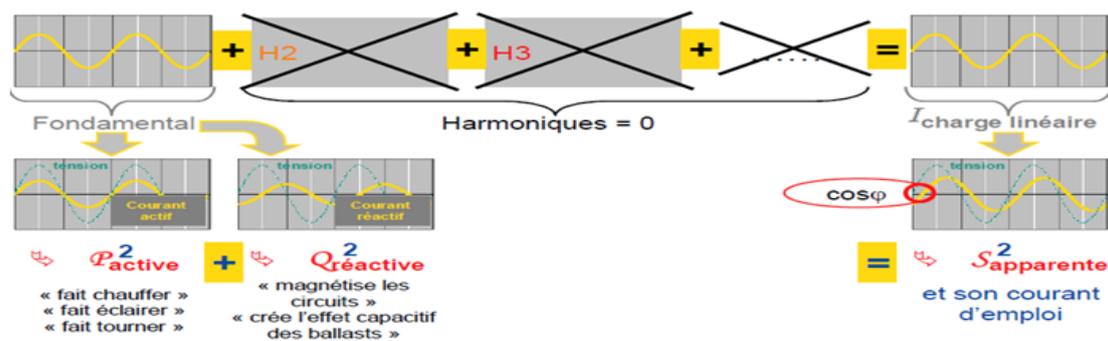


Figure 19: Puissance en absence d'harmonique [7].

b. En présence d'harmonique :

La déformation des signaux de courant et de tension à cause des harmoniques, engendre la consommation de puissance appelée puissance déformante [2], notée D et qu'on peut la calculer par la formule suivante :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (17)$$

D est s'exprime en VAD (voltampère déformant)

Sur la figure 20 nous donnons un exemple de distorsion en présence d'harmoniques de rang 4 et 5. Dans cet exemple on a ajouté 30 % de la quatrième harmonique H4 et 20% de la cinquième harmonique H5 ceci introduit dans l'expression du facteur de puissance une quantité $D_{\text{déformante}}$ appelée puissance déformante qui traduit les effets de la distorsion harmonique et qui a un impact négatif sur le fonctionnement du réseau.

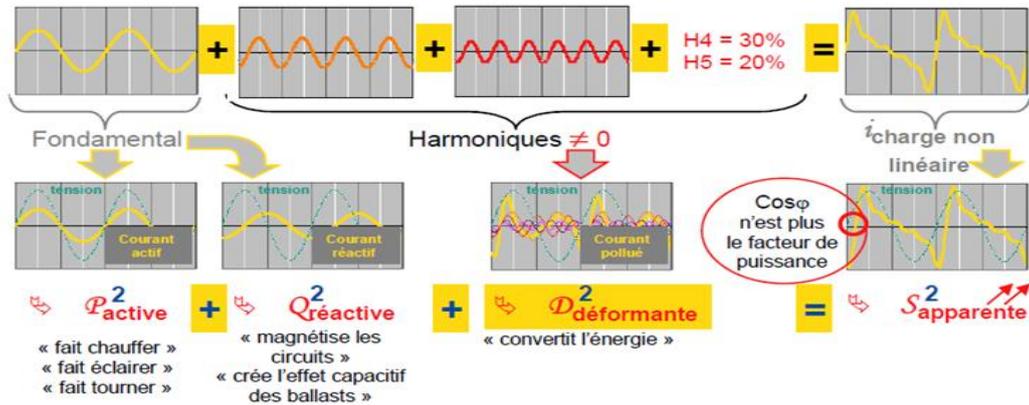


Figure 20: Puissance apparente en présence d'harmonique [7].

5.2. Les grandeurs utiles de la caractérisation :

5.2.1. Le taux de distorsion Harmonique :

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 [4].

Il est donné par l'expression :

$$THD = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (18)$$

5.2.2. Le facteur de puissance :

Dans un milieu non harmonique, le facteur de puissance est donné par:

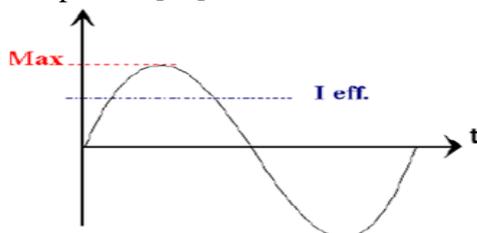
$$FP = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (19)$$

Dans un milieu harmonique, en présence de charges non linéaires, le $\cos \varphi$ n'est plus applicable, on parlera du Facteur de puissance FP, ce dernier est donné par la formule [11] :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} < \cos \varphi \quad (20)$$

5.2.3. 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 (charge linéaire), non déformé, ce dernier correspond à [11] :



$$FC = \frac{I_{max}}{I_{efficace}} = \sqrt{2} = 1,414 \quad (21)$$

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

Les différentes expressions de la puissance apparente S en fonction de D , FP et THD sont donnés par :

$$\text{La puissance déformante } D : D = \sqrt{S^2 - S_1^2} \longrightarrow D = S_1 THD \quad (22)$$

$$\text{La puissance apparente } S : S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \longrightarrow S = S_1 \sqrt{1 + (THD)^2} \quad (23)$$

$$\text{Le facteur de puissance } FP : FP = \frac{P}{S} \longrightarrow FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + (THD)^2}} \quad (24)$$

IV. Causes et conséquences des harmoniques :

1. Causes des harmoniques :

Les dispositifs électroniques de puissance (les convertisseurs) 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, 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 [4].

2. Effets 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.

2.1. Les effets instantanés :

Ils apparaissent immédiatement dans certains appareillages [3] :

a. Pertes énergétiques

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

Par exemple :

- ✓ Dégradation du facteur de puissance
- ✓ Réduction de la puissance des moteurs (couple négatif)
- ✓ Surcharges des câbles, transformateurs et moteurs
- ✓ Augmentation du bruit dans les moteurs
- ✓ Erreur d'enregistrement dans les compteurs

b. La perturbation des lignes à courant faible

Des perturbations surviennent lorsqu'une ligne à courants faibles, par exemple une ligne téléphonique, chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec des courants et des tensions déformés.

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 pulsatives, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes. Ils peuvent entraîner une destruction du matériel.

e. Dysfonctionnement des systèmes de protection et des relais :

Les dispositifs de protection et les relais utilisant les courants de charge peuvent être affectés par la présence d'harmoniques, dans la mesure où ceux-ci modifient la valeur instantanée de ces courants.

f. Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électrique :

Certains appareils de mesure comme des analyseurs, les oscilloscopes et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesures et des erreurs de lecteur supplémentaires en présence des harmoniques.

2.2. Les 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 [3]. Parmi ces effets, on trouve :

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 (voir la figure 21).

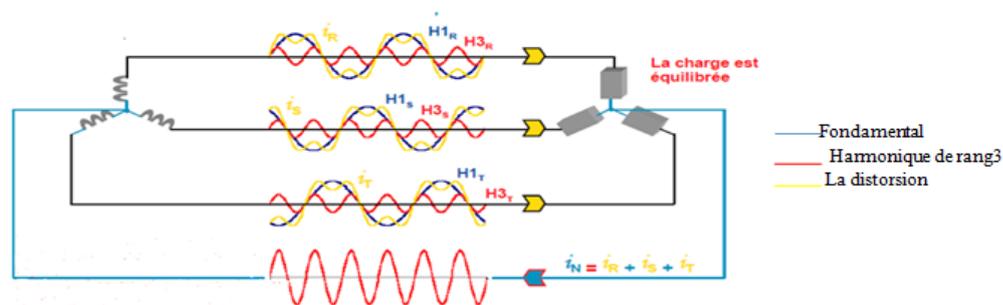


Figure 21: Addition des courants harmoniques de rang trois dans le neutre [7].

V. Les solutions Générales aux Harmoniques :

Il y a plusieurs méthodes pour limiter les effets harmoniques et réactifs d'un courant perturbé, parmi ces méthodes il y a le filtrage. Différents types de filtres ont été développés, on peut distinguer deux types de filtres [3]:

1. Filtres passifs :

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer, donc il se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. 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 existe deux classes de filtres passifs permettant de réduire les harmoniques:

a. Les filtres résonants :

Ils sont constitués par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur (figure 22).

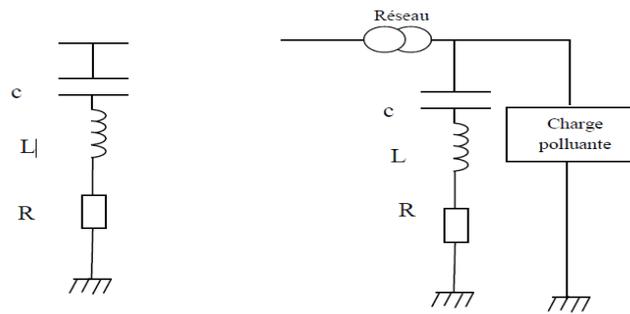


Figure 22: Structure du filtre résonant [3].

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieur et un filtre pour les harmonique d'ordre supérieur, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà du 11^{ème}.

L'emploi du filtre shunt résonant impose les précautions suivantes :

- S'assurer que la fréquence d'antirésonance est 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 sur le réseau peut entraîner un échauffement supplémentaire des condensateurs.

b. Les filtres amortis :

La figure (23) donne la structure d'un filtre amorti, ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de H=13).

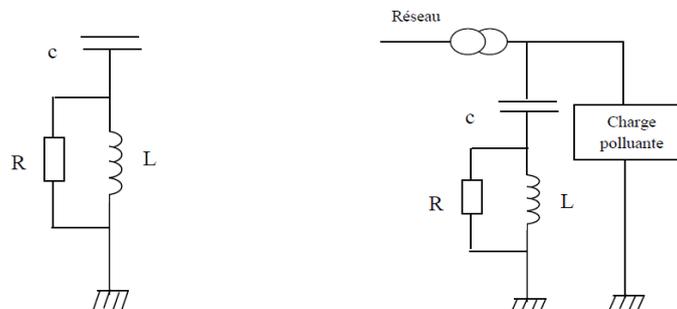


Figure 23: Structure du filtre amorti [3].

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.

Le filtre passif présente des inconvénients et quelques avantages comme il est illustré dans le tableau ci-dessous :

| Filtre passif | |
|---|--|
| Avantages | Inconvénients |
| <ul style="list-style-type: none"> • La plus simple. • La moins cher • son adaptation pour des réseaux de forte puissance. | <ul style="list-style-type: none"> • Elle est d'une efficacité moyenne. • Elle n'offre que très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité. • S'adaptent mal aux variations du réseau et de la charge. • Equipements volumineux. • Problèmes de résonance avec l'impédance de réseau. • Le filtrage passif est une solution lourde et non exempte de risque. • Lorsqu'il ya plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants. |

Tableau 2: Avantages et inconvénients de filtre passif.

2. Filtres actifs:

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, qui injectent en série ou en parallèle dans les réseaux des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations existantes.

Parmi les filtres actifs il y a: les filtres actifs parallèles, série et série-parallèle dont le rôle est donné dans la figure 24.

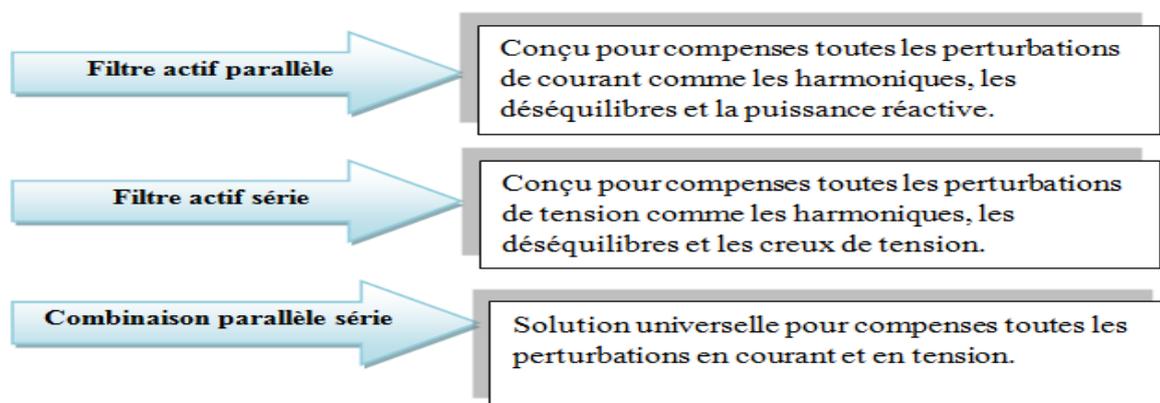


Figure 24: Différents types de filtre actif.

a. Le filtre actif parallèle (FAP) :

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution figure (26). Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension.

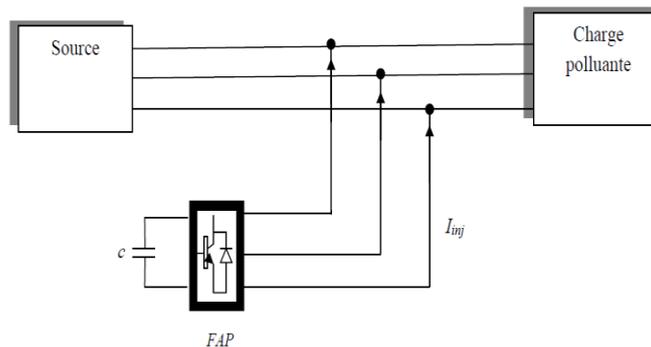


Figure 25: Montage d'un filtre actif parallèle [3].

b. Le filtre actif série (FAS):

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau le montré la figure (26). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

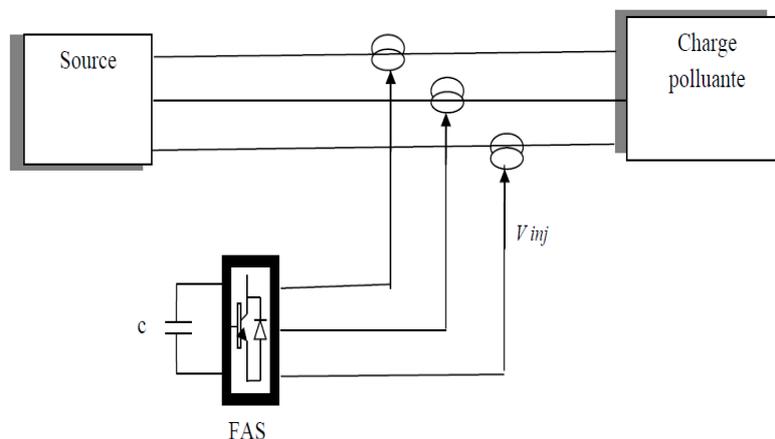


Figure 26: Montage d'un filtre actif en série [3].

c. Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (27). Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*.

Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré ci-dessous, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

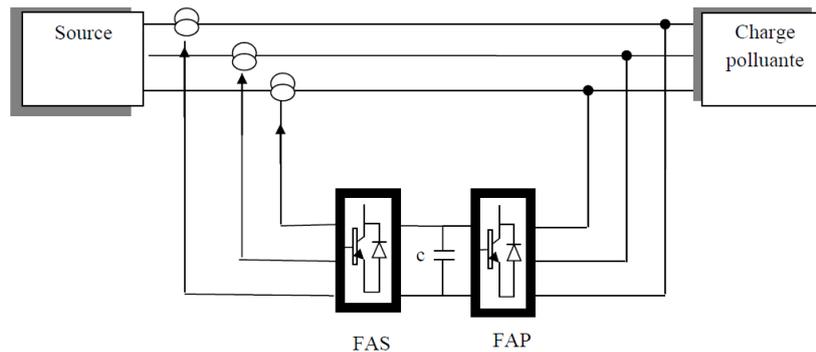


Figure 27: Combinaison parallèle-série actif (UPQC).

Le tableau ci-dessous présente les avantages et quelques inconvénients de filtre actif :

| Filtre actif | |
|---|---|
| Avantages | Inconvénients |
| <ul style="list-style-type: none"> ● 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 impédance du réseau, qui existe avec le filtre passif, est supprimé. ● Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants Harmoniques générés par une charge. | <ul style="list-style-type: none"> ● Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance. ● Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif. ● Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif. |

Tableau 3: Avantages et inconvénients de filtre actif.

3. Choix de filtre approprié à utiliser

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

L'installation où est placé le filtre doit présenter une stabilité suffisante, avec peu de fluctuations 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.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons parlé des harmoniques présents dans le réseau électrique qui proviennent de l'utilisation de charges non linéaires, nous avons donné une vision globale sur les harmoniques et sur la cause principale de ce phénomène et l'influence de ces différents types de charge non linéaires sur les secteurs industrielle, domestique et tertiaires.

Chapitre III :

Cas pratique dans la RADEEF

Dans ce chapitre, nous simulons quelques cas de distorsion sur EXEL. L'objectif principal est d'observer les signaux déformés obtenus dans les différentes situations pour essayer d'extraire une conclusion sur l'influence des harmoniques de différents rangs et la pollution harmonique produite sur le réseau de distribution.

Dans la première application nous observons la déformation et la dégradation du signal fondamental lors de son raccordement avec les différents rangs d'harmonique.

Dans la deuxième application nous étudions la relation entre le courant harmonique toléré et la parité des rangs d'harmoniques. Puis nous proposons des solutions pour éliminer les distorsions. Enfin nous donnons l'étude financière des solutions proposées et nous évaluons l'efficacité de ces solutions.

I. 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. Nous avons utilisé un analyseur de réseau avec l'équipe de la RADEEF afin de détecter ces harmoniques. Des analyses ont été menées au préalable par cette équipe afin de pouvoir cerner les problèmes de la qualité d'énergie. Une application EXCEL a été créée en collaboration avec les agents de la LYDEC pour simuler les harmoniques et leurs effets sur le fondamental afin de visualiser les signaux des tensions et des courants.

I.1. Première application :

La première simulation que nous avons faite pour tester sur l'Excel est composée d'une source de tension triphasée. La valeur de la tension efficace (entre phases) de la source de tension est de 220 V. Cette tension est sinusoïdale avec une fréquence de 50 Hz.

Le courant a été mesuré dans cette simulation en absence d'harmoniques c.à.d. qu'il y a une présence que d'harmonique du rang 1.

Le signal obtenu dans la figure 28 pour cette première simulation avec l'onde fondamentale a pour caractéristiques : la valeur du courant maximale est $I_{max} = 141.4 A$, la valeur du courant efficace est $I_{eff} = 100A$ et le taux de distorsion est nulle (THD= 0%) indiquant la non présence des harmoniques sur le réseau.

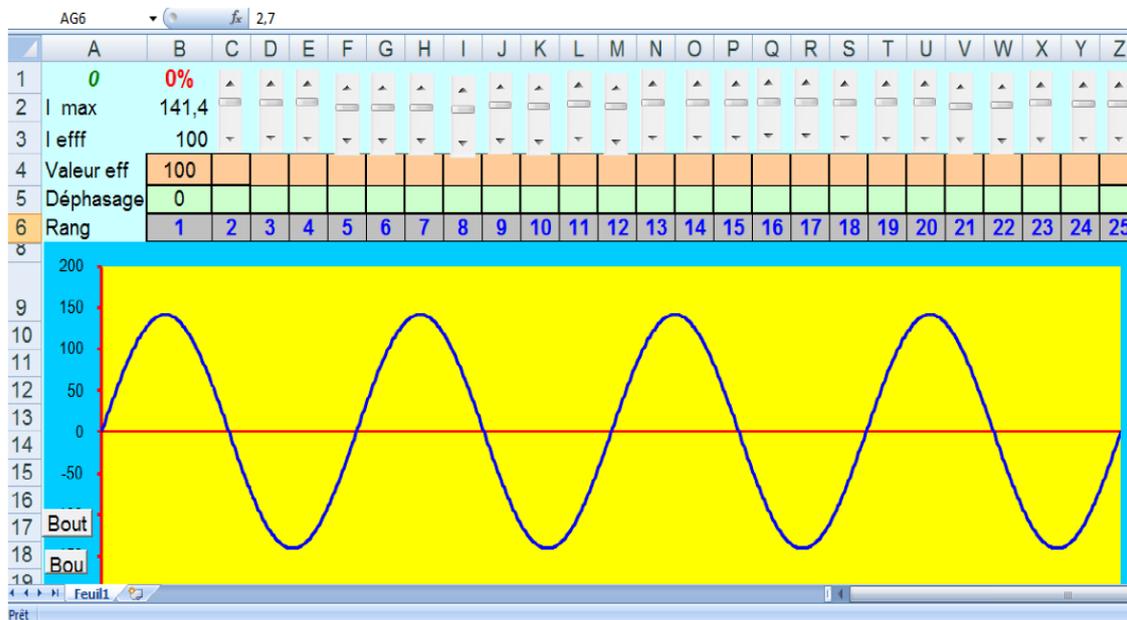


Figure 28: Onde fondamentale.

Le spectre de l'onde du fondamental est donné sur la figure ci-dessous, il montre une efficacité de 100%.

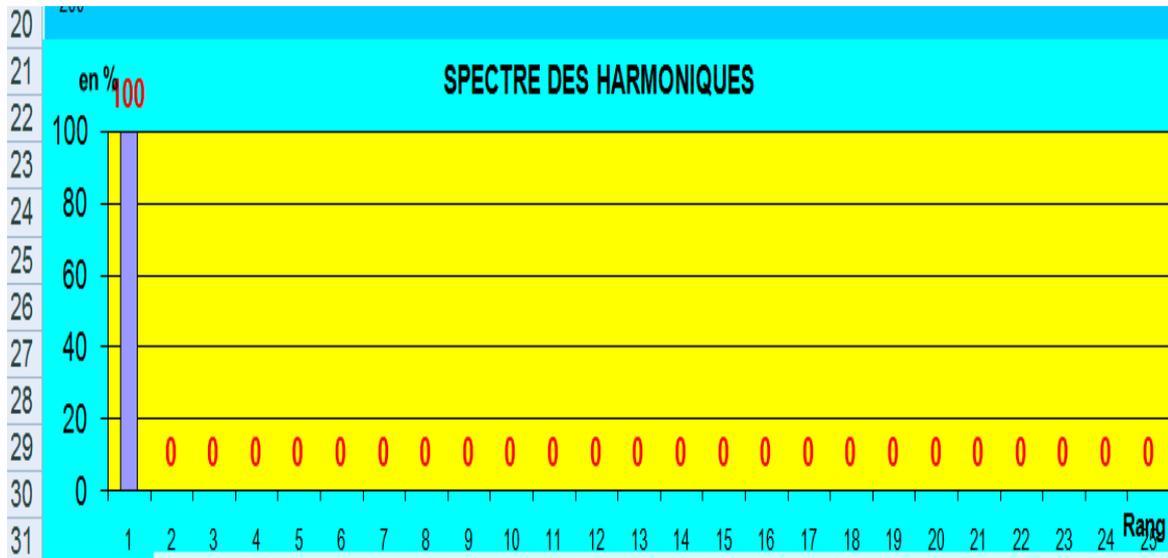


Figure 29: Spectre de rang 1.

Sur la figure 30 nous considérons les harmoniques des rangs 3, 7, 13 et 21. Les résultats obtenus sont reportés sur la figure 30, nous remarquons que ces rangs imposent un courant totalement déformé et perturbé et 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 observe également que les caractéristiques du fondamental sont élevées à : $I_{max} = 266A$, $I_{eff}=188A$ et un taux de distorsion augmente de 0% à un THD=116%

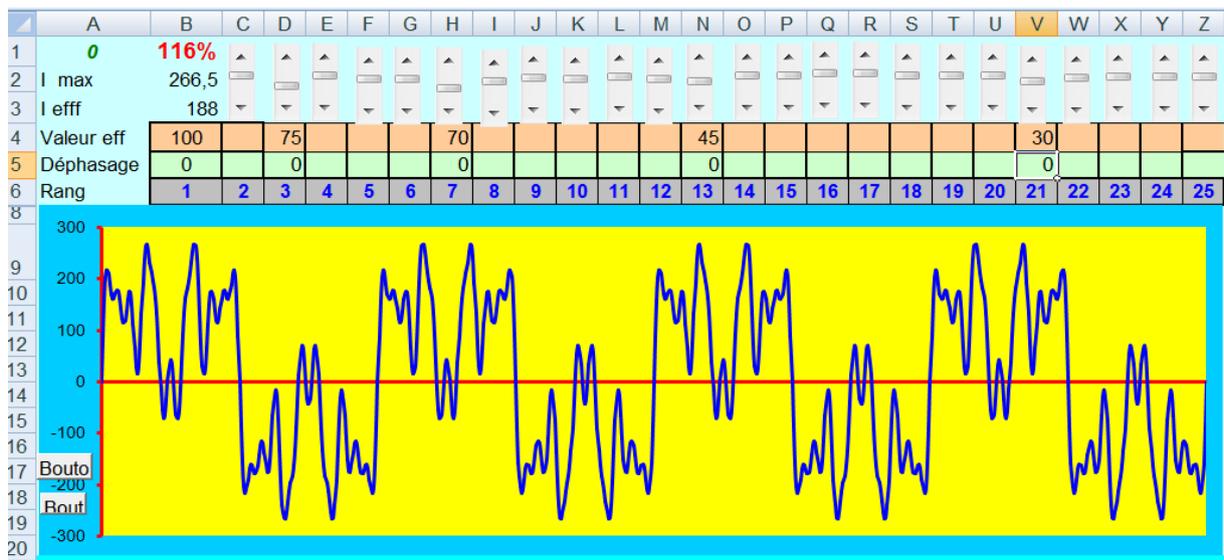


Figure 30: Onde des harmoniques des rangs 3, 7, 13,21.

La figure 31 représente les pourcentages de chaque rang par rapport au fondamental, on remarque que l'harmonique du rang 3 possède un THD de 75% et donc celui-ci cause des distorsions plus importantes que les autres harmoniques sur le réseau. C'est le plus difficile à combattre.

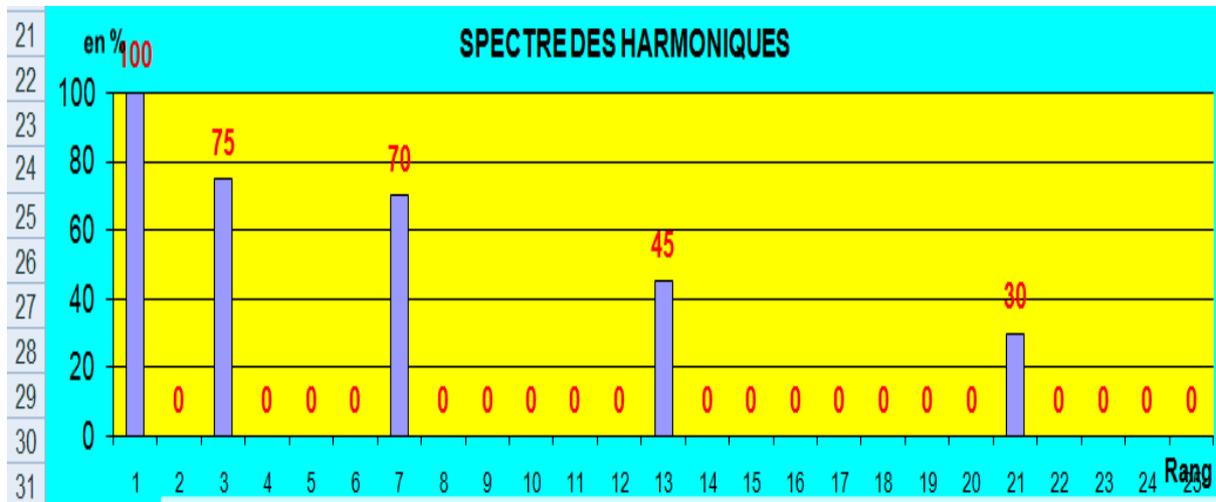


Figure 31: Spectre des harmoniques des rangs 1, 3, 7, 13,21.

On constate qu'avec la présence de ces courants harmoniques, on a une variation croissante du courant max de 141.4A à 266A, ainsi la valeur du courant efficace varie de 100A à 188A, donc une augmentation du taux de distorsion harmonique ce qui entraînera une 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 sur les appareils qui lui sont raccordés.

I.2.deuxième application :

La deuxième partie traite la variation des courants harmoniques tolérés d'un appareil en fonction des rangs et des indications fixées par le constructeur tels que la puissance souscrite et la tension contractuelle (figure 32).

| COURANT HARMONIQUE TOLERE | | |
|--|---|--------------|
| A | B | C |
| 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 32 : Courant harmonique toléré de rang 6

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).

Si le consommateur dépasse la valeur du courant harmonique toléré, alors le surplus lui est facturé ce qui augmentera le montant de la facture.

La figure 32 montre que lorsqu'on applique un rang pair sur le réseau, la valeur du courant toléré est presque négligeable. On trouve 7.22A et cette valeur reste presque constante pour tous ces rangs.

La figure 33 nous montre que lorsque nous avons appliqué sur le réseau un rang impair, le rang 3 par exemple, on a constaté une augmentation de la valeur du courant d'harmonique toléré et cela confirme que ce type de rang influence négativement sur les composantes du réseau ce qui peut entraîner des échauffements et donc un mal fonctionnement du réseau.

| LES TOLERANCES SUIVANTES SONT DONC COMMUNIQUEES A TITRE INDICATIF PAR LES DISTRIBUTEURS | | | |
|---|---|--------------|--|
| PUISSANCE SOUSCRITE | 1000 | KVA | |
| TENSION CONTRACTUELLE | 400 | Volts | |
| RANG DU COURANT HARMONIQUE | 3 | | |
| COURANT HARMONIQUE TOLERE | 57,74 | A | |
| PS>100 KVA | $I_{hn} = k_n \frac{P_{Souscrite}}{\sqrt{3} * U_c}$ | | |

Figure 32: Courant harmonique toléré de rang 3.

II. Solutions proposées :

Après l'étude pratique qui nous a permis de constater l'existence de ces rangs d'harmoniques capables 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 pour lutter contre ce fléau et qui corrigent la phase du courant fondamental, convertissant ainsi les charges non linéaires en charges linéaires.

Pour pouvoir respecter les niveaux de comptabilité harmoniques, il est nécessaire de limiter les émissions des équipements ou des installations raccordées aux réseaux publics comportent une annexe relative à la qualité de fourniture. (Voir annexe)

Parmi ces filtres, il y a :

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

-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 tableau suivant présente quelques critères concernant chaque filtre (son rôle, tension de secteur, gamme de puissance, niveau de protection) pour avoir une idée sur chaque filtre et qui donne au distributeur la possibilité de choisir le plus convenable pour son installation.

| Type de filtre | Le Rôle | Tension secteur | Gamme de puissance | Niveau de protection |
|---------------------------|--|--|--|----------------------|
| Actif BIUEWAVE | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 380-480V AC 50-60 Hz ▪ 500-690V AC 50-60 Hz | 190 A, 250 A, 310 A ,400A . Jusqu'à 4 unités peuvent être installées en parallèle pour les variateurs forts puissances. | IP 00, IP 21, IP 5 |
| Passif NF-HPHF | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Sécuriser les environnements sensibles. ▪ Les réseaux déficients. ▪ Réduire les distorsions harmoniques réseau. ▪ Les variateurs isolés du réseau. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ 500-690V AC 50-60 Hz | 250 KW-1 ,4 MW | IP 21, IP 54 |

Tableau 4: Principales caractéristiques de filtre passif et actif.

III. Etude financière :

Les coûts des pertes par effet d'harmonique sont celles de 2014. Vu la période du projet et le manque de données concernant 2015, nous estimons que 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 prévoir 700 filtres.

Dans le tableau 5 nous donnons les coûts de ces deux types de filtre, ainsi il nous estime le temps de retour de l'investissement.

| Type de filtre | Coût de Filtre DH | coût d'installation des filtres dans 700 postes /DH | Coût d'énergie perdue/DH | Le ratio Bénéfice /coût RBC % | Temps de retour |
|----------------|-------------------|---|--------------------------|--|--|
| Actif Bluewave | 30000,00 | 21 000 000,00 | 1 860 000,00 | $\frac{1860000}{21000000} * 100 = 8,86\%$ | $\frac{100}{8,86} = 11,32$ 11ans et 3mois |
| Passif NF-HPHF | 20 000,00 | 14 000 000,00 | 1 860 000,00 | $\frac{1860000}{14000000} * 100 = 13,30\%$ | $\frac{100}{13,30} = 7,518$ 7ans et 6mois |

Tableau 5: Etude financière des filtres actif et passif.

Sur le tableau 6, nous donnons quelques éléments de comparaison entre le filtrage passif et le filtrage actif, en apportant notre point de vue personnel sur le choix du filtre adéquat en se basant sur cette comparaison.

| Critère | Filtre actif | Filtre passif |
|--|--|--|
| Interaction entre filtres voisins | Pas de risque | Risque de destruction de filtres accordés à des fréquences voisins |
| Rangs Harmoniques compensés | Tous les rangs harmoniques dans sa bande passante | En général, un filtre passif par rang harmonique à compenser |
| Surcharge | Pas de risque | Risque de détérioration lorsque le courant harmonique à compenser dépasse son dimensionnement |
| Modification du réseau (variation d'impédance) | Pas d'influence sur les performances | Risque d'amplification des harmoniques (déplacement de fréquence d'anti résonance vers une fréquence harmonique) |
| Vieillessement | Pas d'influence | Risque de dégradation des performances (dérive de la fréquence d'accord) |
| Raccordement | Étude préalable simplifiée | Étude au cas par cas parfois complexe |
| Surveillance de fonctionnement | Réalisée par le système de contrôle - commande | Pas de surveillance particulière |
| Coût | Coût du filtre plus élevé faible coût d'étude de dimensionnement | Coût du filtre plus faible coût : Étude de dimensionnement parfois complexe obligatoire |

Tableau 6: Eléments de comparaison entre les deux filtrages.

De point de vue technique un filtre actif remplit bien l'objectif de sa conception, sa fiabilité et sa compensation de tous les rangs harmoniques de sa bande passante.

Un filtre passif certes moins cher, mais vu que le réseau subit des modifications de temps à autre à cause de l'extension et des besoins d'exploitation (surcharge, variation d'impédance...etc.) ce qui a des effets sur sa fiabilité et son bon fonctionnement et demande alors des charges supplémentaires de maintenance (changement ou ajout des filtres détériorés...etc.). Pour toutes ses raisons, la RADEEF opte pour un filtre actif.

Conclusion:

L'étude pratique présentée dans ce chapitre nous a permis de relever que la circulation des courants harmoniques dans le réseau entraîne une déformation de l'onde de tension. De nombreuses solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles et le réseau vis-à-vis de la pollution harmonique. On a pris comme solution le filtrage (actif et passif) en précisant le rôle de chacun ainsi que les coûts et le temps de retour des dépenses de chaque filtre.

Conclusion Générale

Pratiquement, tous les équipements électriques et électroniques modernes possèdent un système de contrôle de puissance. Il en résulte une charge non linéaire. 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.

Nous pensons que les cours de traitement du signal qui nous ont été enseignés en S5 ont eu une importance capitale au bon déroulement du stage. En effet sans ces notions de base, nous aurions sûrement été déboussolées et nous n'aurions pas pu découvrir l'intérêt de la théorie pour mener à bien l'étude pratique. Nos compétences en mathématique nous ont également été très utiles car nous avons utilisé la décomposition en série de Fourier pour introduire les harmoniques.

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.

Annexe

Les 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.
- **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.

Bibliographie & Webographie

- [1]- HABI IDIR, PFE Licence 'Compensation active des perturbations dans un réseau basse tension', 2004.
- [2]- Élimination des harmoniques dans les installations, édition 01/2012, APC by Schneider Electric.
<http://www.apcmedia.com/salestools/LARD>
- [3]-Principes de Compensation des harmoniques, cours électronique de puissance avancée (année 2008)
http://elearning.univ-eloued.dz/courses/EPA02/document/Cours_Master2_ChapitreII.pdf
- [4]- EL MOKHTARI MOHAMED, PFE 'Etude des harmoniques générées dans le réseau électrique' Juin 2014.
- [5]- Harmoniques causes et effets, David Chapman Juillet 2002
<http://fr.leonardo-energy.org>.
- [6]- Origines des harmoniques
http://sitelec.org/download_page.php
- [7]- Le courant harmonique version 06/2003
<http://www-zope.ac-strasbourg.fr/sections/enseignements/secondaire/pedagogie>
- [8]- La pollution Harmonique problème et solution année Mai 2010
http://conference.reme.info/fileadmin/user_files/
- [9]- Les singularités de l'harmonique 3, Cahier technique n° 202 Jacques SCHONEK édition septembre 2000.
<http://www2.schneider-electric.com/documents/technical-publications/>
- [10]- Les circuits à courant alternatif : impédance, puissance, facteur de qualité et largeur de bande.
<http://www.iihe.ac.be/~cvdvelde/Info/Cours>
- [11]- Hédi Besrou, Présentation sur les harmoniques et leurs effets, mars2007
<http://www.issatso.rnu.tn/telecharger/cours>

