

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU  
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



# *Mémoire de fin d'études*

*En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique.  
Option : Réseaux Electriques*

## THÈME

*Diagnostic d'un réseau électrique industriel en  
termes de perturbations harmoniques :  
Application à l'ENIEM*

*Proposé et dirigé par :  
Mr : RABAHALLAH*

*Réalisé par :  
Mr : TAHIR MOHAND AKLI  
Mr : ZALOUK SOUFIANE  
Mr: ZERMANI TOUFIK*

*Promotion 2011*

# ***Remerciements***

*Nous tenons à remercier M<sup>r</sup> RABAHALLAH qui nous a suivi et aidé tout au long de ce travail.*

*Par ailleurs, nous remercions M<sup>r</sup> FEDDI et toute l'équipes de l'unité de maintenance (ENIEM) pour leurs aides a fin de réaliser ce travail.*

*Notre profonde gratitude va également aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Nous tenons enfin à remercier les enseignants qui ont contribué à notre formation.*



## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail, avant tout, à mes chers parents qui ne cessent pas de m'encourager durant toutes mes études.*

*À mon cher frère «Rafik».*

*À mes chères sœurs «Hayet, Assia et Ouardia ».*

*À ma très chère fiancée «Nacera».*

*À tous mes amis.*

*À toute ma famille.*

*À tous ceux qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire.*

*Zermani Toufik*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma source de bonheur :*

*A mon père, ma mère pour leur amour, leur bonté, leur sacrifice, leurs encouragements perpétuels, leur soutien, puisse Dieu prolonger leur vie dans le bonheur.*

*A na hdjila*

*A ma grande mère*

*A ma sœur Kahina*

*A ma sœur Nadia son mari Ahcène, leurs deux fils Massil et Rayane*

*A mes frères Akli et Djamel*

*A ma très chère fiancée Safia*

*A mes tentes et oncles*

*A mes cousins et mes cousines*

*A mes voisins en particulier Arezki, Idir et Nonos*

*A tous mes collègues et amis : Ahcène, Karim, Hakim, Youcef ,Idir....*

*Aux mémoires : de mes grands pères Ahcène, Mohamed et ma grande mère Tassadit*

*A tous ceux que j'aime*

*ZALOUK Sofiane dit Merzouk*

# *Dédicaces*

*En toute modestie, je dédie ce travail a:*

*Mes chers parents*

*Mes frères : AMAR et SAID*

*Mes sœurs : SADIA, DAHBIA, OUIZA, GHANIA  
et FARIDA*

*Mes amis : ABDERRAHMANE, KAHINA, FAZIA,  
ZOHRA, SABRINA, FARIDA, KARIMA et YACINE.*

*Tahir mohand akli*

## **Significations des blocs**

- TR nord (les stocks, les aciers et l'éclairage extérieur).
- BTC1 TR3 (montages des machines, unité commerciale, banque, magasin).
- BT 4S TR6 TR7 (injection plastique et chaufferie vapeur).
- BT2B5 TR4 TR5 (maillages, les presses, atelier climatiseur et montage puissant).
- BT 4C TR5 prim (zinc, chrome et mousse).
- BT EF1 TR8 (imprimerie et atelier des engins).
- BT 2A TR6 TR7 (montage frigo et peinture).
- BT D TR8 (restaurant et atelier central).
- BT 2B2 TR2 TR3 (soudeuse de condenseurs).
- BT1 TR1 (montage final).
- Bloc B TR7 (reserve).
- BT 2F TR4 TR5 (bloc administratif).

# **SOMMAIRE**

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| <b>Introduction générale.....</b> | <b>1</b> |
|-----------------------------------|----------|

## **Chapitre I : Généralités sur les harmoniques**

|                                                                         |   |
|-------------------------------------------------------------------------|---|
| I. introduction .....                                                   | 2 |
| I.1 les réseaux électriques.....                                        | 2 |
| I.1.1grandeurs électriques .....                                        | 2 |
| I.1.2disposition spatial.....                                           | 3 |
| I.1.3données temporelles. ....                                          | 3 |
| I.2 qualité d'énergie électrique dans un réseau électrique.....         | 3 |
| I.3 objectifs de la mesure de la qualité d'énergie.....                 | 4 |
| I.3.1 application contractuelle.....                                    | 4 |
| I.3.2.maintenance corrective.. ....                                     | 5 |
| I3.3. optimisation du fonctionnement des installations électrique ..... | 5 |
| I.3.4.enquêtes statistiques.....                                        | 5 |
| I.4.qualité de la tension.....                                          | 6 |
| I.4.1.amplitude.....                                                    | 6 |
| I.4.2.fréquence.....                                                    | 7 |
| I.4.3. forme d'onde.....                                                | 7 |
| I.4.4.symétrie.....                                                     | 7 |
| I.5. qualité du courant.....                                            | 7 |
| I.6.définition des harmoniques.....                                     | 8 |
| I.6.1 harmonique de courant ou de tension.....                          | 8 |
| I.6.1.1.courant harmonique.....                                         | 8 |
| I.6.1.2.tension harmonique.....                                         | 9 |
| I.6.1.3.impédance harmonique.....                                       | 9 |
| I.6.2.inter harmonique.....                                             | 9 |
| I.6.3.infra harmonique.....                                             | 9 |

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| I.7.grandeurs caractéristiques d'un signal déformé .....                | 10 |
| I.7.1.décomposition d'un signal en série de Fourier.....                | 10 |
| I.8.analyse d'un signal.....                                            | 11 |
| I.8.1.valeur efficace.....                                              | 11 |
| I.8.2.rang harmonique.....                                              | 12 |
| I.8.3.représentation spectacle.....                                     | 12 |
| I.8.4.facteur de crête.....                                             | 13 |
| I.8.5.taux de distorsion harmonique (TDH) ou facteur de distorsion..... | 13 |
| I.8.6.taux de distorsion pondéré.....                                   | 14 |
| I.8.7.expression des puissances.....                                    | 15 |
| I.8.8.facteur de puissance et facteur de déphasage... ..                | 16 |
| I.8.9.notion de phase.....                                              | 16 |
| I.9.générateurs de grandeurs harmoniques.....                           | 18 |
| I.9.1.générateurs de tensions harmoniques.....                          | 18 |
| I.9.1.1.les machines synchrones.....                                    | 18 |
| I.9.1.2.les machines asynchrones.....                                   | 18 |
| I.9.1.3.les transformateurs de puissance.....                           | 18 |
| I.9.2.générateurs de courants harmoniques.....                          | 19 |
| I.9.2.1.les transformateurs d'intensité.....                            | 19 |
| I.9.2.2.les arcs électriques.....                                       | 19 |
| I.9.2.3.les convertisseurs statiques de forte puissance.....            | 19 |
| I.9.2.4.les régulateurs a thyristors.....                               | 20 |
| I.9.2.5.les charges électrodomestiques.....                             | 20 |
| I.10.Effets des perturbations harmoniques .....                         | 20 |
| I.10.1. effets instantanés.....                                         | 20 |
| I.10.2.effets a termes.....                                             | 21 |
| I.10.3.les effets différés (ou effets à long termes).....               | 21 |
| I.11.les variations d'amplitude.....                                    | 21 |
| I.11.1.creux de tension.....                                            | 21 |
| I.11.2.coupures brèves.....                                             | 22 |
| I.11.3.Les surtensions.....                                             | 22 |
| I.11.3.1.les surtensions temporaires.....                               | 22 |
| I.11.3.2.les surtensions de manœuvres.....                              | 23 |
| I.11.3.3.les surtensions atmosphériques.....                            | 23 |

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| I.12. effets de la variation d'amplitude.....                    | 23 |
| I.12.1. effets de creux de tension et des coupures brèves.....   | 23 |
| I.12.2. les conséquences d'une surtension.....                   | 24 |
| I.13. la dissymétrie des systèmes triphasés (déséquilibres)..... | 24 |
| I.14. fluctuation lente de la tension (flicker).....             | 25 |
| I.15 Conclusion.....                                             | 26 |

## Chapitre II : les singularités de l'harmonique 3

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                                                    | 27 |
| II.1. charge non-linéaire non symétrie.....                                          | 27 |
| II.2. charge triphasées.....                                                         | 28 |
| II.3. charge monophasées.....                                                        | 30 |
| II.4. surcharge du conducteur de neutre.....                                         | 31 |
| II.4.1. harmonique de rangs 3 et multiples de 3.....                                 | 31 |
| II.4.2. allure du courant dans le neutre.....                                        | 33 |
| II.4.3. calcul de la valeur efficace du courant de neutre.....                       | 35 |
| II.5. surcharge du conducteur de neutre en fonction de la distorsion de courant..... | 37 |
| II.5.1. charge équilibrées.....                                                      | 38 |
| II.5.2. charges déséquilibrées.....                                                  | 38 |
| II.6. les remèdes.....                                                               | 42 |
| II.6.1. adaptations de l'installation.....                                           | 42 |
| II.6.2. transformateur triangle-étoile.....                                          | 42 |
| II.6.3. transformateur à secondaire en zigzag.....                                   | 42 |
| II.6.4 réactance a couplage zigzag.....                                              | 43 |
| II.6.5. filtre de rang 3 dans le neutre.....                                         | 44 |
| II.7. dispositifs de filtrage.....                                                   | 46 |
| II.8. Conclusion.....                                                                | 47 |

## Chapitre III : partie expérimentale

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| Introduction .....                      | 48 |
| III.1. Description d'ENIEM.....         | 48 |
| III.2. Matériel de la mesure.....       | 49 |
| III.3. Présentation de la soudeuse..... | 49 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| III.4. Textes et normes de référence.....                 | 50 |
| III.5.Le contrat Émeraude.....                            | 51 |
| III.6. partie expérimentale et analyse des résultats..... | 52 |
| III.7. conclusion.....                                    | 85 |

## Chapitre IV : Effets et remèdes

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction.....                                                | 86 |
| IV.1. Effets des harmoniques sur le réseau électrique.....       | 86 |
| IV.1.1. Protections électriques.....                             | 86 |
| IV.1.1.1. Relais de protection.....                              | 86 |
| IV.1.1.2. Les protections différentielles.....                   | 86 |
| IV.1.1.3. Disjoncteurs magnétothermiques.....                    | 86 |
| IV.1.1.4. Fusibles.....                                          | 87 |
| IV.1.2. Compteurs électriques.....                               | 87 |
| IV.1.3. Câbles.....                                              | 88 |
| IV.1.3.1. Augmentation des pertes Joule.....                     | 88 |
| IV.1.3.2. Influence sur la durée de vie.....                     | 88 |
| IV.1.3.3. Cas particulier du conducteur de neutre .....          | 88 |
| IV.1.4. Transformateurs.....                                     | 89 |
| IV.1.4.1. Influence sur les pertes du transformateur .....       | 89 |
| IV.1.4.2. Augmentation de la température de fonctionnement ..... | 89 |
| IV.1.4.3. Réduction de la durée de vie .....                     | 90 |
| IV.1.5. Moteurs à induction.....                                 | 90 |
| IV.1.5.1. Perturbations mécaniques .....                         | 90 |
| IV.1.5.1. Perturbations mécaniques.....                          | 91 |
| IV.1.5.3. Augmentation de la température de fonctionnement.....  | 91 |
| IV.1.5.2.4. Réduction de la durée de vie .....                   | 91 |
| IV.2. Les remèdes .....                                          | 92 |
| IV.2.1. Solutions classiques .....                               | 92 |
| IV.2.2. Inductance anti-harmonique.....                          | 92 |
| IV.2.3. Transformateur à couplage spécial.....                   | 92 |
| IV.2.4. Équilibrage des charges non-linéaires.....               | 92 |

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| IV.2.5.Raccordement de l'appareillage à un point de faible impédance .....         | 92         |
| IV.1.5. Filtrage passif .....                                                      | 93         |
| IV.2. Les solutions modernes.....                                                  | 96         |
| IV.2.1. Les filtres actifs .....                                                   | 96         |
| IV.2.1.1. Les filtres actifs parallèles (compensation de courant harmonique) ..... | 96         |
| IV.2.1.2. Les filtres actifs séries (compensation de tension harmonique).....      | 97         |
| IV.2.2. Les filtrages hybrides (mixtes).....                                       | 98         |
| IV.2.2.1. Filtre actif série avec filtre passif parallèle .....                    | 98         |
| IV.2.2.2. Filtre actif et filtre passif en parallèle avec la charge.....           | 99         |
| IV.3. Les convertisseurs propres.....                                              | 100        |
| IV.3.1.Convertisseur source de tension.....                                        | 100        |
| IV.3.2. Convertisseur source de courant .....                                      | 100        |
| Conclusion.....                                                                    | 101        |
| <b>Conclusion générale.....</b>                                                    | <b>102</b> |

# Introduction générale

Depuis des années, les problèmes liés à la qualité d'énergie électrique ne concernent plus uniquement quelques spécialistes mais un très large public. Les entreprises dépendent de plus en plus de l'énergie électrique pour l'alimentation des charges critiques. De plus, l'accroissement du nombre d'équipements à control d'électronique de puissance provoque une augmentation de la distorsion harmonique dans les réseaux.

Une grande partie des charges industrielles, commerciales et domestiques sont à présent non linéaires et le niveau de distorsion dans les réseaux électriques est devenu un problème important. Les problèmes liés à un excès de tensions harmoniques au niveau de l'alimentation sont connus depuis longtemps et des normes ainsi que des procédures existent pour en limiter les effets. Il faut noter que les problèmes qui apparaissent chez les consommateurs d'énergie électrique sont presque toujours dus à leur propre installation et rarement importés du réseau.

Les équipements industriels et domestiques utilisent de plus en plus de circuits électroniques ayant un comportement non-linéaire. En effet, Ils engendrent, dans les réseaux de distribution, des courants non-sinusoïdaux provoquant des effets nocifs. Notre travail consiste à faire un diagnostic en perturbations harmoniques générées par un réseau électrique industriel (entreprise ENIEM).

Afin de mettre en évidence ce principe, ce travail a été structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré aux généralités et définitions des perturbations harmoniques, leurs origines et leurs effets sur les différents équipements dans un réseau électrique.

Dans le second chapitre de ce mémoire, nous traiterons les singularités de l'harmonique 3.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons notre partie expérimentale.

Dans le dernier chapitre, nous détaillerons les effets des harmoniques sur un réseau électrique, ensuite nous présenterons les différentes solutions pour minimiser ces perturbations harmoniques.

# Chapitre I

## Généralités sur les harmoniques

## I. Introduction

La tension fournie par les exploitants de réseaux électriques à leurs clients doit être sinusoïdale, triphasée et équilibrée. Toutefois, à cause de multiples perturbations d'origines diverses (imperfections des générateurs et des lignes, perturbations atmosphériques lors du transport, charges défaillantes.....), la tension dont dispose un client à son point de raccordement est plus ou moins dégradée. Ce chapitre est consacré exclusivement aux problèmes rencontrés dans un réseau électrique où nous essayons de présenter les principales causes et effets des perturbations sur un réseau et sur les matériels connectés sur ce dernier.

### I.1.Les réseaux électriques [1]

L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée, donc, en permanence, la production doit s'adapter à la consommation.

De ce fait, l'ensemble production-acheminement-utilisation constitue un système complexe appelé réseau électrique qui doit être stable.

Un réseau électrique peut être de petite puissance ou très puissant (à l'échelle d'un pays).

Dans tous les cas, ses caractéristiques s'expriment en termes de :

- Ø Grandeurs électriques
- Ø Disposition spatiale
- Ø Données temporelles

#### I.1.1.Grandeurs électriques

ü La fréquence : 50 ou 60 Hz selon les pays.

ü La tension : de quelques centaines de volts à quelques centaines de KV, selon qu'il s'agit de telle ou telle partie du réseau.

Ces grandeurs de base sont influencées par l'intensité du courant qui circule dans les lignes et les câbles, laquelle est liée aux puissances actives et réactives générées, transportées et consommées.

ü La puissance active est produite par les alternateurs à partir d'énergie thermique ou mécanique, et consommée également sous forme thermique ou mécanique par les récepteurs.

ü La puissance réactive est produite ou consommée dans tous les éléments du réseau.

Il faut noter qu'en régime dynamique, l'énergie active est <stockée> par les machines tournantes (inertie), et que l'énergie réactive l'est également, sous forme magnétique (ex : transformateurs ou machines tournantes), ou capacitive (ex : câble)

## **I.1.2.Disposition spatiale**

La structure topologique est à l'échelle :

- ü Des continents
- ü Des pays, des régions
- ü Des sites industriels (centaines de mètres à dizaines de kilomètres)
- ü Des bâtiments du tertiaire.

Dans les deux premiers cas il y a trois niveaux dans l'acheminement d'énergie :

- ü Le transport
- ü La répartition
- ü La distribution

## **I.1.3.Données temporelles**

Les variations de l'équilibre entre l'offre et la demande énergétiques entraînent des perturbations des grandeurs électriques que sont la fréquence et la tension que l'on doit maintenir dans des fourchettes acceptables.

## **I.2. Qualité de l'énergie dans un réseau électrique [1]**

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre, toujours disponible, l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle.

Ces dispositifs, sensibles, mais, qui dégradent également la qualité de la tension, existent dans toutes les catégories d'utilisateurs :

- ü Dans le domaine industriel, par l'emploi de constituants d'électronique de puissance.
- ü Dans le domaine tertiaire, avec le développement de l'informatique.
- ü Dans le domaine domestique, par l'utilisation, en grand nombre, de téléviseurs, magnétoscopes et lampes à économie d'énergie.

L'ouverture du marché de l'énergie électrique, la nécessité de garantir les productions pour les entreprises, font de la qualité de l'énergie électrique un enjeu majeur pour les compagnies d'électricité et pour les fabricants d'équipements.

La notion de qualité du produit <électricité> est attachée au niveau de satisfaction de l'utilisateur. Les performances de ses équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation. Par exemple, une variation de 10% de l'amplitude de la tension se traduira par une perte de couple de 19% pour une machine asynchrone.

Les équipements d'un utilisateur peuvent engendrer des perturbations sur le réseau, susceptibles de gêner les autres utilisateurs. Le distributeur (système d'alimentation) et l'utilisateur (installations) sont, l'un et l'autre, concernés par la qualité de l'électricité.

Les critères de la qualité de l'électricité sont directement issus de l'observation des perturbations électromagnétiques des réseaux électriques.

On parle de compatibilité électromagnétique (C.E.M) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique, sans produire, lui-même, des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs.

La CEM classe ces perturbations selon deux groupes :

- Basses fréquences (< 9 kHz)

- Hautes fréquences (>9 kHz).

D'autre part, ces phénomènes sont caractérisés selon leur mode de transmission. On parlera de perturbations conduites et de perturbations rayonnées.

De manière générale, les perturbations en électrotechnique appartiennent à la basse fréquence dont la transmission est conduite.

### **I.3.Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie [2]**

Selon les applications, les paramètres à mesurer et la précision de la mesure ne sont pas les mêmes.

#### **I.3.1.Application contractuelle**

Des relations contractuelles peuvent s'établir entre fournisseur d'électricité et utilisateur final, mais aussi entre producteur et transporteur ou entre transporteur et distributeur dans le cadre d'un marché dérégulé. Une application contractuelle nécessite que les termes soient définis en commun et acceptés par les différentes parties. Il s'agit, alors, de définir les paramètres de mesure de la qualité et de comparer leurs valeurs à des limites prédéfinies,

voire, contractuelles. Cette application implique souvent le traitement d'un nombre important de données.

### **I.3.2.Maintenance corrective**

Malgré le respect des règles de l'art (conception de schémas, choix de protections, du régime de neutre et mise en place de solutions adaptées) des phases de conception, des dysfonctionnements peuvent apparaître en cours d'exploitation :

- Ü Les perturbations peuvent avoir été négligées ou sous estimées.

- Ü L'installation a évolué (nouvelles charges et/ou modification).

C'est, généralement, suite à ces problèmes qu'une action de dépannage est engagée. L'objectif est souvent d'obtenir des résultats aussi rapidement que possible, ce qui peut conduire à des conclusions hâtives ou infondées.

Des systèmes de mesure portatifs (sur des temps limites) ou des appareils fixes (surveillance permanente) facilitent le diagnostic des installations (détection et archivage des perturbations et déclenchement d'alarmes).

### **I.3.3.Optimisation du fonctionnement des installations électriques**

Pour réaliser des gains de productivité (économies de fonctionnement et / ou réduction des coûts d'exploitation), il faut avoir un bon fonctionnement des procédés et une bonne gestion de l'énergie, deux facteurs dépendant de la QEE (qualité de l'énergie électrique). Disposer d'une QEE adaptée aux besoins, est un objectif des personnels d'exploitation, de maintenance et de gestion de sites tertiaires ou industriels.

### **I.3.4.Enquêtes statistiques**

Cette étude nécessite une approche statistique sur la base de nombreux résultats obtenus par des enquêtes généralement réalisées par les exploitants de réseaux de transport et de distribution.

- Enquêtes sur les performances générales d'un réseau : Elles permettent, par exemple, de :

- Ü Planifier et cibler les interventions préventives grâce à une cartographie des niveaux de perturbations sur un réseau. Ceci réduit les coûts d'exploitation et assure une meilleure maîtrise des perturbations. Une situation anormale par rapport à un niveau moyen peut être détectée et être corrélée avec le raccordement de nouvelles charges.

- Ü Comparer la QEE fournie par différents distributeurs en différents lieux géographiques.

Des clients potentiels peuvent, en effet, demander des caractéristiques de fiabilité pour la fourniture de l'électricité avant d'installer de nouvelles usines.

- Enquêtes sur les performances en un point particulier du réseau. Elles permettent de :

• **Ü** Déterminer l'environnement électromagnétique auquel une installation future ou un nouvel équipement sera soumis. Des actions d'amélioration du réseau de distribution et /ou de désensibilisation du réseau du client peuvent être engagées de façon préventive.

• **Ü** Spécifier et vérifier les performances auxquelles le fournisseur d'électricité s'engage de façon contractuelle. Ces informations sur la qualité de l'électricité sont particulièrement stratégiques pour les compagnies d'électricité qui, dans le contexte de la libéralisation du marché de l'énergie, recherchent la meilleure compétitivité, la satisfaction des besoins et fidélisation de leurs clients.

#### **I.4.Qualité de la tension [3]**

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, possédant quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

##### **I.4.1.Amplitude**

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue, en général, le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur nominale.

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions.

En fonction de la variation de l'amplitude, on distingue deux grandes familles de perturbations :

• **Ü** Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

• **Ü** Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10 % de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

### **I.4.2.Fréquence**

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays.

Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, Mais ces variations sont, en général, très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle  $\pm 1\%$  pendant 99,5% de l'année, et  $6\% \div 4\%$  durant 100% du temps.

Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.

### **I. 4.3.Forme d'onde**

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut, en général, être considérée comme une onde fondamentale à 50 Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz, appelées harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non périodiques, dénommés bruit.

### **I.4.4.Symétrie**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs.

La dissymétrie de tels systèmes est communément appelée déséquilibre.

## **I.5.Qualité du courant [3]**

La qualité de courant est relative à une dérive des courants de leurs formes idéales, et se caractérise de la même manière que pour les tensions, par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de  $2\pi/3$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme «qualité de courant»est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et à la nature des charges. Pour cette raison, la qualité de l'énergie électrique est souvent réduite à la qualité de la tension. C'est l'hypothèse que nous

ferons dans la suite de ce document, où le terme de qualité de l'énergie s'applique uniquement à celle de la tension.

### I.6.Définition des harmoniques [4]

Un signal périodique alternatif se compose d'un fondamental, d'harmoniques, et d'inter harmoniques. Un harmonique est une superposition sur l'onde fondamentale du courant ou de la tension, d'ondes de fréquences différentes de celle de l'onde fondamentale. Ces fréquences sont des multiples entiers des fréquences du réseau.

Pour qu'un signal déformé soit accessible à l'étude et à l'analyse, on peut le décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant :

• Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale : Le fondamental.

• Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental : Les harmoniques.

• Une composante continue.

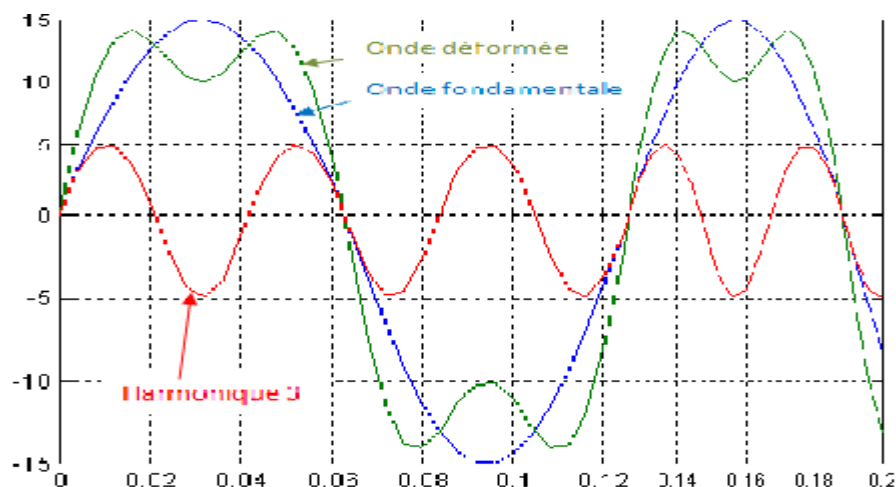


Figure (1-1) : Signal déformé.

#### I.6.1.Harmonique de courant ou de tension [5]

##### I.6.1.1.Courant harmonique

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires.

On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50Hz, elle n'absorbe pas un courant sinusoïdal à cette fréquence (c'est le cas des variateurs de vitesse, fours à arc, micro-ordinateurs).

Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non pas par l'impédance ou la tension du réseau sur lesquelles elles sont raccordées.

#### **I.6.1.2.Tension harmonique**

On peut également parler de source de tension harmonique pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire.

Dans ce cas, si l'on s'intéresse à l'étude de raccordement d'un récepteur de faible puissance, sa connexion au réseau ne modifie pas sensiblement le niveau précédent.

#### **I.6.1.3.Impédance harmonique**

L'impédance harmonique présentée par un réseau dépend de la fréquence considérée. On peut définir en tout point d'un réseau, une impédance harmonique  $Z_h$ , qui dépend du rang harmonique  $h$ . Elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point. Les courants harmoniques émis par une charge perturbée se partagent entre les différentes lignes.

La connaissance de cette impédance est importante, car même pour les faibles charges harmoniques, des surtensions harmoniques peuvent se produire dans le réseau, du fait que l'impédance harmonique peut être infinie (résonance).

#### **I.6.2.Inter-harmoniques [6]**

Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence fondamentale. Ils sont émis par des charges non linéaires, ou par injection, intentionnellement, par les distributeurs sur leurs réseaux.

#### **I.6.3.Infra-harmoniques [7]**

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental : 10Hz, 20Hz.

La présence d'inter-harmoniques ou d'infra-harmoniques est due à des variations périodiques ou aléatoires des puissances absorbées par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à  $T$  (période du fondamental), ce qui explique l'apparition de composantes supplémentaires à celles du développement en série de Fourier.

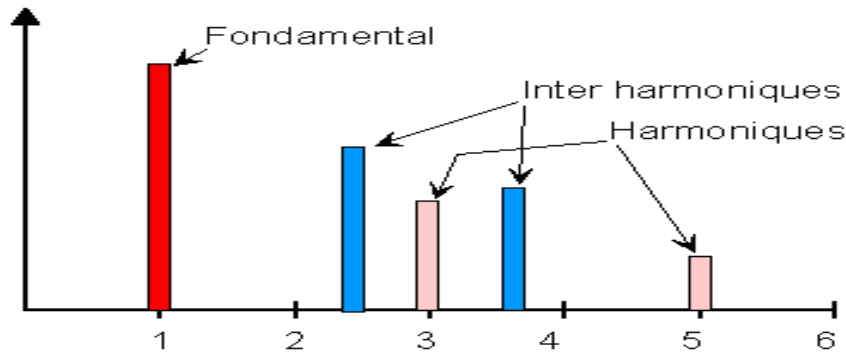


Figure (1-2) : Représentation spectrale d'harmoniques, et inter harmoniques.

## I.7. Grandeurs caractéristiques d'un signal déformé

### I.7.1. Décomposition d'un signal en série de Fourier [8]

Le signal  $S(t)$  peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique de période  $T$ , donc de fréquence  $f = 1/T$  et de pulsation  $\omega = 2\pi f$ . Ce signal s'écrit selon la décomposition suivante :

$$s(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \sin(h\omega t) \quad (1.1)$$

Avec :

$$a_0 = 1/T \int_0^t S(t) \cdot dt \quad (1.2)$$

Pour  $h \geq 1$  :

$$a_h = 2/T \int_0^t S(t) \cdot \cos(h\omega t) \cdot dt \quad (1.3)$$

$$b_h = 2/T \int_0^t S(t) \cdot \sin(h\omega t) \cdot dt \quad (1.4)$$

On peut écrire :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \cdot \sin(h\omega t + q_h) \quad (1.5)$$

Avec :

$$q_h = \arctan(a_h/b_h) \quad (1.6)$$

On définit les fréquences harmoniques  $f_h$  comme fréquences multiples de la fréquence fondamentale  $f_1$ . Leur rang  $h$  est tel que :

$$f_h = h.f \quad (1.7)$$

La grandeur  $C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$  est l'amplitude de l'harmonique de rang  $h$ . Il faut noter qu'on utilise très souvent le terme amplitude pour désigner la valeur efficace harmonique donnée par :

$$C_{eff} = C_h / \sqrt{2} \quad (1.8)$$

Le terme  $a_0$  est une constante qui représente la valeur moyenne de la fonction  $S(t)$  périodique.

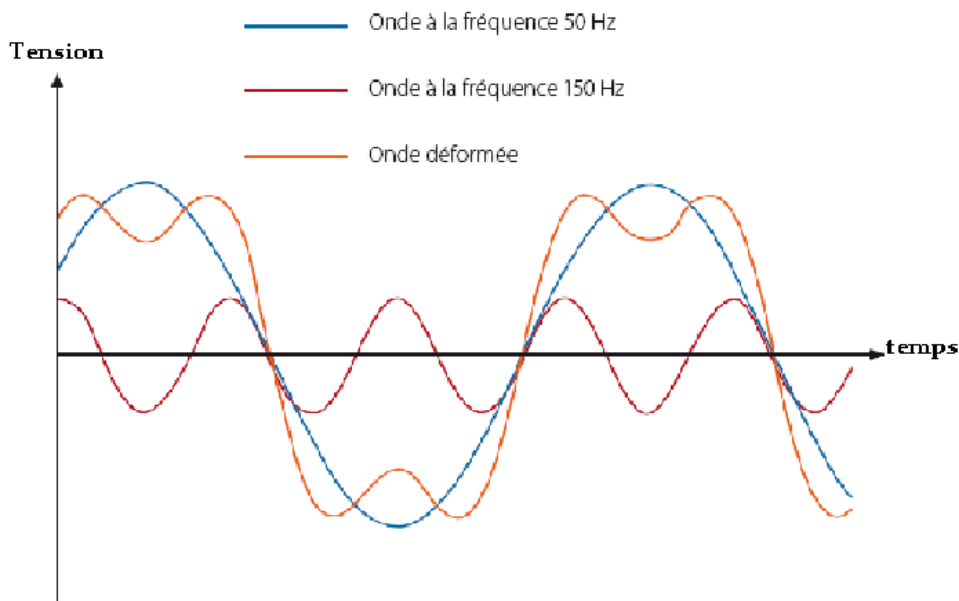


Figure (1-3) : Décomposition d'un signal périodique

## I.8. Analyse d'un signal [5]

### I.8.1. Valeur efficace [5]

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal  $s(t)$  périodique de période  $T$  est l'évaluation de sa valeur efficace :

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t S(t)^2 \cdot dt} \quad (1.9)$$

Lorsque le développement en série de Fourier d'une fonction périodique est continu, on peut déterminer sa valeur efficace comme suit :

$$S_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (S_h)^2} \quad (1.10)$$

La valeur efficace d'un signal tient compte de la présence de toutes les composantes : harmoniques, inter harmoniques et de la composante continue.

Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est alors possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale et la valeur efficace du signal complet.

### I.8.2.Rang d'harmonique

C'est le rapport de la fréquence harmonique  $f_h$  sur la fréquence fondamentale  $f$ .

$$h = f_h / f \quad (1.11)$$

Pour  $h = 1$ ,  $f_1 = f$  (fréquence fondamentale)

### I.8.3.Représentation spectrale [5]

Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre, c'est-à-dire à l'aide d'un schéma où l'on porte en abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pourcent), comme il est représenté sur la figure (1-4):

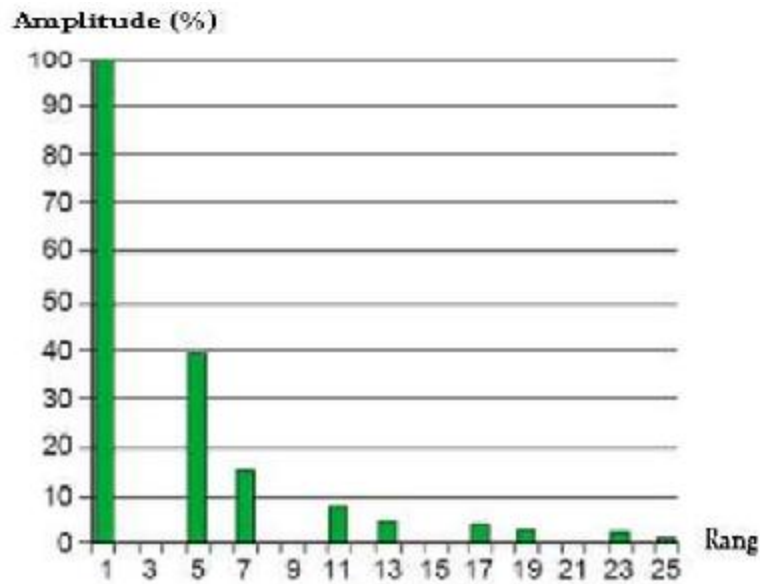


Figure (1-4) : Spectre d'amplitudes harmoniques.

#### I.8.4. Facteur de crête [6]

Le facteur de crête est le rapport de la valeur de crête par la valeur efficace.

$$F_c = \frac{\text{valeur maximale}}{\text{valeur efficace}}$$

$F_c > 6$  pour des ondes très déformées

Pour les tensions sinusoïdales :  $F_c = \sqrt{2} = 1,41$ .

#### I.8.5. Taux de distorsion harmonique (TDH) ou facteur de distorsion [5]

On définit le taux de distorsion harmonique (TDH), appliqué au courant ou à la tension, par :

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2}}{C_1} \quad (1.12)$$

ü Taux harmonique de courant :

$$TDH_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1.13)$$

$I_h$  : Courant harmonique de rang  $h$

$I_1$  : Fondamental de courant

**ü** Taux harmonique de tension :

$$TDH_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (1.14)$$

$V_h$  : Tension harmonique de rang  $h$ .

$V_1$  : Fondamental de la tension.

On parle aussi de taux global de distorsion. Cette grandeur permet d'évaluer, à l'aide d'un nombre unique, la perturbation d'une tension ou d'un courant en un point du réseau, ou de comparer deux réseaux sujets à des harmoniques de rangs différents.

Le taux global de distorsion représente approximativement l'augmentation d'échauffement subi par un récepteur résistif.

Selon la sensibilité des appareils, des rangs plus élevés sont pris en compte. La tendance actuelle dans les normes, est de considérer les harmoniques jusqu'au 50. Précisons que, dans les normes CEI, on trouve une autre définition du TDH :

$$TDH_{cei} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} c_h^2}}{S_{eff}} \quad (1.15)$$

### I.8.6. Taux de distorsion pondéré [5]

Afin de tenir compte de la spécification de certains types de matériels, tels que les condensateurs, les inductances ou les moteurs, des taux de distorsion pondérés en tension  $D_w$  sont définis de la manière suivante :

**Ø Condensateurs**

$$D_{wc} = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} h^2 u_h^2} \text{ avec } u_h = \frac{U_h}{U_1} \quad (1.16)$$

Si  $I_c$  est le courant circulant dans le condensateur,  $I_{c1}$  correspond au fondamental (respectivement  $I_L$  et  $I_{L1}$  pour l'inductance), on a alors :

$$I_c = I_{c1} \cdot \sqrt{1 + D_w^2} \quad (1.17)$$

### Ø Inductances

$$D_{wl} = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (1.18)$$

De même,

$$I_L = I_{L1} \cdot \sqrt{1 + D_w^2} \quad (1.19)$$

### Ø Moteurs

$$D_{wM} = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{u_h^2}{h}} \quad (1.20)$$

Comme ils intègrent la variation d'impédance des matériels en fonction de la fréquence, ces coefficients permettent d'évaluer la nocivité d'un réseau sur la famille de matériels correspondants.

## I.8.7. Expression des puissances

### Ø Puissance active

$$P = \sum_{\substack{h=1 \\ n=1}}^{\infty} V_h I_n (\cos q_{h,n}) \quad (1.21)$$

Avec  $\theta_{h,n} = \alpha_h - \beta_n$

### Ø Puissance réactive

$$Q = \sum_{\substack{h=1 \\ n \neq 1}}^{\infty} V_h I_n (\sin q_{h,n}) \quad (1.22)$$

**Ø Puissance apparente**

$$S = V.I = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.23)$$

**Ø Puissance déformante**

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.24)$$

**I.8.8. Facteurs de puissance et facteur de déphasage****Ø Facteur de puissance**

Le facteur de puissance est le rapport de la puissance active P à la puissance apparente S

$$f_p = \frac{P}{S} \quad (1.25)$$

**Ø Facteur de déphasage**

$$\cos q = \frac{P_1}{S_1} \quad (1.26)$$

avec :

$P_1$  : puissance active de la composante fondamentale

$S_1$  : puissance apparente de la composante fondamentale

Le facteur de puissance ne doit pas être confondu avec le facteur de déphasage.

**Ø facteur de déformation**

Il permet de définir le lien entre le facteur de puissance  $F_p$  et le facteur de déphasage  $\cos \theta$

$$F_d = \frac{f_p}{\cos q}$$

Dans le cas où les tensions et les courants sont parfaitement sinusoïdaux, le facteur de déformation est égal à 1 et le  $\cos q$  est égal au facteur de puissance.

**I.8.9. Notion de phase [5]**

La phase d'un signal harmonique est une notion importante. Elle permet d'une part, de calculer la somme vectorielle de plusieurs courants harmoniques circulant dans un même conducteur, et d'autre part, d'identifier un sens de transit de l'énergie harmonique.

### Ø Phase entre $I_h$ et $I_1$ (ou entre $V_h$ et $V_1$ )

Il est facile de mesurer le déphasage entre le courant harmonique et le courant fondamental (noté  $\alpha_h$ ). L'analyse de Fourier du signal en courant suffit. En revanche, elle est insuffisante pour calculer la somme de deux courants venant de sources différentes.

Lorsqu'on veut faire la somme de courants sur une portion donnée du réseau, il est alors nécessaire d'effectuer une correction qui tient compte du déphasage du courant fondamental par rapport à la tension fondamentale ( $j_h$ ).

### Ø Phase entre le courant $I_h$ et la tension fondamentale $V_1$

Il est préférable de connaître l'angle entre les courants harmoniques  $I_h$  et une référence de tension  $V_1$  qui est beaucoup plus stable.

La Figure (1-5) montre le déphasage  $b_h$  entre le courant  $I_h$  et la tension fondamentale  $V_1$ .

### Ø Phase entre la tension $V_h$ et le courant harmonique $I_h$

Afin de connaître les puissances actives et réactives harmoniques, il est utile de connaître le déphasage  $j_h$  entre la tension et le courant harmonique de même rang.

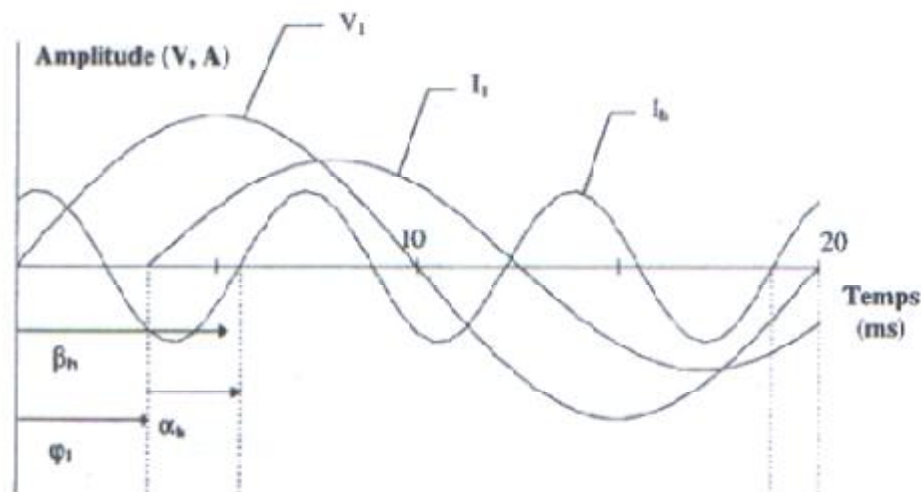


Figure (1-5) : Déphasage des courants et des tensions harmoniques.

## **I.9.Générateurs de grandeurs harmoniques [5]**

### **I.9.1. Générateurs de tensions harmoniques**

La circulation des courants harmoniques à travers les impédances du réseau provoque l'apparition des tensions de mêmes fréquences qui se superposent à la tension fondamentale 50 Hz. Il y a déformation de l'onde de tension et l'on parle alors d'harmoniques de tension.

Les f.e.m. harmoniques sont engendrées par les mêmes générateurs que les générateurs de f.e.m. fondamentales ; elles résultent de leur inadaptation à fournir une tension parfaitement sinusoïdale, soit par construction, soit par suite d'une exploitation en dehors du régime normal, saturation par exemple.

Les harmoniques de rangs faibles sont liés à l'échelle géométrique du pas polaire et ceux de rang élevé à l'échelle géométrique de l'encoche.

En pratique, les f.e.m. harmoniques engendrées par les machines sont faibles par rapport à celles des convertisseurs statiques.

#### **I.9.1.1. Les machines synchrones**

Le champ dans l'entrefer n'est pas parfaitement sinusoïdal. La nécessité de pratiquer des encoches pour loger les conducteurs provoque des harmoniques d'encoches.

En régime déséquilibré, la réaction d'induit déforme l'onde de tension ; en surcharge, la saturation déforme aussi la tension.

#### **I.9.1.2. Les machines asynchrones**

En plus des échauffements et des pertes par hystérésis et courants de Foucault, les harmoniques de séquence inverse ( $h=3k-1$ ) créent un couple de freinage et ceux de séquence directe ( $h=3k+1$ ) créent un couple moteur, ce qui conduit à une altération du couple moteur de la machine.

#### **I.9.1.3. Les transformateurs de puissance**

La distorsion caractéristique du courant magnétisant résulte de la saturation.

La production des harmoniques sera donc sensible :

**Ü** soit à vide à faible charge.

**Ü** soit en charge dès que la tension croît un peu.

**I.9.2. Générateurs de courants harmoniques**

Les générateurs de courants harmoniques englobent tout matériel électrique dont le rapport entre le courant traversant et la tension aux bornes n'est pas constant, c'est-à-dire l'impédance n'est pas linéaire

**I.9.2.1. Les transformateurs d'intensité**

Dès qu'ils se saturent, par suite d'une puissance débitée trop élevée, le courant secondaire est déformé.

**I.9.2.2. Les arcs électriques**

La caractéristique d'un arc,  $U = f(I)$ , statique ou dynamique n'est pas linéaire.

Tous les appareils à arc sont ainsi des générateurs de courants harmoniques. Ces derniers ne sont pas constants quelle que soit l'impédance du réseau.

L'augmentation de l'impédance placée en série avec un arc a un effet de stabilisation, entraînant une diminution du taux de courants harmoniques conjuguée avec l'accroissement des tensions harmoniques aux bornes de l'arc.

Si l'on excepte les arcs temporaires provoqués par les interrupteurs, on recense :

- Les fours à arc, dont la puissance pose des problèmes pour la maîtrise des harmoniques produits.
- Les soudeuses à arc.
- Les lampes à décharge à vapeurs de Hg, de Na, ...
- Les lampes fluorescentes sont particulièrement gênantes par suite de leur branchement en monophasé qui laisse circuler l'harmonique 3, (5 à 30 % suivant le ballast), d'une surcharge des conducteurs neutres.

**I.9.2.3. Les convertisseurs statiques de forte puissance**

Les progrès de l'électronique de puissance se sont traduits par la réalisation de redresseurs, d'onduleurs de tension et d'autres convertisseurs statiques.

Ces appareils figurent parmi les pollueurs les plus répandus.

Certains facteurs concourent à modifier les amplitudes de leurs harmoniques caractéristiques, par exemple les dissymétries de construction, l'imprécision de l'instant

d'ouverture des thyristors, le temps de commutation et le filtrage imparfait. Le redresseur est un convertisseur d'énergie complexe :

Ü Qui absorbe de la puissance au réseau d'alimentation sous forme de courant sinusoïdal à la fréquence fondamentale.

Ü Qui transfère la plus grande partie de cette puissance au réseau d'utilisation sous forme de courant continu plus ou moins chargé d'harmoniques.

Ü Qui restitue au réseau d'alimentation le reste de l'énergie sous forme d'harmoniques complémentaires, ceci constituant sa fonction parasite.

L'onduleur de tension, quant à lui, présente des formes d'ondes affectées d'harmoniques de rang faible (créneaux à la fréquence fondamentale) ou élevé (ondes modulées par impulsion).

#### **I.9.2.4. Les régulateurs à thyristors**

Beaucoup plus pratique que les ignitrons et thyatron, les thyristors au silicium sont de plus en plus utilisés pour réguler la puissance en courant alternatif par le procédé du contrôle de phase.

La sinusoïde se trouve complètement déformée, d'où génération d'harmoniques.

#### **I.9.2.5. Les charges électrodomestiques [9]**

Ce terme englobe tous les appareils domestiques de faible puissance tels que les récepteurs de télévision, les magnétoscopes, etc ... Ces charges sont présentes en grand nombre sur le réseau et, bien que de puissance unitaire réduite, elles sont responsables d'une part importante de la pollution harmonique.

#### **I.10. Effets des perturbations harmoniques [10]**

Les harmoniques circulant dans les réseaux détériorent la qualité de l'énergie, et sont ainsi, à l'origine de nombreuses nuisances (surcharges, vibrations, vieillissement.....)

Dans l'ensemble, on distingue deux types d'effets des harmoniques :

##### **I.10.1. Effets instantanés**

Ils se traduisent par des conséquences immédiates sur le fonctionnement des matériels.

La présence d'harmoniques crée des troubles de fonctionnement :

Ü Perturbation des systèmes de régulation et de synchronisation.

Ü Réduction du facteur de puissance.

- ü Dysfonctionnement des systèmes de mesure.
- ü Dégradation de la classe de précision et erreurs de lecture de certains appareils de mesure et comptage .
- ü Provocation de phénomènes de résonance et d'antirésonance.
- ü Génération et induction de bruit et de vibrations acoustiques dans les appareils (Téléphone...) .
- ü Dysfonctionnement des récepteurs de télécommande centralisée et déclenchement intempestif des relais de protection.

### **I.10.2.Effets à terme**

Les effets à terme sur les machines tournantes et les condensateurs se manifestent par des échauffements supplémentaires , il en découle la destruction de matériel ou, plus fréquemment ,une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

### **I.10.3.Les effets différés(ou effets à long terme)**

Ils sont essentiellement de nature thermique. Ils sont dus à deux phénomènes majeurs qui sont :

- ü L'échauffement des conducteurs et des composants traversés par les courants harmoniques
- ü Le vieillissement des isolants.

## **I.11.Les variations d'amplitude [11]**

### **I.11.1. Creux de tension**

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique d'une valeur comprise entre 10% et 90%de la valeur de la tension nominale.

Un creux de tension est caractérisé par :

- ü Sa profondeur ( $\Delta U$ ).
- ü Sa durée ( $\Delta T$ ).

La mesure d'un creux de tension s'effectue par la détermination de la valeur efficace de la tension toutes les  $\frac{1}{2}$  périodes (avec recouvrement d'une  $\frac{1}{2}$  période).

### I.11.2 coupures brèves

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90% de la valeur nominale, elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 min).

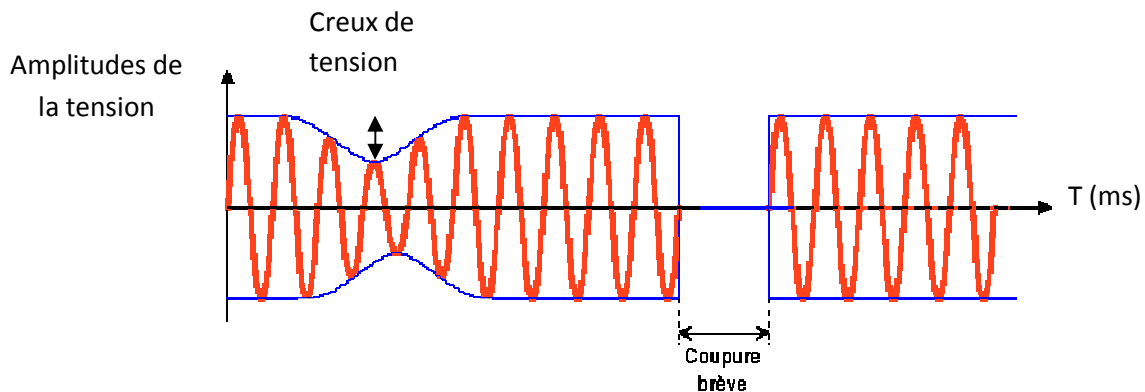


Figure (1-6) : Coupures brèves

#### Remarque

La durée d'un creux de tension ou d'une coupure brève est liée à la temporisation de fonctionnement des organes de protection et l'isolement des défauts par les dispositifs de protections (disjoncteurs...).

Le nombre de creux de tension et de coupures brèves est plus élevé dans les réseaux aériens que dans les réseaux souterrains.

### I.11.3. Les surtensions

Une surtension est toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort d'une limite d'un gabarit défini par une norme. On distingue trois (03) types de surtensions qui sont :

#### I.11.3.1. Les surtensions temporaires

Elles ont la même fréquence que celles du réseau, elles ont plusieurs origines comme :

Un défaut d'isolement, la surcompensation de l'énergie réactive, les défauts de régulateurs d'un alternateur.

### I.11.3.2. Les surtensions de manœuvre

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection.....), on distingue :

- ü Les surtensions de commutation en charge normale.
- ü Les surtensions provoquées par la manœuvre de circuit capacitif (ligne ou câble à vide).

### I.11.3.3. Les surtensions atmosphériques

Les surtensions atmosphériques sont causées par des phénomènes naturels comme la foudre qui apparait en cas d'orage.

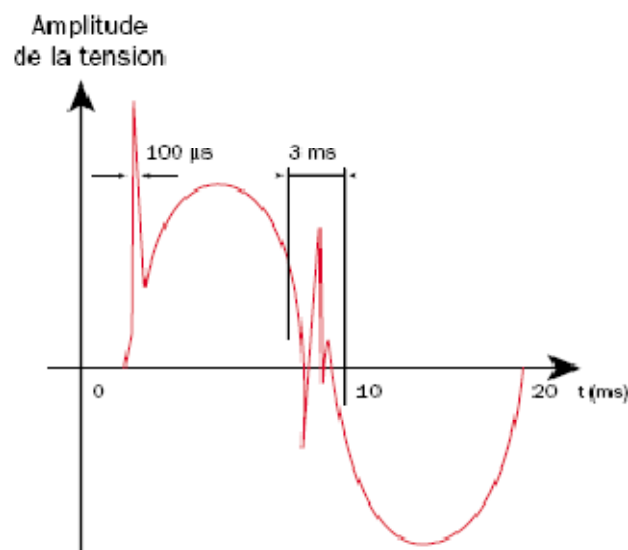


Figure (1-7) : Les surtensions atmosphériques

## I.12. Effets de la variation d'amplitude

### I.12.1. Effet des creux de tension et des coupures brèves

Les creux de tension et les coupures brèves perturbent de nombreux appareils raccordés au réseau, elles sont la cause des problèmes de la qualité d'énergie électrique. Un creux de tension ou une coupure brève de quelques centaines de millisecondes peut se traduire par des conséquences néfastes plusieurs heures durant.

Les applications les plus sensibles sont les :

Ü chaînes complètes de fabrication en continu dont le procédé ne tolère aucun arrêt temporaire d'un élément de la chaîne (imprimerie, sidérurgie, papeterie, pétrochimie.....).

Ü équipements informatiques (centres de traitement de données, banques, télécommunications.....).

### **I.12.2. Les conséquences d'une surtension**

Parmi les effets d'une surtension on peut citer :

Ü Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques....).

Ü Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (exemple : perte de production pour les industriels).

### **I.13. La dissymétrie des systèmes triphasés (déséquilibre)**

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois (03) tensions ne sont pas égales en amplitude, ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de  $120^0$ .

Le non symétrie d'une installation peut entraîner :

Ü Un mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe=mauvais éclairage).

Ü La destruction d'un appareil alimenté par une tension très élevée (claquage d'un filament d'une lampe par une surtension).

Ü L'augmentation de l'échauffement des machines asynchrones, l'existence de couple inverse conduit à la dégradation prématurée des machines.

Ü Apparitions des courants harmoniques qui peuvent poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5.

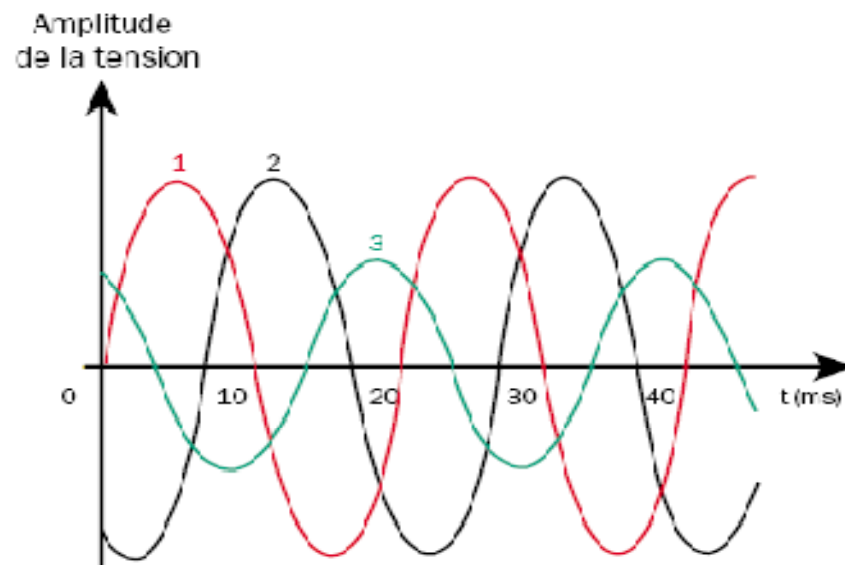


Figure (1-8) : La non symétrie des systèmes triphasés

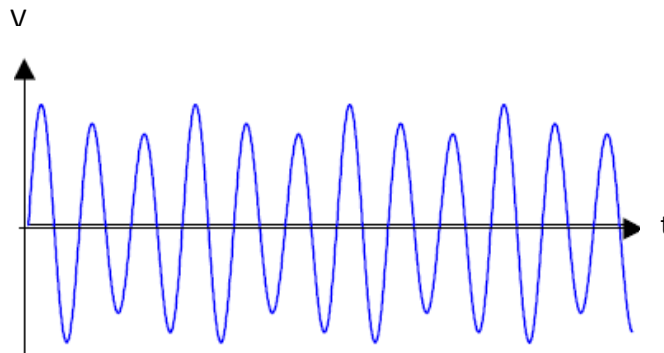
#### I.14. Fluctuation lente de la tension (flicker)

##### Définition

La fluctuation lente de la tension est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10 %. La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la fréquence est comprise entre 0,5 et 25 Hz.

Le phénomène est dû à la propagation sur les lignes du réseau, d'appels de courants importants, à la mise en service ou hors service d'appareils dont la puissance absorbée varie de manière rapide (les fours à arcs, les machines à souder, les moteurs à démarrages fréquents,...).

Les conséquences de la fluctuation lente de la tension s'observent essentiellement sur des lampes à incandescence où elle provoque un papillotement du flux lumineux (Flicker). Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1% de la tension.



**Figure (1-9) : Fluctuation de la tension**

## Conclusion

Les mesures effectuées ces dernières années montrent que la pollution harmonique s'accroît régulièrement sur l'ensemble des réseaux. Face à cela, une politique de maîtrise de la pollution harmonique doit être menée aussi bien du côté des distributeurs d'électricité que de celui des fabricants de matériel ou des utilisateurs industriels.

Comme nous l'avons constaté dans ce premier chapitre, les courants harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller de l'échauffement et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

# Chapitre II

## Singularités de l'harmonique 3

## Introduction

Dans les installations où le neutre est distribué, les charges non-linéaires peuvent entraîner dans ce conducteur des surcharges importantes par la présence de l'harmonique de rang 3.

Le phénomène et les remèdes sont expliqués dans ce chapitre. 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.

### II.1. Charge non-linéaire non symétrique [12]

Une charge non-linéaire quelconque, comme celle représentée sur la figure (2-1), 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 sur les figures (2-2) et (2-3)

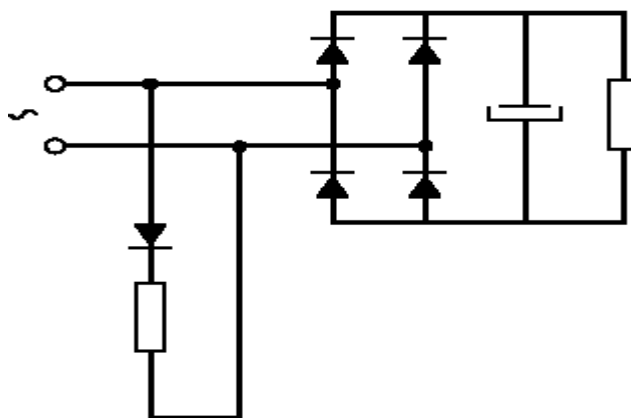


Figure (2-1) : Exemple d'une charge non-linéaire non symétrique

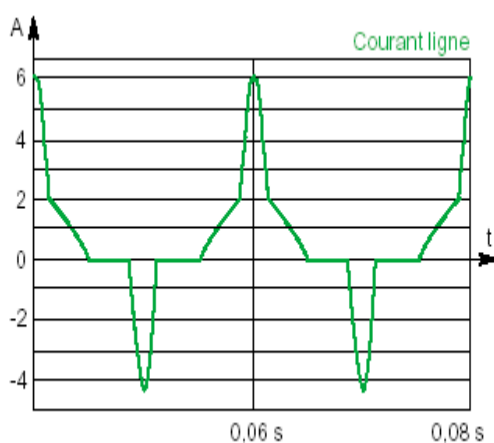


Figure (2-2) : Allure du courant absorbé

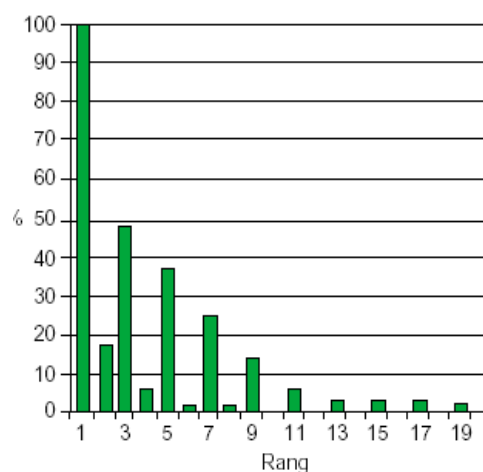


Figure (2-3) : Spectre du courant absorbé

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 :

$$f(wt + p) = -f(wt) \quad (2-1)$$

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

$$I(wt) = I_1 \sin(wt) + I_2 \sin(2wt) \quad (2-2)$$

On a donc :

$$I(wt + p) = I_1 \sin(wt + p) + I_2 \sin 2(wt + p) \quad (2-3)$$

$$I(wt + p) = -I_1 \sin wt + I_2 \sin 2(wt) \quad (2-4)$$

Ceci ne peut être égal à  $-I(wt)$  que si  $I_2$  (amplitude de l'harmonique 2) est nulle. Le raisonnement peut être étendu à tous les harmoniques de rang pair.

## II.2. Charges triphasées [12]

Considérons une charge triphasée non linéaire, équilibrée, symétrique, sans raccordement au neutre, comme représentée sur la figure (2- 4). Supposons que les courants absorbés par cette charge contiennent l'harmonique 3.

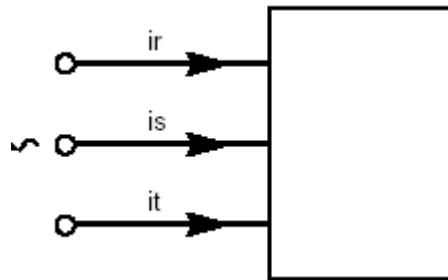


Figure (2-4) : Charge triphasée

Les courants harmoniques de rang 3 de chacune des phases peuvent s'écrire de la manière suivante :

$$i_{r3} = I_3 \sin 3wt \quad (2-5)$$

$$i_{s3} = I_3 \sin 3\left(wt - \frac{2p}{3}\right) = I_3 \sin(3wt - 2p) = i_{r3} \quad (2-6)$$

$$i_{t3} = I_3 \sin 3\left(wt - \frac{4p}{3}\right) = I_3 \sin(3wt - 4p) = i_{r3} \quad (2-7)$$

$$i_{r3} = i_{s3} = i_{t3} \quad (2-8)$$

Les courants harmoniques de rang 3 des trois phases sont donc égaux. Or, en l'absence de conducteur de neutre,  $i_r + i_s + i_t = 0$  (2-9)

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, ..., c'est-à-dire de la forme  $6k \pm 1$ . La démonstration peut être faite pour tout système comprenant des redresseurs commandés ou non. Il est ainsi démontré que le rang des harmoniques s'écrit  $h = (n.p) \pm 1$ . Où  $n$  est un nombre entier (1, 2, 3, 4, 5,...) et  $p$  le nombre de redresseurs composant le dispositif. Par exemple un circuit ne comprenant qu'un seul redresseur (redressement mono- alternance) a des harmoniques de rang  $(n \pm 1)$  et présente tous les harmoniques possibles en partant de 0 qui est le courant continu.

Ce résultat est illustré par le schéma constitué d'un redresseur à diodes avec filtrage capacitif figure (2- 5), dont le courant absorbé est représenté par la courbe de la figure (2-6) et son spectre sur la figure (2-7)

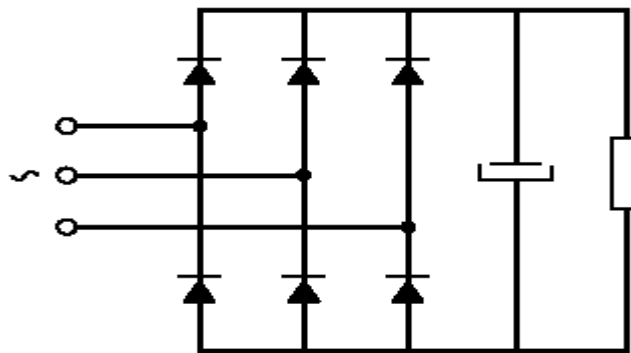


Figure (2-5) : Pont redresseur triphasé avec filtrage capacitif

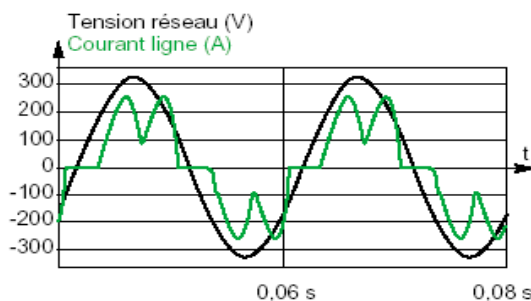


Figure (2-6) : Allure du courant absorbé

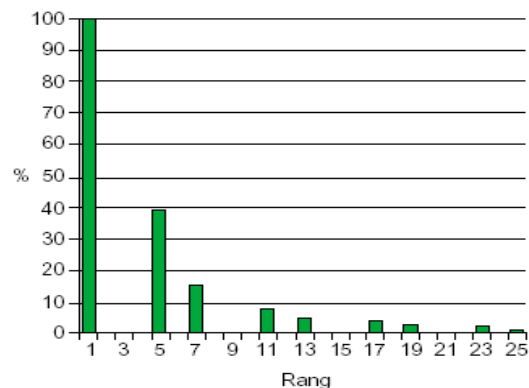


Figure (2-7) : Spectre harmonique du courant

### II.3. Charges monophasées [12]

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, figure (2-8), 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 (2-9) et (2-10). De nombreux appareils, dans tous les domaines d'activités, comportent un circuit de ce type, tableau (2-1). Ce sont les principaux générateurs d'harmonique de rang 3.

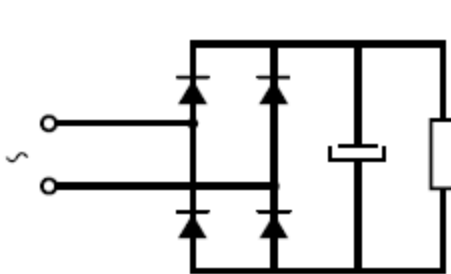


Figure (2-8) : Redresseur monophasé avec filtrage capacitif

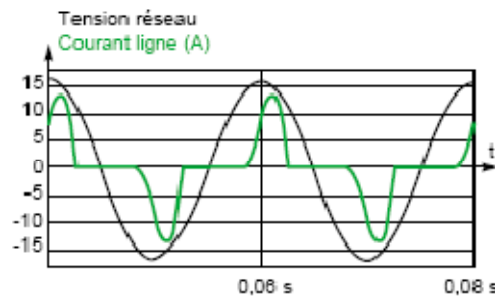


Figure (2-9) : Allure du courant absorbé par le circuit de la figure (2- 8)

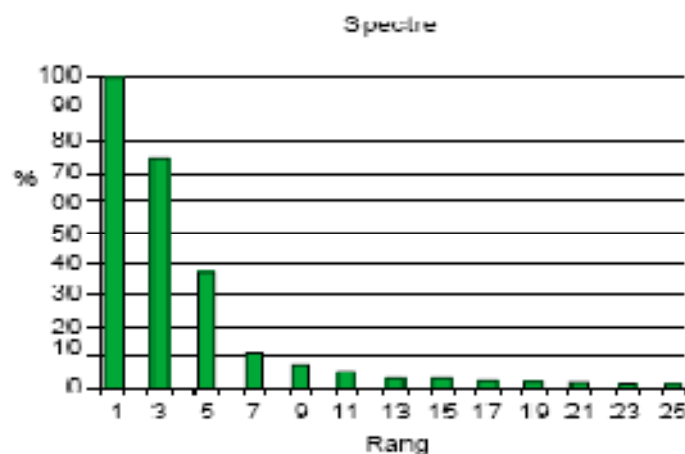


Figure (2-10): Spectre d'harmoniques du courant absorbé par le circuit de la figure (2- 8)

| Domaine d'activité | appareils                                                  |
|--------------------|------------------------------------------------------------|
| Domestique         | TV, hi-fi, vidéo, fours à micro-ondes                      |
| Tertiaire          | Microordinateurs, imprimantes, photocopieuses, élécopieurs |
| Industriel         | Alimentation à découpage, variateurs de vitesse            |

**Tableau (2-1) : Quelques exemples d'appareils comportant un redresseur monophasé avec filtrage capacitif**

## II .4.Surcharge du conducteur de neutre [12]

### II.4.1. Harmoniques de rang 3 et multiples de 3

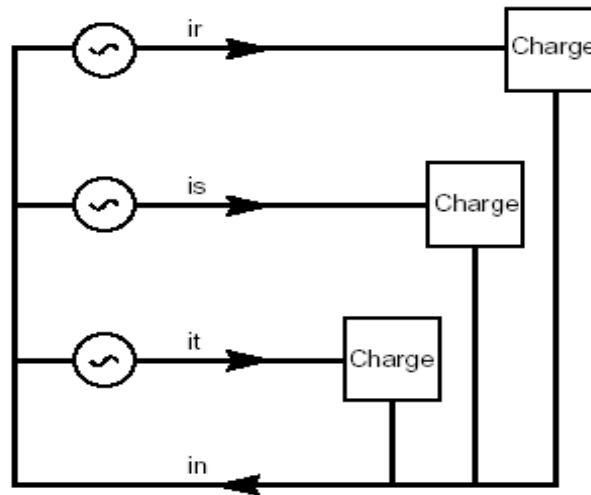
Considérons un système simplifié constitué d'une source triphasée équilibrée et de trois charges monophasées identiques, connectées entre phases et neutre, figure (2-11).

Dans cet exemple simplifié, les courants harmoniques de rang 3 des 3 phases sont donc identiques. Le courant dans le neutre étant égal à la somme des courants des phases, la composante de rang 3 du courant neutre est égal à la somme des composantes de rang 3, soit :

$$i_{n3} = 3i_{r3} \quad (2.10)$$

D'une manière générale, pour des charges équilibrées, les courants harmoniques de rang multiple de 3 sont en phase et s'additionnent arithmétiquement dans le conducteur de neutre, alors que les composantes fondamentales et les harmoniques de rang non multiple de 3 s'annulent.

Les courants harmoniques de rang 3 sont donc des courants homopolaires, circulant en phase dans les trois phases.



**Figure (2-11): Charge triphasée**

Si les charges sont linéaires, les courants constituent un système triphasé équilibré. La somme des courants de phase est donc nulle, ainsi que le courant neutre.

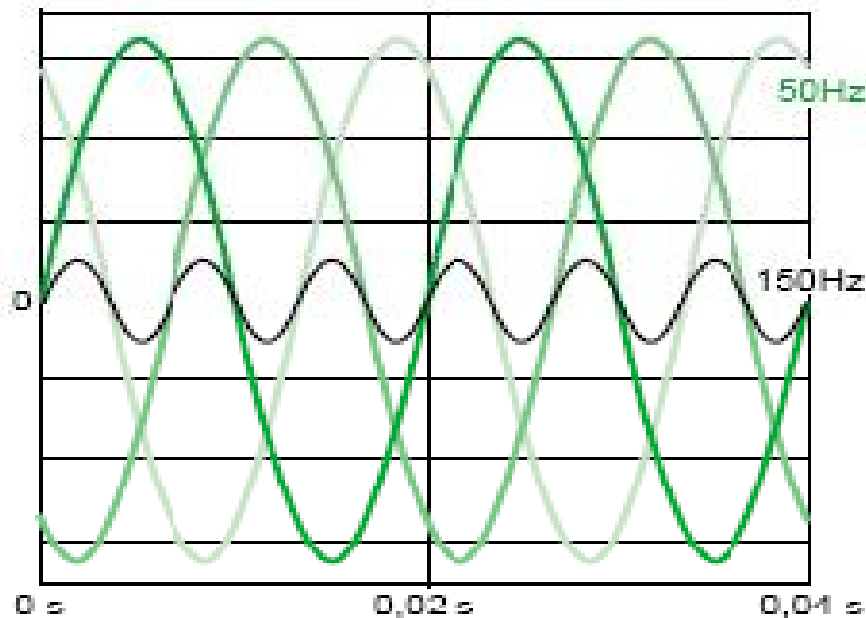
$$in = \sum i_i = 0 \quad (2.11)$$

Dans le cas de charges non linéaires, les courants de phases ne sont pas sinusoïdaux et contiennent donc des harmoniques, en particulier de rang multiple de 3. Les courants des trois phases étant égaux, les courants harmoniques de rang 3, par exemple, ont la même amplitude et peuvent s'écrire sous la forme :

$$i_{r3} = I_3 \sin 3(\omega t) \quad (2.12)$$

$$i_{s3} = I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{2p}{3}\right) = I_3 \sin(3\omega t - 2p) = i_{r3} \quad (2.13)$$

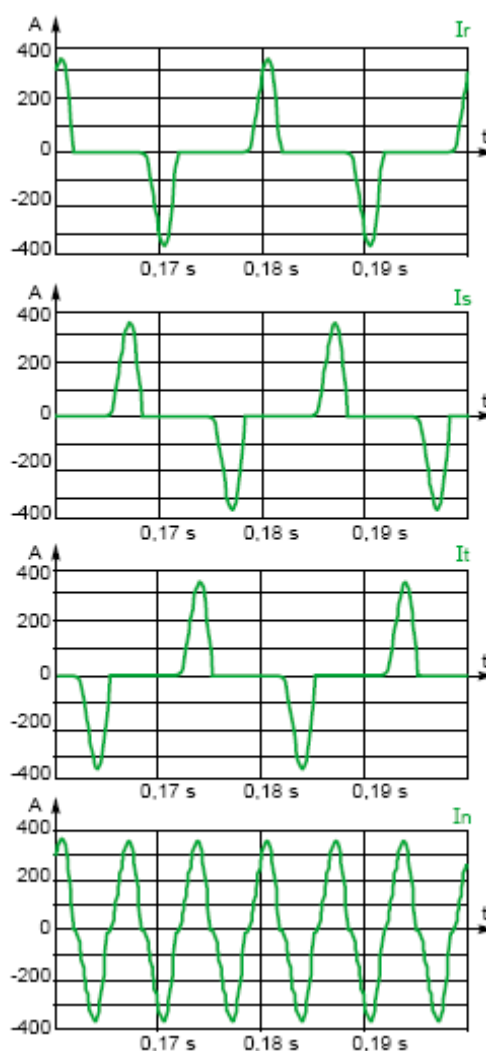
$$i_{t3} = I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{4p}{3}\right) = I_3 \sin(3\omega t - 4p) = i_{r3} \quad (2.14)$$



**Figure (2-12): Courants triphasés à 50 Hz et 150 Hz absorbés par des charges linéaires**

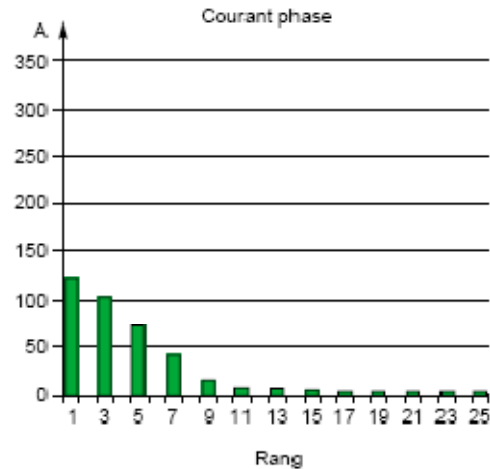
#### **II.4.2. Allure du courant dans le neutre**

La figure (2-13) représente les courants circulant dans les phases de trois charges monophasées non linéaires identiques connectées entre phases et neutre, ainsi que le courant résultant dans le conducteur de neutre.

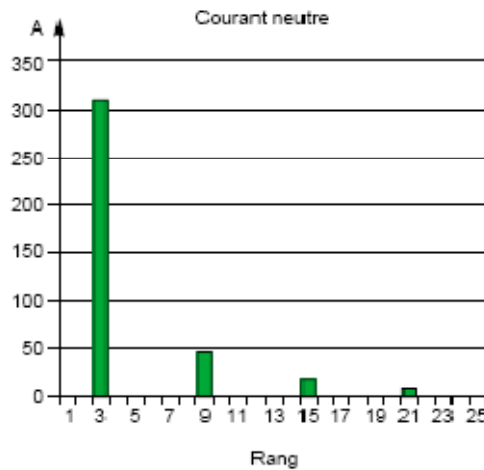


**Figure (2-13): Courant des phases et du neutre alimentant des charges monophasées non linéaires**

Les spectres de ces courants sont représentés sur les figures (2-15) et (2-16). A noter que le courant du neutre ne contient que des composantes de rang impair multiples de 3 (3, 9, 15, ...), dont les amplitudes sont trois fois supérieures à celles des courants de phase.



**Figure (2-14) : Spectre du courant phase alimentant des charges monophasées non linéaires**



**Figure (2-15) : Spectre du courant neutre absorbé par des charges monophasées non linéaires**

#### II.4.3. Calcul de la valeur efficace du courant neutre

Supposons, comme sur la figure (2-13), que les ondes de courant des 3 phases ne se chevauchent pas. Sur une période  $T$  du fondamental, le courant d'une phase est constitué d'une onde positive et d'une onde négative séparée d'un intervalle où le courant est nul. La valeur efficace du courant de ligne peut être calculée par la formule :

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_l^2 dt} \quad (2-15)$$

La valeur efficace du courant neutre peut être calculée sur un intervalle égal à  $T/3$ .

Sur cet intervalle, le courant neutre est également constitué d'une onde positive et d'une onde négative, identiques à celles du courant phase. La valeur efficace du courant neutre peut donc être calculée de la manière suivante :

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{T/3} \int_0^{T/3} i_n^2 dt} \quad (2-16)$$

$$I_N = \sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/3} i_n^2 dt} \quad (2-17)$$

$$I_N = \sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_n^2 dt} = \sqrt{3} I_L \quad (2-18)$$

Le courant dans le conducteur de neutre a donc ici une valeur efficace  $\sqrt{3}$  fois supérieure à celle du courant dans une phase.

Lorsque les ondes de courant des trois phases se chevauchent, comme dans l'exemple de la figure (2-16), la valeur efficace du courant dans le neutre est inférieure à  $\sqrt{3}$  fois la valeur efficace du courant dans une phase, figure (2-17). Dans les installations où l'on trouve un grand nombre de charges non linéaires, comme des alimentations à découpage de matériel informatique, le courant dans le neutre peut donc dépasser le courant dans chaque phase. Cette situation, quoique peu fréquente, nécessite un conducteur de neutre renforcé.

La solution communément adoptée consiste à utiliser un conducteur de neutre de section double de celle des conducteurs de phase. Les appareils de protection et commande (disjoncteur, interrupteurs, contacteurs,...) doivent être dimensionnés en fonction du courant dans le neutre.

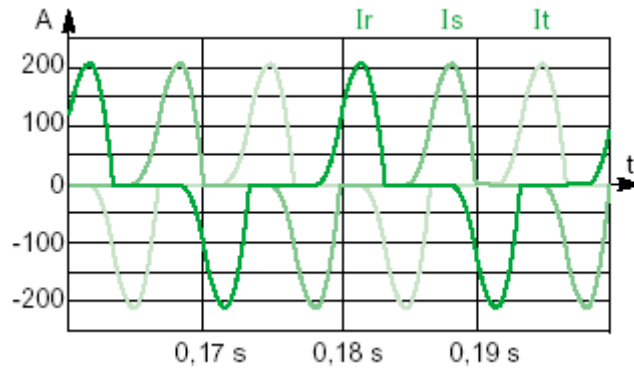


Figure (2-16): Courant dans les trois phases

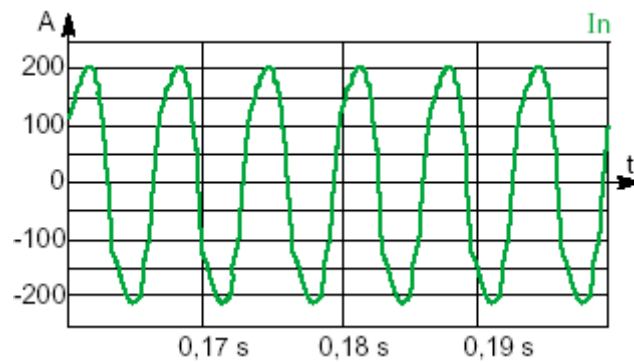


Figure (2-17): Courant dans le neutre

## II.5. Surcharge du conducteur de neutre en fonction de la distorsion de courant [12]

### II.5.1. Charges équilibrées

En considérant que l'harmonique 3 est l'harmonique prépondérant, le taux de distorsion est très voisin du taux d'harmonique 3. Soit :

$$THD = I_3(\%) \quad (2.19)$$

Par ailleurs, comme indiqué en 2.1, le courant dans le neutre  $I_N$  est très voisin de  $3 I_3$  Soit :

$$I_N \approx 3I_3(A) \quad (2.20)$$

Que l'on peut exprimer sous la forme :

$$I_N \approx 3i_3 I_1 \approx 3TDHI_1 \quad (2.21)$$

En utilisant la formule générale :

$$I_1 = \frac{I_L}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (2.22)$$

On obtient:

$$I_1 \approx 3THD \frac{I_L}{\sqrt{1+THD^2}} \Rightarrow \frac{I_N}{I_L} \approx \frac{3THD}{\sqrt{1+THD^2}} \quad (2.23)$$

Cette formule approchée est valable tant que le résultat est inférieur à  $\sqrt{3}$ . Le taux de charge du courant neutre varie donc en fonction du taux de distorsion suivant la courbe de la figure (2-18).

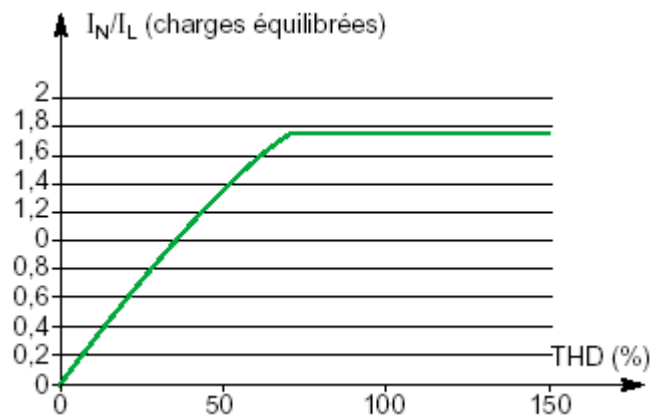


Figure (2-18): Taux de charge du courant neutre (Charges équilibrées)

### II.5.2.Charges déséquilibrées

Considérons le système simplifié constitué d'une source triphasée équilibrée et de deux charges monophasées, connectées entre phases et neutre. Figure (2-19).

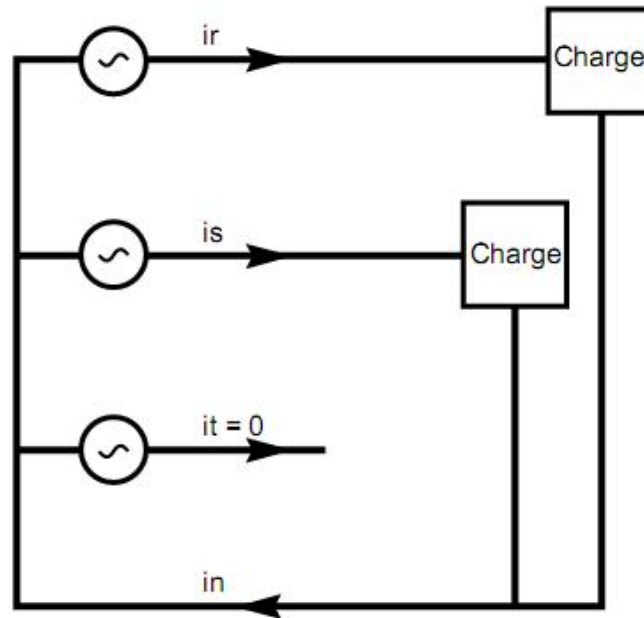


Figure (2-19) : Charges déséquilibrées

Le courant efficace dans le neutre est donc égal à :

$$I_N = \sqrt{I_1^2 + (2I_3)^2} \quad (2.24)$$

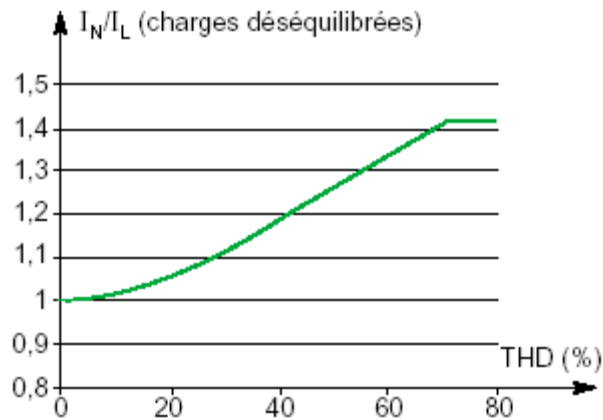
En utilisant les mêmes formules que précédemment, il vient :

$$I_N \approx \sqrt{I_1^2 + (2THDI_1)^2} \quad (2.25)$$

$$I_N \approx I_1 \sqrt{1 + 4THD^2} \quad (2.26)$$

$$I_N \approx \frac{I_L}{\sqrt{1 + THD^2}} \sqrt{1 + 4THD^2} \Rightarrow \frac{I_N}{I_L} = \frac{\sqrt{1 + 4THD^2}}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (2.27)$$

Cette formule approchée est valable tant que le résultat est inférieur à  $\sqrt{2}$ . Le taux de charge du courant neutre varie donc en fonction du taux de distorsion suivant la courbe suivante. Figure (2-20).



**Figure (2- 20): Taux de charge du courant neutre (charges déséquilibrées)**

On peut démontrer, de la même manière que précédemment, que la valeur maximale du courant neutre ne peut dépasser  $\sqrt{2}$  fois le courant dans chaque phase.

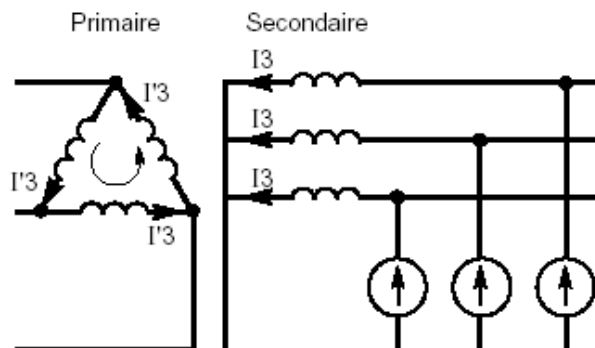
En ne considérant que le courant fondamental et le courant harmonique de rang 3 de chacune des charges, le courant dans le neutre est la somme d'un courant fondamental et d'un courant harmonique de rang 3 :

• Le courant fondamental est la somme vectorielle des courants fondamentaux dans les 2 charges. Ces courants étant égaux et déphasés de  $120^\circ$ , le courant résultant est égal au courant fondamental de chacune des charges.

• Le courant harmonique de rang 3 est la somme des courants harmoniques de rang 3 (ceux-ci étant en phase).

### Ø Transformateur triangle-étoile

Considérons un transformateur triangle – étoile, alimentant des charges non linéaires, identiques, connectées entre phases et neutre. Figure (2-21).



**Figure (2-21): Courant harmonique de rang 3 dans le transformateur triangle-étoile**

Chacune de ces charges génère un courant harmonique de rang 3. Rappelons que ces courants ( $I_3$ ), harmoniques de rang 3, sont égaux. Les courants harmoniques de rang 3 dans les enroulements primaires du transformateur sont donc également identiques entre eux, et notés  $I_3'$ .

En chaque nœud du triangle du primaire, les courants harmoniques de rang 3 se compensent, et le courant dans la ligne ne contient donc pas d'harmonique de rang 3.

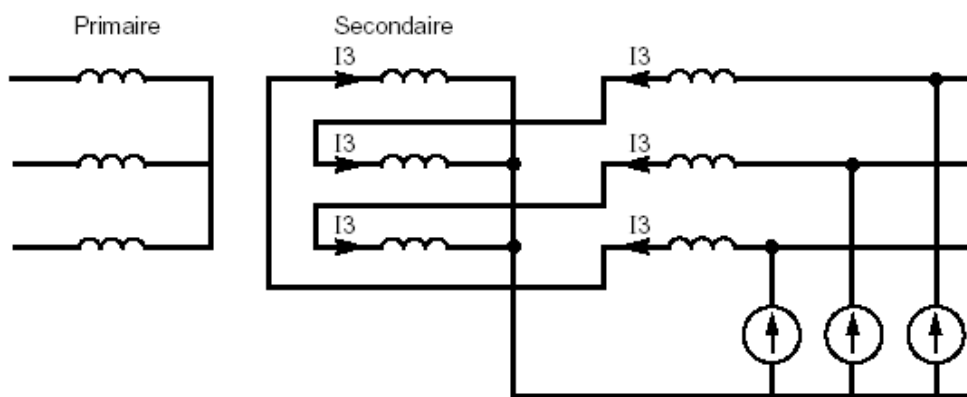
Les courants harmoniques de rang 3 ne sont donc pas transmis au réseau. Par contre, ces courants circulent dans les enroulements primaires du transformateur et provoquent donc un échauffement supplémentaire.

Par ailleurs, la circulation de ces courants est responsable d'une distorsion de la tension au primaire, en raison des impédances des enroulements du transformateur.

### Ø Transformateur à secondaire zigzag

Considérons un transformateur à secondaire zigzag, alimentant des charges non linéaires, identiques, connectées entre phases et neutre. Figure (2-22). Chacune de ces charges génère un courant harmonique de rang 3 (représenté  $I_3$  dans le schéma). Rappelons que ces courants harmoniques de rang 3 sont égaux.

On voit aisément sur cette figure que les ampères-tours sur une même colonne au secondaire s'annulent. Il en résulte qu'aucun courant harmonique de rang 3 ne circule au primaire.



**Figure (2-22): Courant harmonique de rang 3 dans un transformateur à secondaire zigzag**

**II.6. Les remèdes [12]**

Les alimentations à découpage et les éclairages fluorescents à ballast électronique sont de plus en plus fréquents dans les installations tertiaires. Le fort pourcentage d'harmonique 3 dans ce type de charge peut avoir un impact important sur le dimensionnement du conducteur de neutre.

Dans un immeuble de bureau le courant dans le conducteur de neutre peut atteindre 1,4 à 1,7 fois le courant dans une phase. Plusieurs types de dispositifs peuvent être utilisés pour éliminer les effets des courants harmoniques de rang 3.

**II.6.1. Adaptation de l'installation**

Les principales solutions à la surcharge du conducteur de neutre sont les suivantes :

ü Utiliser un conducteur de neutre séparé pour chaque phase

ü Doubler le calibre du conducteur de neutre

Sachant que le courant dans le neutre ne peut dépasser 1,7 fois le courant dans chaque phase, ceci est une solution technologique simple pour éviter la surcharge du conducteur de neutre.

**II.6.2 .Transformateur triangle – étoile**

Les courants harmoniques de rang 3 circulant au secondaire d'un transformateur triangle – étoile ne sont pas transmis à la ligne d'alimentation du transformateur.

Cette disposition est couramment utilisée en distribution, ce qui évite la circulation de courants harmoniques de rang 3 dans les réseaux de distribution et de transport.

A noter que l'élimination des courants harmoniques de rang 3 n'est totale que si les charges sont parfaitement équilibrées.

Dans le cas contraire, les courants harmoniques de rang 3 des 3 phases ne sont pas égaux et ne se compensent pas totalement aux sommets du triangle.

**II.6.3 .Transformateur à secondaire en zigzag**

Les courants harmoniques de rang 3 circulant au secondaire d'un transformateur à secondaire en zigzag ne sont pas transmis aux enroulements primaires.

Cette disposition est fréquemment utilisée, bien que la constitution du transformateur soit plus lourde que celle d'un transformateur triangle –étoile.

A noter, là aussi, que l'élimination des courants harmoniques de rang 3 n'est totale que si les charges sont parfaitement équilibrées. Dans le cas contraire, les courants harmoniques de rang 3 des 3 phases ne sont pas égaux, et la compensation des ampères-tours sur une même colonne au secondaire n'est pas totale. Un courant harmonique de rang 3 peut alors circuler également dans l'enroulement primaire, et donc dans la ligne d'alimentation.

#### II.6.4. Réactance à couplage zigzag

Le schéma de principe de cette réactance est illustré par le schéma de la figure (2-23). Comme dans le cas d'un transformateur zigzag, on voit aisément sur cette figure que les Ampères-tours sur une même colonne s'annulent. Il en résulte que l'impédance vue par les courants harmoniques 3 est très faible (inductance de fuite du bobinage seulement). La réactance zigzag procure un chemin de retour de faible impédance aux courants homopolaires, harmoniques de rangs 3 et multiples de 3. Elle réduit donc le courant  $I_n$  circulant dans le neutre de l'alimentation, comme illustré ci-dessous dans le cas de charges monophasées (voir également figure (2-13)).

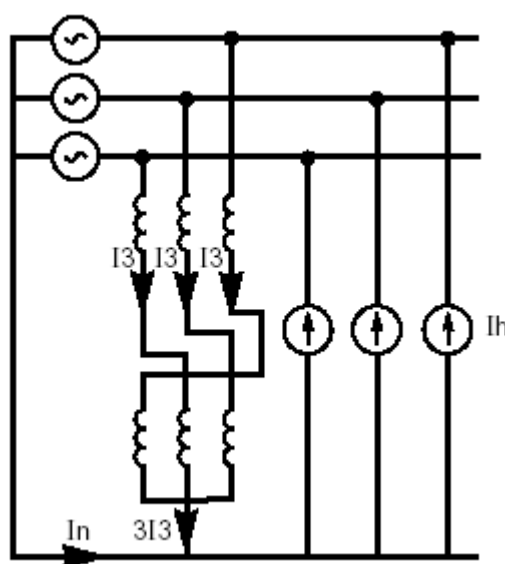


Figure (2-23) : Réactance zigzag

La figure (2-24) met en évidence l'atténuation obtenue

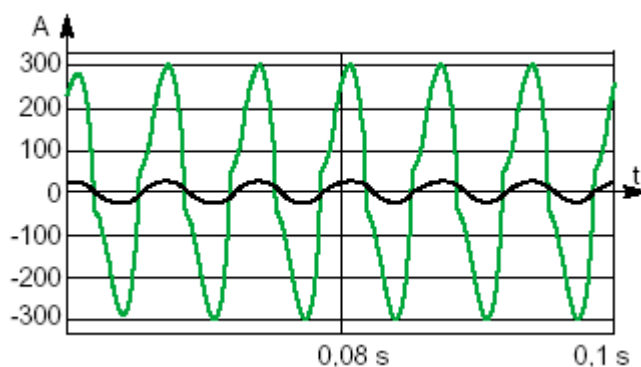


Figure (2-24) : Différences d'amplitude du courant neutre avec et sans utilisation d'une réactance zigzag

### II.6.5 .Filtre de rang 3 dans le neutre

Le principe de ce dispositif consiste à placer un circuit bouchon accordé sur l'harmonique 3 en série avec le conducteur de neutre figure (2-25).

Sur les figures (2-26) à (2-31) sont représentées les formes d'ondes obtenues en supposant, raccordées entre phases et neutre, des charges monophasées du type décrit au paragraphe II.3.

Sont représentés successivement: le courant dans la phase, le courant dans le neutre, la tension phase -neutre, sans filtre et avec filtre.

On observe une forte réduction du courant dans le conducteur de neutre, au détriment d'une distorsion de tension importante appliquée à la tension entre phase et neutre.

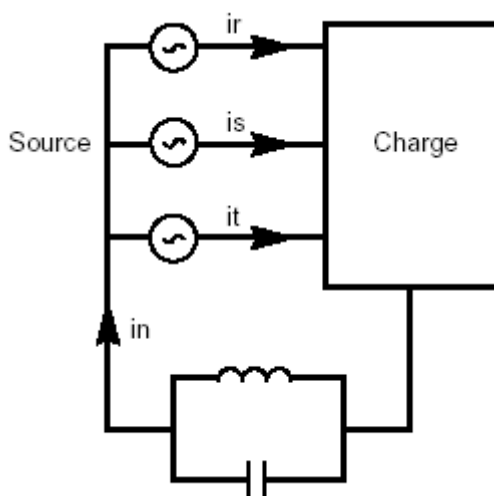


Figure (2-25) : Filtre de rang 3 dans le neutre

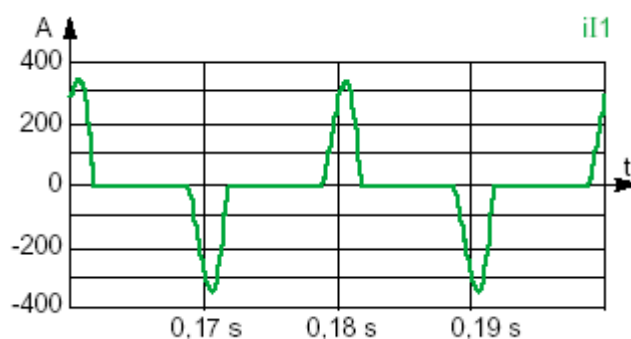


Figure (2-26) : Courant de ligne sans filtre

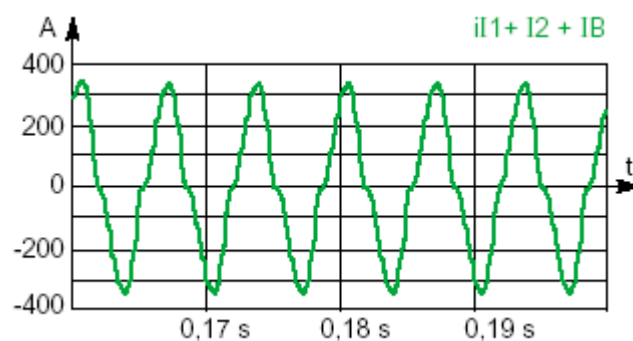


Figure (2-27) : Courant neutre sans filtre

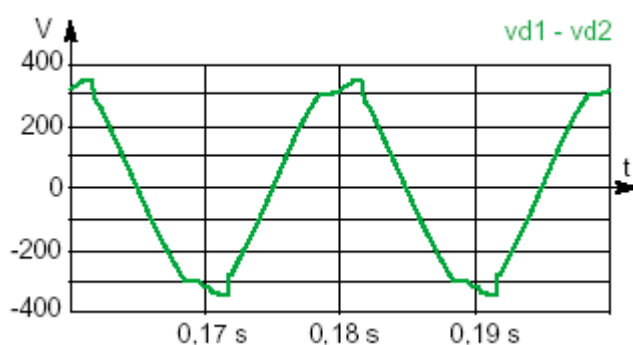


Figure (2-28) : Tension simple sans filtre

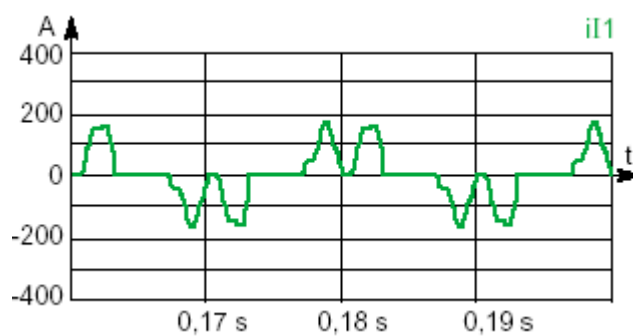


Figure (2-29): Courant ligne avec filtre

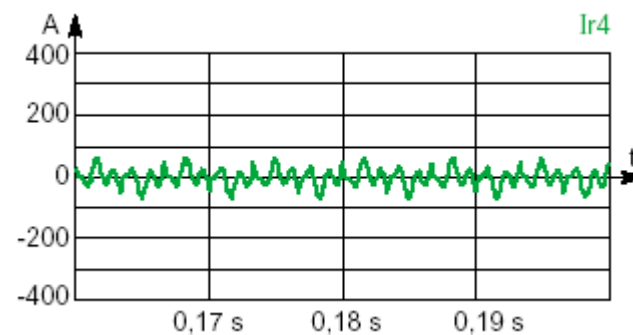


Figure (2-30) : Courant neutre avec filtre

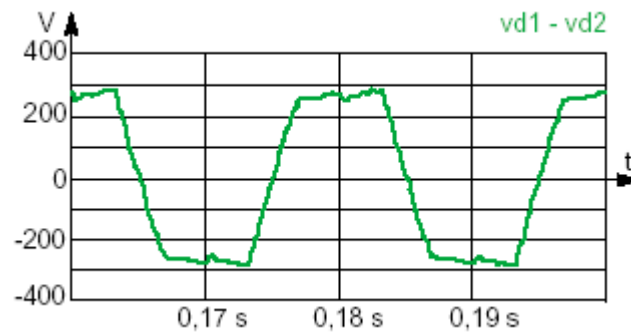


Figure (2-31) : Tension simple avec filtre

## II.7.Dispositifs de filtrage [12]

ü Placer un filtre passif accordé sur le rang 3 à proximité des charges non linéaires, figure (2-32). A noter que cette solution requiert des constituants relativement lourds, compte tenu de la faible fréquence d'accord.

ü Utiliser un compensateur actif placé à proximité des charges non linéaires.

Figure (2-32).

A noter que ce type de dispositif a la capacité de compenser un courant harmonique dans le neutre dont l'amplitude est triple de celle du courant de phase.

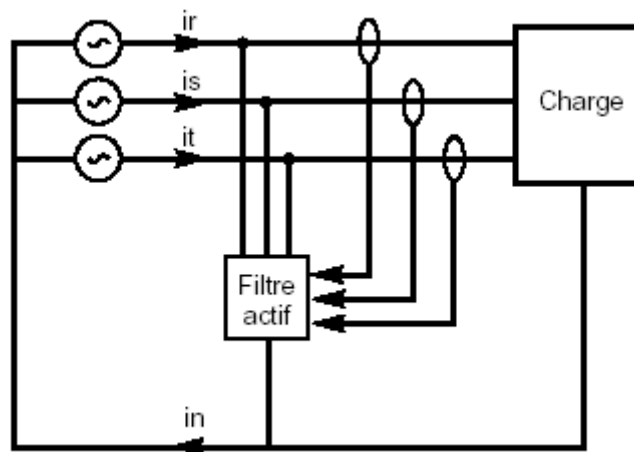


Figure (2-32): Filtre actif

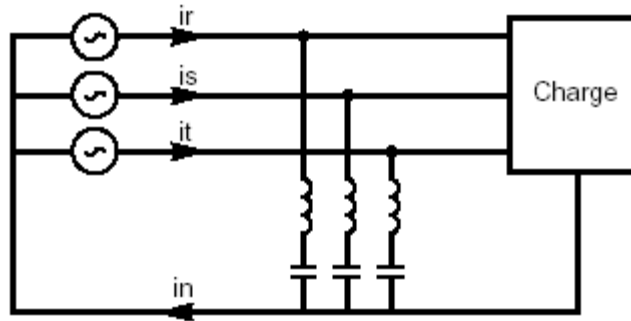


Figure (2-33) : Filtre passif de rang 3

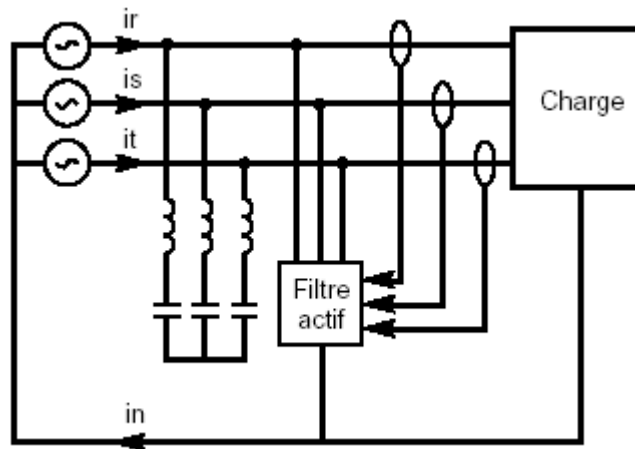


Figure (2-34) : Filtre hybride

## Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu que l'harmonique de rang 3, entraîne des surcharges très importantes dans une installation électrique où le neutre est distribué ; où on a à faire au phénomène du foisonnement, c'est-à-dire une addition des harmoniques, contrairement au cas normal, où le courant du neutre est nul dans le cas d'une charge équilibrée ou linéaire.

Il est impératif de tenir compte de la section du neutre ; à cause du retour permanent du courant homopolaire dans ce neutre.

Pour résoudre cet aléa, on a recourt à quelques solutions qu'on peut apporter aux différentes installations, et cela se résume à introduire des différents filtres.

# Chapitre III

## Partie pratique

## Introduction

Dans le cadre de notre travail, nous avons mené notre étude sur le réseau de l'entreprise ENIEM où nous avons mesuré différents paramètres (tension, courant, TDH....) de trois phases et du neutre du bloc administratif de l'ENIEM, ainsi que les phases et le neutre d'une machine soudeuse. Ces mesures seront ensuite comparées aux normes CEI (commission électrotechnique internationale).

### III.1.Description de l'ENIEM

L'ENIEM (Entreprise Nationale des Industries Electroménagers) est leader de l'électroménager en Algérie car elle possède des capacités de production, et elle veille à améliorer la qualité de ses produits pour pouvoir faire concurrence au marché.

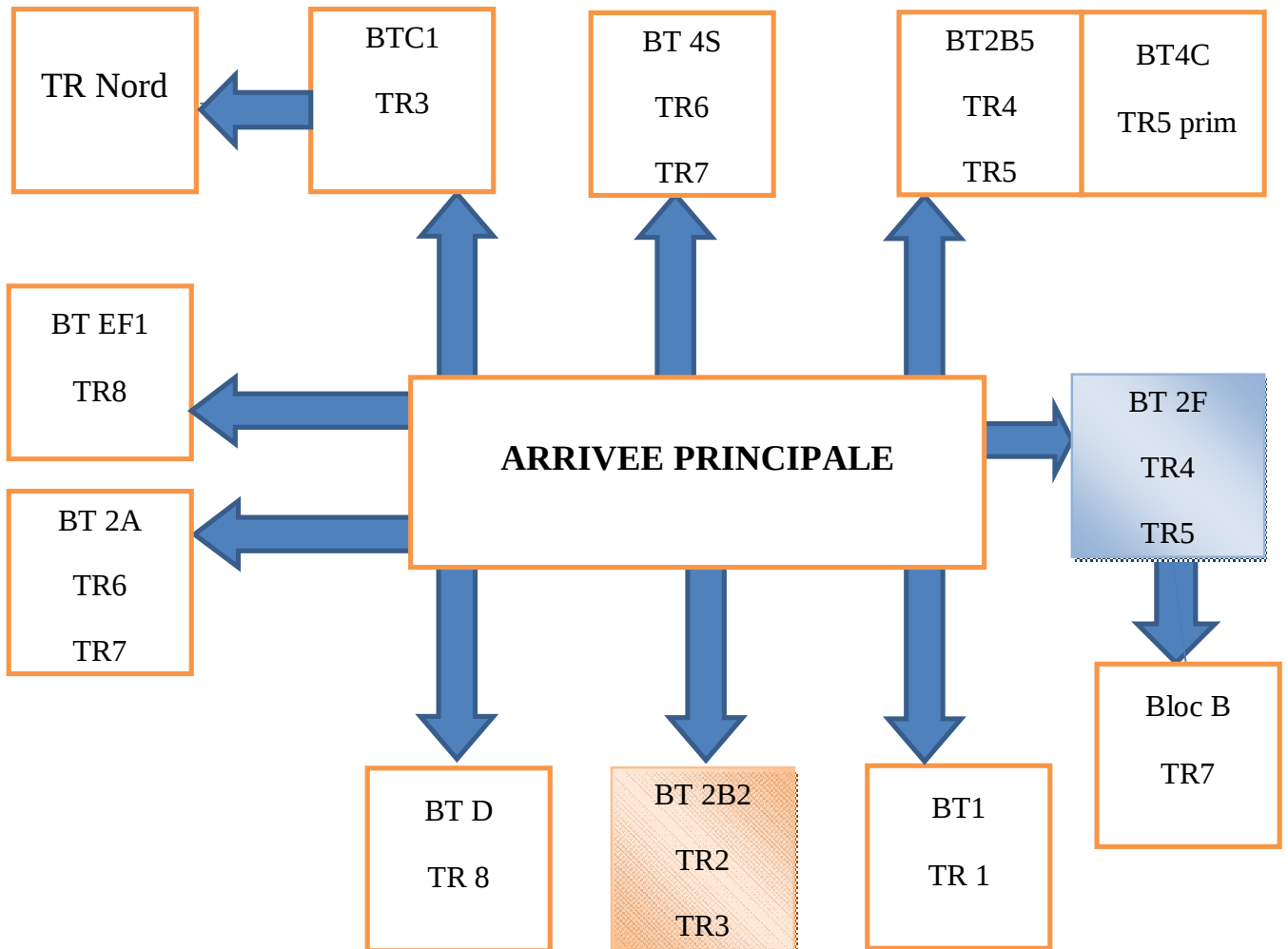


Figure (3-1) : Schéma bloc de l'ENIEM (côté électrique)

### III.2 .Matériel de la mesure

L'outil de mesure utilisé dans nos mesures est la pince harmonique de type F 27. La pince harmonique F 27 est un instrument de mesure capable de mesurer les différents paramètres (tension, courant, puissance, TDH) d'une phase, elle permet d'enregistrer les valeurs mesurées, et même de les enregistrer sur un micro-ordinateur à l'aide d'une sortie optique RS232.

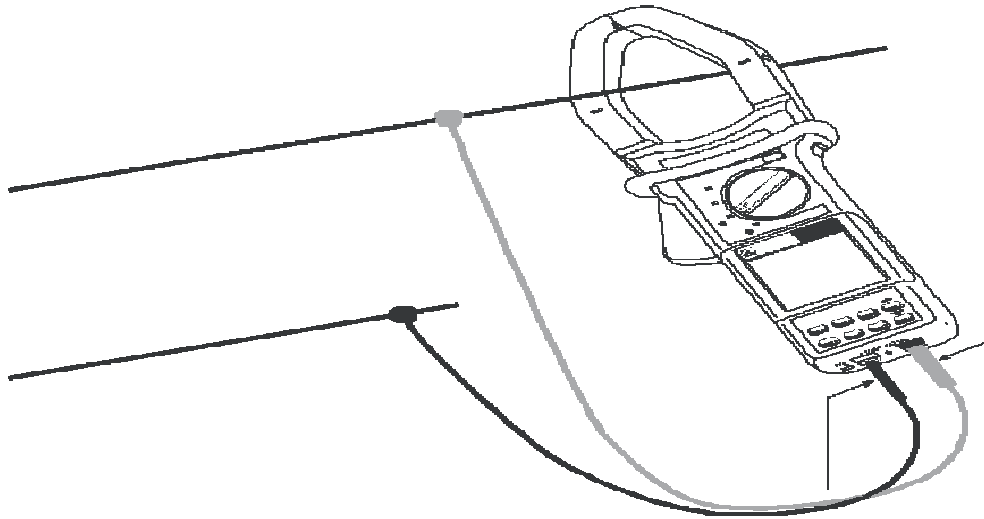


Figure (3-2): La pince harmonique F 27

### III.3. Présentation de la soudeuse

La machine soudeuse de condensateurs a pour rôle de souder des condensateurs, elle est représentée par la figure suivante:



Figure (3-3) : Machine soudeuse de condensateurs

**III.4 .Textes et normes de référence [10]**

De toute évidence, la limitation de la pollution harmonique se concrétise par un travail commun entre les deux partenaires, distributeur et utilisateur. Du côté du distributeur d'énergie électrique, il est essentiel de fournir une qualité de l'énergie électrique présentant la distorsion la plus faible possible. Du côté de l'utilisateur de cette énergie électrique, il est impératif de s'assurer que les charges polluantes identifiées ne contribuent pas à dégrader la tension du réseau, ce qui serait préjudiciable pour le fonctionnement des autres récepteurs.

La limitation des courants harmoniques s'inscrit dans les règles de compatibilité électromagnétique. Les normes **CEI 61000-3-2**, **61000-3-4** et **61000-3-6** précisent les limites d'émission harmonique à respecter.

La norme est un recueil de règles, de descriptions ou encore de méthodologies qu'un constructeur utilise comme référence afin de définir le produit qu'il fabrique et de réaliser les tests des produits élaborés.

La norme **CEI 61000-3-2** définit les limites en courants harmoniques pour les appareils de moins de 16 A par phase.

La norme **CEI 61000 -2-2** définit les limites en tensions harmoniques pour les réseaux à basse tension.

| Harmoniques impairs |          | Harmoniques pairs |          |
|---------------------|----------|-------------------|----------|
| Rang h              | Taux (%) | Rang h            | Taux (%) |
| 3                   | 5        | 2                 | 2        |
| 5                   | 6        | 4                 | 1        |
| 7                   | 5        | 6                 | 0,5      |
| 9                   | 1,5      | 8                 | 0,5      |
| 11                  | 3,5      | 10                | 0,5      |
| 13                  | 3        | 12                | 0,2      |

**Tableau (3-1) : Taux d'harmoniques spécifiés par la norme CEI 61000-2-2**

| Rang harmonique            | Courant harmonique maximal admissible en ampères (A) |
|----------------------------|------------------------------------------------------|
| <b>Harmoniques impairs</b> |                                                      |
| 3                          | 2,3                                                  |
| 5                          | 1,14                                                 |
| 7                          | 0,77                                                 |
| 11                         | 0,33                                                 |
| 13                         | 0,21                                                 |
| $15 \leq n \leq 39$        | $0,15 \times \frac{15}{n}$                           |
| <b>Harmoniques pairs</b>   |                                                      |
| 2                          | 1,08                                                 |
| 4                          | 0,43                                                 |
| 6                          | 0,30                                                 |
| $8 \leq n \leq 40$         | $0,23 \times \frac{8}{n}$                            |

**Tableau (3-2) : Taux d'harmoniques spécifiés par la norme (CEI61000-3-2).**

### III.5 .Le contrat Émeraude

La mise en place d'un nouveau contrat d'abonnement baptisé "contrat Émeraude", élaboré en concertation avec les représentants des consommateurs industriels d'énergie électrique, a pour but d'améliorer ce contexte, et ceci depuis 1996. Le contrat Émeraude est destiné à la fourniture de l'énergie électrique en tarif vert, et à établir les règles de fourniture et d'exploitation de l'énergie entre le distributeur et l'utilisateur en termes de qualité de l'énergie électrique.

| Harmoniques impairs |           |                |           | Harmoniques pairs |           |
|---------------------|-----------|----------------|-----------|-------------------|-----------|
| Non multiples de 3  |           | Multiples de 3 |           |                   |           |
| Rang                | Seuil (%) | rang           | Seuil (%) | rang              | Seuil (%) |
| 5                   | 6         | 3              | 5         | 2                 | 2         |
| 7                   | 5         | 9              | 1,5       | 4                 | 1         |
| 11                  | 3,5       | 15 et 21       | 0,5       | 6 à 24            | 0,5       |
| 13                  | 3         |                |           |                   |           |
| 17                  | 2         |                |           |                   |           |
| 19,23 et 25         | 1,5       |                |           |                   |           |
|                     |           |                |           |                   |           |

**Tableau (3-3): Taux de tension harmoniques donnés à titre indicatif par le contrat  
Emeraude**

### III.6. Partie expérimentale et analyse des résultats

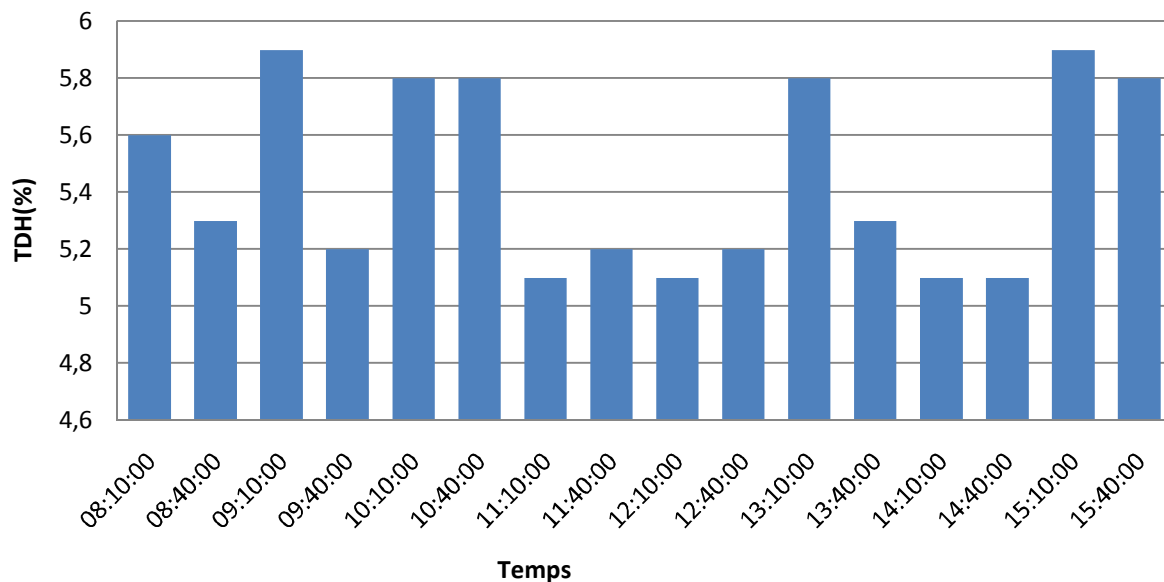
Dans la première partie de notre étude nous nous intéressons au bloc administratif, ensuite dans la deuxième partie, les relevés seront faits sur la machine soudeuse de condensateurs.

## **Partie 1 : bloc administratif de l'ENIEM**

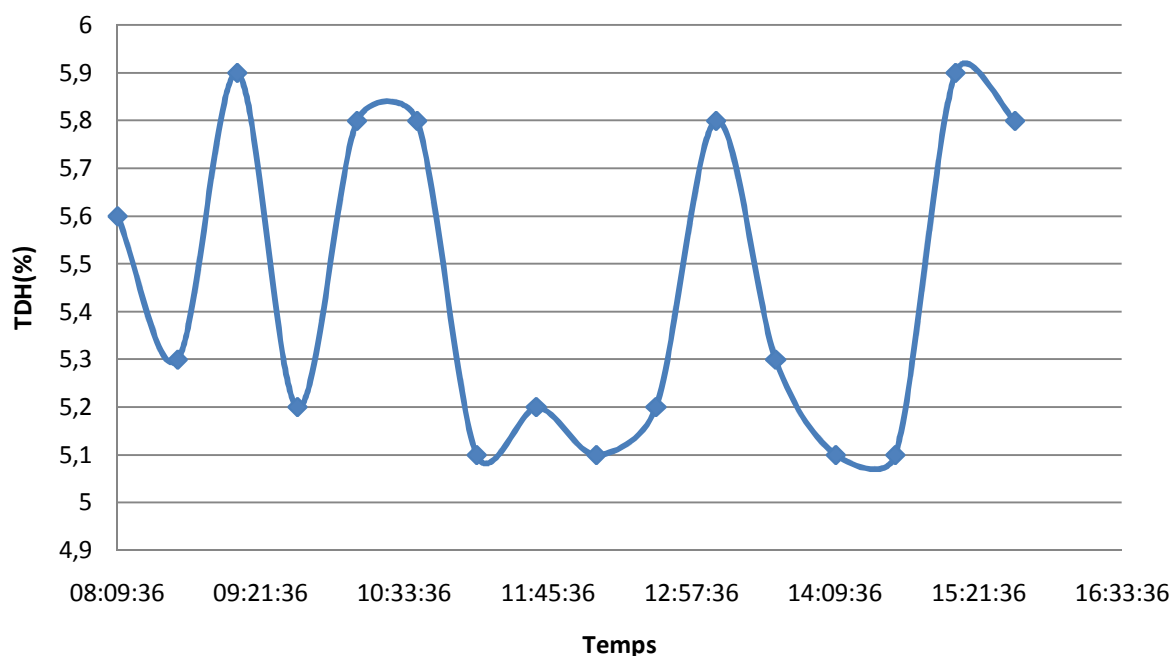
| N° | Heure    | A <sub>sc+cc</sub> | T-ID(%) | KF  | H <sub>0c</sub> | HC1 | HC2  | HC3 | H04 | H0E | H0E | H07 | H0E | H0E | H15 | H1E | H17 | H1E | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 |
|----|----------|--------------------|---------|-----|-----------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 00:00:00 | 161,6              | 5,6     | 1,1 | 0,1             | 100 | 1,8  | 3,5 | 0,2 | 3,9 | 0   | 1,1 | 0   | 1,9 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 |
| 2  | 00:30:00 | 165,8              | 5,3     | 1,1 | 0,3             | 100 | 1,5  | 3,7 | 0,4 | 3,8 | 0   | 1   | 0   | 1,7 | 0   | 0,7 | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0,2 |
| 3  | 01:00:00 | 167,8              | 5,8     | 1,1 | 0,2             | 100 | 1    | 3,8 | 0,2 | 3,7 | 0   | 1,1 | 0   | 1,8 | 0   | 0,8 | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 |
| 4  | 01:30:00 | 172,4              | 5,2     | 1,1 | 0,2             | 100 | 1,6  | 3,5 | 0,1 | 3,4 | 0   | 1,2 | 0   | 1,6 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 5  | 02:00:00 | 165,9              | 5,8     | 1,1 | 0,3             | 100 | 1,8  | 4,1 | 0,1 | 3,8 | 0   | 1,1 | 0   | 1,8 | 0   | 0,8 | 0   | 0,7 | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 |
| 6  | 02:30:00 | 168,8              | 5,8     | 1,1 | 0,2             | 100 | 1,3  | 3,8 | 0,1 | 3,9 | 0   | 1   | 0   | 1,9 | 0   | 0,8 | 0   | 0,5 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 7  | 03:00:00 | 162,7              | 5,1     | 1,1 | 0,2             | 100 | 0,98 | 4,2 | 0,1 | 3,9 | 0   | 1,3 | 0   | 1,5 | 0   | 0,8 | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 8  | 03:30:00 | 180,6              | 5,2     | 1,1 | 0,2             | 100 | 0,97 | 3,5 | 0,1 | 3,2 | 0   | 1,1 | 0   | 1,6 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 9  | 04:00:00 | 185,3              | 5,1     | 1,1 | 0,1             | 100 | 1,2  | 3,5 | 0,1 | 3,2 | 0   | 1,1 | 0   | 1,7 | 0   | 1,1 | 0   | 0,7 | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 |
| 10 | 04:30:00 | 168,4              | 5,2     | 1,1 | 0               | 100 | 1,5  | 3,8 | 0,2 | 3,8 | 0   | 1,1 | 0   | 1,7 | 0   | 0,8 | 0   | 0,5 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 11 | 05:00:00 | 167,8              | 5,8     | 1,1 | 0               | 100 | 1,2  | 3,7 | 0,3 | 3,7 | 0   | 1,2 | 0   | 1,7 | 0   | 0,7 | 0   | 0,7 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 12 | 05:30:00 | 168,6              | 5,3     | 1,1 | 0               | 100 | 1,2  | 4,8 | 0,2 | 3,5 | 0   | 1   | 0   | 1,7 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 13 | 06:00:00 | 165,7              | 5,1     | 1,1 | 0,1             | 100 | 1,5  | 4,5 | 0,1 | 3,3 | 0   | 1   | 0   | 1,8 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,4 | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 |
| 14 | 06:30:00 | 168,9              | 5,1     | 1,1 | 0               | 100 | 1,1  | 3,5 | 0,1 | 3,2 | 0   | 1,1 | 0   | 1,5 | 0   | 0,8 | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 |
| 15 | 07:00:00 | 161,8              | 5,8     | 1,1 | 0               | 100 | 1,1  | 3,8 | 0,1 | 3,2 | 0   | 1,2 | 0   | 1,6 | 0   | 0,7 | 0   | 0,5 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 16 | 07:30:00 | 158,7              | 5,8     | 1,1 | 0               | 100 | 1,1  | 3,7 | 0,1 | 3,5 | 0   | 1   | 0   | 1,4 | 0   | 0,7 | 0   | 0,5 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |

Tableau (4-4) : les relevés des courants harmoniques de la phase A

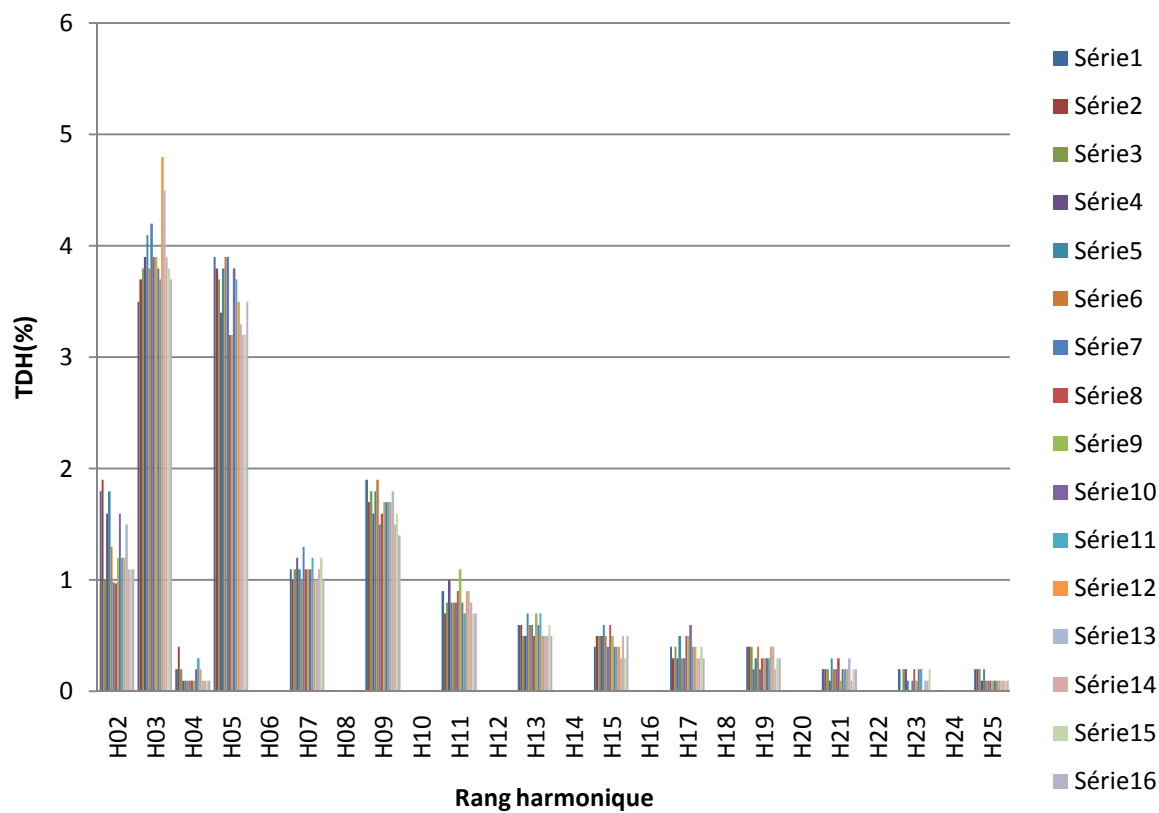
**Figure (3-4): Histogramme des TDH du courant de la phase A du bloc administratif**



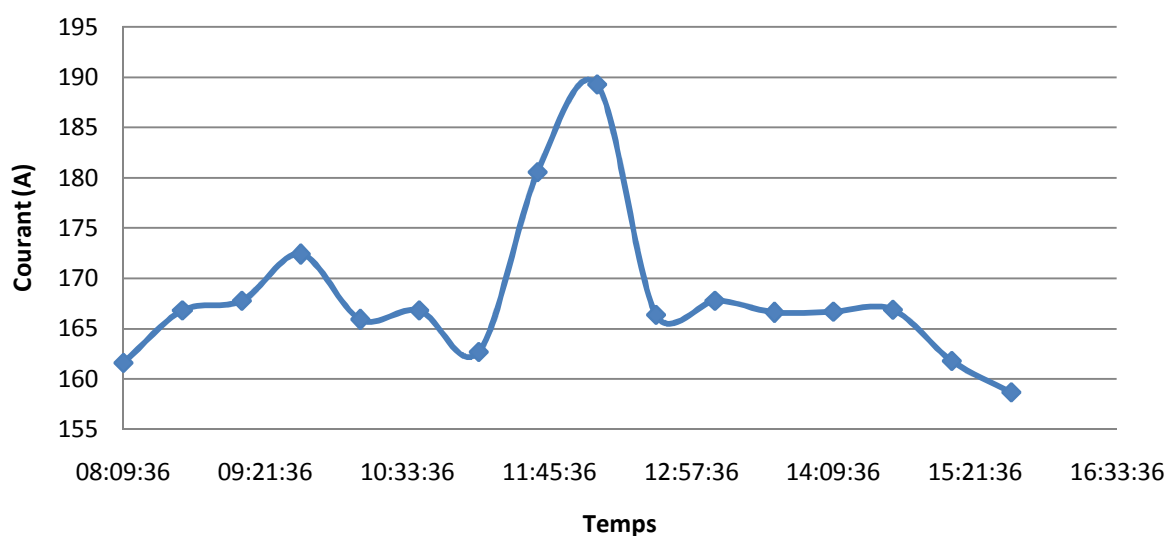
**Figure (3-5) : Courbe des TDH du courant de la phase A du bloc administratif**



**Figure (3-6): Histogramme des TDH du courant de la phase A du bloc administratif**



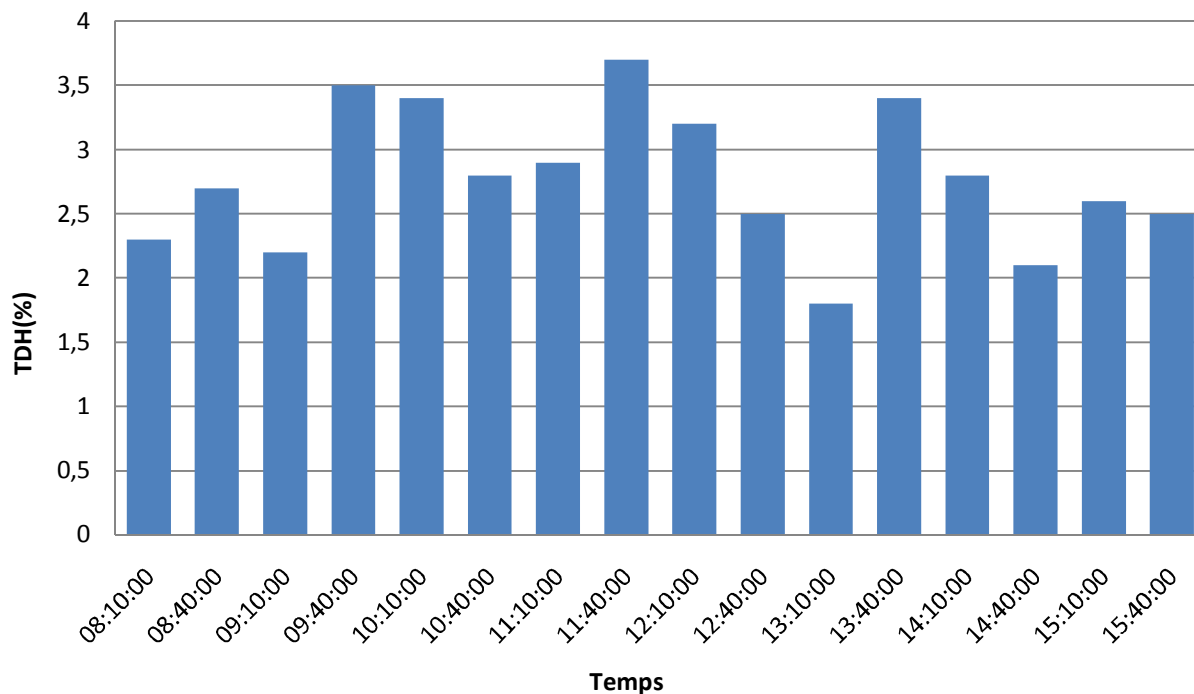
**Figure (3-7): Courbe d'évolution du courant de la phase A du bloc administratif**



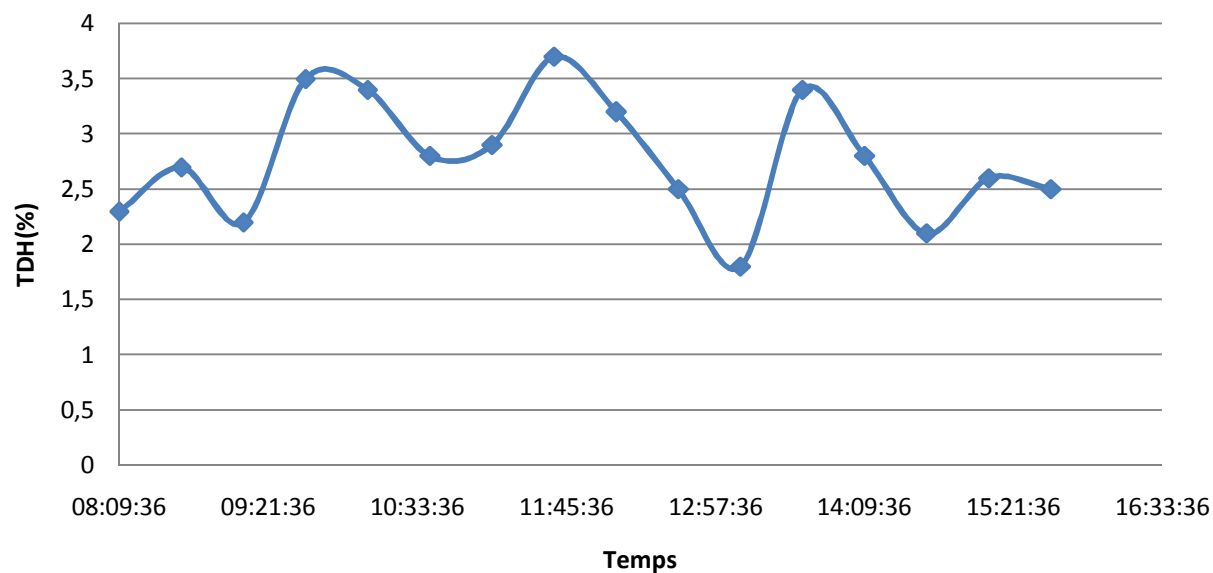
| N° | Heure    | Abséc | THD(%) | KF | H00 | H01 | H02 | H03 | H04 | H05 | H06 | H07 | H08 | H09 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 |   |
|----|----------|-------|--------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 1  | 00:00:00 | 143.6 | 2.3    | 1  | 0.3 | 100 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 1.5 | 0.3 | 1.2 | 0.1 | 0.8 | 0   | 0.4 | 0   | 0.3 | 0   | 0.1 | 0   | 0.2 | 0   | 0.3 | 0   | 0.2 | 0   | 0.3 | 0   | 0   |   |
| 2  | 00:30:00 | 146.3 | 2.7    | 1  | 0.2 | 100 | 1.7 | 0.4 | 0.3 | 1.4 | 0.1 | 1   | 0   | 0.8 | 0   | 0.4 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0.6 | 0   | 0.1 |   |
| 3  | 01:00:00 | 144.3 | 2.2    | 1  | 0.3 | 100 | 0.7 | 0.4 | 0.2 | 1.4 | 0   | 1.1 | 0   | 0.8 | 0   | 0.4 | 0   | 0.2 | 0   | 0.1 | 0   | 0.2 | 0   | 0.1 | 0   | 0.1 | 0   | 0.5 | 0   | 0   |   |
| 4  | 01:30:00 | 145.3 | 3.5    | 1  | 0.1 | 100 | 0.4 | 0.8 | 0   | 2.4 | 0.1 | 1.3 | 0   | 0.6 | 0   | 0.6 | 0   | 0.2 | 0   | 0.3 | 0   | 0.1 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.5 | 0   | 0   |   |
| 5  | 02:00:00 | 156.1 | 3.4    | 1  | 0.1 | 100 | 0.3 | 0.6 | 0.1 | 2.7 | 0   | 1.1 | 0   | 0.7 | 0   | 0.8 | 0   | 0.4 | 0   | 0.2 | 0   | 0.1 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.4 | 0   | 0   |   |
| 6  | 02:30:00 | 149.7 | 2.8    | 1  | 0.2 | 100 | 0.3 | 0.6 | 0.3 | 1.9 | 0   | 0.9 | 0   | 1.1 | 0   | 0.8 | 0   | 0.1 | 0   | 0.2 | 0   | 0.3 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.1 | 0   | 0 |
| 7  | 03:00:00 | 142.3 | 2.9    | 1  | 0.2 | 100 | 0.2 | 0.6 | 0.2 | 1.7 | 0.3 | 1.7 | 0   | 1   | 0   | 0.6 | 0   | 0.3 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.3 | 0   | 0   |   |
| 8  | 03:30:00 | 138.6 | 3.7    | 1  | 0.2 | 100 | 1   | 0.8 | 0   | 1.5 | 0.1 | 1.2 | 0   | 1.2 | 0   | 0.4 | 0   | 0.3 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.3 | 0   | 0   |   |
| 9  | 04:00:00 | 155.9 | 3.2    | 1  | 0.2 | 100 | 0.5 | 1   | 0   | 2.5 | 0.1 | 1   | 0   | 0.8 | 0   | 0.7 | 0   | 0.3 | 0   | 0.1 | 0   | 0.2 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.3 | 0   | 0.2 |   |
| 10 | 04:30:00 | 151.3 | 2.5    | 1  | 0.2 | 100 | 0.7 | 0.5 | 0.1 | 1.6 | 0.2 | 1.3 | 0   | 1   | 0   | 0.5 | 0   | 0.4 | 0   | 0.1 | 0   | 0.3 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0.3 | 0   | 0   |   |
| 11 | 05:00:00 | 148.9 | 1.8    | 1  | 0.3 | 100 | 0.5 | 1   | 0.5 | 1.4 | 0.1 | 1.2 | 0   | 0.9 | 0   | 0.4 | 0   | 0.1 | 0   | 0.3 | 0   | 0.3 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0.5 | 0   | 0   |   |
| 12 | 05:30:00 | 145.9 | 3.4    | 1  | 0.3 | 100 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 1.4 | 0.1 | 1.1 | 0   | 0.8 | 0   | 0.5 | 0   | 0.3 | 0   | 0.3 | 0   | 0.2 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.2 | 0   | 0   |   |
| 13 | 06:00:00 | 150.1 | 2.8    | 1  | 0.1 | 100 | 0.2 | 0.7 | 0.3 | 1.5 | 0   | 1.4 | 0   | 0.8 | 0   | 0.5 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.5 | 0   | 0.1 |   |
| 14 | 06:30:00 | 147.9 | 2.1    | 1  | 0.2 | 100 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 1.8 | 0.2 | 1.5 | 0   | 1   | 0   | 0.6 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0.1 | 0   | 0.5 | 0   | 0   |   |
| 15 | 07:00:00 | 145.1 | 2.6    | 1  | 0.2 | 100 | 0.5 | 0.5 | 0.3 | 1.3 | 0.2 | 1.1 | 0   | 0.8 | 0   | 0.7 | 0   | 0.1 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.3 | 0   | 0   |   |
| 16 | 07:30:00 | 146.5 | 2.5    | 1  | 0.2 | 100 | 0.1 | 0.4 | 0.3 | 1.2 | 0.2 | 1.2 | 0   | 0.9 | 0   | 0.6 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0.2 | 0   | 0   | 0   | 0.1 | 0   | 0.3 | 0   | 0   |   |

Tableau (4-5) : les relevés des courants harmoniques de la phase B

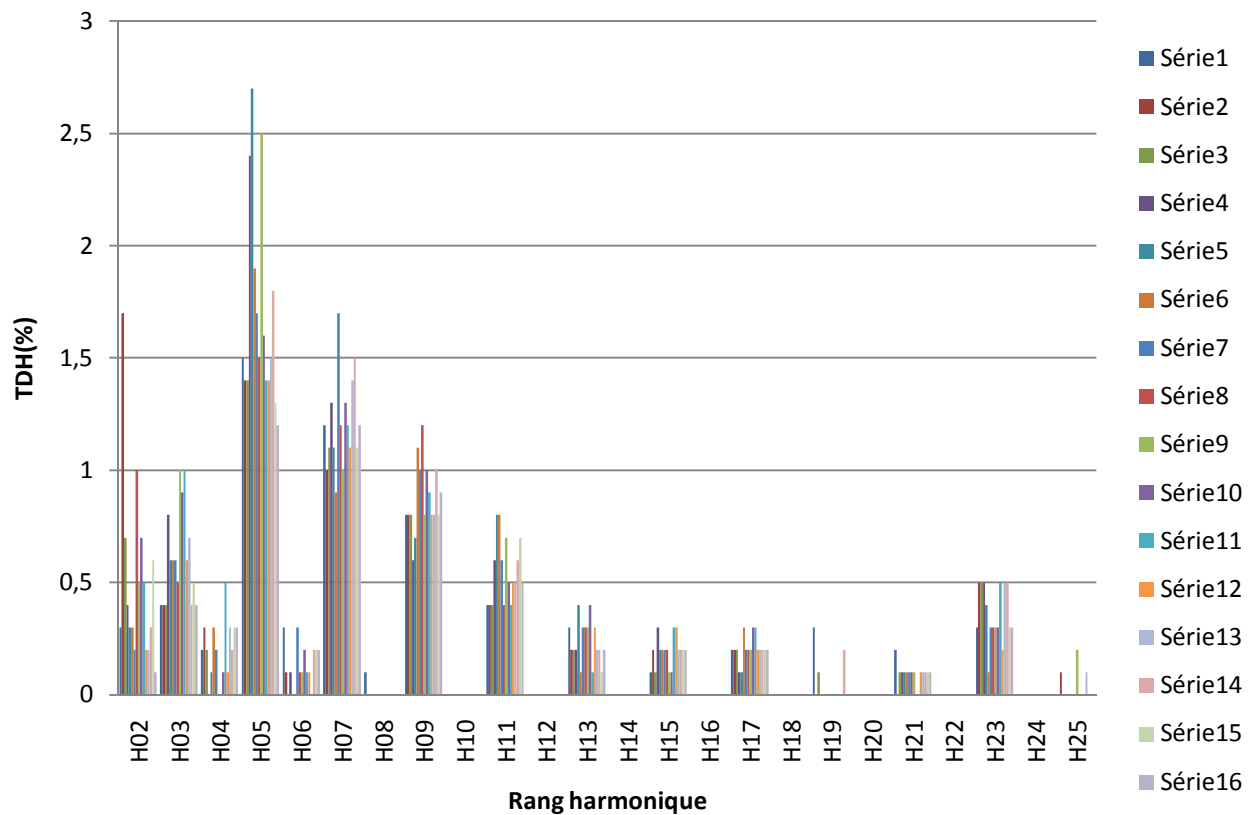
**Figure (3-8): Histogramme des TDH du courant de la phase B du bloc administratif**



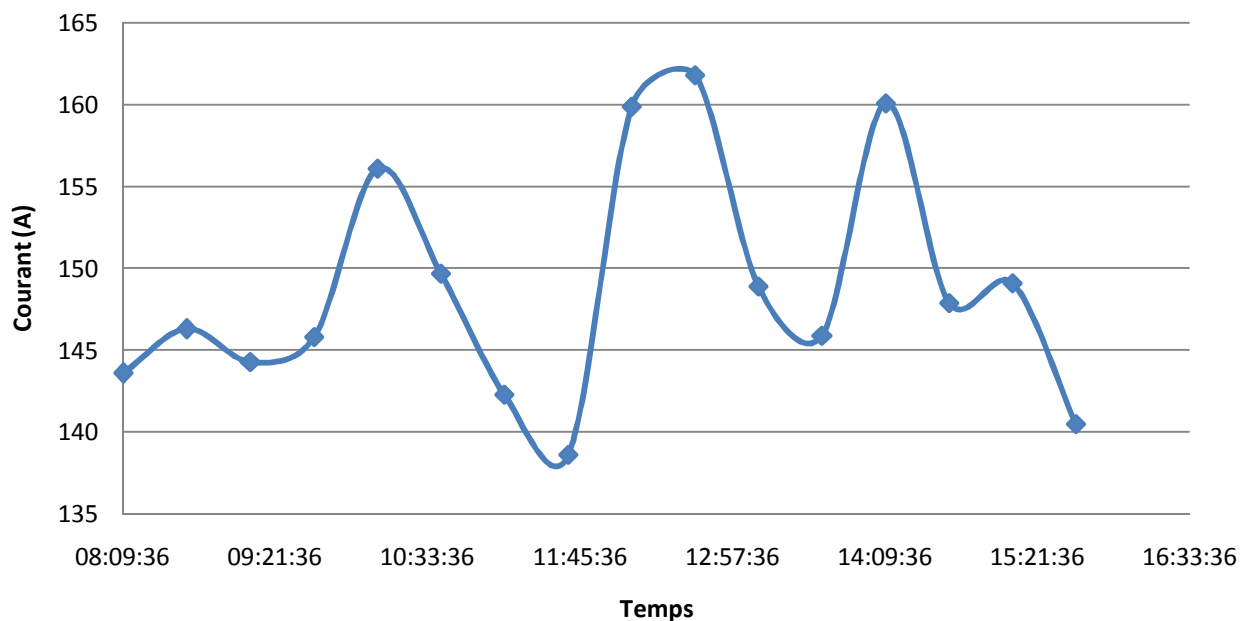
**Figure(3-9): Courbe des TDH du courant de la phase B du bloc administratif**



**Figure(3-10): Histogramme des TDH du courant de la phase B du bloc administratif**



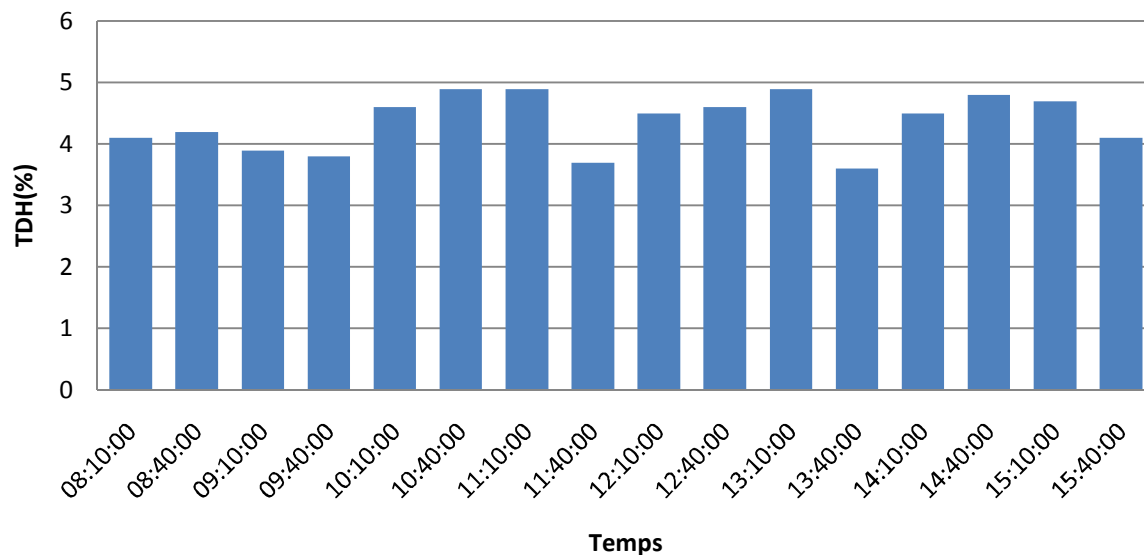
**Figure(3-11): Courbe d'évolution du courant de la phase B du bloc administratif**



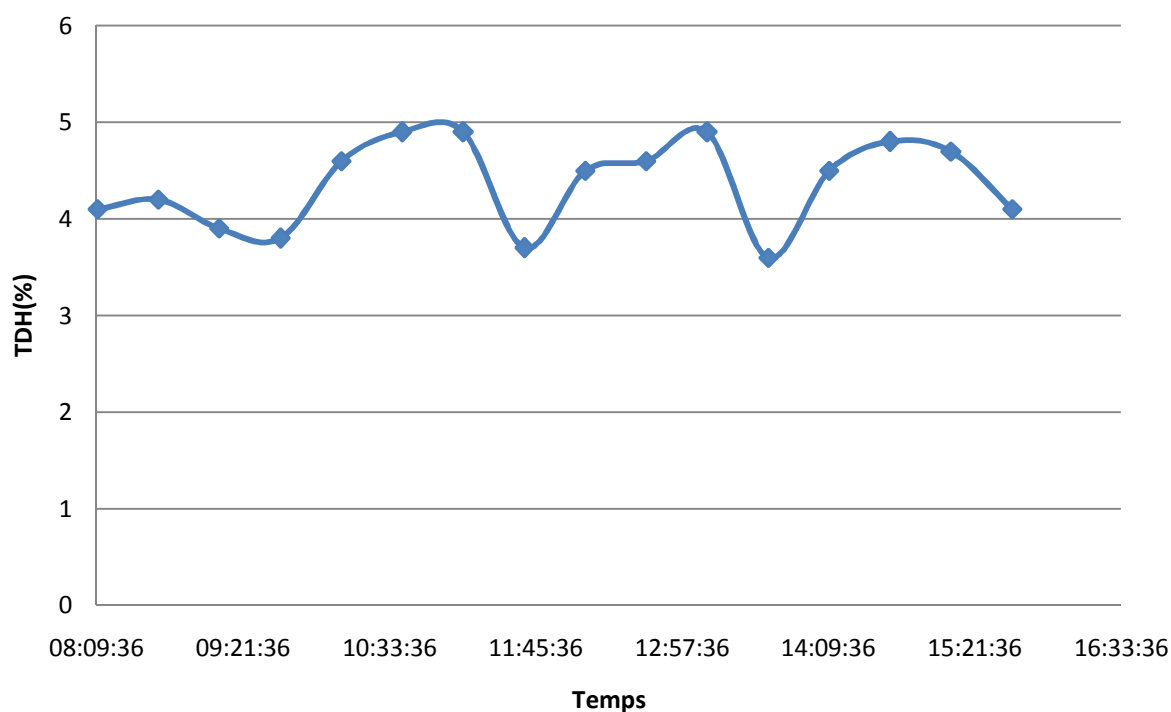
| N° | Heure    | Asctdc | THD(%) | VF  | Hdc | H01 | H02 | H03 | H04 | H05 | H06 | H07 | H08 | H09 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 |
|----|----------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 00:00:00 | 142,2  | 4,1    | 1,1 | 0,2 | 100 | 1,7 | 2,2 | 0,1 | 2,4 | 0,1 | 0,9 | 0,1 | 1,2 | 0   | 0,6 | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0,4 | 0   | 0   |
| 2  | 00:30:00 | 133,5  | 4,2    | 1,1 | 0,2 | 100 | 1,5 | 2,4 | 0,3 | 2,5 | 0,1 | 0,9 | 0   | 1,3 | 0   | 0,7 | 0   | 0,5 | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 |
| 3  | 01:00:00 | 132,6  | 3,8    | 1,1 | 0,3 | 100 | 0,8 | 2,3 | 0,2 | 2,3 | 0,1 | 0,9 | 0   | 1,3 | 0   | 0,7 | 0   | 0,6 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,3 | 0   | 0,3 | 0   | 0,5 | 0   | 0,1 |
| 4  | 01:30:00 | 140,7  | 3,8    | 1,1 | 0,2 | 100 | 1   | 2,9 | 0,2 | 2,8 | 0,2 | 1   | 0   | 1,3 | 0   | 0,6 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 5  | 02:00:00 | 139,6  | 4,6    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,7 | 3,1 | 0,2 | 2,5 | 0,3 | 1,1 | 0   | 1,3 | 0   | 0,9 | 0   | 0,6 | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 | 0   | 0,5 | 0   | 0,1 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 |
| 6  | 02:30:00 | 137,9  | 4,9    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,4 | 3,4 | 0,4 | 3,1 | 0   | 0,8 | 0   | 1,2 | 0   | 0,6 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,3 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 |
| 7  | 03:00:00 | 150,7  | 4,8    | 1,1 | 0,1 | 100 | 0,5 | 2,9 | 0,6 | 3,6 | 0   | 1,4 | 0   | 1,6 | 0   | 0,4 | 0   | 0,4 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,3 | 0   |     | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 |
| 8  | 03:30:00 | 148,3  | 3,7    | 1,1 | 0,1 | 100 | 0,4 | 2,6 | 0,1 | 2,5 | 0,1 | 1,4 | 0   | 1,1 | 0   | 0,6 | 0   | 0,4 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,4 | 0   | 0,3 | 0   | 0,5 | 0   | 0,1 |
| 9  | 04:00:00 | 141,9  | 4,8    | 1,1 | 0,3 | 100 | 1   | 3,3 | 0,1 | 2,6 | 0,1 | 1   | 0   | 1   | 0   | 0,7 | 0   | 0,5 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 |
| 10 | 04:30:00 | 150,8  | 4,6    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,6 | 4,1 | 0,2 | 2,8 | 0,1 | 1,2 | 0   | 1,2 | 0   | 0,6 | 0   | 0,6 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0,4 | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 |
| 11 | 05:00:00 | 145,6  | 4,9    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,7 | 2,7 | 0,3 | 1,9 | 0,2 | 1,2 | 0   | 0,9 | 0   | 0,6 | 0   | 0,4 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0,3 | 0   | 0,5 | 0   | 0   |
| 12 | 05:30:00 | 133,9  | 3,6    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,8 | 3,1 | 0,1 | 1,6 | 0   | 1,6 | 0   | 0,7 | 0   | 0,6 | 0   | 0,5 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,5 | 0   | 0,1 |
| 13 | 06:00:00 | 145,1  | 4,8    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,4 | 4,2 | 0,2 | 2,3 | 0,3 | 0,9 | 0   | 1,4 | 0   | 0,6 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,3 | 0   | 0,3 | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 |
| 14 | 06:30:00 | 138,1  | 4,8    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,5 | 3,1 | 0,5 | 2,7 | 0,1 | 1   | 0   | 0,3 | 0   | 0,8 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,3 | 0   | 0,4 | 0   | 0,1 |
| 15 | 07:00:00 | 148,5  | 4,7    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,8 | 2,8 | 0,3 | 2,9 | 0,2 | 1,3 | 0   | 1,1 | 0   | 0,7 | 0   | 0,6 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,3 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 |
| 16 | 07:30:00 | 134,5  | 4,1    | 1,1 | 0,2 | 100 | 0,7 | 2,1 | 0,3 | 2,2 | 0,2 | 1,3 | 0   | 1,2 | 0   | 0,7 | 0   | 0,4 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 |

Tableau (4-6) : les relevés des courants harmoniques de la phase C

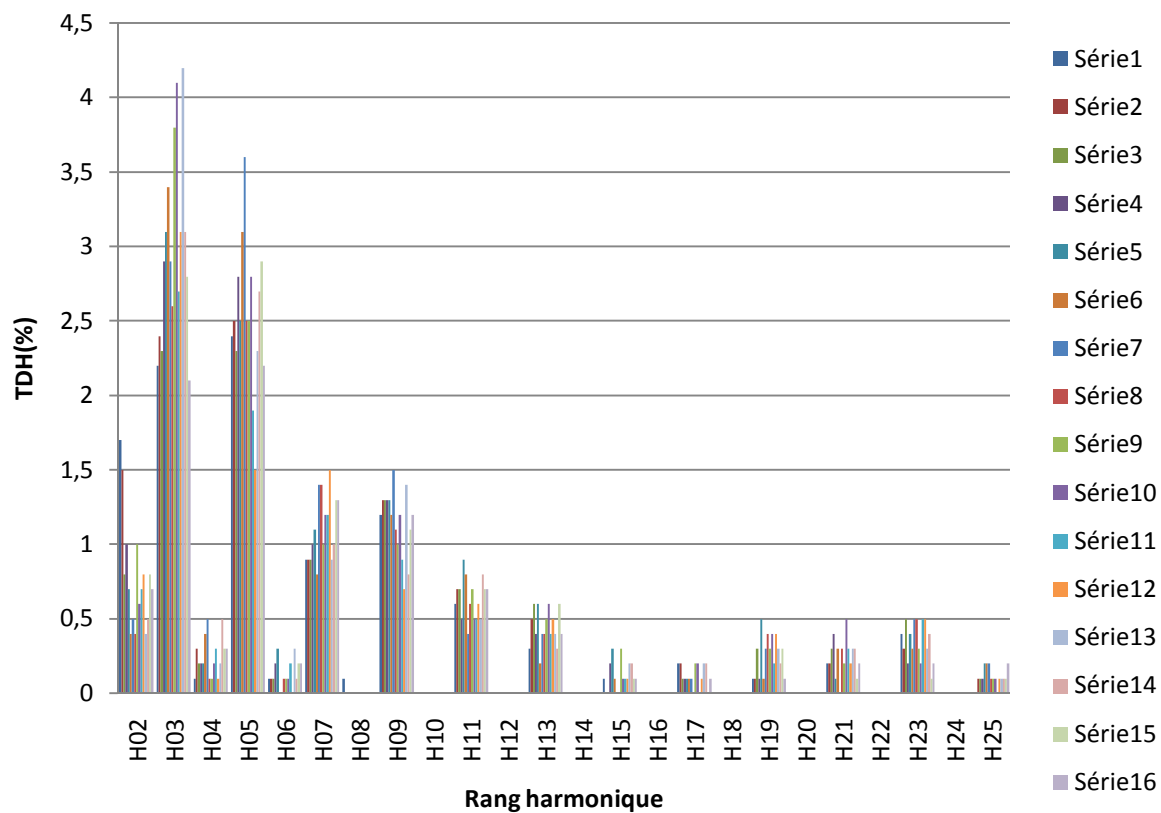
**Figure(3-12): Histogramme des TDH du courant de la phase C du bloc administratif**



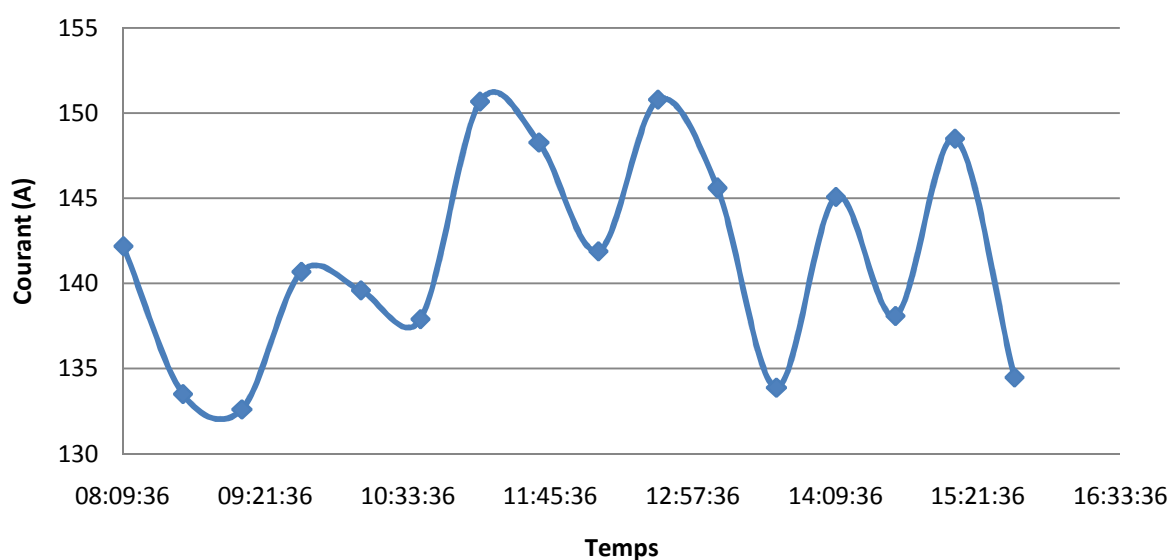
**Figure(3-13): Courbe des TDH du courant de la phase C du bloc administratif**



**Figure(3-14): Histogramme des TDH du courant de la phase C du bloc administratif**



**Figure(3-15): Courbe d' évolution du courant de la phase C du bloc administratif**



**Interprétation des résultats :**

Après avoir calculé les valeurs moyennes des différents TDH globaux et des TDH individuels de chaque phase (A, B, C) à partir des tableaux (4-5), (4-6), (4-7) on a obtenu les résultats qui sont représentés dans le tableau suivant :

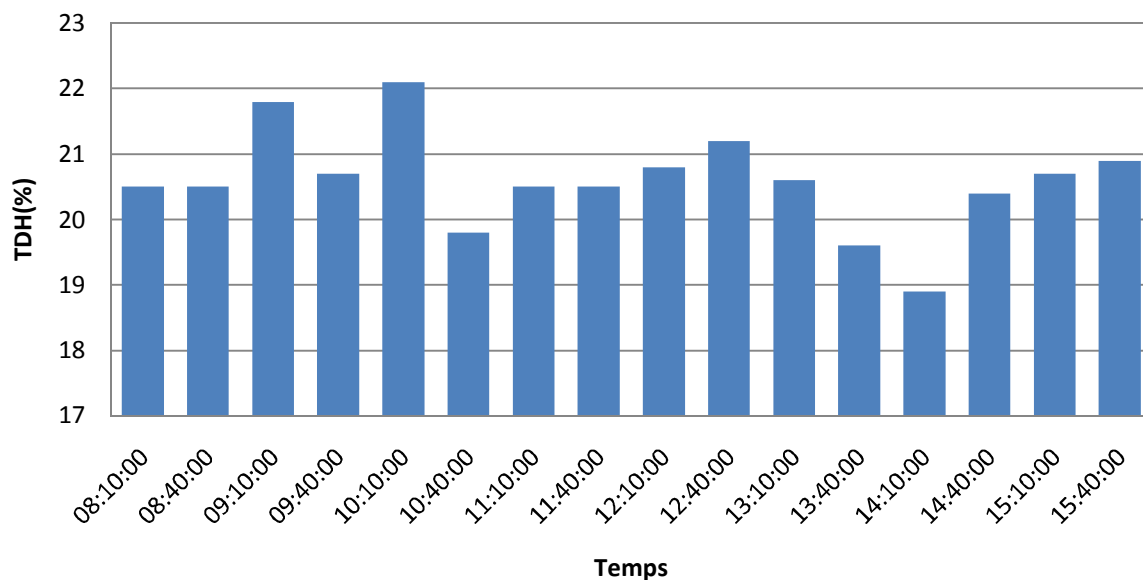
|         | TDH <sub>gmoy</sub><br>(%) | TDH3<br>(%) | TDH5<br>(%) | TDH7<br>(%) | TDH9<br>(%) | TDH11<br>(%) | TDH13<br>(%) | TDH15<br>(%) | TDH23<br>(%) |
|---------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Phase A | 5,45                       | 3,93        | 3,56        | 1,1         | 1,68        | 0,83         | 0            | 0            | 0            |
| Phase B | 2,77                       | 0,61        | 1,7         | 1,2         | 0,875       | 0,55         | 0            | 0            | 0            |
| Phase C | 4,36                       | 2,98        | 2,53        | 1,11        | 1,15        | 0,63         | 0            | 0            | 0            |

- L'analyse des relevés des trois phases (A, B, C) fait apparaitre un TDH global relativement faible d'harmonique en courant.
- Une étude de Fourier permet d'affirmer que les rangs harmoniques pairs sont nuls.
- Si on examine les amplitudes des harmoniques impairs. On remarque bien la prépondérance de l'harmonique de rang 3.
- Donc les résultats trouvés dans les trois phases sont satisfaisants, où on voit bien que la pollution harmonique est loin d'être un danger au moment où le TDH global est faible.

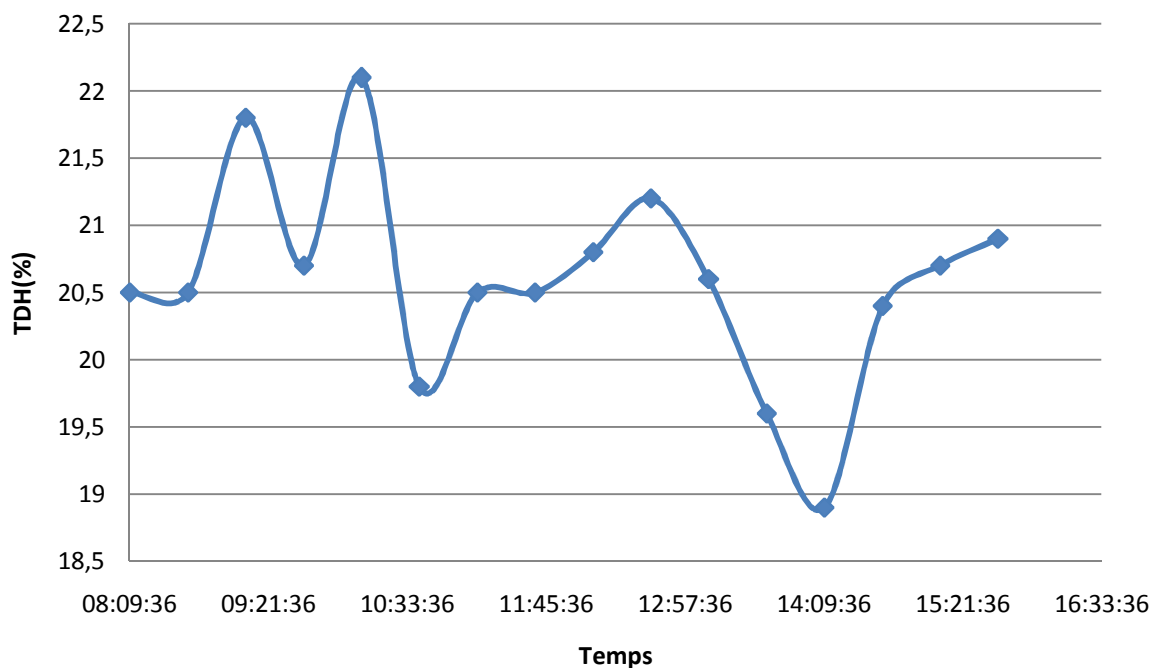
| N° | Heure    | P <sub>act</sub> (dc) | THD(%) | KF  | H01  | H02 | H03 | H04  | H05 | H06 | H07 | H08 | H09 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 |     |
|----|----------|-----------------------|--------|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 00:00:00 | 0,63                  | 20,5   | 1,3 | 23,4 | 100 | 1   | 17,1 | 0,5 | 5,3 | 0,5 | 6,3 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 2,4 | 0   | 0,1 |
| 2  | 00:30:00 | 0,62                  | 20,5   | 1,3 | 20,7 | 100 | 1,5 | 17,7 | 1   | 5,9 | 1   | 4,9 | 0   | 1   | 0   | 1,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0   | 0   | 3   | 0   | 0,2 |
| 3  | 01:00:00 | 0,61                  | 21,8   | 1,3 | 21,3 | 100 | 0,5 | 17,5 | 1   | 5,4 | 0,3 | 5,9 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 2,5 | 0   | 0,1 |
| 4  | 01:30:00 | 0,61                  | 20,7   | 1,3 | 21,9 | 100 | 1   | 18,9 | 0,5 | 6,2 | 0   | 7,4 | 0   | 0,9 | 0   | 1   | 0   | 1,3 | 0   | 0,7 | 0   | 0,4 | 0   | 0,5 | 0   | 1   | 0   | 2,9 | 0   | 0,1 |
| 5  | 02:00:00 | 0,6                   | 22,1   | 1,3 | 20,7 | 100 | 1   | 17,5 | 0,5 | 5,7 | 0   | 5,7 | 0   | 1,4 | 0   | 0,5 | 0   | 1,1 | 0   | 0,4 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 1   | 0   | 2,8 | 0   | 0,1 |
| 6  | 02:30:00 | 0,62                  | 19,8   | 1,3 | 20,7 | 100 | 0,5 | 17,3 | 0,5 | 4,9 | 0,4 | 4,3 | 0   | 1,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,9 | 0   | 0,6 | 0   | 0,2 | 0   | 0,5 | 0   | 0,4 | 0   | 2,5 | 0   | 0,1 |
| 7  | 03:00:00 | 0,62                  | 20,5   | 1,3 | 19,9 | 100 | 0,5 | 17,5 | 1   | 5,5 | 0,5 | 6,4 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,2 | 0   | 0,5 | 0   | 0,7 | 0   | 3,2 | 0   | 0,1 |
| 8  | 03:30:00 | 0,6                   | 20,5   | 1,3 | 23,7 | 100 | 0,5 | 17,3 | 0,3 | 6,5 | 0,5 | 6,3 | 0   | 1   | 0   | 0,4 | 0   | 1   | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0,5 | 0   | 2,6 | 0   | 0,1 |
| 9  | 04:00:00 | 0,6                   | 20,8   | 1,3 | 20,3 | 100 | 0,4 | 17,4 | 0,7 | 5,1 | 0,5 | 6,5 | 0   | 1   | 0   | 1,4 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,5 | 0   | 2,7 | 0   | 0   |
| 10 | 04:30:00 | 0,63                  | 21,2   | 1,3 | 22,3 | 100 | 0   | 17,1 | 0,5 | 4,3 | 0   | 4,9 | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,1 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 3,7 | 0   | 0   |
| 11 | 05:00:00 | 0,61                  | 20,6   | 1,3 | 20,7 | 100 | 0   | 17,9 | 0,5 | 5,3 | 0,5 | 6,4 | 0   | 1   | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,1 | 0   | 0,5 | 0   | 1   | 0   | 2,5 | 0   | 0   |
| 12 | 05:30:00 | 0,62                  | 19,6   | 1,3 | 20,3 | 100 | 0   | 16,3 | 0,5 | 5,3 | 0,3 | 5,9 | 0   | 0,7 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,4 | 0   | 0,5 | 0   | 0,6 | 0   | 2,1 | 0   | 0,1 |
| 13 | 06:00:00 | 0,6                   | 18,9   | 1,3 | 21,9 | 100 | 0   | 16,9 | 0,7 | 6,5 | 0,5 | 7,2 | 0   | 0,3 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0   | 0   | 0,4 | 0   | 0   | 0   | 1,3 | 0   | 0,1 |
| 14 | 06:30:00 | 0,61                  | 20,4   | 1,3 | 21,3 | 100 | 0,4 | 17,5 | 0,5 | 4,9 | 0,5 | 6,9 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,6 | 0   | 0,1 | 0   | 0,5 | 0   | 0   | 0   | 1,9 | 0   | 0,1 |
| 15 | 07:00:00 | 0,6                   | 20,7   | 1,3 | 20,7 | 100 | 0   | 17,3 | 0,5 | 4,9 | 0   | 6,1 | 0   | 1   | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 3   | 0   | 0   |
| 16 | 07:30:00 | 0,63                  | 20,9   | 1,3 | 20,3 | 100 | 0   | 17,5 | 0,5 | 4,3 | 0,5 | 6,7 | 0   | 0,9 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,5 | 0   | 0,5 | 0   | 2,5 | 0   | 0   |

Ta Tableau (4-7). Les relevés des courants harmoniques du neutre

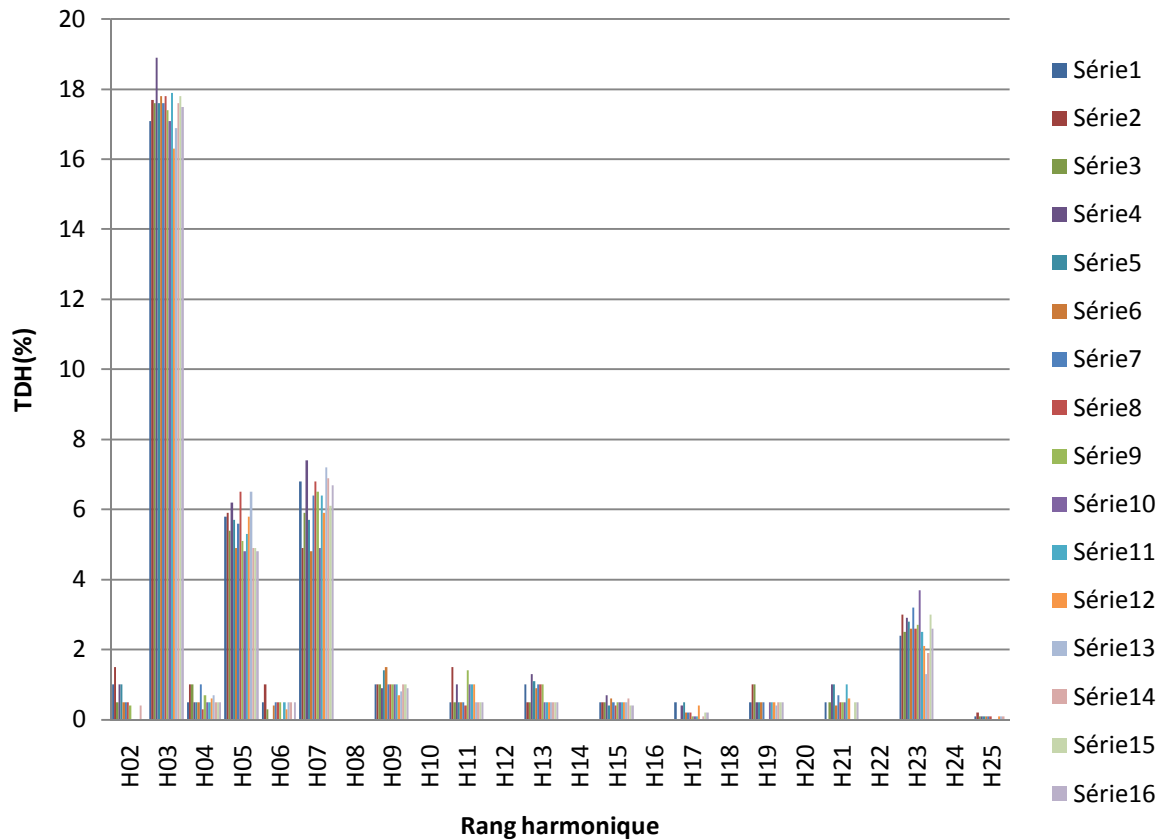
**Figure(3-16): Histogramme des TDH du courant du neutre du bloc administratif**



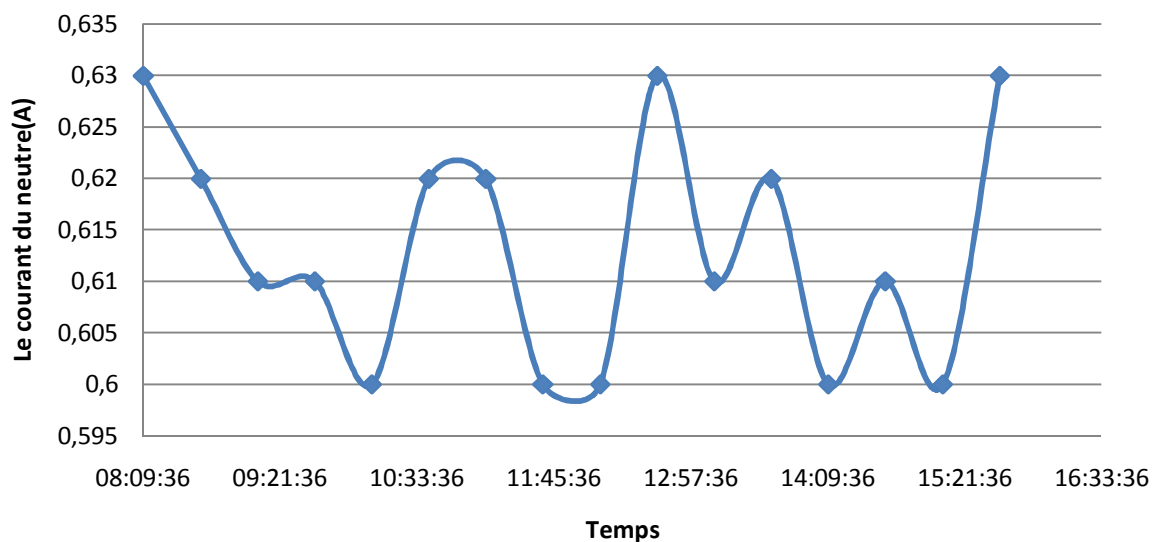
**Figure(3-17): Courbe des TDH du courant du neutre du bloc administratif**



**Figure(3-18): Histogramme des TDH du courant du neutre du bloc administratif**



**Figure(3-19): Courbe d'évolution du courant du neutre du bloc administratif**



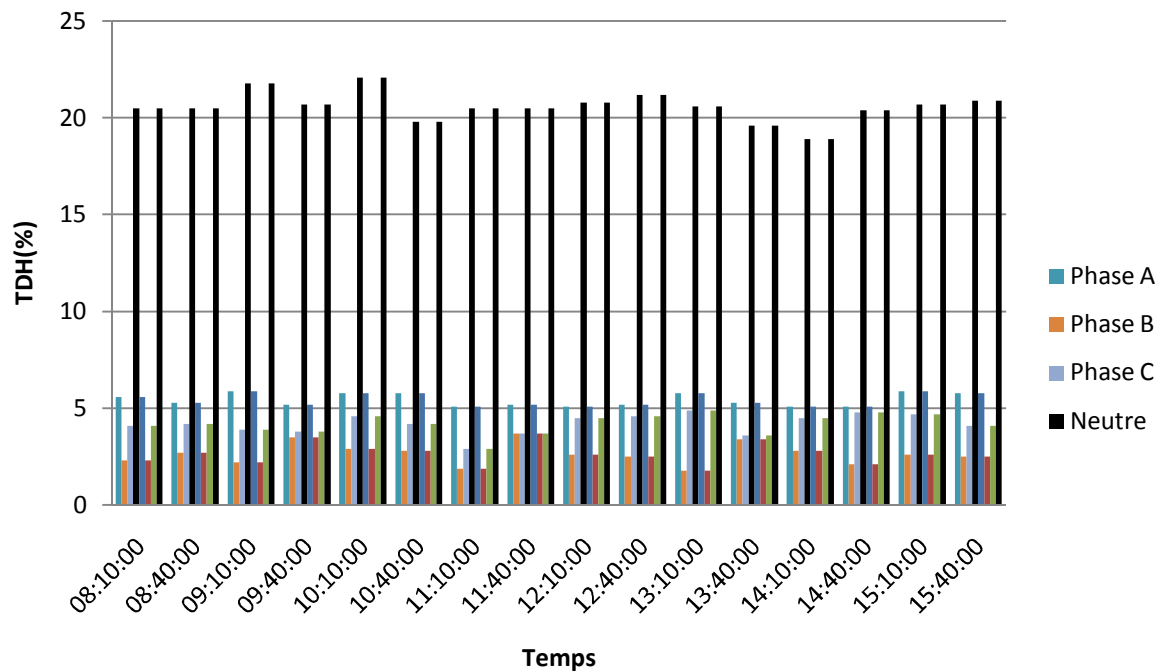
**Analyse des résultats :**

A partir du tableau (4-8), on calcule le TDH moyen global et les TDH individuels du courant du neutre du bloc administratif. Les résultats trouvés sont représentés dans le tableau suivant :

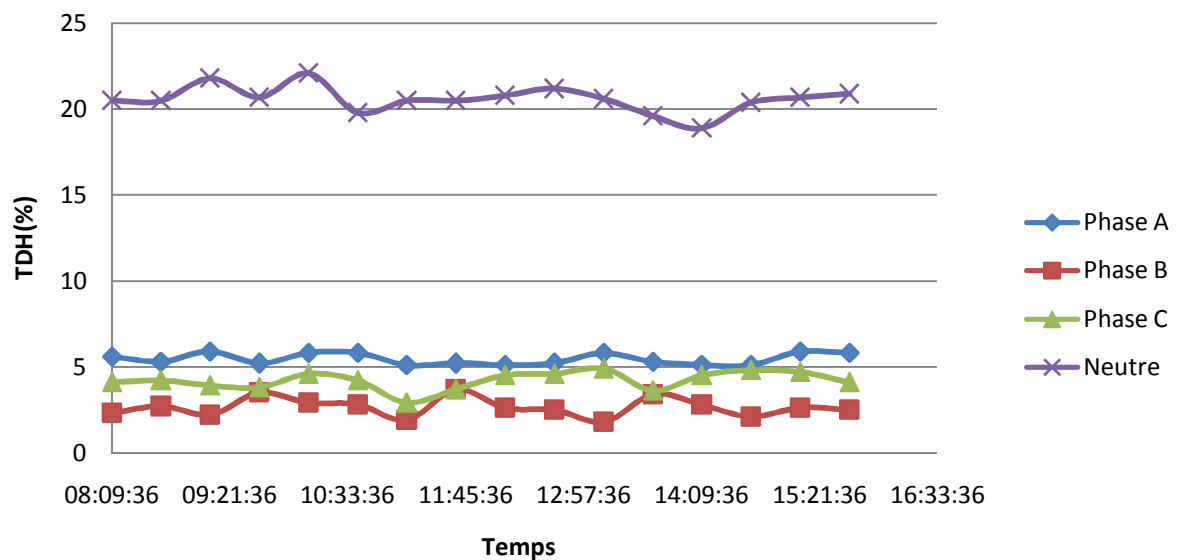
|           | TDH <sub>gmoy</sub><br>(%) | TDH3<br>(%) | TDH5<br>(%) | TDH7<br>(%) | TDH9<br>(%) | TDH11<br>(%) | TDH13<br>(%) | TDH15<br>(%) | TDH23<br>(%) |
|-----------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Le neutre | 20,59                      | 17,53       | 5,5         | 6,2         | 1,01        | 0,73         | 0,73         | 0,5          | 2,61         |

- L'analyse détaillée de l'évolution du taux de distorsion du courant dans le neutre nous montre clairement que le courant harmonique est très élevé, et cela à cause d'une forte présence des harmoniques de rang 03 des trois phases qui s'additionnent dans ce conducteur.
- La difficulté rencontrée pour ce type de pollution harmonique est la surcharge du neutre, ce qui engendre des effets néfastes sur ce conducteur, comme l'échauffement et les vibrations.
- Pour éviter de tels désagréments, le conducteur du neutre doit être dimensionné, en tenant compte de ces harmoniques.

**Figure(3-20): Histogramme des TDH des courants des phases A,B,C et du neutre du bloc administratif**



**Figure(3-21): Courbe des TDH des courants des phases et du neutre du bloc administratif**

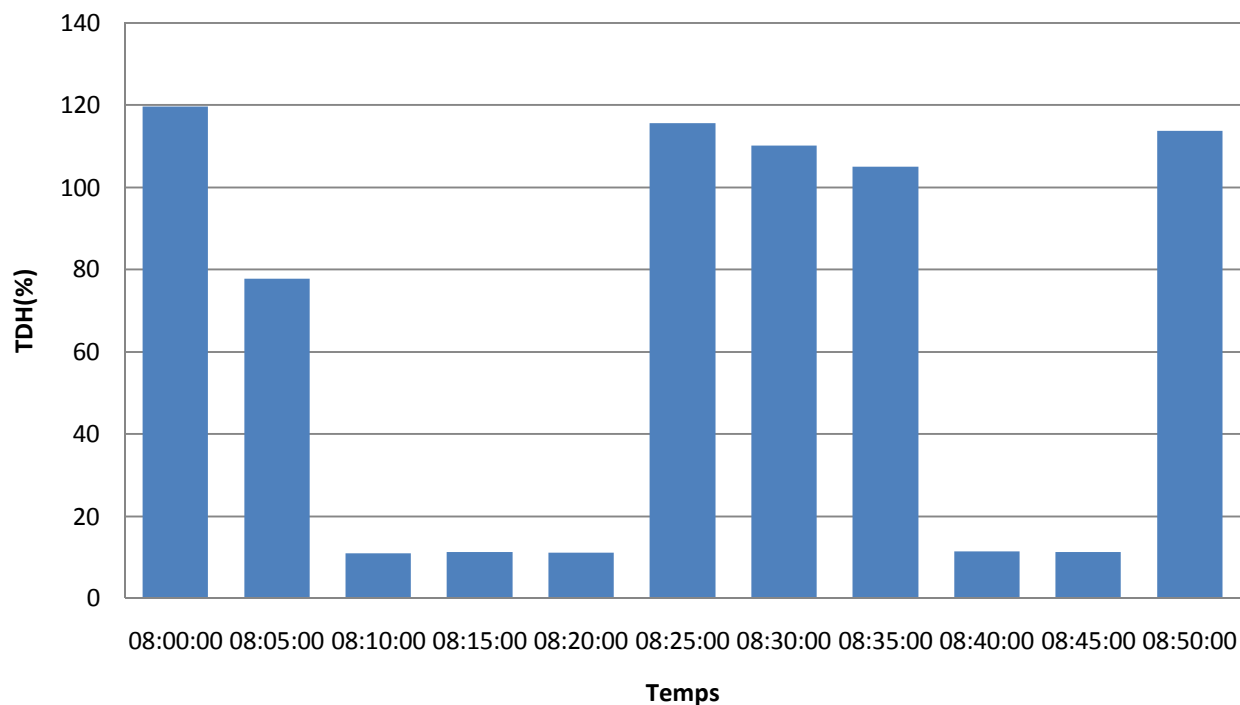
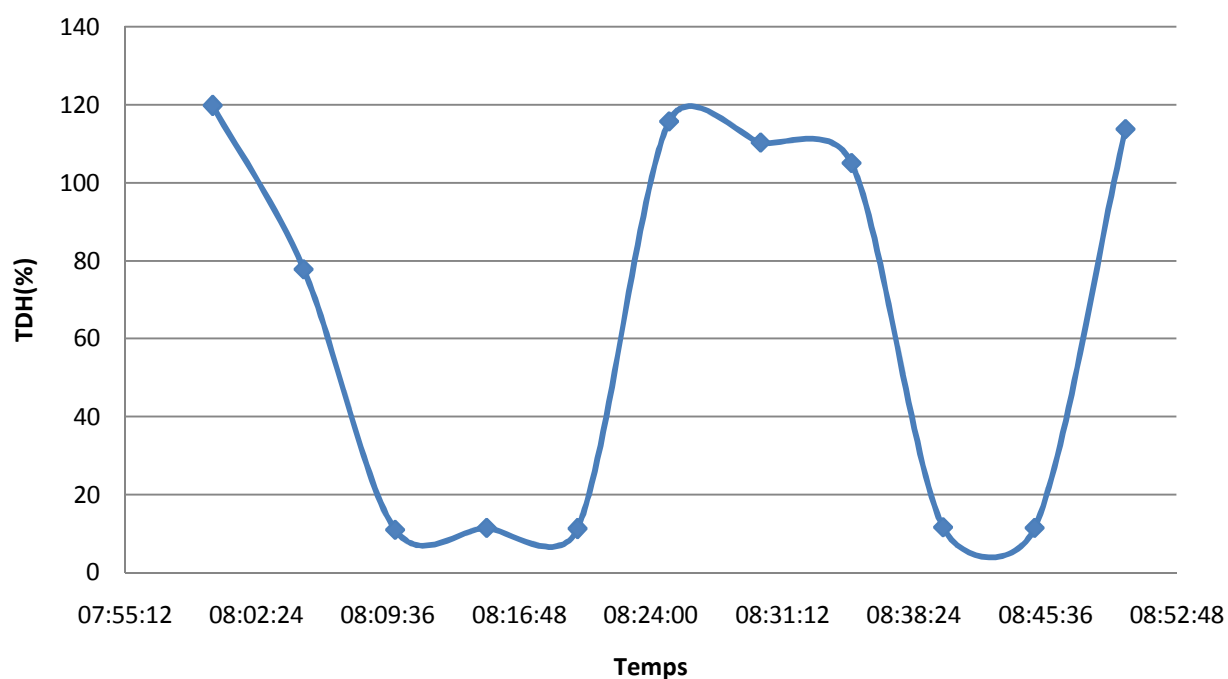


Les figures (3-20) et (3-21) nous montrent que, les TDH du courant harmonique du neutre sont plus élevés par rapport à ceux des trois phases, surtout les courants harmoniques de rang 3, où on voit bien que les courbes des TDH des phases sont presque superposées les unes par rapport aux autres avec des valeurs inférieures à 6 %, contrairement aux TDH du neutre qui atteignent la valeur 22,1 %. Donc dans le bloc administratif, on constate que la pollution harmonique se trouve seulement dans le conducteur du neutre.

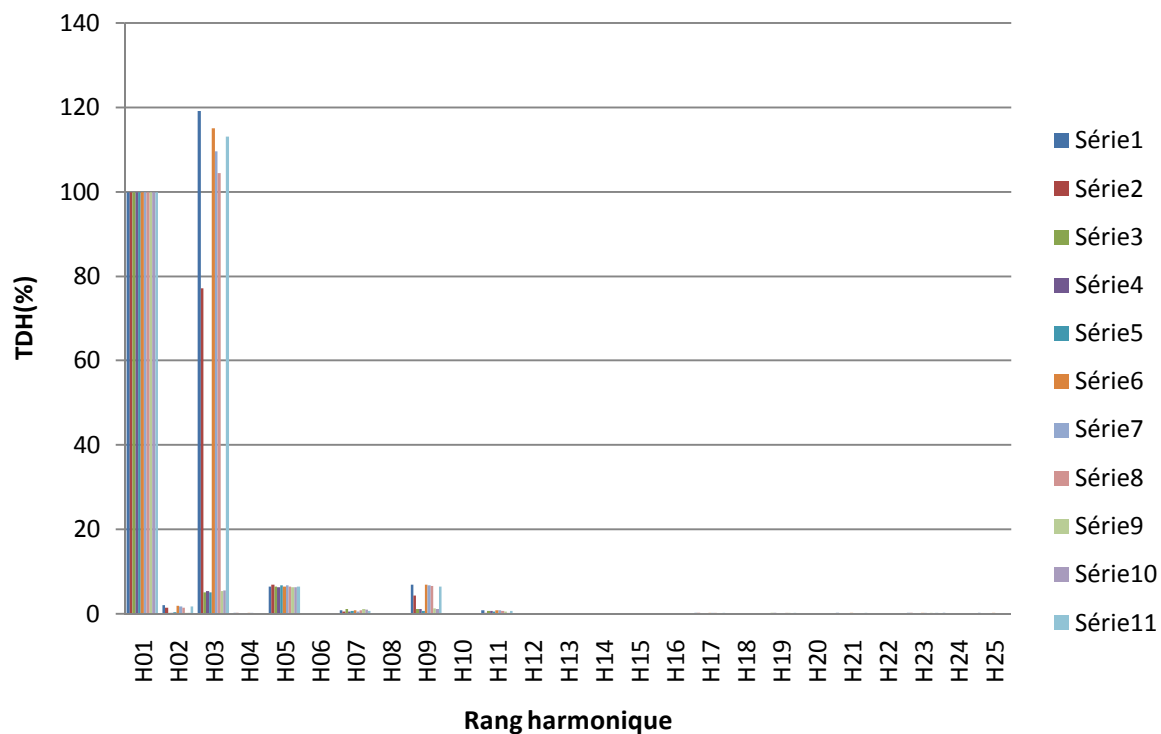
## **Partie 2 : Machine soudeuse de condenseurs**

| N° | Heure    | Age-co | T-H(%) | KF  | H40  | H01 | H02 | H03   | H04 | H05 | H06 | H07 | H08 | H09 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 |
|----|----------|--------|--------|-----|------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 00:00:00 | 1,29   | 119,8  | 5,8 | 24,6 | 100 | 2,1 | 119,2 | 0,3 | 6,5 | 0   | 0,9 | 0   | 7   | 0   | 0,8 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| 2  | 00:05:00 | 2,24   | 77,8   | 3,6 | 17,8 | 100 | 1,4 | 77,2  | 0,2 | 6,9 | 0   | 0,6 | 0   | 4,4 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0   |
| 3  | 00:10:00 | 5,48   | 11     | 1,2 | 4    | 100 | 0,3 | 5,1   | 0,1 | 6,5 | 0   | 1,1 | 0   | 1,1 | 0   | 0,7 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 4  | 00:15:00 | 5,86   | 11,4   | 1,3 | 6,1  | 100 | 0,2 | 5,4   | 0   | 6,3 | 0   | 0,5 | 0   | 1,2 | 0   | 0,7 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 5  | 00:20:00 | 5,32   | 11,2   | 1,3 | 5,9  | 100 | 0,4 | 5,1   | 0   | 6,9 | 0   | 0,8 | 0   | 0,8 | 0   | 0,6 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0   |
| 6  | 00:25:00 | 1,35   | 115,7  | 5,2 | 21,6 | 100 | 1,5 | 115,1 | 0,3 | 6,5 | 0   | 0,9 | 0   | 6,9 | 0   | 0,8 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,3 |
| 7  | 00:30:00 | 1,48   | 110,3  | 4,8 | 19,6 | 100 | 1,7 | 109,7 | 0,2 | 6,8 | 0   | 0,6 | 0   | 6,8 | 0   | 0,8 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0   |
| 8  | 00:35:00 | 1,87   | 108,1  | 4,7 | 12,3 | 100 | 1,6 | 104,6 | 0,1 | 6,5 | 0   | 0,8 | 0   | 6,6 | 0   | 0,7 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 9  | 00:40:00 | 5,56   | 11,6   | 1,3 | 5,5  | 100 | 0,3 | 5,4   | 0   | 6,3 | 0   | 1,1 | 0   | 1,3 | 0   | 0,6 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0   |
| 10 | 00:45:00 | 5,76   | 11,4   | 1,3 | 6,1  | 100 | 0,3 | 5,6   | 0   | 6,3 | 0   | 1   | 0   | 1,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 11 | 00:50:00 | 1,41   | 113,8  | 5,1 | 20,3 | 100 | 1,7 | 113,2 | 0,1 | 6,4 | 0   | 0,7 | 0   | 6,5 | 0   | 0,7 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0   |

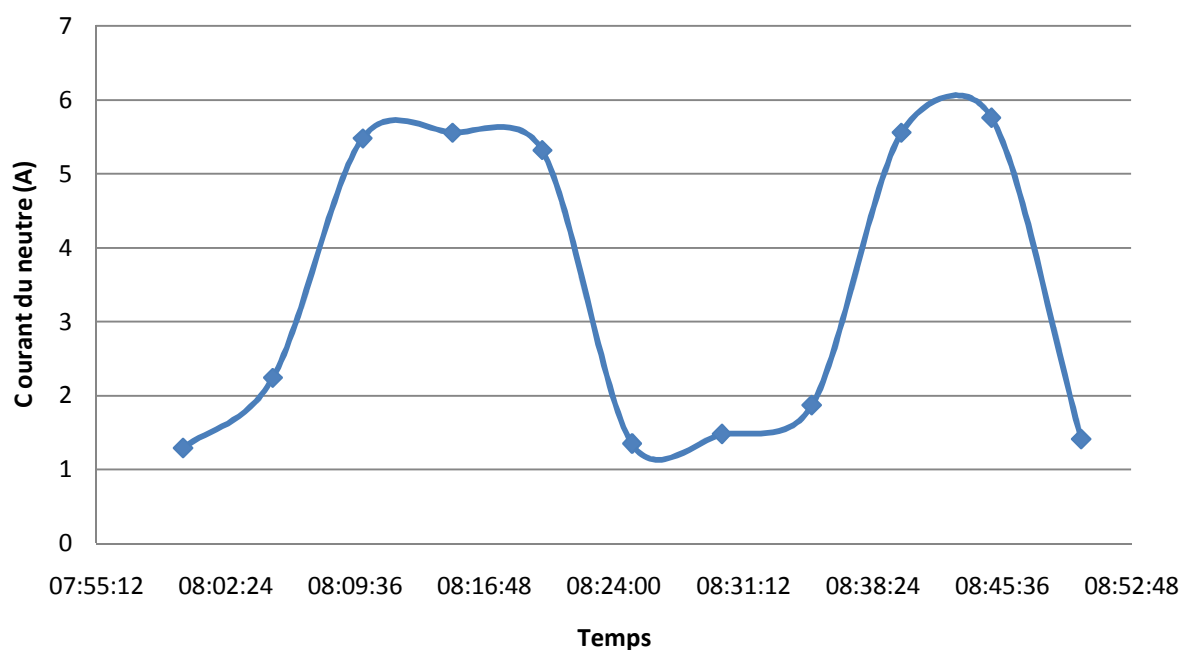
Tableau (4-8): Les relevés des courants harmoniques du neutre de la soudeuse

**Figure(3-22): Histogramme des TDH du courant du neutre de la soudeuse****Figure(3-23): Courbe des TDH du courant du neutre de la soudeuse**

**Figure(3-24): Histogramme des TDH du courant du neutre de la soudeuse**



**Figure(3-25): Courbe d'évolution du courant du neutre de la soudeuse**



**Interprétation des résultats :**

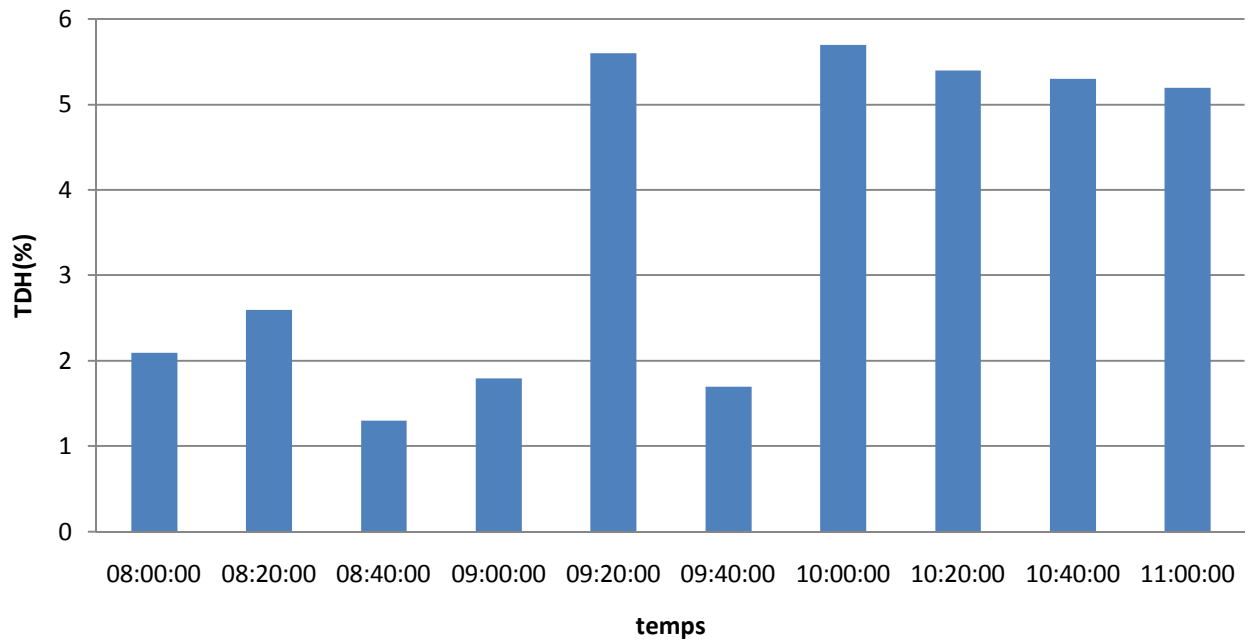
Pour bien analyser les valeurs du tableau (4-9), on calcule le TDH global et les TDH individuels du courant de neutre de la machine soudeuse de condenseurs, les valeurs trouvées sont données dans le tableau suivant :

|           | TDH <sub>gmoy</sub><br>( %) | TDH 3<br>(%) | TDH 5<br>(%) | TDH 7<br>(%) | TDH 9<br>(%) | TDH 11<br>(%) |
|-----------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Le neutre | 63,55                       | 60,5         | 6,53         | 0,81         | 3,98         | 0,61          |

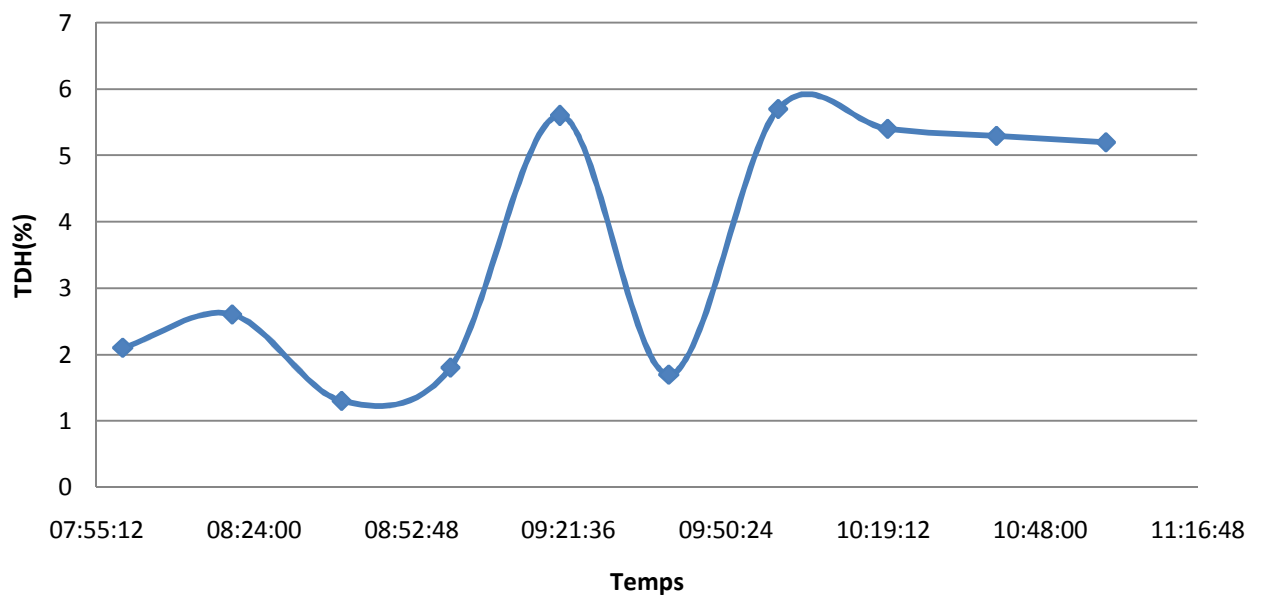
- La circulation de courants harmoniques dans le neutre de la soudeuse conduit à un taux de distorsion très élevé avec une valeur de 63,55 %.
- L'apparition du TDH en courant très élevé dans le neutre (60,5 %) est du à la présence des harmoniques de rang 3 des trois phases qui s'ajoutent dans ce conducteur.
- La présence du courant harmonique de rang 3 dans ce conducteur entraîne de nombreux dysfonctionnements et occasionne des échauffements, des pertes d'énergie.
- Donc on voit bien que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires s'ajoutent dans le conducteur du neutre (surcharge du neutre), ce qui nous oblige à surdimensionner le neutre.

| N° | Heure    | Vac+dc | THD(%) | Hdc | H01 | H02 | H03 | H04 | H05 | H06 | H07 | H08 | H09 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 |
|----|----------|--------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 00:00:00 | 234    | 2,1    | 0   | 100 | 0   | 0,7 | 0,1 | 1,3 | 0,1 | 1,3 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   |
| 2  | 00:20:00 | 231,9  | 2,6    | 0,4 | 100 | 0,9 | 1,1 | 0,5 | 0,7 | 0,1 | 1,5 | 0   | 0,5 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0   | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   |
| 3  | 00:40:00 | 214,9  | 1,3    | 0   | 100 | 0   | 0   | 0   | 1   | 0   | 0,9 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   |
| 4  | 01:00:00 | 233,2  | 1,8    | 0   | 100 | 0   | 0   | 0   | 0,5 | 0,1 | 1,7 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 5  | 01:20:00 | 230,5  | 5,6    | 0,6 | 100 | 3,4 | 0,7 | 1,7 | 1,6 | 0,3 | 1,5 | 0   | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0   | 0   | 0,2 | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| 6  | 01:40:00 | 239,5  | 1,7    | 0   | 100 | 0   | 0   | 0   | 0,6 | 0,1 | 1,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 7  | 02:00:00 | 231,8  | 5,7    | 0,6 | 100 | 0,8 | 0,9 | 0,1 | 3,8 | 0,1 | 1,3 | 0   | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0   | 0,3 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   |
| 8  | 02:20:00 | 230,9  | 5,4    | 0,6 | 100 | 1   | 1   | 0   | 3,7 | 0,3 | 2,5 | 0   | 0   | 0,2 | 0,1 | 0   | 0,4 | 0   | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   |
| 9  | 02:40:00 | 230,1  | 5,3    | 0,6 | 100 | 2,3 | 0,9 | 0   | 1,2 | 0,2 | 2,9 | 0   | 0,1 | 0   | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 10 | 03:00:00 | 231,5  | 5,2    | 0,6 | 100 | 0,8 | 0,7 | 0,4 | 3,9 | 0,1 | 1,9 | 0   | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0   | 0,2 | 0,3 | 0   | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

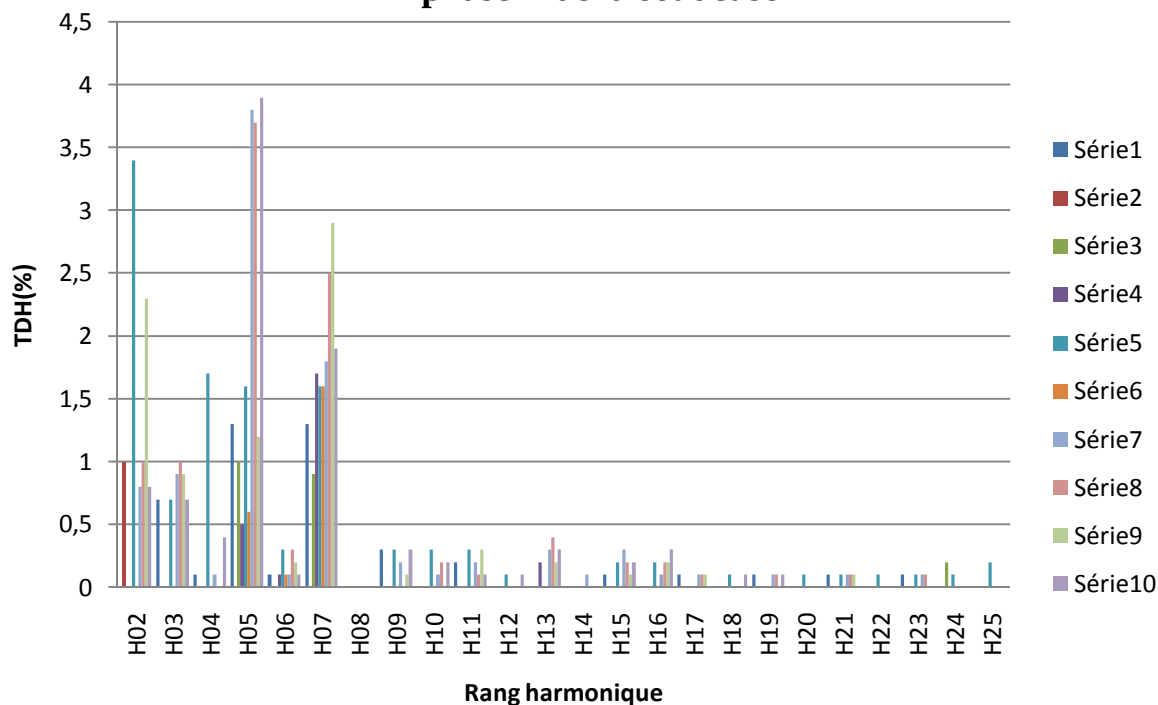
**Figure(3-26): Histogramme des TDH de la tension de la phase A de la soudeuse**



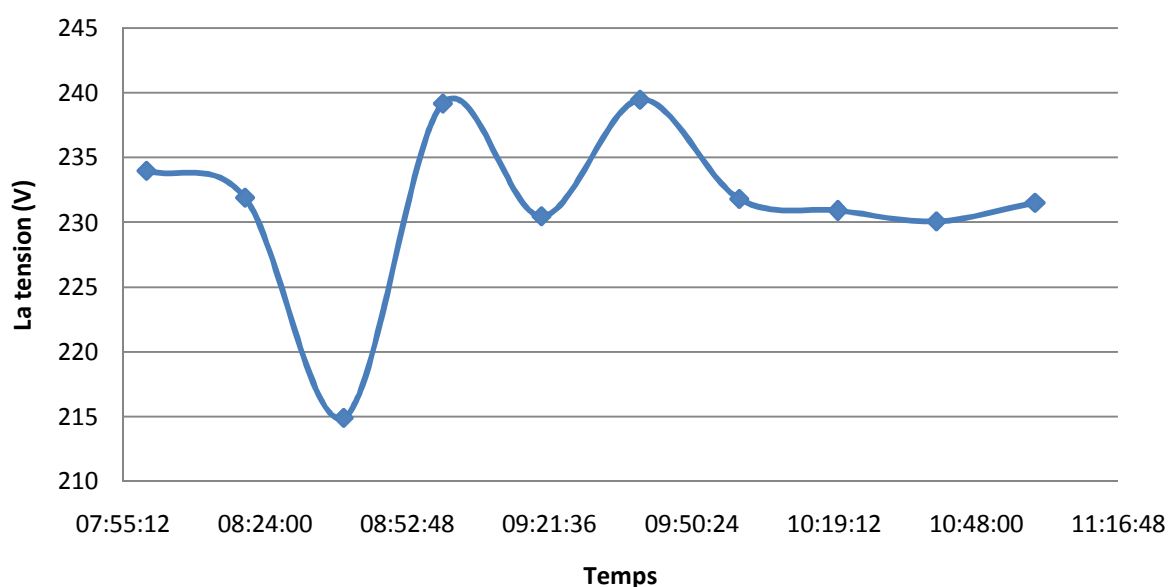
**Figure(3-27): courbe des TDH de la tension de la phase A de la soudeuse**



**Figure(3-28): Histogramme des TDH de la tension de la phase A de la soudeuse**



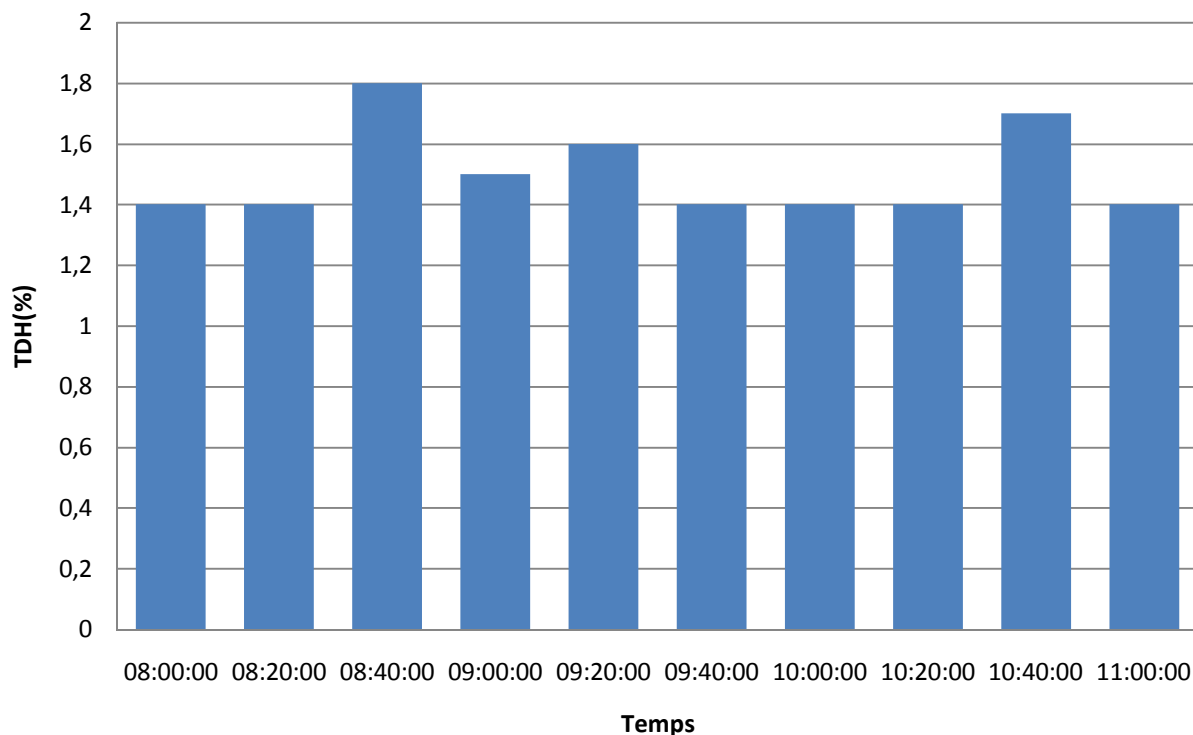
**Figure(3-29): Courbe d'évolution de la tension de la phase A de la soudeuse**



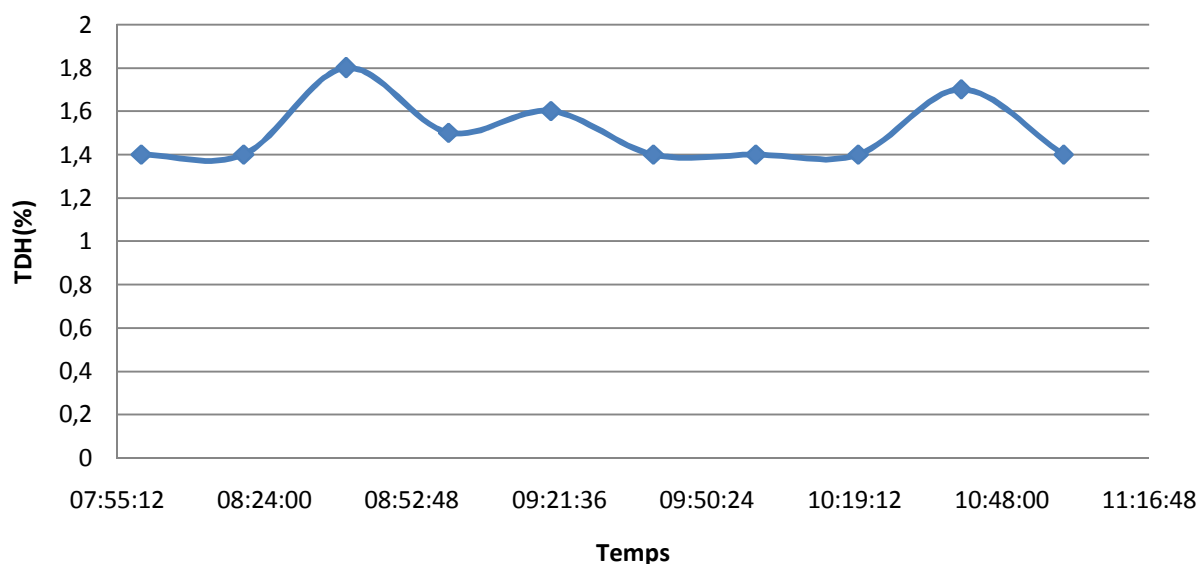
| N° | Heure    | $V_{ac-rms}$ | THD(%) | F <sub>dc</sub> | H01 | H02 | H03 | H04 | H05 | H06 | H07 | H08 | H09 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 |
|----|----------|--------------|--------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 00:00:00 | 235,6        | 1,4    | 0               | 100 | 0   | 0,1 | 0   | 0,7 | 0   | 1,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 2  | 00:20:00 | 236          | 1,4    | 0               | 100 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,7 | 0   | 1,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 3  | 00:40:00 | 235,5        | 1,3    | 0               | 100 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 1,1 | 0   | 0,4 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0   | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 4  | 01:00:00 | 235,9        | 1,5    | 0               | 100 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,1 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 5  | 01:20:00 | 234,6        | 1,6    | 0               | 100 | 0,2 | 0,4 | 0,4 | 0,7 | 0,2 | 1,4 | 0   | 0,2 | 0,1 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 |
| 6  | 01:40:00 | 235,5        | 1,4    | 0               | 100 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,7 | 0,2 | 1,2 | 0,3 | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0,2 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 7  | 02:00:00 | 235,6        | 1,4    | 0               | 100 | 0   | 0,2 | 0,1 | 0,7 | 0,1 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 8  | 02:20:00 | 235,6        | 1,4    | 0               | 100 | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,6 | 0   | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 9  | 02:40:00 | 235,6        | 1,7    | 0               | 100 | 0,2 | 0,5 | 0,4 | 0,7 | 0,5 | 1,5 | 0,1 | 0,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 |
| 10 | 03:00:00 | 235,7        | 1,4    | 0               | 100 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,5 | 0,1 | 1,2 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tableau (4-10) : Les relevés des tensions harmoniques de la phase B de la soudeuse

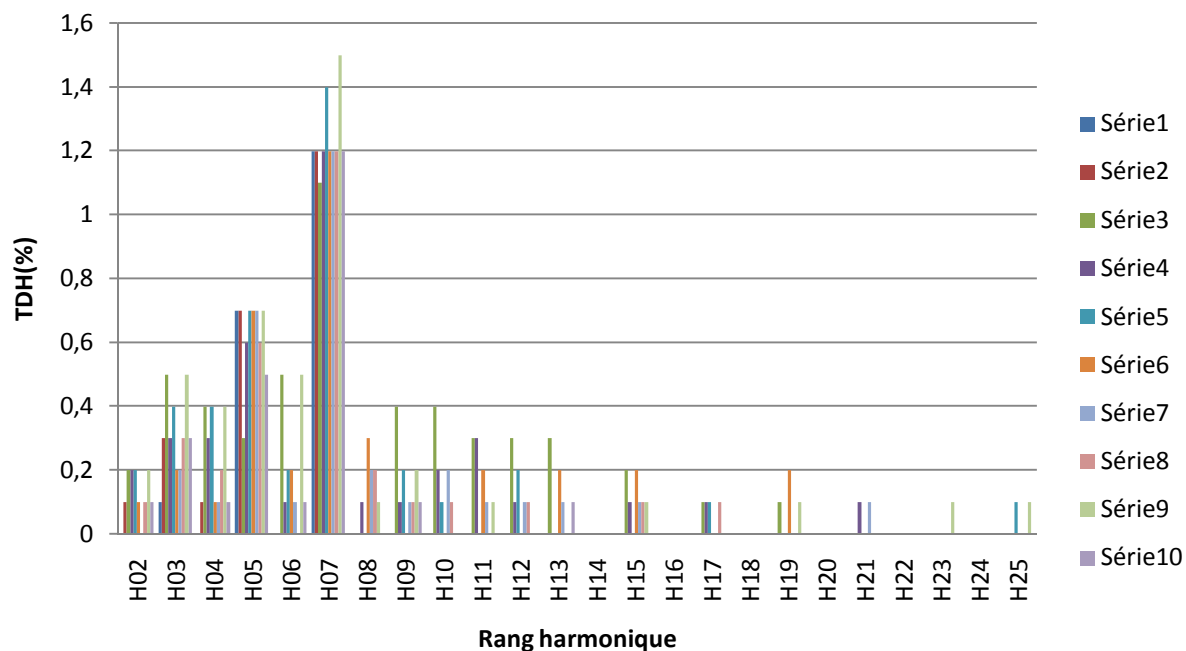
**Figure(3-30): Histogramme des TDH de la tension de la phase B de la soudeuse**



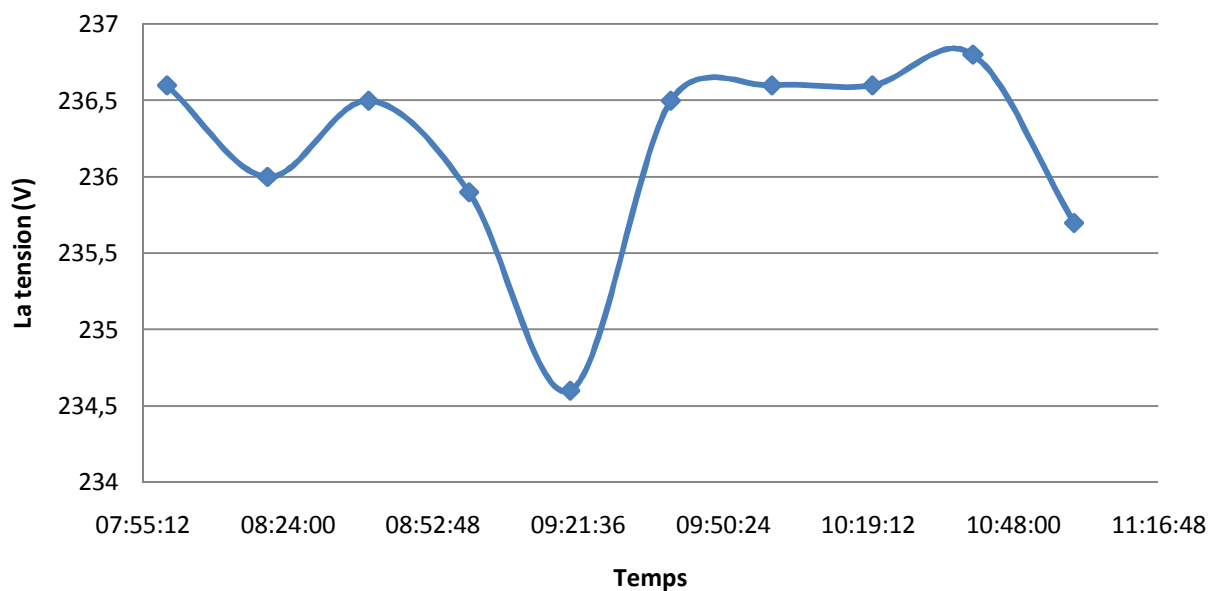
**Figure(3-31): Courbe des TDH de la tension de la phase B de la soudeuse**



**Figure(3-32): Histogramme des TDH de la tension de la phase B de la soudeuse**



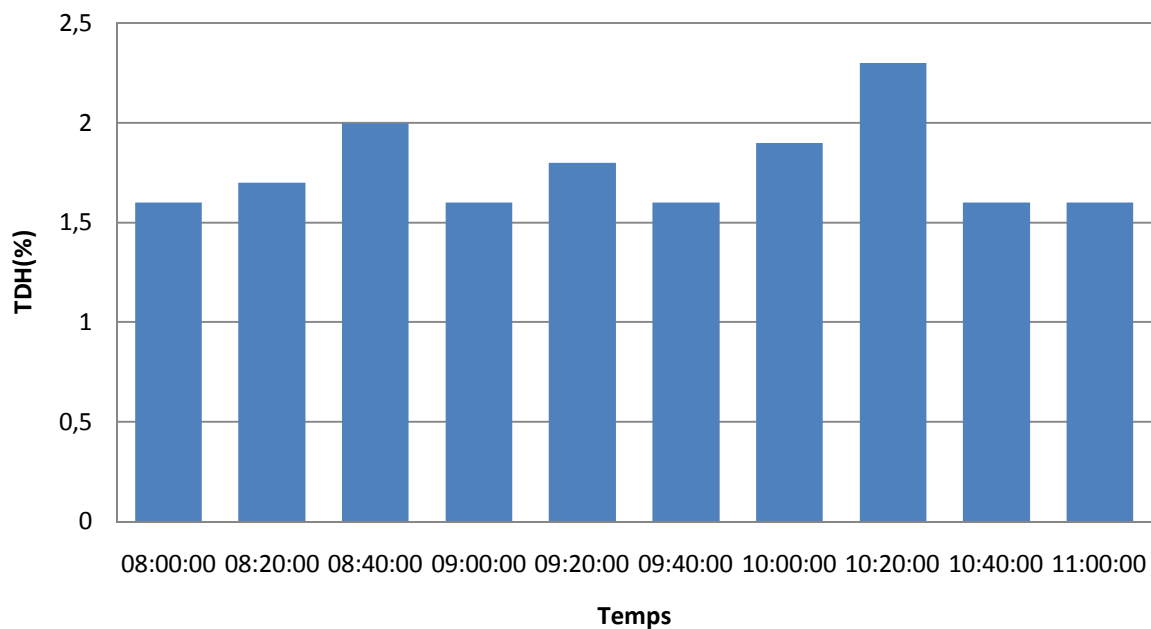
**Figure(3-33): Courbe d'évolution de la tension de la phase B de la soudeuse**



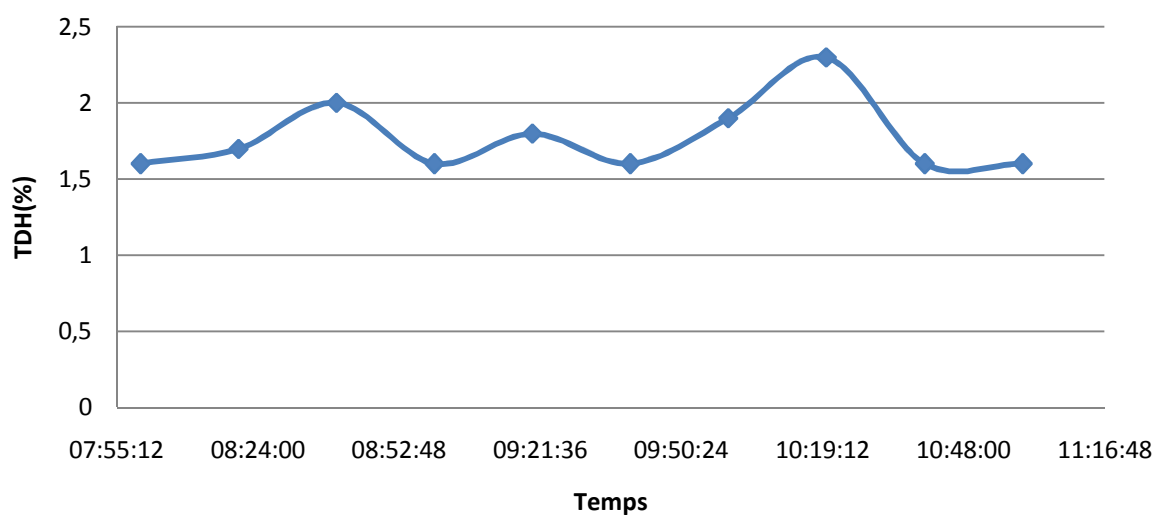
| N° | Heure    | Vac-Hdc | THD(%) | Hdc | H01 | H02 | H03 | H04 | H05 | H06 | H07 | H08 | H09 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | H20 | H21 | H22 | H23 | H24 | H25 |
|----|----------|---------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1  | 00:00:00 | 239,9   | 1,6    | 0   | 100 | 0   | 0,1 | 0   | 0,9 | 0   | 13  | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   |
| 2  | 00:20:00 | 239,8   | 1,7    | 0   | 100 | 0   | 0,1 | 0   | 0,8 | 0,4 | 14  | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 3  | 00:40:00 | 239,1   | 2      | 0   | 100 | 0,7 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,2 | 14  | 0   | 0   | 0,1 | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 |
| 4  | 01:00:00 | 240     | 1,6    | 0   | 100 | 0   | 0,2 | 0   | 0,8 | 0,2 | 13  | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   |
| 5  | 01:20:00 | 239,5   | 1,8    | 0   | 100 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 0,1 | 13  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   |
| 6  | 01:40:00 | 239,2   | 1,6    | 0   | 100 | 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,7 | 0,2 | 15  | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 7  | 02:00:00 | 240,1   | 1,9    | 0   | 100 | 0   | 0,2 | 0   | 0,8 | 0,3 | 16  | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 8  | 02:20:00 | 239,8   | 2,3    | 0   | 100 | 0,7 | 0,1 | 0,4 | 0,8 | 0,1 | 2   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   |
| 9  | 02:40:00 | 239,5   | 1,6    | 0   | 100 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,7 | 0,2 | 13  | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 |
| 10 | 03:00:00 | 239,7   | 1,6    | 0   | 100 | 0   | 0,1 | 0   | 0,7 | 0,4 | 13  | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0,1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Tableau (4-11) : Les relevés des tensions harmoniques de la phase C de la soudeuse

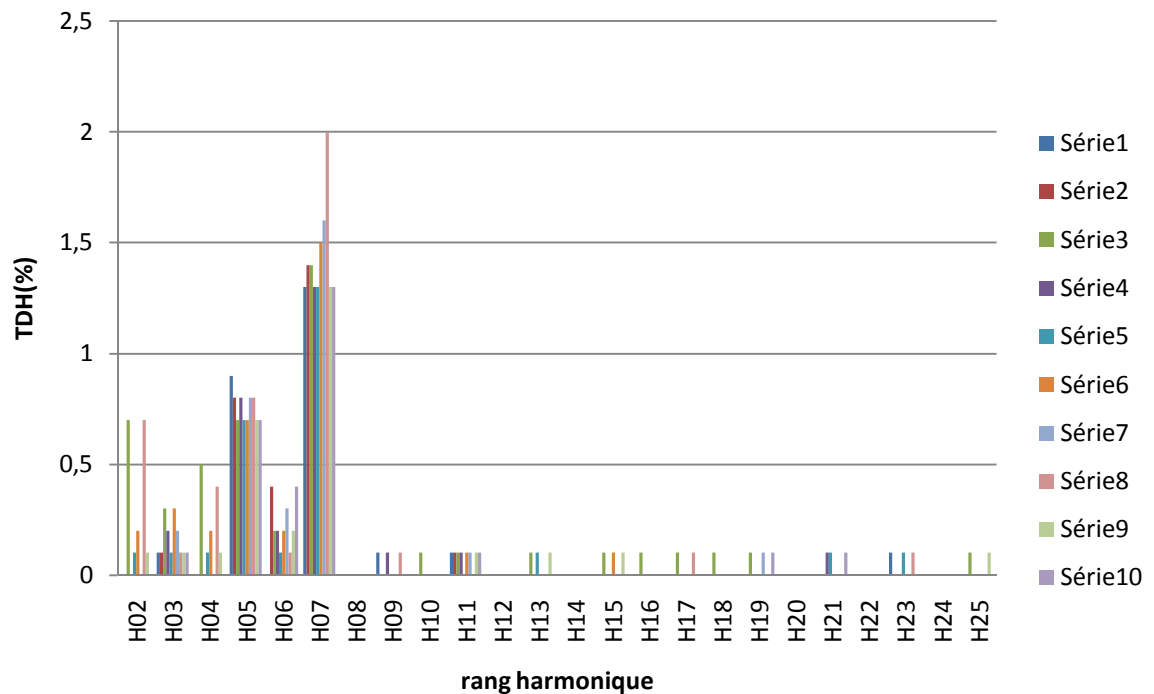
**Figure(3-34): Histogramme des TDH de la tension de la phase C de la soudeuse**



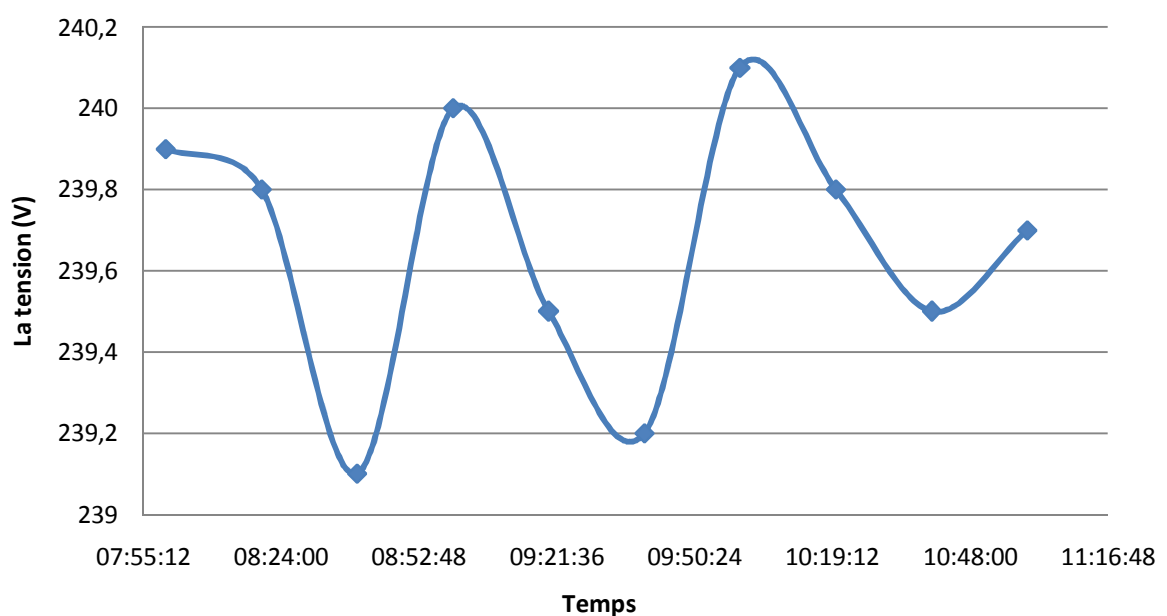
**Figure(3-35): Courbe des TDH de la tension de la phase C de la soudeuse**



**Figure(3-36): Histogramme des TDH de la tension de la phase C de la soudeuse**



**Figure(3-37): Courbe d'évolution de la tension de la phase C de la soudeuse**



**Analyse des résultats :**

Le tableau suivant regroupe les TDH globaux et les TDH individuels des tensions des trois phases de la machine soudeuse de condensateurs.

|         | TDH <sub>gmoy</sub><br>(%) | TDH 3<br>(%) | TDH 5<br>(%) | TDH 7<br>(%) | TDH 9<br>(%) | TDH 11<br>(%) |
|---------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Phase A | 3,67                       | 0,6          | 1,83         | 1,77         | 0            | 0             |
| Phase B | 1,5                        | 0,31         | 0,62         | 1,24         | 0            | 0             |
| Phase C | 1,77                       | 0,16         | 0,76         | 1,44         | 0            | 0             |

- A partir des relevés des TDH en tension des trois phases, nous constatons que les valeurs des TDH sont faibles, donc la pollution harmonique est faible.
- On constate que, parmi les rangs impairs, la tension harmonique du rang 5 est la plus prédominante dans la phase A. Par contre, dans les phases B et C, les tensions harmoniques du rang 7 sont les plus prédominantes.
- Les rangs paires sont nuls, cela est dû à la symétrie de glissement  $[f(wt+\pi)=-f(wt)]$
- Si on compare les valeurs des TDH de la tension des trois phases à celles de la norme **CEI 61000-2-2**, on trouve que ces valeurs répondent aux exigences de la norme, donc la tension des trois phases ne court aucun risque pour notre réseau.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre les résultats obtenus sont satisfaisants, les perturbations harmoniques ne sont pas très importantes, ce qui nous permet de dire que notre réseau ne court aucun risque, sauf dans le neutre où le courant harmonique de rang 3 est important à cause de la présence des charges non linéaires dans le réseau, ce qui produit des effets néfastes sur le neutre comme la vibration et l'échauffement de ce conducteur qui favorisent les pertes supplémentaires sous forme de chaleur.

Donc on voit bien que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires s'additionnent dans le conducteur du neutre (surcharge du neutre), ce qui nous oblige à surdimensionner le neutre.

# **Chapitre IV**

## **Effets et remèdes**

**Introduction**

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

La présence d'harmonique sur les réseaux de distribution va impacter les matériels de réseau et ceux qui sont connectés sur celui-ci.

La correction de la forme d'onde est rendue nécessaire si la déformation dépasse une certaine limite, souvent, dans les réseaux possédant des sources de perturbations harmoniques.

L'existence de perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre impérativement des dispositions afin d'atténuer ou d'éliminer leurs effets sur les équipements et les réseaux électriques.

**IV.1. Effets des harmoniques sur le réseau électrique****IV.1.1. Protections électriques****IV.1.1.1. Relais de protection [13]**

Les harmoniques vont agir sur la valeur du seuil de déclenchement du relais ainsi que sur le temps de fonctionnement. Les relais de protection basés sur des technologies numériques ne seront influencés que par l'augmentation du courant efficace et non par les différentes fréquences contenues dans le spectre harmonique du courant.

**IV.1.1.2. Les protections différentielles [14]**

D'une façon générale, en fonctionnement normal, les protections différentielles sont peu perturbées par les harmoniques de courant qui sont des perturbations de mode différentiel (la somme instantanée des courants de phases et du neutre étant nulle).

La présence d'harmoniques de tension aux bornes des capacités de filtrage va générer des courants de fuite supplémentaires qui vont venir se superposer aux courants de fuite 50Hz et aux phénomènes HF. Ils peuvent alors provoquer des déclenchements intempestifs soit sur ouverture ou fermeture d'un contacteur, soit sur mise sous tension d'éclairage.

**IV.1.1.3. Disjoncteurs magnétothermiques [13]**

Les protections magnétothermiques protègent les installations et les matériels contre les surcharges et les surintensités. La partie thermique est composée d'une lame bimétallique

(bilame) qui va se déformer en cas de surcharge. La partie magnétique intervient contre les surintensités et les court-circuits. En service normal, l'induction magnétique produite par la circulation de courant n'est pas suffisante pour attirer l'armature mobile ; le circuit est fermé. Si un défaut apparaît dans le circuit en aval du disjoncteur de canalisation, le courant de court-circuit provoque une violente aimantation de l'armature mobile. Cela a comme conséquence d'ouvrir le circuit aval du disjoncteur en 0,1 sec au maximum. Pour un courant efficace constant, la présence harmonique n'aura pas d'influence sur la partie thermique car elle est sensible au courant efficace et non à la fréquence. Par contre, la partie magnétique peut déclencher en présence d'harmoniques alors que la valeur du courant ne l'impose pas.

#### IV.1.1.4. Fusibles [13]

Les fusibles peuvent être constitués de trois façons différentes :

- Ø soit de façon verticale
- Ø soit de façon horizontale
- Ø soit en U

L'effet de peau crée une augmentation de la résistance totale et de la puissance dissipée en présence d'harmoniques de courant. Pour les hautes fréquences, il y a donc une nécessité de déclasser et de réduire le courant admissible afin de se prémunir de températures excessives.

#### IV.1.2. Compteurs électriques

La présence d'harmoniques sur le réseau peut perturber la mesure de puissance et introduire des erreurs sur celle-ci. Les compteurs d'énergie électromécanique sont composés d'un circuit magnétique, d'un disque et de bobines. Figure (4-1). La tension et le courant qui vont circuler dans l'appareil vont créer un flux dans le circuit magnétique, ce qui va créer un flux dans l'entrefer du circuit. Ce flux va générer des courants de Foucault dans le disque, et ces courants vont alors créer des forces de Laplace sur ce disque.

Ces forces génèrent un couple qui va faire tourner le disque à une certaine vitesse, donnant ainsi l'indication de consommation de puissance.

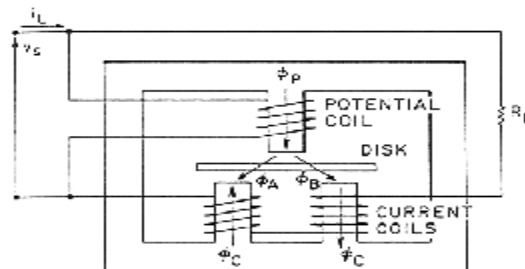


Figure (4-1) : Circuit magnétique d'un wattmètre à induction

Dans le cas d'une perturbation harmonique, on va avoir une augmentation du couple de rotation du disque et donc une erreur sur la mesure de la puissance consommée.

### **IV.1.3. Câbles**

#### **IV.1.3.1. Augmentation des pertes Joule [13]**

La présence d'harmoniques va, pour une même puissance, augmenter la valeur efficace du courant qui circule dans les câbles électriques. En première approximation, les pertes présentes dans un câble sont les pertes par effet Joule, qui sont proportionnelles au carré de la valeur efficace du courant. On comprend bien, alors, que les harmoniques de courant vont créer des pertes supplémentaires dans les câbles électriques.

#### **IV.1.3.2. Influence sur la durée de vie [13]**

L'augmentation de la température de fonctionnement des câbles va se traduire par un vieillissement prématuré de l'isolant qui entoure l'âme des conducteurs, et donc une réduction de la durée de vie du câble. On peut voir aussi que l'augmentation de température va réduire considérablement la durée de vie théorique du câble (durée de vie réduite de 50% pour un  $TDH_i$  de 24%). Comme l'étude est menée proche de la température maximale admissible par l'isolant, l'impact des harmoniques sur la durée de vie est important. Il serait aussi judicieux pour ce type de matériel de prendre en compte le taux de charge du câble dans le calcul de la durée de vie.

#### **IV.1.3.3. Cas particulier du conducteur de neutre**

La présence de plus en plus importante sur le réseau électrique de charges non linéaires monophasées avec une forte composante d'harmoniques de rang 3 va entraîner des problèmes au niveau du conducteur de neutre. En régime équilibré, avec des charges linéaires connectées au réseau triphasé, le courant dans le neutre est nul. Mais actuellement, du fait des nombreuses charges non linéaires (ordinateurs, téléviseurs, lampes basses consommations), le contenu harmonique du courant est riche. La particularité des harmoniques de rang  $3k$  est qu'ils s'additionnent arithmétiquement dans le neutre. La valeur efficace du courant dans le neutre peut atteindre, dans le pire des cas, 1,73 fois la valeur efficace du courant dans la phase. Ces charges non linéaires peuvent alors créer un excès de courant dans le neutre qui pourrait conduire dans le pire des cas à un incendie.

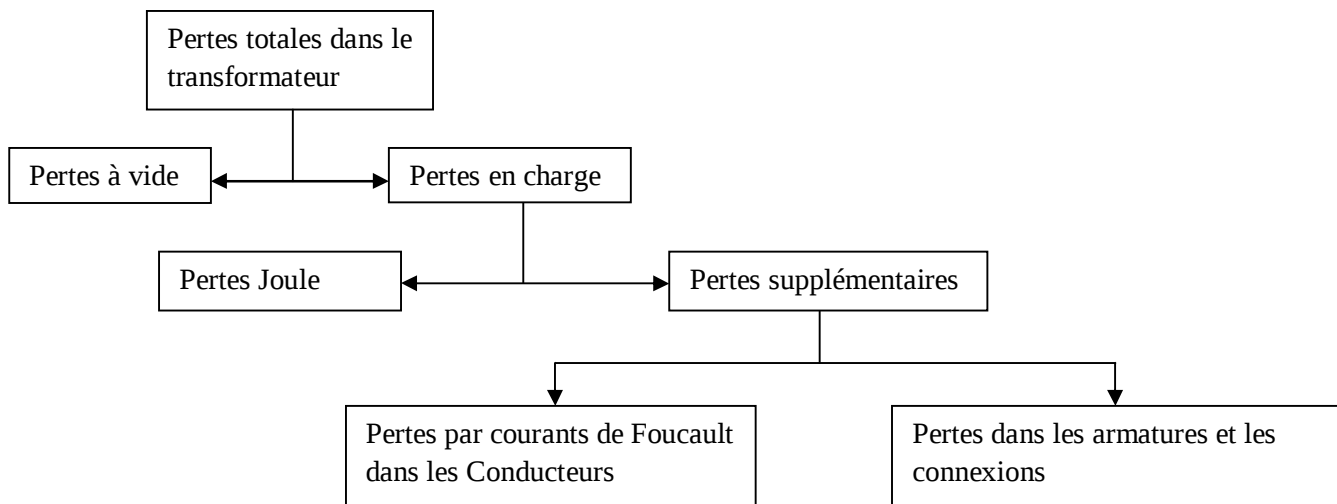
On peut voir apparaître des perturbations conduites en mode commun. L'une des manifestations des perturbations conduites en mode commun, dans un système triphasé, est la différence de tension entre le neutre et la terre. La combinaison d'un fort courant harmonique avec l'impédance du neutre à la fréquence de cet harmonique va causer une chute de tension

dans le neutre et donc une différence de potentiel entre le neutre et la terre. Par exemple, les constructeurs d'ordinateurs préconisent que cette tension soit inférieure à une valeur comprise entre 0.5 et 3 volts efficace, en fonction de la fréquence.

#### IV.1.4 .Transformateurs

##### IV.1.4.1. Influence sur les pertes du transformateur

Les pertes dans les transformateurs sont généralement définies comme la somme des pertes en charge et des pertes à vide comme indiqué sur la figure (4-2).

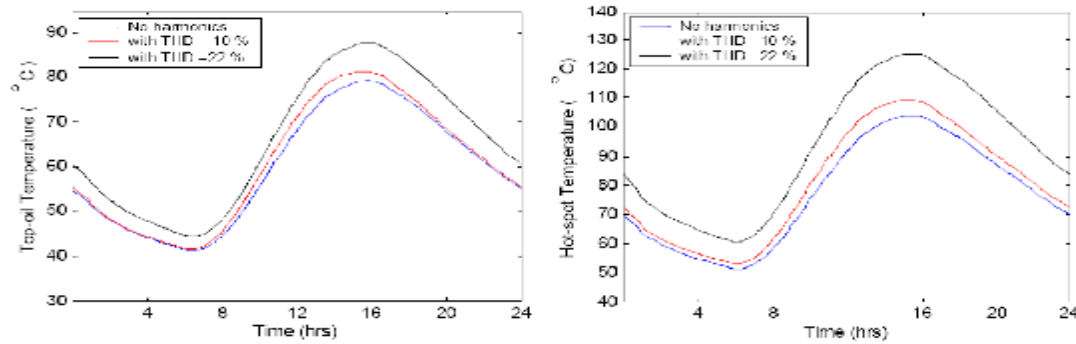


**Figure (4-2) : Diagramme des pertes d'un transformateur**

##### IV.1.4.2. Augmentation de la température de fonctionnement

La circulation d'harmoniques dans un transformateur va augmenter les pertes dans celui-ci, comme nous l'avons vu précédemment. Cette augmentation de pertes va avoir comme effet d'augmenter la température de fonctionnement dans ce même transformateur.

On peut voir sur la figure (4-3), l'évolution de la température de l'huile et de la température du point chaud du transformateur. Dans cette étude, le taux de charge du transformateur varie au cours de la journée (autour de 60% la nuit, et proche de 100% en milieu d'après-midi). Cela explique d'une part que l'augmentation de température engendrée par les harmoniques ne soit pas uniforme au cours de la journée et d'autre part que la température du point chaud dépasse les 120°C.



**Figure (4-3): Température de l'huile et du point chaud du transformateur**

Les pertes par courants de Foucault étant importantes, la présence d'harmoniques va augmenter ces pertes de manière considérable, ce qui se traduit sur les températures du transformateur.

L'estimation précise et chiffrée de l'impact des harmoniques à partir des différentes études menées est assez difficile car il manque souvent des informations permettant de conclure

#### IV.1.4.3. Réduction de la durée de vie [13]

La durée de vie d'un transformateur peut être ramenée à la durée de vie des isolants autour des conducteurs. On peut alors exprimer la durée de vie d'un transformateur grâce à la relation (4-1), tirée de la loi d'Arrhenius :

$$\text{Per unit life} = A \exp\left(\frac{B}{\theta_h + 273}\right) \quad (4-1)$$

Avec

$\theta_h$  la température maximale au niveau des enroulements ;

A, B des constantes.

#### IV.1.5. Moteurs à induction

##### IV.1.5.1. Perturbations mécaniques [13]

La présence d'harmoniques dans l'alimentation va engendrer la création de couples harmoniques dans la machine. Ces couples harmoniques se superposent au couple fondamental et augmentent les vibrations mécaniques subies par la machine, ce qui va augmenter plus rapidement la fatigue mécanique du moteur. Des résultats de simulation montrent des oscillations importantes sur le couple de la machine, et ce, avec une tension d'alimentation ayant un TDH de 6,2%. La suppression de certains rangs harmoniques, comme le rang 5 ou 7, dans le contenu harmonique permet de diminuer l'ondulation du couple de la

machine. L'utilisation d'onduleurs MLI pour alimenter les machines asynchrones crée aussi des vibrations mécaniques supplémentaires, mais on ne s'intéresse ici qu'aux moteurs alimentés directement par le réseau.

#### IV.1.5.2. Influence sur les pertes [13]

Lorsque l'alimentation de la machine est perturbée par la présence d'harmoniques, les pertes à l'intérieur de celle-ci vont augmenter. Les pertes dans une machine à induction peuvent être séparées en trois termes : les pertes Joule, les pertes fer et les pertes mécaniques. A 50Hz, nous pouvons négliger les pertes fer rotoriques car elles sont fonction de la fréquence rotorique, égale à  $g$  fois la fréquence statorique. Ces pertes, pour le régime harmonique, ne sont plus négligeables. En présence d'harmoniques, la résistance des conducteurs du rotor va augmenter du fait de l'effet de peau.

Au niveau du rotor, le glissement très fort pour les composantes harmoniques crée des phénomènes induits qui vont augmenter le courant rotorique (le courant est tout de même limité par l'inductance de fuite du rotor). L'augmentation de la résistance et du courant rotorique vont ainsi faire croître les pertes Joule rotoriques.

Une augmentation des pertes qui peut aller jusqu'à 10% suivant le rang concerné. La présence d'un condensateur de démarrage sur ce type de moteur peut engendrer une résonance qui peut par conséquent augmenter les pertes dues à un rang donné.

#### IV.1.5.3. Augmentation de la température de fonctionnement [13]

Nous avons vu dans la partie précédente que la présence d'harmoniques cause des pertes supplémentaires dans les machines à induction. Ces pertes vont avoir comme effet d'augmenter la température de la machine asynchrone. Pour un TDH en tension de 10%, l'augmentation de température est comprise entre 5 et 10% pour les rangs harmoniques impairs

#### IV.1.5.2.4. Réduction de la durée de vie [13]

Cette augmentation de température dans les machines à induction va entraîner une diminution de la durée de vie des machines, le vieillissement thermique des isolants dans les matériels électrotechniques est régi par la loi d'Arrhenius décrite par l'équation (4-2) :

$$\frac{dp}{dt} = A \exp\left(-\frac{E}{kq}\right) \quad (4-2)$$

**IV.2. Les remèdes****IV.2.1.Solutions classiques**

Les techniques classiques les plus utilisées pour résoudre les problèmes d'harmoniques sont :

**IV.2.2.Inductance anti-harmonique**

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents.

Ainsi, pour le fondamental, la batterie peut assurer sa fonction d'amélioration du facteur de puissance, tandis que l'impédance élevée de l'inductance limite l'amplitude des courants harmoniques. Les condensateurs à gradins doivent tenir compte des fréquences de résonance à privilégier.

**IV.2.3.Transformateur à couplage spécial [15]**

Si une grosse charge linéaire est identifiée, on peut tout simplement l'isoler derrière un transformateur. Les transformateurs ayant la capacité de supprimer certains harmoniques sont :

Les transformateurs HT/BT, étoile-zig zag et triangle-étoile. Ces couplages permettent d'avoir le minimum de distorsion au secondaire. En effet, dans ce cas, les courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples sont éliminés.

**Inconvénient**

Les autres harmoniques (5,7,...), ne sont pas bloqués. Si l'impédance de la ligne est importante, cette dernière provoque une distorsion plus intense.

**IV.2.4.Équilibrage des charges non-linéaires**

Les charges non linéaires doivent être réparties sur les différents transformateurs de l'installation de façon à ce que l'équilibre dans les réseaux soit réalisé.

**IV.2.5.Raccordement de l'appareillage à un point de faible impédance**

Le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé sur la source présentant l'impédance la plus faible, ou sur un transformateur le plus puissant possible. Lorsque

l'impédance de source est faible, la puissance de court-circuit est importante, ce qui réduit la puissance harmonique globale.

#### **IV.1.5. Filtrage passif [10]**

Un certain nombre de solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles et le réseau, vis-à-vis de la pollution harmonique.

La solution, actuellement, la plus fréquemment mise en œuvre, est le filtrage passif des harmoniques.

##### **Ø Principe :**

Le principe d'un filtre passif est de modifier, localement, l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie.

Une connaissance précise des rangs harmoniques, devant être filtrés, et des atténuations requises, est nécessaire à la réalisation d'un filtre.

On distingue deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

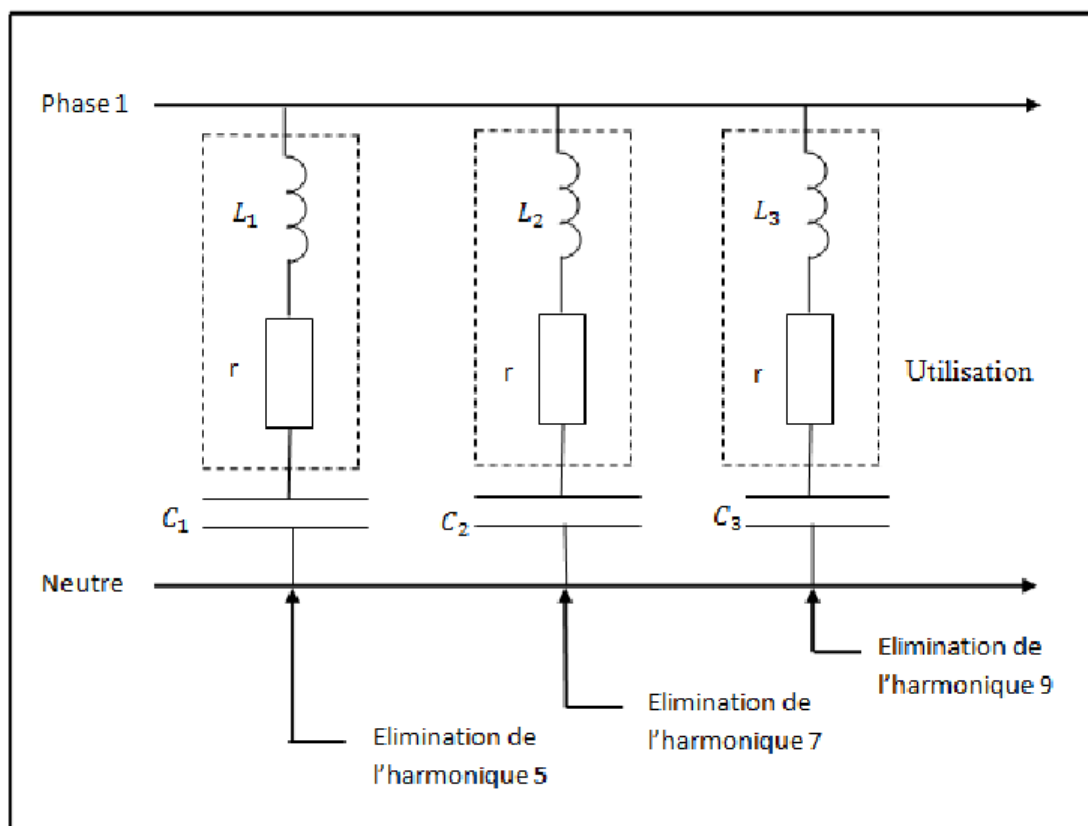
- ü Filtre résonnant (filtre de type shunt)

- ü Filtre amorti

##### **a- Filtre résonnant**

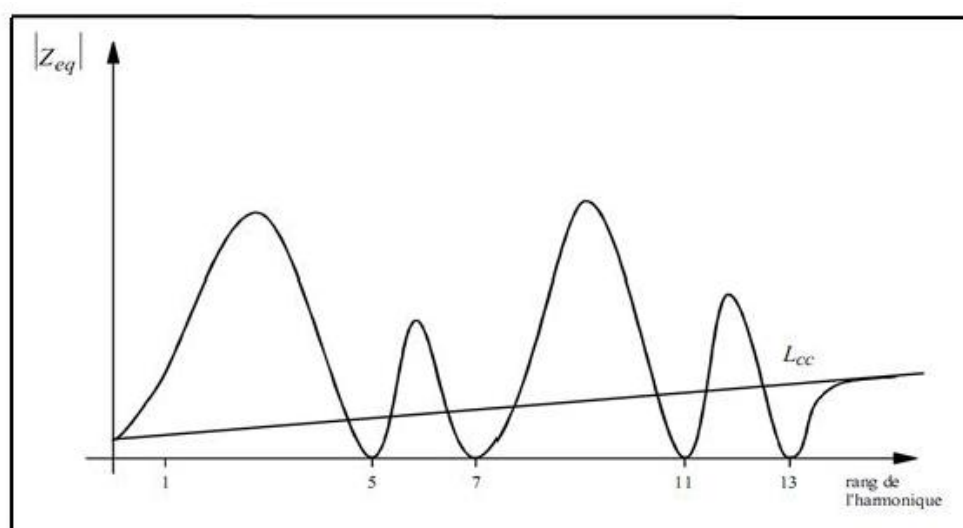
Le filtre résonnant est constitué d'une inductance  $L$  en série avec un condensateur  $C$ . Les valeurs de l'inductance  $L$  et de la capacité  $C$  sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer.

Pour un filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer, comme le montre le schéma suivant :



**Figure (4-4) : Filtre résonant agissant sur plusieurs rangs harmoniques**

Lorsque plusieurs shunts résonants sont installés, l'impédance équivalente du réseau a l'allure suivante :



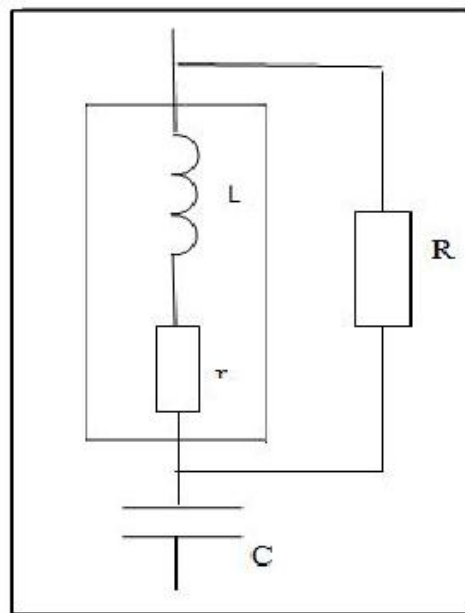
**Figure (4-5) : Spectre d'impédance du réseau lorsque plusieurs shunts résonants sont installés**

Pour éviter d'éventuelles antirésonances à l'enclenchement, il faut enclencher les shunts du rang le plus bas vers le rang plus élevé. Si on enclenche le rang 13 avant le rang 11, il y a risque d'antirésonance sur le rang 11.

#### **b- Filtre amorti (filtre passe haut)**

Le filtre amorti est constitué d'une capacité  $C$  en série avec un ensemble composé de la mise en parallèle d'une inductance  $L$  et d'une résistance appelée « résistance d'amortissement ». Il est utilisé pour filtrer, simultanément, les plus hautes fréquences du spectre, et non une fréquence particulière.

Ce filtre assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquence que le filtre résonnant, mais sans éliminer correctement ces perturbations, c'est-à-dire, il ne réalise pas la suppression de ces harmoniques, mais contribue à améliorer le taux de distorsion harmonique global d'une installation polluée.



**Figure (4-6) : Structure d'un filtre amorti**

On peut associer un filtre résonant et un filtre amorti dans certaines applications industrielles, mais cela peut provoquer entre eux la circulation des courants harmoniques très importants qui mènent rapidement à leur destruction.

Les variations de l'impédance du réseau peuvent aussi détériorer les performances du filtre.

## IV.2. Les solutions modernes

### IV.2.1. Les filtres actifs [16]

L'apparition de nombreux composants semi-conducteurs (les thyristors, et les transistors) a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations des réseaux électriques.

Un filtre actif est constitué des composants qui sont des sources de tension et de courant qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau, des courants, des tensions, ou tous les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existantes.

#### Avantages des filtres actifs

Le filtre actif offre de nombreux avantages comme :

- ü Adaptation automatique à n'importe quelle charge
- ü Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques
- ü Pas de risque de destruction.
- ü Pas de résonance entre le filtre et l'impédance de réseau.

#### Inconvénients

- ü Le filtre actif est très coûteux par rapport au filtre passif.

#### IV.2.1.1. Les filtres actifs parallèles (compensation de courant harmonique)

Un filtre actif peut être placé en parallèle avec les charges et son rôle est de compenser les courants harmoniques. Ce filtre injecte des courants qui s'opposent aux courants harmoniques (il élimine les courants harmoniques qui circulent dans les impédances du réseau), donc le courant, côté réseau, est sinusoïdal.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale, vis-à-vis de la source et de la charge, lui confère une bonne auto adaptabilité avec des performances appréciables. Sa structure est la suivante :

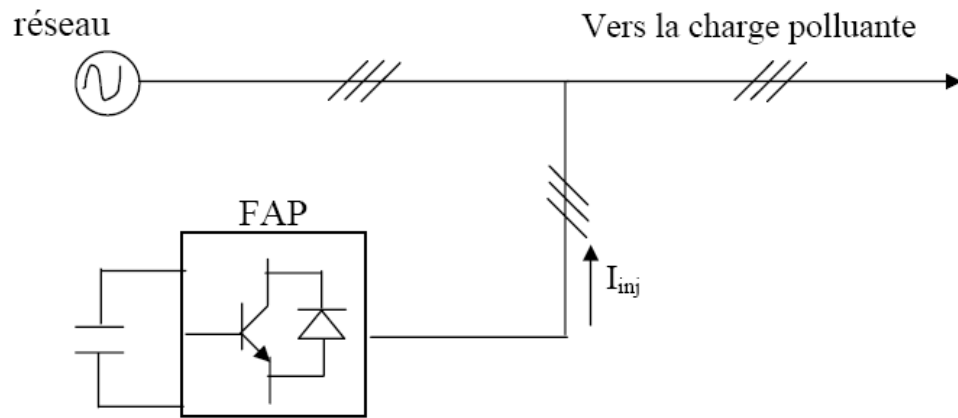


Figure (4-7) : Configuration d'un filtre actif parallèle

#### IV.2.1.2. Les filtres actifs séries (compensation de tension harmonique)

Le filtre actif série se comporte, dans ce cas, comme le montre la figure (4.8), 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.

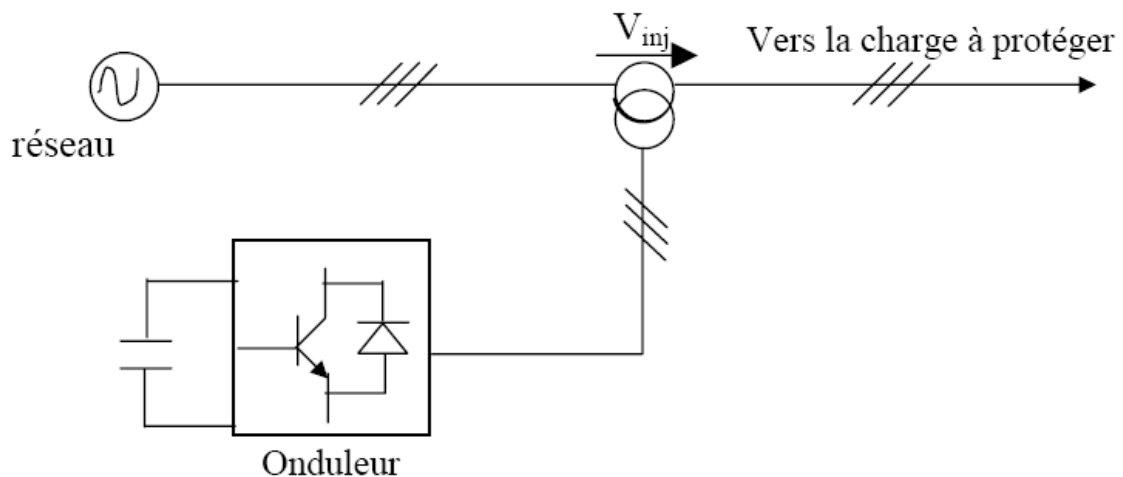
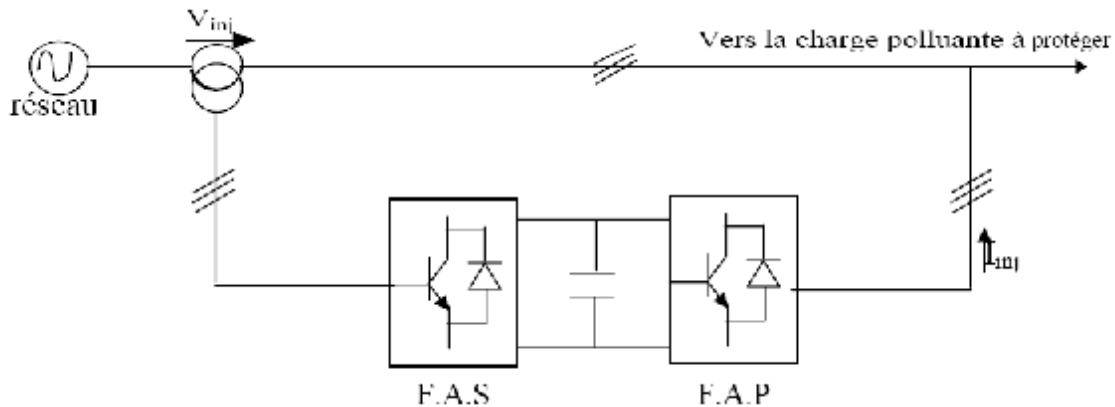


Figure (4-8) : Filtre actif série

### ũ Remarque

Pour assurer un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'une tension et d'un courant perturbé, on peut profiter des avantages de deux filtres actifs (série, parallèle) en faisant associer ces deux derniers, comme le montre le schéma suivant :



**Figure (4-9) : Association des filtres actifs série et parallèle**

#### IV.2.2. Les filtrages hybrides (mixtes) [15]

Le filtrage hybride ou mixte constitue l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif, l'objectif des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques. Par contre, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau.

Parmi les nombreuses possibilités d'association des filtres actifs et passifs on peut citer :

##### IV.2.2.1. Filtre actif série avec filtre passif parallèle

Les filtres passifs sont montés en parallèle avec la charge. Leur rôle est d'absorber les courants harmoniques créés par la charge non linéaire. Le filtre actif est en série avec la source et il fournit une tension opposée à la tension harmonique venant du côté de la source.

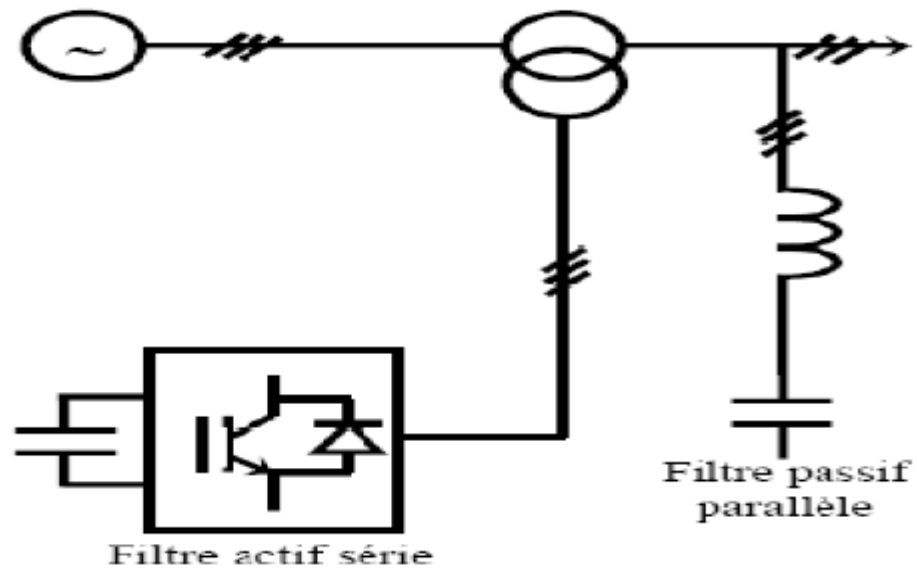


Figure (4-10) : Filtre actif série avec filtre passif parallèle

#### IV.2.2.2. Filtre actif et filtre passif en parallèle avec la charge

Dans ce type de montage, les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présentes sur le réseau. Le filtre actif se comporte comme une source de tension contrôlée en courant, cette structure permet selon le cas :

D'améliorer la dépollution obtenue avec le cas de filtre passif seul.

De limiter le nombre de rangs de filtre passif.

D'améliorer les performances de filtre actif.

La présence de filtre actif minimise le dimensionnement des filtres passifs.

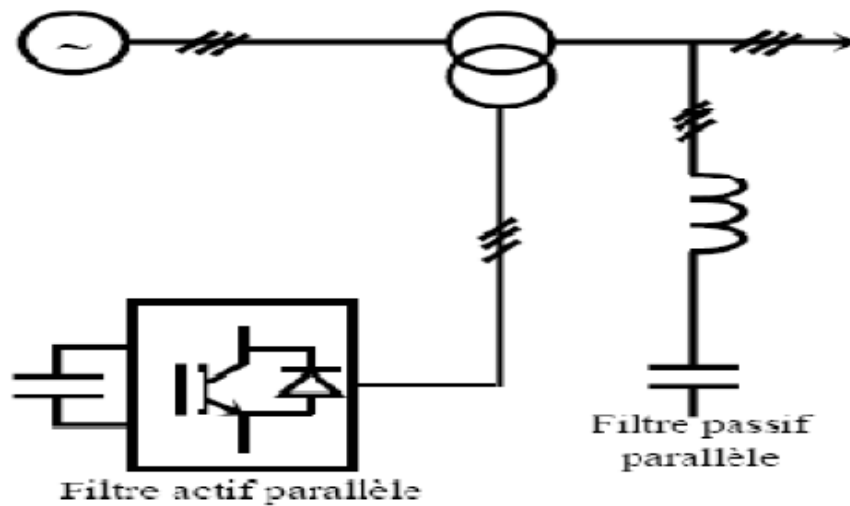


Figure (4-11) : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

### IV.3. Les convertisseurs propres [17]

Un convertisseur propre est un dispositif (redresseurs, chargeurs de batteries, variateurs de vitesse....) qui consiste à forcer le courant absorbé à être sinusoïdal. Deux grandes familles peuvent être distinguées selon que le redresseur se comporte comme une source de tension ou une source de courant.

#### IV.3.1. Convertisseur source de tension

Dans ce cas le convertisseur se comporte vis à vis du réseau comme une force contre électromotrice (un générateur de tension sinusoïdal) et le courant sinusoïdal est obtenu en intercalant une inductance entre le réseau et la source de tension.

#### IV.3.2. Convertisseur source de courant

Le convertisseur se comporte dans ce cas comme un générateur de courant haché. Un filtre passif relativement conséquent est disponible pour restituer, côté secteur, un courant sinusoïdal. Ce type de convertisseur est utilisé dans des applications spécifiques (fournir un courant continu très bien régulé).

**Conclusion**

Les systèmes de protection présents sur les réseaux électriques ainsi que les compteurs d'énergie semblent relativement bien immunisés contre les harmoniques de tension et de courant. Que ce soit pour les moteurs, les câbles ou les transformateurs, on retrouve les mêmes problématiques en présence d'harmoniques : une augmentation des pertes dans ces matériels qui entraîne une augmentation de la température de fonctionnement pouvant, à long terme, diminuer la durée de vie.

Les solutions classiques présentent plusieurs contraintes pour satisfaire un besoin actif de dépollution, elles sont toujours pénalisées en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne s'adaptent pas à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Des solutions modernes, ont été exploitées : convertisseurs propres, filtres actifs qui sont plus souples et performantes mais plus coûteuse.

Les moyens présentés dans ce chapitre peuvent être exploités seuls ou simultanément.

### Conclusion générale

L'utilisation croissante des charges non linéaires contribue fortement à l'augmentation des taux d'harmoniques présents sur le réseau électrique industriel. Ces harmoniques de courant ou de tension vont venir impacter les matériels connectés au réseau, que ce soit en termes de fonctionnement ou de vieillissement. Ce travail nous a permis de constater les différentes causes et conséquences de la pollution harmonique, ainsi nous a permis de franchir l'harmonique perturbateur qui entraîne des surcharges très importantes dans une installation électrique où le neutre est distribué ; où on a à faire au phénomène du foisonnement.

Pour résoudre cet aléa on a recourt à quelques solutions qu'on peut apporter aux différentes installations ; et cela se résume à introduire des différents filtres. On a vu aussi l'influence des harmoniques sur les matériels de réseau et ceux qui sont connectés sur celui-ci.

Dans la partie pratique les résultats obtenus sont satisfaisants. Les perturbations harmoniques ne sont pas très importantes, ce qui nous permet de dire que notre réseau ne court aucun risque, sauf dans le neutre où le courant harmonique est important à cause de la propagation d'harmoniques dus à la présence des charges non linéaires dans le réseau, ce qui produit des effets néfastes sur le neutre comme les vibrations et l'échauffement qui favorisent les pertes supplémentaires sous forme de chaleur.

Donc on voit bien que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires s'ajoutent dans le conducteur du neutre (surcharge du neutre), ce qui nous oblige à surdimensionner le neutre.

## **Bibliographie**

**[1] : Cahiers techniques Schneider Electrique :N° 01**(Qualité de l'Energie Electrique et Enseignement de l'Electrotechnique).

**[2] : Cahiers techniques Schneider Electrique :N° 199** (La qualité de l'énergie électrique), octobre 2001

**[3] :Vanya Ignatova**

« Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique». Thèse de Doctorat, Université Technique de Sofia , le 20 Octobre 2006 .

**[4]: M Bessadi**

« Pollution harmonique due aux redresseurs triphasés et la stratégie de dépollution ». Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2001.

**[5] : T.DEFLANDRE, P. MAURAS**

Les harmoniques sur les réseaux électriques. Direction des études et recherches d'EDF.

Edition EYROLLES, Paris, 1998.

**[6]:Mohand Alaa Eddin Alali**

Thèse de doctorat, Université Louis-Pasteur « Strasbourg I », 12 Septembre 2001

«Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension»

**[7] : Christophe Prévé**

« Réseau électrique industriel » Tome 2, Edition LAVOISIER, juin 2005

**[8]: Francisco C. De la Rosa**

Distribution Control Systems, Inc.

Hazelwood, Missouri, U.S.A.

« HARMONICS AND POWER SYSTEMS ».

Published in 2006 by, CRC Press Taylor & Francis Group

**[9] : H. BESSAI**

« Etude déterministe de la propagation des harmoniques dans les réseaux d'énergie électrique ». Mémoire de Magister, UMMTO, 2000.

**[10] : Eric Félice**

« Perturbations harmoniques : Effets, Origines, Mesures, Diagnostic, Remède »  
Edition DUNOD, Paris, 2000

**[11] : Cahiers techniques Schneider Electrique :N<sup>0</sup> 141** (Les perturbations électriques en BT) Edition mai 2001.

**[12] : Cahiers techniques Schneider Electrique :N<sup>0</sup> 202** (Les singularités de l'harmonique 3)  
Edition septembre 2000.

**[13] :Mr Wilfried FRELIN**thèse de doctorat, université paris-sud 11, décembre 2009.

«Impact de la pollution harmonique sur les matériels de réseau».

**[14] : Intersections, La protection différentielle dans les installations électriques basse tension**, le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel, juin 2001.

**[15] : Sites Internet**

[www.gesi.asso.fr/documentlibre /document.html/](http://www.gesi.asso.fr/documentlibre/document.html/)

[www.mgeups.com](http://www.mgeups.com) http://.

[www.harmoniques .htm .com](http://www.harmoniques.htm)

[www.abb.be](http://www.abb.be)

**[16]:Emadi, Anasiri, S, B, Bekiarov**<<Uninterruptible power supplies and active filters>>

**[17] :Cahiers techniques Schneider Electrique :N<sup>0</sup> 183** (Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs). Edition juin 1998