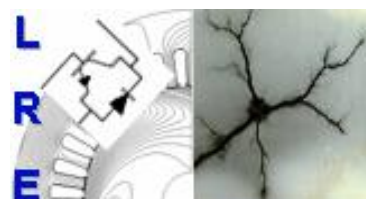


République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



## Mémoire de Master En Electrotechnique

Présenté par :  
**KACI Louenas**

Intitulé

# ÉTUDE DE LA QUALITE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR DES CHARGES NON LINÉAIRE

Directeur(s) du mémoire :

TOUHAMI Omar  
TAHMI Redouane

Professeur  
Docteur

ENP  
ENP

**ENP 2012**

## Résumé :

Nous allons présenter dans ce travail une étude de la Qualité de l'Energie Electrique pour des charges non linéaire, les phénomènes perturbateurs, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements et appareillages électriques.

Pour les besoins de notre étude nous aurons recourt à un ensemble d'outils dont la Transformé de Fourier et la méthode de la FPEM, et à un ensemble de paramètres de mesures de la Qualité de l'Energie Electrique. Nous procéderons à des études de cas réels sur un utilisateur domestique à travers des essais de laboratoire, nous mettrons en clair un ensemble de phénomènes montrant l'impact collectif de ces appareils domestiques sur la Qualité de l'Energie Electrique.

Pour finir on proposera une modélisation électrique d'une lampe économique (CFL), pour mettre en évidence quelques propriétés de cette lampe et cela vue de la popularité croissante de cette lampe.

Mots clés : Qualité de l'Energie Electrique, Harmonique, FPEM, Les lampes économiques, MULTISIM.

## Summary:

We will present in this work a study of Quality of Electrical Energy for nonlinear loads, disturbance phenomena, their origins and their effects on equipment and electrical equipment. For our purposes we will resort to a set of tools including Fourier Transforms and the method of FPEM, and a set of measurement parameters of Quality of Electrical Energy. We will conduct real case studies on a home user through laboratory tests; we will clear a set of phenomena showing the collective impact of these appliances on the Quality of Electric Energy.

Finally we propose a model of an electrical energy saving lamp (CFL), to highlight some properties of this lamp and this view of the increasing popularity of this lamp.

Keywords: Quality of Electric Energy, Harmonics, FPEM, Energy saving lamps, MULTISIM.

## ملخص:

سنقدم في هذا العمل دراسة جودة الطاقة الكهربائية للأحمال غير الخطية، وظواهر اضطراب، أصولها وآثارها على معدات وأجهزة كهربائية.

لأغراضنا سوف نلجأ إلى مجموعة من الأدوات بما في ذلك التحويلات فورييه وطريقة FPEM، ومجموعة من المعلمات قياس جودة الطاقة الكهربائية. سنجري دراسات حالة واقعية في أحد المستخدمين المنزليين من خلال الاختبارات المعملية، وسوف نعرض مجموعة من الظواهر التي تبين الأثر الجماعي من هذه الأجهزة على جودة الطاقة الكهربائية. أخيراً نقترح نموذجاً للمصباح الاقتصادي (CFL)، لتسليط الضوء على بعض خصائص هذا المصباح وهذا نظراً لازدياد شعبية هذا المصباح.

الكلمات الرئيسية: جودة الطاقة الكهربائية، FPEM، المصابيح الموفرة للطاقة، MULTISIM

# Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	59
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
CHAPITRE I : .....	59
NOTION DE QUALITÉ D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET METHODE DE MESURE DE SES PARAMETRES.....	59
I.1 Notion de la qualité d'énergie électrique .....	3
I.1.1 Introduction.....	3
I.1.2 Qualité de l'énergie électrique et Compatibilité ElectroMagnétique (CEM) .....	3
I.1.2.1 Qualité de l'énergie électrique.....	3
I.1.2.2 Compatibilité électromagnétique (CEM) .....	4
I.1.3 Dégradation de la qualité de l'énergie électrique et les phénomènes perturbateurs .....	5
I.1.4 Les perturbations électriques.....	6
I.2 Méthode de mesure des paramètres de la qualité d'énergie électrique .....	6
I.2.1 Introduction.....	6
II.2.2 Mesure et acquisition des données .....	7
II.2.2.1 Maquette de charges .....	7
II.2.2.2 Les capteurs du courant, de la tension et les transducteurs .....	8
II.2.3 Traitement des données et calcul des différents paramètres de la qualité de l'énergie électrique .....	9
II.2.3.1 Méthode de la transformée de Fourier.....	9
CHAPITRE II : .....	11
ÉTUDE DES CHARGES NON LINÉAIRES ET INFLUENCE DES HARMONIQUES DU COURANT DE CHARGE SUR LA TENSION DU RÉSEAU .....	11
II.1 Introduction.....	11
II.2 Etude pratique de certains types de charges non linéaires .....	12
II.2.1 Cas d'une lampe à incandescence.....	12
II.2.2 Cas d'une lampe fluo compact (lampe à faible consommation).....	13
II.2.3 Cas d'une lampe fluorescente .....	13
II.2.4 Cas d'un micro-ordinateur .....	14
II.2.5 Cas d'un four à micro-ondes .....	15
II.3 Etude de l'influence du montage triangle sur les harmoniques .....	16
II.3.1 Cas des Lampes fluo compact .....	16
III.2.2. Les lampes fluorescentes : .....	17
II.4 Effet collectif des charges non linéaires (étude cas d'un foyer).....	18

II.4.1 Cas d'un foyer utilisant que des charges non linéaires de même type : (5 lampes fluo compacts) .....	19
II.4.2 Cas d'un foyer ayant que des charges non linéaires de types différents : (Four à micro-onde, micro-ordinateur, lampe fluo compact, lampe fluorescente).....	19
II.4.3. Cas d'un foyer réel comportant une lampe fluo compact, une lampe à incandescence, une lampe fluorescente et un micro-ordinateur.....	20
II.5 Influence des charges non linéaires sur les réseaux électriques .....	22
II.5.2 Cas d'une lampe fluo compact (économique) .....	23
II.5.3 Cas d'une lampe fluorescente .....	24
II.5.4 Cas d'un micro-ordinateur .....	24
II.5.5 Cas d'un four à micro-ondes .....	25
II.5.6 Cas d'un foyer réel comportant une lampe fluo compact, une lampe à incandescence, une lampe fluorescente et un micro-ordinateur.....	26
III.6 Conclusion .....	28

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

Depuis quelques années la qualité de l'énergie électrique est devenue un sujet prépondérant et de grand intérêt, et cela est dû au fait que l'énergie électrique est considérée comme un produit qui doit satisfaire certaines conditions. Avec l'ouverture à la concurrence de la production de l'électricité et donc la possibilité pour les consommateurs de choisir leurs fournisseurs ; et dans ce contexte de libération de marché de l'énergie, la compétitivité des compagnies d'électricité est aussi liée à la qualité de l'énergie fournie qui est devenue un facteur différenciateur. Sa garantie peut être, pour un industriel notamment, un critère de choix d'un fournisseur d'énergie. En effet, pour un industriel, une mauvaise qualité de l'énergie électrique peut entraîner un dysfonctionnement ou même l'arrêt des outils de production [1].

L'une des propriétés particulières de l'électricité est que certaines de ses caractéristiques dépendent à la fois du producteur, distributeur d'électricité, des fabricants d'équipements et du client. Le nombre important de protagonistes et l'utilisation d'une terminologie et de définitions parfois approximatives expliquent en partie la complexité du sujet. La qualité de l'énergie est devenue un pôle attracteur de chercheurs, expérimentateurs, managers et consultants, et cela essentiellement pour les raisons suivantes [2], [3]:

- La nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises,
- La généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations,
- L'ouverture du marché de l'électricité,
- La réduction des coûts liés à la perte de continuité de service et à la non-qualité,
- La réduction des coûts liés au surdimensionnement des installations et aux factures énergétiques.

D'autres conséquences plus insidieuses de la dégradation de la qualité d'énergie électrique sont :

- La réduction du rendement énergétique de l'installation, ce qui alourdit la facture énergétique.
- La surcharge de l'installation, d'où son vieillissement prématuré avec le risque accru de pannes qui conduisent à un surdimensionnement des équipements de distribution.

Au fil des années la qualité de l'énergie électrique est devenue liée à la continuité de service mais aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements électroniques sensibles à des petites variations de l'onde servie. Ainsi la qualité de l'énergie dépend non seulement de la continuité de l'onde mais aussi de ces caractéristiques [4].

Les préoccupations et l'intérêt pour les problèmes de la qualité de l'énergie se font de plus en plus vifs. Ceci est lié à l'accroissement des charges non linéaires qui contribue à changer les caractéristiques des signaux de tension et de courant. Les compagnies de production d'électricité doivent fournir à leurs clients un approvisionnement ayant une

fréquence constante égale à la fréquence fondamentale, 50Hz en Algérie, et ayant une amplitude constante.

Ce mémoire a pour but de montrer l'influence des charges non linéaires sur la Qualité de l'Energie Electrique en mettant l'accent sur les différents phénomènes dû à leurs superposition, ainsi que leurs l'influence sur le réseau d'énergie électrique.

**CHAPITRE I :**  
**NOTION DE QUALITÉ D'ÉNERGIE**  
**ÉLECTRIQUE ET METHODE DE**  
**MESURE DE SES PARAMETRES**



## I.1 Notion de la qualité d'énergie électrique

### I.1.1 Introduction

L'énergie électrique est principalement distribuée sous forme d'un système triphasé sinusoïdal qui permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux équipements et matériels de l'électrotechnique. C'est particulièrement l'aspect sinusoïdal et l'amplitude de la tension d'origine ainsi que sa continuité qu'il est nécessaire de conserver, afin de lui préserver ses qualités essentielles pour la transmission de la puissance utile aux équipements terminaux. Alors une alimentation électrique parfaite serait un approvisionnement toujours disponible, toujours situé dans les tolérances de tension et de fréquence, possédant une onde sinusoïdale pure et exempte de bruit, [1].

L'utilisation croissante des équipements informatiques et de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la dégradation de la tension d'alimentation. Aussi, des récepteurs tels que les moteurs asynchrones et les transformateurs participent à la distorsion de l'onde sinusoïdale de la tension. Mais, ce ne sont pas les uniques et principaux responsables. L'électronique de puissance présente, aujourd'hui, au sein de nombreux matériels d'électrotechnique, ainsi que l'électronique des équipements informatiques, contribuent essentiellement à la prolifération de ces perturbations électriques. Ces charges dites déformantes, ou encore appelées récepteurs non linéaires appellent sur le réseau électrique des courants déformés, qui en fonction de l'impédance du réseau modifieront l'allure de la tension sinusoïdale. Le signal déformé ou pollué ainsi obtenu est composé d'harmoniques ou de creux de tension qui se traduisent par des pertes électriques ou encore des dysfonctionnements sur le réseau électrique d'alimentation, [5].

### I.1.2 Qualité de l'énergie électrique et Compatibilité ElectroMagnétique (CEM)

La qualité de l'énergie électrique et la compatibilité électromagnétique sont étroitement liées. Nous définissons chacune d'elles.

#### I.1.2.1 Qualité de l'énergie électrique

Pourquoi utilise-t-on souvent l'expression anglaise "*Power quality*" ? On rencontre de nombreuses traductions françaises de cette expression, mais aucune ne fait vraiment l'unanimité : qualité de l'alimentation, qualité de la tension, qualité du courant, qualité de l'onde, qualité de la fourniture, qualité du produit, qualité de l'énergie électrique, qualité de l'électricité. Il est à remarquer que la traduction littérale "qualité de la puissance" n'est jamais utilisée, sans doute parce que l'expression originale "power quality" n'a pas beaucoup de sens.

On appelle "power quality problem" toute variation dans l'alimentation en puissance électrique, ayant pour conséquence le dysfonctionnement ou l'avarie d'équipements des utilisateurs, tel que : le creux de tension, la surtension, le transitoire, les fluctuations de tension, les harmoniques et le déséquilibre.

Cependant, tous ces phénomènes affectent essentiellement la tension qui est fournie à l'utilisateur. Si ce dernier n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie. C'est pourquoi on dit parfois que la qualité de l'énergie électrique se réduit à la qualité de la tension ("power quality = voltage quality"). Par contre, si le client utilise des charges perturbatrices, celles-ci ont d'abord pour effet de perturber le courant, ce qui se traduit ensuite par une perturbation de la tension (parce que l'impédance du réseau n'est pas nulle) ce qui cause une dégradation de l'alimentation des autres clients [6] [7].

Cependant, l'expression "power quality" s'entend généralement dans une acception plus large. Elle recouvre aussi le concept de continuité de la tension c'est-à-dire la fiabilité, la résilience et la redondance de l'alimentation. On ne peut évidemment parler de "qualité de la tension" que lorsque la tension est présente. En cas d'interruption brève ou longue selon la durée, inférieure ou supérieure à 3 min, cela se traduit par un problème de continuité de la tension (fiabilité de l'alimentation). L'alimentation est d'autant plus fiable que le nombre annuel d'interruptions est petit et que leur durée moyenne est faible [8]. L'équation correspondant à l'interprétation la plus correcte est donc :

$$\textit{Qualité de l'Énergie Électrique} = \textit{Continuité} + \textit{Qualité de la Tension}.$$

### **I.1.2.2 Compatibilité électromagnétique (CEM)**

On ne peut passer sous silence l'expression très courante de "Compatibilité ElectroMagnétique (CEM)". La question où se situe la CEM vis-à-vis la Qualité de l'énergie électrique est souvent posée.

La CEM est l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique sans qu'il produise des perturbations électromagnétiques intolérables pour son environnement. C'est donc un concept plus large, couvrant des perturbations dans les entrées/sorties d'un appareil en plus de son alimentation électrique. Les perturbations rayonnées (dues à des champs électromagnétiques) et les perturbations conduites (transmises par câble) caractérisent les phénomènes HF (> 9 kHz) ou les phénomènes BF (< 9 kHz) [6][9].

Une certaine ambiguïté résulte du fait que l'on utilise l'expression CEM dans deux définitions différentes :

- Dans le cadre de la normalisation, on tend à utiliser le terme CEM au sens large. Il s'agit d'assurer la compatibilité par une bonne coordination des niveaux d'immunité des appareils sensibles et des niveaux d'émission des appareils perturbateurs qui couvrent tous les phénomènes.
- Dans le langage courant, on considère le plus souvent que CEM et Qualité de l'Énergie Électrique couvrent deux domaines distincts, mettant en œuvre des techniques d'analyse et de compensation différentes avec certains recouvrements. La Qualité de l'électricité se soucie des perturbations à basse fréquence, pénétrantes par l'alimentation électrique et la CEM se soucie des perturbations à haute fréquence ou des perturbations pénétrantes par des voies autres que l'alimentation électrique, par

exemple : les prises de terre, les entrées/sorties des signaux, le couplage inductif ou capacitif ou le rayonnement) [10].

### I.1.3 Dégradation de la qualité de l'énergie électrique et les phénomènes perturbateurs

Dans la distribution de l'énergie électrique, la tension constitue le support de la puissance et le courant représente l'énergie réelle qui transite d'un point à un autre. La qualité d'énergie fournie à l'utilisateur dépend de quatre caractéristiques du système de tension :

- **L'amplitude** : c'est généralement la première exigence imposée au distributeur d'énergie. Selon les normes [11], en conditions normales d'exploitation, la tension ne peut s'écarter de  $\pm 10$  (%) de la tension assignée. Ces variations d'amplitude sont aussi associées à la notion de temps de 10 ms à quelques minutes. Les perturbations affectant ce caractère se manifestent sous forme de creux, de coupures courtes ou brèves de tensions.
- **La fréquence** : la norme EN 50160 [11] stipule que la valeur moyenne de la fréquence fondamentale mesurée sur 10 s, doit se trouver dans l'intervalle de 50 Hz  $\pm 1$  (%) durant 99,5 (%) de l'année et 50 Hz +4 (%) ou 50Hz- 6 (%) durant 100 (%) du temps. Les perturbations liées à la fréquence sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles par exemple : lors des défauts de grande ampleur au niveau de la production ou du transport.
- **La forme d'onde** : une onde parfaite serait une sinusoïde de fréquence 50 Hz, mais l'existence de charges non linéaires provoque la distorsion et laisse apparaître des harmoniques. Alors, cette onde n'est plus sinusoïdale ; elle peut être considérée comme une onde fondamentale à 50 Hz associée à des harmoniques et des ondes de fréquences quelconques de valeurs supérieures ou inférieures à 50 Hz.
- **La symétrie** : la symétrie impose au système triphasé de tensions d'avoir la même amplitude et le même déphasage de  $2\pi/3$  . L'alimentation des charges monophasées entraîne des dispersions sur les modules des tensions et leurs déphasages ne sont plus égaux.

Les perturbations affectant ces caractéristiques peuvent être classées selon deux critères :

- Le caractère de la tension modifiée : toute variation de l'un des caractères mentionnés précédemment est une perturbation et les différentes perturbations sont identifiées Selon le paramètre perturbé.
- La durée de la perturbation : c'est un facteur déterminant dans l'identification de la perturbation. On distingue :
  - Les perturbations transitoires : moins d'une demi-période
  - Les perturbations de courte durée : plus d'une demi-période
  - Les perturbations permanentes : ce type de perturbations existent à cause de la présence des charges non linéaires et se traduit par de faibles variations de l'amplitude, [12].

## I.1.4 Les perturbations électriques

En pratique, les réseaux électriques sont le plus souvent le siège de phénomènes perturbateurs qui affectent, différemment, les caractéristiques de la tension. Ces perturbations sont dues à des phénomènes aléatoires qui peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit affectant un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain. Ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête), matérielles (vieillessement d'isolants) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers).
- Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils.

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de l'énergie, lorsque celle-ci est présente, sont :

- Les creux de tension et les coupures brèves
- Les surtensions
- Fluctuation de tension et Flicker
- Déséquilibre
- Les harmoniques et les inter-harmoniques, [13].

## I.2 Méthode de mesure des paramètres de la qualité d'énergie électrique

### I.2.1 Introduction

La mesure de la qualité de l'électricité est nécessaire pour caractériser les phénomènes électromagnétiques à un endroit donné d'un réseau d'alimentation électrique.

L'objectif peut être aussi simple que la vérification de la régulation de la tension en régime établi à l'entrée d'un point de livraison, ou peut être aussi complexe que l'analyse des flux de courants harmoniques dans un réseau de distribution.

Pour l'analyse et le traitement des signaux récupérés, un certain nombre de techniques de traitement du signal existent, allant des méthodes les plus simples comme la transformée de Fourier discrète appelée TFD à des méthodes plus complexes (par exemple, le filtre de Kalman).

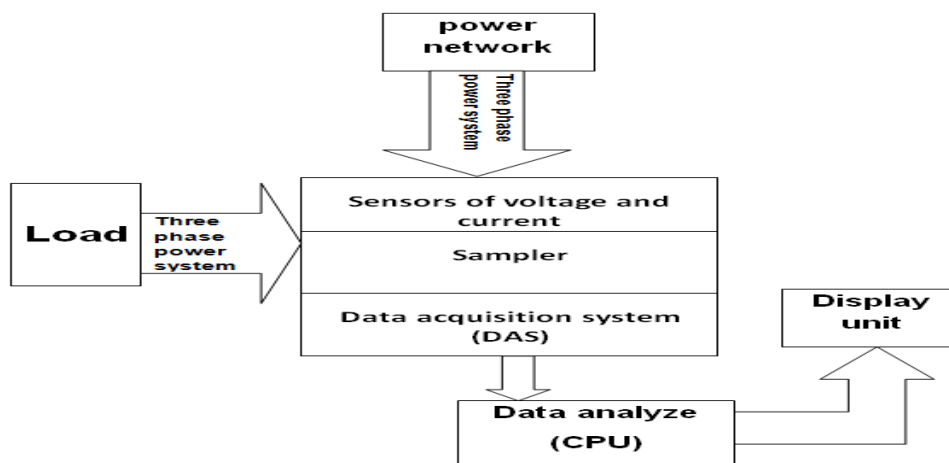
L'étude des caractéristiques ainsi que la qualité de l'énergie électrique absorbée par ces charges nécessitent le passage par les étapes suivantes :

- Mesures et acquisition des données.
- Traitement des données et calcul des différents paramètres de la qualité de l'énergie électrique.
- Interprétation des résultats et classification des charges.

## II.2.2 Mesure et acquisition des données

Elle est considérée comme la première étape pour l'analyse de la qualité d'énergie électrique, elle consiste en la mesure des deux signaux tension et courant. Cette étape a été réalisée dans le laboratoire de recherche en électrotechnique de l'école nationale polytechnique.

La figure I.1 résume les différentes étapes pour l'analyse de la qualité de l'énergie électrique absorbée par des charges non linéaires :



**Figure I.1 :** Système de mesure et d'analyse de la qualité de l'énergie électrique.

Pour effectuer cette étape, nous avons utilisé un banc d'essai constitué des éléments suivant :

1. Maquette de charges
2. Les capteurs du courant et de la tension et les transducteurs
3. La carte d'acquisition.

### II.2.2.1 Maquette de charges

Elle permet le branchement des différentes charges soit en parallèle ou en série, soit en monophasé ou en triphasé triangle. Elle est connectée au réseau électrique à travers des capteurs de tension et du courant.

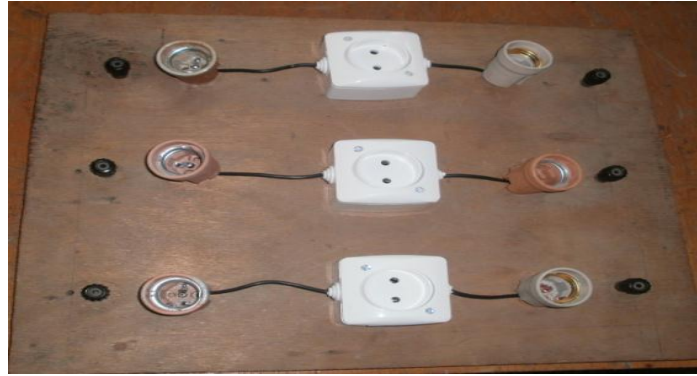


Figure I.2 : Vue maquette de charges.

### II.2.2.2 Les capteurs du courant, de la tension et les transducteurs

Les capteurs du courant et de la tension récupèrent les deux signaux (courant et tension) et les transducteurs les adaptent à la carte d'acquisition en les divisant par des rapports bien définis. Les courants et les tensions récupérés seront envoyés par un câble en nappe vers la carte déjà installée à l'intérieur d'un micro-ordinateur sur un bus PCI comme le montre la Figure I.3.

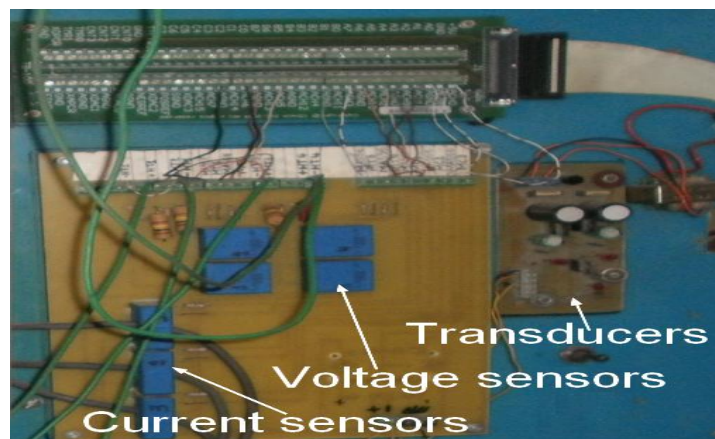
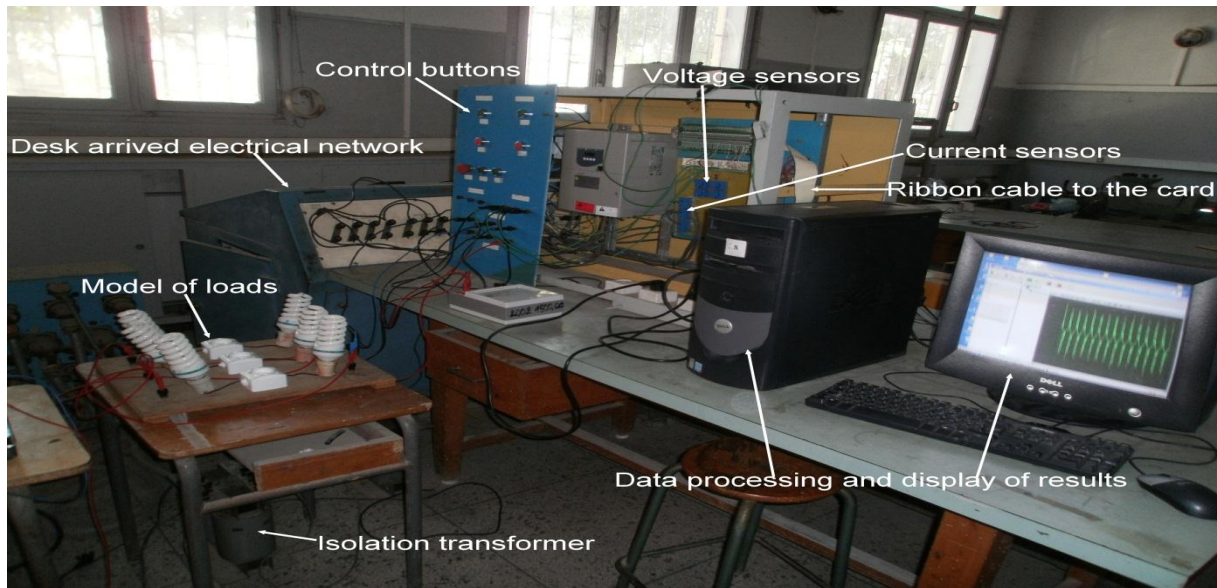


Figure I.3 : Vue des capteurs du courant, de la tension et les transducteurs.

Ainsi cette carte nous permet de tirer des fichiers de valeurs des 3 tensions et des 3 courants en triphasé ou bien le courant et la tension d'une phase si on est en monophasé [14].



**Figure II.4 :** Vue générale de banc d'essai.

## II.2.3 Traitement des données et calcul des différents paramètres de la qualité de l'énergie électrique

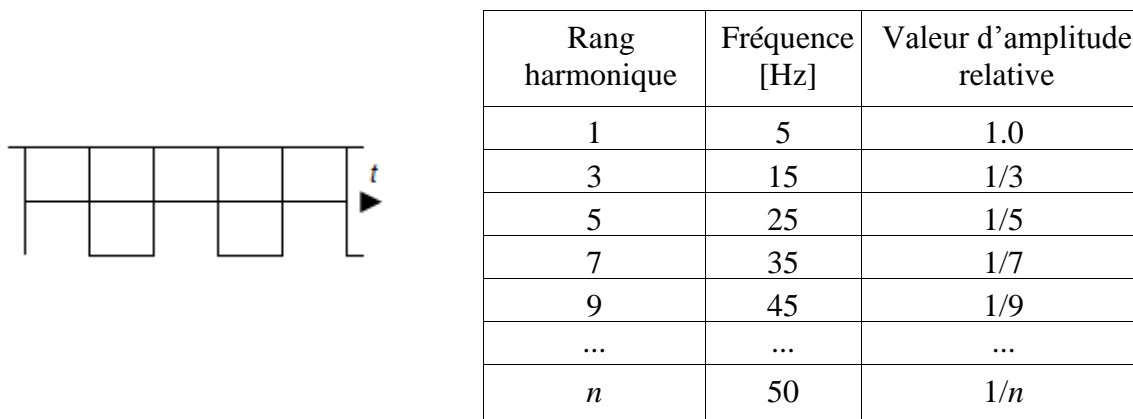
Dans le cas de notre étude, nous nous limiterons à la TFD et le calcul des paramètres caractérisant la qualité de l'énergie électrique selon la norme IEEE Std.1459.2010 pour l'analyse de la qualité de l'énergie électrique, [15].

### II.2.3.1 Méthode de la transformée de Fourier

Cette méthode nécessite la décomposition de tout signal périodique en un fondamental et de signaux sinusoïdaux de fréquence  $nf$ . Nous présentons la composition et la décomposition d'une onde déformée.

#### II.2.3.1.1 Composition d'une d'onde déformée

Une onde déformée (différente d'une sinusoïde) peut être obtenue par la superposition de plusieurs sinusoïdes de fréquences et d'amplitudes différentes. Par exemple, la forme d'onde rectangulaire à la Figure I.5 est le résultat de la sommation d'un nombre indéfini d'harmoniques dont les amplitudes sont décroissantes en proportion inverse à leurs ordres  $n$ , et leurs fréquences sont des multiples impairs de l'harmonique fondamentale à  $f_1 = 50$  Hz. La forme d'onde ne dépend pas uniquement des fréquences et des amplitudes des composantes harmoniques, mais aussi de leur déphasage mutuel [16].

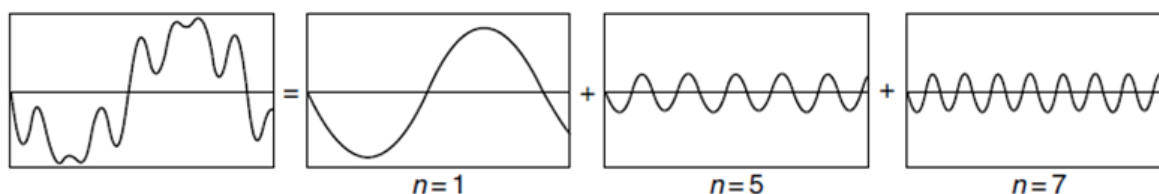


**Figure.I.5 :** Onde rectangulaire comme une superposition du fondamental et des harmoniques impaire.

### II.2.3.1.1 Décomposition d'une onde déformée

Comme chaque onde déformée peut être composée à partir des composantes harmoniques. Il en est de même pour toute onde périodique se décomposant en composantes harmoniques (Figure II.6). Cette technique d'analyse permet d'examiner séparément chaque composante de l'onde déformée selon des méthodes classiques pour l'analyse des circuits et obtenir un résultat final qui est la somme des résultats partiels. Il a été démontré que toute forme d'onde périodique peut être décomposée en une sinusoïde à fréquence fondamentale avec un certain nombre de sinusoïdes à des fréquences harmoniques [16]. Selon le type de forme d'onde, ces coefficients peuvent ou ne peuvent exister. Une composante continue peut compléter ces résultats de termes purement sinusoïdaux. Ce concept peut être expliqué par l'équation suivante :

$$f(t) = c_0 + \sum_{m=1}^{\infty} c_m \sin\left(\frac{m}{N}\omega_1 t + \varphi_m\right) \quad \text{(I.1)}$$



**Figure I.6 :** Décomposition d'une onde déformée en composante fondamentale (n=1) et en cinquième et septième harmonique.



**CHAPITRE II :**  
**ÉTUDE DES CHARGES NON**  
**LINÉAIRES ET INFLUENCE DES**  
**HARMONIQUES DU COURANT DE**  
**CHARGE SUR LA TENSION DU**  
**RÉSEAU**

---

## II.1 Introduction

Actuellement, la plupart des appareils domestiques dans les maisons modernes utilisent l'électronique de puissance. Ces appareils sont sources de courants harmoniques dans le réseau électrique. La combinaison de plusieurs charges non linéaires a pour effet de détériorer la qualité d'énergie dans les systèmes de distribution. Ainsi les lampes fluo compactes (CFL), les lampes fluorescentes, les ordinateurs de bureau et les fours à micro-ondes peuvent contribuer à cette dernière détérioration. Par conséquent, il est important d'étudier et de caractériser les effets d'un nombre relativement important d'appareils électroménagers sur le courant résultant harmonique qui n'est pas une simple somme arithmétique des courants harmoniques individuels de chacun de ces appareils.

Parmi les charges présentes dans une maison d'un client résidentiel, l'éclairage représente une partie importante de la puissance totale consommée. Si l'éclairage se compose principalement de lampes à incandescence, il peut représenter une part significative de la facture énergétique d'un client. La consommation liée à l'éclairage associé peut être réduite de 75-80 % lorsque les lampes fluo compacts remplacent les lampes à incandescence.

Dans ce chapitre, on commence par traiter la question «Quels sont les appareils électroménagers sources de courants harmoniques les plus importants? ». Ainsi, une comparaison des courants harmoniques provenant des appareils domestiques est effectuée. Ce thème est important, car les harmoniques sont susceptibles d'être l'une des préoccupations principales de la qualité d'énergie dans les zones résidentielles dans un proche avenir [17].

Afin de répondre à cette question, nous avons effectué une étude des courants et des tensions harmoniques ainsi que le calcul des paramètres caractérisant la qualité de l'énergie sur quelques appareils domestiques. Nous avons classé la pollution harmonique de ces derniers appareils afin d'obtenir une comparaison cohérente des impacts harmoniques et d'évaluer leurs gravités relatives.

Dans une deuxième partie, nous abordons l'influence du montage triangle sur les harmoniques.

La troisième partie de notre étude porte sur l'effet de ces appareils dans le but d'analyser l'impact collectif des appareils domestiques. Les déphasages des courants harmoniques sont pris en considération afin d'en atténuer au maximum les effets. Dans les trois parties de ce chapitre, des indices sont proposés pour évaluer les harmoniques de courant des appareils électroménagers en s'intéressant au courant et à la tension du côté du récepteur.

La quatrième partie porte sur l'influence des charges sur le réseau d'énergie électrique. Cette étude est effectuée à l'aide d'un transformateur d'isolement afin de simuler un réseau d'énergie électrique. Les mesures des courants et des tensions sont effectuées du côté amont du transformateur.

## II.2 Etude pratique de certains types de charges non linéaires

Dans cette partie on s'intéresse à l'étude des charges individuellement. Les charges seront alimentées sous une tension de 220V. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. On obtiendra un fichier de valeur sur le courant absorbé par cette charge et un autre sur la tension à ces bornes grâce au système d'acquisition de données (Figure II.1), puis les différents paramètres de la qualité d'énergie électrique seront calculés conformément à la norme IEEE Std 1459-2010, [15] grâce à un script Matlab.



Figure II.2.1. Schéma du montage expérimental pour l'étude des charges.

### II.2.1 Cas d'une lampe à incandescence

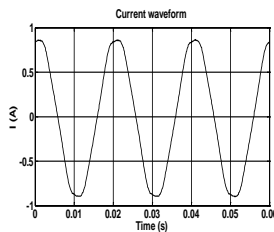


Figure II.2.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

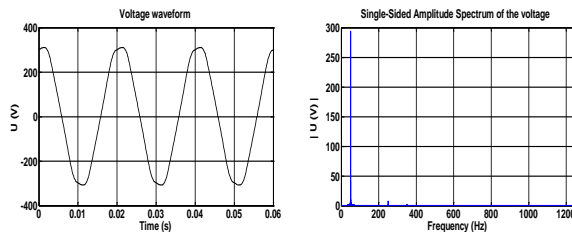


Figure II.2.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau II.1 Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension

n	1	3	5	7	9	11
$THDI_i$ (%)	99.968	0.781	2.328	0.491	0.0764	0.138
$THDVi$ (%)	99.941	0.061	2.287	0.500	0.075	0.155

### Analyse et interprétation

D'après les figures II.1.2 et II.1.3, on remarque que la forme du courant et de la tension sont presque des sinusoïdes parfaites. Ces résultats sont vérifiés par une  $THD_I = 2.5181(\%)$  et une  $THD_V = 2.5831(\%)$ .

Cette lampe présente un facteur de puissance fondamental de 0.99 et les faibles taux de distorsion harmoniques en courant et en tension expliquent le fait que  $FP = \cos \theta_1$ , alors on peut considérer cette lampe comme une résistance pure.

Vu les propriétés de la qualité de l'énergie qu'on retrouve sur le Tableau III.6 sur cette lampe on la prendra dans ce chapitre comme référence d'étude pour les autres appareils domestique.

**II.2.2 Cas d'une lampe fluo compact (lampe à faible consommation)**

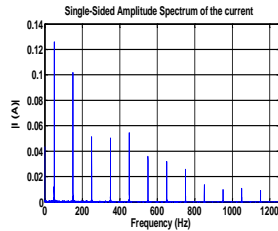
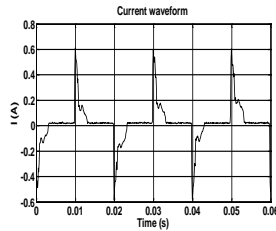


Figure II.2.4 : Représentation temporelle et spectre du courant.

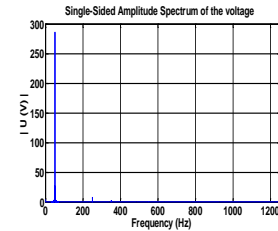
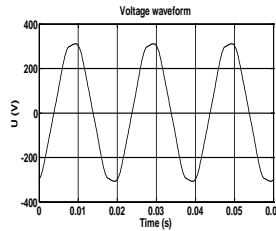


Figure II.2.5 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.2** Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
THDi (%)	66.7	47.8	29.3	24.4	27.4	19.4	16.7	11.2	8.6	4.0	5.8	4.4	4.3
THDVi (%)	99.9	0.1	2.8	0.7	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Analyse et interprétation**

En résumé, cette lampe est caractérisée par une très grande distorsion en courant,  $THD_I = 111.6417\%$ , une augmentation de la distorsion en tension,  $THD_V = 3.1228\%$ , une faible consommation en puissance active,  $P = 10.4885$  (W), une consommation élevée en puissance réactive,  $Q=6.5240$  (VAR), et un très faible facteur de puissance,  $FP= 0.5198$ .

**II.2.3 Cas d'une lampe fluorescente**

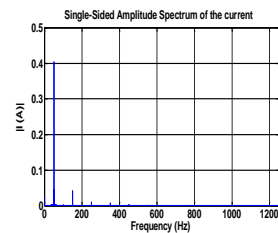
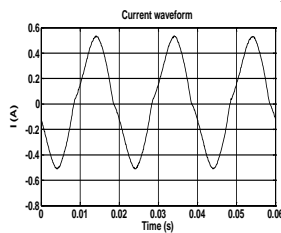


Figure II.2.6 : Représentation temporelle et spectre du courant.

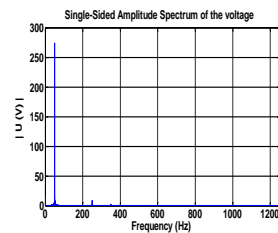
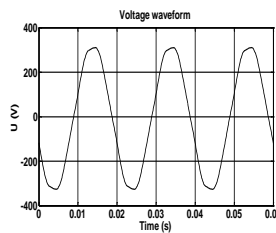


Figure II.2.7 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.3** : Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension

n	1	3	5	7	9	11
THDi (%)	99.7	6.4	2.1	1.5	0.6	0.4
THDVi (%)	99.9	0.1	2.7	0.8	0.0	0.2

**Analyse et interprétation**

Cette lampe est caractérisée par une faible distorsion en courant,  $THD_I = 6.959 \%$ , une augmentation de la distorsion en tension,  $THD_V = 3.1228\%$ , elle jouie aussi d'un bon facteur de puissance  $FP = \cos \theta_1 = 0.99$  presque similaire à la lampe à incandescence. Ainsi si on devait faire une comparaison entre cette lampe et la lampe à incandescence on dira que mise à part la présence de l'harmonique trois 3 qui peut causer des problèmes pour les installations électriques et les problèmes liés aux ballasts magnétiques, comme le fait qu'il faut quelques secondes pour que la lampe s'allume et qu'ils peuvent provoquer un papillotement ou Flicker perceptible. Les ballasts magnétiques peuvent aussi vibrer à une fréquence faible ce qui cause un bourdonnement qui dérange les usagers, cette lampe est très similaire du point de vue des paramètres de la qualité de l'énergie électrique à la lampe à incandescence.

**II.2.4 Cas d'un micro-ordinateur**

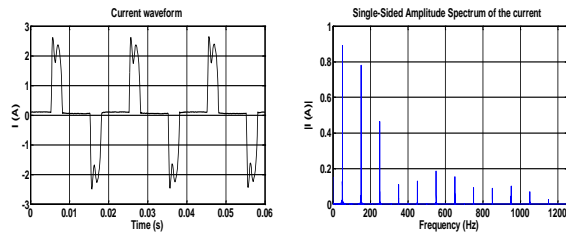


Figure II.2.8 : Représentation temporelle et spectre du courant.

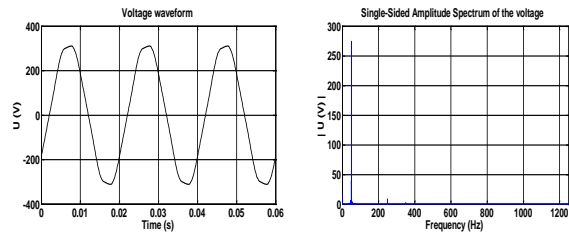


Figure II.2.9 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau III.4 : Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension :**

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
$THDI_i$ (%)	73.8	56.4	30.4	6.6	7.7	10	10.8	9.0	5.5	5.5	6.7	2.0	1.6
$THDV_i$ (%)	99.9	0.1	2.5	0.7	0.6	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Analyse et interprétation**

En résumé, le micro-ordinateur est caractérisé, comme les lampes fluo compact, par une très grande distorsion en courant,  $THD_I = 91.409 \%$ , une augmentation de la distorsion en tension en tension comparativement à la lampe à incandescence,  $THD_V = 2.783 \%$ , une consommation élevée en puissance réactive,  $Q = 2.7056$  (VAR) pour une puissance active de  $P = 82.3445$  (W) et un très faible facteur de puissance,  $FP = 0.69$ .

Ces phénomènes d'harmoniques peuvent être expliqués par le fait que les ordinateurs personnels de bureau présentent une charge non linéaire à l'entrée de l'alimentation AC et aussi la ressemblance de l'écran CRT avec les lampes fluo compact, [19].

**II.2.5 Cas d'un four à micro-ondes**

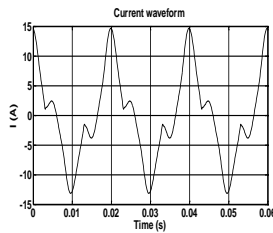


Figure II.2.10 : Représentation temporelle et spectre du courant.

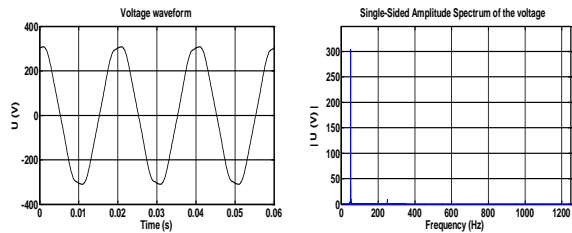


Figure II.2.11 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.5 : Taux individuels de distorsions harmoniques en courant et en tension**

n	1	2	3	4	5	6	7	9	11	13
THD <sub>i</sub> (%)	94.417	7.561	31.291	1.876	5.231	1.360	3.740	0.746	0.831	0.575
THD <sub>v</sub> (%)	99.94	0.00	0.186	0.00	2.234	0.00	0.627	0.00	0.00	0.00

**Analyse et interprétation :**

On constate une forte consommation en courant,  $I_{eff} = 7.0653(A)$ , et en puissance réactive,  $Q = 317.057 (VAR)$ , pour une puissance active consommée  $P = 781.159 (W)$ , Tableau III.6.

En résumé, les fours à micro-ondes sont caractérisés par une moyenne distorsion en courant,  $THD_I = 34.904 \%$ , une consommation très élevée en puissance active et réactive et un facteur de puissance acceptable  $FP = 0.90$ .

**Tableau II.6 : Récapitulatifs de tous les paramètres caractérisant la qualité d'énergie électrique des charges utilisées selon la norme IEEE Std 1459-2010**

paramètres	Type de charges				
	Lampe à incandescence	Lampe fluo compact	Lampe fluorescente	Micro-ordinateur	Four à micro-ondes
THD <sub>I</sub>	2.5181	111.6417	6.9599	91.4099	34.9047
THD <sub>V</sub>	2.5831	3.1228	3.0157	2.7830	2.6749
I <sub>eff</sub> (A)	0.6377	0.1561	0.3416	1.0577	7.0653
I <sub>1</sub> (A)	0.6325	0.0890	0.3232	0.7451	5.9368
I <sub>h</sub> (A)	0.0812	0.1282	0.1091	0.7507	3.8304
U <sub>eff</sub> (V)	223.8435	223.9457	230.5232	224.8372	223.883
U <sub>1</sub> (V)	222.1433	202.4211	219.5655	223.907	218.503
U <sub>h</sub> (V)	27.5366	95.7986	70.2278	19.4917	48.7858
P (W)	82.3445	10.4885	45.0512	94.6898	781.159
P <sub>1</sub> (W)	81.0799	8.1069	40.7539	90.0297	678.525
P <sub>h</sub> (W)	1.2645	2.3816	4.2973	4.6601	102.634
S (VA)	82.4164	20.1782	45.4057	137.2981	913.249

$S_1$ (VA)	81.1251	10.4059	40.9755	96.3520	748.947
$S_h$ (VA)	1.2906	7.0890	4.4245	8.4483	107.889
$S_N$ (VA)	14.5324	17.2881	19.5625	97.8114	522.591
Q (VAR)	2.7056	6.5240	4.22554	34.3273	317.057
DI (VAR)	2.0421	7.7511	2.8450	65.0081	246.815
Dv (VAR)	2.0949	0.3247	1.2352	2.6804	19.278
D <sub>h</sub> (VAR)	0.2580	6.6770	1.0529	7.0468	33.262
N (VAR)	3.4431	17.2381	5.6628	99.4214	473.089
FP	0.9991	0.5198	0.9922	0.6897	0.8554
$\text{Cos}\theta_1$	0.9994	0.7791	0.9946	0.9344	0.9060

En résumé, généralement les charges non linéaires sont caractérisées par :

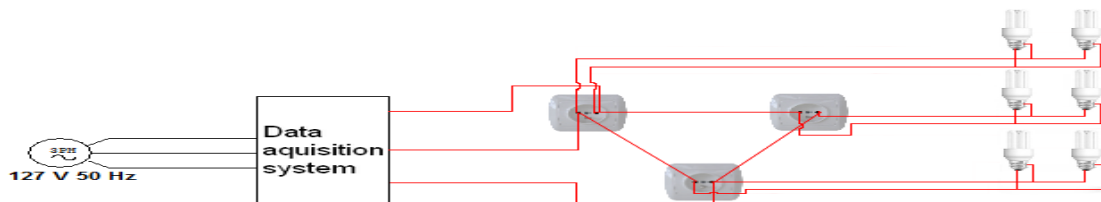
- Une large distorsion en courant accompagnée par une légère distorsion en tension,
- Une grande consommation en puissance non active (N) et une augmentation de la puissance active harmonique,
- Un faible facteur de puissance.

### II.3 Etude de l'influence du montage triangle sur les harmoniques

Le montage joue un rôle important sur les phénomènes harmoniques. Dans cette partie nous étudierons l'influence du montage triangle sur les paramètres de la qualité d'énergie électrique sur deux cas, l'un portera sur des lampes fluo compact et l'autre sur les lampes fluorescentes.

#### II.3.1 Cas des Lampes fluo compact

Dans ce type de montage les récepteurs sont montés en triangle et sont supposées comme des charges triphasées équilibrées, nous avons utilisé 2 lampes par phase, ces dernières ont les mêmes propriétés que celle qu'on a utilisée dans la première étude, chaque phase est alimentée sous une tension de 220V.



**Figure II.3.1.** Schéma du montage expérimental pour des lampes fluo Compact montées en triangle.

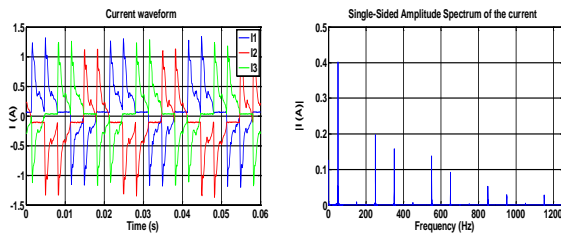


Figure II.3.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

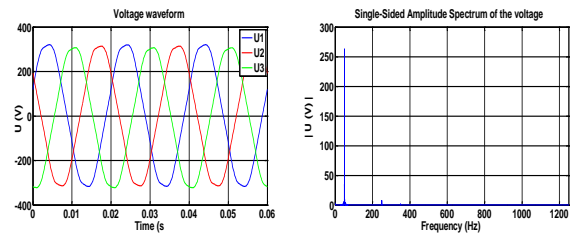


Figure II.3.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau III.7** Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension.

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
$THDI_i$ (%)	87.0	0.4	30.8	19.8	0.9	22.8	17.0	0.8	7.3	5.8	0.9	6.8	4.6
$THDVi$ (%)	99.9	0.3	2.0	0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

### III.2.2. Les lampes fluorescentes :

Le même montage a été utilisé pour les lampes fluorescentes

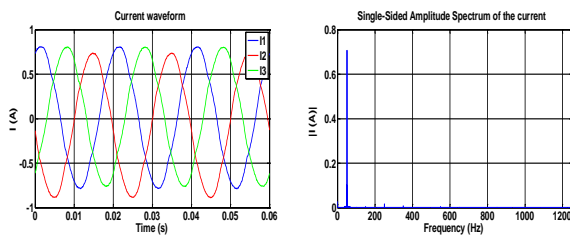


Figure II.3.4 : Représentation temporelle et spectre du courant.

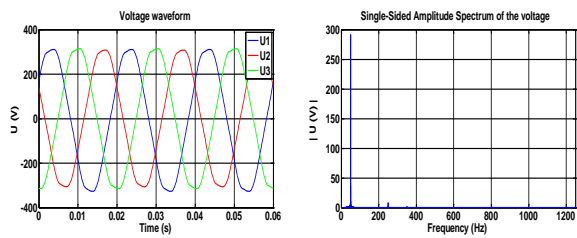


Figure II.3.5 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.8** : Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19
$THDI_i$ (%)	99.96	0.14	2.10	1.51	0.01	0.45	0.36	0.01	0.18	0.14
$THDVi$ (%)	99.97	0.00	2.51	0.72	0.09	0.20	0.11	0.05	0.10	0.07

**Tableau II.9** Récapitulatifs de tous les paramètres caractérisant la qualité d'énergie électrique pour les montages triangles selon la norme IEEE Std 1459-2010, [15].

paramètre	Type de charge	
	Lampe fluo compact	Lampe fluorescente
$THD_I$	56.5732	2.6756
$THD_V$	2.1284	2.6281
$I_{eff}$ (A)	0.4603	0.5774
$I_1$ (A)	0.3475	0.5722



$I_h$ (A)	0.3018	0.0766
$U_{\text{eff}}$ (V)	226.9600	222.5214
$U_1$ (V)	224.4164	222.3487
$U_h$ (V)	33.9296	8.7647
$P$ (W)	46.27	61.9591
$P_1$ (W)	38.5021	61.3854
$P_h$ (W)	7.7716	0.5737
$S$ (VA)	60.3139	74.1738
$S_1$ (VA)	45.0222	73.4607
$S_h$ (VA)	5.9145	0.3877
$S_N$ (VA)	40.1344	10.2604
$Q$ (VAR)	23.3362	40.3522
$DI$ (VAR)	22.1691	1.9648
$D_v$ (VAR)	0.9130	1.9299
$D_h$ (VAR)	5.0415	0.4229
$N$ (VAR)	38.6848	40.7776
$FP$	0.7672	0.8353
$\cos \theta_1$	0.8552	0.8356

En résumé, l'utilisation du montage triangle à un intérêt majeur dans les installations électriques, car il permet d'atténuer les harmoniques de rangs multiples de 3 qui représente un grave danger pour équipement électrique.

#### II.4 Effet collectif des charges non linéaires (étude cas d'un foyer)

Dans cette partie nous avons étudié l'effet commun des charges non linéaire, Afin de répondre plus précisément sur l'impact collectif de ces dernières sur le courant de charge. Pour cela les charges sont montées en parallèle sur une phase et alimentées sous une tension de 220V



**Figure II.4.1.** Schéma du montage expérimental pour l'étude des charges en parallèle.

### II.4.1 Cas d'un foyer utilisant que des charges non linéaires de même type : (5 lampes fluo compacts)

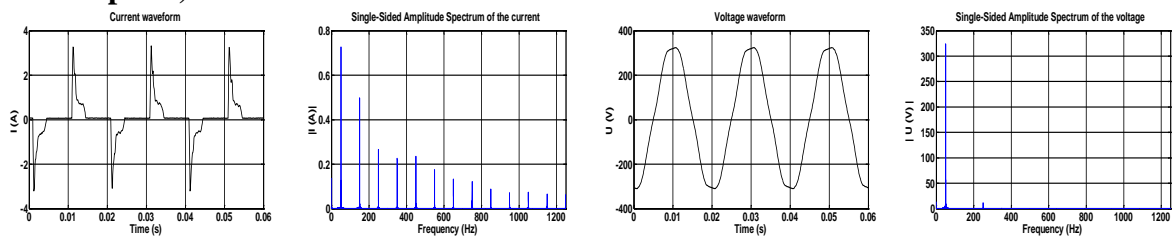


Figure II.4.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

Figure II.4.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau II.10 : Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension

N	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
$THDi$ (%)	70.2	44.7	30.7	21.4	28.0	13.8	14.0	10.2	9.2	6.3	7.7	5.6	6.5
$THDVi$ (%)	99.9	0.2	4.3	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

#### Analyse et interprétation

On constate une amélioration du taux de distorsion harmonique en courant,  $THD_I = 101.345(\%)$ , et une augmentation de la distorsion harmonique en tension,  $THD_V = 3.1228\%$ , une amélioration de facteur de puissance,  $FP=0.53$ , comparativement au cas où nous avons utilisé une lampe fluo compact.

On conclue donc que ce qui augmente la puissance n'augmente pas nécessairement les harmoniques en courants en raison de la grande quantité d'annulations harmonique, en particulier les harmoniques du rang au-dessus du 3. Lorsqu'on considère un grand nombre de charges non linéaires, le courant harmonique résultant n'est pas une simple somme arithmétique des courants harmoniques individuels de chaque charge. Il y a un effet décroissant qui influe sur le courant harmonique résultant d'un groupe de charges. Le phénomène qui affecte la distorsion en courant est l'effet d'atténuation. Cet effet est défini dans la littérature comme une diminution de la distorsion du courant de la charge causée par une certaine augmentation de la distorsion de la tension, [17, 18, 20, 21, 22, 23,24].

### II.4.2 Cas d'un foyer ayant que des charges non linéaires de types différents : (Four à micro-onde, micro-ordinateur, lampe fluo compact, lampe fluorescente)

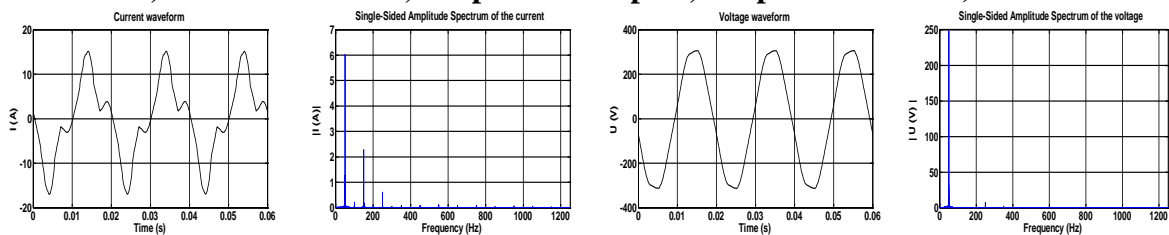


Figure II.4.4 : Représentation temporelle et spectre du courant.

Figure II.4.5 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.11 :** Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension

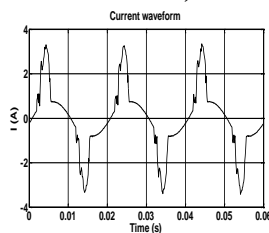
n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
THD <sub>I</sub> (%)	93.8	33.7	8.1	1.1	1.5	1.8	1.2	1.0	0.5	1.2	0.8	0.4	0.2
THD <sub>V</sub> (%)	99.9	0.2	1.9	0.7	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Analyse et interprétation**

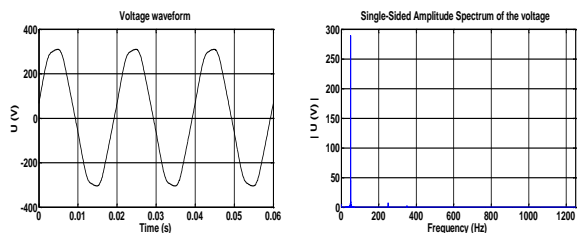
L’augmentation de taux de distorsion harmonique en courant et en tension pour l’ensemble des charges, THD<sub>I</sub> = 37.3653 %, THD<sub>V</sub> = 2.829 %, comparativement à celui d’un four à micro-onde seul, THD<sub>I</sub> = 34.9047 %, THD<sub>V</sub> = 2.674 %, respectivement et leur diminution comparativement avec ceux d’une lampe fluo compact, THD<sub>I</sub> = 111.64%, THD<sub>V</sub> = 3.12 % est due au phénomène de diversité des charges. Le courant total absorbé par l’ensemble des charges est la superposition, c'est-à-dire une somme vectorielle, des courants absorbés par chacune des charges. Le courant résultant porte des nouvelles caractéristiques différentes de celles des courants absorbés par chacune des charges. Généralement, c’est la charge qui consomme le plus fort courant qui impose ces caractéristiques, comme dans ce cas c’est le four à micro-onde qui a imposé ces caractéristiques, [18, 20, 21].

En résumé, une installation comportant que des charges non linéaires est caractérisée par une grande distorsion en courant, mais plus faible que celle de la charge ayant la plus grande distorsion de l’ensemble. Cela est dû aux phénomènes de diversité et d’atténuation harmoniques. Une augmentation de la distorsion en tension est due à la circulation d’un courant harmonique élevé en valeur efficace. Une grande consommation de l’énergie non active ce qui dégrade le facteur de puissance de l’installation.

**II.4.3. Cas d’un foyer réel comportant une lampe fluo compact, une lampe à incandescence, une lampe fluorescente et un micro-ordinateur**



**Figure II.4.6 :** Représentation temporelle et spectre du courant.



**Figure II.4.7 :** Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.12 :** Taux individuel de distorsion harmonique en courant et en tension

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
THD <sub>I</sub> (%)	88.9	38.8	20.8	8.4	3.6	3.2	3.2	2.2	1.5	3.6	3.2	2.2	1.2
THD <sub>V</sub> (%)	99.9	0.2	2.4	0.6	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

**Analyse et interprétation**

Dans ce cas contrairement à l'essai de 5 lampes fluo compacts il y a deux effets décroissants qui influent sur le courant harmonique résultant. Le premier phénomène affecte la distorsion en courant c'est l'effet d'atténuation. Le deuxième phénomène affectant la somme de ces charges est l'effet de diversité. Dans ce cas l'effet de diversité est plus visible, car les courants absorbés par chaque charge sont de même grandeur. La diversité de topologies ces différents appareils provoque une diversité d'angles de phase des courants harmoniques générés par ces dispositifs. Cela conduit à une somme vectorielle inférieure à la somme arithmétique (qui néglige les angles de phase), Un facteur de diversité est défini comme le rapport entre la somme vectorielle (mesurée) et la somme arithmétique des harmoniques [22], [23], [24] - [29].

L'introduction d'une charge linéaire (lampe à incandescence) a amélioré le facteur de puissance de l'installation (FP=0.86) alors qu'il été de 0.52 pour 5 lampes fluo compact et de 0.73 pour le cas ou on avait utilisé que des charges non linéaires.

**Tableau II.13** Récapitulatifs de tous les paramètres caractérisant la qualité d'énergie électrique dans le cas d'une superposition des charges non linéaires (étude cas d'un foyer) selon la norme IEEE Std 1459-2010, [15].

paramètre	Type de charge		
	5 lampes fluo compacts CFL	micro-ondes, micro-ordinateur, lampe fluo compact, lampe fluorescente	(lampe fluo compact, lampe à incandescence, lampe fluorescente, micro-ordinateur)
<b>THD<sub>I</sub></b>	101.345	37.3653	51.3894
<b>THD<sub>V</sub></b>	4.5617	2.8295	2.8797
<b>I<sub>eff</sub> (A)</b>	0.8017	6.2546	1.4704
<b>I<sub>1</sub> (A)</b>	0.4759	4.6430	1.2774
<b>I<sub>h</sub> (A)</b>	0.6451	4.1908	0.7283
<b>U<sub>eff</sub> (V)</b>	230.7934	225.1405	222.2485
<b>U<sub>1</sub> (V)</b>	212.2173	220.9128	221.0195
<b>U<sub>h</sub> (V)</b>	90.7160	43.4265	23.3405
<b>P (W)</b>	56.5190	597.0656	161.5429
<b>P<sub>1</sub> (W)</b>	43.9285	464.2636	156.9101
<b>P<sub>h</sub> (W)</b>	12.5905	132.8020	4.6327
<b>S (VA)</b>	106.8230	813.0055	188.6767
<b>S<sub>1</sub> (VA)</b>	58.3150	592.1839	163.0020
<b>S<sub>h</sub> (VA)</b>	33.7876	105.0733	9.8141
<b>S<sub>N</sub> (VA)</b>	89.5014	557.0423	95.0223

<b>Q (VAR)</b>	38.3528	367.6154	44.1460
<b>DI (VAR)</b>	41 .5095	207.2747	74.5037
<b>Dv (VAR)</b>	2.6574	14.9746	4.6920
<b>D<sub>h</sub> (VAR)</b>	31.3541	81.2157	8.6518
<b>N (VAR)</b>	90.6463	551.8067	97.4823
<b>Fp</b>	0.5291	0.7344	0.8562
$\cos \theta_1$	0.7933	0.7840	0.9626

En résumé, les foyers domestiques sont caractérisés par le grand nombre et la diversité des charges utilisées (linéaire et non linéaire). La distorsion de la forme de courant absorbée dépend de deux paramètres : la diversité des charges et l’atténuation des harmoniques. Ces deux paramètres améliorent la forme d’onde du courant comparativement à la forme d’onde de la charge la plus polluante, mais la superposition des charges non linéaire dégrade la qualité de la tension et la valeur efficace du courant harmonique  $I_h$  augmente avec l’augmentation de nombre de charge utilisée ce qui dégrade la qualité de l’énergie électrique et perturbera les réseaux d’énergie électrique qui est l’objet de l’étude de la partie suivante.

### II.5 Influence des charges non linéaires sur les réseaux électriques

Le but de cette partie est l’étude de l’influence des charge non linéaire sur les réseaux électriques pour cela on introduit un transformateur d’isolement entre la charge et la carte d’acquisition comme le montre la figure suivante

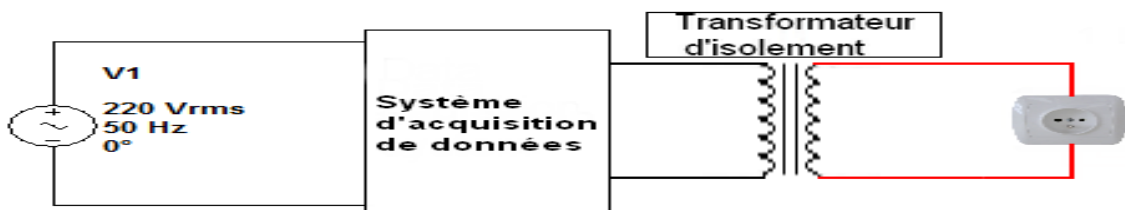


Figure II.5.1. Schéma du montage expérimental avec un transformateur.

#### II.5.1 Cas d’une lampe à incandescence

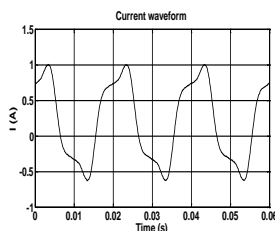


Figure II.5.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

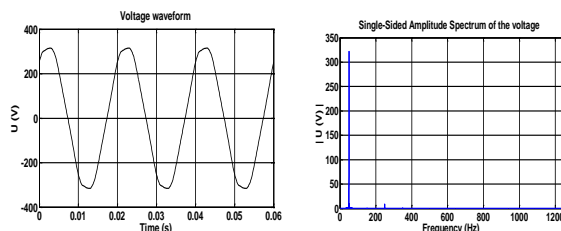


Figure II.5.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.1 :** Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension

n	1	2	3	4	5	11	13
$THD_i$ (%)	95.629	0.753	28.992	0.295	3.713	0.176	0.176
$THD_v$ (%)	99.948	0.103	0.273	0.033	2.110	0.150	0.00

### Analyse et interprétation

On constate une présence d'harmoniques d'ordre pairs et impairs alors que l'essai de l'étude n° 1 portant sur la lampe à incandescence nous a donné des formes sinusoïdales en courant et en tension, ces résultats portant sur la distorsion en courant et en tension sont vérifiés par les valeurs des Tableaux II.6 et II.20, ainsi il y a une augmentation de la  $THD_I$  de 2.518 % à 30.579 % et une augmentation de la  $THD_V$  de 2.583 % à 3.213 %.

Ainsi on peut conclure que les transformateurs sont des charges non linéaires, qui participent dans la distorsion du courant et de la tension en générant des harmoniques d'ordre 3, surtout quand ces derniers fonctionnent à charge réduite.

### II.5.2 Cas d'une lampe fluo compact (économique)

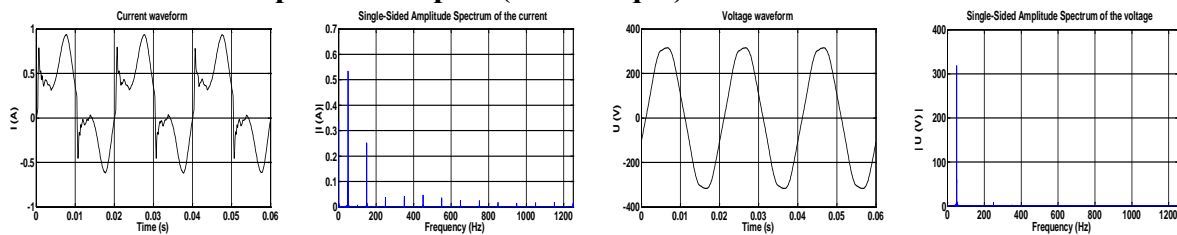


Figure II.5.4 : Représentation temporelle et spectre du courant.

Figure II.5.5 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.15 :** Taux individuels de distorsion harmonique en tension et en courant

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
$THD_i$ (%)	92.0	35.3	7.5	6.8	6.5	7.2	4.4	3.6	3.3	2.2	2.9	3.0	2.0
$THD_v$ (%)	99.9	0.2	2.9	0.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

### Analyse et interprétation

De la Figure II.5.4 et de la Figure II.5.5 on remarque la distorsion en courant due à la lampe fluo compact se retrouve au primaire du transformateur avec une diminution dans l'amplitude des harmoniques comparant celle trouvée avec une lampe fluo compact sans transformateur, et cela est vérifié par les Tableaux II.6 et II.20 par une diminution du  $THD_I$  de 111.64 (%) à un  $THD_I$  de 42.52 (%) respectivement. Cette diminution de la distorsion en courant est accompagnée par une augmentation de la distorsion en tension vérifié une élévation du  $THD_V$  de 3.122 % à 3.604 %.

La diminution des amplitudes des harmoniques et l'augmentation de la distorsion en tension sont expliquées par le phénomène d'atténuation dû au transformateur et l'effet de diversité entre la lampe fluo compact utilisée et le transformateur d'isolement. Ce dernier effet est visible dans ce cas, car le transformateur fonctionne à charge réduite.

**II.5.3 Cas d'une lampe fluorescente**

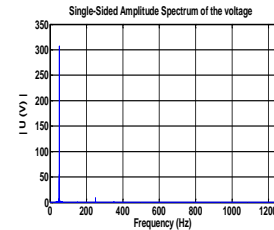
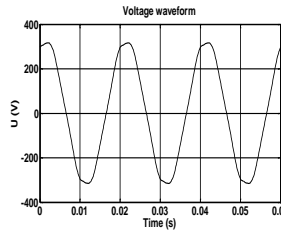
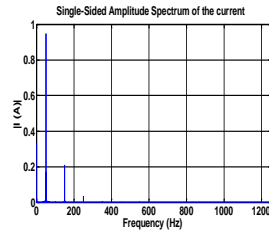
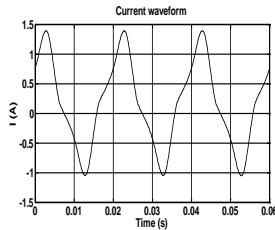


Figure II.5.6 : Représentation temporelle et spectre du courant.

Figure II.5.7 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II 16 : Taux individuels de distorsions harmoniques en courant et en tension**

n	1	3	5	7	9	11	13
THDi(%)	98.03	19.62	2.14	0.44	0.25	0.31	0.12
THDVi(%)	99.96	0.21	1.83	0.50	0.10	0.22	0.05

**Analyse et interprétation**

On constate une augmentation de la distorsion en courant et en tension,  $THD_I = 20.146\%$ ,  $THD_V = 3.295\%$ , comparativement au cas sans transformateur. Ainsi on peut conclure similairement à la lampe à incandescence que c'est le transformateur d'isolement qui est responsable de cette distorsion dans les formes d'onde du courant et de la tension et qu'il génère principalement des harmoniques d'ordre 3 en courant .

Cette augmentation de distorsion harmonique est accompagnée par une dégradation de facteur de puissance FP qui est de 0.93 alors qu'il été de 0.99 dans le cas de l'essai sans transformateur.

**II.5.4 Cas d'un micro-ordinateur**

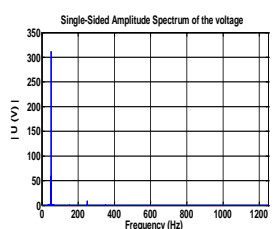
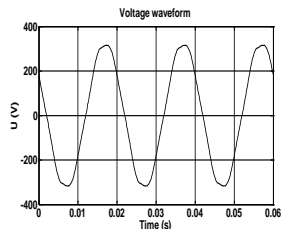
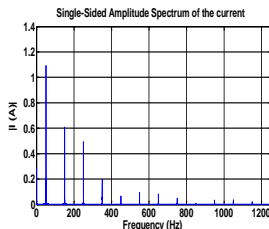
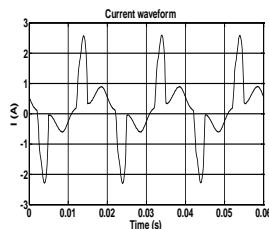


Figure II.5.8 : Représentation temporelle et spectre du courant.

Figure II.5.9 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau III.17 : Taux individuels de distorsions harmoniques en courant et en tension**

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
THDi(%)	83.3	42.6	29.0	16.9	5.2	5.8	5.5	3.4	0.6	2.3	2.2	1.4	0.5
THDVi(%)	99.9	0.2	2.3	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

### Analyse et interprétation

On constate une diminution de la distorsion en courant, et une légère augmentation de la distorsion en tension. C'est résultat portant sur la distorsion en courant et en tension sont vérifiés par les valeurs des tableaux II.6 et II.20 cela par une diminution du  $THD_I$  de 91.409 % à 66.355 % et une élévation du  $THD_V$  de 2.783 % à 3.099 %.

Ainsi on peut conclure similairement à la Lampe fluo compact que les distorsions dues au micro-ordinateur se retrouvent au secondaire de transformateur avec une légère atténuation due à l'effet d'atténuation du transformateur d'isolement et l'effet de diversité entre le microordinateur utilisé et le transformateur d'isolement.

#### II.5.5 Cas d'un four à micro-ondes

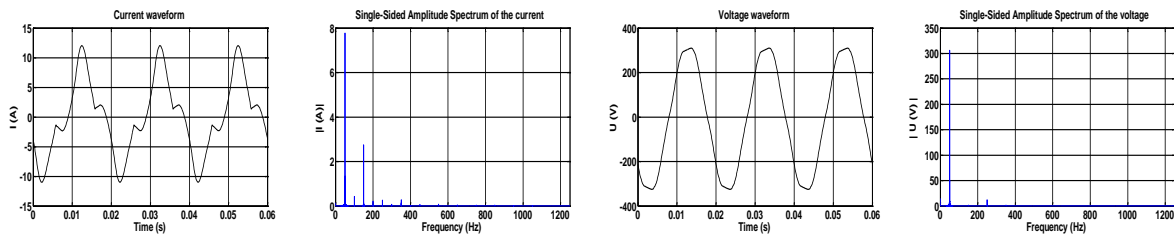


Figure II.5.10 : Représentation temporelle et spectre du courant.

Figure II.5.11 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau II.18 : Taux individuels de distorsions harmoniques en courant et en tension

n	1	2	3	4	5	6	7	9	11	13
$THD_{Ii}$ (%)	94.9	5.94	30.5	2.22	2.3	0.73	2.40	0.67	0.89	0.58
$THD_{Vi}$ (%)	99.9	0.00	0.50	0.00	2.9	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00

### Analyse et interprétation

Des Figure II.5.10, II.5.11 on remarque la très faible diminution de la distorsion en courant, et une légère augmentation de la distorsion en tension. C'est résultats portant sur la distorsion en courant et en tension sont vérifiés par les valeurs des tableaux II.6 et II.20; ainsi il y a une diminution de la  $THD_I$  de 34.904 % à 33.098 % et une élévation du  $THD_V$  de 2.674 % à 3.631 %.

La faible atténuation des harmoniques due au transformateur pour ce type de charge caractérise l'influence des grandes charges non linéaires sur les réseaux électriques, en effet on retrouve la même forme de courant comparativement à l'étude n° 1 sans transformateur au primaire du transformateur dans cette étude, c'est-à-dire l'effet d'atténuation diminue avec l'augmentation du courant de charge. Ce qui aura pour effet la circulation des courants harmoniques dans les réseaux électriques avec une augmentation de la distorsion en tension et cela aura un effet désastreux sur les réseaux électriques.



### II.5.6 Cas d'un foyer réel comportant une lampe fluo compact, une lampe à incandescence, une lampe fluorescente et un micro-ordinateur

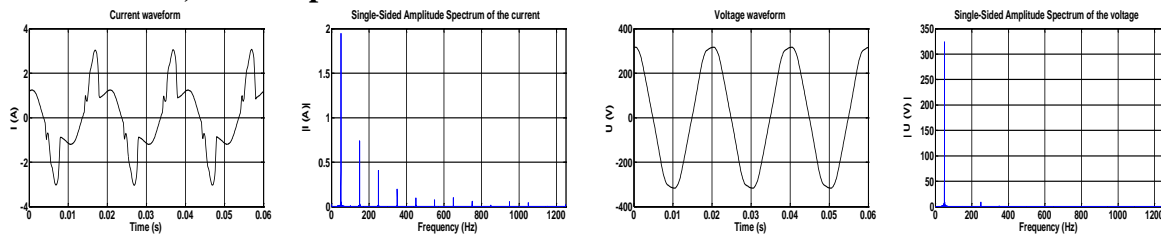


Figure II.5.12 : Représentation temporelle et spectre du courant.

Figure II.5.13 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

**Tableau II.19 :** Taux individuels de distorsion harmoniques en courant et en tension

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
$THDi(\%)$	90.6	35.30	18.8	9.9	4.5	4.0	5.0	3.5	0.6	3.1	2.3	0.4	1.0
$THDVi(\%)$	99.9	0.3	2.7	0.6	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

#### Analyse et interprétation

on remarque que la distorsion due à l'ensemble des appareils montés au secondaire de transformateur se retrouve à son primaire avec une diminution de la distorsion en courant comparativement à l'essai sur un foyer réel de l'étude n° 3, ainsi qu'une légère augmentation de la distorsion en tension. C'est résultat portant sur la distorsion en courant et en tension sont vérifiés par les valeurs des tableaux II.13 et II.20, cela par une diminution du  $THD_I$  de 51.389 % à 46.667 % et une élévation du  $THD_V$  de 2.879 % à 3.548 %.

Ces phénomènes s'expliquent par l'effet d'atténuation du transformateur d'isolement et par l'effet de diversité entre ces appareils domestiques utilisés et le transformateur d'isolement, et que l'effet combiné de la lampe fluo compact et du micro-ordinateur est supérieur à celui de l'effet combiné de la lampe à incandescence et de la lampe fluorescente.

**Tableau II.20** Récapitulatifs de tous les paramètres caractérisant la qualité d'énergie électrique dans le cas d'une superposition des charges non linéaires (étude cas d'un foyer) selon la norme IEEE Std 1459-2010.

paramètre	Type de charge					
	Lampe à incandescence	Lampe fluo compact	Lampe fluorescente	Micro-ordinateur	Four à micro-onde	(lampe fluo compact, lampe à incandescence, lampe fluorescente, micro-ordinateur)
$THD_I$	30.5792	42.5170	20.1469	66.3550	33.0987	46.6673
$THD_V$	3.2139	3.6044	3.2951	3.0998	3.6315	3.5483

<b>I<sub>eff</sub> (A)</b>	0.5843	0.4738	0.7413	1.4495	6.2261	1.5212
<b>I<sub>1</sub> (A)</b>	0.4557	0.3633	0.6901	0.9817	5.7850	1.2327
<b>I<sub>h</sub> (A)</b>	0.3657	0.3041	0.2707	0.7004	2.3017	0.8913
<b>U<sub>eff</sub> (V)</b>	228.3702	228.8835	228.5233	2288320	230.9115	229.2173
<b>U<sub>1</sub> (V)</b>	196.2561	216.9993	224.2774	222.7058	227.9743	205.0657
<b>U<sub>h</sub> (V)</b>	116.7754	72.7939	43.8460	52.5948	86.7108	102.4142
<b>P (W)</b>	67.5069	50.4045	91.4110	99.0900	776.3996	148.6231
<b>P<sub>1</sub> (W)</b>	47.3136	39.8222	85.1968	77.4999	350.2200	118.9013
<b>P<sub>h</sub> (W)</b>	20.1933	10.5822	6.2142	11.5901	26.1796	29.7214
<b>S (VA)</b>	77.0441	62.6060	97.8007	148.6592	830.0400	201.3071
<b>S<sub>1</sub> (VA)</b>	51.6376	45.5187	89.3567	100.5066	761.4272	145.9404
<b>S<sub>h</sub> (VA)</b>	24.6577	12.7787	6.8515	21.2666	48.7848	52.7026
<b>S<sub>N</sub> (VA)</b>	57.1783	42.9833	39.7536	95.5238	330.4467	138.6576
<b>Q (VAR)</b>	20.6850	22.0487	26.9465	63.9949	130.1588	84.6227
<b>DI (VAR)</b>	15.1001	17.8103	17.6480	55.5702	239.2577	61.7168
<b>Dv (VAR)</b>	1.6587	1.6396	2.4976	3.1140	27.6333	5.1752
<b>D<sub>h</sub> (VAR)</b>	14.1504	7.1632	2.8857	17.8309	41.1653	43.5224
<b>N (VAR)</b>	37.1298	37.1336	34.7706	106.2513	293.5473	135.7782
<b>Fp</b>	0.8762	0.8051	0.9347	0.6425	0.9354	0.7383
<b>cos <math>\theta_1</math></b>	0.9163	0.8749	0.9534	0.7711	0.9853	0.8147

En résumé, le fait de retrouver la distorsion harmonique en courant due aux charges non linéaires montées au secondaire du transformateur à son primaire avec une légère atténuation des harmoniques qui se traduit par une augmentation de la distorsion en tension on peut conclure que l'effet commun des charges non linéaires à un effet néfaste sur les réseaux électriques. Dans ce cas on peut faire une extrapolation sur plusieurs foyers. Leurs l'effet commun se traduira par la diversité des foyers ainsi que la diversité des charges utilisées par chaque foyer et l'atténuation harmonique qui vont causer une distorsion de la tension ce qui sera désastreux pour les réseaux électriques et la qualité de l'énergie électrique transitée sur ces derniers.

---

### III.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de voir que les appareils les plus pollués sont les lampes fluo compact et le micro ordinateur et que le four à micro-onde constitue une réelle source d'harmonique du fait de sa forte puissance, aussi on a constaté que les lampes à incandescence et les lampes fluorescentes avaient des paramètres très similaires de qualité d'énergie électrique, on ajoutera à cela que les lampes fluo compactes et les micro-ordinateurs grâce à leurs écrans CRT sont très consommateurs d'énergie réactive.

La deuxième étude nous a permis de conclure que le montage triangle permet d'éliminer toutes les harmoniques multiples de 3.

La troisième étude qui concerne la superposition de charges nous a permis de conclure qu'il faut tenir compte des effets décroissants qui influent sur le courant harmonique résultant, le premier étant l'effet d'atténuation et le deuxième phénomène est l'effet de diversité des charges, ces deux phénomènes conduisent à la diminution des courants harmoniques, mais provoque une augmentation des tensions harmonique, ce qui cause la dégradation de l'énergie électrique. On peut aussi dire qu'une charge impose sa distorsion en courant et en tension si cette charge est caractérisée par une forte consommation en énergie électrique.

La quatrième étude nous a permis de conclure que les charges non linéaires ont un effet néfaste sur les réseaux électriques. Cela en démontrant que les courants harmoniques causés par ce type de charge circulent dans réseaux électriques avec une légère atténuation lors de leurs passages dans les transformateurs qui se traduit par une augmentation de la distorsion en tension, ce qui cause une dégradation de la qualité de l'énergie électrique transitée. Cette dégradation de la qualité électrique affecte tous les équipements installés sur ces réseaux. L'influence des charges non linéaire sur le réseau électrique diffère d'une charge à une autre, et les charges les plus perturbatrices sont celle avec une grande consommation d'énergie ou celle avec une grande distorsion harmonique en courant citons les fours à micro-onde et les lampes fluo compact respectivement. L'effet collectif des charges non linéaires (cas d'un foyer) est désastreux sur les réseaux, car on peut faire une extrapolation sur plusieurs foyers ainsi que sur le nombre de charges utilisées par chaque foyer et sous l'effet de l'atténuation et de la diversité on aura une large distorsion en tension ce qui dégradera la qualité de la tension.

## **Bibliographies:**

- [1] D. CHAPMAN, ‘‘ notions de power quality ‘‘ Copper Development Association, United Kingdom, juillet 2002, PP, 1- 4.
- [2] P. ESPEL, ‘‘Analyse de la qualité de l’énergie électrique, mesure de Flicker’’, Revue Française de métrologie n°20, Laboratoire national de métrologie et d’essai (LNE), France, 2009.
- [3] P. FERRACI, ‘‘ la qualité de l’énergie électrique’’, Cahier Technique de Schneider Electric CT 199, édition octobre 2001, PP, 3 - 16.
- [4] M. KEBBAL & K. BAKIR, ‘‘ Paramètre de la qualité de la tension d’un réseau électrique, étude et analyse’’, Mémoire d’ingénieur d’état en électrotechnique, ENP Alger, juin 2008, PP, 55 - 104.
- [5] E. FELICE & P. REVILLA, ‘‘ qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique’’, Dunod, Paris, 2009, PP, 11 - 66.
- [6] M.H.J. BOLLEN, ‘‘what is power quality’’, Department of Electric power Engineering, Chalmers University of Technology, Horsalsvagen 11, Gothenburg 412 96, Sweden, 2003, PP, 1 - 10.
- [7] S. GHENNA & D. HADBI, ‘‘qualité de l’énergie électrique, étude de cas ‘‘, Mémoire d’ingénieur d’état en électrotechnique, ENP Alger, juin 2011, PP, 7 - 17.
- [8] G. MARSHALL & D. CHAPMAN, ‘‘résilience, fiabilité et redondance ‘‘, Copper Development Association et WSP Communication Ltd, United Kingdom, mai 2002, PP, 1 - 12.
- [9] IEC 61000-4-7, Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4-7 : Techniques d'essai et de mesure –Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'interharmoniques, ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés, 2002.
- [10] CLAYTON R. PAUL, ‘‘Introduction to Electromagnetic Compatibility’’, United States of America, 2006, PP, 3 - 48.
- [11] NF EN 50160, Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution, Mai 2000.
- [12] IEC/TR3 61000-2-1, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems.
- [13] R. CALVAS, ‘‘ les perturbations électriques en BT’’, Cahier Technique de Schneider Electric CT 141, édition mai 2001, PP, 4 - 29.
- [14] ‘‘DaqTemp User’s Manual,’’ PCI-Based Data Acquisition Systems for Desktop and Tower PCs’’, IOtech, Inc., November 2002. pp. 68–75
- [15] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Un-balanced Conditions, IEEE Std. 1459, Jan. 2010.
- [16] Angelo Baggini, ‘‘Handbook of Power Quality’’, John Wiley & Sons Ltd, 2008. pp. 175–225.

- [17] A. B. Nassif and J. Acharya, "An investigation on the harmonic attenuation effect of modern compactfluorescent lamps", presented at the 13<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, Wollongong, Australia, 2008.
- [18] A. B. Nassif and W. Xu, "Characterizing the harmonic attenuation effect of compact fluorescent lamps", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 3, July 2009.
- [19] S. Z. Djokic, J. Desmet, G. Vaneme, J. V. Milanovic, and K. Stockman, "Sensitivity of Personal Computers to Voltage Sags and Short Interruptions," *IEEE Trans. On Power Del.*, vol. 20, no.1, January 2005, pp. 375–383.
- [20] M. Raylander, W. M. Grady, and M. Narendorf Jr., "Experimental apparatus, testing results, and interpretation of the impact of voltage distortion on the current distortion of typical single-phase loads", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 2, April 2009.
- [21] N. R. Watson, T. L. Scott, and S. J. J. Hirsch, "Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 3, July 2009.
- [22] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury, and M. J. Samotyj, "An investigation on harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 10, no. 1, January 1995.
- [23] A. Mansoor and W. M. Grady, "Analysis of compensation factors influencing the net harmonic current produced by single-phase non-linear loads", presented at the 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, 1998.
- [24] M. Raylander, W. M. Grady, and M. Narendorf Jr., "Experimental Apparatus, testing results, and interpretation of the impact of voltage distortion on the current distortion of typical single-phase loads", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 24, no. 2, April 2009.
- [25] M. T. Au and J. Milanović, "Establishing harmonic distortion level of distribution network based on stochastic aggregate harmonic load models", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 22, no. 2, April 2007.
- [26] S. Hansen, P. Nielsen, and F. Blabjerg, "Harmonic cancellation by mixing nonlinear single-phase and three-phase loads", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 36, no. 1, January/February 2000.
- [27] Edited by P.F. Ribeiro, "Time – varying waveform distortions in power systems", John Wiley & Sons, 2009.
- [28] P. F. Ribeiro, "Investigations of harmonic penetration in transmission systems", chapter 6, PhD Thesis, The Victoria University of Manchester, UK, 1985.
- [29] Probabilistic aspects task force of the harmonics working group, "Time-varying harmonics: Part II – Harmonic summation and propagation", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, no. 1, January 2002.