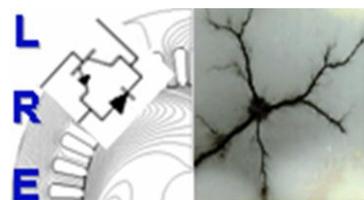


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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



Mémoire de Master En Electrotechnique

Présenté par :
ABOURA Faouzi

Intitulé

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

Directeurs 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 Transforme 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, FPEM, Harmoniques, THD, Facteur de puissance, 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, FPEM, Harmonics, THD, Power factor, 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 الاق تصادي (CFL)، لتسليط الضوء على بعض خصائص هذا المصباح وهذا نظراً لازدياد شعبية هذا المصباح.

الكلمات الرئيسية: جودة الطاقة الكهربائية، FPEM، THD، عامل القوة، المصابيح الموفرة للطاقة، MULTISIM.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I.1 Introduction	2
I.2 Qualité de l'énergie électrique et Compatibilité ElectroMagnétique (CEM)	2
I.2.1 Qualité de l'énergie électrique	2
I.2.2 Compatibilité électromagnétique (CEM)	3
I.3 Dégradation de la qualité de l'énergie électrique et les phénomènes perturbateurs	4
I.4 Les perturbations électriques	5
II.1 Introduction	5
II.2 Mesure et acquisition des données.....	6
II.2.1 Maquette de charges	6
II.2.2 Les capteurs du courant, de la tension et les transducteurs	7
II.3 Traitement des données et calcul des différents paramètres de la qualité de l'énergie électrique .	8
II.3.1 Méthode de la transformée de Fourier	8
II.3.1.1 Composition d'une d'onde déformée.....	8
II.3.1.2 Décomposition d'une onde déformée.....	8
II.3.2 Méthode de la FPÉM	9
III.1 Introduction	11
III.2 Etude pratique de certains types de charges non linéaires	12
III.2.1 Cas d'une lampe à incandescence	12
III.2.2 Cas d'une lampe fluo compact (lampe à faible consommation).....	14
III.2.3 Cas d'une lampe fluorescente	15
III.2.4 Cas d'un micro-ordinateur.....	17
III.2.5 Cas d'un four à micro-ondes.....	18
III.3 Etude de l'influence du montage triangle sur les harmoniques	20
III.3.1 Cas des Lampes fluo compact.....	21
III.3.2. Les lampes fluorescentes	23
III.4 Effet collectif des charges non linéaires (étude cas d'un foyer)	27
III.4.1 Cas d'un foyer utilisant que des charges non linéaires de même type : (5 lampes fluo compacts).....	27
III.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)	28
III.4.3. Cas d'un foyer réel comportant une lampe fluo compact, une lampe à incandescence, une lampe fluorescente et un micro-ordinateur	30

III.5 Influence des charges non linéaires sur les réseaux électriques	33
III.5.1 Cas d'une lampe à incandescence	33
III.5.2 Cas d'une lampe fluo compact (économique)	34
III.5.3 Cas d'une lampe fluorescente	36
III.5.4 Cas d'un micro-ordinateur.....	37
III.5.5 Cas d'un four à micro-ondes.....	38
III.5.6 Cas d'un foyer réel comportant une lampe fluo compact, une lampe à incandescence, une lampe fluorescente et un micro-ordinateur	40
III.6 Conclusion	42
IV.1. Introduction	43
IV.2 Tests expérimentaux sur la lampe CFL de type Philips essential 11W	43
IV.3 Calcul des éléments du montage de la simulation	44
IV.4 Schéma proposé du modèle.....	44
Conclusion.....	45
Conclusion Générale	46
Perspectives	47
Bibliographie	48
ANNEXE A.....	51

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, [2], [3].

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'importance de la notion de Qualité de l'Energie Electrique en mettant l'accent sur les différents phénomènes dû à des charges non linéaires, et à analyser l'influence de ces charges sur le réseau d'énergie électrique.

I.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.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.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.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. [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.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 la norme EN 50160 [11], en conditions normales d'exploitation, la tension ne peut s'écarter de ± 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 ± 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.

I.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.

II.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 et la méthode de la FPDM (Feature pattern extraction method) 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 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 II.1 résume les différentes étapes pour l'analyse de la qualité de l'énergie électrique absorbée par des charges non linéaires :

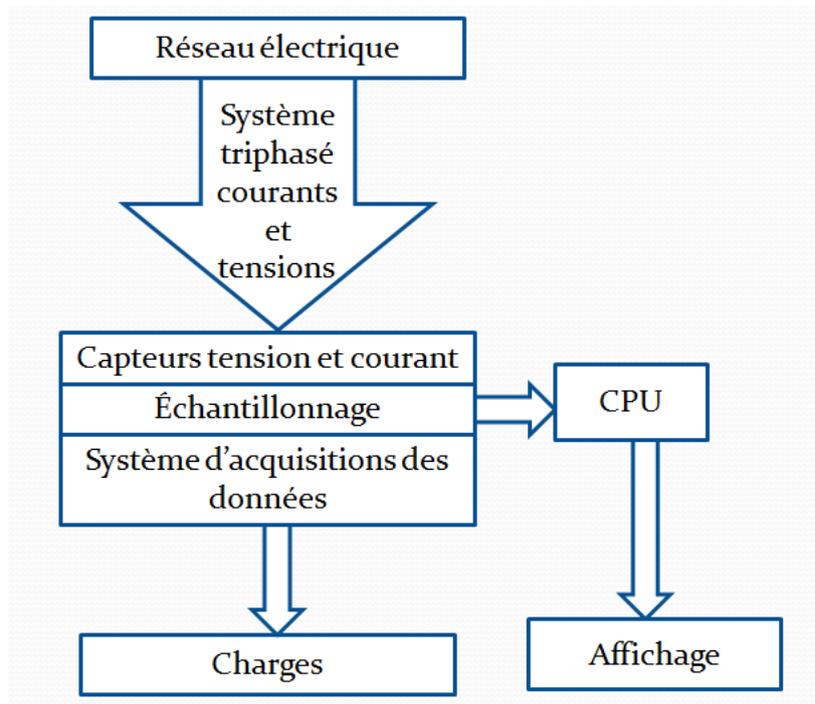


Figure II.1 : Système de mesure et d'analyse de la qualité de l'énergie électrique.

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.2.1 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.

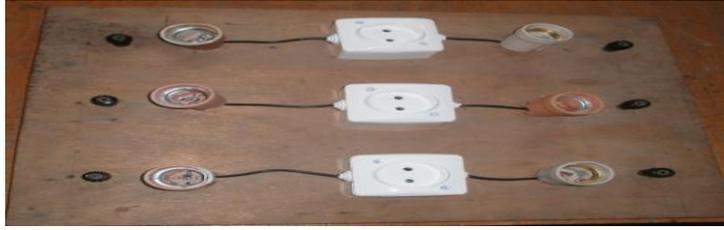


Figure II.2 : Vue maquette de charges.

II.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 II.3.

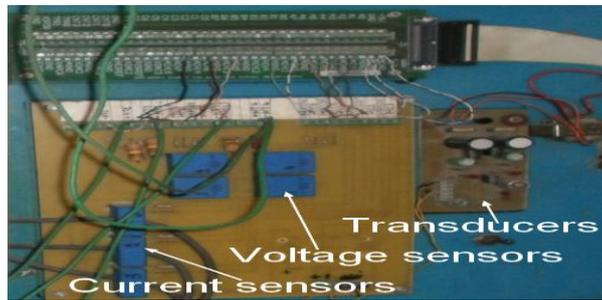


Figure II.3 : Vue des capteurs du courant, de la tension et les transducteurs.

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 [13].

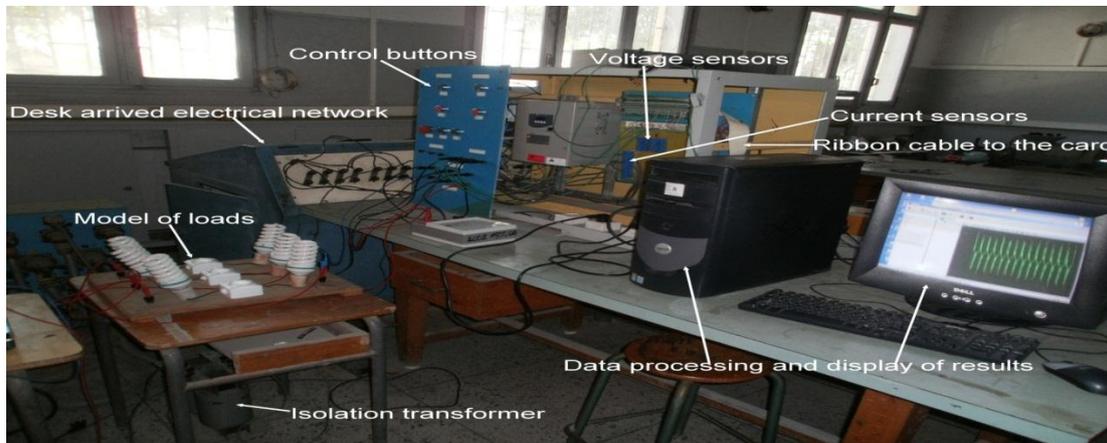


Figure II.4 : Vue générale du banc d'essai.

II.3 Traitement des données et calcul des différents paramètres de la qualité de l'énergie électrique

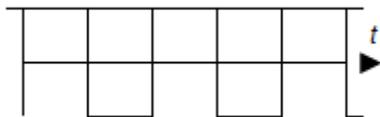
Dans le cas de notre étude, nous nous limiterons à la TFD et la méthode de la FPEM. Pour l'analyse de la qualité de l'énergie électrique, des paramètres doivent être calculés selon la norme IEEE Std.1459.2010, [12].

II.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.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 II.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 [14].



Rang harmonique	Fréquence [Hz]	Valeur d'amplitude relative
1	5	1.0
3	15	1/3
5	25	1/5
7	35	1/7
9	45	1/9
...
n	50	$1/n$

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

II.3.1.2 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 [14]. 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 :

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

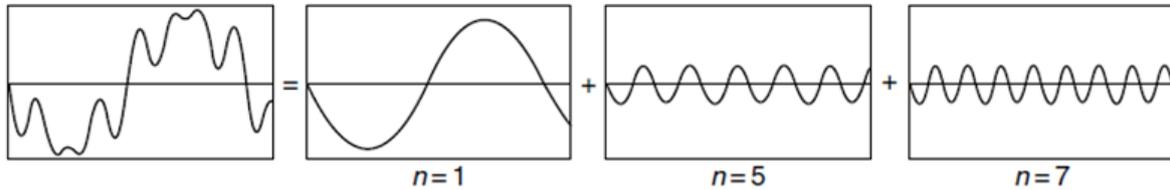


Figure II.6 : Décomposition d'une onde déformée en composante fondamentale (n=1) et en cinquième et septième harmonique.

II.3.2 Méthode de la FPEM

La méthode d'extraction des caractéristiques des motifs (FPEM) est une branche de la résolution des problèmes de forme d'onde connexes, où les signatures des différents paramètres du système d'alimentation sont capturées, certains modèles spécifiques sont formés avec les signatures elles-mêmes ou avec un certain signal de référence prédéfinie, d'où les principales caractéristiques des modèles sont extraites afin d'analyser les performances du système ou pour résoudre des problèmes [15,16]. L'avantage de l'extraction des caractéristiques des motifs est de réduire la quantité des données devant être stockées et le temps de traitement de données et de l'exécution.

Deux phases de tensions et deux de courants constituants des données normalisées sont tracées dans un plan tension-tension et dans un plan courant-courant respectivement. Les motifs sont formés dans ces plans. Elles sont de formes elliptiques en fonctionnement équilibré. Un tel motif formé par des signaux de tension est représenté à la Figure II.7.

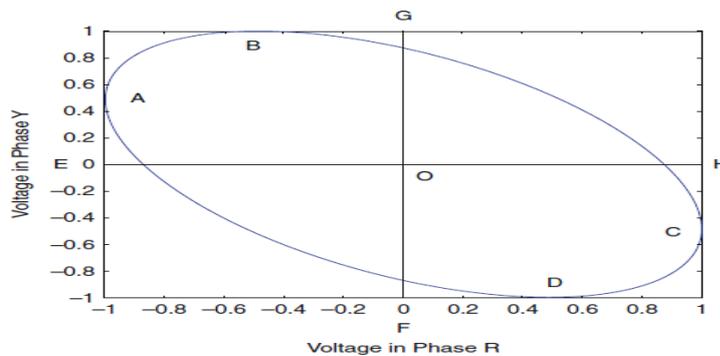


Figure II.7 : Le modèle elliptique dans le plan tension-tension.

Le déséquilibre dans un système modifie l'amplitude et l'angle de phase des signaux. Il en résulte des changements dans la longueur des axes majeurs et mineurs des motifs formés. Évidemment, les motifs en plan de tension-tension et courant –courant transportent les informations de déséquilibre dans leur forme. Pour extraire les caractéristiques des modèles, ou en d'autres termes, pour obtenir en retour de l'information du déséquilibre de la tension ou du courant à partir des modèles, les paramètres qui doivent être introduits sont :

$$\begin{cases} x = X_{MIN} (point A), & y = Y_1(AE) \\ x = X_{MAX} (point C), & y = Y_2(CH) \\ & Y = Y_1 \sim Y_2 \end{cases} \quad (II.2)$$

$$\begin{cases} y = Y_{MIN} (point D), & x = Y_1(FD) \\ y = Y_{MAX} (point B), & x = Y_2(GB) \\ & X = X_1 \sim X_2 \end{cases} \quad (II.3)$$

Pour l'évaluation du déséquilibre de tension dans un système triphasé, deux phases des tensions sont considérées, et on trace leurs caractéristiques tension-tension. Pour la phase R et la phase Y dans le plan tension-tension, la tension de la phase R est le long de l'axe x et la tension de phase Y le long de l'axe y. X et Y sont alors calculées. Ils sont désignés comme X_{RY} et Y_{RY} . De même, pour les phases Y et B et les phases B et R, X_{YB} et Y_{YB} et X_{BR} et Y_{BR} sont calculées à partir des boucles respectives de tension-tension. Ainsi, dans un système triphasé, deux matrices colonnes sont obtenues dans le plan tension-tension (voir Equations. II.4 et II.5) :

$$[x_V] = \begin{bmatrix} X_{V_{RY}} \\ X_{V_{YB}} \\ X_{V_{BR}} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

$$[y_V] = \begin{bmatrix} Y_{V_{RY}} \\ Y_{V_{YB}} \\ Y_{V_{BR}} \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

Il faut noter que ces deux matrices portent les caractéristiques du modèle mis au point par les deux signaux. Le déséquilibre modifie les dimensions de la forme elliptique. Des changements dans la longueur du grand axe et le petit axe des motifs elliptiques sont consignés dans les valeurs de $[x_V]$ et $[y_V]$.

De même, pour l'évaluation du déséquilibre de courant dans le système triphasé, les deux courants de ligne sont considérés et tracés dans le plan courant-courant. Pour les phases R et Y dans le plan courant-courant, la phase R est considérée comme le long de l'axe x, et la phase Y est considérée comme le long de l'axe y. X et Y sont alors calculées de la même façon que précédemment. De même, X et Y sont calculées par les courants des phases Y et B

et les courants des phases B et R dans le plan courant-courant. Deux matrices sont formées pour le courant de déséquilibre évalué (voir Equation. II.6 et II.7) :

$$[x_I] = \begin{bmatrix} X_{IRY} \\ X_{IYB} \\ X_{IBR} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$[y_I] = \begin{bmatrix} Y_{IRY} \\ Y_{IYB} \\ Y_{IBR} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Le déséquilibre de courant modifie les dimensions des formes elliptiques. Des changements dans la longueur des grands axes et des petits axes des motifs elliptiques sont consignés dans les valeurs de $[x_V]$ et $[y_V]$. Ces deux matrices sont utilisées pour l'évaluation du déséquilibre [14, 15].

III.1 Introduction

Actuellement, la plupart des appareils domestiques dans les maisons modernes utilisent sur 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.

III.2 Etude pratique de certains types de charges non linéaires

Dans cette partie on s'intéresse à l'étude des charges individuellement et pour cela on fait des essais sur chacune des charges après on calculera tous les paramètres de la qualité d'énergie électrique qui les caractérise.



Figure III.1.1 Schéma du montage expérimental pour une charge isolée.

III.2.1 Cas d'une lampe à incandescence

Il s'agit d'une lampe à incandescence alimentée sous une tension de 220V. 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, puis les différents paramètres de la qualité d'énergie électrique seront calculés conformément à la norme IEEE Std 1459-2010[12] grâce à un script Matlab .

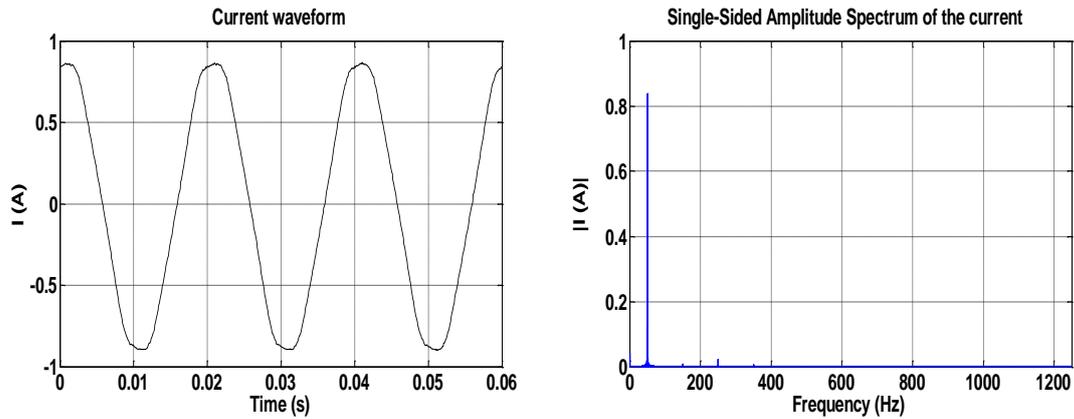


Figure III.1.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

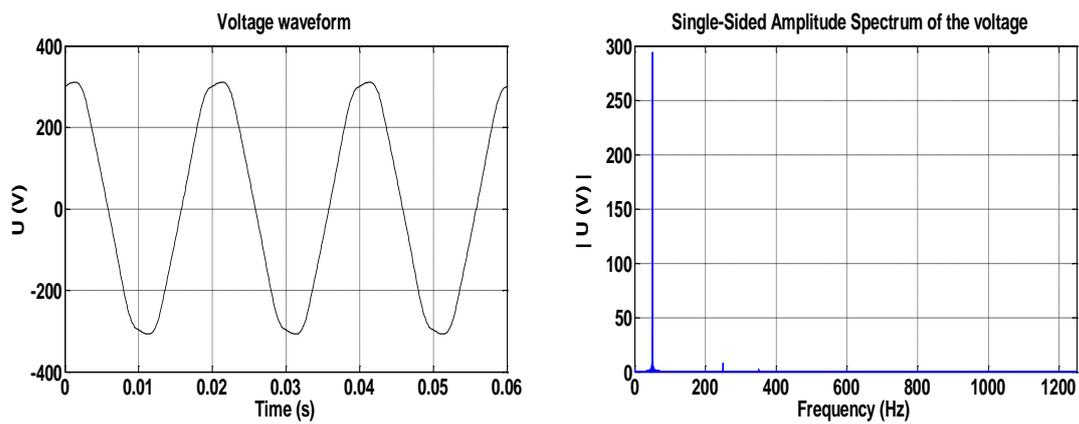


Figure III.1.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

n	1	3	5	7	9	11
<i>THDi</i> (%)	99.968	0.781	2.328	0.491	0.0764	0.138
<i>THDv</i> (%)	99.941	0.061	2.287	0.500	0.075	0.155

Analyse et interprétation

D'après les figures III.1.2 et III.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 $THD_V = 2.5831(\%)$.

Dans la représentation spectrale de la tension et du courant, on voit que les harmoniques de rangs impairs. Le 5^{ème} harmonique est prédominant par rapport aux autres harmoniques avec des $THDi$ de 2.33 (%) et $THDv$ de 2.29(%).

Une lampe à incandescence est constituée d'un filament de tungstène enroulé et entourée par une ampoule remplie d'un mélange d'azote et d'argon dans des proportions dépendent de la puissance de la lampe. L'ampoule est givrée à l'intérieur avec de l'acide

fluorhydrique pour produire une lumière diffuse plutôt qu'un éclat éblouissant du filament non dissimulé [17].

Une tension aux bornes d'une lampe à incandescence conduit à un courant à travers le filament de la lampe. Le courant chauffe le filament, et lorsque le il atteint une température suffisamment élevée, il commence à émettre de la lumière. La température constante du filament est d'environ 3500 °K .Plus la tension est élevée et plus le courant et l'intensité de la lumière sont élevés. Une fluctuation de la tension conduira donc à une fluctuation de l'intensité lumineuse. 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.

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

Il s'agit d'une lampe fluo compact alimentée sous une tension de 220V. Le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

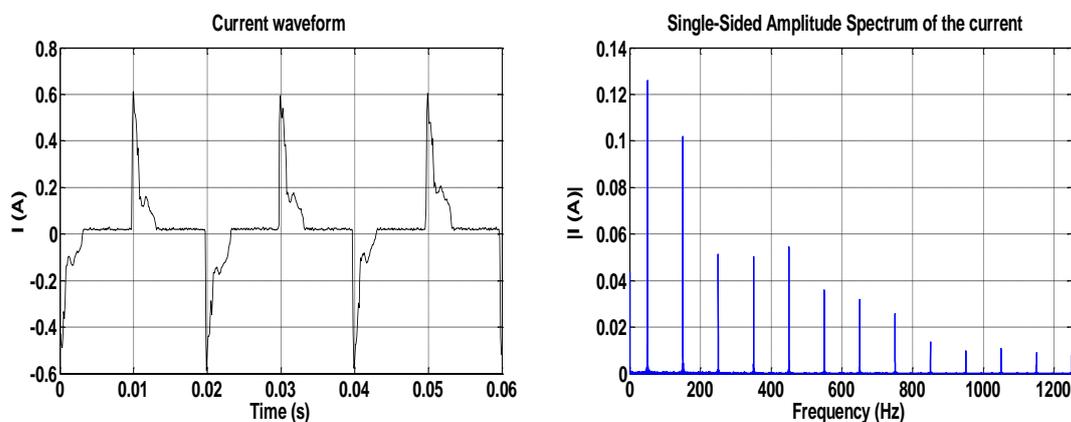


Figure III.1.4 : Représentation temporelle et spectre du courant.

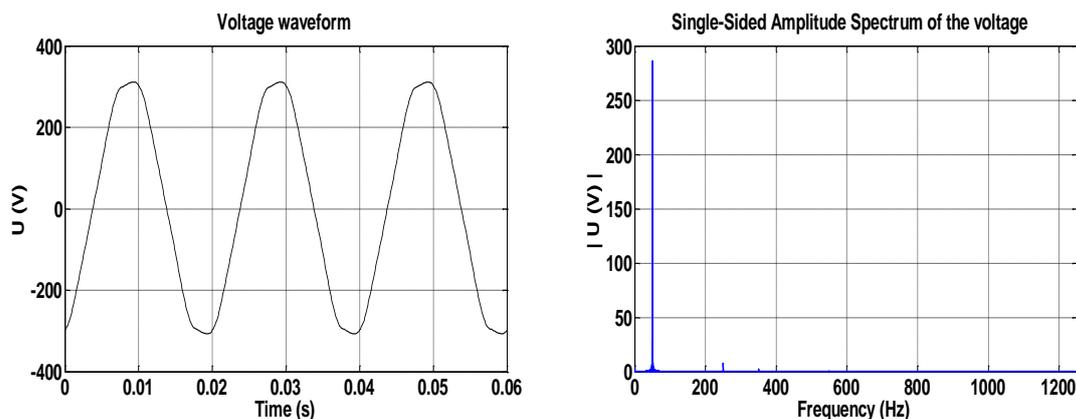


Figure III.1.5 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau III.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

Des Figures III 1.4 et III 1.5, on remarque la forte distorsion en courant comparativement à la lampe à incandescence vérifié par un $THD_I = 111.6417\%$ et une très faible augmentation du $THD_V = 3.1228\%$, on peut aussi voir qu'il n'y a que des harmoniques impairs qui apparaissent, et que c'est l'harmonique 3 qui prédomine sur les autres harmoniques avec un taux individuel de distorsion harmonique de 47.8 (%) en courant et l'harmonique 5 pour la tension avec un taux individuel de distorsion harmonique de 2.8 (%).

Ainsi cette lampe provoque une faible distorsion en tension due à sa faible consommation en puissance. En effet cette lampe consomme une puissance active $P = 10.4885$ (W) soit 8 fois moins qu'une lampe à incandescence qui consomme une puissance $P = 82.3445$ (W), si on néglige les pertes dans le transfert de la puissance réactive dans les lignes électriques, la puissance réactive est un phénomène inhérent à ces lampes. En effet, elle consomme une puissance réactive très élevée, $Q=6.5240$ (Var), comparant à celle consommée par une lampe à incandescence, $Q=2.7056$ (Var), cela explique le fait que le facteur de puissance fondamental soit faible, $\cos \theta_1 = 0.7791$, comparativement à celui d'une lampe à incandescence qui est de $FP = \cos \theta_1 = 0.99$.

Le taux de distorsion harmonique très élevé en courant explique la dégradation du facteur de puissance, $FP = 0.5198$, comparant à celui d'une lampe à incandescence, $FP = 0.99$.

En résumé, cette lampe est caractérisée par une très grande distorsion en courant, une faible consommation en puissance active, une consommation élevée en puissance réactive et un très faible facteur de puissance.

III.2.3 Cas d'une lampe fluorescente

Il s'agit d'une lampe fluorescente alimentée sous une tension de 220V. Le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

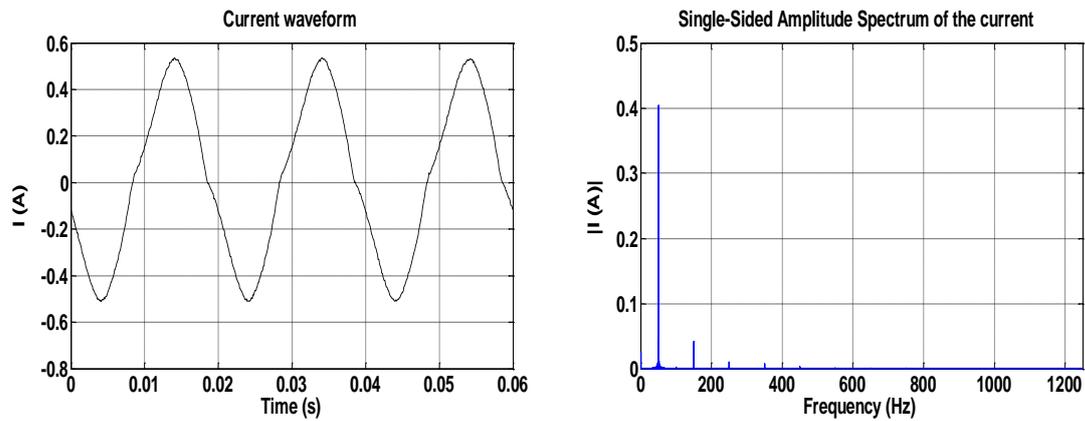


Figure III.1.6 : Représentation temporelle et spectre du courant.

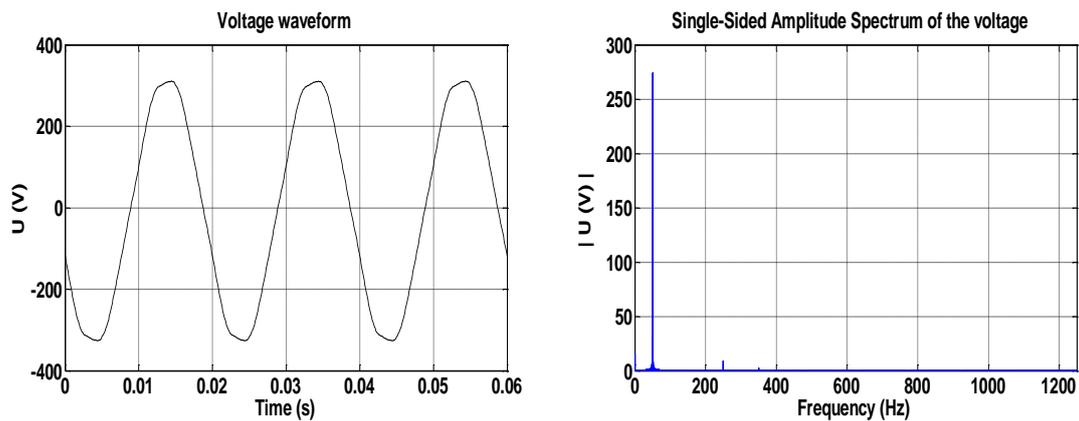


Figure III.1.7 : Représentation temporelle et spectre de la tension

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

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

Analyse et interprétation

D'après les figures III.1.6 et III.1.7, on observe une légère distorsion du courant due surtout à l'harmonique d'ordre 3, et une distorsion moindre en tension, vérifiés par un $THD_I = 6.959\%$ et un $THD_V = 3.1228\%$. Aussi on peut remarquer la similitude avec la lampe fluo compact puisqu'il n'y a que des harmoniques impairs et que c'est l'harmonique 3 qui prédomine sur les autres indices d'harmonique en courant et l'harmonique 5 pour la tension.

Cette lampe 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.

III.2.4 Cas d'un micro-ordinateur

Il s'agit d'un micro-ordinateur monté en parallèle avec un écran CRT alimenté sous une tension de 220V. Le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

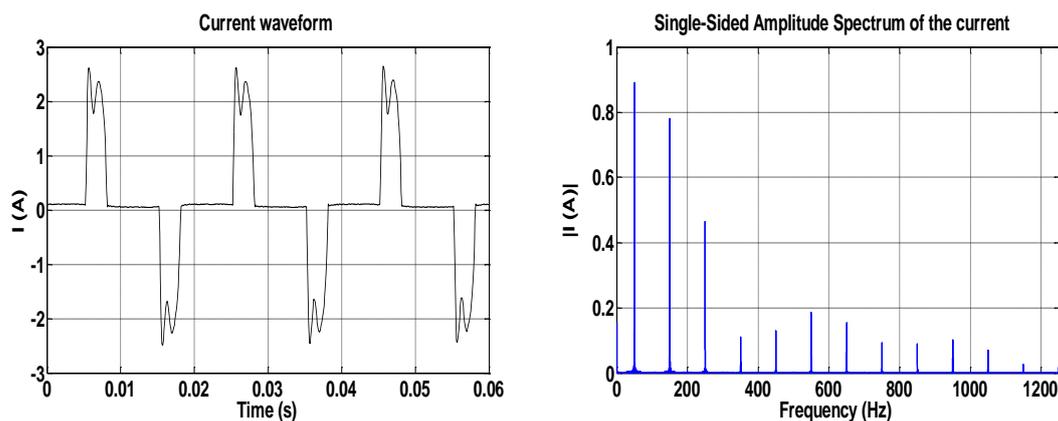


Figure III.1.8 : Représentation temporelle et spectre du courant.

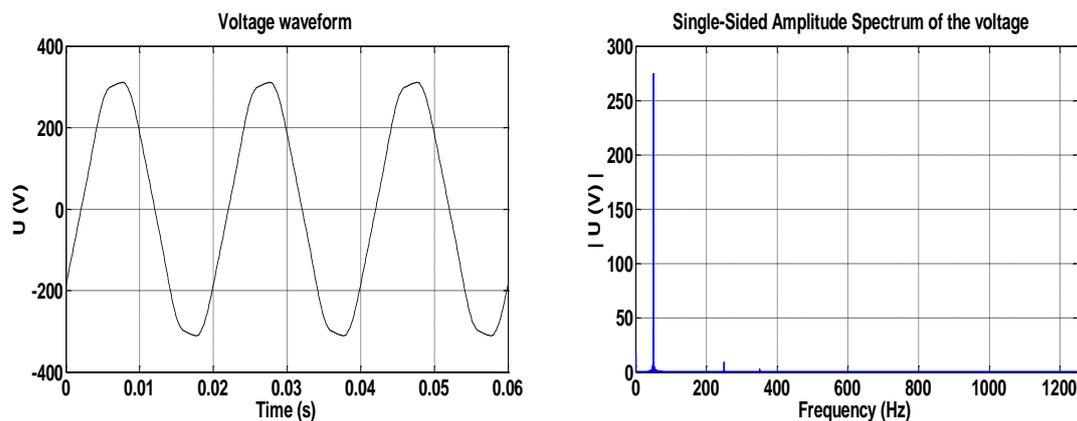


Figure III.1.9 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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
<i>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
<i>THDVi</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

Les figures III.1.8 et III.1.9 montrent une large distorsion en courant similaire à celle de la Lampe fluo compact vérifiée par un $THD_I = 91.409\%$ due surtout aux harmoniques de rangs 3 et 5 avec un taux individuel de distorsion harmonique de 56.4(%) et 30.4(%) respectivement, et une très faible augmentation de la distorsion en tension comparant à celle d'une lampe à incandescence vérifiée par un $THD_V = 2.783\%$ due à la 5ième harmonique, mais elle reste moins importante que celle de la lampe fluo compact et de la lampe fluorescente.

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. Car ce type d'appareils utilisent des alimentations à découpages pour convertir le courant alternatif monophasé en courant basse tension continu afin d'alimenter l'électronique de traitement. De telles alimentations sont les principales responsables de la génération d'harmoniques impaires, [21].

On remarque aussi du Tableau III.6 que la puissance réactive consommée est de $Q=34.3273$ (Var) pour une puissance active $P=94.6898$ (W), alors qu'une lampe à incandescence consomme une puissance réactive $Q=2.7056$ (Var) pour une puissance active de $P = 82.3445$ (W). Cette forte consommation de la puissance réactive est due à la ressemblance de l'écran CRT avec les lampes fluo compact, aussi le taux de distorsion harmonique en courant élevé a fait chuter le facteur de puissance à une valeur $FP=0.69$.

En résumé, le micro-ordinateur est caractérisé, comme les lampes fluo compact, par une très grande distorsion en courant, une consommation élevée en puissance réactive et un très faible facteur de puissance.

III.2.5 Cas d'un four à micro-ondes

Il s'agit d'un four à micro-ondes alimenté sous une tension de 220V. Le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

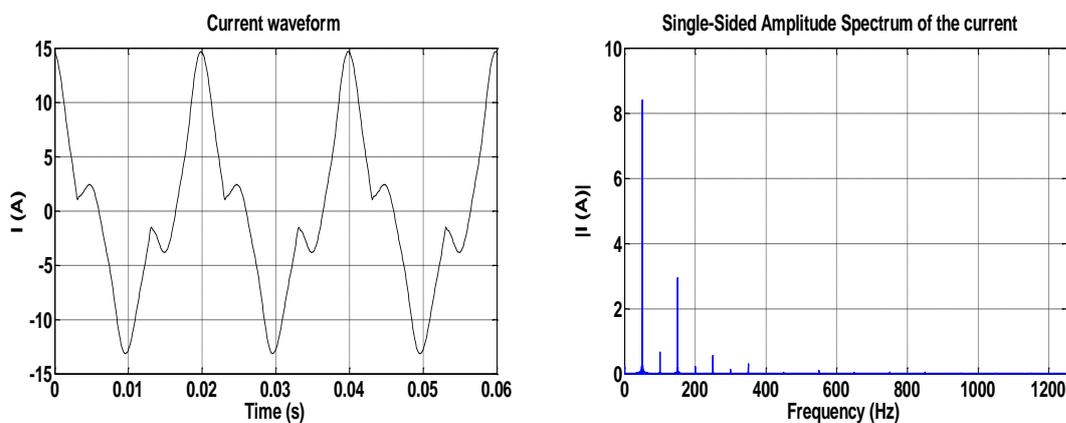


Figure III.1.10 : Représentation temporelle et spectre du courant.

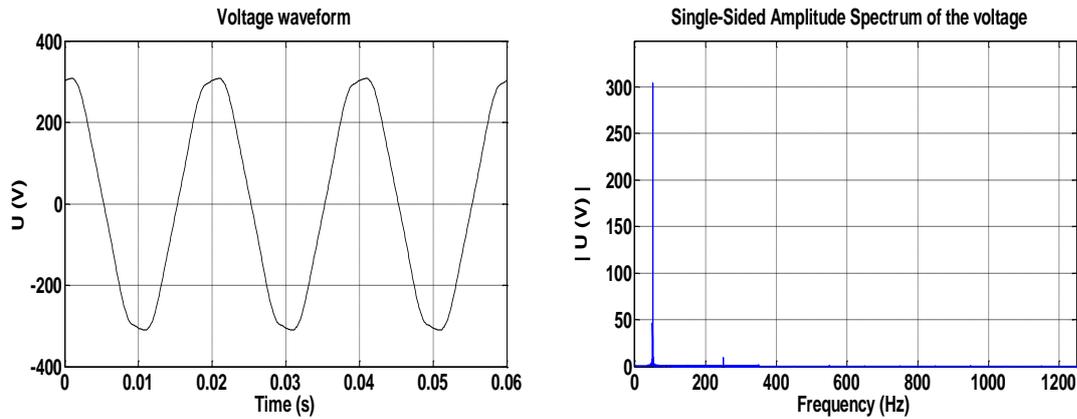


Figure III.1.11 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

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

Analyse et interprétation :

Des Figures III.1.10 et III.1.11, on remarque une distorsion nettement moins importante en courant que celle de la lampe fluo compacte et du micro-ordinateur exprimée par un $THD_I = 34.904\%$ et une faible distorsion en tension vérifiée par un $THD_V = 2.674\%$

Aussi on peut voir la différence avec les autres appareils ménagers puisque qu'il y a des harmonique pairs et impairs en courant et que c'est l'harmonique 3 qui prédomine sur les autres indices avec un taux individuel de distorsion de 31.29 (%), en revanche, c'est l'harmonique 5 qui prédomine en tension avec un taux individuel de distorsion de 2.23 (%).

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, une consommation très élevée en puissance active et réactive et un facteur de puissance acceptable $FP = 0.90$.

Tableau III.6: Récapitulatifs de tous les paramètres caractérisant la qualité d'énergie électrique des charges utilisées selon la norme IEEE Std 1459-2010 [12].

paramètres	Type de charges				
	Lampe à incandescence	Lampe fluo compact	Lampe fluorescente	Micro-ordinateur	Four à micro-ondes
THD_I	2.5181	111.6417	6.9599	91.4099	34.9047
THD_V	2.5831	3.1228	3.0157	2.7830	2.6749
I_{eff} (A)	0.6377	0.1561	0.3416	1.0577	7.0653
I_1 (A)	0.6325	0.0890	0.3232	0.7451	5.9368
I_h (A)	0.0812	0.1282	0.1091	0.7507	3.8304
U_{eff} (V)	223.8435	223.9457	230.5232	224.8372	223.883
U_1 (V)	222.1433	202.4211	219.5655	223.907	218.503
U_h (V)	27.5366	95.7986	70.2278	19.4917	48.7858
P (W)	82.3445	10.4885	45.0512	94.6898	781.159
P_1 (W)	81.0799	8.1069	40.7539	90.0297	678.525
P_h (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
D_I (Var)	2.0421	7.7511	2.8450	65.0081	246.815
D_V (Var)	2.0949	0.3247	1.2352	2.6804	19.278
D_H (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
$Cos\theta_1$	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).
- Un faible facteur de puissance.

III.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.

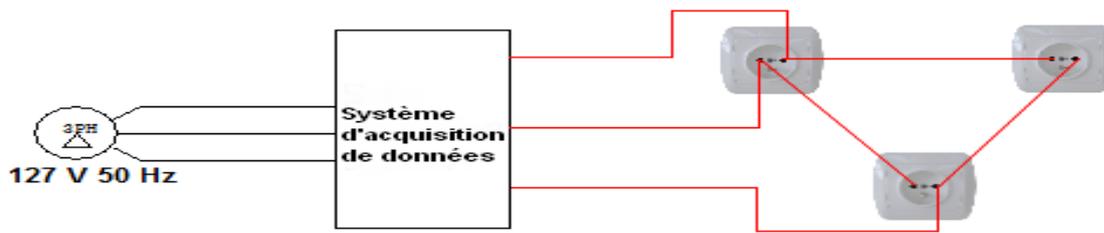


Figure III.2.1. Schéma du montage expérimental pour un montage

III.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.

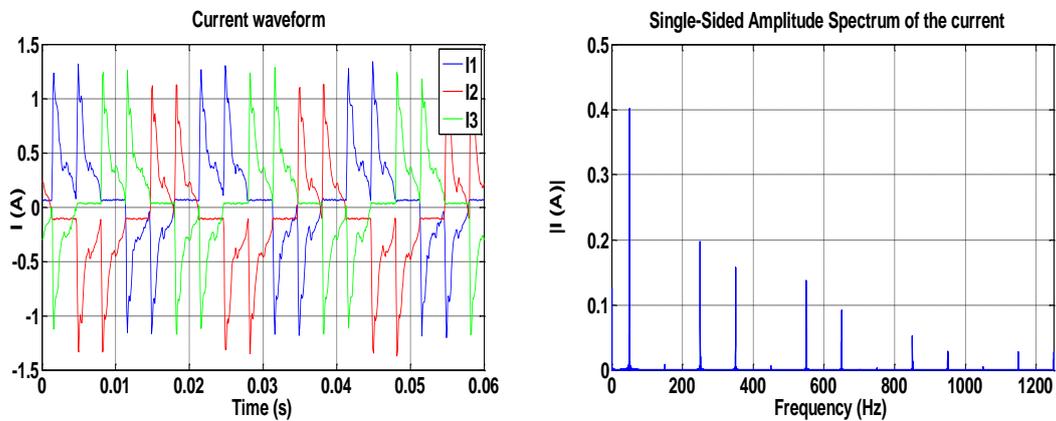


Figure III.2.2 : Représentation temporelle et spectre des courants de ligne.

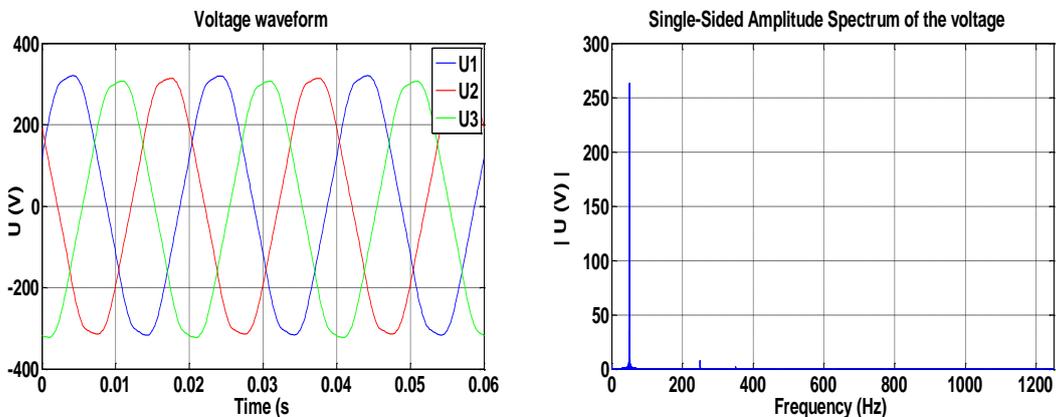


Figure III.2.3 : Représentation temporelle et spectre des tensions.

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
<i>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
<i>THDVi</i> (%)	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

La méthode de la FPEM

Cette méthode va nous permettre d'évaluer les déséquilibres en courant et en tension et d'évaluer aussi la distorsion harmonique.

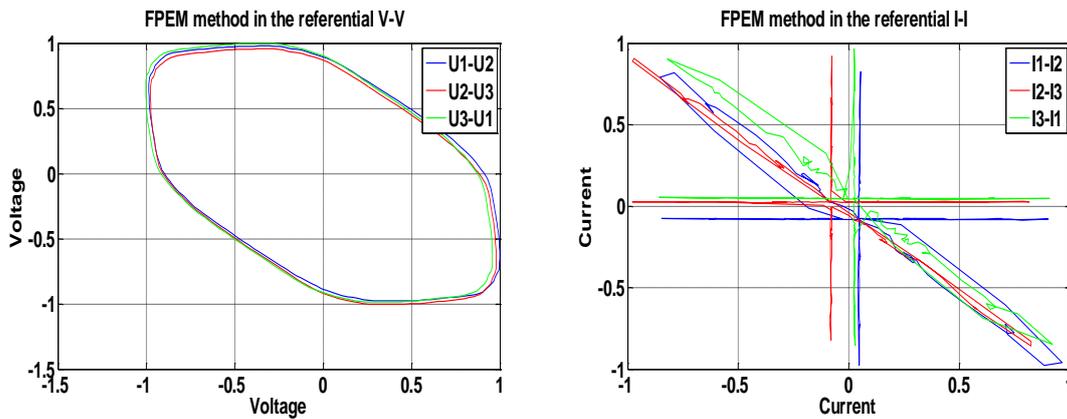


Figure III.2.4 : Représentation des motifs des tensions et des courants dans les plans V-V et I-I.

Analyse et interprétation

On remarque sur les Figures III.2.2 et III.2.3, une diminution de la distorsion en courant et en tension vérifiés par un $THD_I = 56.5732\%$, et un $THD_V = 2.1284\%$, comparativement au montage monophasé de l'étude n°1, ($THD_I = 111.64\%$, et une $THD_V = 3.12\%$).

Cette diminution est due en grande partie à l'atténuation de l'harmonique 3 qui est généralement le plus important en amplitude, ainsi que toutes les harmoniques multiples de 3. On notera aussi que dans ce cas, le 5ième harmonique prédomine sur les autres harmoniques de courant et de tension avec un taux individuel de distorsion harmonique de 30.8 (%) et de 2.0 (%) respectivement.

Cette atténuation des amplitudes des harmoniques multiples de 3, a diminué la distorsion du signal et relevé le facteur de puissance qui est de $FP=0.7672$ alors qu'il était de 0.5198 dans le cas de l'essai monophasé sur la lampe fluo compacte de l'étude n° 1 ce qui s'est traduit par un courant total plus faible.

Calcul avec la méthode de la FPEM

La méthode de la FPEM nous permet on utilisant les motifs des tensions dans le plan V-V de calculer les valeurs des deux matrices $[x_V]$ et $[y_V]$ donnée ci-dessous:

$$[x_V] = \begin{bmatrix} X_{V_{12}} \\ X_{V_{23}} \\ X_{V_{31}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.05 \\ 1 \\ 0.985 \end{bmatrix} \text{ et } [y_V] = \begin{bmatrix} Y_{V_{12}} \\ Y_{V_{23}} \\ Y_{V_{31}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.985 \\ 1.05 \end{bmatrix}$$

Ainsi d'après le Tableau 1.10, annexe A on a:

$$[x_V] \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ et } [y_V] \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ce résultat permet de déduire que le système est déséquilibré en tension.}$$

D'après la règle 8 du Tableau 1.10, (voir annexe A) on a $X_{V_{12}} \neq 1$ et $X_{V_{31}} \neq 1$ et $Y_{V_{23}} \neq 1$ et $Y_{V_{31}} \neq 1$ ainsi on peut déduire que Le déséquilibre c'est produit sur les phases 1 et 3 et que le pourcentage du déséquilibre sur la phase 1 est $|(1 - X_{V_{12}})| \times 100\% = 5\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase 3 est $|(1 - X_{V_{31}})| \times 100\% = 1.05\%$.

Ainsi, cette méthode est capable de donner une indication claire sur la présence d'harmonique dans le système et cela est donné par la déformation de la forme elliptique des motifs tracés dans le plan I-I. La mesure de nombre des clivages en courant est très complexe et ne peut donner une évaluation du pourcentage d'harmoniques présents dans le système et cela est dû au fait que les taux individuels de distorsion des harmoniques sont de valeurs très proche et assez élevées.

La modification des axes des motifs des tensions dans le plan V-V permet de déduire qu'il y a un déséquilibre de tensions et que notre supposition de charges triphasées équilibrées n'est pas tout à fait vraie, aussi on notera la difficulté de lecture avec la méthode de la FPEM.

III.3.2. Les lampes fluorescentes

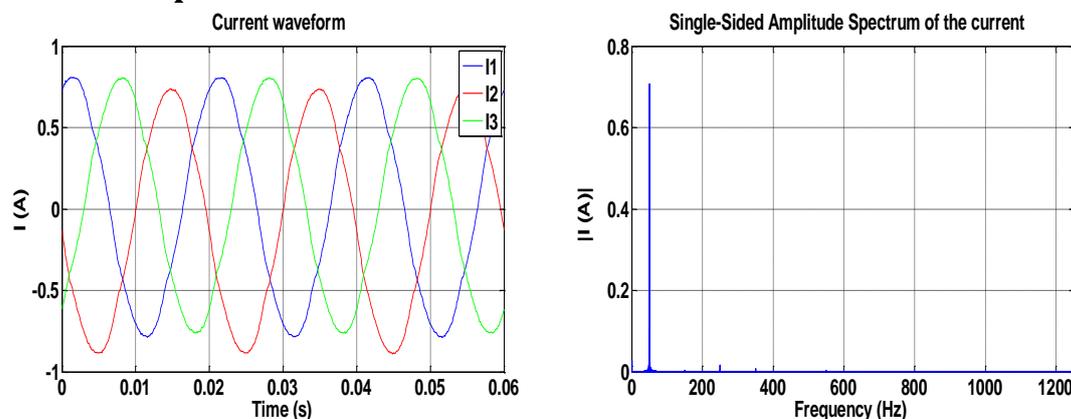


Figure III.2.5 : Représentation temporelle et spectre des courants de ligne.

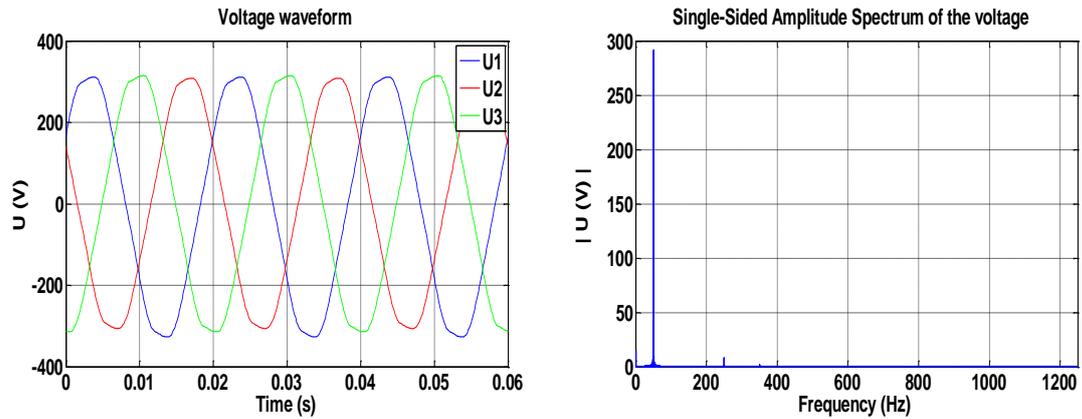


Figure III.2.6 : Représentation temporelle et spectre des tensions.

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

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

La méthode de la FPEM

Cette méthode va nous permettre d'évaluer les déséquilibres en courant et en tension et d'évaluer aussi la distorsion harmonique.

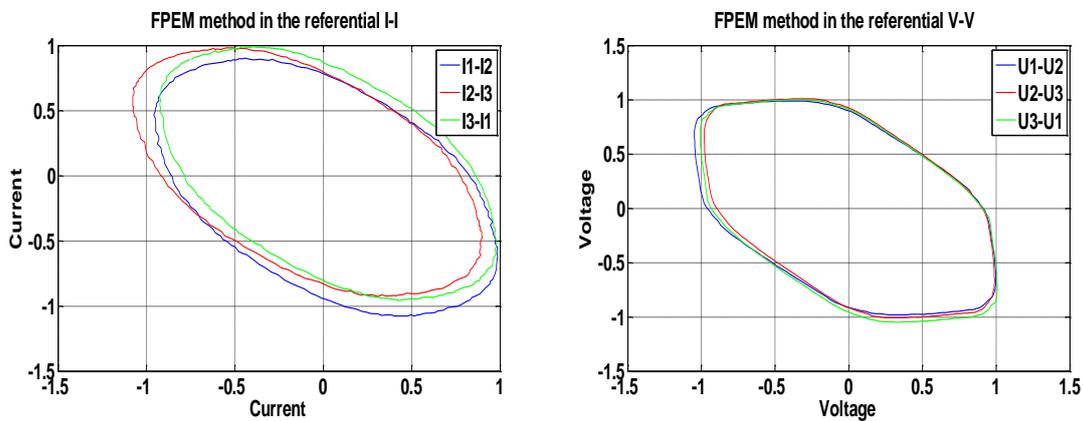


Figure III.2.7 : Représentation des motifs de tensions et de courants dans les plans V-V et I-I.

Analyse et interprétation

Les Figures III.2.5, III.2.6 montrent une diminution de la distorsion en courant et en tension vérifiés par une diminution du THD_I de 6.959 % à 2.675 %, et une diminution du THD_V de 3.015 % à 2.628 %, ainsi que l'atténuation des harmoniques d'ordres multiples de 3 comparativement au montage monophasé de l'étude n° 1.

Les courants absorbés et les tensions aux bornes de la charge sont presque sinusoïdaux avec une légère déformation due aux harmoniques de rang 5 et 7.

Calcul avec la méthode de la FPEM

En courant

Les motifs des courants tracés dans le plan I-I en utilisant la méthode de la FPEM (Figure III.2.14), nous on permet de calculer les matrices $[x_I]$ et $[y_I]$ données ci-dessous :

$$[x_I] = \begin{bmatrix} X_{I_{12}} \\ X_{I_{23}} \\ X_{I_{31}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.955 \\ 1.045 \\ 0.9025 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [y_I] = \begin{bmatrix} Y_{I_{12}} \\ Y_{I_{23}} \\ Y_{I_{31}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.045 \\ 0.955 \\ 0.9025 \end{bmatrix}$$

Ainsi d'après le Tableau 1.10, annexe A on a que :

$$[x_I] \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [y_{VI}] \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ce résultat permet de déduire que le système est déséquilibré en courant.}$$

D'après la règle 9 du Tableau 1.10 (voir annexe A) on a $X_{I_{12}} \neq 1$ et $X_{I_{23}} \neq 1$ et $X_{I_{31}} \neq 1$, et $Y_{I_{12}} \neq 1$ et $Y_{I_{23}} \neq 1$, $Y_{I_{31}} \neq 1$ ainsi on peut déduire que Le déséquilibre c'est produit sur les phases 1,2 et 3 et que le pourcentage du déséquilibre sur la phase 1 est $|(1 - X_{I_{12}})| \times 100\% = 4.5\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase 2 est $|(1 - X_{I_{23}})| \times 100\% = 4.5\%$, et sur la phase 3 est $|(1 - X_{I_{31}})| \times 100\% = 9.75\%$.

En tension

De même pour les tensions, leurs tracées dans le plan V-V permettent de calculer les matrices $[x_V]$ et $[y_V]$ données ci-dessous :

$$[x_V] = \begin{bmatrix} X_{V_{12}} \\ X_{V_{23}} \\ X_{V_{31}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.02 \\ 1 \\ 0.99 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [y_V] = \begin{bmatrix} Y_{V_{12}} \\ Y_{V_{23}} \\ Y_{V_{31}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.99 \\ 1.02 \end{bmatrix}$$

Ainsi d'après le Tableau 1.10 de l'annexe A on a:

$$[x_V] \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [y_V] \neq \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ce résultat permet de déduire que le système est déséquilibré.}$$

D'après la règle 8 du Tableau 1.10 (voir annexe A) on a $X_{V_{12}} \neq 1$ et $X_{V_{31}} \neq 1$ et $Y_{V_{23}} \neq 1$ et $Y_{V_{31}} \neq 1$, ainsi on peut déduire que Le déséquilibre c'est produit sur les phases 1 et 3 et que le pourcentage du déséquilibre sur la phase 1 est $|(1 - X_{V_{12}})| \times 100\% = 2\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase 3 est $|(1 - X_{V_{31}})| \times 100\% = 1\%$.

Tableau III.9 Récapitulatifs de tous les paramètres caractérisant la qualité d'énergie électrique pour les montages triangles selon la norme IEEE Std 1459-2010 [12].

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
I₁ (A)	0.3475	0.5722
I_h (A)	0.3018	0.0766
U_{eff} (V)	226.9600	222.5214
U₁ (V)	224.4164	222.3487
U_h (V)	33.9296	8.7647
P (W)	46.27	61.9591
P₁ (W)	38.5021	61.3854
P_h (W)	7.7716	0.5737
S (VA)	60.3139	74.1738
S₁ (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
D_I (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 θ₁	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.

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

Dans cette partie nous étudierons l'influence collective des charges non linéaires.



Figure III.3.1 Schéma du montage expérimental pour des charges parallèles.

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

Il s'agit de 5 lampes fluo compact montées en parallèle sur une phase et alimentées sous une tension de 220V. Le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence dans l'étude n° 1.

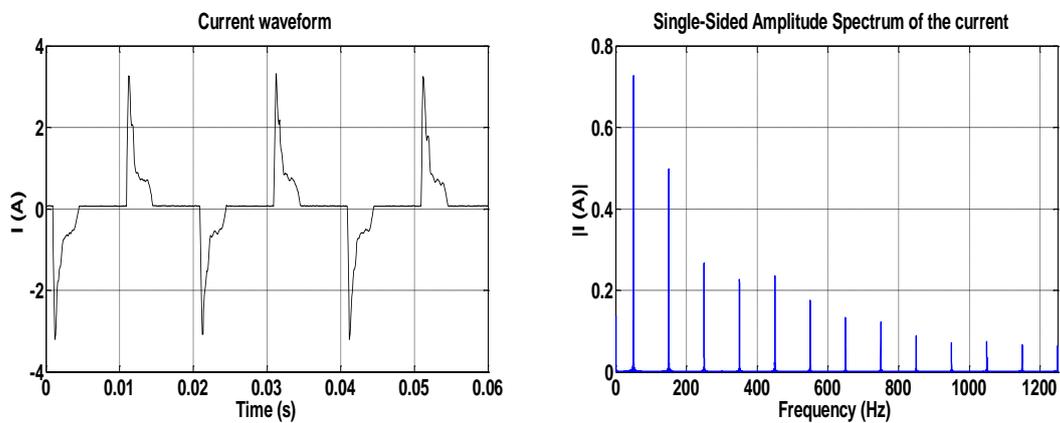


Figure III.3.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

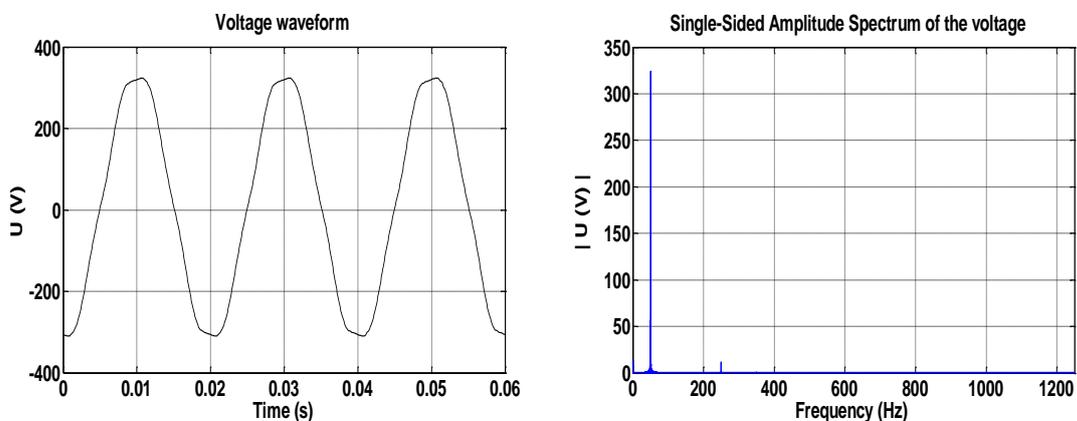


Figure III.3.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau III.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
<i>THDi</i> (%)	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
<i>THDVi</i> (%)	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

Des Figures III.3.2, III.3.3, on remarque une forte distorsion en courant due à la présence des harmoniques d'ordre impairs, ainsi qu'une faible distorsion en tension due principalement à l'harmonique 5. Du Tableau III.13 on remarque une diminution du $THD_I = 101.345(\%)$ et une faible augmentation du $THD_V = 4.5617\%$ comparativement aux valeurs obtenues pour l'essai d'une seule lampe fluo compact de l'étude n° 1 qui donnait un $THD_I = 111.6417\%$ et $THD_V = 3.1228\%$, alors que la puissance est passée de $P = 10.49(W)$ à $P = 56.52 (W)$.

On constate une amélioration de facteur de puissance, $FP = 0.53$ alors qu'il a été 0.51, due à la diminution du taux de distorsion harmonique en courant.

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, [18, 19, 25, 26, 28, 29, 30].

III.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)

Il s'agit d'une lampe fluo compact, d'une lampe fluorescente, d'un micro-ordinateur et d'un four à micro-onde montés en parallèle sur une phase et alimentés sous une tension de 220V. Les caractéristiques des constructeurs sont données dans l'annexe A. Le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence dans l'étude n° 1.

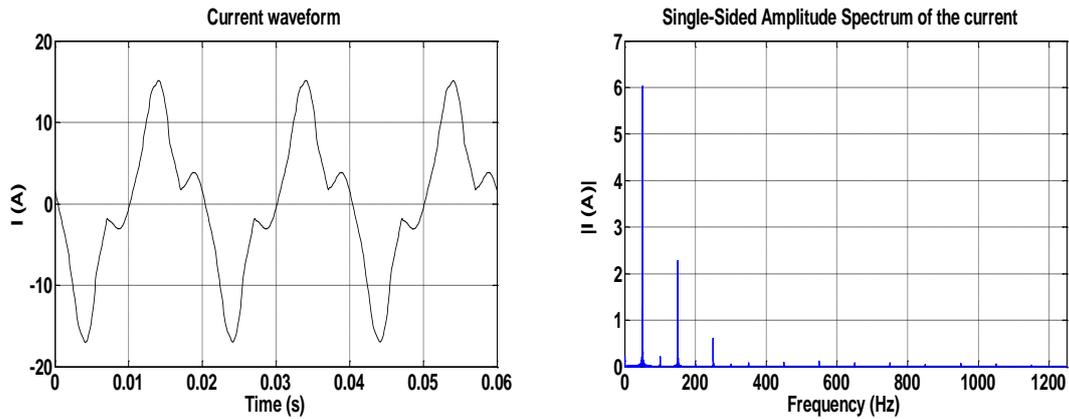


Figure III.3.4 : Représentation temporelle et spectre du courant.

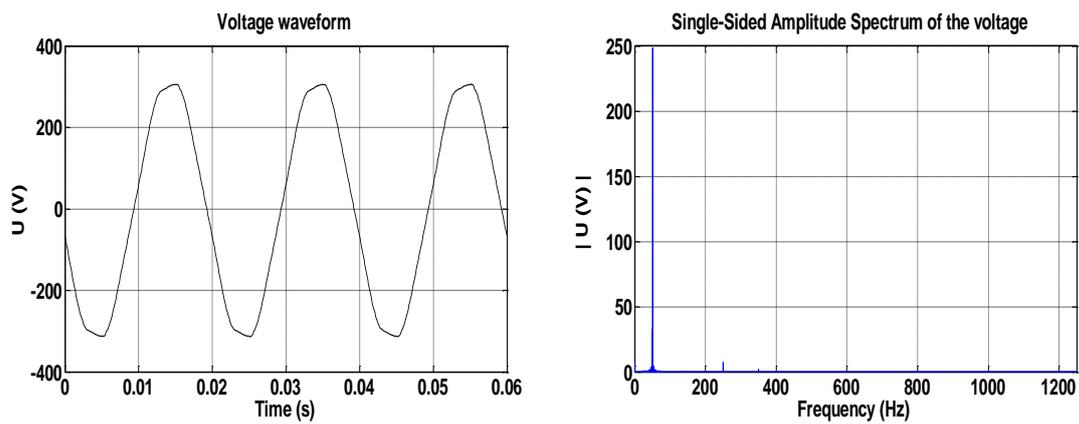


Figure III.3.5 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau III.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
THDi (%)	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
THDVi (%)	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

Les Figures III.3.4, III.3.5 montrent une forte distorsion en courant, ainsi qu'une faible distorsion en tension due principalement aux 5^{ième} et le 7^{ième} harmonique, dans cette partie on comparera les résultats obtenus avec ceux de l'étude n° 1 sur le four à micro-onde étant donné que c'est lui qui consomme la plus grande puissance $P = 781.159$ (W), et ceux d'une lampe fluo compact car elle présente la plus grande distorsion en courant.

Ainsi on comparant les paramètres de distorsion en courant et en tension des Tableaux III.6 et le Tableau III.13 on trouve qu'il y a une légère augmentation du $THD_I = 37.3653(\%)$ alors que dans le cas d'un four à micro-onde seul, le $THD_I = 34.9047(\%)$ mêmes remarque pour le THD_V qui est devenu égale à 2.829 % alors qu'elle était égale à 2.674 %, mais comparativement au cas d'une lampe fluo compact de l'étude n° 1, on remarque une diminution du taux de distorsion harmonique en courant alors qu'il était de 111.64(%)

L'augmentation de taux de distorsion harmonique en courant et en tension pour l'ensemble des charges comparativement à celui d'un four à micro-onde seul et leur diminution comparativement avec celui d'une lampe fluo compact 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 par 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.

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.

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

Il s'agit de d'une lampe fluo compact et d'une lampe à incandescence, une d'une lampe fluorescente et d'un micro-ordinateur montés en parallèle sur une phase et alimentés sous une tension de 220V. Le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence dans l'étude n°1. L'appellation foyer réel revient au fait qu'un consommateur domestique utilise des charges non linéaires et des charges linéaires (lampe à incandescence).

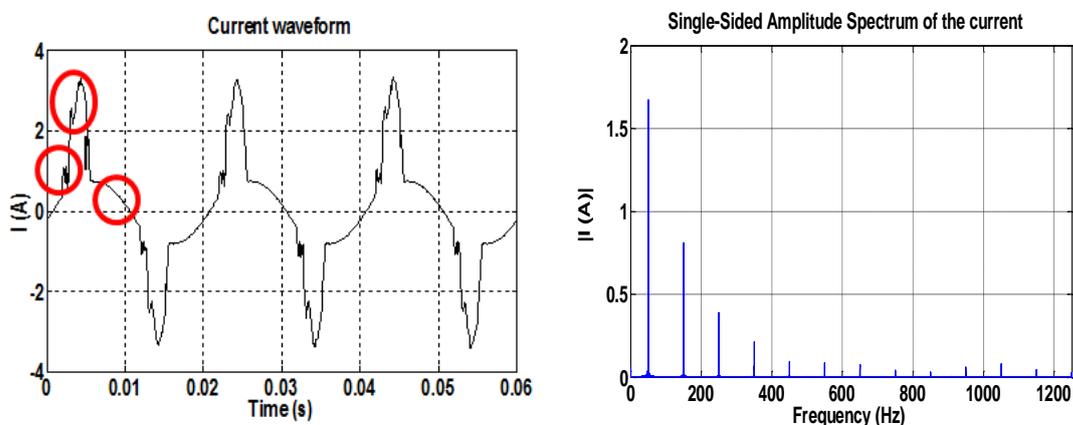


Figure III.3.6 : Représentation temporelle et spectre du courant.

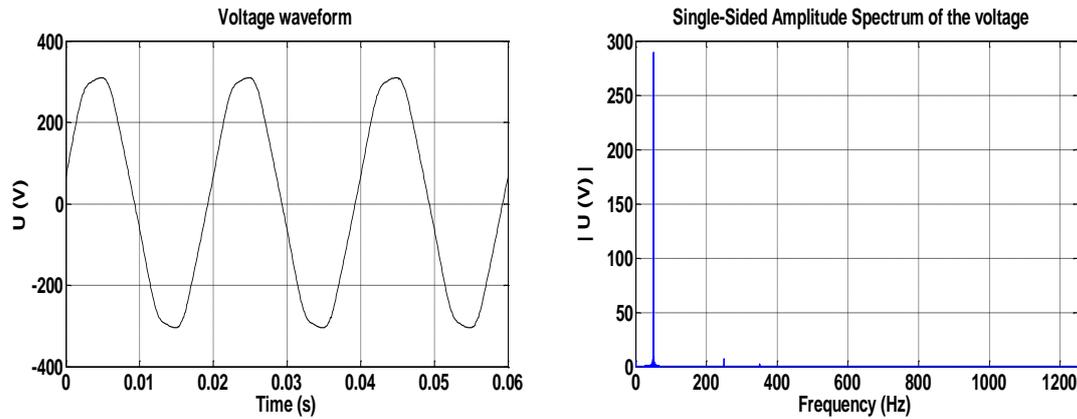


Figure III.3.7 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau III.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
THDi(%)	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
THDVi(%)	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

Des Figures III.3.6, III.3.7 on remarque la présence que d'harmoniques d'ordre impairs et une forte distorsion en courant, ainsi qu'une faible distorsion en tension due principalement aux harmoniques 5 et 7. Du Tableau III.13 on remarque une augmentation du $THD_I = 51.389\%$ et une faible augmentation du $THD_V = 2.8797\%$ comparativement aux valeurs du Tableau III.6 dans l'étude n° 1 dans le cas de la lampe à incandescence et une diminution de taux de distorsion harmonique en courant comparativement aux valeurs obtenu pour un micro-ordinateur et la lampe fluo compact dans l'étude n° 1 ($THD_I = 91.41(\%)$), $THD_I = 111.64(\%)$ respectivement.

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 cet effet est plus visible, car les courants absorbés par chaque charge sont du même ordre de grandeur, on peut aussi remarquer l'effet de superposition des courants qui est plus visible dans le dernier cas (voir figure III.3.6). 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 [28], [29], [30] - [35].

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 où on avait utilisé que des charges non linéaires.

Tableau III.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 [12].

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)
THD_I	101.345	37.3653	51.3894
THD_V	4.5617	2.8295	2.8797
I_{eff} (A)	0.8017	6.2546	1.4704
I₁ (A)	0.4759	4.6430	1.2774
I_h (A)	0.6451	4.1908	0.7283
U_{eff} (V)	230.7934	225.1405	222.2485
U₁ (V)	212.2173	220.9128	221.0195
U_h (V)	90.7160	43.4265	23.3405
P (W)	56.5190	597.0656	161.5429
P₁ (W)	43.9285	464.2636	156.9101
P_h (W)	12.5905	132.8020	4.6327
S (VA)	106.8230	813.0055	188.6767
S₁ (VA)	58.3150	592.1839	163.0020
S_h (VA)	33.7876	105.0733	9.8141
S_N (VA)	89.5014	557.0423	95.0223
Q (Var)	38.3528	367.6154	44.1460
D₁ (Var)	41.5095	207.2747	74.5037
D_V (Var)	2.6574	14.9746	4.6920
D_H (Var)	31.3541	81.2157	8.6518
N (Var)	90.6463	551.8067	97.4823
Fp	0.5291	0.7344	0.8562
cos θ₁	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.

III.5 Influence des charges non linéaires sur les réseaux électriques

Dans cette partie on étudiera l'influence individuelle de quelques des charges non linéaires puis l'influence collective de ces charges sur le réseau d'énergie électrique, on simulant un réseau électrique en utilisant un transformateur d'isolement.

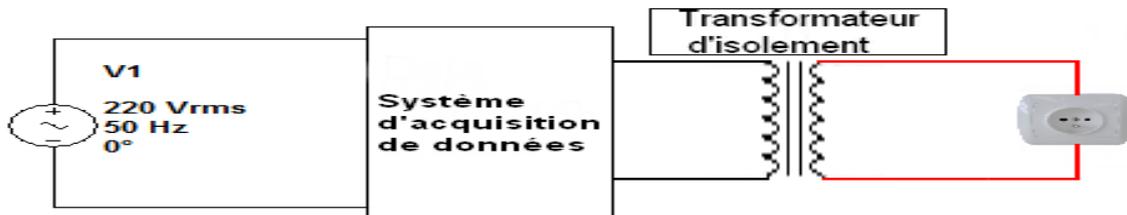


Figure III.4.1. Schéma du montage expérimental pour des charges en aval d'un transformateur d'isolement.

III.5.1 Cas d'une lampe à incandescence

Il s'agit de la même lampe à incandescence utilisée dans l'étude n° 1 alimentée sous une tension de 220V. Sauf que cette fois elle est connectée sur le secondaire d'un transformateur d'isolement, les mesures du courant et de la tension sont faites sur le primaire du transformateur d'isolement. On tirera un fichier de valeur sur le courant absorbé au primaire du transformateur d'isolement et un autre sur la tension primaire grâce au système d'acquisition de données. Les différents paramètres de la qualité d'énergie électrique seront calculés conformément à la norme IEEE Std 1459-2010 [12] grâce à un script Matlab.

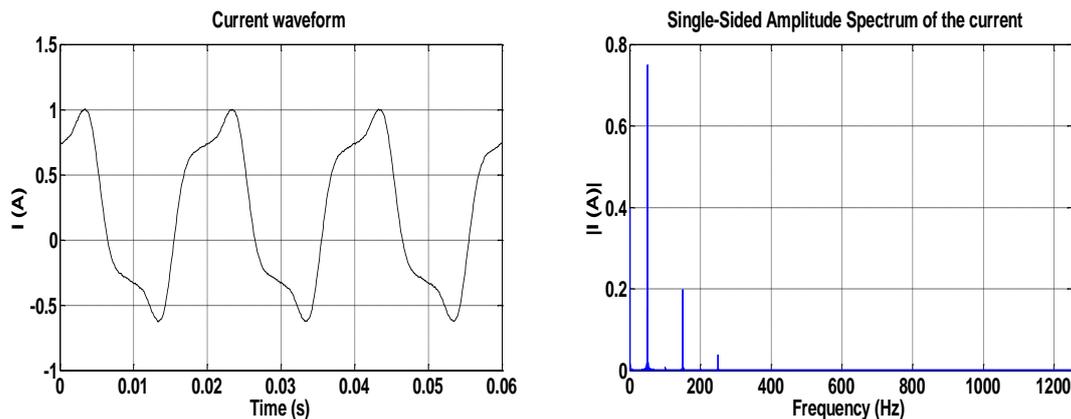


Figure III.4.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

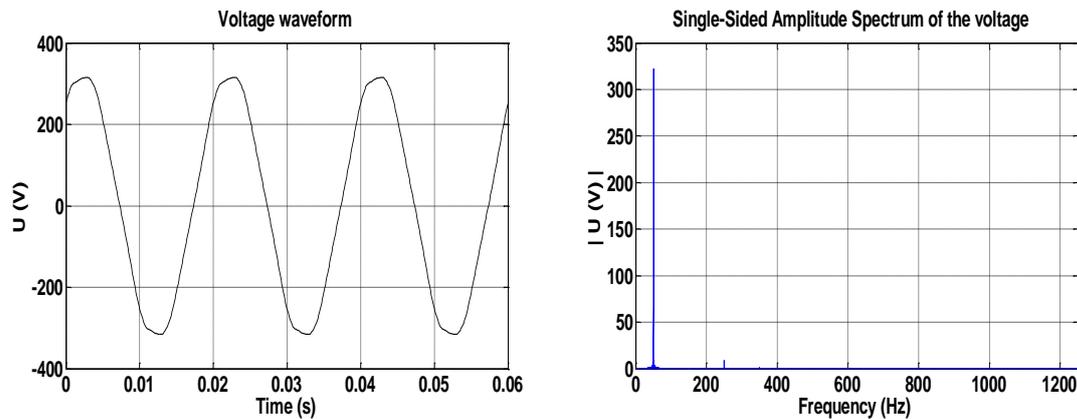


Figure III.4.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

n	1	2	3	4	5	11	13
<i>THDi</i> (%)	95.629	0.753	28.992	0.295	3.713	0.176	0.176
<i>THDVi</i> (%)	99.948	0.103	0.273	0.033	2.110	0.150	0.00

Analyse et interprétation

Des Figures III.4.2, III.4.3, on remarque qu'il y a une large distorsion du courant et une légère distorsion en tension, et que c'est l'harmonique 3 qui prédomine en courant et l'harmonique 5 en tension avec un taux de distorsion individuel de 28.99 (%) et de 2.11(%) respectivement. On remarque aussi la présence des 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 III.6 et III.20, ainsi il y a une augmentation du THD_I de 2.518 % à 30.579 % et une augmentation du 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.

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

Il s'agit de la même lampe fluo compact utilisée dans l'étude n° 1 alimentée sous une tension de 220V. Sauf que cette fois elle est connectée sur le secondaire d'un transformateur d'isolement, le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

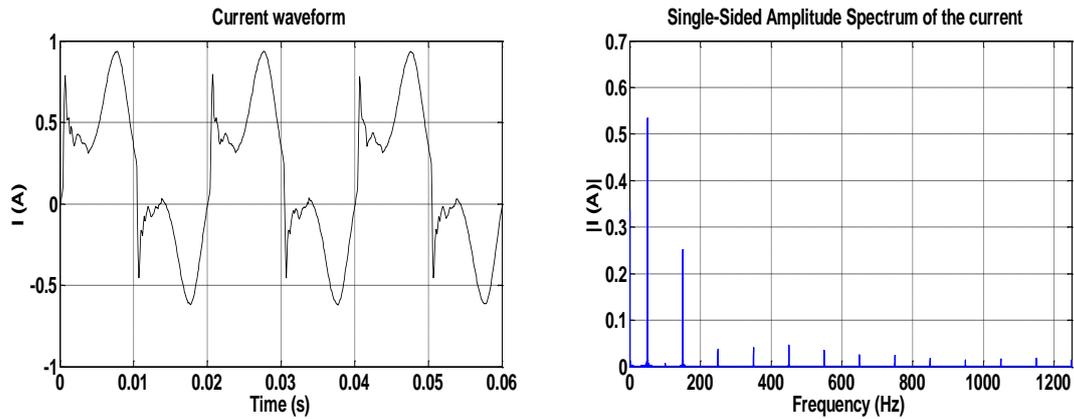


Figure III.4.4 : Représentation temporelle et spectre du courant.

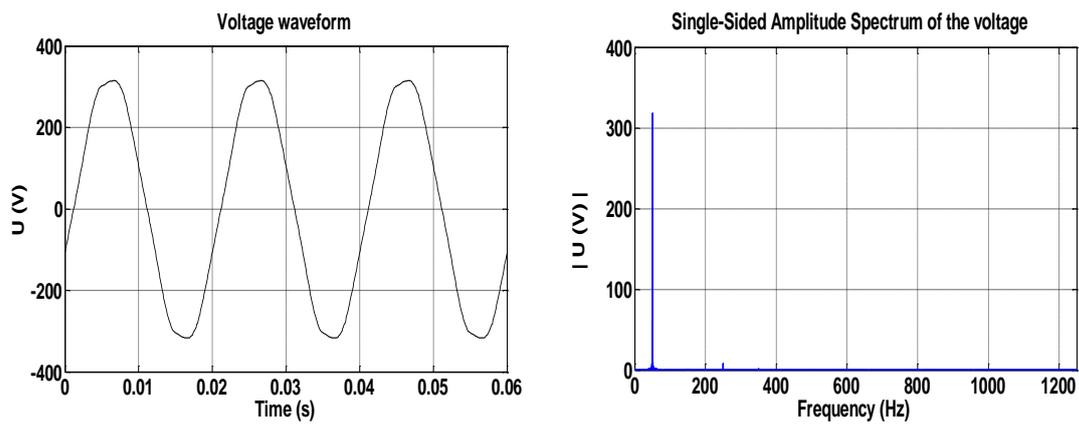


Figure III.4.5: Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau III.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 III.4.4 et de la Figure III.4.5 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 d'après les Tableaux III.6 et III.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.

III.5.3 Cas d'une lampe fluorescente

Il s'agit de la même lampe fluorescente utilisée dans l'étude n° 1 alimentée sous une tension de 220V. Sauf que cette fois elle est connectée sur le secondaire d'un transformateur d'isolement, le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

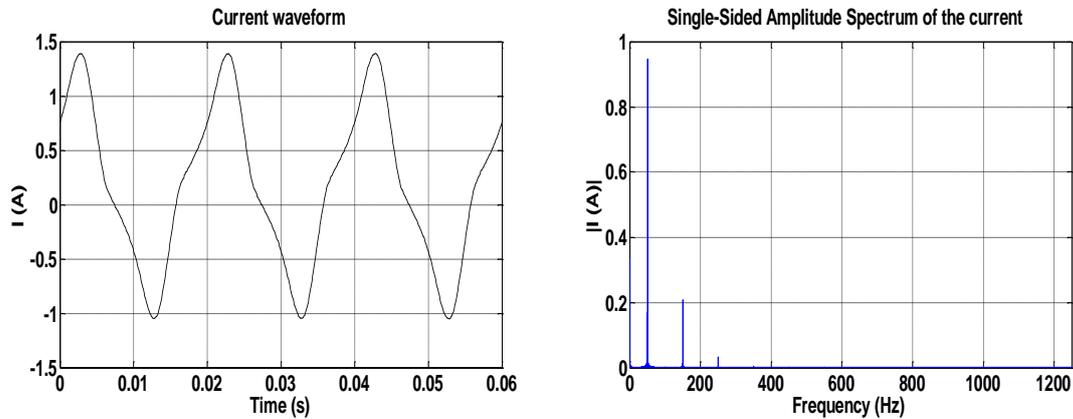


Figure III.4.6 : Représentation temporelle et spectre du courant.

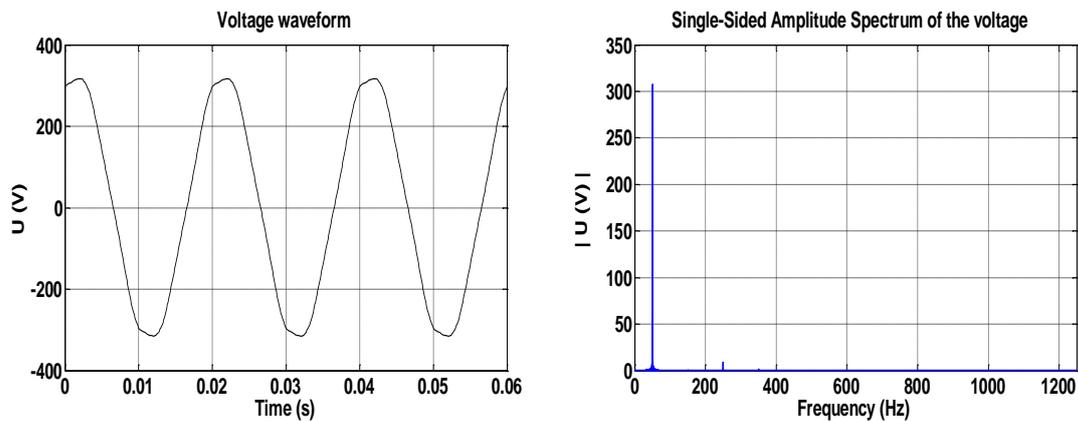


Figure III.4.7 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

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

Analyse et interprétation

Les Figure III.4.6, III.4.7 montrent qu'il y a une augmentation de la distorsion en courant et en tension, et que c'est l'harmonique 3 qui prédomine en courant et l'harmonique 5 en tension. On remarque aussi la présence que d'harmoniques d'ordre impairs alors que l'essai de l'étude n° 1 portant sur la lampe fluorescente nous a permis de conclure que cette lampe est très similaire du point de vue des paramètres de la qualité de l'énergie à la lampe à incandescence, c'est résultat portant sur la distorsion en courant et en tension sont vérifiés par les valeurs des tableaux III.6 et III.20 ainsi il y a une élévation du THD_i de 6.959 % à 20.146 % et une élévation du THD_v de 3.015 % à 3.295 %.

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 la 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.

III.5.4 Cas d'un micro-ordinateur

Il s'agit du même micro-ordinateur que celui utilisé dans l'étude n° 1 alimenté sous une tension de 220V.. Sauf que cette fois il est connecté sur le secondaire d'un transformateur d'isolement, le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

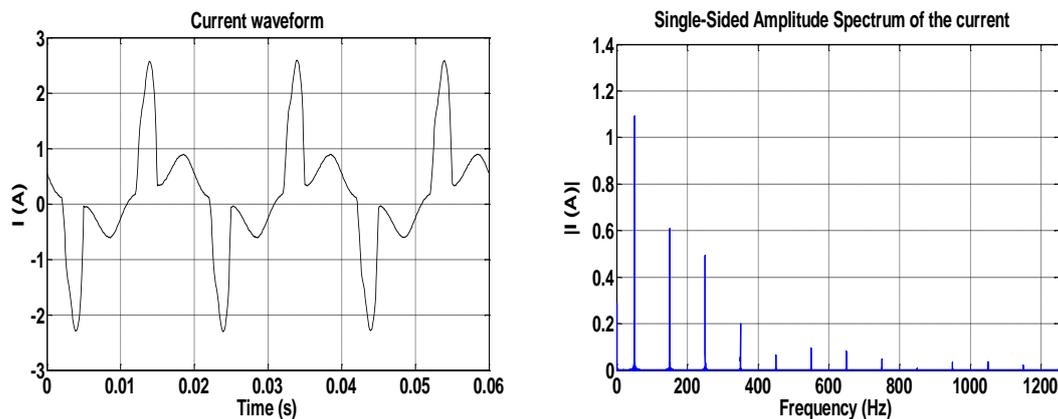


Figure III.4.8: Représentation temporelle et spectre du courant.

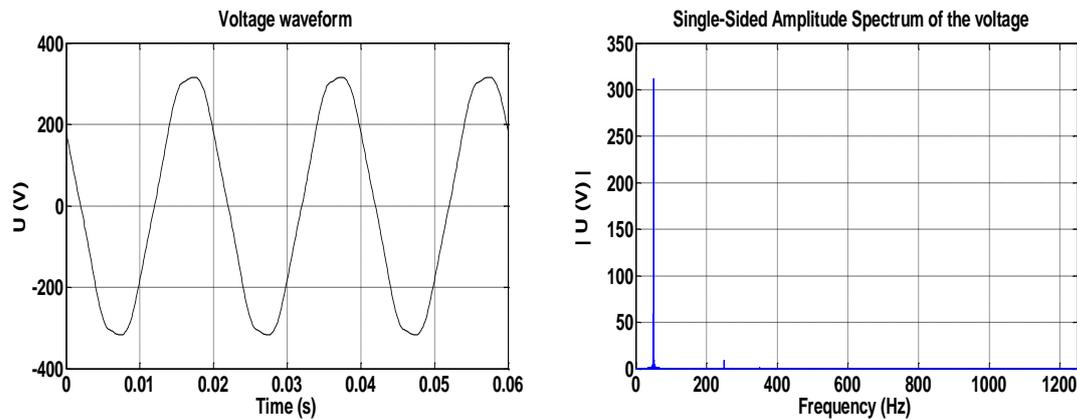


Figure III.4.9 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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
<i>THDi</i> (%)	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
<i>THDVi</i> (%)	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

Des Figures III.4.8, III.4.9 on remarque la diminution de la distorsion en courant, et la présence que d'harmoniques impairs en courant et en tension, 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 III.6 et III.20 et 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 primaire 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.

III.5.5 Cas d'un four à micro-ondes

Il s'agit du même four à micro-ondes utilisé dans l'étude n° 1 alimenté sous une tension de 220V. Sauf que cette fois il est connecté sur le secondaire d'un transformateur d'isolement, le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

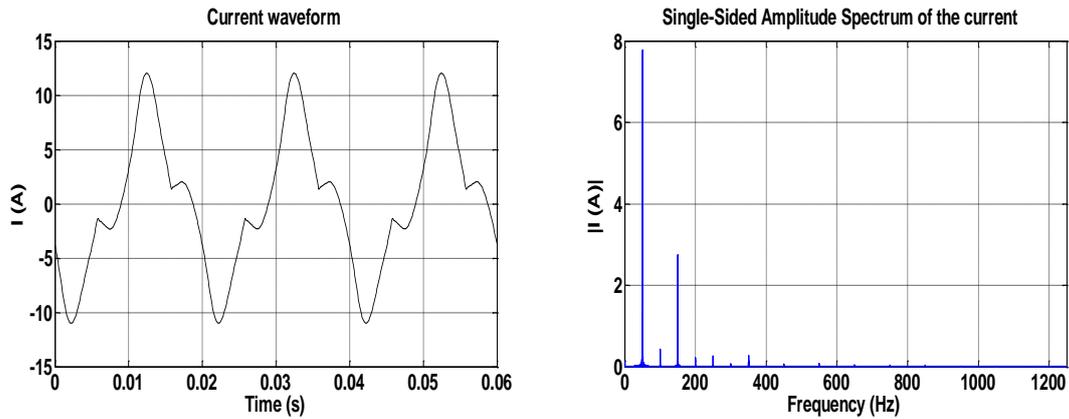


Figure III.4.10 : Représentation temporelle et spectre du courant.

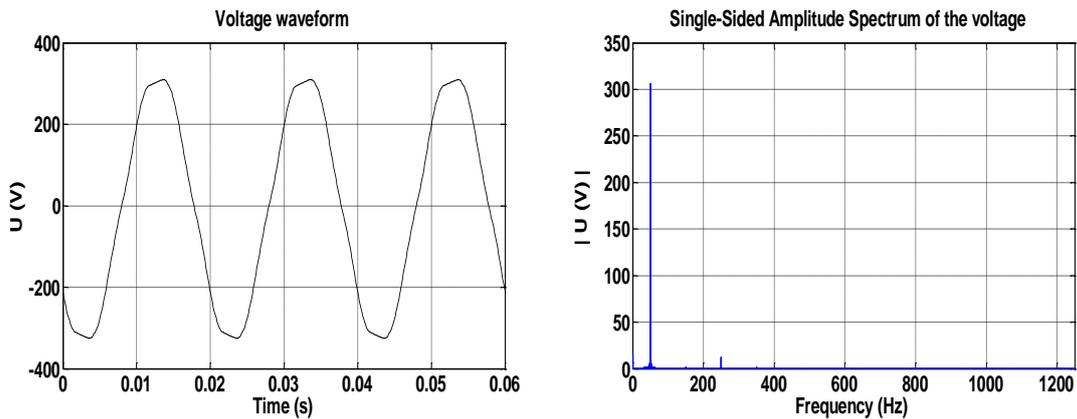


Figure III.4.11 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

n	1	2	3	4	5	6	7	9	11	13
THD_i (%)	94.9	5.94	30.5	2.22	2.3	0.73	2.40	0.67	0.89	0.58
THD_v (%)	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 III.4.10, III.4.11 on remarque la très faible diminution de la distorsion en courant, et la présence que d'harmoniques pairs et impairs en courant et seulement de harmoniques impairs en tension, ainsi qu'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 III.6 et III.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.

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

Il s'agit des mêmes appareils utilisés dans l'étude n° 1 placés en parallèle et alimentés sous une tension monophasée de 220V. Sauf que cette fois ils sont connectés sur le secondaire d'un transformateur d'isolement dans le but de voir l'effet collectif de ces charges sur les réseaux électriques, le procédé de mesure des paramètres de la qualité d'énergie est similaire à celui de la lampe à incandescence.

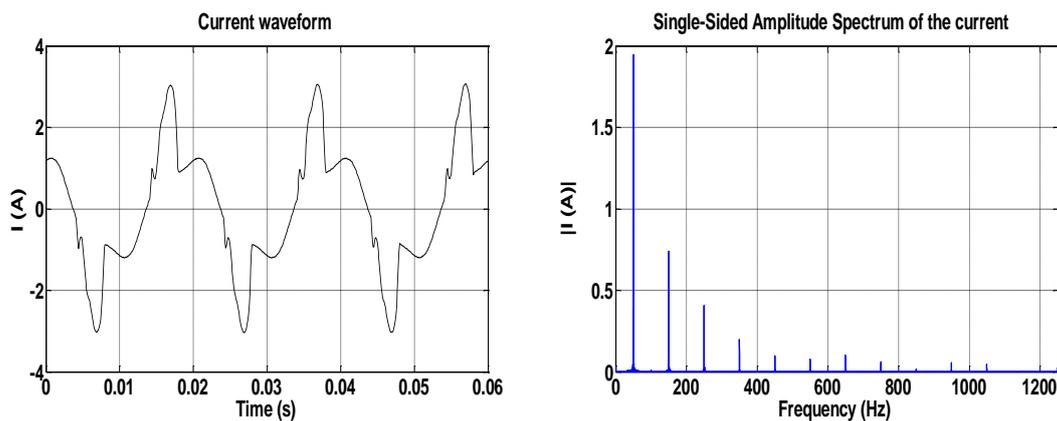


Figure III.4.12 : Représentation temporelle et spectre du courant.

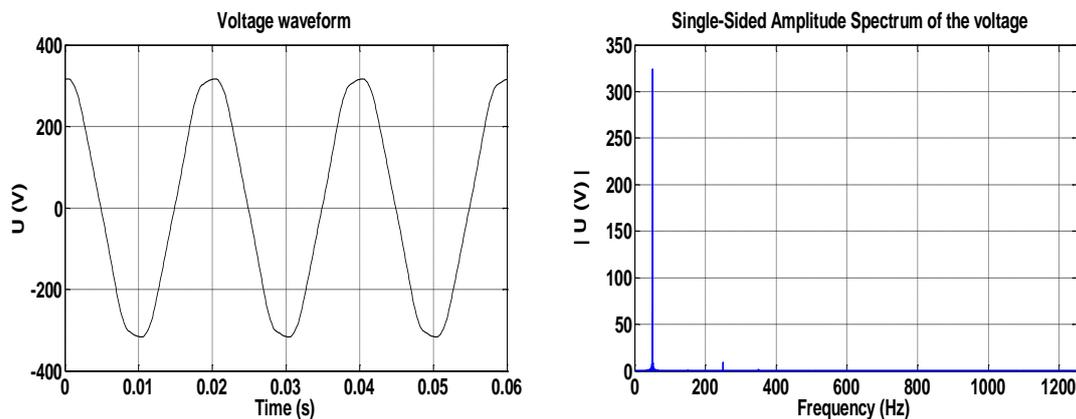


Figure III.4.13 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau III.19 : Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension

n	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
$THD_i(\%)$	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
$THD_v(\%)$	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

Des Figures III.4.12, III.4.13 on remarque que la distorsion due à l'ensemble des appareils montées 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 III.13 et III.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 III.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
I_{eff} (A)	0.5843	0.4738	0.7413	1.4495	6.2261	1.5212
I₁ (A)	0.4557	0.3633	0.6901	0.9817	5.7850	1.2327
I_h (A)	0.3657	0.3041	0.2707	0.7004	2.3017	0.8913
U_{eff} (V)	228.3702	228.8835	228.5233	2288320	230.9115	229.2173
U₁ (V)	196.2561	216.9993	224.2774	222.7058	227.9743	205.0657
U_h (V)	116.7754	72.7939	43.8460	52.5948	86.7108	102.4142
P (W)	67.5069	50.4045	91.4110	99.0900	776.3996	148.6231
P₁ (W)	47.3136	39.8222	85.1968	77.4999	350.2200	118.9013
P_h (W)	20.1933	10.5822	6.2142	11.5901	26.1796	29.7214
S (VA)	77.0441	62.6060	97.8007	148.6592	830.0400	201.3071
S₁ (VA)	51.6376	45.5187	89.3567	100.5066	761.4272	145.9404

S_h (VA)	24.6577	12.7787	6.8515	21.2666	48.7848	52.7026
S_N (VA)	57.1783	42.9833	39.7536	95.5238	330.4467	138.6576
Q (Var)	20.6850	22.0487	26.9465	63.9949	130.1588	84.6227
D_I (Var)	15.1001	17.8103	17.6480	55.5702	239.2577	61.7168
D_V (Var)	1.6587	1.6396	2.4976	3.1140	27.6333	5.1752
D_H (Var)	14.1504	7.1632	2.8857	17.8309	41.1653	43.5224
N (Var)	37.1298	37.1336	34.7706	106.2513	293.5473	135.7782
F_p	0.8762	0.8051	0.9347	0.6425	0.9354	0.7383
cos θ₁	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, aussi la méthode de la FPDM nous a permis d'évaluer les déséquilibres sur les phases grâce à une méthode simple et pratique.

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 provoquent une augmentation des tensions harmoniques, 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 a 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.

IV.1. Introduction

Le désir de réduire la consommation électrique a donné lieu à une utilisation croissante des lampes économiques ou CFL (*compact fluorescent lamp*). Mais ces charges sont considérées comme non linéaires et injectent des harmoniques dans le réseau électrique.

Par le passé, l'influence d'une telle charge peut être ignorée, car elle consomme peu, Cependant, l'adoption de ce type de produit peut être très néfaste et même avoir un effet plus important qu'une seule source d'harmonique importante, car les problèmes dus à ces charges sont plus difficiles à atténuer en raison de leur nature distribuée.

IV.2 Tests expérimentaux sur la lampe CFL de type Philips essential 11W

La lampe CFL de type Philips essential 11W est alimentée sous une tension de 220V. On obtiendra un fichier de valeur sur le courant absorbé par cette charge et un autre sur la tension à ces bornes avec le système d'acquisition de données, puis les différents paramètres de la qualité d'énergie électrique sont calculés conformément à la norme IEEE Std 1459-2010 en utilisant un script Matlab .



Figure IV.1. Schéma du montage expérimental

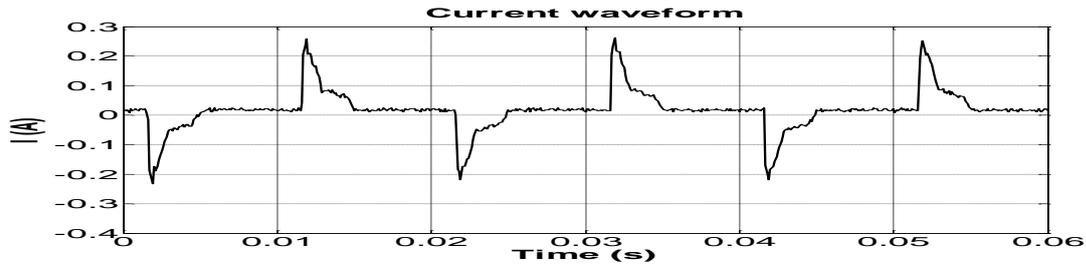


Figure IV.2 : Représentation temporelle du courant.

De la Figure IV.2 on peut considérer que la forme du courant ressemble étroitement à la forme d'onde d'un courant alimentant un pont PD2 sur charge R-C, ainsi on aura la charge de condensateur via PD2 et ça décharge sur la résistance R.

IV.3 Calcul des éléments du montage de la simulation

Pour calculer les éléments R et C, il faut tout d'abord veiller à respecter :

- 1- Le temps de la pseudo-décharge du signal de courant réel mesuré à l'aide du script Matlab $t=3$ ms.
- 2- La période du signal courant qui est de $T=10$ (ms).
- 3- L'amplitude maximale du signal courant $I_{\max} = 0.25$ (A).

L'inductance a été introduite comme réservoir d'énergie électrique et dans le but d'obtenir un taux de distorsion harmonique en courant THD_1 à l'aide de l'analyseur de distorsion XDA1, (voir Figure IV.3), équivalent à celui obtenu expérimentalement, c'est à dire $THD_1 = 103.83(\%)$.

IV.4 Schéma proposé du modèle

Dans notre simulation, on utilisera le logiciel Multisim qui est considéré parmi les meilleurs environnements de simulation de classe SPICE. Il permet d'acquérir une expertise grâce à l'application pratique dans la conception, le prototypage et les tests des circuits électriques. La démarche de conception par le logiciel Multisim permet d'économiser des itérations de prototypes et d'optimiser les circuits imprimés.

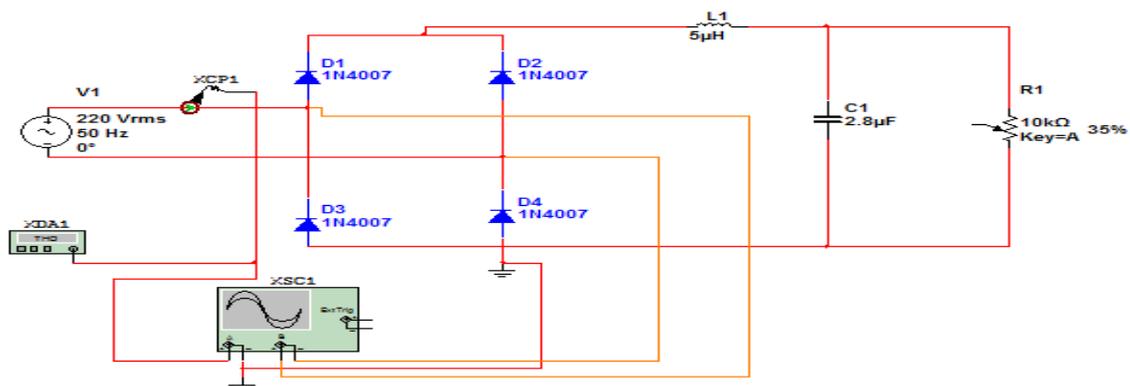


Figure IV.3 Schéma équivalent du circuit électrique de la lampe CFL Philips essential 11W.

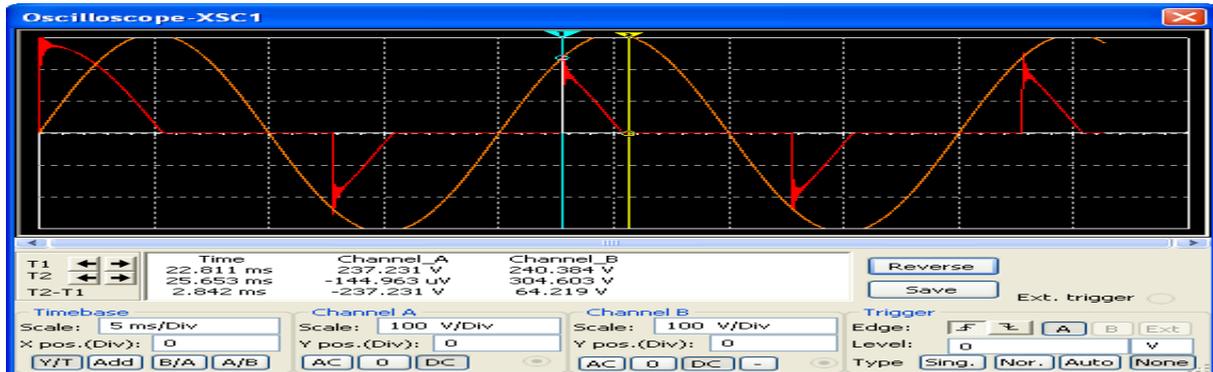


Figure IV.4. Formes d'ondes du courant et de la tension du circuit électrique équivalent de la lampe CFL Philips essential 11W (rouge=courant, orange=tension).

Ainsi on obtient les formes d'onde du courant et de la tension à l'aide d'un capteur de courant XCP1 et de l'oscilloscope XSC1, Figure IV.4. Ce modèle respecte le temps de décharge qui est de 2.84 (ms), l'amplitude du courant est de 0.241(A) et le taux de distorsion harmonique en courant $THD_1 = 104.5(\%)$, presque équivalent à celui calculé avec les valeurs expérimentales.

Conclusion

Les lampes fluo compact consomment moins de puissance active et leur utilisation se traduira par la réduction de la demande de la puissance active du système d'alimentation électrique. D'autre part, le faible facteur de puissance de ces lampes nécessite plus de puissance réactive du système d'électricité. En outre, l'utilisation extensive de ces lampes cause des problèmes de qualité d'énergie dus à la distorsion du courant. On remarque que la lampe étudiée a seulement des harmoniques impairs. La distorsion significative du courant de la CFL est due principalement à ses composants d'électroniques et à leurs méthodes de construction afin de diminuer la taille du ballast. Lorsque les lampes fonctionnent en parallèle, le taux de distorsion harmonique en courant est inférieur comparativement à celui de chaque lampe, mais le taux de distorsion harmonique en tension augmente ce qui conduit à la dégradation de la tension du réseau.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une modeste contribution à l'étude de la qualité d'énergie électrique. 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,

Nous nous sommes confrontés, dans ce travail, aux problèmes majeurs affectant la qualité de l'énergie électrique, nous avons eu recours à un ensemble des 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.

Dans le premier chapitre, nous avons évoqué au début les généralités sur la notion de qualité d'énergie électrique ainsi que des phénomènes perturbateur qui peuvent la dégrader. À cet effet, nous avons essayé d'éclaircir au mieux les sources de ces dernières ainsi que leurs conséquences.

Nous a montré que les charges les plus polluantes sont celles avec le plus de circuits d'électronique de puissance. Cet effet a été montré grâce à la comparaison des différentes charges du point de vue qualité de l'énergie électrique ainsi la lampe fluo compact (CFL) et micro-ordinateur sont des charges très polluantes et consomme beaucoup d'énergie réactive sur le réseau électrique, nous avons aussi montré que le montage triangle permet d'éliminer toutes les harmoniques multiples de trois qui représente un réelle source de danger dans les installations électriques, aussi la méthode de la FPEM a permis d'évaluer les déséquilibres sur les phases en tensions et en courant mais cette méthode reste néanmoins très limitée dès que les taux de distorsions harmoniques individuelle sont dans des proportions très proches. Ce chapitre nous a, entre autre permis, de voir l'impact des phénomènes d'atténuations et de diversités sur les paramètres collectifs de ces charges.

Ces deux phénomènes conduisent à la diminution de la distorsion harmonique totale en courant, mais provoque une augmentation de la distorsion harmonique totale en tension, ce qui est très néfaste pour le réseau d'énergie électrique, aussi on a obtenu qu'un transformateur d'isolement servant à la simulation d'un réseau d'énergie électrique a un même effet qu'une charge non linéaire, qui participe dans la distorsion du courant et de la tension en générant des harmoniques d'ordre trois, surtout quand ces derniers fonctionnent à charge réduite.

Nous avons proposé un modèle de la lampe fluo compact de marque Philips Essential pour lequel nous avons vérifié l'exactitude de ce modèle grâce aux essais expérimentaux. Nous avons conclu grâce au modèle simulé qu'il était très difficile d'atténuer les distorsions harmonique sans dégrader le facteur de puissance, déjà très faible, pour ce genre de lampes. L'explication est principalement due aux composants électroniques et aux méthodes de construction afin de diminuer la taille du ballast.

Perspectives

Au-delà de ce travail, il reste à traiter l'aspect général sur une plus grande catégorie de charges domestiques et tenter une étude technico économique qui pourrait intégrer le coût des solutions de filtrage à mettre en place sur le réseau et l'économie réalisée sur les pertes en présence d'harmoniques

Il faut espérer que dans les années à venir il y ait une véritable prise de conscience générale et que la qualité de l'énergie électrique ne soit pas et plus abordée seulement sous l'aspect économique, mais sous l'aspect écologique nous permettant ainsi de comprendre que l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique n'est pas seulement un « placement financier » mais une chance que l'on se donne de préserver nos ressources naturelles. C'est de cette manière que notre développement sera, le plus accompli, le plus mûri, le plus intégré et donc le plus efficace.

Bibliographie

- [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] R. WIERDA, ‘‘ Flicker ou scintillement des sources lumineuses, Cahier Technique de Schneider Electric CT 176, édition décembre 1995, PP, 3 - 13.
- [12] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Un-balanced Conditions, IEEE Std. 1459, Jan. 2010.
- [13] ‘‘DaqTemp User’s Manual,’’ PCI-Based Data Acquisition Systems for Desktop and Tower PCs’’, IOtech, Inc., November 2002. pp. 68–75
- [14] [3]Angelo Baggingi,’’ Handbook of Power Quality’’, John Wiley & Sons Ltd,2008. pp. 175–225
- [15] Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S. : Feature pattern extraction method for on linedetermination of percentage unbalance and the highest order of harmonic present in a three-phase system. Proceedings of An all India Seminar on Power System by IEEE, Calcutta sectionand IE, India (2003) .pp. 1–6
- [16] [Math h. j. Bollen, Irene yu-huagu,’’ Signal Processing Of Power Quality Disturbances’’, iee press series on power engineering mohamed e. el-hawary, series editor, john wiley & sons, inc,2006. pp. 114–182.
- [17] Math h. j. Bollen, Irene yu-huagu,’’ Signal Processing Of Power Quality Disturbances’’, iee press series on power engineering mohamed e. el-hawary, series editor, john wiley & sons, inc,2006. pp. 114–182.

- [18] A. B. Nassif and J. Acharya, "An investigation on the harmonic attenuation effect of modern compact fluorescent lamps", presented at the 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Wollongong, Australia, 2008. pp. 1–6.
- [19] 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. pp. 1748 - 1749.
- [20] 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.
- [21] 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. pp. 844 - 851.
- [22] 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. pp. 279 - 285.
- [23] [8]Angelo Baghini," Handbook of Power Quality", John Wiley & Sons Ltd,2008. pp. 173–182.
- [24] Robert D. Henderson, Member, IEEE, and Patrick J. Rose," Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 30, NO. 3, JUNE 1994. pp. 528 - 532.
- [25] Standard ANSI/IEEE C57.110, 1998, "Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents," February 1998.
- [26] P. N. Korovesis, G. A. Vokas, I. F. Gonos, and F. V. Topalis, "Influence of large-scale installation of energy saving lamps on the line voltage distortion of a weak network supplied by a photovoltaic station", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, no. 4, October 2004. pp. 1787 - 1793.
- [27] 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. pp. 1521 - 1528.
- [28] 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. pp. 467 - 473.
- [29] 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. pp. 883 - 889.
- [30] 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. pp. 44 - 851.
- [31] 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. pp. 1086 - 1092.

- [32] 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. pp. 1261 - 1268.
- [33] Edited by P.F. Ribeiro, "Time – varying waveform distortions in power systems", John Wiley & Sons, 2009. pp. 115–133.
- [34] P. F. Ribeiro, "Investigations of harmonic penetration in transmission systems", chapter 6, PhD Thesis, The Victoria University of Manchester, UK, 1985. pp. 154–188.
- [35] 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. pp. 279 - 285.

ANNEXE A

Ensemble des tableaux utilisés pour l'évaluation par la FPEM et la classification des charges non linéaire :

1. Tableaux utilisés pour l'évaluation par la FPEM

Tableau 1.1: Valeurs de $[x_V]$ et $[y_V]$ pour un système équilibré

Condition	Phase	$[y_V]=\begin{bmatrix} Y_{V_{RY}} \\ Y_{V_{YB}} \\ Y_{V_{BR}} \end{bmatrix}$	$[x_V]=\begin{bmatrix} X_{V_{RY}} \\ X_{V_{YB}} \\ X_{V_{BR}} \end{bmatrix}$
Système équilibré	RY	1	1
	YB	1	1
	BR	1	1

Tableau 1.2 : Règle élaborée à partir du (tableau 1.1)

Règle 1	$[x_V]=[111]$ et $[y_V]=[111]$	le système est parfaitement équilibré
---------	--------------------------------	---------------------------------------

Tableau 1.3 : Valeurs de $[x_V]$ et $[y_V]$ pour un système déséquilibré dans la phase R :

Condition	Phase	$[y_V]$	$[x_V]$
10 % de la tension phase R	RY	1.0	0.1
	YB	1.0	1.0
	BR	0.1	1.0
30 % de la tension phase R	RY	1.0	0.3
	YB	1.0	1.0
	BR	0.3	1.0
50 % de la tension phase R	RY	1.0	0.5
	YB	1.0	1.0
	BR	0.5	1.0
70 % de la tension phase R	RY	1.0	0.7
	YB	1.0	1.0
	BR	0.7	1.0
90 % de la tension phase R	RY	1.0	0.9
	YB	1.0	1.0
	BR	0.9	1.0
110 % de la tension phase R	RY	1.0	1.1
	YB	1.0	1.0
	BR	1.1	1.0
130 % de la tension phase R	RY	1.0	1.3
	YB	1.0	1.0
	BR	1.3	1.0
150 % de la tension phase R	RY	1.0	1.5
	YB	1.0	1.0
	BR	1.5	1.0
170 % de la tension	RY	1.0	1.7

phase R	YB	1.0	1.0
	BR	1.7	1.0
190 % de la tension phase R	RY	1.0	1.9
	YB	1.0	1.0
	BR	1.9	1.0

Tableau 1.4 : Règle élaborée à partir du (tableau 1.3) :

Règle 2	$[x_V] \neq [111]$ et $[y_V] \neq [111]$	Le système est déséquilibré
Règle 3	Si la règle 2 est vrai et $X_{RY} \neq 1$ Et $Y_{BR} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur la phase R et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{RY}) \times$ 100%

Tableau 1.5 : Valeurs de $[x_V]$ et $[y_V]$ pour un système déséquilibré dans la phase Y :

Condition	Phase	$[y_V]$	$[x_V]$
10 % de la tension phase R	RY	0.1	1.0
	YB	1.0	0.1
	BR	1.0	1.0
30 % de la tension phase R	RY	0.3	1.0
	YB	1.0	0.3
	BR	1.0	1.0
50 % de la tension phase R	RY	0.5	1.0
	YB	1.0	0.5
	BR	1.0	1.0
70 % de la tension phase R	RY	0.7	1.0
	YB	1.0	0.7
	BR	1.0	1.0
90 % de la tension phase R	RY	0.9	1.0
	YB	1.0	0.9
	BR	1.0	1.0
110 % de la tension phase R	RY	1.1	1.0
	YB	1.0	1.1
	BR	1.0	1.0
130 % de la tension phase R	RY	1.3	1.0
	YB	1.0	1.3
	BR	1.0	1.0
150 % de la tension phase R	RY	1.5	1.0
	YB	1.0	1.5
	BR	1.0	1.0
170 % de la tension phase R	RY	1.7	1.0
	YB	1.0	1.7
	BR	1.0	1.0
190 % de la tension phase R	RY	1.9	1.0
	YB	1.0	1.9
	BR	1.0	1.0

Tableau 1.6 : Règle élaborée à partir du (tableau 1.5) :

Règle 2	$[x_V] \neq [111]$ et $[y_V] \neq [111]$	Le système est déséquilibré
---------	--	-----------------------------

Règle 3	Si la règle 2 est vrai et $X_{YB} \neq 1$ et $Y_{RY} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur la phase Y et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{YB}) \times$ 100%
---------	---	---

Tableau 1.7 : Valeurs de $[x_V]$ et $[y_V]$ pour un système déséquilibré dans la phase B :

Condition	Phase	$[y_V]$	$[x_V]$
10 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	0.1	1.0
	BR	1.0	0.1
30 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	0.3	1.0
	BR	1.0	0.3
50 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	0.5	1.0
	BR	1.0	0.5
70 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	0.7	1.0
	BR	1.0	0.7
90 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	0.9	1.0
	BR	1.0	0.9
110 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	1.1	1.0
	BR	1.0	1.1
130 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	1.3	1.0
	BR	1.0	1.3
150 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	1.5	1.0
	BR	1.0	1.5
170 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	1.7	1.0
	BR	1.0	1.7
190 % de la tension phase R	RY	1.0	1.0
	YB	1.9	1.0
	BR	1.0	1.9

Tableau 1.8 : Règle développé du (tableau 1.7) :

Règle 2	$[x_V] \neq [111]$ et $[y_V] \neq [111]$	Le système est déséquilibré
Règle 5	Si la règle 2 est vrai et $X_{BR} \neq 1$ et $Y_{YB} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur la phase Y et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{BR}) \times 100\%$

Tableau 1.9 : Valeurs de $[x_V]$ et $[y_V]$ pour un système déséquilibré dans les phases R, Y et B :

Condition	Phase	$[y_V]$	$[x_V]$
10 % de la tension phase R, et 50 % de la	RY	0.5	0.1
	YB	1.0	0.5

tension phase Y.	BR	0.1	1.0
10 % de la tension phase R, et 50 % de la tension phase Y et 150 % de la tension phase B.	RY YB BR	0.5 1.5 0.1	0.1 0.5 1.5
30 % de la tension phase R, et 30 % de la tension phase Y, 30 % de la tension phase B.	RY YB BR	0.3 0.3 0.3	0.3 0.3 0.3
40 % de la tension phase R, et 60 % de la tension phase B	RY YB BR	1.0 0.6 0.4	0.4 1.0 0.6

Tableau 1.10 : Règle élaborée à partir du (tableau 1.9) :

Règle	Règle	Inférence
Règle 2	$[x_V] \neq [111]$ et $[y_V] \neq [111]$	Le système est déséquilibré
Règle 6	Si la règle 2 est vrai et $X_{RY} \neq 1$, $X_{YB} \neq 1$, $Y_{RY} \neq 1$ et $Y_{BR} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur les phases R et Y et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{RY}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase Y = $(1 - X_{YB}) \times 100\%$
Règle 7	Si la règle 2 est vrai et $X_{YB} \neq 1$, $X_{BR} \neq 1$, $Y_{YB} \neq 1$ et $Y_{RY} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur les phases Y et B et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{YB}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase B = $ (1 - X_{BR}) \times 100\%$
Règle 8	Si la règle 2 est vrai et $X_{BR} \neq 1$, $X_{RY} \neq 1$, $Y_{YB} \neq 1$ et $Y_{BR} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur les phases B et R et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{BR}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase R = $ (1 - X_{RY}) \times 100\%$
Règle 9	Si la règle 2 est vrai et $X_{RY} \neq 1$, $X_{YB} \neq 1$, $X_{BR} \neq 1$, $Y_{RY} \neq 1$, $Y_{YB} \neq 1$ et $Y_{BR} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur les phases R et Y et B, et le pourcentage du déséquilibre sur la phase R = $X_{RY} \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase Y = $ (1 - X_{YB}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase B = $ (1 - X_{BR}) \times 100\%$

Tableau 1.11 : Règle CMS développé en utilisant la FPEM :

Règle	Règle	Inférence
Règle 1	$[x_V] = [111]$ et $[y_V] = [111]$	Le système est parfaitement équilibré
Règle 2	$[x_V] \neq [111]$ et $[y_V] = [111]$	Le système est déséquilibré
Règle 3	Si la règle 2 est vrai et $X_{RY} \neq 1$, $Y_{BR} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur la phase R et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{RY}) \times 100\%$
Règle 4	Si la règle 2 est vrai et $X_{YB} \neq 1$, $Y_{RY} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur la phase Y et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{YB}) \times 100\%$

Règle 5	Si la règle 2 est vrai et $X_{BR} \neq 1$ et $Y_{YB} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur la phase B et le pourcentage du déséquilibre = $ (1 - X_{BR}) \times 100\%$
Règle 6	Si la règle 2 est vrai et $X_{YB} \neq 1$ et $Y_{RY} \neq 1$ et $Y_{BR} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur les phases R et Y et le pourcentage du déséquilibre sur la phase R = $ (1 - X_{RY}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase Y = $ (1 - X_{YB}) \times 100\%$
Règle 7	Si la règle 2 est vrai et $X_{YB} \neq 1$ et $X_{BR} \neq 1$ et $Y_{YB} \neq 1$ et $Y_{RY} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur les phases Y et B et le pourcentage du déséquilibre sur la phase Y = $ (1 - X_{YB}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase B = $ (1 - X_{BR}) \times 100\%$
Règle 8	Si la règle 2 est vrai et $X_{BR} \neq 1$ et $X_{RY} \neq 1$ et $Y_{YB} \neq 1$ et $Y_{BR} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur les phases B et R et le pourcentage du déséquilibre sur la phase B = $ (1 - X_{BR}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase R = $ (1 - X_{RY}) \times 100\%$
Règle 9	Si la règle 2 est vrai et $X_{RY} \neq 1$ et $X_{YB} \neq 1$ et $X_{BR} \neq 1$, et $Y_{RY} \neq 1$ et $Y_{YB} \neq 1$, $Y_{BR} \neq 1$	Le déséquilibre c'est produit sur les phases R et Y et B, et le pourcentage du déséquilibre sur la phase R = $ (1 - X_{RY}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase Y = $ (1 - X_{YB}) \times 100\%$ et le pourcentage du déséquilibre sur la phase B = $ (1 - X_{BR}) \times 100\%$

Tableau 1.12 : Nombre de clivages (C) liée à l'ordre de la plus haute harmonique dans un système équilibré.

Ordres des harmoniques présents dans le système	Nombre de clivages (C)	Ordre de l'harmonique le plus élevé n_H
2	1	2
3	2	3
2,3	2	3
2,3	2	3
2, 3,5	4	5
3,5	4	5
5,7	6	7
5, 7,13	12	13
2, 3, 5, 6, 7,13	12	13

Tableau 1.13 : règle CMS pour la détermination ordre des harmoniques dominantes :

C = nombre de clivages dans un modèle	Ordre de la plus haute harmonique ($n_H = C + 1$)
---------------------------------------	---

2. Tableaux utilisée pour la classification des charges non linéaire :

Tableau 2.1 : Limites pour les appareils de classe A :

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
Harmoniques impairs	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$1.15 \frac{15}{n}$
Harmoniques pairs	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 \frac{8}{n}$

Tableau 2.2 : Limites pour les appareils de classe C :

Rang harmonique	Courant harmonique maximal exprimé en pourcentage du courant fondamental d'entrée des luminaires (%)
2	2
3	30*FP
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (harmoniques impaires seulement)	3
FP : facteur de puissance du circuit	

Tableau 2.3 : Limites pour les appareils de classe D :

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé par watt (mA/W)	courant harmonique maximal autorisé
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.33
$13 \leq n \leq 39$	$\frac{3.85}{n}$	Voir tableau 2.1