

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE **N**ATIONALE **P**OLYTECHNIQUE
Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique

Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'État en Électrotechnique

THÈME

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

Proposé par: Pr. O. TOUHAMI

Etudié par : Mr. ABOURA FAOUZI

Dr. R. TAHMI

Mr. KACI LOUENAS

ENP- juin 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 الـ قوة، المصابيح الموفرة للطاقة، MULTISIM.

Dédicace

A la mémoire de mon frère KHIRDENE que dieu l'accueille dans son vaste paradis,

A mes très chers parents qui m'ont soutenu tout au long de mes études et qui ont toujours cru en moi et que je leur dois tout ce qu'ils ont fait pour moi,

A mes deux frères LYAZID et SAKIM,

A mes sœurs,

A ma famille

A mon binôme Faouzi.

A mes frères et chers amis Lounis SADELLI, Soufiane TIGHZERT, Faouzi YAHIAOUI,

Et à tous mes amis.

Je dédie ce travail

L. KACI

Dédicace

Je dédie ce projet à :

En signe de respect et de reconnaissance à

Mes parents sans qui je ne serais pas là aujourd'hui.

A mes frères et sœurs.

A toute la famille ABOURA et NEDJRAOUI.

A mon binôme Louenas.

A tous mes amis.

A. Faouzi.

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés au Laboratoire de Recherche en Électrotechnique de l'école nationale polytechnique d'Alger.

On voudrait remercier les professeurs O.TOUHAMI et R.TAHMI qui nous ont fait l'honneur de nous encadrer et qui nous ont guidé au cours de nos travaux et pour qui on exprime toute notre gratitude pour leurs expériences, leurs compétences multidisciplinaires, leurs disponibilité, leurs conseils, et leurs qualités humaines.

A messieurs M.OUADAH et A.BOUZIDA qui nous ont transmis leurs amours du travail qu'ils trouvent ici l'expression de notre respect et de notre reconnaissance.

Aux membres du jury qui ont bien voulu évaluer notre modeste travail qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude.

Que tous les enseignants ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.

Liste des symboles

BF : Basse fréquence

HF : Haute fréquence

CEM : Compatibilité ÉlectroMagnétique

S_d : Facteur de défaut à la terre

BT : Basse tension

MT : Moyenne tension

HT : Haute Tension

V : Tension efficace

I : Courant efficace

V_H : Tension efficace harmonique

I_H : Courant efficace harmonique

THD_V : Taux de distorsion harmonique en tension

THD_I : Taux de distorsion harmonique en courant

p : Puissance instantanée

P : Puissance active

P_1 : Puissance active fondamentale

P_H : Puissance active harmonique

Q : Puissance réactive

S : Puissance apparente

S_1 : Puissance apparente fondamentale

S_N : Puissance apparente non fondamentale

N : Puissance déformante harmonique

FP_1 : Facteur de puissance fondamental

FP : Facteur de puissance

S_H : Puissance apparente harmonique

D_I : Puissance déformante en courant

D_V : Puissance déformante en tension

D_H : Puissance déformante harmonique

n : Rang d'harmonique

THD_{Ii} : Taux individuel de distorsion harmonique en courant

THD_{Vi} : Taux individuel de distorsion harmonique en tension

I.5.4.4 Effet du déséquilibre de la tension	23
I.5.5 Les harmoniques et les inter-harmoniques	23
I.5.5 .1 Les harmoniques	23
1.5.5.2 Les inter-harmoniques	26

Bibliographie

CHAPITRE II MÉTHODES DE MESURES ET PARAMÈTRES REPRÉSENTATIFS DE LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

II.1 Introduction	28
II.2 Mesure et acquisition des données.....	28
II.2.1 Maquette de charges	29
II.2.2 Les capteurs du courant, de la tension et les transducteurs	29
II.2.3 La carte d'acquisition.....	30
II.3 Traitement des données et calcul des différents paramètres de la qualité de l'énergie électrique	32
II.3.1 Méthode de la transformée de Fourier	32
II.3.1.1 Composition d'une d'onde déformée	32
II.3.1.1 Décomposition d'une onde déformée	32
II.3.2 Méthode de la FPEM	34
II.3.2.1 Déséquilibre et FPEM	35
II.3.2.2 Ensemble de règles CMS pour l'évaluation du déséquilibre par la FPEM	38
II.3.2.3 Règle CMS pour la détermination de l'ordre de l'harmonique dominante	41
II.4 Les paramètres caractérisant la qualité de l'énergie électrique selon la norme IEEE Std 1459[1]	42
II.4.1 Les Paramètres caractérisant les systèmes monophasés	42
II.4.1.1 La valeur efficace de la tension et du courant	42
II.4.1.2 Le taux global de distorsion harmonique THD	43
II.4.1.3 La puissance instantanée	44
II.4.1.4 La puissance active (W)	45
II.4.1.5 La puissance active fondamentale (W)	45
II.4.1.6 La puissance active harmonique (W)	45
II.4.1.7 La puissance réactive fondamentale (Var)	45
II.4.1.8 La puissance apparente (VA)	45
II.4.1.9 La puissance apparente fondamentale (VA)	45
II.4.1.10 La puissance apparente non fondamentale (VA)	46
II.4.1.11 La puissance déformante en courant (Var)	46

II.4.1.12 La puissance déformante en tension (Var)	46
II.4.1.13 La puissance apparente harmonique (VA)	46
II.4.1.14 La puissance déformante harmonique (Var)	46
II.4.1.15 La puissance déformante harmonique (Var)	47
II.4.1.16 Le facteur de puissance fondamental	47
II.4.1.17 Le facteur de puissance	47
II.4.2 Paramètres caractérisant les systèmes triphasés asymétriques	49
II.4.2.1 La puissance instantanée (W)	49
II.4.2.2 La puissance active (W)	50
II.4.2.3 Puissance active positive, négative, et homopolaire (W)	50
II.4.2.4 La puissance réactive (Var)	51
II.4.2.5 La puissance réactive positive, négative, et homopolaire (Var)	51
II.4.2.6. Puissance apparente par phase (VA)	51
II.4.2.7 Le vecteur de puissance apparente (VA)	51
II.4.2.8 Le vecteur de facteur de puissance et le facteur de puissance arithmétique	52
II.4.2.9 La puissance apparente efficace (VA)	52
II.4.2.10 Facteur de puissance efficace	52
II.4.2.11 La puissance effective apparente et sa résolution.....	53
II.4.2.12 Les courants efficaces	53
II.4.2.13. Les tensions efficaces	53
II.4.2.14 La puissance apparente fondamentale	54
II.5 Élaboration des décisions et classification des charges	55
II.5.1 Classification des appareils.....	56
II.5.2 Limites des courants harmoniques	56
II.5.2.1 Limites pour les matériels de Classe A	56
II.5.2.2 Limites pour les matériels de Classe B	57
II.5.2.3 Limites pour les matériels de Classe C	57
II.5.2.4 Limites pour les matériels de Classe D	58

Bibliographie

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

III.2 Etude pratique de certains types de charges non linéaires	60
III.2.1 Cas d'une lampe à incandescence	60

III.2.2 Cas d'une lampe fluo compact (lampe à faible consommation).....	63
III.2.3 Cas d'une lampe fluorescente	65
III.2.4 Cas d'un micro-ordinateur.....	68
III.2.5 Cas d'un four à micro-ondes.....	70
III.3 Etude de l'influence du montage triangle sur les harmoniques	73
III.3.1 Cas des Lampes fluo compact.....	73
III.3.2. Les lampes fluorescentes :	77
III.4 Effet collectif des charges non linéaires (étude cas d'un foyer)	82
III.4.1 Cas d'un foyer utilisant que des charges non linéaires de même type : (5 lampes fluo compacts).....	82
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)	84
III.4.3. Cas d'un foyer réel comportant une lampe fluo compact, une lampe à incandescence, une lampe fluorescente et un micro-ordinateur	87
III.5 Influence des charges non linéaires sur les réseaux électriques	91
III.5.1 Cas d'une lampe à incandescence	91
III.5.2 Cas d'une lampe fluo compact (économique)	93
III.5.3 Cas d'une lampe fluorescente	95
III.5.4 Cas d'un micro-ordinateur.....	98
III.5.5 Cas d'un four à micro-ondes.....	100
III.5.6 Cas d'un foyer réel comportant une lampe fluo compact, une lampe à incandescence, une lampe fluorescente et un micro-ordinateur	103
III.6 Conclusion	107
Bibliographie	

CHAPITRE IV MODÉLISATION D'UNE LAMPE FLUO COMPACT (CFL) DE TYPE PHILIPS ESSENTIAL

IV.1. Introduction	107
IV.2 Description de la lampe économique de type CFL	108
IV.3. Principe de fonctionnement.....	110
IV.4 Tests expérimentaux sur la lampe CFL de type Philips essential 11W.....	110
IV.5 Modélisation de la lampe CFL de type Philips 11W essential.....	114
IV.5.1 Calcul des éléments du montage de la simulation	115
IV.5.2 Schéma proposé du modèle.....	115
IV.5.3 Amélioration de la forme d'onde du courant,.....	117
Conclusion.....	118

Bibliographie

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

ANNEXE A

ANNEXE B

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

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

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

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

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

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

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

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

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

Ce mémoire a pour but de montrer l'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.

Dans le premier chapitre, nous présentons la notion de qualité d'énergie électrique et sa place vis-à-vis de la compatibilité électromagnétique ainsi que les différents phénomènes perturbateurs. Nous présenterons d'abord leurs définitions et leur caractéristique suivant les normes standards, ainsi que leur origine et leurs effets.

Le deuxième chapitre traite des différentes méthodes de mesures. Dans le cadre de notre mémoire on limitera à deux méthodes que sont la transformée de Fourier et la méthode de la FPDM. Par la suite, nous présenterons les différents paramètres à mesurer afin de caractériser la qualité d'énergie d'un point de vue optimale, et enfin, on abordera l'élaboration des décisions et la classification des charges.

Le troisième chapitre met l'accent sur la qualité d'énergie pour charges domestiques, ainsi en premier lieu on étudiera les caractéristique de chaque charge prise séparément permettant ainsi de faire une comparaison d'un point de vue perturbation électrique des différentes charges domestiques et on montrera l'influence du montage triangle ainsi que l'effet commun de ces charges sur les paramètres de la qualité d'énergie.

Nous terminerons ce chapitre par une étude sur l'influence de ces charges sur le réseau d'énergie électrique via un transformateur d'isolement.

Le quatrième et dernier chapitre est entièrement consacré à l'étude de la lampe fluorescente compacte (CFL). Après une description sommaire de sa composition et de son principe de fonctionnement, on proposera un modèle électrique de cette lampe qu'on simulera. Une comparaison des résultats obtenus à ceux expérimentaux, sur cette même lampe, permet de valider le modèle proposé.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET LES PHÉNOMÈNES PERTURBATEURS

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. Les perturbations rayonnées (dues à des champs électromagnétiques) et les perturbations conduites (transmises par câble) caractérisent les phénomènes HF (> 9 kHz) ou les phénomènes BF (< 9 kHz) [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 Notion de charge linéaire et non linéaire

Auparavant, la majorité des charges utilisées sur le réseau électrique étaient des charges dites linéaires. Les charges linéaires appellent un courant de forme identique à la

tension, c'est-à-dire quasi sinusoïdal tels que les convecteurs électriques ou encore les lampes à incandescence.

Aujourd'hui, avec l'apport de l'électronique intégrée dans de nombreux dispositifs électriques, les charges produisent des courants déformés dont l'allure n'est plus sinusoïdale. Il est important de faire la distinction entre les charges linéaires et les charges non linéaires. Cette identification peut s'effectuer par :

- La reconnaissance du type de charge lorsque la technologie intégrée est connue,
- les mesures électriques dans le but de vérifier les caractéristiques du courant consommé par la charge, [5].

I.3.1 Les charges linéaires

Cette catégorie de charge se retrouve au travers des récepteurs classiques tels que les convecteurs électriques, les lampes à incandescence ou encore tout simplement les récepteurs comportant des éléments purement résistifs. Mais cela peut-être aussi une charge comprenant des éléments inductifs ou capacitifs.

Aussi, la charge linéaire, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale, absorbe un courant de même allure. La proportionnalité entre tension et courant est présente à tout moment (Figure I.1).

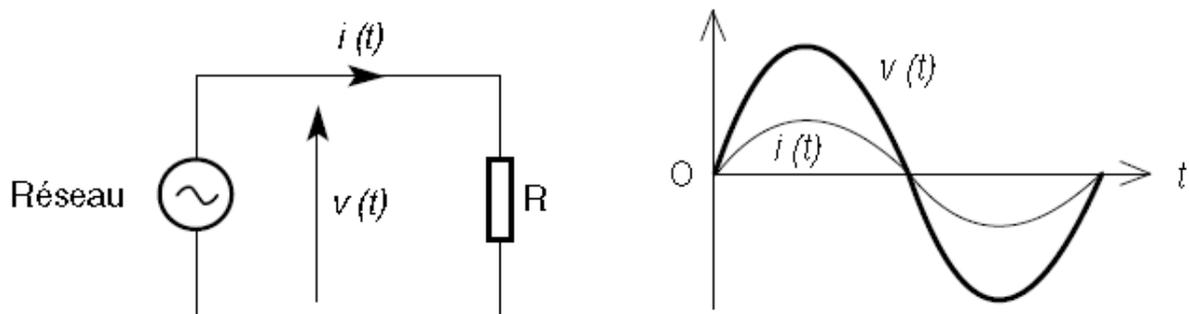


Figure.I.1 Signaux relatifs à une charge linéaire.

La puissance absorbée correspond aux deux grandeurs électriques que sont la tension et le courant. Lorsqu'on observe un décalage de l'un par rapport à l'autre sur l'axe des temps, on dit que les deux signaux sont déphasés. Ce déphasage fait référence au facteur de puissance défini comme suit :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (\text{I.1})$$

Sachant que S est la puissance apparente donnée par :

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

P est la puissance active et Q la puissance réactive.

Le facteur de puissance peut être unitaire (dans le cas d'une charge purement résistive) ou inférieure à 1 (dans le cas d'une charge inductive), alors la notion de charge linéaire :

- devient valable pour des charges comprenant non seulement des éléments résistifs, mais aussi des composants passifs tels que les inductances ou les condensateurs.
- conserve la proportionnalité entre la tension et le courant.

I.3.2 Les charges non linéaires

La charge dite non linéaire correspond à un type de charge composée d'éléments semi-conducteurs, constituants essentiels des dispositifs de l'électronique.

Aussi, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale, absorbe un courant déformé. Il n'y a donc plus de proportionnalité entre la tension et le courant (Figure I.2).

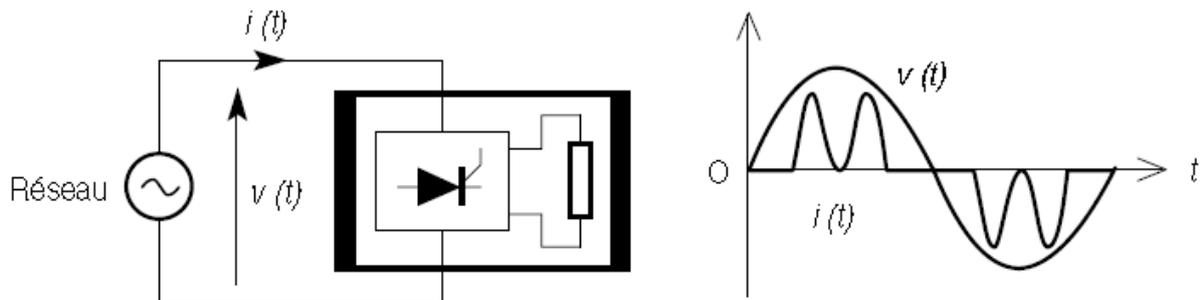


Figure.I.2 Signaux relatifs à une charge non linéaire.

On peut citer, dès à présent, quelques exemples d'équipements responsables de la déformation des signaux :

- les convertisseurs de l'électronique de puissance
- les machines à souder, fours à arc
- la généralisation des alimentations à découpage dans l'informatique des secteurs tertiaire et industriel aussi bien que dans les appareils électroménagers
- tous les équipements comportant des dispositifs à semi-conducteurs.

La notion de $\cos \varphi$ n'est plus applicable dans le cas de signaux déformés. On parle alors de facteur de puissance FP donné par la relation suivante :

$$FP = \frac{P}{S} \quad (\text{I.3})$$

En développant cette notion de facteur de puissance, on voit apparaître un nouveau terme D dans l'expression de la puissance apparente, matérialisant la puissance déformante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.4})$$

Cette puissance déformante D traduit les effets de la déformation des signaux sur l'installation considérée. La dégradation de la valeur du facteur de puissance est donc augmentée, sur ce type d'installation, comparativement à une installation ne comportant que des charges linéaires [5].

I.4 Dégradation de la qualité de l'énergie électrique et les phénomènes perturbateurs

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

- **L'amplitude** : c'est généralement la première exigence imposée au distributeur d'énergie. Selon les normes [11], en conditions normales d'exploitation, la tension ne peut s'écarter de ± 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, [11,12].

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, [7].

I.5. 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.

1.5.1 Les creux de tension et les coupures brèves

Les creux de tension et les coupures brèves sont parmi les problèmes majeurs qui affectent les systèmes d'énergie électrique, nous donnerons leurs définitions, leurs caractéristiques, leurs origines et leurs effets.

1.5.1.1 Définition et caractéristiques

A/ Creux de tension

Un creux de tension est une chute brutale de la tension à une valeur précise, suivie d'un rétablissement après un laps de temps.

Selon les normes CEI 61000-2-1 [12], CENELEC et EN 50 160 [11] la valeur de la tension lors d'un creux est comprise entre 90 (%) et 1 (%) ; ou 90 (%) et 10 (%) selon la norme IEEE 1159 pendant un temps allant d'une demi-période du fondamentale du réseau à une minute.

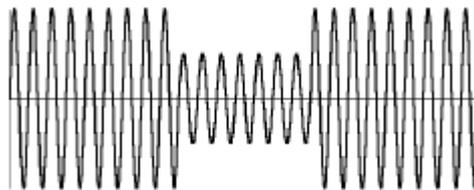


Figure I.3 : creux de tension.

Généralement on caractérise un creux de tension par le calcul de la valeur efficace du signal (rms : pour root mean square) sur une période du fondamental toutes les demi-périodes $\ll \text{rms}(1/2) \gg$; alors un creux de tension est caractérisé par :

- Son amplitude U : l'amplitude d'un creux de tension est la valeur de la tension durant le creux.
- Sa profondeur ΔU : la profondeur d'un creux de tension est la différence entre la valeur efficace de l'amplitude du creux et celle de la tension de référence U_{ref} . On parle de creux de tension à $X\%$ si la valeur efficace (1/2) passe en dessous de $X\%$ de la valeur de référence U_{ref} .
- Sa durée Δt : la durée d'un creux de tension est l'intervalle de temps précité.

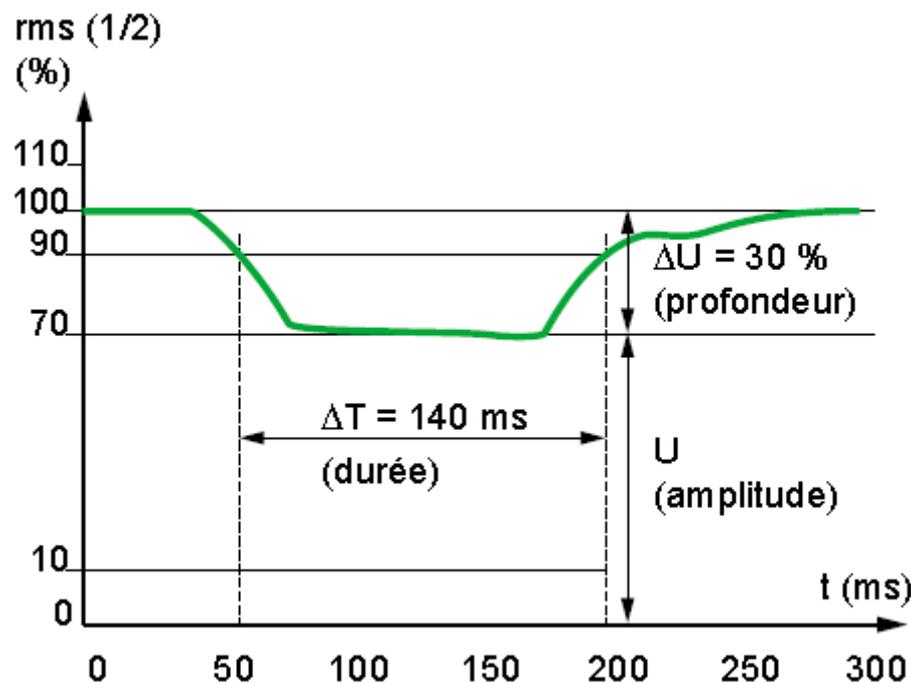


Figure.I.4 : Caractéristique d'un creux de tension

La tension nominale est considérée comme une tension de référence pour les réseaux basse tension. Pour le réseau haute et moyenne tension, une tension de référence dite glissante égale à la tension avant la perturbation est utilisée. On prend, de manière générale, comme tension de référence, la tension contractuelle que le distributeur s'engage à fournir. Sa valeur est fixée en fonction des conditions du contrat de fourniture. De ce fait, elle peut être égale ou différente de la tension nominale. Le rapport de la profondeur d'un creux de tension à la tension de référence est compris entre 90 (%) et 1 (%) selon les normes CEI 61000-2-1 et EN 50 160. La durée d'un creux de tension est comprise entre 10 ms et 1 s, [3].

B/ Les coupures brèves

Les coupures brèves sont un cas particulier de creux de tension de profondeur supérieure à 90 (%) selon IEEE et 99 (%) selon la CEI et CENELEC. Une coupure brève est caractérisée seulement par sa durée Δt ; celle-ci doit être inférieure à 3 minutes selon CENELEC et une minute selon IEEE et la CEI, [3,11,12].

Les creux de tension sont qualifiés selon leur durée :

- instantané (instantaneous) : $(\frac{T}{2} < \Delta t < 30T)$.

- momentané (momentary) : ($30T < \Delta t < 3s$).
- temporaire (temporary) : ($3s < \Delta t < 1 \text{ min}$).
- maintenue (sustained interruption) et sous-tension (undervoltage) : ($\Delta t > 1 \text{ min}$).

Si une coupure dépasse la durée de 3 minutes; elle devient longue et on ne parle plus de la qualité de tension, mais de sa continuité ; et si elle est inférieure à une demi-période fondamentale $\Delta t < T/2$, on la considère comme un phénomène transitoire.

I.5.1.2 Origines des creux de tension et les coupures brèves

Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation. Parmi ces causes on distingue :

- L'exploitation des réseaux HT, MT et BT

La mise en service ou l'arrêt d'appareils de puissance importante par rapport à la puissance de court-circuit comme les moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder, la mise sous tension des transformateurs de grande puissance et les chaudières font appel à des courants très importants, ce qui cause des chutes de tension. Les moteurs asynchrones au démarrage ont des courants de 5 à 7 fois le courant nominal. Cette brève surintensité produit une chute de tension décroissante. Ces creux durent entre quelques secondes et quelques dizaines de secondes, en fonction de la constante mécanique de la machine. La mise sous tension de gros transformateurs provoque des creux de tension évolutifs dus aux courants d'enclenchement. Le Tableau I.1 donne, à titre d'exemple, le courant de mise sous tension des transformateurs MT/BT. Il en est de même lors de la mise sous tension des condensateurs MT. Pour ces derniers le courant d'appel peut atteindre 5 fois le courant nominal (selon CEI 831-1) et jusqu'à 8 le courant nominal pendant plusieurs dizaines de secondes.

S (kVA)	$ne = \frac{I_{enc.crête}}{I_{Ntransformateur}}$	Constante de temps (s)
50	15	0.1
100	14	0.15
160	12	0.2
250	12	0.22
400	12	0.25
630	11	0.3
800	10	0.3
1000	10	0.35
1250	9	0.35
1600	9	0.4
2000	8	0.45

Tableau I.1 : Valeurs des courants d'enclenchement et constante de temps des transformateurs MT/BT

- Défauts sur les réseaux électriques

Des phénomènes, tels que défaut d'isolement du matériel, coup de foudre, blessure d'un câble souterrain, provoquent des courts-circuits qui génèrent des creux de tension pour tous les utilisateurs. La durée d'un creux est en général conditionnée par les temporisations de fonctionnement des organes de protection. L'isolement des défauts par les dispositifs de protections (disjoncteurs, fusibles) provoque des coupures (brèves ou longues) pour les utilisateurs alimentés par la section en défaut du réseau.

Les coupures brèves sont souvent le résultat du fonctionnement des automatismes de réseau tels que les enclenchements rapides et/ou lents, les permutations de transformateurs ou de lignes. Les coupures longues sont le résultat de l'isolement définitif d'un défaut permanent par les dispositifs de protection ou de l'ouverture volontaire ou intempestive d'un appareil. Les coupures transitoires ($\Delta t < T/2$) sont causées, par exemple, par la mise sous tension de condensateurs ou l'isolement d'un défaut par un fusible ou par un disjoncteur rapide BT, ou encore par les encoches de la forme d'onde de commutation des convertisseurs polyphasés, [3].

I.5.1.3 Effet des creux de tension et coupures brèves

Les creux de tension et coupures brèves peuvent perturber les installations raccordées aux réseaux et provoquer des dysfonctionnements.

- *Moteur asynchrone*

Pour les moteurs asynchrones, un creux de tension pose également un problème de stabilité, qui se traduit par un problème d'équilibre de couples (couple moteur = couple résistant).

- ralentissement du moteur,
- décrochage de moteur,
- déclenchements des protections générales de l'installation.

- *Moteur synchrone*

Les creux de tension affectent le synchronisme des moteurs synchrones, et causent le décrochage et l'arrêt de moteur.

- *Système à base d'électronique de puissance*

Les creux de tension peuvent causer l'arrêt ou même la destruction du dispositif, on cite :

- Le variateur de vitesse pour une machine à courant continu dont les protections sont détruites en mode onduleur et provoque le ralentissement de la machine en mode redresseur.
- Une insuffisance de tension au niveau du variateur de vitesse d'un moteur asynchrone cause des pertes du couple, le ralentissement de la vitesse ainsi qu'un décrochage. Une surintensité due au rétablissement de la tension cause la destruction éventuelle du matériel au niveau de convertisseur.

- *Éclairage*

- vieillissement des lampes à incandescence et des tubes fluorescents.
- extinction des lampes à décharge, [3,7].

Le Tableau I.2 suivant présente les différents effets des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles.

Types d'appareils	Conséquences néfastes
Éclairage	Moins de luminosité, extinction et rallumage.
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt des dispositifs.
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour une machine à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> • en mode onduleur : destruction des protections • en mode redresseur ralentissement de la machine
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

Tableau.I.2 Effets des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles.

I.5.2 Les surtensions

I.5.2 .1 Définition

Les surtensions sont des perturbations affectant l'amplitude de la tension, Fig.I.5. Elles sont définies comme toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification. Selon la norme EN50160 [11], les niveaux de surtensions sont donnés par les schémas de liaison à la terre de l'installation.

- Pour les réseaux à neutre à la terre, raccordés directement ou avec une impédance, la surtension ne devra pas dépasser $1,7 U_n$.
- Pour les réseaux à neutre isolé ou résonant, la surtension ne devra pas dépasser $2U_n$, [3].

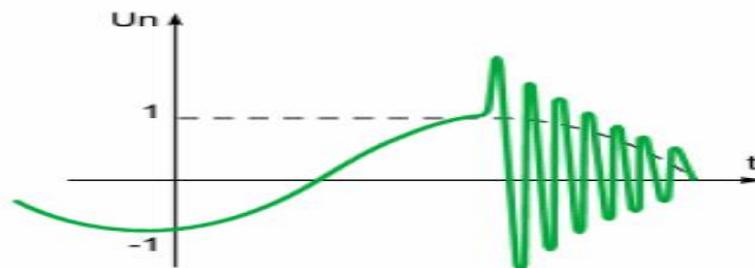


Figure.I.5 surtension transitoire

I.5.2 .2 Caractéristiques des surtensions transitoires

Les surtensions sont généralement caractérisées par :

- Le coefficient de surtension est le rapport de l'amplitude crête de la tension atteinte à la valeur efficace de la tension,
- La forme de l'onde,
- La durée : On distingue selon leurs durées, trois types de surtensions :
 1. Surtension permanente de forme sinusoïdale (à fréquence industrielle), de longue durée (supérieure à 1 heure),
 2. Surtension temporaire de forme sinusoïdale (autour de la fréquence industrielle), d'une durée relativement longue (comprise entre 1,5 fois la période industrielle et 1 heure),
 3. Surtension transitoire de forme oscillatoire ou non et généralement vite amortie, de courte durée (inférieure à la période industrielle). Cette catégorie regroupe les surtensions à front lent (type choc de manœuvre), à front rapide (type choc de foudre), à front très rapide.

Bien que les surtensions soient variées et aléatoires, l'estimation de ces paramètres peut se faire par une approche statistique. La sensibilité des réseaux électriques aux surtensions est liée à leurs topologies, au niveau de tension, au type de matériel et au mode d'exploitation, [4].

I.5.2.3. Origines des surtensions transitoires

Il y a trois natures de surtension :

- Temporaires à fréquence industrielle.
- De manœuvre.
- D'origine atmosphérique (transitoire).

Elles se manifestent selon deux modes :

1. En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre).
2. En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

1- Les surtensions temporaires à fréquence industrielle

Elles sont définies comme une augmentation de la valeur efficace de la tension, d'une phase ou plusieurs, à une valeur supérieure à 110 % de la tension nominale sur une durée allant de 3 secondes à 1 minute. Ces surtensions sont à la même fréquence que celle du réseau. Elles ont plusieurs origines dont :

La surtension due à un défaut d'isolement : Ce défaut apparaît sur un réseau triphasé lorsque le neutre est isolé ou impédant. Lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la masse ou la terre, ou comme blessure d'un câble souterrain, ou une mise à la terre d'un conducteur aérien par des branchages, ou un défaut dans un équipement. La phase concernée par le défaut est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumises, par rapport à la terre, à la tension composée $U = \sqrt{3}.V$, [14].

Un facteur de défaut à la terre S_d est défini comme le rapport de la tension des phases saines par rapport à la terre, à la tension simple du réseau. Il est donné comme suit,[13] :

$$S_d = \frac{\sqrt{3(k^2 + k + 1)}}{k + 2} \quad \text{Avec} \quad k = \frac{X_0}{X_d} \quad (\text{I.5})$$

X_d Étant la réactance directe du réseau vu du point de défaut, et X_0 la réactance homopolaire.

Il est à noter que :

- si le neutre est parfaitement isolé, soit $X_0 = \infty \Rightarrow S_d = \sqrt{3}$.
- si la mise à la terre du neutre est parfaite, soit $X_0 = X_d \Rightarrow S_d = 1$.
- si comme dans le cas général, soit $X_0 \leq 3X_d \Rightarrow S_d \leq 1.25$.

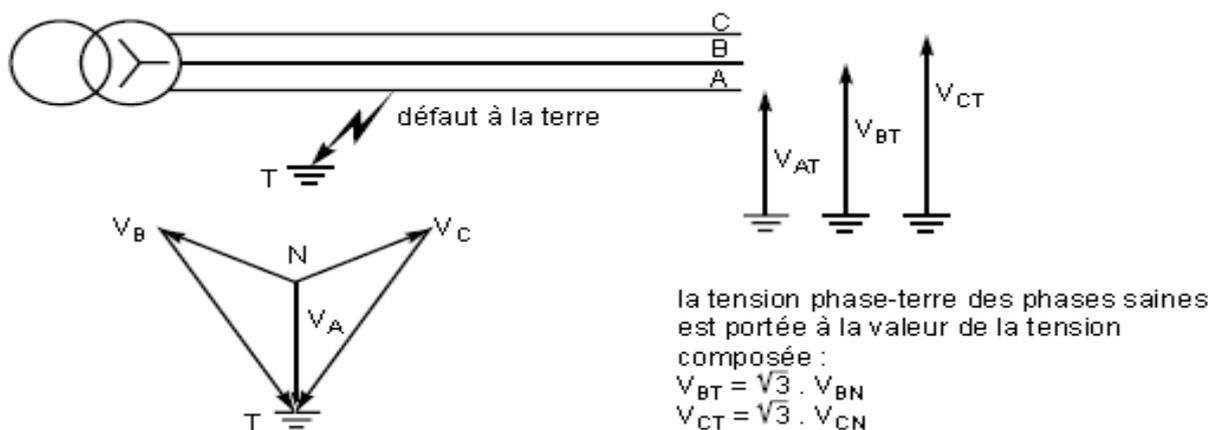


Figure.I.6 : surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement.

La ferrorésonance : Lorsqu'une ligne longue non chargée est alimentée, un phénomène de résonance se manifeste par une onde de tension à croissance linéaire le long de la ligne et provoque une surtension. Le facteur de surtension dans ce cas est donné par le rapport de la tension à l'extrémité ouverte, à la tension à l'entrée de la ligne, et il est défini comme suit :

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - \frac{LC\omega^2}{2}} \quad (\text{I.6})$$

Avec U_s et U_e étant les tensions à l'extrémité ouverte et à l'entrée de la ligne, et L et C désignant respectivement l'inductance et la capacité totale de la ligne, [17].

Les surtensions par ferrorésonance se produisent lorsqu'un circuit comporte à la fois un condensateur C et une self L avec un circuit magnétique saturable. La Figure I.7 illustre le phénomène de la ferrorésonance.

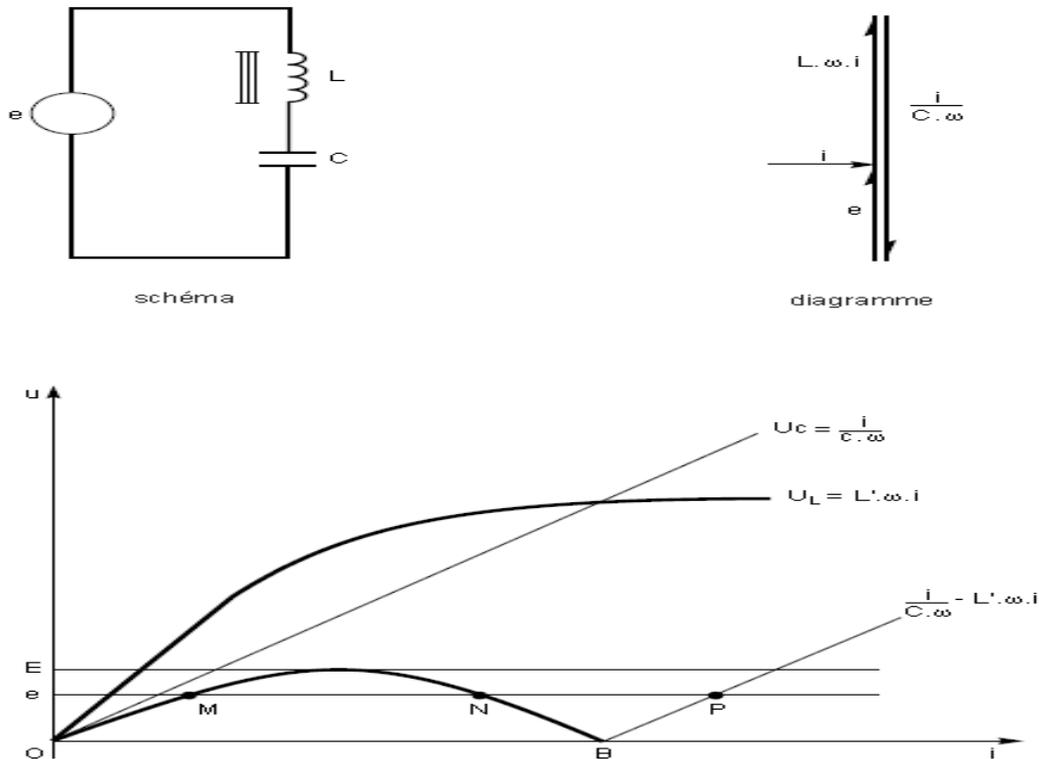


Figure.I.7 principe de la Ferrorésonance.

Le circuit de la Figure I.7 permet de tracer les tensions $U_C = f(i)$, $U_L = f(i)$, $U_C = f(i)$, $U_L - \frac{1}{C.\omega.i} = f(i)$.

- la première est une droite de pente $\frac{1}{C.\omega}$.
- la seconde présente un coude de saturation.
- la troisième permet de visualiser deux points de fonctionnement (O et B) pour lesquels la tension aux bornes de l'ensemble LC est nulle et deux autres points de fonctionnement stables M et P (N est un point d'équilibre instable). Les tensions aux bornes de L et C de point P sont élevées. Le passage de M vers P peut n'être dû qu'à un transitoire qui augmente momentanément la tension e à une valeur supérieure à E.

La surcompensation de l'énergie réactive : Les condensateurs shunt produisent une augmentation de la tension depuis la source jusqu'au point où ils se trouvent. Cette tension est particulièrement élevée en période de faibles charges.

La rupture du conducteur de neutre : Les appareils alimentés par la phase la moins chargée voient leur tension augmenter parfois jusqu'à la tension composée, [15].

2- Les surtensions de manœuvres

Ce type de phénomène apparaît sur des réseaux électriques subissant des modifications rapides de leur structure (ouverture d'appareils de protection, fermeture et ouverture d'appareils de commande). Les surtensions engendrées se propagent généralement sous forme d'ondes haute fréquence à amortissement rapide. À titre d'exemple on peut citer :

- Surtension de commutation en charge normale. Une charge dite normale est essentiellement résistive, c'est-à-dire que son facteur de puissance est supérieur à 0,7. Dans ce cas, la coupure ou l'établissement des courants de charge ne posent pas de problème majeur. Le coefficient de surtension (rapport de l'amplitude de la tension transitoire et de la tension de service) varie entre 1,2 et 1,5.
- Les surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs. Ce sont des impulsions de forte amplitude et de temps de montée très faible. Elles sont dues à l'établissement ou à l'interruption de petits courants inductifs, par exemple, un interrupteur commandant un moteur électrique, un transformateur BT/BT, un contacteur, voire un simple relais, génère une surtension de mode différentiel dont l'amplitude peut dépasser 1000 V avec des fronts de montée de quelques microsecondes.
- Les surtensions de manœuvre par commutation de courants inductifs peuvent également provenir de la MT.
- Les surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs. La nature des réseaux électriques est inductive. La présence des capacités (batteries de condensateurs ou tout simplement lignes à vide) constitue un circuit LC résonant. Les manœuvres provoquent alors des surtensions de type oscillatoire, elles peuvent avoir un facteur de surtension qui peut atteindre trois.
- Surtensions provoquées par l'interruption d'un fort courant par un organe de coupure. L'interruption d'un courant de court-circuit génère des surtensions si la coupure est très rapide et sans consommation d'énergie par l'arc. Elles peuvent être importantes lors de la fusion de certains fusibles ou la rupture de courant qui accompagne la soudure à l'arc, [14].

L'étude statistique des surtensions de manœuvre a conduit à la normalisation des ondes présentées par la Figure.I.8.

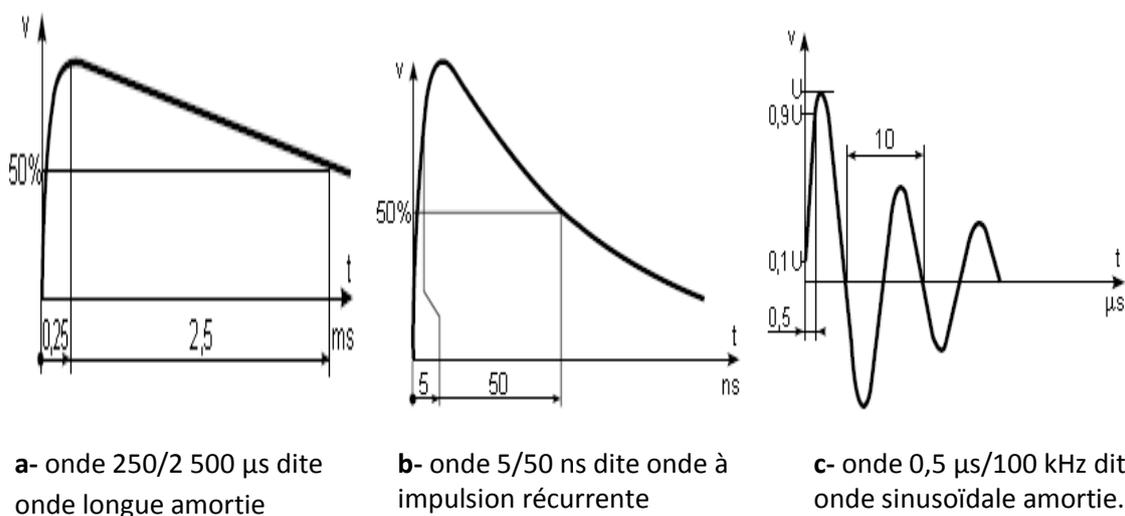


Figure.I.8 Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre.

3- Les surtensions atmosphériques

Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique. La foudre est un phénomène naturel qui apparaît en cas d'orage, lorsqu'elle tombe sur une structure le courant de foudre génère une surtension impulsionnelle.

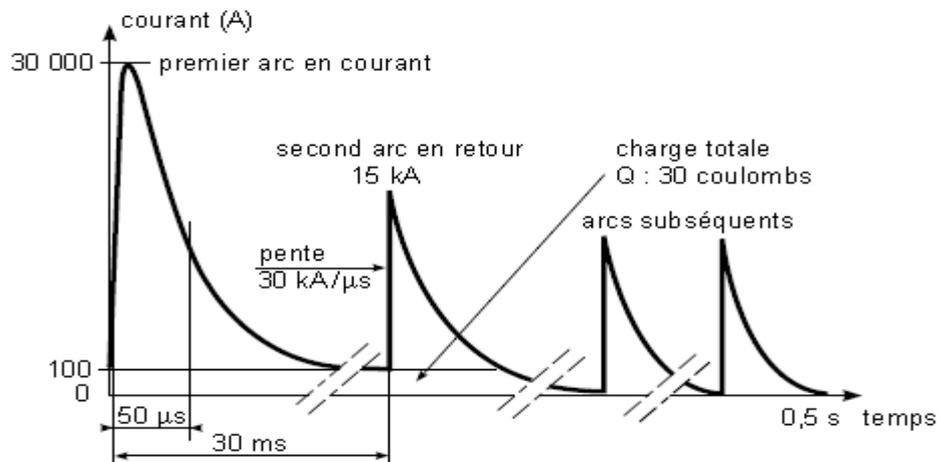


Figure.I.9 : forme du courant de foudre nuage-sol négatif

Les effets des coups de foudre font l'objet de deux approches ; lorsque l'élément étudié est celui qui reçoit la foudre, c'est le cas du coup de foudre direct, et lorsque l'élément étudié ne subit que des effets, c'est le coup de foudre indirect.

- Le coup de foudre direct atteint directement les installations électriques, son énergie est importante puisque 50 (%) des coups de foudre dépassent 25 kA crête et 1 (%) dépassent les 180 kA. La raideur de ces décharges peut atteindre 100 kV/μs.
- Le coup de foudre indirect qui est la manifestation à distance d'un coup de foudre direct selon trois aspects : les surtensions conduites, le rayonnement et l'élévation du potentiel de terre, [15].

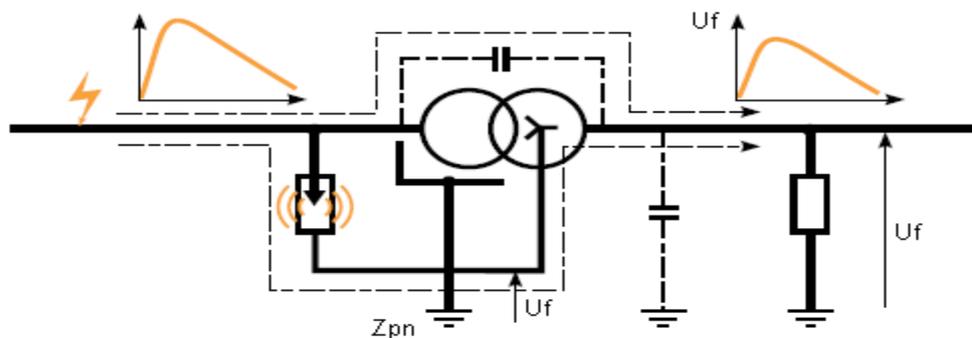


Figure I.10 Transmission d'une surtension de foudre de la MT vers la BT créée par le couplage capacitif des enroulements du transformateur.

On résumera au **Tableau I.3** les caractéristiques des différents types de surtensions :

type de surtension (cause)	coefficient de surtension	durée	raideur de front fréquence	amortissement
fréquence industrielle	$\leq\sqrt{3}$	longue >1 s	fréquence industrielle	faible
de manœuvre	2 à 4	courte 1 ms	moyenne 1 à 200 kHz	moyen
atmosphérique	>4	très courte 1 à 10 μ s	très élevée 1000 Kv/ μ s	fort

Tableau I.3 Caractéristiques des différents types de surtensions.

I.5.2.4. Effet des surtensions

Les effets des surtensions entraînent des pertes économiques par le remplacement des éléments endommagés, ainsi que le coût indirect de l'interruption des processus de production. De plus, ces effets peuvent entraîner un risque pour les personnes. Ils sont très divers et varient selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode, la raideur du front de montée et la fréquence de l'onde de tension. On distingue :

- Le claquage provoque la destruction diélectrique des équipements, et conduit à des pertes économiques dues à des coupures longues et le changement des équipements électriques.
- Le vieillissement prématuré de matériel causé généralement par les surtensions non destructibles comme les claquages successifs des huiles des transformateurs, les surtensions de manœuvre et les foudres répétitives, et la circulation des surtensions de foudre sur les lignes causant l'amorçage des isolateurs.
- L'arrêt ou le démarrage incontrôlé dû à des perturbations des circuits de contrôle et de communication à courant faible, [15].

I.5.3. Fluctuation de tension et Flicker

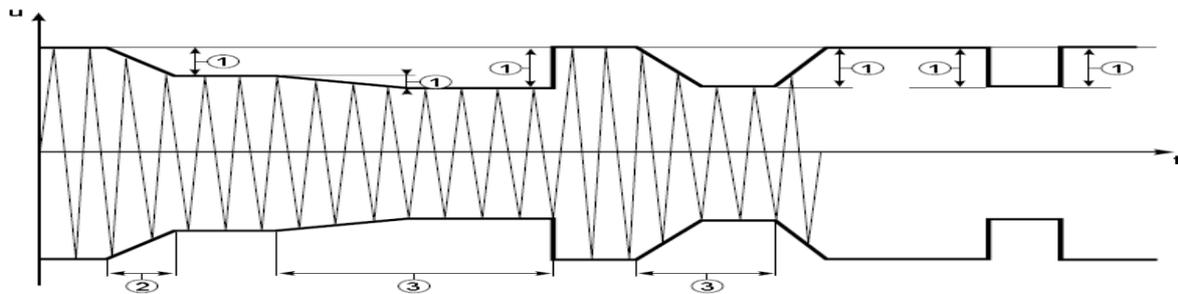
I.5.3.1. Définition

La variation du flux lumineux ou papillotement est souvent nommée Flicker. Selon la norme CEI 555-1, il est défini comme une impression subjective de fluctuation de la luminance. Il est aussi défini comme un phénomène de gêne physiologique visuelle ressenti par les utilisateurs de lampes alimentées par une source commune à l'éclairage et à une charge perturbatrice. Les fluctuations de tension sont une suite de variations rapides de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe de la tension qui ne dépasse pas 10 % de la tension nominale, [3].

I.5.3.2 Caractéristiques des fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont caractérisées selon la CEI 555-3, par :

- L'amplitude de la variation de tension (ΔU).
- La durée de la variation de tension.
- L'intervalle entre deux variations.



- (1) variation de tension (ΔU), ici au nombre de sept ; (2) durée de la variation de tension ;
 (3) intervalle entre deux variations.

Figure.I.11 fluctuation de la tension et ses caractéristiques

I.5.3.3. Origines du Flicker et des fluctuations de tension

Le Flicker résulte surtout des fluctuations rapides de faible amplitude de la tension d'alimentation provoquée soit par :

- 1- La variation fluctuante de puissance appelée par divers récepteurs : fours à arc, soudeuses, moteurs.
- 2- La mise sous et hors tension de charges importantes : démarrage des gros moteurs, manœuvre de batteries de condensateurs en gradins.
- 3- Le dysfonctionnement d'un système d'éclairage.
- 4- Présence d'infra-harmoniques ou d'inter-harmoniques, [16].

I.5.3.4. Description des fluctuations de tension à l'origine du Flicker

Les fluctuations brusques de la tension du réseau sont à l'origine de ce phénomène (ou Flicker). Elles se situent dans une plage de variation de ± 10 (%) de la tension nominale et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes; elles peuvent être :

- Des variations périodiques ou erratiques permanentes qui ont une décomposition spectrale dans une bande de 0,5 Hz à 25 Hz. Elles sont dues à des charges (ou ensemble de charges) dont l'utilisation se caractérise par une variation permanente d'appel de puissance.
- Ou des variations de tension par à-coups qui se produisent de façon systématique ou erratique. Ces variations sont dues à des mises en service de charges importantes.

I.5.3.5. Expressions mathématiques traduisant l'origine du Flicker

Les sources des fluctuations sont les équipements électriques dont le fonctionnement nécessite d'importantes variations cycliques de courant, qui, en parcourant l'impédance du réseau (R, X) provoquent les variations de tension ΔU . (Figure.I.12)

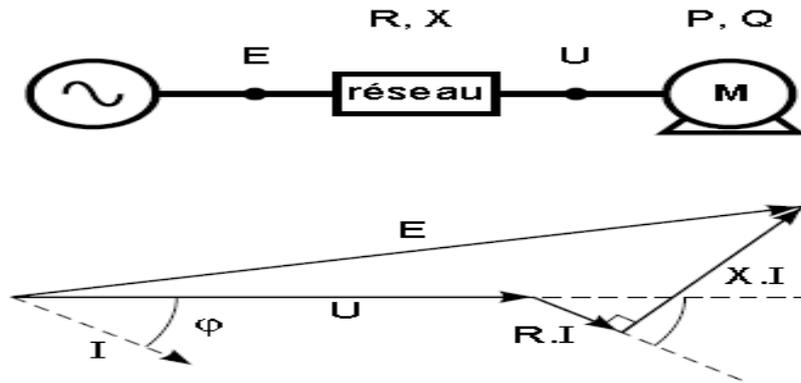


Figure I.12 Origine des fluctuations de tension.

On définit :

U : Tension nominale du réseau (de fonctionnement).

E : Tension à vide du réseau.

ΔU : Chute de tension ($\Delta U = E - U$).

P : Puissance active de la charge sous la tension nominale U .

Q : Puissance réactive de la charge sous la tension nominale U .

$\cos \varphi$: Facteur de puissance de la charge.

I : Courant nominal de la charge.

S_{cc} : Puissance apparente de court-circuit en amont de la charge.

R : Résistance totale du circuit amont de la charge.

X : Réactance totale du circuit amont de la charge.

Si on considère que l'angle entre U et E est faible :

$$\Delta U = E - U \approx R.I. \cos \varphi + X.I. \sin \varphi \quad (\text{I.7})$$

On peut écrire :

$$P = U.I. \cos \varphi \quad \text{Et} \quad Q = U.I. \sin \varphi \quad (\text{I.8})$$

Ce qui donne :

$$\Delta U = \frac{R.P + X.Q}{U} \quad (\text{I.9})$$

En valeur relative :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P + X.Q}{U^2} \quad (\text{I.10})$$

En HT, c'est la variation de la puissance réactive qui est prépondérante, car R est négligeable, alors elle doit être contrôlée ; en BT on doit contrôler les deux puissances, à savoir : active et réactive.

Les charges perturbatrices : Ce sont des charges dont le fonctionnement nécessite d'importantes variations cycliques de courant. On distingue :

- Les fours à arc.
- Machines à charges fluctuantes.
- Régulateurs de puissance à thyristors.
- Machines à souder, [16].

I.5.3.6 Effet de Flicker

Les fluctuations de tension n'ont généralement pas d'influence sur le bon fonctionnement des appareils connectés, la variation étant inférieure aux limites contractuelles de variation de tension d'alimentation. Par contre, ces fluctuations peuvent, pour différents types d'éclairage, affecter le flux lumineux.

I.5.4 Déséquilibre

Nous étudierons le déséquilibre en tension, à savoir : sa caractérisation, son origine et son impact sur les équipements électriques

I.5.4.1 Définition

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de 120° .

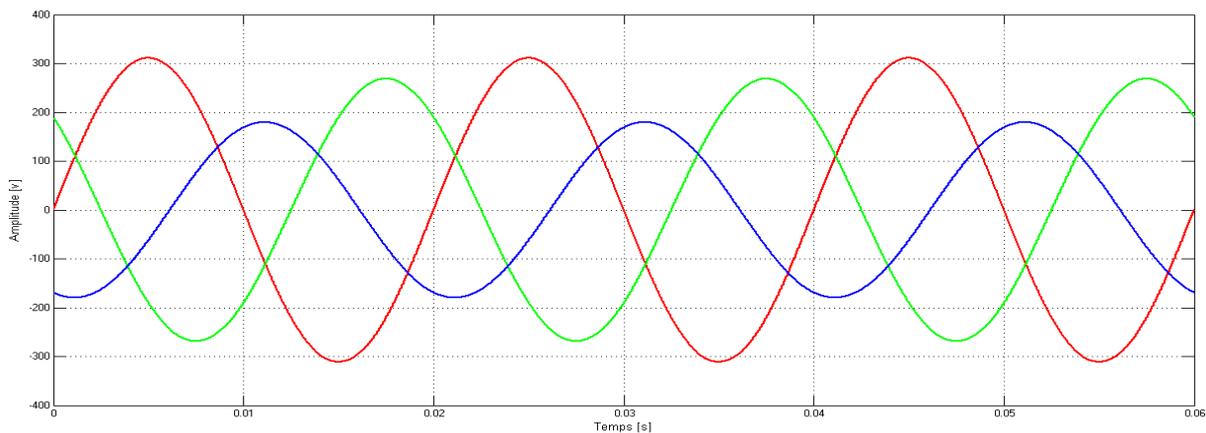


Figure I.13 Déséquilibre du système triphasé de la tension

Ces déséquilibres en tension engendrent des composantes inverses du courant (Figure I.14) qui provoquent principalement le dysfonctionnement des appareils électriques. Par exemple l'apparition des couples de freinage parasites et l'échauffement des moteurs à courant alternatif, [7].

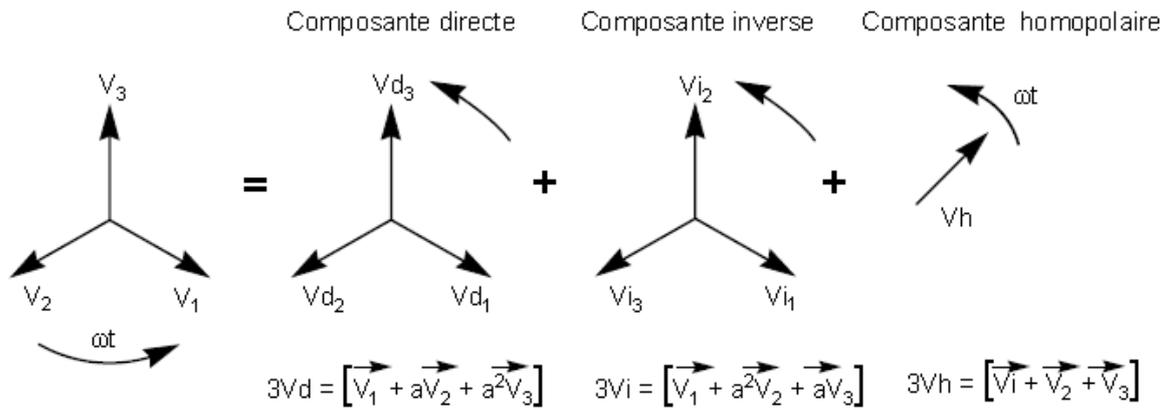


Figure.I.14 Rappel des différentes composantes ; directe, inverse et homopolaire du système triphasé.

I.5.4. 2 Caractérisation du déséquilibre de la tension

Le déséquilibre de la tension est caractérisé par son taux ou degré de déséquilibre. Il est défini par la méthode des composantes de Fortescue (**Figure I.14**) comme étant le rapport de la composante inverse U_{i1} (ou homopolaire U_{h1}) du fondamental à celui de la composante directe U_{d1} du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{i1}|}{|U_{d1}|} \quad \text{Et} \quad \Delta U_0 = \frac{|U_{01}|}{|U_{d1}|} \quad \text{(I.11)}$$

La formule approchée suivante peut aussi être utilisée : $\Delta U_i = \max_i \frac{V_i - V_{moy}}{V_{moy}}$.

Avec V_i la tension de la phase i et $V_{moy} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$.

Dans des conditions normales d’exploitation, pour chaque période d’une semaine, 95 (%) des valeurs efficaces calculées sur 10 minutes de la composante inverse de la tension d’alimentation doivent se situer entre 0 et 2 % de la composante directe, selon la norme EN 50160 [11].

I.5.4.3 Origines du déséquilibre de la tension

Les réseaux électriques sont généralement triphasés, ils alimentent des récepteurs triphasés, mais aussi beaucoup de récepteurs monophasés. Les courants absorbés sur les trois phases sont donc d’amplitude différente, d’où des déséquilibres de tension. Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu’au fonctionnement des protections.

I.5.4.4 Effet du déséquilibre de la tension

Le principal effet du déséquilibre est l'échauffement des enroulements des machines électriques tournantes. Le cas le plus grave du déséquilibre reste la coupure d'une phase, circonstance qui peut rapidement conduire à la destruction de la machine.

Les redresseurs polyphasés pour lesquels chacune des tensions d'alimentation participe à la sortie continue sont aussi sensibles à une alimentation déséquilibrée. Celle-ci provoque une ondulation inopportune de la tension continue et des harmoniques non caractéristiques du réseau.

I.5.5 Les harmoniques et les inter-harmoniques

Avec l'apport des charges non linéaires dans l'utilisation domestique et industrielle, les courants absorbés sont de forme non sinusoïdale. Ils sont composés d'un fondamental de fréquence de 50 Hz superposé à des harmoniques et des inter-harmoniques.

I.5.5.1 Les harmoniques

Nous présentons l'origine des harmoniques ainsi que leurs effets sur le réseau électrique.

I.5.5.1.1 Définition

Les harmoniques sont des tensions et des courants dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale de l'alimentation, généralement 50 Hz ou 60 Hz.

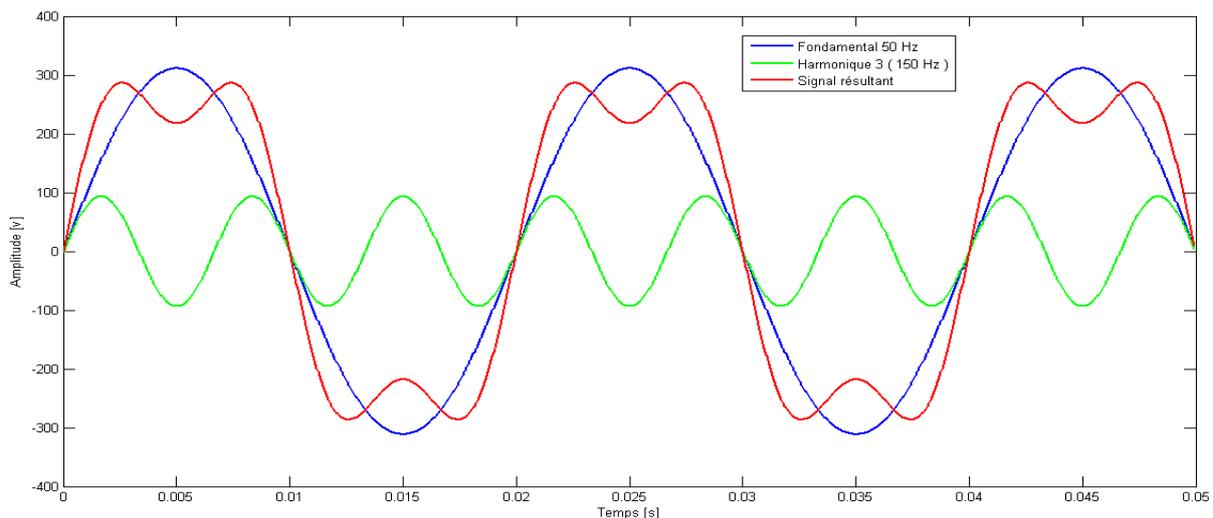


Figure.I.15 Déformations de l'onde du courant par l'harmonique 3.

I.5.5.1.2 Origines des harmoniques

À l'origine, ce sont les récepteurs non linéaires qui absorbent des courants déformés, sources de courants harmoniques. Ces derniers circulant dans les conducteurs et les appareils

électriques rencontrent donc des impédances propres à ces composants et par suite, engendrent des tensions harmoniques.

Les harmoniques sont produites dans de faibles proportions et avec de faibles niveaux de distorsion par les systèmes d'électricité. Ce sont les charges domestiques et industrielles qui provoquent la plus grande proportion des courants harmoniques avec des niveaux de distorsion relativement élevés.

- *Systèmes d'énergie électrique*

Cette catégorie engendre tous les appareils utilisés par les fournisseurs de l'électricité. On distingue les alternateurs, les transformateurs et récemment les compensateurs et les convertisseurs statiques.

- Les alternateurs : engendrent des tensions harmoniques de rang impair, dues aux irrégularités des champs tournants, au nombre d'encoches et au fonctionnement déséquilibré dont le taux de distorsion est faible.
- Les transformateurs engendrent des tensions harmoniques de rang impair en raison de la non linéarité des circuits magnétiques.

- *Charges industrielles*

Les convertisseurs statiques de puissance (redresseurs), les alimentations à découpage, les fours à induction et les fours à arc, engendrent des harmoniques avec un taux de distorsion notable, [3].

Les convertisseurs sont assimilés à des ensembles de sources de courants harmoniques de rang :

$$h = k.m \pm 1 \quad (\text{I.12})$$

Où

h : est le rang harmonique

k : est le nombre de bras du convertisseur

m : est un nombre entier (1, 2, 3, ...)

I.5.5.1.3 Effet des harmoniques

La circulation des courants harmoniques dans les réseaux électriques contribue :

- à l'augmentation des pertes par effet Joule dans les conducteurs électriques,
- à la diminution du facteur de puissance de l'installation, ce qui conduit à un surcoût au niveau de la facturation d'électricité,
- au vieillissement prématuré des équipements raccordés sur l'installation électrique en diminuant leur durée de vie.

Ces perturbations provoquées par les harmoniques se manifestent de deux façons sur les appareils et les équipements électriques :

- **Les effets instantanés** : dus à la déformation de l'onde et aux phénomènes de résonance. Ils concernent les déclenchements intempestifs de disjoncteurs et de relais d'automatisme, la destruction de matériels (condensateurs par exemple), la perturbation des dispositifs de régulation et également la dégradation du facteur de puissance de l'installation.
- **Les effets à long terme** : ils sont essentiellement de nature thermique et affectent alors la durée de vie des équipements concernés, [5].

Le Tableau.I.3 récapitulatif présente les effets produits sur certains équipements.

Équipements perturbés	Effets
Machines électriques tournantes	<ul style="list-style-type: none"> • Échauffements supplémentaires. • Couples pulsatoires entraînant une perte de stabilité mécanique des moteurs. • Augmentation du bruit.
Transformateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes supplémentaires. • Risques de saturation si l'harmonique est paire.
Câbles	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes ohmiques (notamment câble du neutre dans les réseaux triphasés). • Vieillesse prématuré de l'isolant (dû à l'effet Joule). • Pertes diélectriques supplémentaires. • Corrosion des câbles aluminium. • Effet de peau.
Micro-ordinateurs	<ul style="list-style-type: none"> • Dysfonctionnement.
Électronique industrielle	<ul style="list-style-type: none"> • Défauts de fonctionnement liés à la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Dispositifs de communication	<ul style="list-style-type: none"> • Interférences.
Dispositifs de télécommande Relais de protection Fusibles Disjoncteurs thermiques Disjoncteurs à maxima	<ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement et déclenchement intempestifs.
Condensateurs de puissance	<ul style="list-style-type: none"> • Échauffement, vieillissement.
Compteurs d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> • Erreurs de mesure

Tableau I.3 Effet de la pollution harmonique sur quelques équipements électriques [3].

1.5.5.2 Les inter-harmoniques

1.5.5.2.1 Définition

Les inter-harmoniques sont des tensions et des courants dont les fréquences sont des multiples non entiers de la fréquence fondamentale de l'alimentation.

La connaissance des perturbations électromagnétiques associées aux inter-harmoniques se développe et commence à avoir un intérêt certain pour le phénomène. Les inter-harmoniques ont toujours existé sur les réseaux électriques, mais ont pris, récemment, plus d'importance du fait de l'usage de plus en plus étendu des systèmes d'électroniques de puissance qui conduisent à une augmentation de leurs amplitudes.

Le terme "infra-harmonique" n'a pas de définition officielle ; il s'agit, en fait, d'un cas particulier d'inter-harmonique dont la fréquence est inférieure à la fréquence fondamentale, [5].

Le tableau I.4 donne certaines grandeurs qui caractérisent les inter-harmoniques.

FACTEURS	DÉFINITIONS
Le rang	$m = f_m / f_1$
Le taux de distorsion individuel	$\tau_m = Y_m / Y_1$
Contenu total de distorsion	$TDC = \sqrt{Y^2 - Y_1^2}$
Taux de distorsion total	$TDR = \frac{TDC}{Y_1}$
Distorsion totale inter-harmonique	$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^n Y_m^2}}{Y_1}$
Distorsion totale infra-harmonique	$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^s Y_m^2}}{Y_1}$
f_m : La fréquence de l'inter-harmonique	
f_1 : La fréquence du fondamental	
Y : Valeur efficace totale du courant ou de la tension	
Y_1 : Valeur efficace totale du fondamental	
Y_m : Valeur efficace totale de l'interharmonique m	
n : nombre total des inter-harmoniques prises en compte	
s : nombre total des infra-harmoniques prises en compte	

Tableau.I.4 Les grandeurs caractérisant les inter-harmoniques [5].

I.5.5.2.2 Origines des inter-harmoniques

Il existe deux mécanismes principaux qui peuvent conduire à la création d'inter-harmoniques :

Le premier est les variations rapides des courants absorbés par les équipements et les installations, et dont peuvent également résulter des fluctuations de tension. Les perturbations sont causées par les régimes transitoires des charges, ou, dans la plupart des cas, si l'on est en présence de modulation d'amplitude des courants ou des tensions. Ces perturbations sont, en général, aléatoires, liées aux modifications de charge liée aux processus et aux équipements utilisés.

Le second mécanisme consiste en la commutation asynchrone (c'est-à-dire, non synchronisée avec la fréquence) de composants semi-conducteurs dans les convertisseurs statiques. Les exemples usuels sont les cyclo-convertisseurs et les convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion (M.L.I). Les inter-harmoniques qu'ils génèrent sont situés n'importe où dans le spectre, mais directement en rapport avec les harmoniques de la tension d'alimentation, [5].

Les principales sources de perturbations sont :

- Charges à arc

Ce type de charges comprend les fours et les soudeuses. Les fours à arc ne produisent pas normalement d'interharmoniques significatives, sauf si elles sont amplifiées par le phénomène de résonance.

- Moteurs électriques

Les moteurs asynchrones peuvent être source d'interharmoniques du fait des dentures ménagées dans les tôles du stator et du rotor, en particulier s'il y a saturation du circuit magnétique.

- Les convertisseurs de fréquence statiques :

On distingue les cyclo-convertisseurs et les convertisseurs de modulation de largeur d'impulsion (M.L.I).

I.4.5.2.3 Effets des inter-harmoniques

Les courants inter-harmoniques sont à l'origine de distorsion inter-harmonique de tension déterminée par l'amplitude des composantes de courant et l'impédance de source amont du réseau aux fréquences considérées. Plus la gamme de fréquences des composantes de courant est importante, plus le risque d'apparition de phénomènes de résonances est élevé, avec un accroissement de la distorsion en tension. Parmi les effets les plus courants et directs des inter-harmoniques, il faut citer :

- les oscillations basse fréquence des systèmes mécaniques.
- les perturbations de l'éclairage fluorescent et des équipements électroniques.
- la saturation des transformateurs d'intensité.
- les interférences avec les signaux de contrôle et de protection sur les lignes d'alimentation de puissance.

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] NF EN 50160, Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution, Mai 2000.
- [12] IEC/TR3 61000-2-1, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems.
- [13] R. CALVAS, ‘‘ les perturbations électriques en BT’’, Cahier Technique de Schneider Electric CT 141, édition mai 2001, PP, 4 - 29.
- [14] D.FULCHIRON, ‘‘ surtension et coordination d’isolement’’, Cahier Technique de Schneider Electric CT 151, édition décembre 1992, PP, 3 - 7.
- [15] C. SÉRAUDIE, ‘‘ surtensions et parafoudres en BT-coordination de l’isolement en BT’’, Cahier Technique de Schneider Electric CT 179, édition septembre 1995.
- [16] R. WIERDA, ‘‘ Flicker ou scintillement des sources lumineuses, Cahier Technique de Schneider Electric CT 176, édition décembre 1995, PP, 3 - 13.
- [17] P. FERRACCI, ‘‘la Ferrorésonance, Cahier Technique de Schneider Electric CT 190, édition octobre 1997, PP, 5 - 32.

CHAPITRE II

MÉTHODES DE MESURES ET PARAMÈTRES REPRÉSENTATIFS DE LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

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 FPEM (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 :

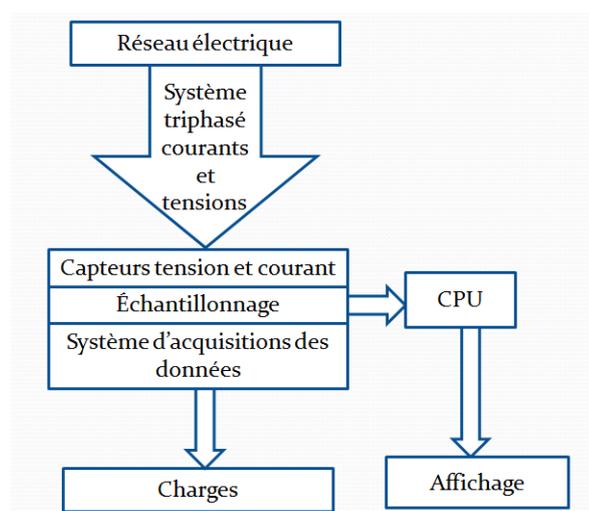


Figure II.1 : Système de mesure et d'analyse de la qualité de l'énergie électrique.

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.

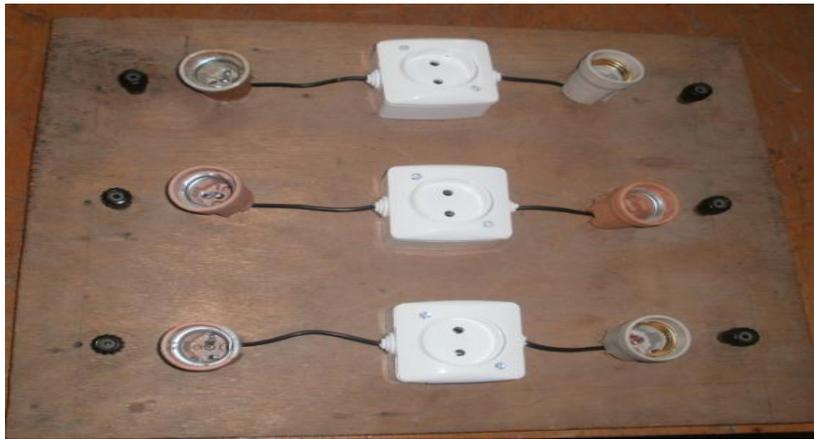


Figure II.2 : Vue maquette de charges.

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.

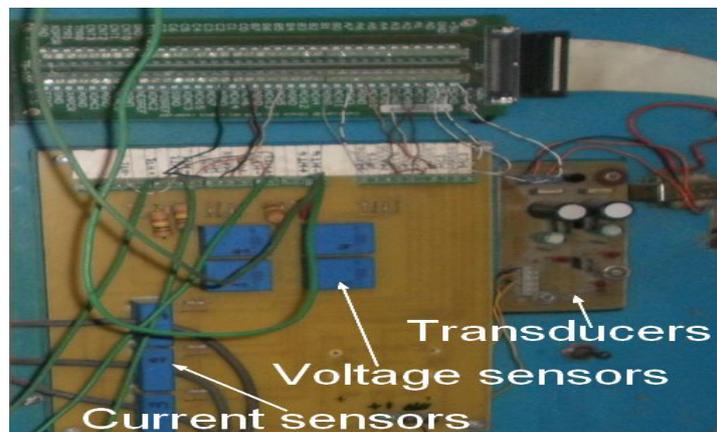


Figure II.3 : Vue des capteurs du courant, de la tension et les transducteurs.

II.2.3 La carte d'acquisition

L'outil d'acquisition que nous avons utilisé est la carte DaqBoard/1005 représentée à la Figure II.4. Cette carte d'acquisition permet de recueillir les 3 tensions et les 3 courants nécessaires à l'analyse.



Figure II.4 : Vue de la carte d'acquisition DaqBoard/1005.

La carte DaqBoard/1005 est une carte d'acquisition de données multifonction pour les ordinateurs à bus PCI. Elle dispose d'un convertisseur A/N à 16-bits, 200 kHz, un étalonnage numérique, le mastering du bus DMA, 24 lignes E/S numériques, quatre compteurs, et deux minuterie. Jusqu'à quatre panneaux peuvent être installés dans un PC.

Un connecteur 68 broches SCSI III connecté sur la carte donne accès à tous les signaux d'entrée et de sortie. La DaqBoard/1005 accueille toutes les E/S avec un câble et un connecteur PCI.

Le 68 connecteur pin E/S est logiquement divisé en trois fonctions :

- Entrée analogique pour les 16 sorties ou 8 entrées analogiques différentielles avec 7 gammes de logiciels bipolaires programmables ($\pm 10\text{ V}$ à $\pm 156\text{ mV}$ à la pleine échelle).
- 24 lignes numériques I/O.
- 4 compteurs entrés et 2 sorties minuterie.

Le balayage à l'aide du séquenceur permet de sélectionner jusqu'à 512 canaux/large combinaisons, le séquenceur balaie tous les canaux de l'analyse à $5\mu\text{s}/\text{chaîne}$ ou $10\text{ us}/\text{canal}$. Le schéma-bloc de la carte est représenté à la Figure II.5.

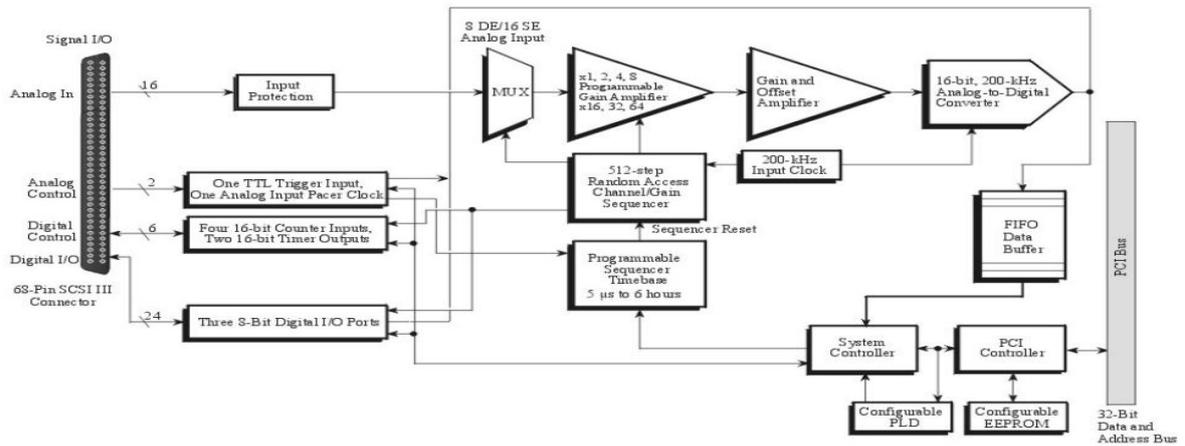


Figure II.5 : Diagramme block du fonctionnement de la DaqBoard/1005.

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 [2].

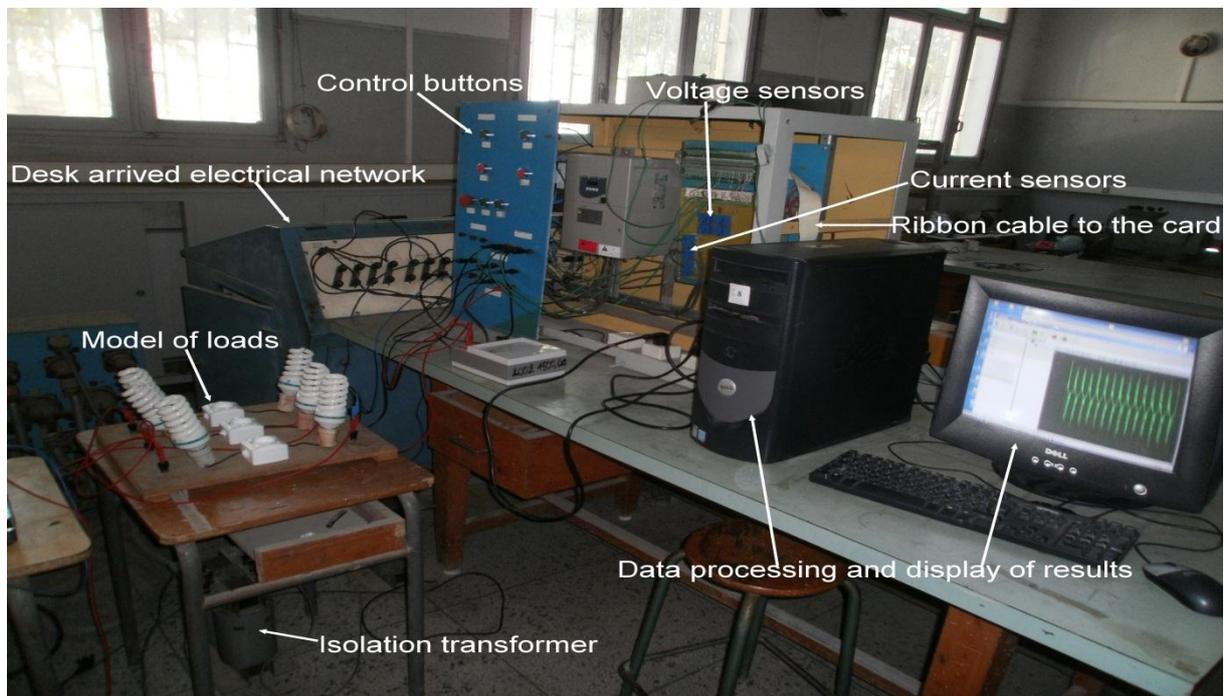


Figure II.6 : Vue générale de banc d’essai

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

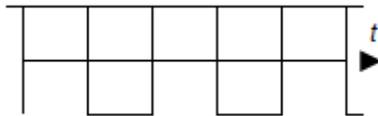
Dans le cas de notre étude, nous nous limiterons à la TFD et la méthode de la FPDM. Pour l'analyse de la qualité de l'énergie électrique, des paramètres doivent être calculés selon la norme IEEE Std.1459.2010, [1].

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 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.7 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 [3].



Rang harmonique	Fréquence [Hz]	Valeur d'amplitude relative
1	50	1.0
3	150	1/3
5	250	1/5
7	350	1/7
9	450	1/9
...
n	$50n$	$1/n$

Figure.II.7 : Onde rectangulaire comme une superposition du fondamental et des harmoniques impaire.

II.3.1.1 Décomposition d'une onde déformée

Comme chaque onde déformée peut être composée à partir des composantes harmoniques. Il en est de même pour toute onde périodique se décomposant en composantes harmoniques (Figure II.8). 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 [3]. 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 :

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

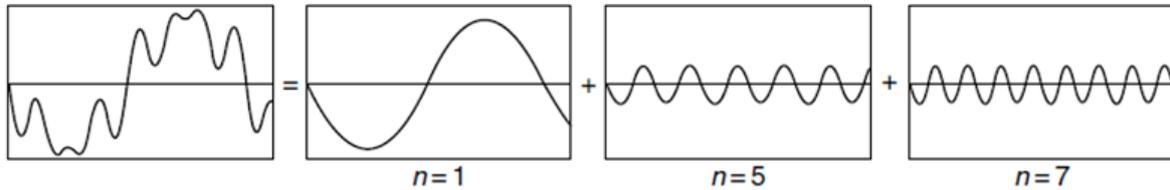


Figure II.8 : Décomposition d'une onde déformée en composante fondamentale ($n=1$) et en cinquième et septième harmonique.

Sachant que :

$f(t)$: est une onde périodique.

c_0 : est la composante continue, calculée comme dans l'équation (II.2).

a_m , b_m : sont les coefficients de la série, calculés comme dans l'équation (II.2).

n : est un nombre entier compris entre 1 et l'infini, et $T = 2\pi$ est la période.

$$\left\{ \begin{array}{l} c_0 = \frac{2}{T_\omega} \int_0^{T_\omega} f(t) dt \\ a_m = \frac{2}{T_\omega} \int_0^{T_\omega} f(t) \cos\left(\frac{m}{N}\omega_1 t + \varphi_m\right) dt \\ b_m = \frac{2}{T_\omega} \int_0^{T_\omega} f(t) \sin\left(\frac{m}{N}\omega_1 t + \varphi_m\right) dt \end{array} \right. \quad (\text{II.2})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \\ C_m = \frac{c_m}{\sqrt{2}} \\ \varphi_m = \arctg\left(\frac{a_m}{b_m}\right) \quad \text{si } b_m \geq 0 \\ \varphi_m = \arctg\left(\frac{a_m}{b_m}\right) + \pi \quad \text{si } b_m \leq 0 \end{array} \right. \quad (\text{II.3})$$

Sachant que :

ω_1 : est la pulsation du fondamental ($\omega_1 = 2\pi f_1$)

T_ω : est la largeur (ou la durée) de la fenêtre temporelle ($T_\omega = NT_1$ et $T_1 = 1/f_1$), sachant que la fenêtre temporelle est la période d'observation d'une fonction temporelle sur laquelle est appliquée la transformée de Fourier.

c_m : est l'amplitude de la composante de fréquence $f_m = mf_1/N$.

N : est le nombre de périodes du fondamental contenues dans la largeur de la fenêtre temporelle.

m : est le nombre ordinal (rang de la raie spectrale) relatif à la fréquence de base ($f_\omega = 1/T_\omega$).

Généralement, la série de Fourier est calculée numériquement, c'est-à-dire sous forme de *transformée de Fourier discrète* (TFD), dans ce cas le signal analogique $f(t)$ à analyser est échantillonné, converti en numérique, puis mémorisé. Chaque groupe de M échantillons forme une fenêtre temporelle sur laquelle la TFD est calculée. Suivant les principes du développement en série de Fourier, la largeur de la fenêtre T_ω détermine la résolution en fréquence ($f_\omega = 1/T_\omega$), (c'est-à-dire la séparation fréquentielle des raies spectrales) pour l'analyse, ainsi, la fréquence de base pour le résultat de la transformée. Par conséquent, il faut que la largeur de fenêtre T_ω soit un multiple entier N de la période du fondamental T_1 de la tension du réseau, c'est-à-dire $T_\omega = NT_1$. La fréquence d'échantillonnage dans ce cas est $f_s = M/NT$ (M : est le nombre d'échantillons dans T_ω).

Avant de réaliser la TFD, les échantillons dans la fenêtre temporelle T_ω sont souvent pondérés en étant multipliés par une fonction symétrique particulière (fonction fenêtre). Toutefois, pour les signaux périodiques et un échantillonnage synchrone, il est préférable d'utiliser une fenêtre de pondération rectangulaire qui multiplie chaque échantillon par un niveau unitaire. Le processus de la TFD donne les coefficients orthogonaux de Fourier, a_m et b_m , pour les fréquences harmoniques correspondantes $f_m = m/T_\omega$, $m = 0, 1, 2, \dots, 2i-1$. Toutefois, seules les valeurs de m inférieures ou égales à la moitié de la valeur maximale sont utiles, l'autre moitié ne faisant que les dupliquer.

Lorsque la synchronisation est suffisante, le rang n d'un harmonique relativement à la fréquence fondamentale f_1 est donné par $n = m/N$ [1.3].

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 [4,5]. 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.

II.3.2.1 Déséquilibre et FPDM

Pour l'évaluation du déséquilibre en utilisant la méthode (FPDM) d'un système d'alimentation, des premiers signaux électriques principalement tension et courant doivent être capturés. Les motifs sont à développer, l'utilisation de ces signaux et les caractéristiques principales du modèle sont extraites, ainsi le degré de déséquilibre est évalué [4-8]. Une puissance de bonne qualité se compose d'une tension et d'un courant équilibré sans harmoniques. Les tensions peuvent être représentées par le système d'équation suivante :

$$\begin{cases} v_R(t) = V_R \sin(\omega t) \\ v_Y(t) = V_Y \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ v_B(t) = V_B \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

De même, les courants peuvent être représentés comme suit :

$$\begin{cases} i_R(t) = I_R \sin(\omega t + \varphi) \\ i_Y(t) = I_Y \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi) \\ i_B(t) = I_B \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Pour un système équilibré, on a :

$$V_R = V_Y = V_B \quad \text{et} \quad I_R = I_Y = I_B$$

Du système d'équations (II.4) on obtient :

$$\begin{cases} v_Y(t) = V_Y \sin(\arcsin(\frac{v_R(t)}{V_R}) + \frac{2\pi}{3}) \\ v_B(t) = V_B \sin(\arcsin(\frac{v_Y(t)}{V_Y}) + \frac{2\pi}{3}) \\ v_R(t) = V_R \sin(\arcsin(\frac{v_R(t)}{V_R}) - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

De même, à partir du système (II.5) on a :

$$\begin{cases} i_Y(t) = I_Y \sin(\arcsin(\frac{i_R(t)}{I_R}) + \frac{2\pi}{3}) \\ i_B(t) = I_B \sin(\arcsin(\frac{i_Y(t)}{I_Y}) + \frac{2\pi}{3}) \\ i_R(t) = I_R \sin(\arcsin(\frac{i_R(t)}{I_R}) - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Le système d'équations (II.6) représente trois ellipses tension-tension où chaque tension d'une phase est tracée en fonction d'une tension d'une autre phase le long des axes x et y, de même pour le système d'équations (II.7) qui représente trois ellipses courant-courant. Le grand axe de chaque ellipse fait $+\pi/4$ ou $-\pi/4$ avec l'axe x.

Dans un système déséquilibré V_R, V_Y, V_B et I_R, I_Y, I_B ne sont pas égaux ainsi :

$$\begin{cases} V_R \neq V_Y \neq V_B \\ I_R \neq I_Y \neq I_B \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Dans un système déséquilibré, les signaux normalisés sont utilisés pour l'analyse. La normalisation est un processus par lequel tous les signaux sont exprimés en fonction de l'un de ces signaux. Dans la forme normalisée, des tensions peuvent être représentées comme suit :

$$\begin{cases} v_R^N(t) = \frac{v_R(t)}{V_R} = \sin(\omega t) \\ v_Y^N(t) = \frac{v_Y(t)}{V_R} = \frac{V_Y}{V_R} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ v_B^N(t) = \frac{v_B(t)}{V_R} = \frac{V_B}{V_R} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

De même, les courants peuvent être représentés, dans une forme normalisée comme suit :

$$\begin{cases} i_R^N(t) = \frac{i_R(t)}{I_R} = \sin(\omega t) \\ i_Y^N(t) = \frac{i_Y(t)}{I_R} = \frac{I_Y}{I_R} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ i_B^N(t) = \frac{i_B(t)}{I_R} = \frac{I_B}{I_R} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

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.4.

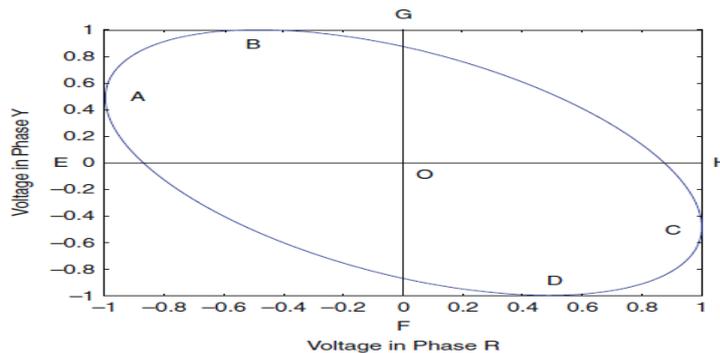


Figure II.9 : Le modèle elliptique dans le plan tension-tension.

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 :

$$\begin{cases} x = X_{MIN}(\text{point } A), & y = Y_1(AE) \\ x = X_{MAX}(\text{point } C), & y = Y_2(CH) \\ & Y = Y_1 \sim Y_2 \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{cases} y = Y_{MIN}(\text{point } D), & x = X_1(FD) \\ y = Y_{MAX}(\text{point } B), & x = X_2(GB) \\ & X = X_1 \sim X_2 \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

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.13 et II.14) :

$$[x_V] = \begin{bmatrix} X_{V_{RY}} \\ X_{V_{YB}} \\ X_{V_{BR}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[y_V] = \begin{bmatrix} Y_{V_{RY}} \\ Y_{V_{YB}} \\ Y_{V_{BR}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

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.15 et II.16) :

$$[x_I] = \begin{bmatrix} X_{I_{RY}} \\ X_{I_{YB}} \\ X_{I_{BR}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$[y_I] = \begin{bmatrix} Y_{I_{RY}} \\ Y_{I_{YB}} \\ Y_{I_{BR}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

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 $[x_I]$ et $[y_I]$. Ces deux matrices sont utilisées pour l'évaluation du déséquilibre [3, 4].

II.3.2.2 Ensemble de règles CMS pour l'évaluation du déséquilibre par la FPDM

Les matrices $[x]$ et $[y]$ pour une situation d'équilibre et les différentes situations déséquilibrées sont déterminées par la FPDM. Pour cela, les signaux, courant et tension, sont normalisés par rapport au courant et à la tension de la phase-R, respectivement. Dans chaque cas, deux signaux de tension quelconque et deux signaux quelconques de courant sont tracés dans des plans de tension-tension et courant-courant. Les modèles ainsi formés correspondent aux phases R-Y, Y-B et B-R. La matrice $[x]$ et la matrice $[y]$ pour la tension et le courant sont formées et prises en considération pour l'évaluation du déséquilibre.

II.3.2.2.1 Système équilibré

Dans un premier temps, nous considérons un système équilibré où les amplitudes des tensions de phase sont égales, elles sont ensuite normalisées comme indiqué à la Figure.II.10.a. Les motifs formés par ce signal normalisé sont représentés à la Figure II.10.b.

De la Figure II.10.b, $[x_V]$ et $[y_V]$ sont calculés. Ceux-ci sont présentés dans le Tableau II.1 (voir annexe B). D'après le Tableau 1.1 (voir annexe B), une inférence peut être considérée comme une règle obligatoire pour qu'un système soit équilibré. La règle est présentée dans le Tableau 1.2 (voir annexe B).

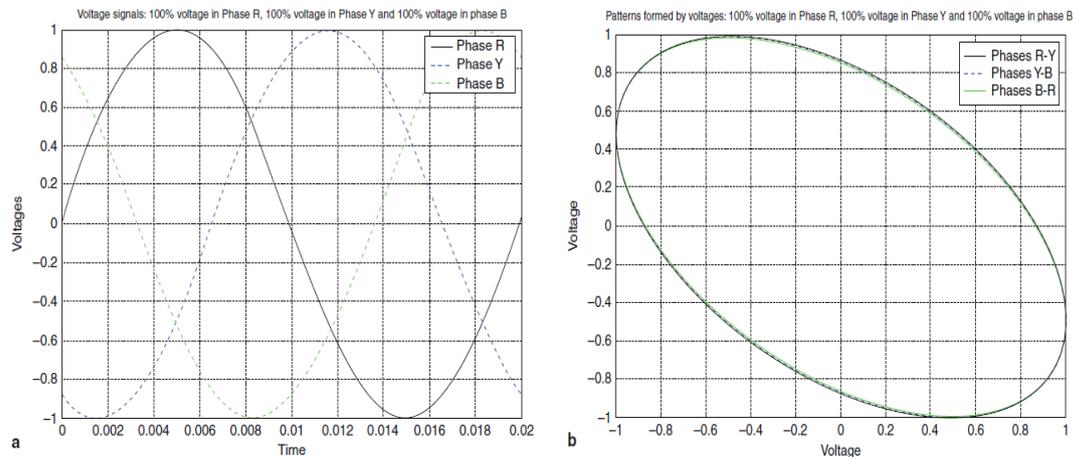
II.3.2.2.2 Déséquilibre dans les phases

- Déséquilibre de la phase R :

Le déséquilibre est introduit dans la tension de phase R on l'augmentant progressivement de 10 (%) à 190 (%). Les motifs sont ensuite formés dans le plan tension-tension. Comme le changement de la tension s'est produit dans la phase R, les modèles développés par les tensions de la phase R et de la phase Y, les tensions de la phase B et de la

phase R seront changés. Les signaux de tension et les modèles générés en combinaison de R-Y et tensions de phase B-R sont formés. Comme le modèle des tensions Y-B reste inchangé, la dimension de ce modèle (Y-B) ne changera pas. $[x_V]$ Et $[y_V]$ pour différent niveau de tension de la phase R sont présentés dans le Tableau 1.3 (voir annexe B).

Le Tableau 1.3 (voir annexe B) montre qu'en raison du déséquilibre de la phase R un élément de $[x]$ change et un élément de $[y]$ change et l'élément n'est égale à l'unité. D'après le Tableau 1.3 (voir annexe B) une inférence est dessinée comme une règle pour un système ayant un déséquilibre à la phase de tension R, cette règle est présentée dans le Tableau 1.4 (annexe B).



a) Les trois signaux de tension.

b) Les motifs développés dans le plan tension-tension.

Figure II.10 : Tension d'un système équilibré et les motifs développés.

- Déséquilibre de la phase Y

Le déséquilibre est introduit dans la tension de la phase Y on l'augmentant progressivement de 10 % à 190 %. Les motifs sont formés dans le plan tension-tension. Comme le déséquilibre s'est produite dans phase Y, les modèles développés par les tensions des phases Y et B et les tensions des phases R et Y seront changés. Des signaux de tension et des motifs générés en combinaison des tensions de phase Y et B, R et Y sont formées. Comme les tensions de phase B et R restent les mêmes, la dimension des modèles développés par les phases de tensions B et R ne changera pas. $[x_V]$ et $[y_V]$ pour les différents niveaux de tension de la phase Y sont présentés dans le Tableau 1.5 (voir annexe B). Il montre que le déséquilibre dû à phase Y change un seul élément de $[x_V]$ et un élément de $[y_V]$ et l'élément n'est pas l'unité. D'après le Tableau 1.5 (annexe B) une inférence est dessinée comme une règle pour un système ayant un déséquilibre de la phase Y, qui est présenté dans le Tableau 1.6 (annexe B).

- *Déséquilibre de la phase B*

Le déséquilibre est maintenant dans la phase B en augmentant progressivement la tension de la phase B de 10 % à 190 %. Les motifs sont formés, $[x_V]$ et $[y_V]$ pour différents niveaux de la tension de la phase B, sont présentés dans le Tableau 1.7 (annexe B).

Le Tableau 1.7 (annexe) montre qu'en raison du déséquilibre de la phase B, il y a changement d'un élément de $[x_V]$ et d'un élément de $[y_V]$ et l'élément n'est pas l'unité. D'après le Tableau 1.7 (annexe B) une inférence est présentée dans le Tableau 1.8 (voir annexe B) les valeurs de $[x_V]$ et $[y_V]$ pour les déséquilibres dans la phase B établie comme une règle pour un système ayant un déséquilibre dû à la phase Y, qui est présenté dans le Tableau 1.8 (annexe B).

- *Déséquilibre dans plusieurs phases*

Il est introduit dans plus d'une phase, les motifs formés et les deux paramètres $[x_V]$ et $[y_V]$ pour différents signaux déséquilibrés sont présentés dans le Tableau 1.9 (annexe B).

Le Tableau 1.9 (annexe B) montre les conditions de déséquilibre dans plus d'une des phases. Ainsi il ya plus d'un des éléments de $[x_V]$ et $[y_V]$ qui ne sont pas égale à l'unité. D'après le (Tableau 1.9, annexe B), on peut tirer des conclusions comme des règles pour un système avec un déséquilibre dans plus d'une phase, qui sont présentés dans le Tableau 1.10 (annexe B). Toutes les règles sont combinées et sont appelées, dans les noms des développeurs, Chattopadhyay Mitra et Sengupta, la règle CMS pour l'évaluation du déséquilibre à l'aide de la FPEM. L'ensemble de règles est présenté dans le Tableau 1.11 (annexe B) [4-8].

II.3.2.2.3 Algorithme pour l'évaluation du déséquilibre

Basé sur le jeu de la règle de CMS établie pour l'évaluation du déséquilibre à l'aide de la FPEM, un algorithme a été développé pour l'évaluation du déséquilibre dans le système de puissance réel comme suit :

1. Diminution de la tension du réseau et de signaux de courant par un transformateur de potentiel et un transformateur de courant, respectivement.
2. Echantillonné et normaliser ces données.
3. Numériser ces données et recevoir dans une unité centrale de traitement (CPU) par le biais d'un système d'acquisition de données (DAS).
4. Prendre des données de tensions de phase et des courants de ligne.
5. Calculer $[x_V]$ et $[y_V]$ des modèles développés dans le plan tension- tension et courant-courant.
6. Appliquer la règle d'ensemble et évaluer le déséquilibre de l'onde de tension et de courant.

Le schéma du dispositif expérimental est représenté sur la Figure.II.1. Les données du système d'alimentation sont réduites par un transformateur du potentiel et un transformateur de courant, recueillies grâce à un système d'acquisition de données (DAS), saisies par l'unité centrale de traitement où elles sont traitées et analysées afin de développer la fonction modèle des tensions de phase combinées et des courants dans l'unité d'affichage. $[x_V]$ et $[y_V]$ pour la tension et le courant sont calculées. Le déséquilibre a été évalué à l'aide de la règle énoncée dans le Tableau 1.11 (voir annexe B).

II.3.2.3 Règle CMS pour la détermination de l'ordre de l'harmonique dominante :

L'ordre de la composante harmonique et le nombre de clivages ont été présentés dans le Tableau 1.12 (voir annexe B) d'où, la règle CMS pour la détermination de l'ordre des harmoniques dominantes donnée dans le Tableau 1.13 (voir annexe B).

Il est également à observer que la position angulaire des clivages évolue avec l'amplitude et l'ordre des harmoniques. La distance entre deux clivages consécutifs et la profondeur d'un clivage dépend de l'amplitude des composantes harmoniques. Mais, malheureusement, aucun rapport définitif n'a été trouvé pour évaluer l'amplitude réelle de ces clivages des modèles.

II.3.2.3.1 Limitation de la FPEM pour l'évaluation harmonique dans les plans V-V et I-I :

La limitation de l'utilisation de ce procédé pour l'évaluation d'harmoniques à partir des caractéristiques tirées dans des plans de tension-tension et courant-courant avec des tensions et des courants de phase est son incapacité à mesurer l'amplitude de composantes harmoniques présentes dans le système à partir des motifs développés dans ces plans. Ainsi, l'évaluation de la distorsion harmonique, puissance harmonique, etc, n'est pas possible par la FPEM dans des plans V-V ou I-I.

II.3.2.3.1 Algorithme pour la puissance réelle aux données du système d'alimentation [1] :

1. Diminution de la tension du réseau et des signaux de courant par transformateur de potentiel et de transformateur de courant, respectivement.
2. Échantillonnage et normalisation des données.
3. Numérisation des données et réception dans une unité centrale de traitement (CPU) par le biais d'un système d'acquisition de données (DAS).
4. Prendre des données de tensions de phase et le courant de ligne.
5. Prendre les données de deux phases des tensions et des parcelles du plan tension-tension pour un cycle complet.
6. De même, prendre des données de deux lignes de courants et de l'intrigue du plan courant-courant pour un cycle complet.

7. Observez si tout clivage (s) apparaît dans les modèles développés dans les plans de tension de tension et de courant-courant.

8. S'il ya un clivage, alors il peut être conclu que le système se compose d'harmoniques.

Sinon, le système est libre d'harmoniques.

9. Si il ya des harmoniques dans le système puis, calculer l'ordre le plus élevé d'harmoniques en utilisant la règle du Tableau 1.13 (voir annexe B).

II.4 Les paramètres caractérisant la qualité de l'énergie électrique selon la norme IEEE Std 1459[1] :

L'énergie électrique est caractérisée par plusieurs paramètres. L'étude de la qualité de l'énergie électrique nécessite leurs connaissances, selon la norme IEEE Std 1459 [1], on peut les classés en deux groupes :

- Paramètres caractérisant les systèmes monophasés.
- Paramètres caractérisant les systèmes triphasés.

II.4.1 Les Paramètres caractérisant les systèmes monophasés :

Dans le cas d'un système électrique monophasé la qualité de l'énergie électrique est caractérisée par les paramètres suivant :

II.4.1.1 La valeur efficace de la tension et du courant :

Dans le cas ou le système tension, courant est non sinusoïdal périodique instantané alors il est composé de deux composantes :

- les composants du système de puissance v_1 et i_1 ,
- les composants du système harmonique v_H et i_H

Sachant que :

$$\begin{cases} v = v_1 + v_H \\ i = i_1 + i_H \end{cases} \quad \text{Ou} \quad \begin{cases} v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \\ i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

et

$$\begin{cases} v_H = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \\ i_H = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Les carrés des valeurs efficaces sont donnés comme suit:

$$\begin{cases} V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \\ I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{cases} V_H^2 = V_0^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \\ I_H^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

V_H, I_H : Sont les valeurs efficaces de v_H et i_H , respectivement.

τ : est le moment où la mesure commence.

k : est un nombre entier positif.

T : est la période du signal.

Les termes de la tension directe et de courant directe V_0 et I_0 respectivement, doivent être inclus dans V_H et I_H . Ces composantes sont rarement présentes dans les systèmes d'alimentation à courant alternatif (AC).

II.4.1.2 Le taux global de distorsion harmonique THD :

L'écart global d'une onde déformée de son fondamental peut être estimée à l'aide du taux global de distorsion harmonique on distingue :

- le taux global de distorsion harmonique en tension donnée par :

$$THD_V = \frac{V_H}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (\text{II.21})$$

- le taux global de distorsion harmonique en courant donné par :

$$THD_I = \frac{I_H}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (\text{II.22})$$

II.4.1.3 La puissance instantanée :

Elle donnée par la relation suivante :

$$p = vi \quad (\text{II.23})$$

Cette puissance peut être décomposée en deux termes

$$p = p_a + p_q \quad (\text{II.24})$$

Sachant que :

$$p_a = V_0 I_0 + \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t - 2\alpha_h)] \quad (\text{II.25})$$

Cette partie de la puissance instantanée représente la somme des puissances actives harmoniques. La puissance active harmonique de l'ordre h est provoquée par la tension harmonique de l'ordre h et l'harmonique du courant de l'ordre h qui se trouvent en phase.

Chaque puissance active harmonique est composée de deux parties :

- la puissance harmonique active : c'est la puissance réelle qui contribue au transfert d'énergie, elle donnée comme suite :

$$P_h = V_h I_h \cos \theta_h \quad (\text{II.26})$$

- la puissance harmonique intrinsèque : elle ne contribue pas à un transfert d'énergie nette ou à une perte de puissance supplémentaire, elle est donnée comme suite :

$$P_{h\text{int}} = -P_h \cos(2h\omega t - 2\alpha_h) \quad (\text{II.27})$$

Le second terme p_q est un terme qui ne représente pas un transfert d'énergie (c'est à dire, sa valeur moyenne est nulle), et pourtant, le courant lié à ces composantes non actives entraîne une perte de puissance supplémentaire dans les conducteurs. Elle est donnée par la relation suivante :

$$p_q = -\sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t - 2\alpha_h) + 2 \sum_n \sum_{\substack{m \\ m \neq n}} V_m I_n \sin(m\omega t - \alpha_m) \sin(n\omega t - \beta_n) \\ + \sqrt{2} V_0 \sum_h I_h \sin(h\omega t - \beta_h) + \sqrt{2} I_0 \sum_h V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (\text{II.28})$$

L'angle $\theta_h = \beta_h - \alpha_h$ est l'angle de phase entre les phaseurs de V_h et I_h .

II.4.1.4 La puissance active (W) :

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p_a dt \quad (\text{II.29})$$

$$P = P_1 + P_H \quad (\text{II.30})$$

II.4.1.5 La puissance active fondamentale (W) :

La puissance active fondamentale est souvent mentionnée par la fréquence fondamentale, elle est donnée par la relation suivante :

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1 i_1 dt = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (\text{II.31})$$

II.4.1.6 La puissance active harmonique (W) :

$$P_H = V_0 I_0 + \sum_h V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (\text{II.32})$$

P_H Telle qu'elle est définie ci-dessus contient également des composants pour les quels h n'est pas un nombre entier (inter-harmoniques et sous-harmoniques).

II.4.1.7 La puissance réactive fondamentale (Var) :

$$Q_1 = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_1 \left[\int_{\tau}^{\tau+kT} v_1 dt \right] dt = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (\text{II.33})$$

II.4.1.8 La puissance apparente (VA) :

La puissance apparente est la quantité de puissance réelle transitée (fournie) à une charge, où un groupe de charges, dans des conditions idéales. Les conditions idéales assurent à la charge une tension et un courant alternatifs. Les charges sont compensées par des dispositifs actifs ou passifs tels que le courant de ligne soit sinusoïdal et en phase avec la tension qui, idéalement, est également ajusté pour être sinusoïdale. La valeur efficace du courant I est maintenue égale à la valeur quadratique moyenne de la ligne du courant réel [1]. La tension de charge est ajustée à une valeur qui donne les performances de chargement inchangé (la même quantité d'énergie utile est convertie et livrée par la charge), elle donnée comme suit :

$$S = VI \quad (\text{II.34})$$

II.4.1.9 La puissance apparente fondamentale (VA) :

La puissance fondamentale apparente S_1 et ses composantes P_1 et Q_1 sont les quantités réelles qui contribuent à définir le taux d'écoulement de l'énergie associé à la tension et du courant fondamental, elle est donnée par la relation suivante :

$$S_1 = V_1 I_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (\text{II.35})$$

La puissance apparente fondamentale est souvent appelée par la fréquence fondamentale. Par exemple, pour un système de fréquence 50 Hz, S_1 peut être dénommée « puissance apparente 50 Hz ».

II.4.1.10 La puissance apparente non fondamentale (VA) :

La séparation de la valeur efficace de la tension et du courant en termes fondamentaux et harmoniques corrige la puissance apparente de la manière suivante :

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (\text{II.36})$$

D'où la puissance apparente non fondamentale :

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (\text{II.37})$$

Elle peut être décomposée en trois termes comme suit :

$$S_N = \sqrt{D_I^2 + D_V^2 + S_1^2} \quad (\text{II.38})$$

II.4.1.11 La puissance déformante en courant (Var) :

La puissance déformante en courant D_I identifie la composante de puissance non fondamentale inactive due à la distorsion du courant. Il s'agit généralement de la composante dominante de la S_N elle est donnée comme suit :

$$D_I = V_1 I_H = S_1 (THD_I) \quad (\text{II.39})$$

II.4.1.12 La puissance déformante en tension (Var) :

La puissance déformante en tension D_V identifie la composante de puissance non fondamentale inactive due à la distorsion de la tension, elle est donnée comme suit :

$$D_V = V_H I_1 = S_1 (THD_V) \quad (\text{II.40})$$

II.4.1.13 La puissance apparente harmonique (VA) :

La puissance apparente harmonique S_H indique le niveau de la puissance harmonique apparente due aux tensions et courants harmoniques seuls. Il s'agit de la plus petite composante de S_N . Elle comprend la puissance harmonique active D_H , elle est donnée par la relation suivante :

$$S_H = V_H I_H = S_1 (THD_I) (THD_V) = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (\text{II.41})$$

II.4.1.14 La puissance déformante harmonique (Var) :

Elle traduit la distorsion harmonique en tension et en courant, elle est donnée par la relation suivante :

$$D_H = \sqrt{S_H^2 - P_H^2} \quad (\text{II.42})$$

Dans les systèmes d'alimentation pratiques, $THD_V < THD_I$, et S_N peut être calculé en utilisant l'expression suivante :

$$S_N \approx S_1 \sqrt{(THD_I)^2 + (THD_V)^2} \quad (\text{II.43})$$

Lorsque $THD_V \leq 5$ (%), cette expression donne une erreur inférieure à 0,15 (%) pour toute valeur de THD_I , et pour $THD_V < 5$ (%) et $THD_I > 40$ (%), une erreur inférieure à 1,00 (%) est obtenue en utilisant l'expression suivante (voir Emanuel [B8]) :

$$S_N \approx S_1 (THD_I) \quad (\text{II.44})$$

II.4.1.15 La puissance déformante harmonique (Var) :

Dans le passé, cette puissance a été appelée « la puissance fictive ». La puissance non active N ne doit pas être confondue avec la puissance réactive. Ce n'est que lorsque les formes d'onde sont parfaitement sinusoïdales que $N = Q = Q_1$, dans le cas général elle est donnée la formule suivante :

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{II.45})$$

II.4.1.16 Le facteur de puissance fondamental :

Ce rapport permet d'évaluer séparément les conditions fondamentales d'écoulement de puissance. Il peut être appelé le facteur de puissance fondamentale. Il est souvent désigné par la fréquence fondamentale [1]. Par exemple, pour un réseau électrique 50 Hz. FP_1 Peut être appelé facteur de puissance 50 Hz, il est donné par la relation suivante :

$$FP_1 = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (\text{II.46})$$

II.4.1.17 Le facteur de puissance :

Il traduit la distorsion du courant et de la tension ainsi que le décalage de l'un par rapport à l'autre il est défini comme suit :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{\left(\frac{P_1}{S_1}\right) \left[1 + \frac{P_H}{P_1}\right]}{\sqrt{1 + \left(\frac{S_N}{S_1}\right)^2}} = \frac{FP_1 \left[1 + \frac{P_H}{P_1}\right]}{\sqrt{1 + (THD_I)^2 + (THD_V)^2 + (THD_V THD_I)^2}} \quad (\text{II.47})$$

Lorsque $THD_V < 5$ % et $THD_I > 40$ %, il est commode d'utiliser l'expression suivante :

$$FP \approx \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} FP_1 \quad (\text{II.48})$$

Pour S et V données, l'utilisation maximale de la ligne est obtenue lorsque $S = P$; donc, le rapport P/S est un indicateur du facteur d'utilisation. Le degré global de l'injection d'harmonique produite par une grande charge non linéaire, où par un groupe de charges où des consommateurs peuvent être estimés à partir du rapport S_N/S_1 . L'efficacité des filtres harmoniques peut également être évaluée à partir d'une telle mesure. Les mesures de S_1, P_1, FP_1 , ou Q_1 aident à établir les caractéristiques de l'écoulement de la puissance fondamentale.

Dans la plupart des situations concrètes, il est difficile de mesurer correctement les composantes d'ordre supérieur de P_H en utilisant des instruments de mesure. La principale raison de cette difficulté provient du fait que l'angle de phase entre le phaseur de la tension v_h et le phaseur du courant i_h peut être proche $\pm \pi/2$ de sorte que même des petites erreurs dans la mesure d'angle de phase peut causer des erreurs importantes dans P_H , au point même de changer le signe de P_H . Ainsi, il faut utiliser des instruments spécialement optimisés pour les mesures de P_H lorsqu'ils prennent des décisions techniques concernant la compensation des harmoniques, les tarifs de l'énergie, où la quantification des pertes néfastes causées par une charge non linéaire.

Tableau II.1 : regroupement des quantités pour les systèmes monophasés avec des formes d'onde non sinusoïdale.

Quantité ou indicateur	combinaison	Puissances Fondamentales	Puissances non Fondamentales
Apparente	S (VA)	S_1 (VA)	$S_N \quad S_H$ (VA)
Active	P (W)	P_1 (W)	P_H (W)
Non active	N (Var)	Q_1 (Var)	$D_I \quad D_V \quad D_H$ (Var)
Utilisation de la ligne	$PF = \frac{P}{S}$	$PF_1 = \frac{P_1}{S_1}$	—
La pollution harmonique	—	—	$\frac{S_N}{S_1}$

II.4.2 Paramètres caractérisant les systèmes triphasés asymétriques :

Dans ce cas, les trois phasors des courants I_a , I_b et I_c des trois phases, n'ont pas des grandeurs égales, et ils ne sont pas décalés exactement de $\frac{2\pi}{3}$ l'un par rapport à l'autre. Le déséquilibre de charge conduit à des courants asymétriques et leurs circulations conduisent à des tensions asymétriques.

Il ya des situations où les trois phasors de tension ne sont pas symétriques, cela conduit à des courants asymétriques, même lorsque la charge est parfaitement équilibrée. Les tensions des trois phases sont les suivantes :

$$\begin{cases} v_a = \sqrt{2}V_a \sin(\omega t + \alpha_a) \\ v_b = \sqrt{2}V_b \sin(\omega t + \alpha_b - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c = \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + \alpha_c + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

Où au moins l'une des trois phases à une amplitude $\sqrt{2}V_a, \sqrt{2}V_b$ ou $\sqrt{2}V_c$ a une valeur différente de la valeur des deux autres. La même chose peut s'appliquer aux angles de phase $\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$. Si un angle de phase a une valeur différente de la valeur des deux autres, le système perd sa symétrie et devient déséquilibré.

Les courants de phase ont des expressions similaires. Ils s'écrivent comme suite :

$$\begin{cases} i_a = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + \beta_a) \\ i_b = \sqrt{2}I_b \sin(\omega t + \beta_b - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = \sqrt{2}I_c \sin(\omega t + \beta_c + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

Dans le cas de systèmes à trois fils, les tensions de phase sont définies en supposant un nœud de neutre artificiel, qu'on peut obtenir à l'aide de trois résistances identiques connectées en Y.

II.4.2.1 La puissance instantanée (W) :

Pour les systèmes à trois fils, $i_a + i_b + i_c = 0$, et la puissance instantanée a les expressions suivantes :

$$p = v_{ab}i_a + v_{cb}i_c = v_{ba}i_b + v_{ca}i_c = v_{ac}i_a + v_{bc}i_b \quad (\text{II.51})$$

Où V_{ab}, V_{bc} , et V_{ca} sont des tensions composées instantanées.

Pour les systèmes à quatre fils la puissance instantanée est donnée par la relation suivante :

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (\text{II.52})$$

Où, V_{ar} , V_{br} , V_{cr} , sont des tensions simples instantanées.

II.4.2.2 La puissance active (W) :

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p dt \quad (\text{II.53})$$

$$P = P_a + P_b + P_c$$

Où P_a , P_b , et P_c sont des puissances actives de chaque phase :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_a = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_a i_a dt = V_a I_a \cos \theta_a \\ P_b = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_b i_b dt = V_b I_b \cos \theta_b \\ P_c = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_c i_c dt = V_c I_c \cos \theta_c \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} \theta_a = \alpha_a - \beta_a \\ \theta_b = \alpha_b - \beta_b \\ \theta_c = \alpha_c - \beta_c \end{array} \right. \quad (\text{II.54})$$

II.4.2.3 Puissance active positive, négative, et homopolaire (W) :

Dans les systèmes avec quatre fils, il y a des situations où l'utilisation de composantes symétriques peut être très utile. Les composantes de tension symétriques V^+ , V^- , et V^0 , et les composantes de courants I^+ , I^- , et I^0 , avec des angles de phase respectivement θ^+ , θ^- et θ^0 produisant les trois composantes suivantes de puissance active :

- La puissance active de la séquence positive :

$$P^+ = 3V^+ I^+ \cos \theta^+ \quad (\text{II.55})$$

- La puissance active de la séquence négative :

$$P^- = 3V^- I^- \cos \theta^- \quad (\text{II.56})$$

- La puissance active de la séquence homopolaire :

$$P^0 = 3V^0 I^0 \cos \theta^0 \quad (\text{II.57})$$

La puissance active totale est :

$$P = P^+ + P^- + P^0 \quad (\text{II.58})$$

II.4.2.4 La puissance réactive (Var) :

$$\begin{cases} Q_a = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_a [\int v_a dt] dt = V_a I_a \sin \theta_a \\ Q_b = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_b [\int v_b dt] dt = V_b I_b \sin \theta_b \\ Q_c = \frac{\omega}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i_c [\int v_c dt] dt = V_c I_c \sin \theta_c \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \theta_a = \alpha_a - \beta_a \\ \theta_b = \alpha_b - \beta_b \\ \theta_c = \alpha_c - \beta_c \end{cases} \quad (\text{II.59})$$

Alors la puissance réactive totale est :

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c \quad (\text{II.60})$$

II.4.2.5 La puissance réactive positive, négative, et homopolaire (Var) :

Les trois puissances réactives sont les suivantes :

- La puissance réactive de la séquence positive :

$$Q^+ = 3V^+ I^+ \sin \theta^+ \quad (\text{II.61})$$

- La puissance réactive de la séquence négative :

$$Q^- = 3V^- I^- \sin \theta^- \quad (\text{II.62})$$

- La puissance réactive de la séquence homopolaire :

$$Q^0 = 3V^0 I^0 \sin \theta^0 \quad (\text{II.63})$$

La puissance réactive totale est :

$$Q = Q^+ + Q^- + Q^0 \quad (\text{II.64})$$

II.4.2.6. Puissance apparente par phase (VA) :

$$\begin{cases} S_a = V_a I_a \\ S_b = V_b I_b \\ S_c = V_c I_c \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2} \\ S_b = \sqrt{P_b^2 + Q_b^2} \\ S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2} \end{cases} \quad (\text{II.65})$$

II.4.2.7 Le vecteur de puissance apparente (VA) :

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S_V = |(P_a + P_b + P_c) + j(Q_a + Q_b + Q_c)| \quad (\text{II.66})$$

$$S_V = |(P^+ + P^- + P^0) + j(Q^+ + Q^- + Q^0)|$$

II.4.2.8 Le vecteur de facteur de puissance et le facteur de puissance arithmétique :

Ils sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{cases} FP_A = \frac{P}{S_A} \\ FP_V = \frac{P}{S_V} \end{cases} \quad (\text{II.67})$$

II.4.2.9 La puissance apparente efficace (VA) :

Cette puissance apparente représente la puissance active maximale qui peut être transmise par l'intermédiaire du système triphasé, pour un système triphasé équilibré de charge, alimenté par une tension efficace V_e , en gardant les pertes constantes dans la ligne, elle donnée par la relation suivante :

$$S_E = 3V_e I_e \quad (\text{II.68})$$

Lorsque le système est équilibré, on a :

$$\begin{cases} V_a = V_b = V_c = V = V_e \\ I_a = I_b = I_c = I \\ I_n = 0 \\ S_V = S_A = S_e \end{cases} \quad (\text{II.69})$$

Sachant que :

I_n est le courant de neutre.

Lorsque le système est déséquilibré, on a :

$$\begin{cases} S_V \leq S_A \leq S_e \\ FP_e \leq FP_A \leq FP_V \end{cases} \quad (\text{II.70})$$

II.4.2.10 Facteur de puissance efficace :

Représente la relation entre la puissance réelle à la puissance maximale de ce qui pourrait être transmis, tout en gardant constants les pertes de puissance dans la ligne, il est donné comme suite :

$$FP_e = \frac{P}{S_e} \quad (\text{II.71})$$

II.4.2.11 La puissance effective apparente et sa résolution :

La puissance apparente efficace peut être divisée en puissance active P et inactive N comme suit :

$$S_e = \sqrt{P^2 + N^2} \quad (\text{II.72})$$

Cette approche, cependant, ne sépare pas les puissances de séquences positives fondamentales.

II.4.2.12 Les courants efficaces :

Le courant efficace consommé est donné par la relation suivante :

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}} \quad (\text{II.73})$$

Le courant fondamental est :

$$I_{e1} = \sqrt{\frac{I_{a1}^2 + I_{b1}^2 + I_{c1}^2 + I_{n1}^2}{3}} \quad (\text{II.74})$$

Le courant harmonique est :

$$I_{eH} = \sqrt{\frac{I_{aH}^2 + I_{bH}^2 + I_{cH}^2 + I_{nH}^2}{3}} = \sqrt{I_e^2 - I_{e1}^2} \quad (\text{II.75})$$

Pour les systèmes à trois fils, $I_{n1} = I_{nh} = 0$ les expressions deviennent plus simples.

II.4.2.13. Les tensions efficaces :

Les expressions pratiques pour la tension efficace sont obtenues d'une manière similaire

La tension efficace est :

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]} \quad (\text{II.76})$$

La valeur efficace de la tension fondamentale est donnée par la relation suivante :

$$V_{e1} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{a1}^2 + V_{b1}^2 + V_{c1}^2) + V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2]} \quad (\text{II.77})$$

La valeur efficace de la tension harmonique est donnée par la relation suivante :

$$V_{eH} = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_{aH}^2 + V_{bH}^2 + V_{cH}^2) + V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2]} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (\text{II.78})$$

Pour les systèmes à trois fils, on a :

La tension efficace est :

$$V_e = \frac{1}{3} \sqrt{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2} \quad (\text{II.79})$$

La tension efficace fondamentale est donnée par la relation suivante :

$$V_{e1} = \frac{1}{3} \sqrt{V_{ab1}^2 + V_{bc1}^2 + V_{ca1}^2} \quad (\text{II.80})$$

La tension efficace harmonique est donnée par la relation suivante :

$$V_{eH} = \frac{1}{3} \sqrt{V_{abH}^2 + V_{bcH}^2 + V_{caH}^2} = \sqrt{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (\text{II.81})$$

II.4.2.14 La puissance apparente fondamentale :

$$S_{e1} = 3V_{e1}I_{e1} \quad (\text{II.82})$$

La puissance apparente peut s'écrire sous la forme suivante :

$$S_e = \sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2} \quad (\text{II.83})$$

Sachant que S_{eN} est la puissance non fondamentale apparente. Sa résolution est :

$$S_{eN}^2 = S_e^2 - S_{e1}^2 = D_{e1}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 \quad (\text{II.84})$$

La puissance déformante en courant, la puissance déformante en tension, la puissance apparente harmonique et la puissance déformante harmonique sont données respectivement par les relations suivantes :

$$\begin{cases} D_{e1} = 3V_{e1}I_{eH} \\ D_{eH} = 3V_{eH}I_{e1} \\ S_{eH} = 3V_{eH}I_{eH} \\ D_{eH} = \sqrt{S_{eH}^2 + P_{eH}^2} \end{cases} \quad (\text{II.85})$$

Les taux de distorsions harmoniques équivalents sont définis comme suit :

$$\begin{cases} THD_{eV} = \frac{V_{eH}}{V_{e1}} \\ THD_{eI} = \frac{I_{eH}}{I_{e1}} \end{cases} \quad (\text{II.86})$$

Des expressions pratiques pour la puissance apparente non fondamentale S_{eN} et ses composants D_{eI} , D_{eV} , et S_{eH} sont obtenus comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{eN} = S_{e1} \sqrt{THD_{eI}^2 + THD_{eV}^2 + (THD_{eI} THD_{eV})^2} \\ D_{eI} = S_{e1} (THD_{eI}) \\ D_{eV} = S_{e1} (THD_{eV}) \\ S_{eH} = S_{e1} (THD_{eI}) (THD_{eV}) \end{array} \right. \quad (\text{II.87})$$

Pour les systèmes avec $THD_{eV} \leq 5$ (%) et $THD_{eI} \geq 40$ (%), l'approximation suivante est recommandée :

$$S_{eN} = S_{e1} (THD_{eI}) \quad (\text{II.88})$$

Le tableau II.2 résume et regroupe les quantités caractérisant d'un système triphasé avec des formes d'onde non sinusoïdale :

Tableau II.2 : Résumé et le regroupement des quantités pour les systèmes triphasés avec des formes d'onde non sinusoïdale.

Quantité ou indicateur	Combinaison	Puissance fondamentale	Puissance non fondamentale
Apparente	S_e	$S_{e1} S_1^+ S_{1U}$ (VA)	$S_{eN} S_{eH}$ (VA)
Active	P (W)	P_1^+ (W)	P_H (W)
Non active	N (Var)	Q_1^+ (Var)	$D_{eI} D_{eV} D_{eH}$ (Var)
Utilisation dans la ligne	$PF = \frac{P}{S_e}$	$PF_1^+ = \frac{P_1^+}{S_1^+}$	-
Pollution harmonique	-	-	$\frac{S_{eN}}{S_{e1}}$
Déséquilibre de charge	-	$\frac{S_{1U}}{S_1^+}$	-

II.5 Élaboration des décisions et classification des charges :

La diversité des appareils non linéaire ainsi que la différence dans leur niveau de démission d'harmonique a mis en face la nécessité de les classer et de mettre des limites pour leurs courants harmoniques.

Les exigences et limites définies dans la CEI 61000-3-2, [12] sont applicables aux bornes d'entrée de puissance des appareils destinés à être raccordés à des réseaux 220/380 V, 230/400 V et 240/415 V fonctionnant à 50 Hz ou 60 Hz.

II.5.1 Classification des appareils

Pour ce qui concerne la limitation du courant harmonique, les appareils sont classés de la manière suivante :

Classe A :

- appareils triphasés équilibrés,
- appareils électrodomestiques à l'exclusion des appareils identifiés comme appartenant à la classe D,
- outils à l'exclusion des outils portatifs,
- variateurs de lumière pour lampes à incandescence,
- matériels audio.

Les matériels non spécifiés dans l'une des trois autres classes doivent être considérés comme des matériels de classe A.

Classe B :

- outils portatifs,
- appareils de soudage à l'arc hors matériel professionnel.

Classe C :

- appareils d'éclairage.

Classe D :

Les appareils ayant une puissance spécifiée inférieure ou égale à 600 W, et qui sont des types suivants :

- ordinateurs individuels et écrans pour ordinateurs individuels,
- récepteurs de télévision.

II.5.2 Limites des courants harmoniques :

La limitation des courants harmonique des charges non linéaires se fait selon les classes des appareils et leur puissance active.

II.5.2.1 Limites pour les matériels de Classe A :

Pour les appareils de Classe A, les harmoniques du courant d'entrée ne doivent pas dépasser les valeurs indiquées au Tableau 2.1 (voir annexe B).

II.5.2.2 Limites pour les matériels de Classe B :

Pour les appareils de Classe B, les harmoniques du courant d'entrée ne doivent pas dépasser les valeurs indiquées au Tableau 2.1 (voir annexe B) multipliées par un facteur de 1,5.

II.5.2.3 Limites pour les matériels de Classe C :

- *Puissance active d'entrée >25 W :*

Pour les appareils d'éclairage ayant une puissance active d'entrée supérieure à 25 W, les courants harmoniques ne doivent pas dépasser les limites relatives indiquées au (Tableau 2.2, annexe B).

Cependant, les limites indiquées au tableau 2.1 (voir annexe B) s'appliquent aux appareils d'éclairage à incandescence qui comportent des variateurs de lumière incorporés ou sont constitués de variateurs de lumière incorporés dans une enveloppe.

Pour les appareils d'éclairage à décharge qui comportent des variateurs de lumière incorporés ou sont constitués de variateurs de lumière indépendants ou incorporés dans une enveloppe, les conditions suivantes sont applicables :

- Pour les conditions de charge maximale, les valeurs de courant harmonique ne doivent pas dépasser les limites définies en pourcentage au Tableau 2.2 (voir annexe B).
- Pour toutes les positions du variateur de lumière, les valeurs de courant harmonique ne doivent pas dépasser les valeurs limites autorisées dans le cas de la charge maximale.
- *Puissance active d'entrée $\leq 25 W$:*

Les appareils d'éclairage à décharge ayant une puissance active d'entrée inférieure ou égale à 25 W doivent respecter l'une des deux prescriptions suivantes :

- les courants harmoniques ne doivent pas dépasser les limites proportionnelles à la puissance du Tableau 2.3 (voir annexe B), colonne 2.
- L'amplitude du courant harmonique de rang 3, exprimée en pourcentage du courant fondamental, ne doit pas dépasser 86 (%) et l'amplitude du courant harmonique de rang 5 ne doit pas dépasser 61 (%). De plus, la forme d'onde du courant d'entrée doit être telle qu'elle atteigne le seuil de 5 (%) en courant à 60° ou avant, qu'elle ait sa valeur de crête à 65° ou avant et qu'elle ne retombe pas en dessous du seuil de 5 (%) en courant avant 90°, par référence à n'importe quel passage par zéro du fondamental de la tension d'alimentation. Le seuil en courant correspond à 5 (%) de la valeur absolue la plus élevée de la valeur de crête qui se produit dans la fenêtre de mesure, et les mesures de déphasages sont faites sur la période qui inclut cette valeur absolue de la valeur de crête. (voir Figure II.11) .

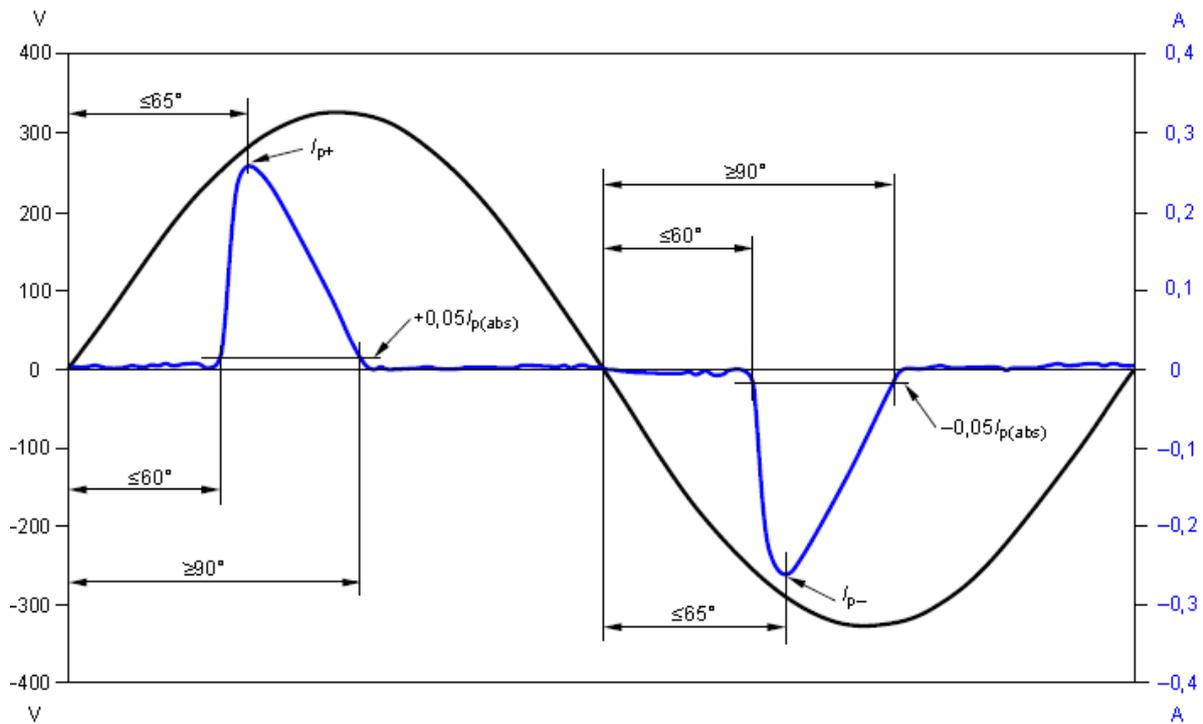


Figure II.11 : Illustration des caractéristiques en déphasage relatif.

II.5.2.4 Limites pour les matériels de Classe D :

Les courants d'entrée aux fréquences harmoniques ne doivent pas dépasser les valeurs limites tirées du Tableau 2.3 (voir annexe B).

Bibliographie

- [1] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Un-balanced Conditions, IEEE Std. 1459, Jan. 2010.
- [2] DaqTemp User's Manual," PCI-Based Data Acquisition Systems for Desktop and Tower PCs", IOtech, Inc., November 2002.
- [3] Angelo Baggini," Handbook of Power Quality", John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [4] 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 section and IE, India (2003)
- [5] Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S.: Computerized assessment of electric power quality. In Proceedings of 12th Science Congress organized by DST and Govt. of West Bengal in Kolkata, in February–March (2005)
- [6] Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S.: IT based assessment of electric power quality of a power system. Proceedings of PEITSICON-2005: International Conference on IT and Power System, IEE (Calcutta section), Kolkata, January (2005)
- [7] Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S.: Intelligent power quality monitoring in an electric power system. Best of 2004-volume on Modeling and Simulation, AMSE, France, pp. 18–22 (2004)
- [8] Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S.: Power quality assessment in V-V, Clarke and Park domain. UPEC, pp. 669–676 (2007).
- [9] Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S.: IT based assessment of electric power quality of a power system. Proceedings of PEITSICON-2005: International Conference on IT and Power System, IEE (Calcutta Branch), Kolkata, Paper No. 83. January 28, 29, 2005
- [10] Chattopadhyay, S., Mitra, M., Sengupta, S.: Intelligent Power Quality Monitoring in an Electric Power System, Vol.—Best of 2004, on Modeling and Simulation, AMSE (France), pp. 146–156, 2004.
- [11] 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 Integrated Operation of Power System, IEEE (Calcutta section), PE Chapter and IE (India), pp. 34–37, September 6–9, 2003.
- [12] CEI 61000.3.2:2009, "Electromagnetic compatibility (EMC), Limits for harmonic current emissions (Equipment input current less than or equal to 16A per phase)".

CHAPITRE III

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

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 [1].

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 caractérises.

III.2.1 Cas d'une lampe à incandescence

Il s'agit d'une lampe à incandescence alimentée sous une tension de 220V. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. On obtiendra un fichier de valeur sur le courant absorbé par cette charge et un autre sur la tension à ces bornes grâce au système d'acquisition de données, puis les différents paramètres de la qualité d'énergie électrique seront calculés conformément à la norme IEEE Std 1459-2010[2] grâce à un script Matlab .

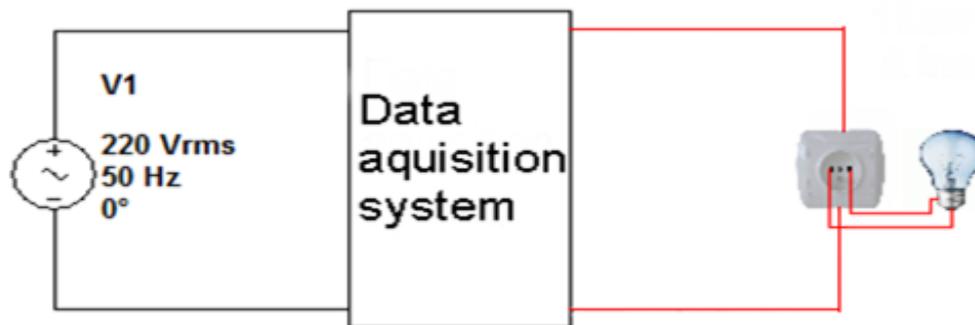


Figure III.1.1. Schéma du montage expérimental pour une lampe a incandescence.

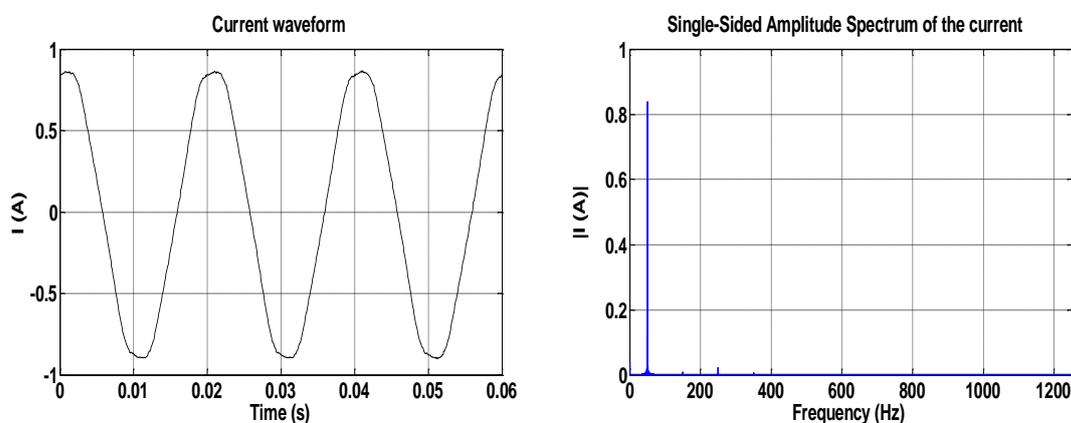


Figure III.1.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

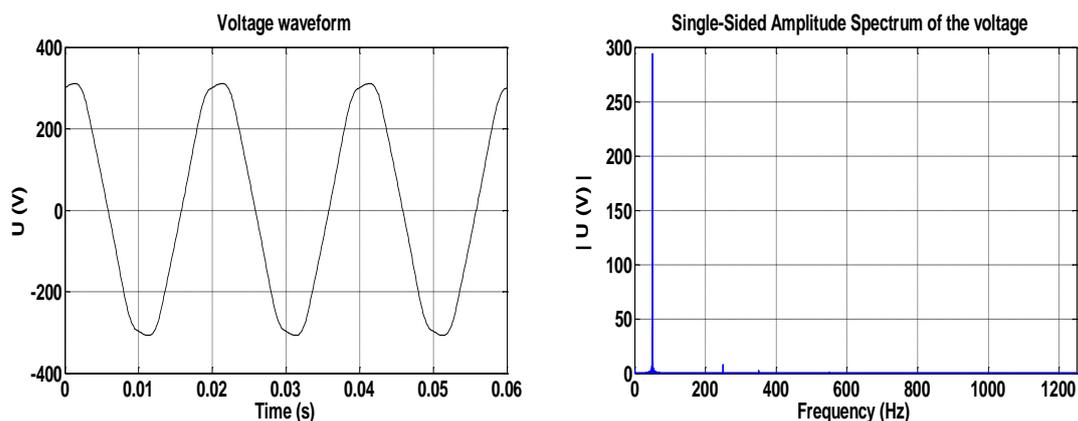


Figure III.1.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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>THDVi</i> (%)	99.941	0.061	2.287	0.500	0.075	0.155

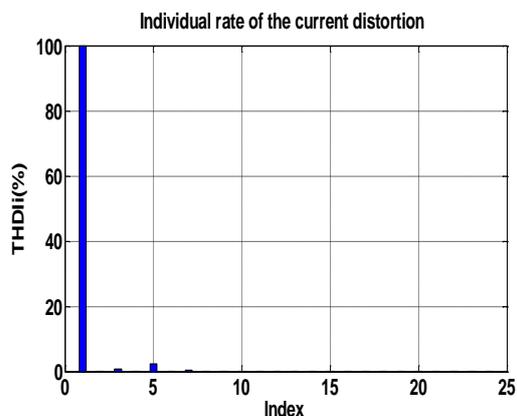


Figure III.1.4 : Taux individuels de distorsion en courant.

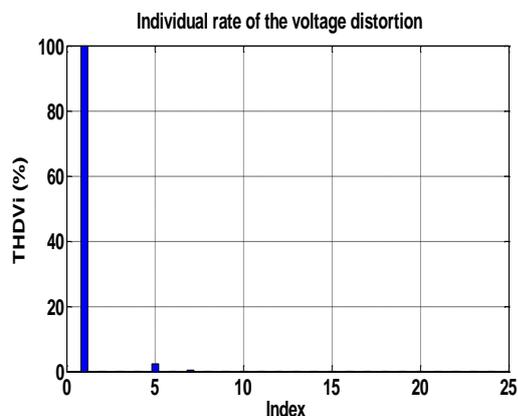


Figure III.1.5 : Taux individuels de distorsion en tension.

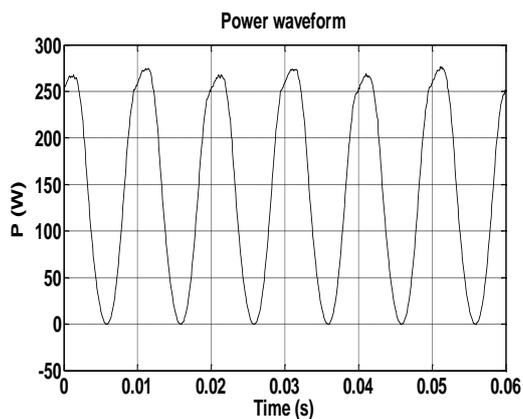


Figure III.1.6 : Puissance instantanée.

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 $THDI_i$ de 2.33 (%) et $THDVi$ de 2.29(%).

L'allure de la puissance instantanée est presque en cosinus avec une fréquence égale à deux fois la fréquence du fondamental en courant et en tension c'est-à-dire 50 Hz vérifiés par :

$$P = vi \quad \text{(III.1)}$$

Sachant que :

$$\begin{cases} v = v_1 + v_H \\ i = i_1 + i_H \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

Et :

$$\begin{cases} v_1 = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \\ i_1 = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \beta_1) \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

Et comme les composantes harmoniques v_H et i_H sont faibles par rapport à leurs fondamentaux alors on obtient :

$$\begin{cases} v = v_1 \\ i = i_1 \\ P = v_1 i_1 \end{cases} \quad \text{(III.4)}$$

$$P = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \times \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \beta_1)$$

$$= 2V_1 I_1 \left[-\frac{1}{2} [\cos(\omega t - \alpha_1 + \omega t - \beta_1) - \cos(\omega t - \alpha_1 - \omega t + \beta_1)] \right] \quad \text{(III.5)}$$

Et si on considère que $\theta_1 = \beta_1 - \alpha_1$, l'angle de phase entre les phaseurs de V_1 et I_1 , est nulle alors l'expression (III.5) sera égale à :

$$P = -V_1 I_1 [\cos(2\omega t - \alpha_1 - \beta_1)] \quad \text{(III.6)}$$

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 [1].

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. Les caractéristiques du constructeur 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.

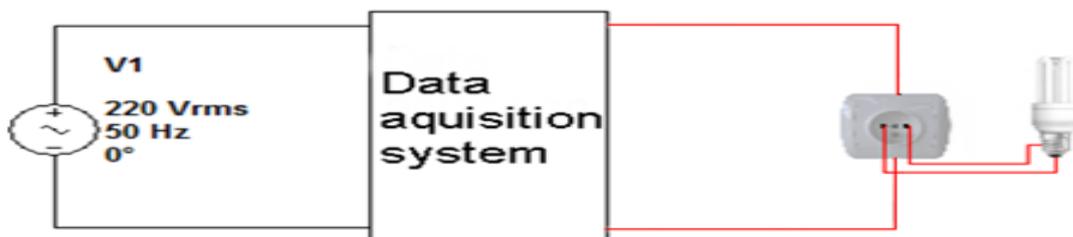


Figure III.1.7. Schéma du montage expérimental pour une lampe fluo compact.

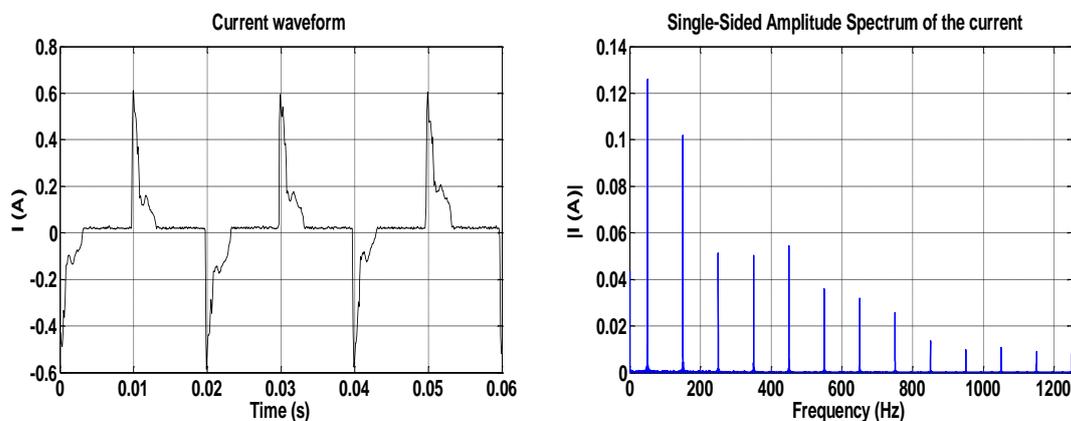


Figure III.1.8 : Représentation temporelle et spectre du courant.

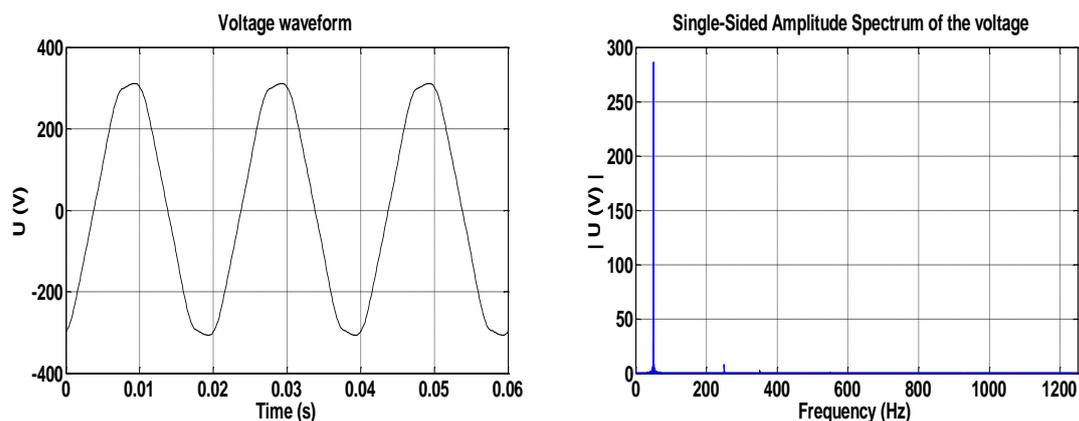


Figure III.1.9 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

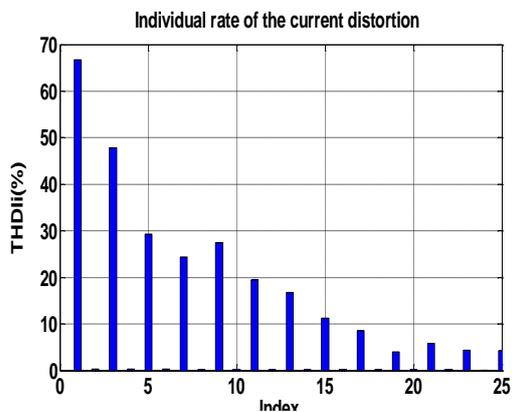


Figure III.1.10: Taux individuels de distorsion en courant.

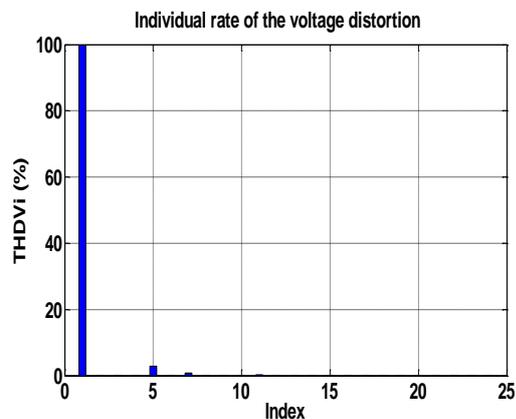


Figure III.1.11 : Taux individuels de distorsion en tension.

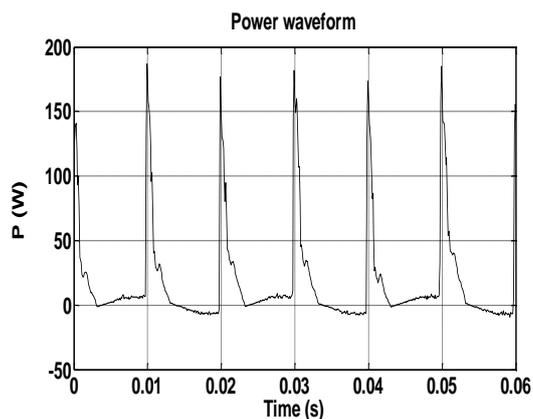


Figure III 1.12 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Des Figures III 1.8 et III 1.9, on remarque la forte distorsion en courant comparativement à la lampe à incandescence vérifié par un $\text{THD}_I = 111.6417\%$ et une très faible augmentation du $\text{THD}_V = 3.1228\%$, 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 $\text{FP} = \cos \theta_1 = 0.99$.

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

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. Les caractéristiques du constructeur 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.

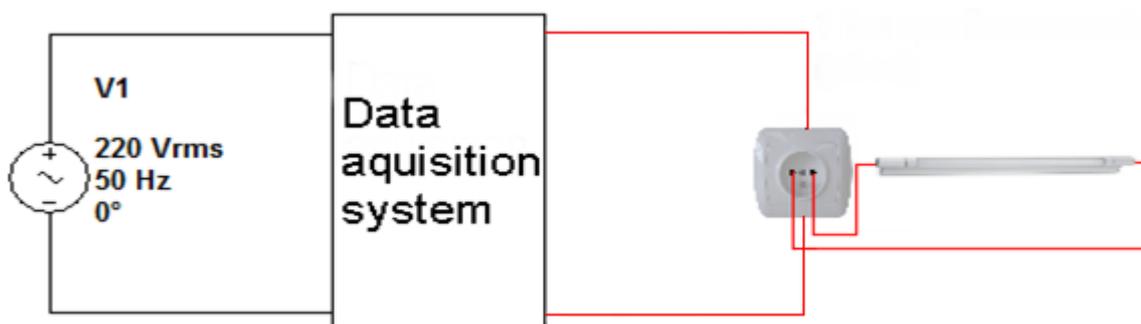


Figure III.1.13. Schéma du montage expérimental pour une lampe fluorescente.

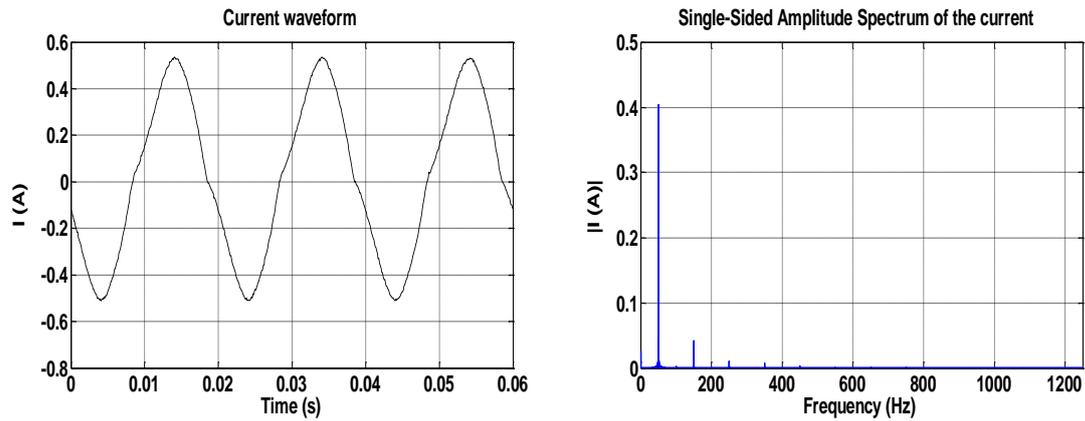


Figure III.14 : Représentation temporelle et spectre du courant.

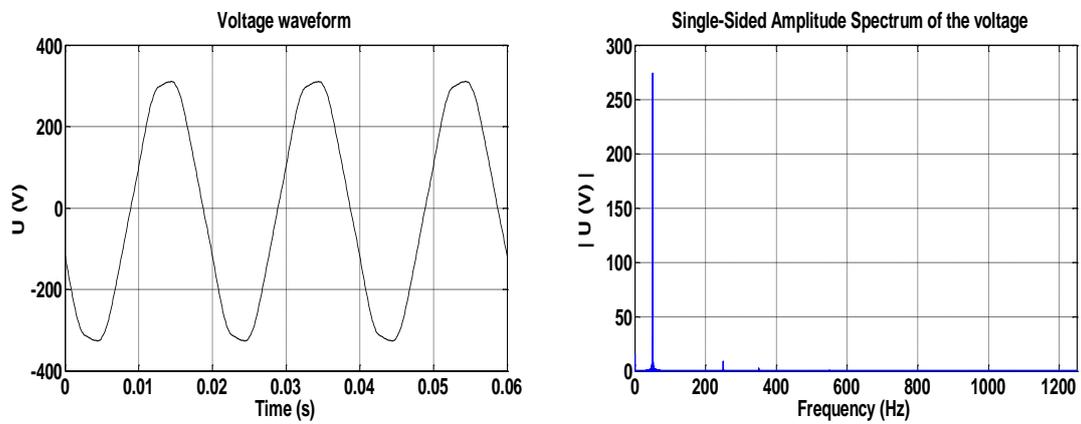


Figure III.15 : Représentation temporelle et spectre de la tension

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

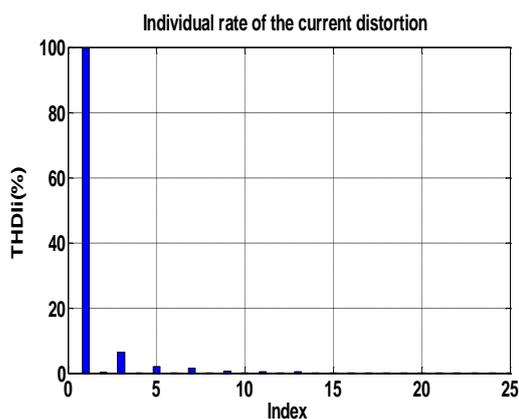


Figure III.1.16 : Taux individuel de distorsion en courant.

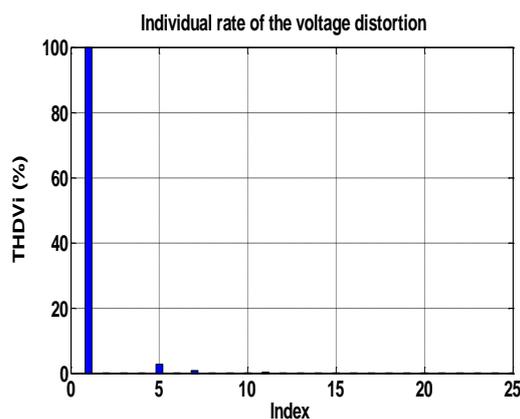


Figure III 1.17 : Taux individuel de distorsion en tension.

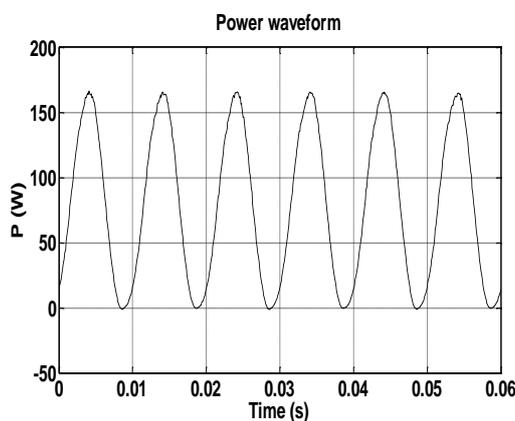


Figure III.1.18 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

D'après les figures III.1.14 et III.1.15, 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. Les caractéristiques du constructeur 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.

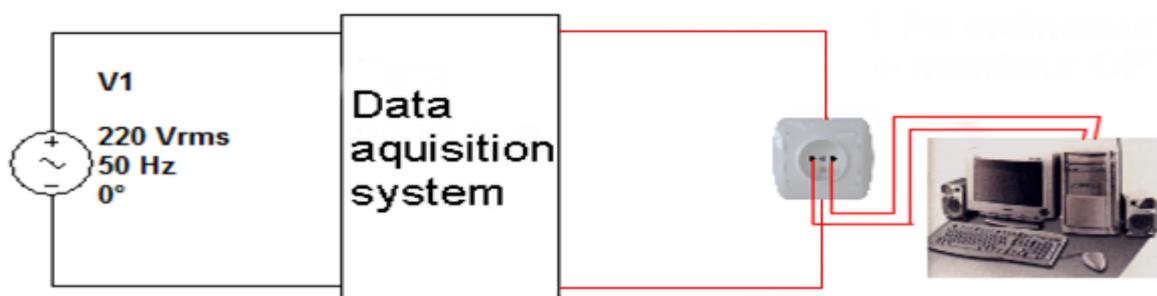


Figure III.1.19: Schéma du montage expérimental pour un micro-ordinateur.

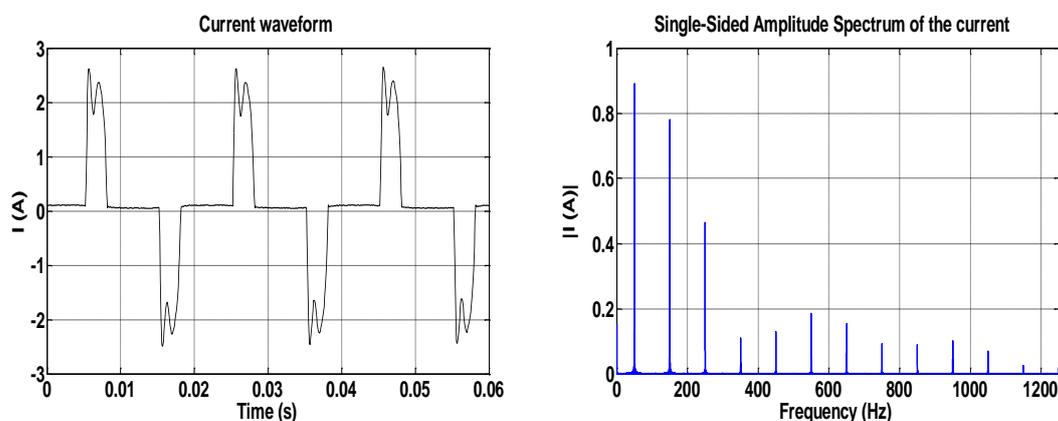


Figure III.1.20 : Représentation temporelle et spectre du courant.

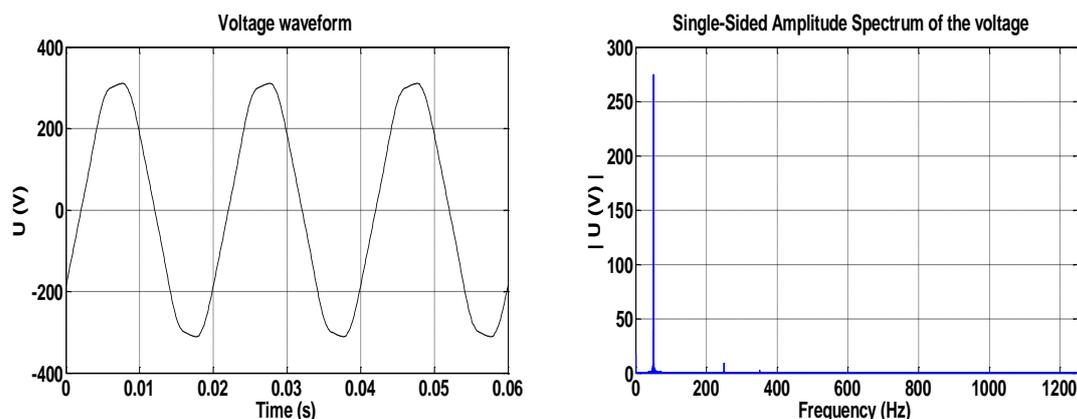


Figure III.1.21 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

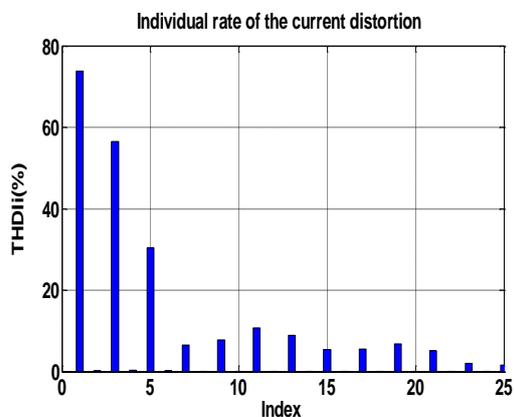


Figure III.1.22 : Taux individuels de distorsion en courant

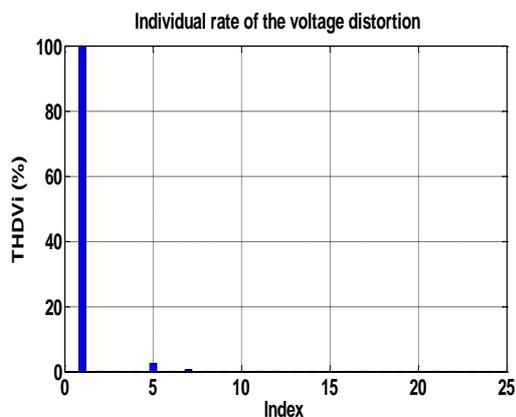


Figure III.1.23 : Taux individuels de distorsion en tension

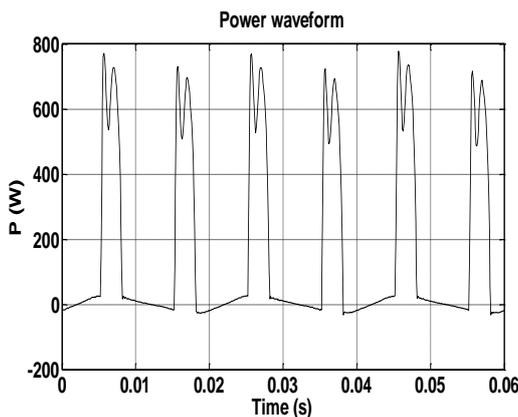


Figure III.1.24 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Les figures III.1.20 et III.1.21 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, [5].

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. Les caractéristiques du constructeur 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.

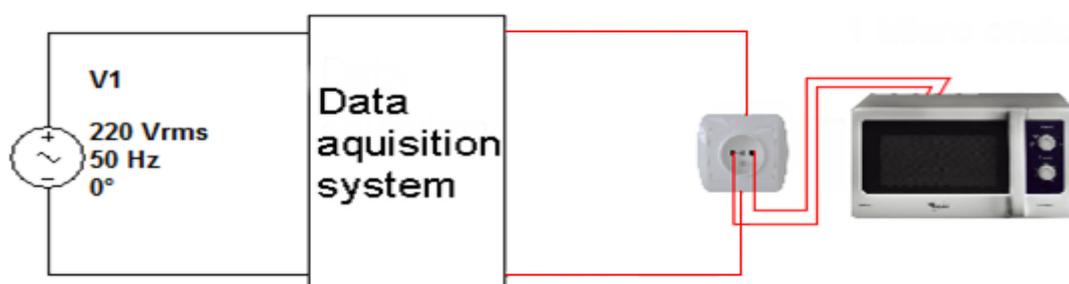


Figure III.1.25. Schéma du montage expérimental pour un four micro-ondes.

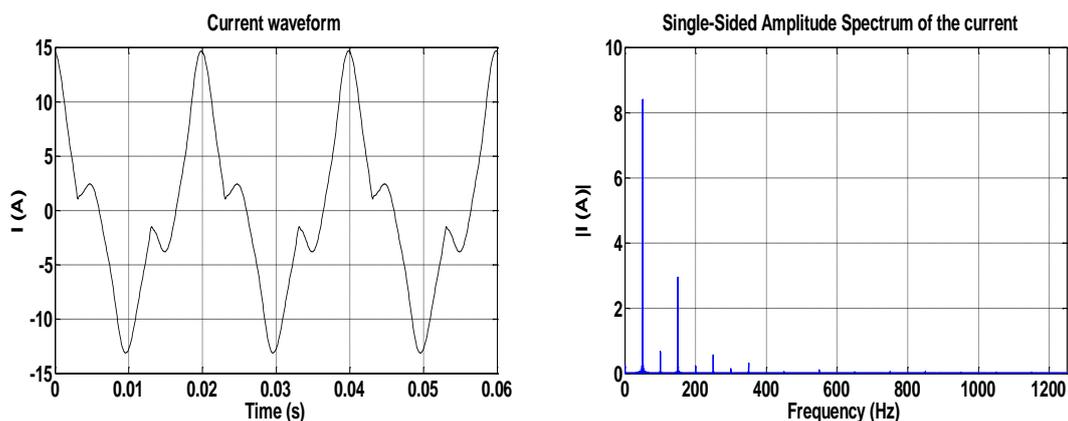


Figure III.1.26 : Représentation temporelle et spectre du courant.

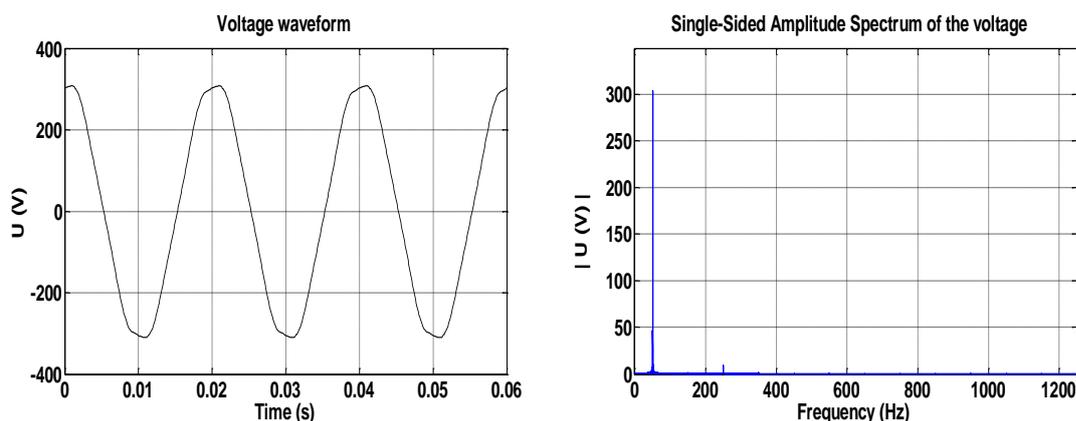


Figure III.1.27 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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>THDVi</i> (%)	99.94	0.00	0.186	0.00	2.234	0.00	0.627	0.00	0.00	0.00

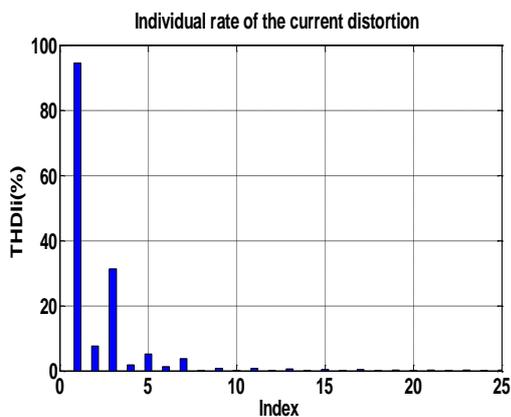


Figure III.1.28 : Taux individuels de distorsion en courant

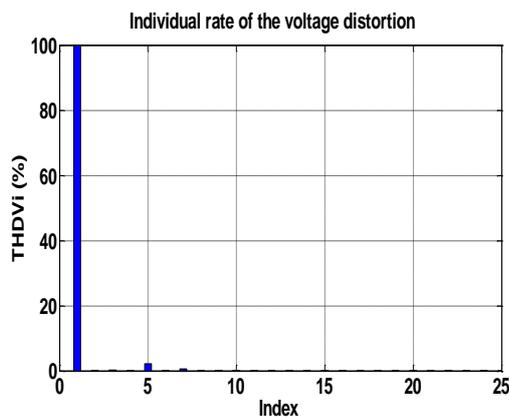


Figure III.1.29 : Taux individuels de distorsion en tension

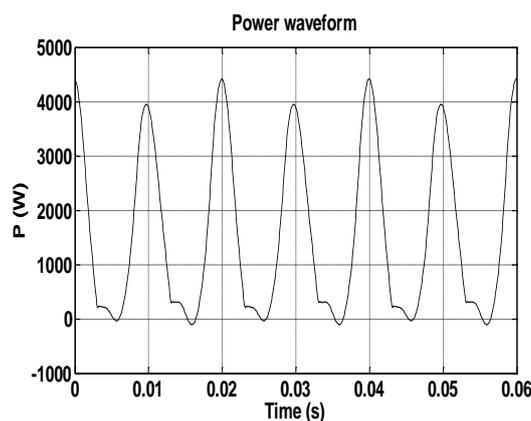


Figure III.1.30 : Puissance instantanée

Analyse et interprétation :

Des Figures III.1.26 et III.1.27, 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 [2].

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_I (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_I (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
Cosθ_I	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.

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.

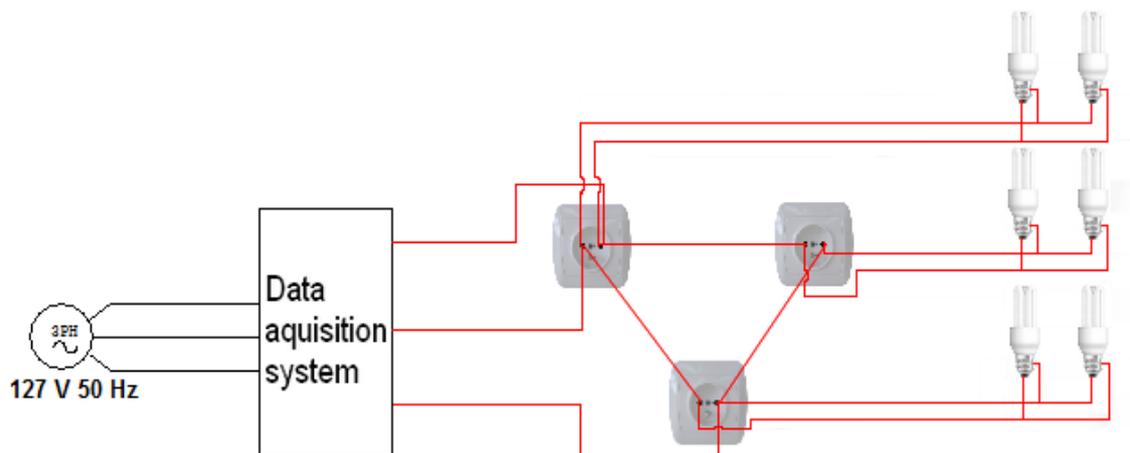


Figure III.2.1. Schéma du montage expérimental pour des lampes fluo Compact montées en triangle.

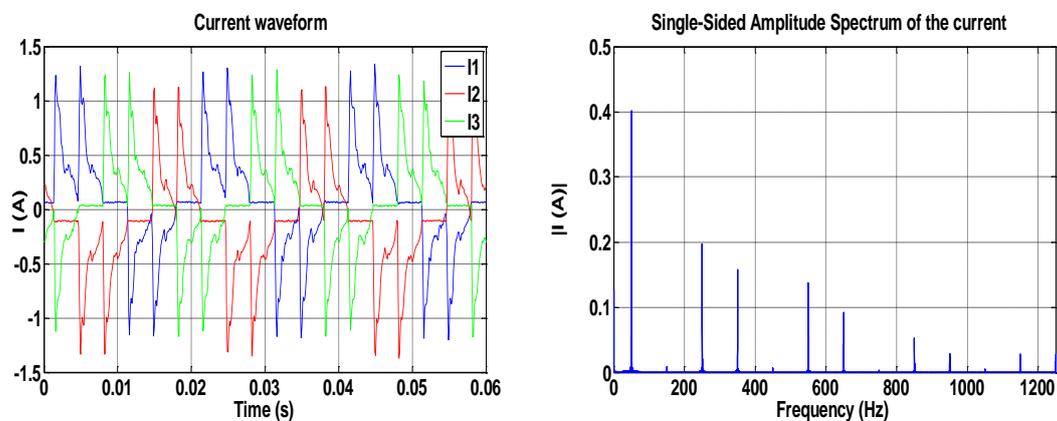


Figure III.2.2 : Représentation temporelle et spectre des courants de ligne.

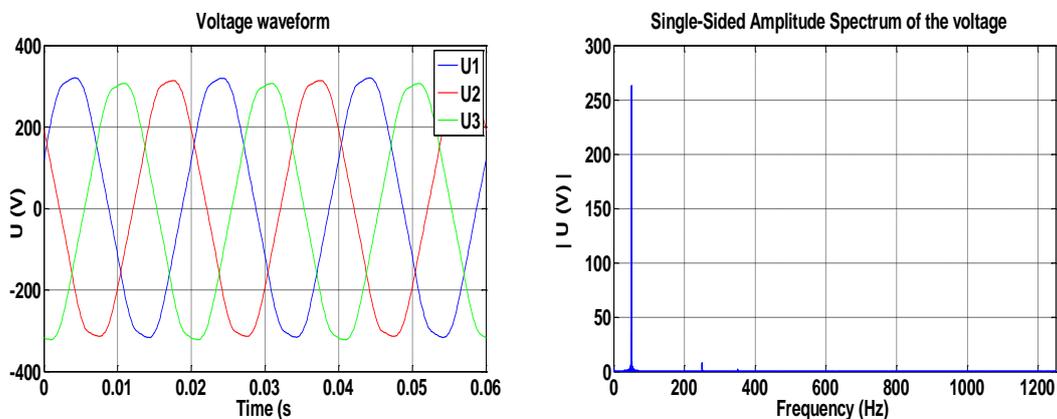


Figure III.2.3 : Représentation temporelle et spectre des tensions.

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

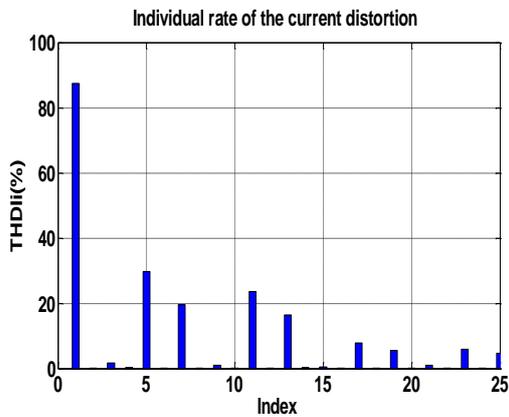


Figure III.2.4: Taux individuels de distorsion en courant.

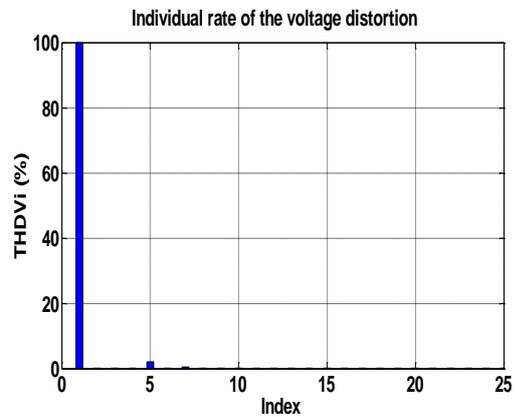


Figure III.2.5 : Taux individuels de distorsion en tension

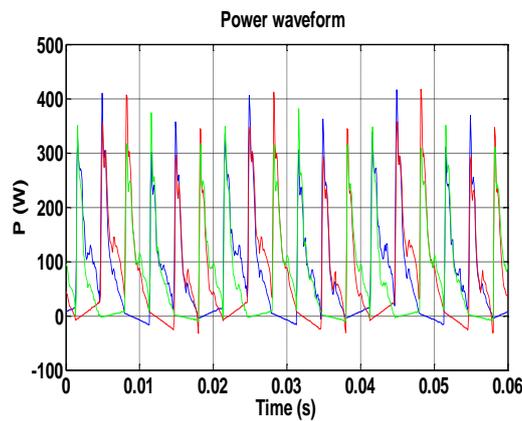


Figure III.2.6 : La puissance instantanée.

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.

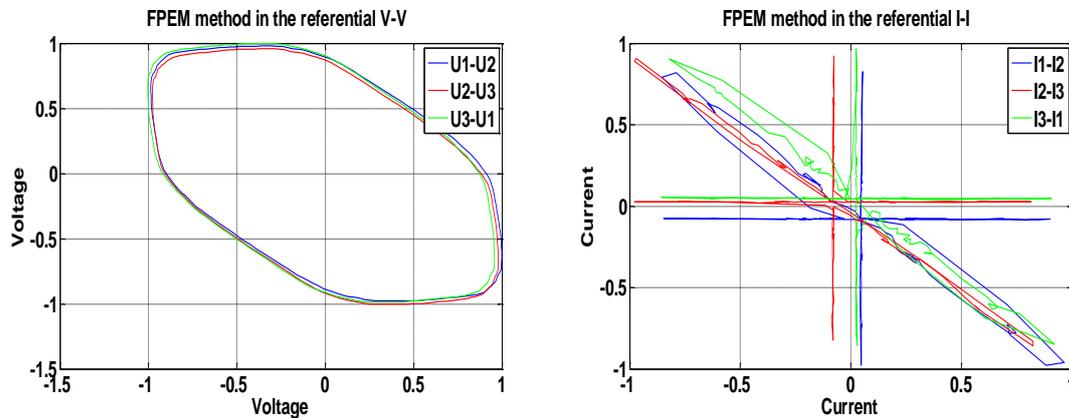


Figure III.2.7 : Représentation des motifs des tensions et des courants dans les plans V-V et I-I.

Analyse et interprétation

On remarque sur les Figures III.2.3 et III.2.4, une diminution de la distorsion en courant et en tension vérifiées 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 B 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 B) 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 :

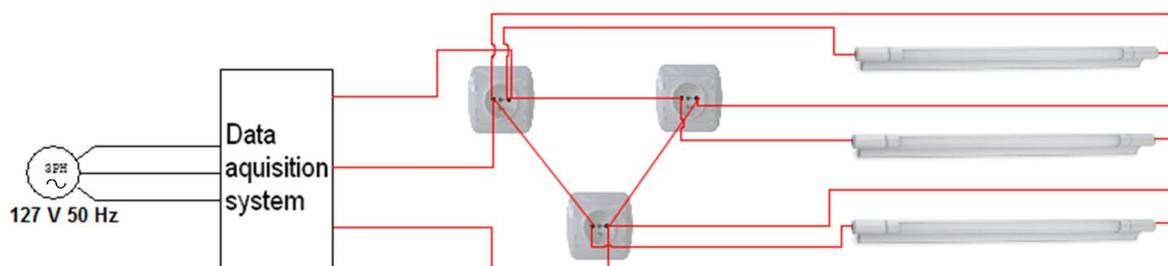


Figure III.2.8. Schéma du montage expérimental pour des lampes fluorescentes montées en triangle.

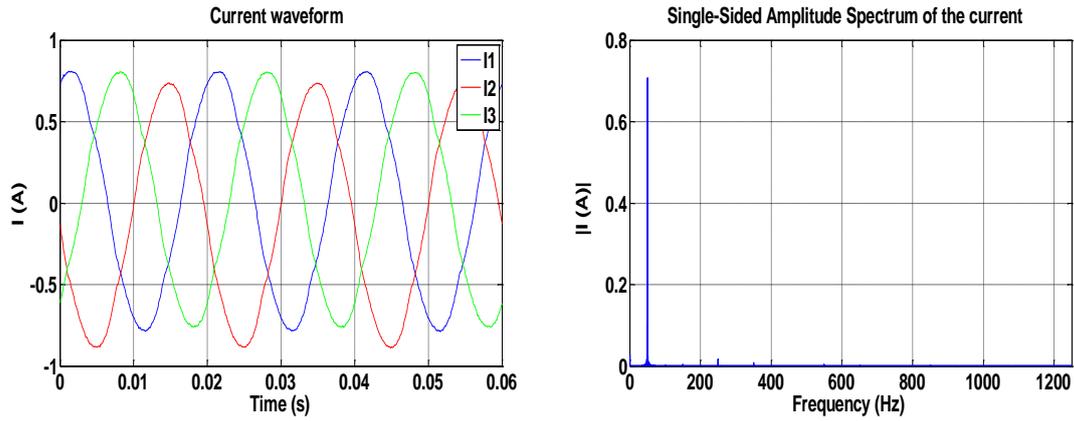


Figure III.2.9 : Représentation temporelle et spectre des courants de ligne.

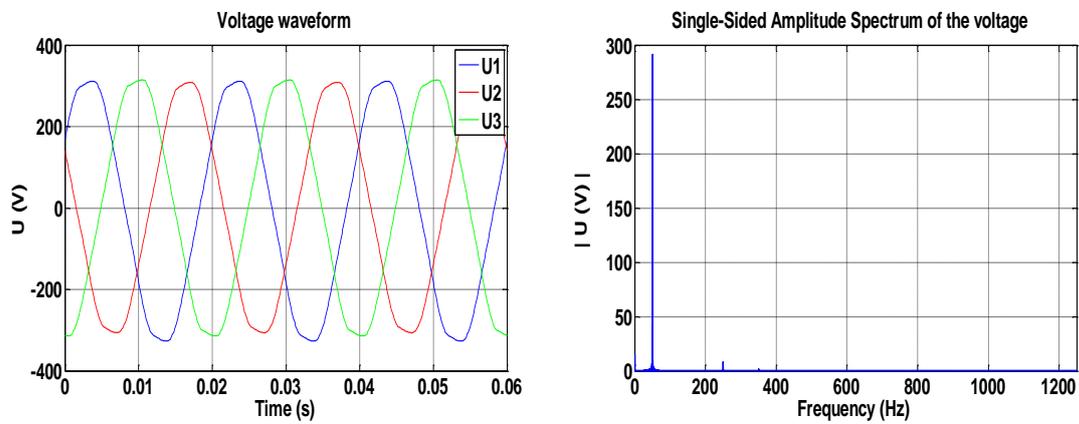


Figure III.2.10 : Représentation temporelle et spectre des tensions.

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

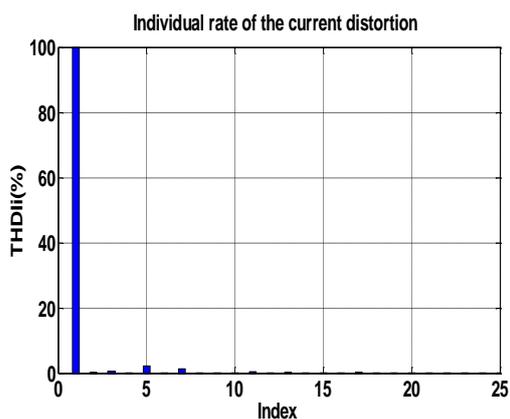


Figure III.2.11: Taux individuels de distorsion en courant.

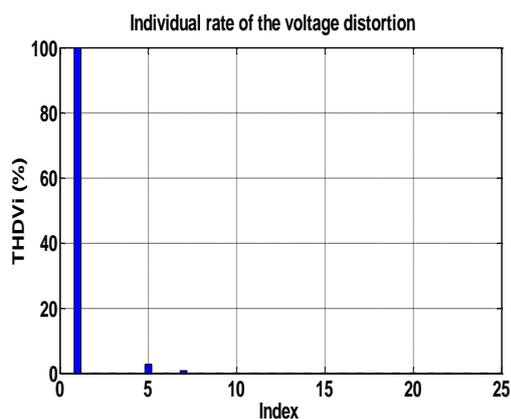


Figure III.2.12 : Taux individuels de distorsion en tension

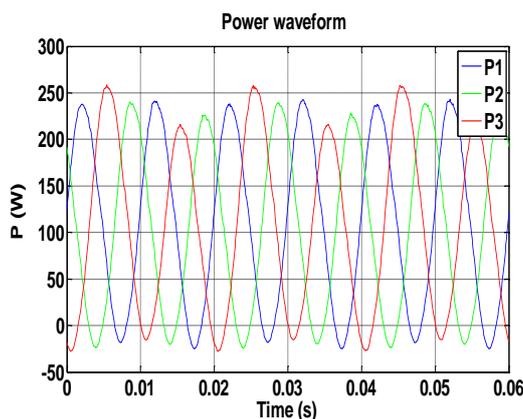


Figure III.2.13 : Puissance instantanée.

La méthode de la FP EM

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

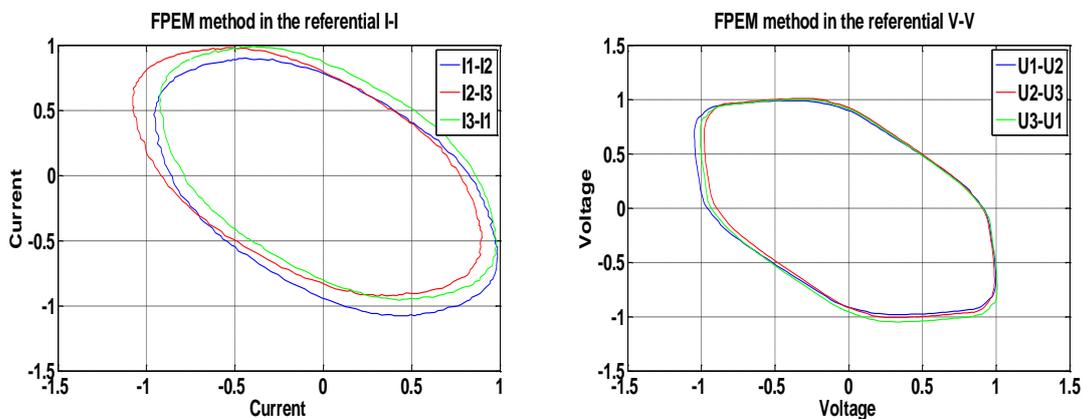


Figure III.2.14 : Représentation des motifs de tensions et de courants dans les plans V-V et I-I.

Analyse et interprétation

Les Figures III.2.9, III.2.10 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 Bon 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 B) 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 B 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 B) 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 [2].

Paramètres	Type de charges	
	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.

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. Les caractéristiques du constructeur 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.

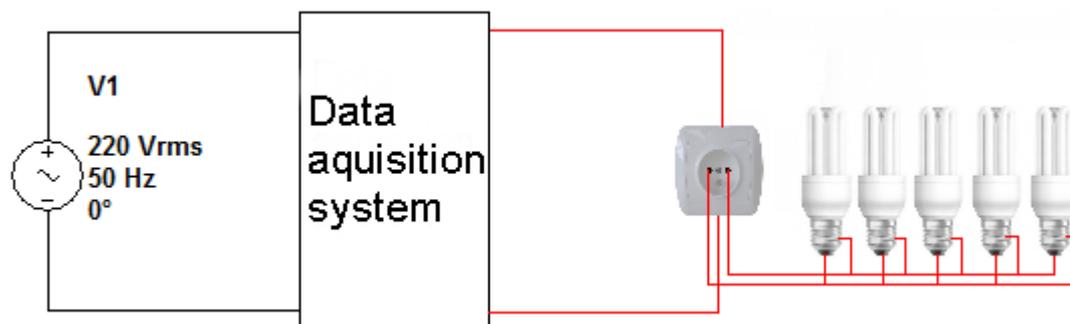


Figure III.4.1. Schéma du montage expérimental pour 5 lampes fluo compact alimenté en monophasé et montées en parallèle.

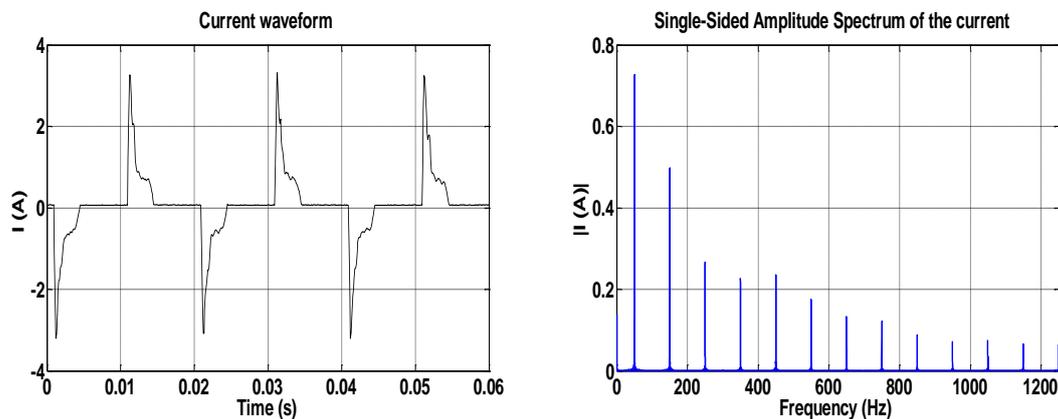


Figure III.4.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

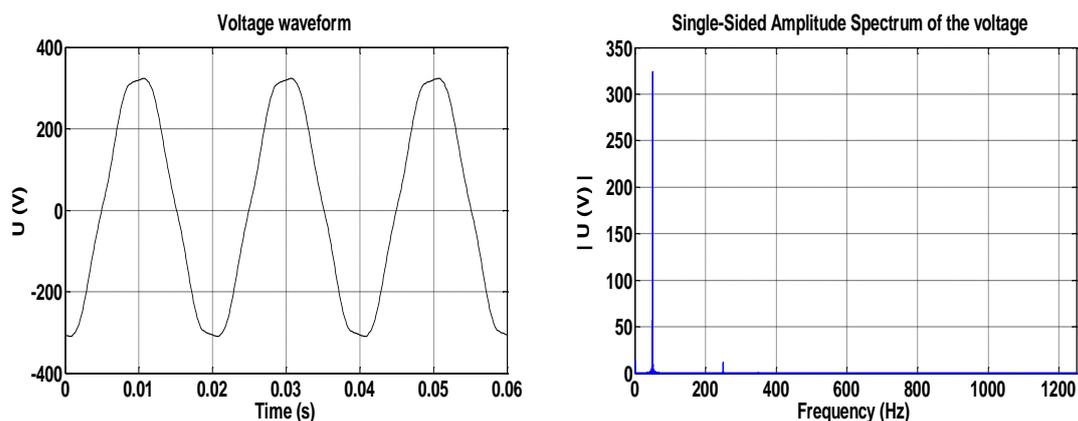


Figure III.4.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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
$THDi$ (%)	70.2	44.7	30.7	21.4	28.0	13.8	14.0	10.2	9.2	6.3	7.7	5.6	6.5
$THDVi$ (%)	99.9	0.2	4.3	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

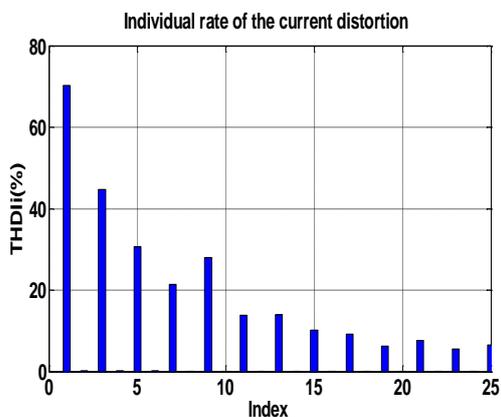


Figure III.4.4: Taux individuels de distorsion en courant.

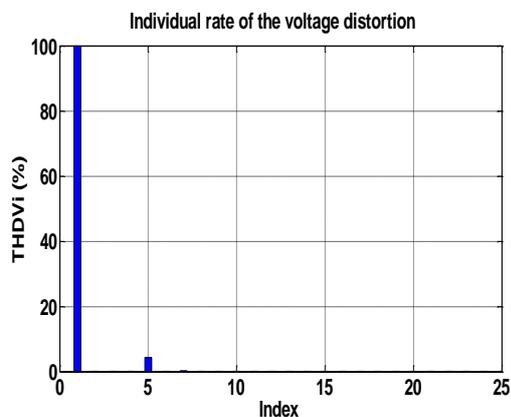


Figure III.4.5 : Taux individuels de distorsion en tension

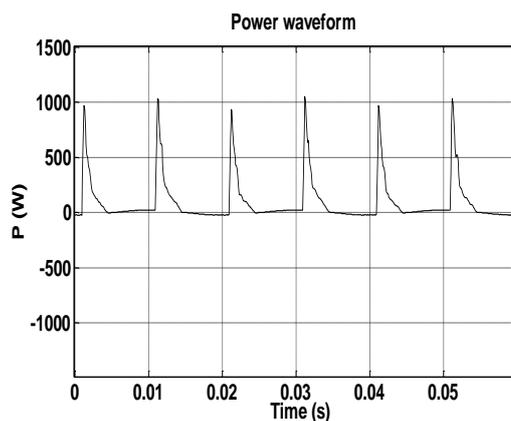


Figure III 4.6 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Des Figures III.4.2, III.4.3, 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 du 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, [3, 4, 6, 11, 13, 14,15].

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.

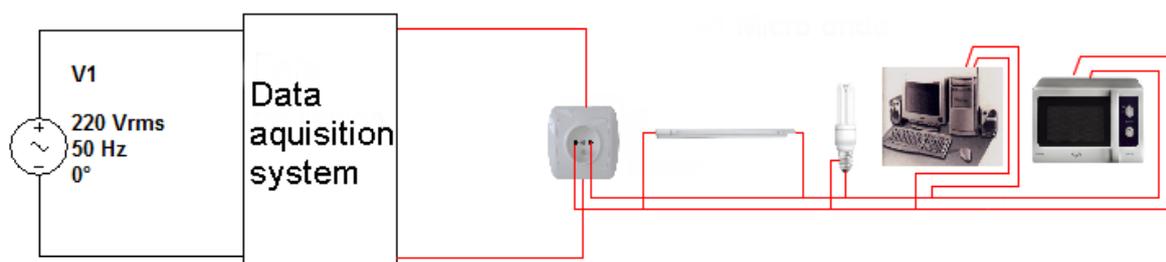


Figure III.4.7. Schéma du montage expérimental pour 1 lampe fluorescente, une lampe fluo compact, un micro-ordinateur et un four à micro-onde alimenté en monophasé et montées en parallèle.

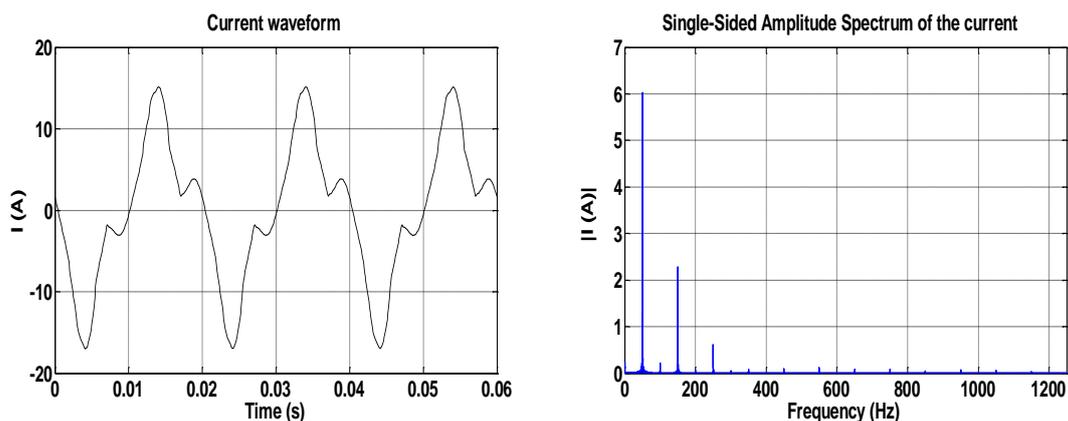


Figure III.4.8 : Représentation temporelle et spectre du courant.

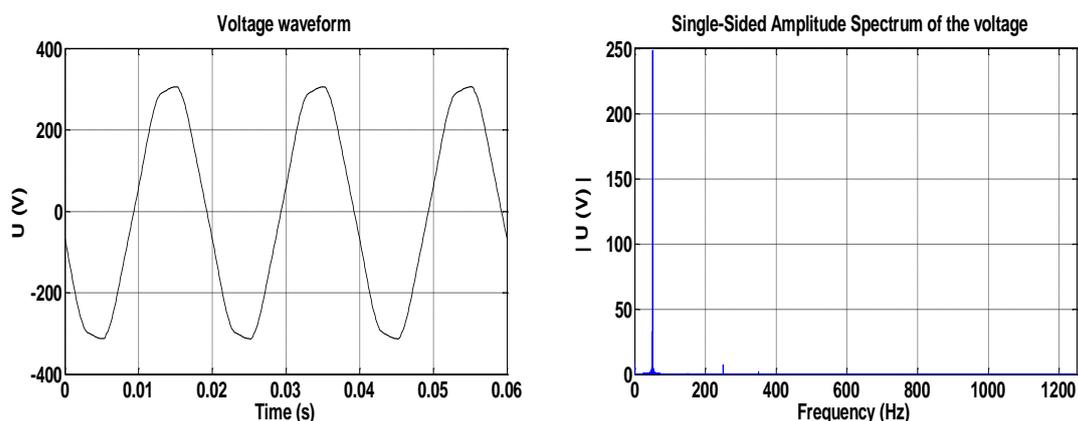


Figure III.4.9 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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
$THDI_i$ (%)	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

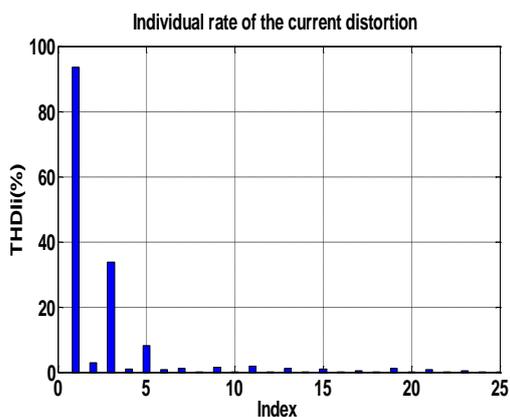


Figure III.4.10: Taux individuels de distorsion en courant.

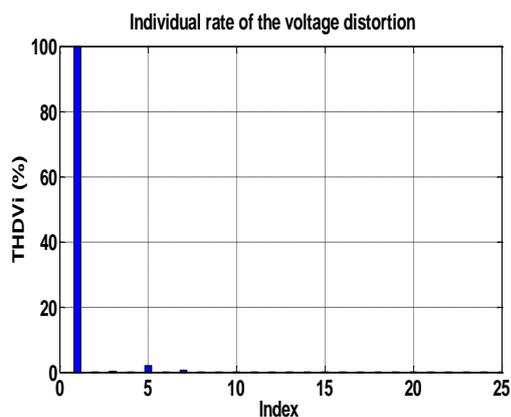


Figure III.4.11 : Taux individuels de distorsion en tension

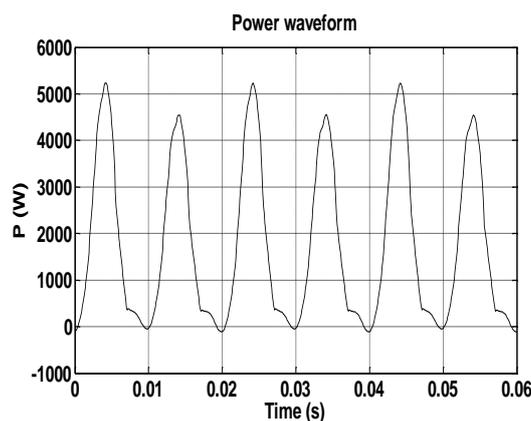


Figure III.4.12 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Les Figures III.4.8, III.4.9 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. 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. L'appellation foyer réel revient au fait qu'un consommateur domestique utilise des charges non linéaires et des charges linéaires (lampe à incandescence).

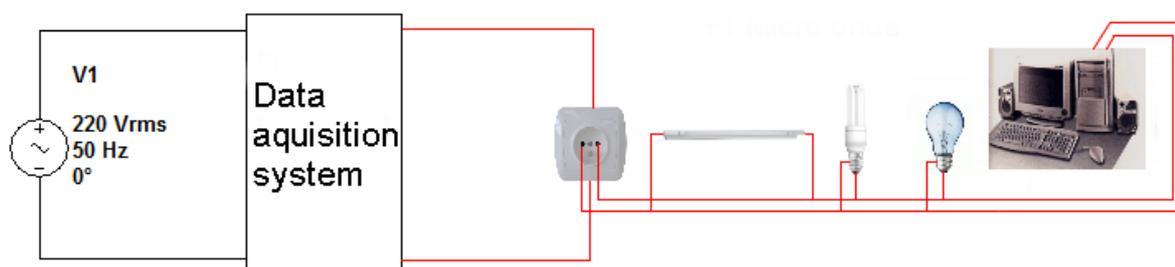


Figure III.4.13. Schéma du montage expérimental pour une lampe fluorescente, une lampe fluo compact, une lampe à incandescence et micro-ordinateur alimenté en monophasé et montées en parallèle.

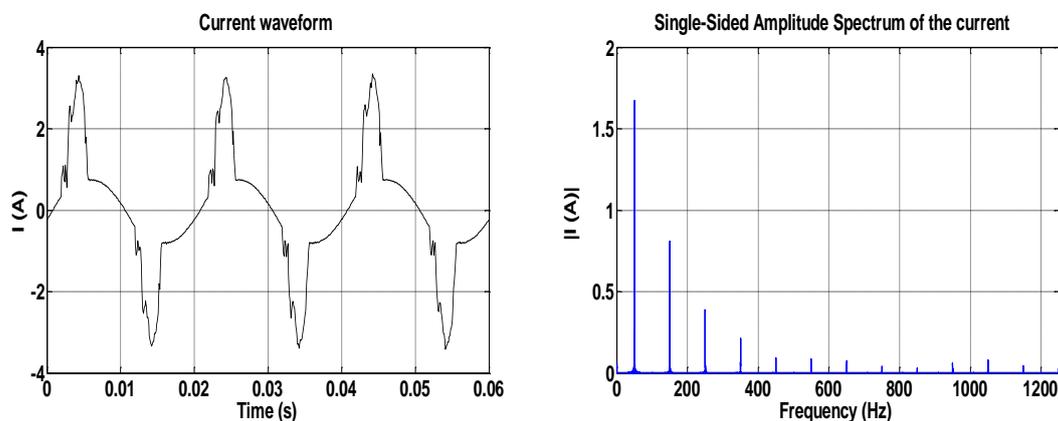


Figure III.4.14 : Représentation temporelle et spectre du courant.

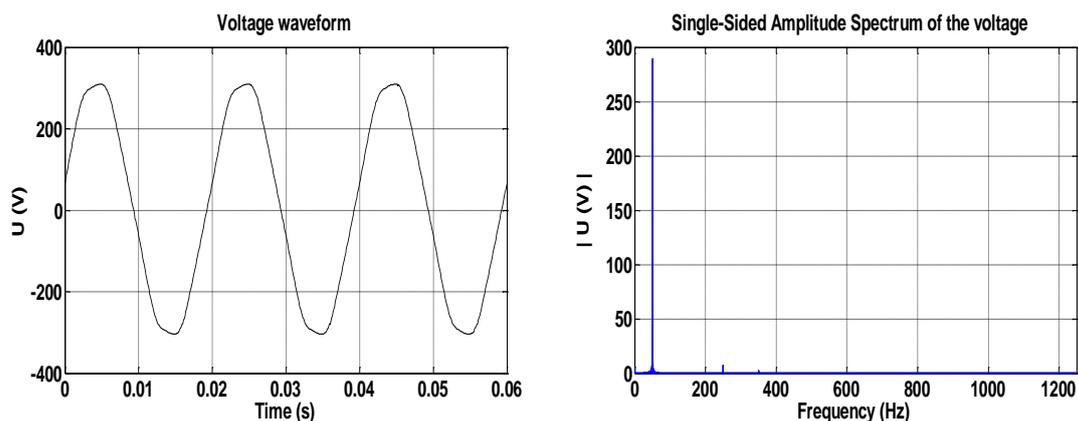


Figure III.4.15 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

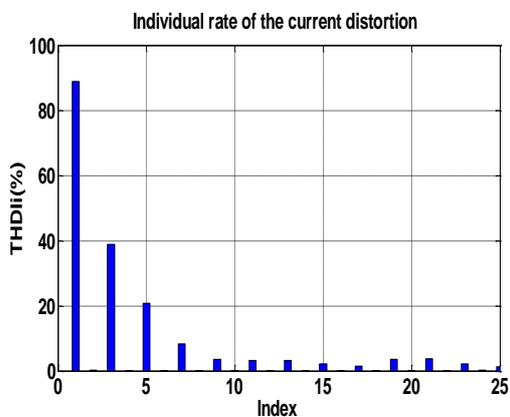


Figure III.4.16: Taux individuels de distorsion en courant.

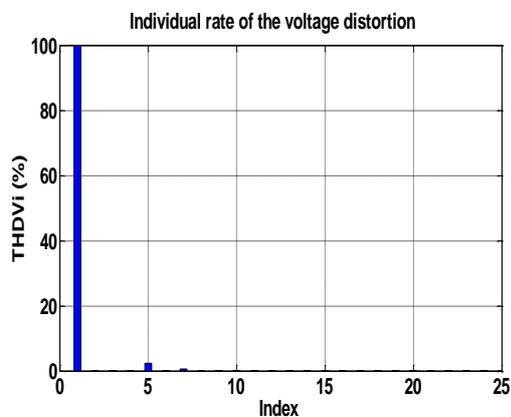


Figure III.4.17 : Taux individuels de distorsion en tension.

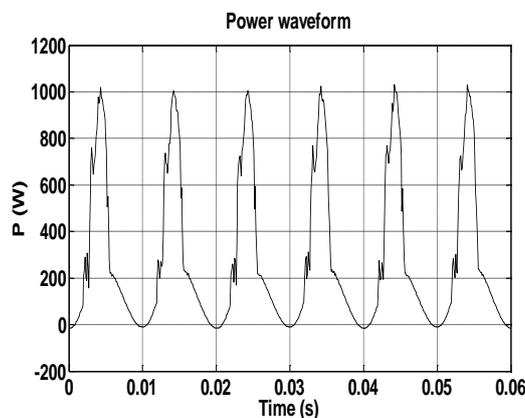


Figure III.4.18 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Des Figures III.4.14, III.4.15 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 de même grandeur. La diversité de topologies ces différents appareils provoque une diversité d'angles de phase des courants harmoniques générés par ces dispositifs. Cela conduit à une somme vectorielle inférieure à la somme arithmétique (qui néglige les angles de phase), Un facteur de diversité est défini comme le rapport entre la somme vectorielle (mesurée) et la somme arithmétique des harmoniques [13], [14], [15] - [20].

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 [2].

Paramètres	Type de charges		
	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
I_1 (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
U_1 (V)	212.2173	220.9128	221.0195

U_h (V)	90.7160	43.4265	23.3405
P (W)	56.5190	597.0656	161.5429
P_1 (W)	43.9285	464.2636	156.9101
P_h (W)	12.5905	132.8020	4.6327
S (VA)	106.8230	813.0055	188.6767
S_1 (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
D_1 (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
F_p	0.5291	0.7344	0.8562
$\cos \theta_1$	0.7933	0.7840	0.9626

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

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 simulera un réseau électrique en utilisant 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. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. 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 [2] grâce à un script Matlab.

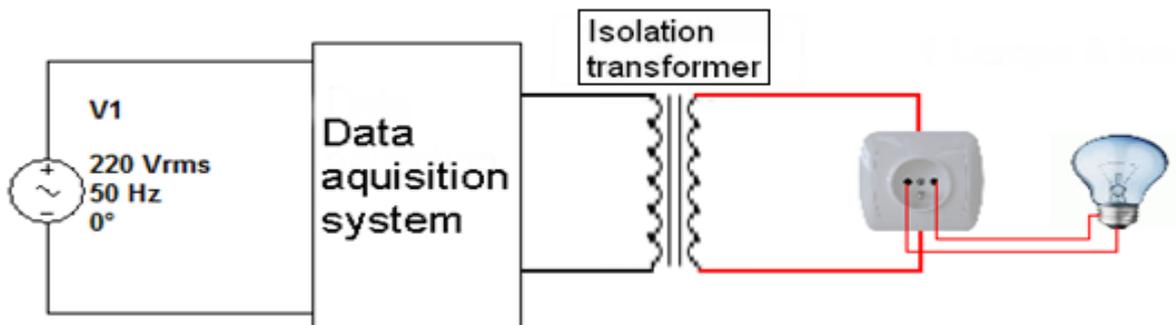


Figure III.5.1. Schéma du montage expérimental pour 1 lampe à incandescence alimenté en monophasé et alimenté à travers un transformateur d'isolement.

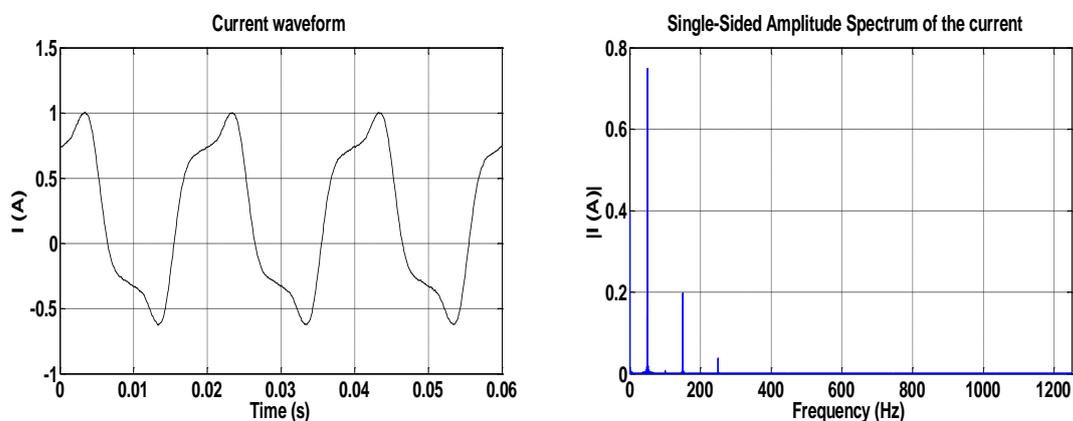


Figure III.5.2 : Représentation temporelle et spectre du courant.

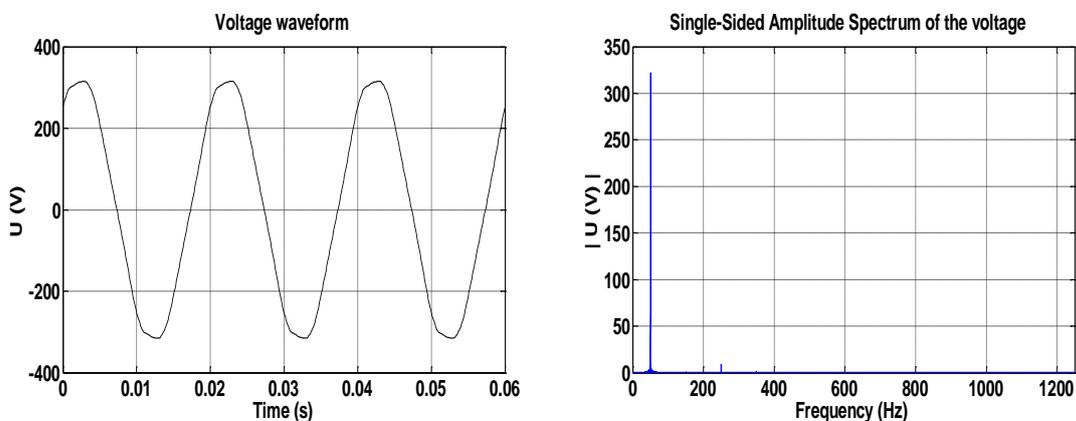
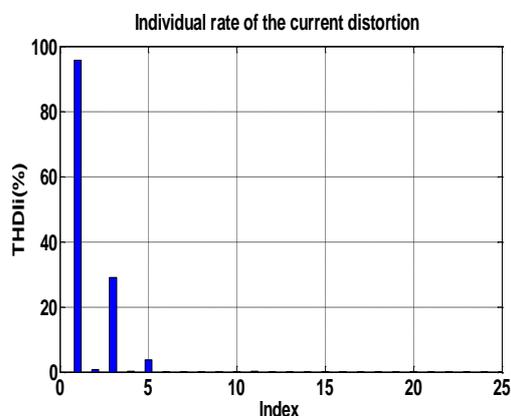
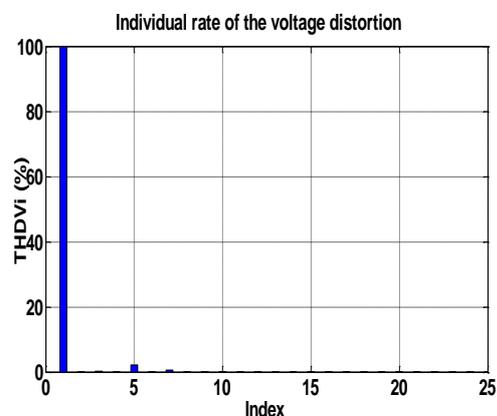
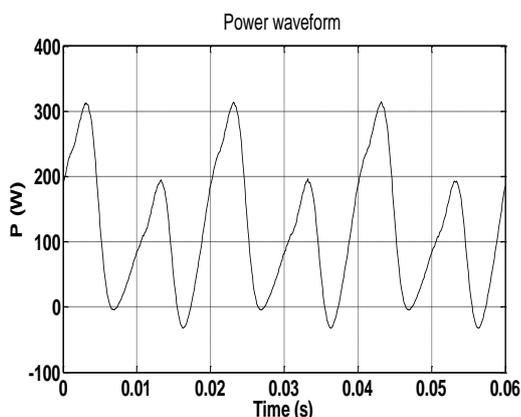


Figure III.5.3 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

n	1	2	3	4	5	11	13
THD_{i_i} (%)	95.629	0.753	28.992	0.295	3.713	0.176	0.176
THD_{v_i} (%)	99.948	0.103	0.273	0.033	2.110	0.150	0.00

**Figure III.5.4** : Taux individuel de distorsion en courant.**Figure III.5.5** : Taux individuel de distorsion en tension**Figure III.5.6** : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Des Figures III.5.2, III.5.3, 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. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. 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.

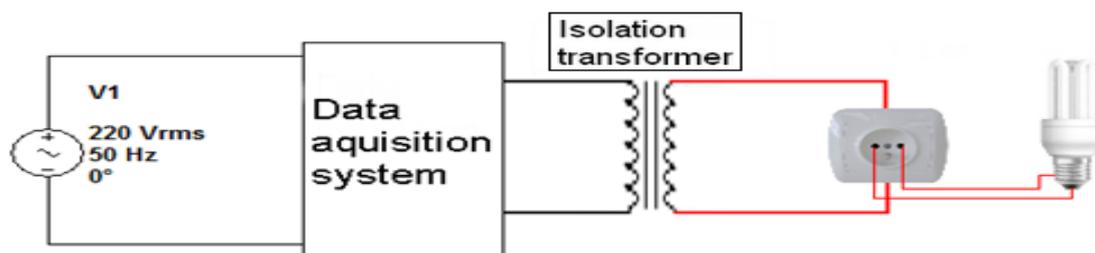


Figure III.5.7. Schéma du montage expérimental pour 1 lampe fluo compact alimenté en monophasé et alimenté à travers un transformateur d'isolement.

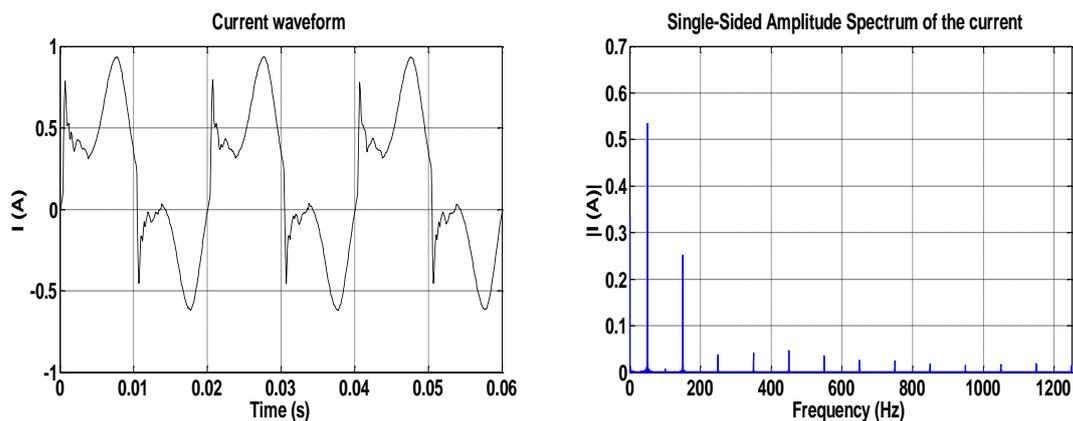


Figure III.5.8 : Représentation temporelle et spectre du courant.

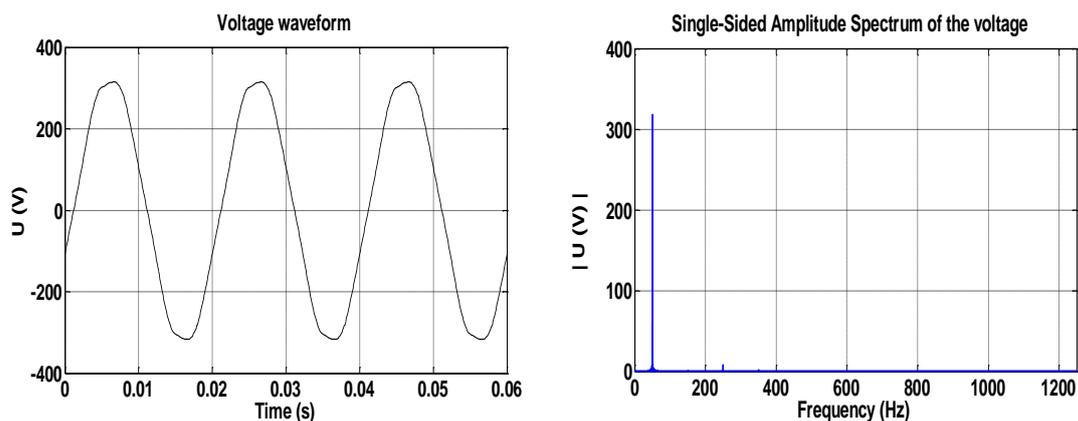


Figure III.5.9 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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
THDi(%)	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
THDVi(%)	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

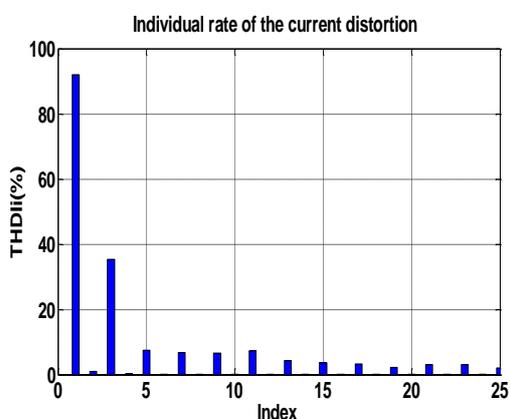


Figure III.5.10: Taux individuels de distorsion en courant.

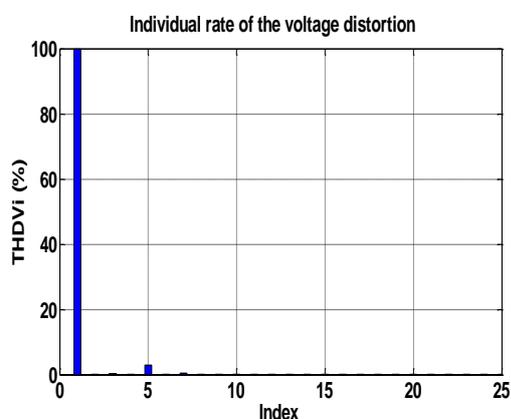


Figure III.5.11: Taux individuels de distorsion en tension

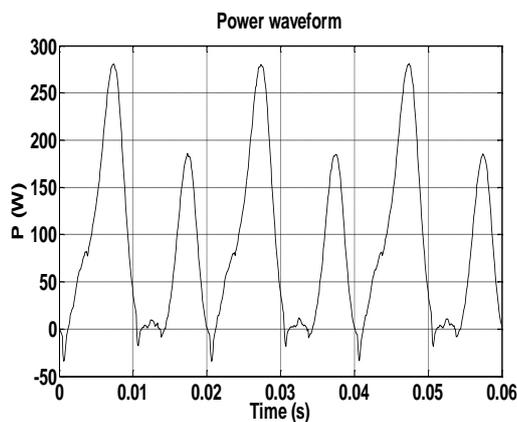


Figure III.5.12 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

De la Figure III.5.8 et de la Figure III.5.9 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. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. 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.

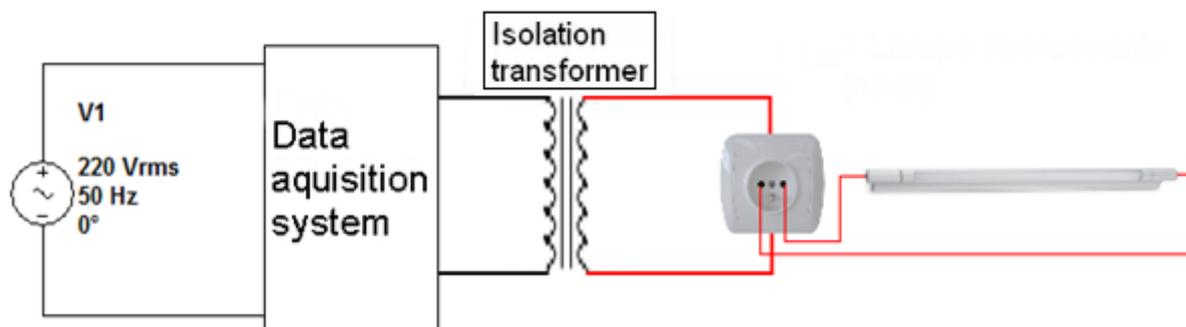


Figure III.5.13. Schéma du montage expérimental pour une lampe fluorescente alimentée en monophasé et alimentée à travers un transformateur d'isolement.

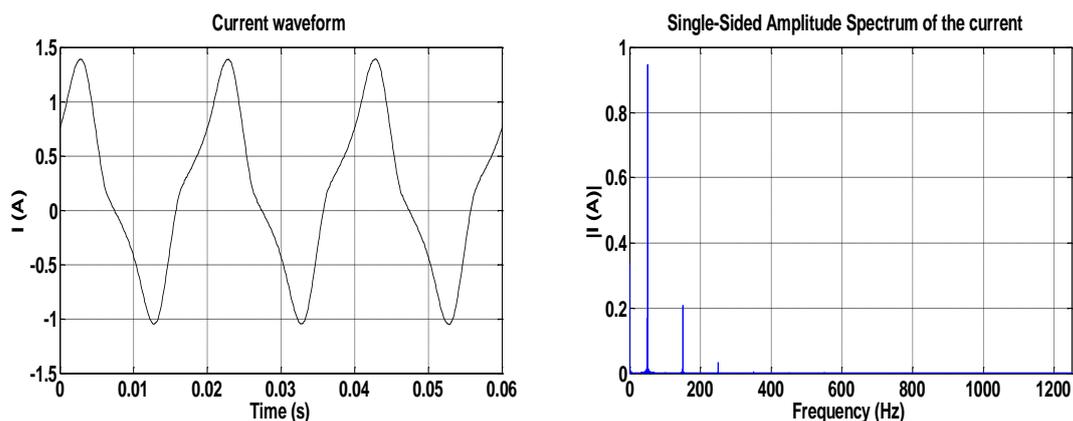


Figure III.5.14 : Représentation temporelle et spectre du courant.

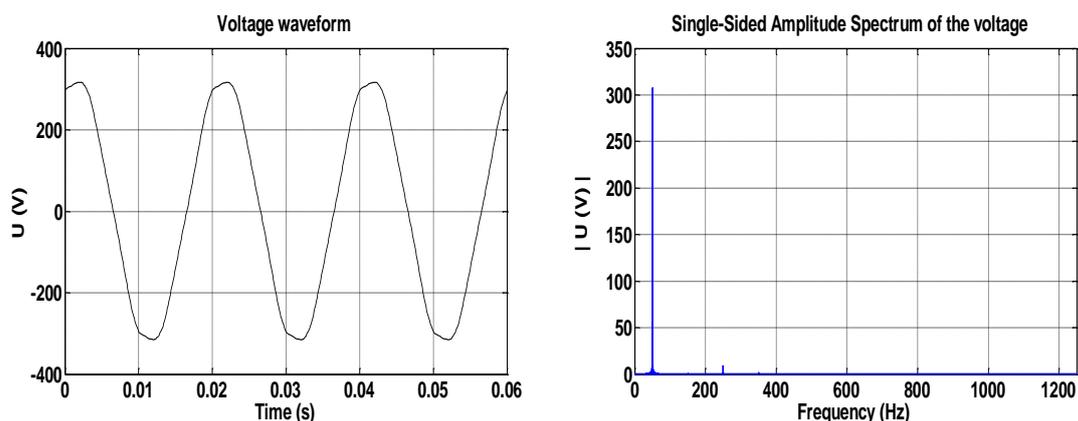


Figure III.5.15 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

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

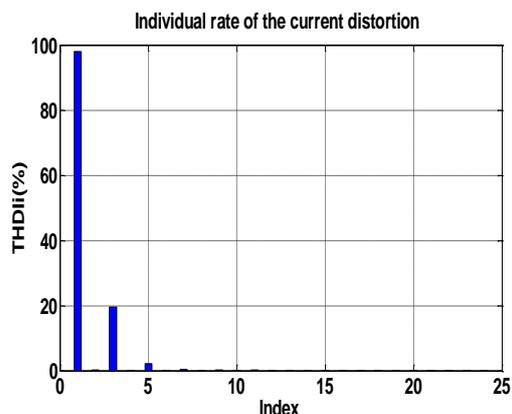


Figure III.5.16: Taux individuels de distorsion en courant

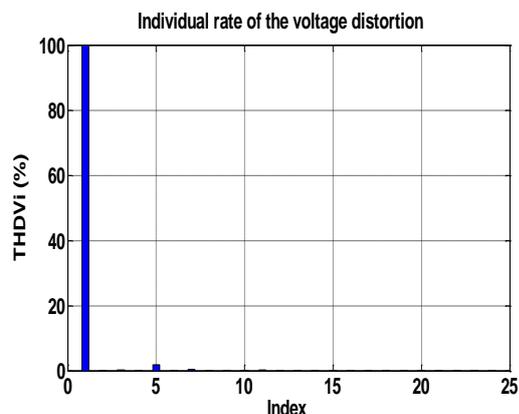


Figure III.5.17 : Taux individuels de distorsion en tension

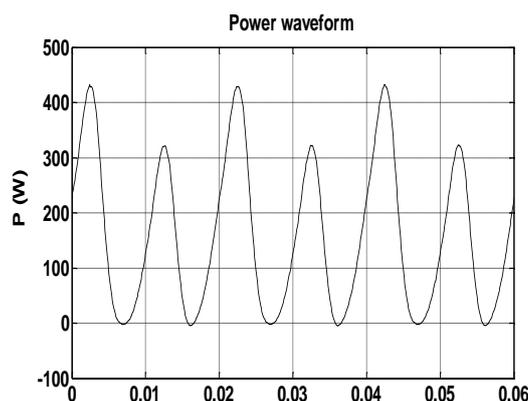


Figure III.5.18 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Les Figure III.5.14, III.5.15 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 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. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. 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.

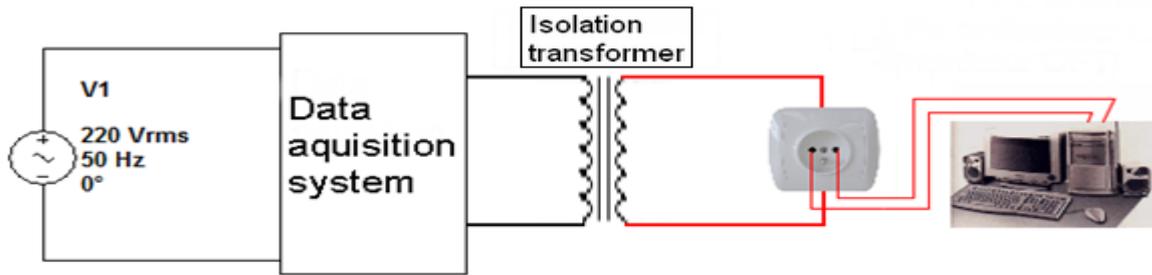


Figure III.5.19. Schéma du montage expérimental pour un micro-ordinateur alimenté en monophasé et alimenté à travers un transformateur d'isolement.

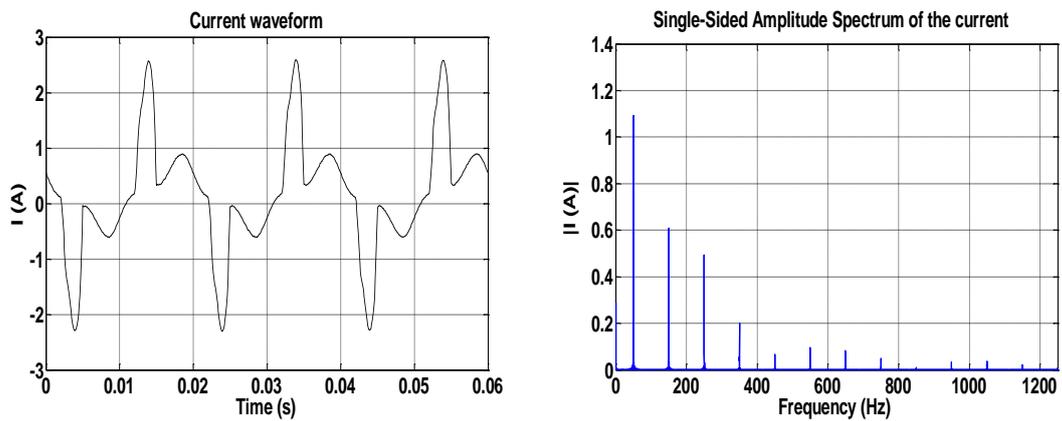


Figure III.5.20 : Représentation temporelle et spectre du courant.

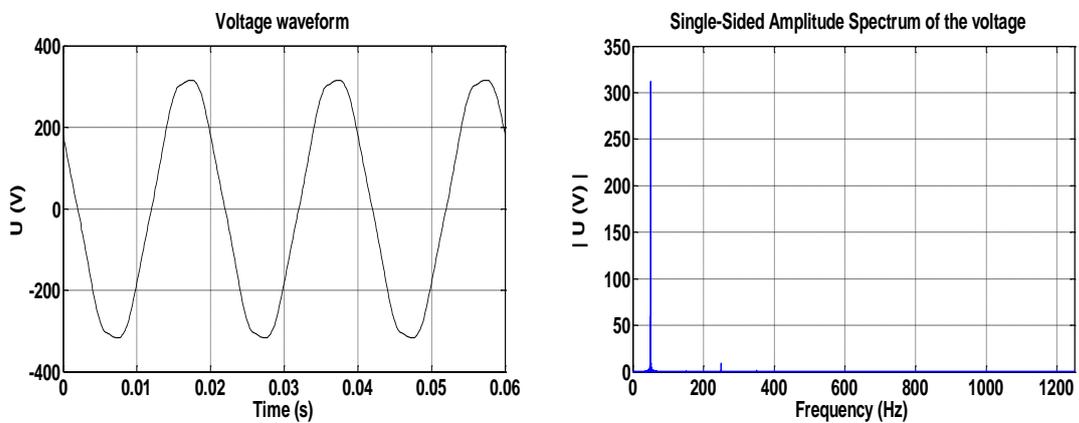
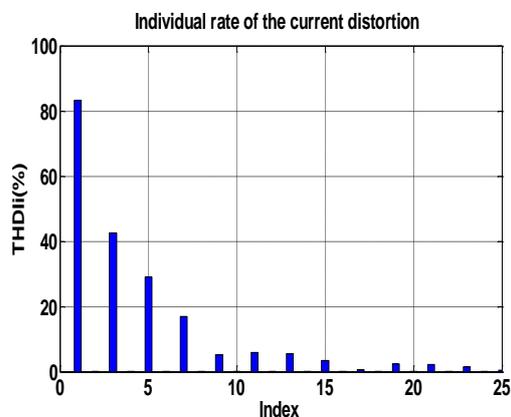
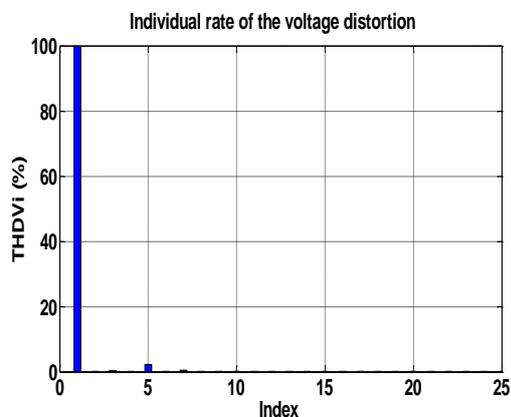
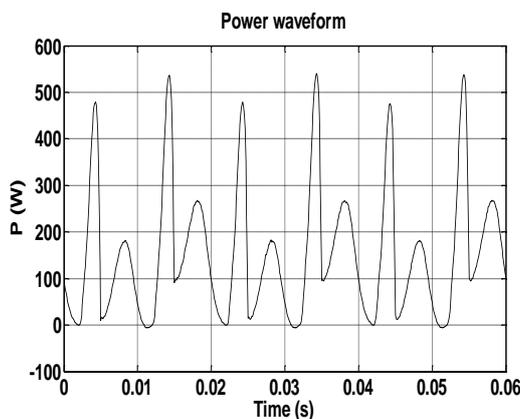


Figure III.5.21 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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
$THD_i(\%)$	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
$THD_v(\%)$	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

**Figure III.5.22**: Taux individuels de distorsion en courant.**Figure III.5.23** : Taux individuels de distorsion en tension**Figure III.5.24** : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Des Figures III.5.20, III.5.21 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. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. 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.

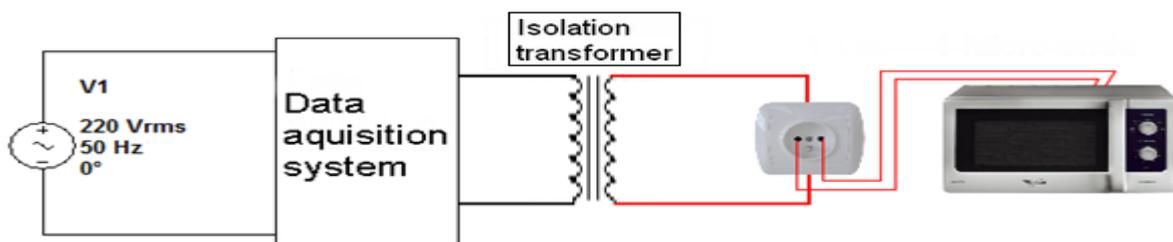


Figure III.5.25. Schéma du montage expérimental pour 1 micro-ondes alimenté en monophasé et alimenté à travers un transformateur d'isolement.

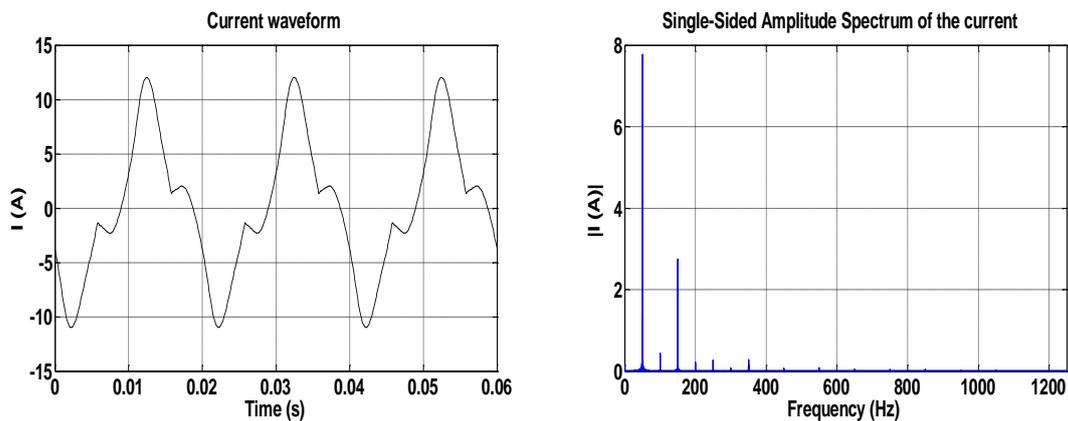


Figure III.5.26 : Représentation temporelle et spectre du courant.

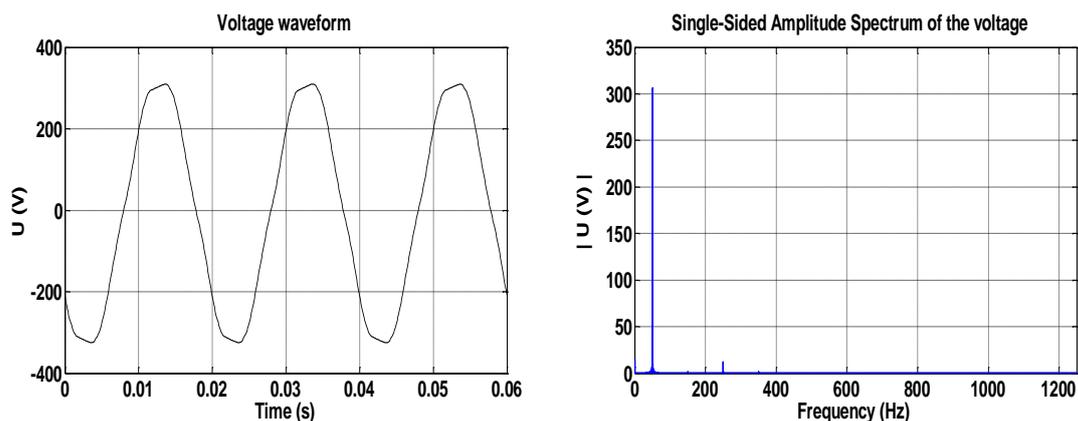


Figure III.5.27 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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

n	1	2	3	4	5	6	7	9	11	13
<i>THDi</i> (%)	94.9	5.94	30.5	2.22	2.3	0.73	2.40	0.67	0.89	0.58
<i>THDVi</i> (%)	99.9	0.00	0.50	0.00	2.9	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00

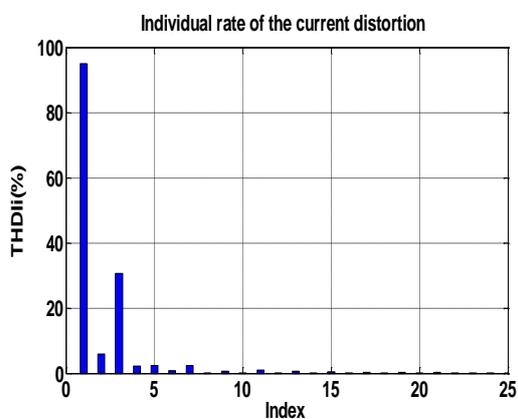


Figure III.5.28: Taux individuel de distorsion en courant.

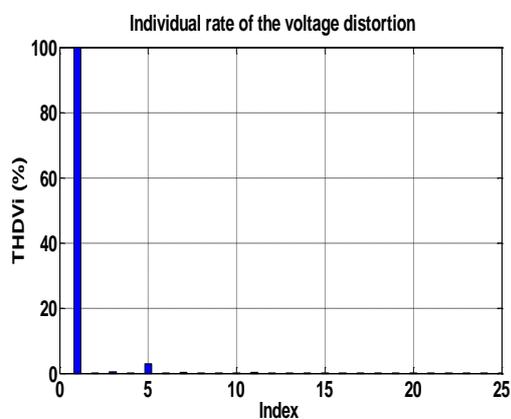


Figure III.5.29: Taux individuel de distorsion en tension

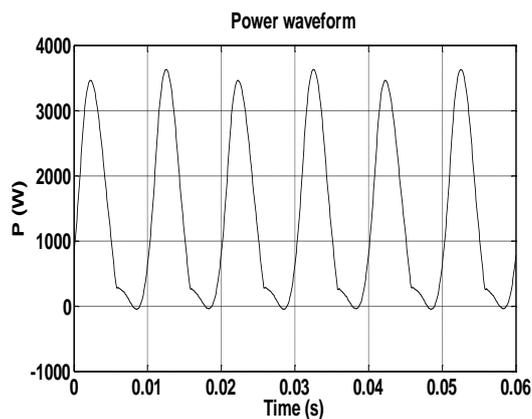


Figure III.5.30 : La puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Des Figure III.5.26, III.5.27 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. Les caractéristiques des constructeurs sont données dans l'annexe A. 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.

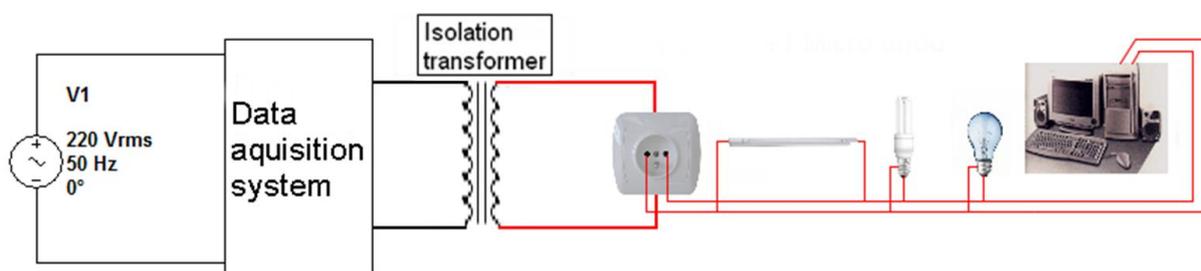


Figure.III.5.31. Schéma du montage expérimental pour une lampe fluo compact, une lampe fluorescente, une lampe à incandescence et un micro-ordinateur alimenté en monophasé et alimenté à travers un transformateur d'isolement.

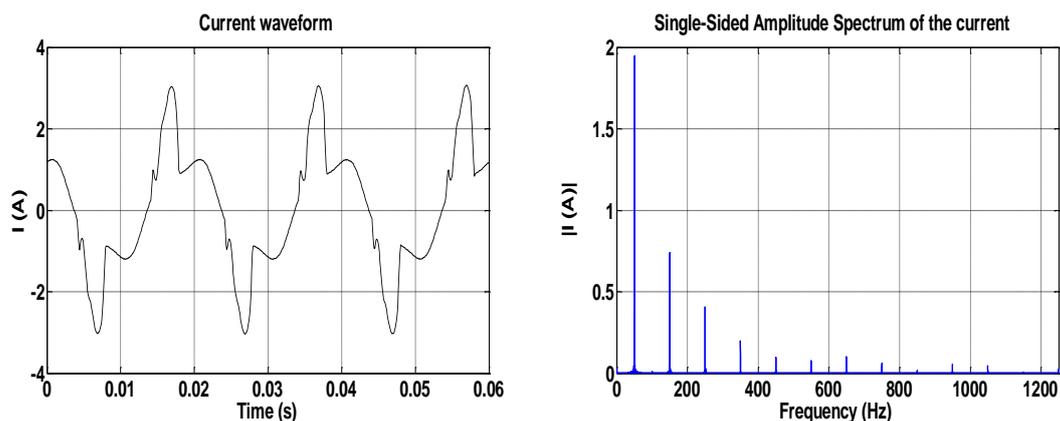


Figure III.5.32 : Représentation temporelle et spectre du courant.

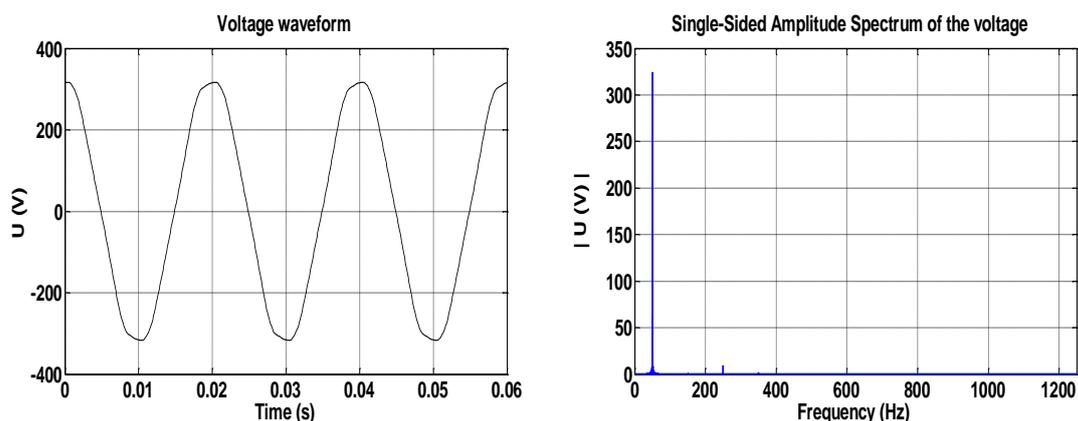


Figure III.5.33 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

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
$THDi_i(\%)$	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
$THDVi(\%)$	99.9	0.3	2.7	0.6	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0

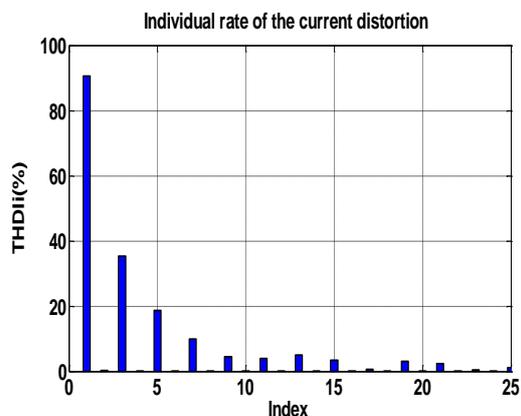


Figure III.5.34: Taux individuels de distorsion en courant

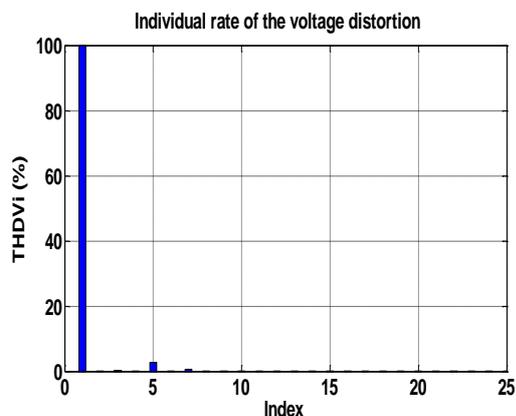


Figure III.5.35 : Taux individuels de distorsion en tension

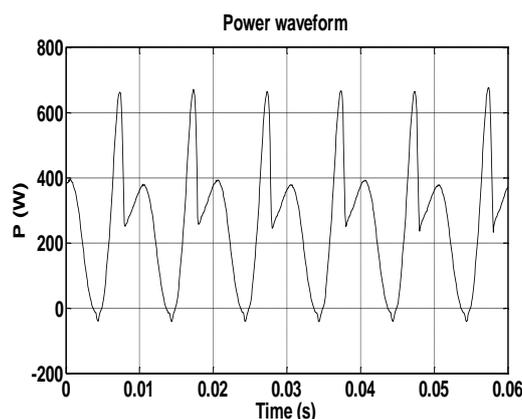


Figure III.5.36 : Puissance instantanée.

Analyse et interprétation

Des Figures III.5.32, III.5.33 on remarque que la distorsion due à l'ensemble des appareils montés au secondaire de transformateur se retrouve à son primaire avec une diminution de la distorsion en courant comparativement à l'essai sur un foyer réel de l'étude n° 3, ainsi qu'une légère augmentation de la distorsion en tension. C'est résultat portant sur la distorsion en courant et en tension sont vérifiés par les valeurs des tableaux 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.

Paramètres	Type de charges					
	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
Fp	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 FPEM 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 les 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 transmise. Cette dégradation de la qualité électrique affecte tous les équipements installés sur ces réseaux. L'influence des charges non linéaires sur le réseau électrique diffère d'une charge à une autre, et les charges les plus perturbatrices sont celles avec une grande consommation d'énergie ou celle avec une grande distorsion harmonique en courant citons les fours à micro-onde et les lampes fluo compact respectivement. L'effet collectif des charges non linéaires (cas d'un foyer) est désastreux sur les réseaux, car on peut faire une extrapolation sur plusieurs foyers ainsi que sur le nombre de charges utilisées par chaque foyer et sous l'effet de l'atténuation et de la diversité on aura une large distorsion en tension ce qui dégradera la qualité de la tension.

Bibliographies

- [1] 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.
- [2] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Un-balanced Conditions, IEEE Std. 1459, Jan. 2010.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8]Angelo Baggini,” Handbook of Power Quality”, John Wiley & Sons Ltd,2008. pp. 173–182.
- [9]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.
- [10] Standard ANSI/IEEE C57.110, 1998, "Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents," February 1998.
- [11] 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.
- [12] 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.

- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Edited by P.F. Ribeiro, "Time – varying waveform distortions in power systems", John Wiley & Sons, 2009. pp. 115–133.
- [19] P. F. Ribeiro, "Investigations of harmonic penetration in transmission systems", chapter 6, PhD Thesis, The Victoria University of Manchester, UK, 1985. pp. 154–188.
- [20] 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.

CHAPITRE IV

MODÉLISATION D'UNE LAMPE FLUO COMPACT (CFL) DE TYPE PHILIPS ESSENTIAL

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.

La raison de la popularité croissante de la CFL est qu'elle économise de l'énergie électrique, et par suite, réduit le coût de la facture énergétique par rapport aux traditionnelles lampes à incandescence. Pour produire la même quantité de lumière, les lampes CFL consomment seulement un tiers de la puissance d'une lampe à incandescence [1]. La durée de vie moyenne d'une CFL est comprise entre 8 à 15 fois celle des lampes à incandescence [4, 7, 8]. Les CFL ont généralement une durée de vie nominale comprise entre 6000 et 15 000 heures, alors que les lampes à incandescence sont généralement fabriquées pour avoir une durée de vie de 750 à 1000 heures [4].

La différence majeure entre les lampes fluo compact et les lampes à incandescence, est qu'elles présentent des caractéristiques de résistance négative. Ce qui signifie que plus la lampe fluo compact consomme de la puissance, plus il y a augmentation du courant appelé par la lampe avec une diminution de la tension de la lampe. Par conséquent, les lampes fluo compact ne peuvent pas être connectées directement à la ligne, comme dans le cas des lampes à incandescence [14].

Un élément de stabilisation de courant de lampe appelé ballast est nécessaire afin de fournir une tension suffisante pour son allumage et la stabilisation du courant, jusqu'à ce que l'arc de la lampe soit établi. Pour offrir une solution compacte et légère pour les lampes CFL, des ballasts électroniques fonctionnant à une fréquence élevée supérieure à 25 kHz sont plus appropriés que les ballasts magnétiques. En fonctionnant à une fréquence plus élevée, l'efficacité lumineuse peut être augmentée d'au moins 20 (%) et un contrôle avancé de la gradation peut également être mis en œuvre avec une grande flexibilité. Pour diminuer le coût et veiller à ce qu'un ballast électronique compact puisse être installé à la base d'une CFL, ces lampes commerciales ne comprennent pas un circuit de correction du facteur de puissance (PFC) dans leurs ballasts électroniques [5].

IV.2 Description de la lampe économique de type CFL :

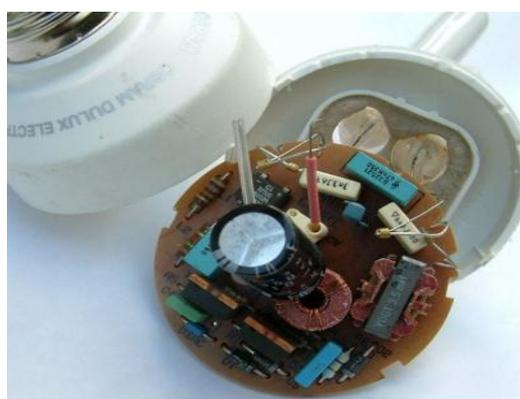
L'avancé technique le plus important a été le remplacement des ballasts magnétiques par des ballasts électroniques, cela a permis de supprimer la plupart du scintillement et le démarrage long associé à un éclairage fluorescent [9]. Il existe deux types de lampes fluorescentes compactes: Lampes intégrées et Lampes non intégrées.

Les lampes CFL intégrées combinent un tube et un ballast électronique. Elles sont soit à vis Edison ou à baïonnette dans une seule unité. Ces lampes permettent aux consommateurs de remplacer les lampes à incandescence par des CFL facilement. Les CFL intégrées fonctionnent bien dans de nombreux standards luminaires à incandescence, ce qui réduit le coût de la conversion aux fluorescences.

Les lampes CFL non intégrées ont le ballast installé en permanence dans le luminaire, et seulement la lampe est habituellement changée à la fin de sa vie. Étant donné que les ballasts sont placés dans l'appareil d'éclairage, ils sont plus grands et durent plus longtemps par rapport à ceux des lampes intégrées, et ils n'ont pas besoin d'être remplacés lorsque le bulbe atteint sa fin de vie. Le boîtier des CFL non intégrés peut être à la fois plus coûteux et sophistiqué. Ils ont deux types de tubes: un tube à deux broches conçu pour un ballast classique, et un tube à quatre broches conçu pour un ballast électronique ou un ballast classique avec une entrée externe. Un tube bi-broches contient un démarreur intégré qui élimine la nécessité pour les broches du chauffage extérieur, mais provoque une incompatibilité avec des ballasts électroniques.



(a)



(b)

Figure IV.1. (a) Ballast électronique pour des CFL non intégrées (b) Ballast électronique et tube permanent attaché à la CFL.

Il y a deux parties principales dans une CFL, à savoir :

1- Un tube rempli de gaz (également appelé ampoule) :

Quand un courant électrique sortant du ballast s'écoule à travers le gaz (vapeur de mercure), ce dernier émet de la lumière ultraviolette. La lumière ultraviolette excite alors un revêtement du phosphore à l'intérieur du tube. Ce revêtement émet de la lumière visible.

2- Un ballast électronique (cas de la lampe CFL de type Philips 11W essential) :

Les ballasts électroniques contiennent un petit circuit avec des redresseurs, un condensateur du filtrage et habituellement deux transistors de commutation connectés en tant qu'onduleur série à haute fréquence de résonance. La fréquence élevée qui en résulte, d'environ 40 kHz ou plus, est appliquée sur le tube de la lampe. Le convertisseur résonnant tend à stabiliser le courant de lampe (et de la lumière produite) sur une plage de tensions d'entrée [11, 12,13].

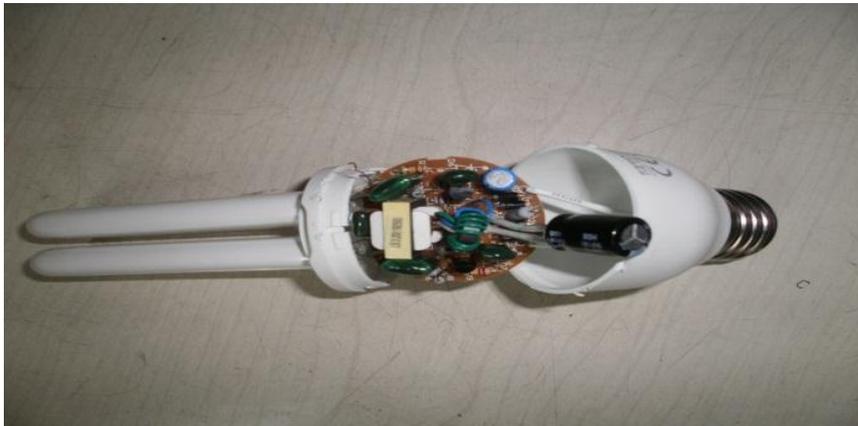


Figure IV.2. Vue de la lampe CFL de type Philips 11W essential.

IV.3. Principe de fonctionnement

Lorsque la lampe est allumée, il y a une tension importante à travers les électrodes, de sorte que les électrons migrent à travers le gaz à partir d'une extrémité du tube à l'autre. Cette énergie change une partie du mercure dans le tube à partir d'un liquide à un gaz. Comme les électrons et les atomes chargés se déplacent à travers le tube, certains d'entre eux vont entrer en collision avec les atomes de mercure gazeux. Ces collisions excitent les atomes, les électrons se déplacent à des niveaux élevés d'énergie. Lorsque les électrons retournent à leur niveau d'énergie d'origine, ils libèrent des photons de lumière. Les électrons des atomes de mercure sont disposés de telle manière à libérer une lumière ultraviolette. Nos yeux ne voient pas les rayons ultraviolets, pour que ce genre de besoin la lumière doit être converti en lumière

visible. C'est là que le phosphore revêtement du tube entre en jeu. La lumière émise est dans le spectre visible, le phosphore émet de la lumière blanche [13].

IV.4 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. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. On obtiendra un fichier de valeur sur le courant absorbé par cette charge et un autre sur la tension à ces bornes 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 .

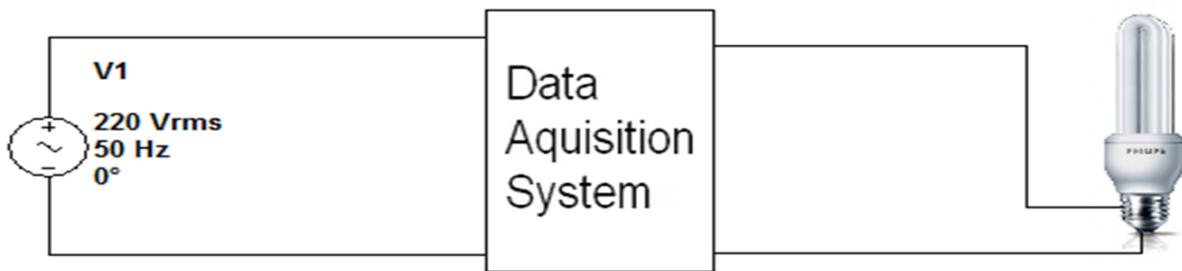


Figure IV.3. Schéma du montage expérimental

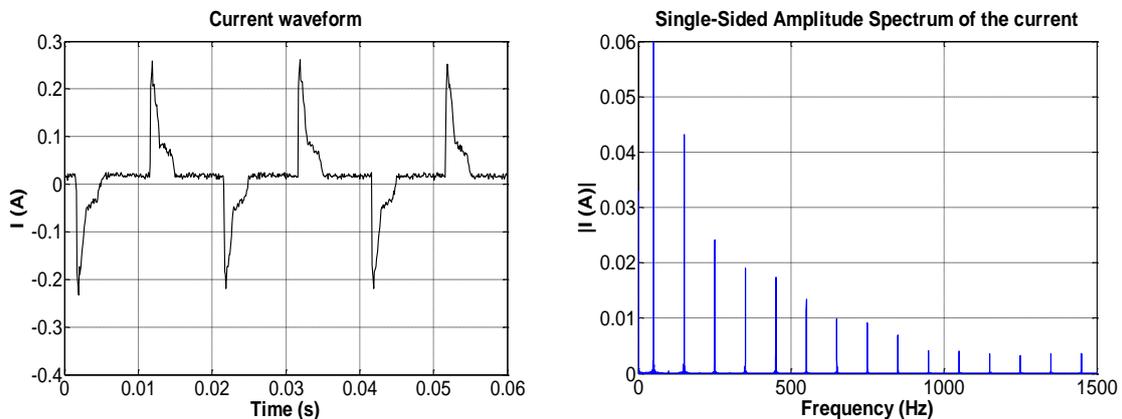


Figure IV.4 : Représentation temporelle et spectre du courant.

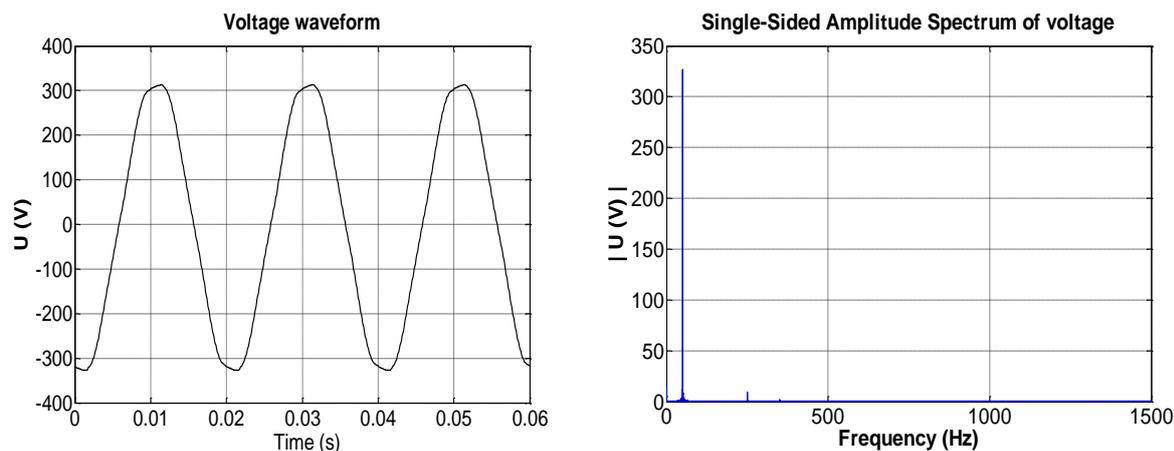


Figure IV.5 : Représentation temporelle et spectre de la tension.

Tableau IV.1. Récapitulatifs de tous les paramètres caractérisant la qualité d'énergie électrique pour la lampe CFL Philips essential 11 Watt selon la norme IEEE Std 1459-2010.

Le taux de distorsion harmonique en courant THD_I (%)	103.8318
Le taux de distorsion harmonique en tension THD_V (%)	3.2756
Le courant efficace I_{eff} (A)	0.0670
La tension efficace U_{eff} (V)	231.8641
La puissance active P (W)	4.6868
La puissance apparente S (VA)	8.9655
Le facteur de puissance FP	0.5228
Le facteur de puissance fondamental $\cos \theta_1$	0.7536
Le courant fondamental I_1 (A)	0.0388
La tension fondamentale U_1 (V)	211.1032
Le courant harmonique I_H (A)	0.0546
La tension harmonique U_H (V)	95.8978
La puissance active fondamentale P_1 (W)	3.5608
La puissance harmonique P_H (W)	1.1260
La puissance réactive Q (Var)	3.1060
La puissance apparente fondamentale S_1 (VA)	4.7251

La puissance apparente non fondamentale S_N (VA)	7.6193
La puissance déformante en courant D_I (Var)	3.4034
La puissance déformante en tension D_V (Var)	0.1547
La puissance déformante apparente S_H (VA)	3.0237
La puissance déformante D_H (Var)	2.8062
La puissance non active N (Var)	7.6429

Tableau IV.2. Taux individuels de distorsion harmonique en courant et en tension de la lampe Philips 11W essential.

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
Taux individuel de distorsion harmonique en courant $THDI_i$ (%)	69.3	48.1	31.0	21.9	27.0	14.8	13.5	8.0	8.7	3.9	5.1	4.2	4.0
Taux individuel de distorsion harmonique en tension $THDVi$ (%)	99.9	0.2	3.0	0.5	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

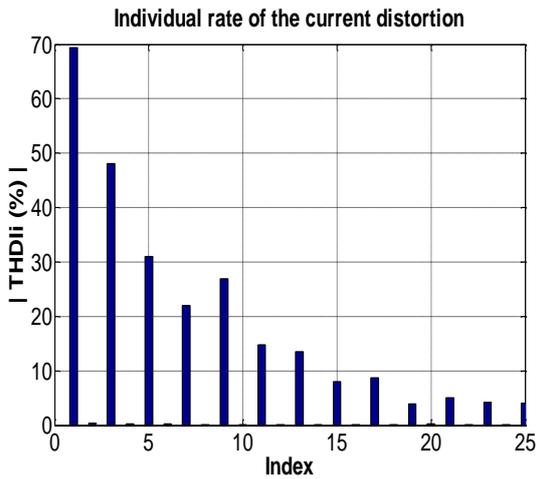


Figure IV.6 : Taux individuels de distorsion harmonique en courant.

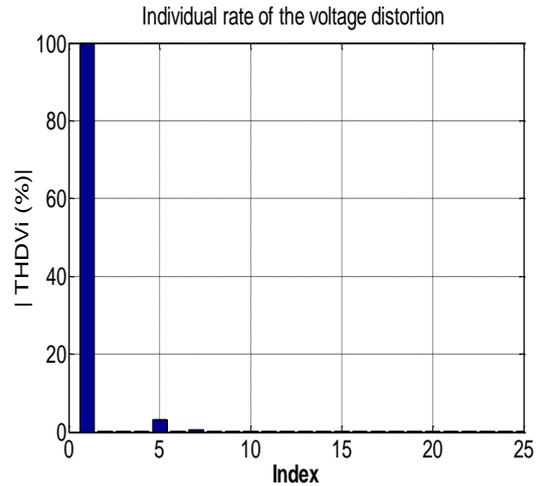


Figure IV.7 : Taux individuels de distorsion harmonique en tension.

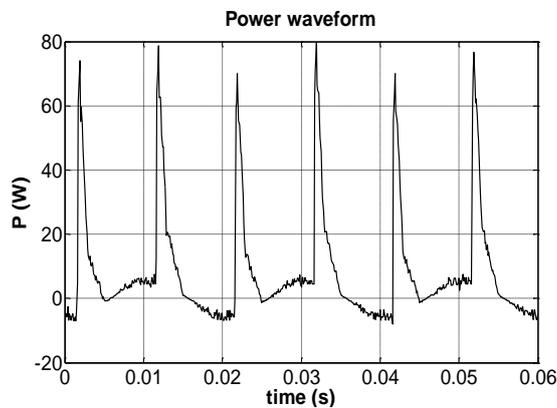


Figure IV.8 : Puissance instantanée.

Analyse, observation et interprétation des résultats:

La norme CEI 61000-3-2 .2009 [3] classe les appareils d'éclairage dans la classe C, ainsi les appareils d'éclairage à décharge ayant une puissance active d'entrée inférieure ou égale à 25 (W) doivent respecter l'une des deux prescriptions données au chapitre II.

On remarque que cette lampe répond à la seconde prescription de la norme, CEI 61000-3-2 .2009, donnée pour cette classe d'appareils. Cela avec un taux individuel de distorsion pour l'harmonique 3 de 48.1 (%) inférieur à 86 (%) et pour l'harmonique 5 de 31.0 (%) inférieur à 61 (%). La forme d'onde du courant d'entrée Figure IV.4 atteint 5 (%) en courant avant 60° et elle a sa valeur de crête avant 65° et elle n'est pas retombée en dessous du seuil de 5 % en courant avant 90°.

Mais la limite actuelle de la THD_i des CFL avec ballasts électroniques est de 15 % selon la CEI 61000-3-2 .2009. Alors que cette limite est largement dépassée par la lampe CFL Philips 11W essential que nous avons utilisée avec une $THD_i = 103.83(\%)$ ainsi cette

valeur montre bien que le contenu harmonique est supérieur à celui du fondamental, vérifié par $I_H = 0.055(A)$ alors que $I_1 = 0.039(A)$. Ce qui affecte le facteur de puissance qui est de l'ordre $FP = 0.52$

IV.5 Modélisation de la lampe CFL de type Philips 11W essential

Le rôle du ballast consiste à adapter la puissance consommée par la lampe, la régulation de la tension de décharge et la régulation du courant. Malgré leurs avantages; réduction du clignotement de la lampe, un fonctionnement plus silencieux, etc., les ballasts électroniques ont conduit à plus de distorsion que les ballasts magnétiques, [5].



Figure IV.9. Ballast de la lampe Philips essential 11W

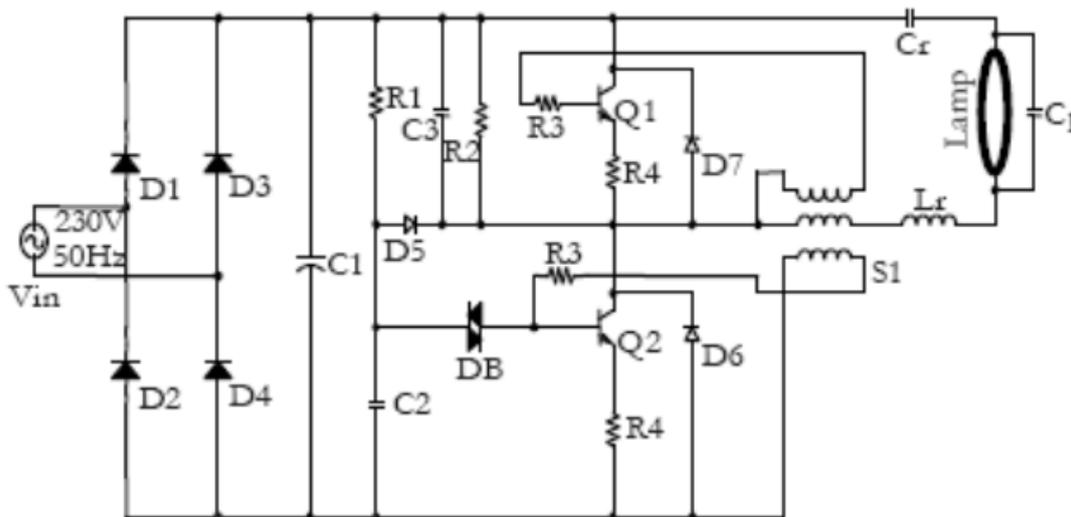


Figure IV.10. Schéma général d'un ballast d'une lampe CFL [5].

La tension de phase 230 V, 50 Hz est converti en courant continu par le pont de diode et le condensateur C1 comme le montre la Figure IV.10 ci-dessus. Puis des signaux auto-oscillant sont générés par les deux transistors en séquence alternative via un transformateur. De la Figure IV. 4 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.5.1 Calcul des éléments du montage de la simulation

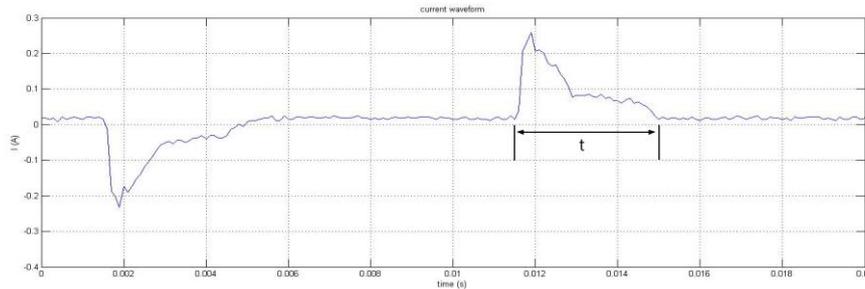


Figure IV.11. Forme d'onde du courant sur une période.

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_I à l'aide de l'analyseur de distorsion XDA1, (voir Figure IV.12), équivalent à celui obtenu expérimentalement, c'est à dire $THD_I = 103.83\%$.

IV.5.2 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.

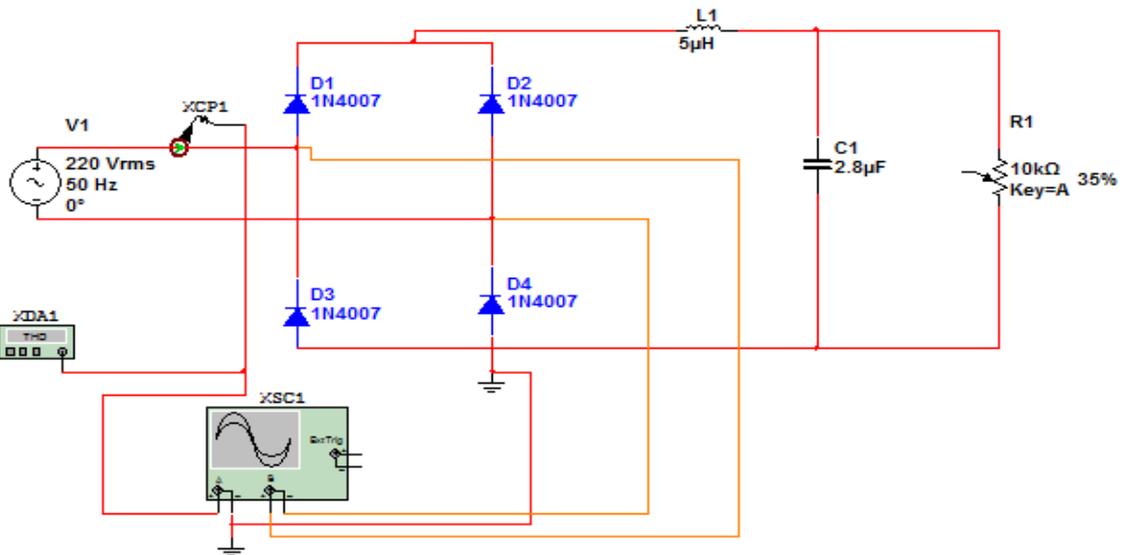


Figure IV.12 Schéma équivalent du circuit électrique de la lampe CFL Philips essential 1W.

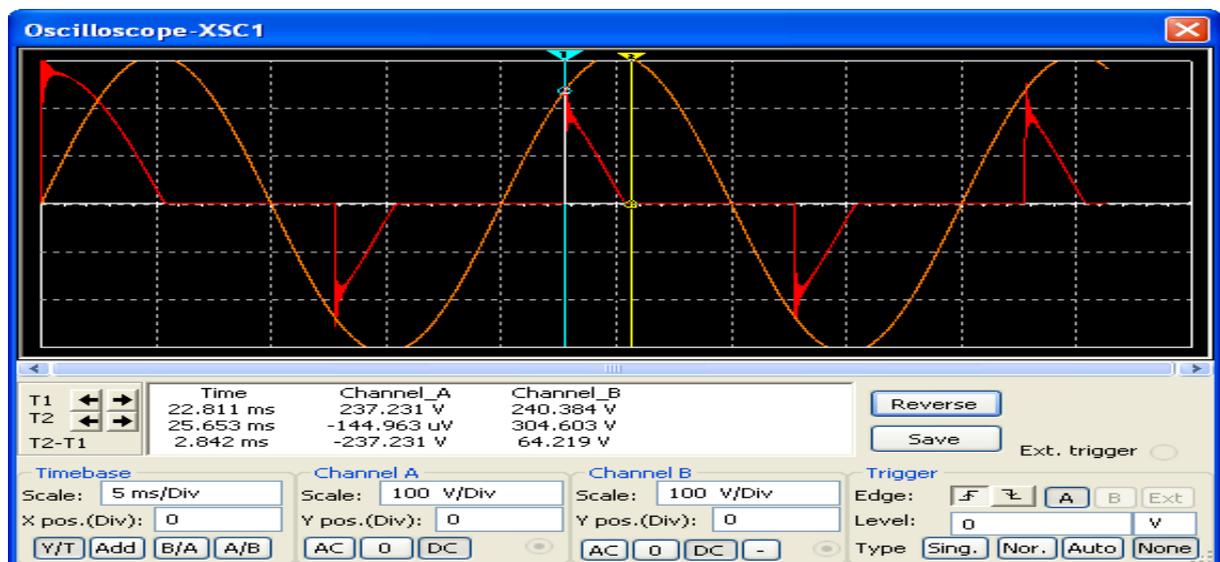


Figure IV.13. Formes d'ondes du courant et de la tension du circuit électrique équivalent de la lampe CFL Philips essential 1W (rouge=courant, orange=tension).

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.13.

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.

IV.5.3 Amélioration de la forme d'onde du courant,

À partir du modèle du circuit électrique équivalent de la lampe CFL Philips essential 11W, on introduit un filtre CL en amont du pont à diode et cela dans le but de filtrer le courant

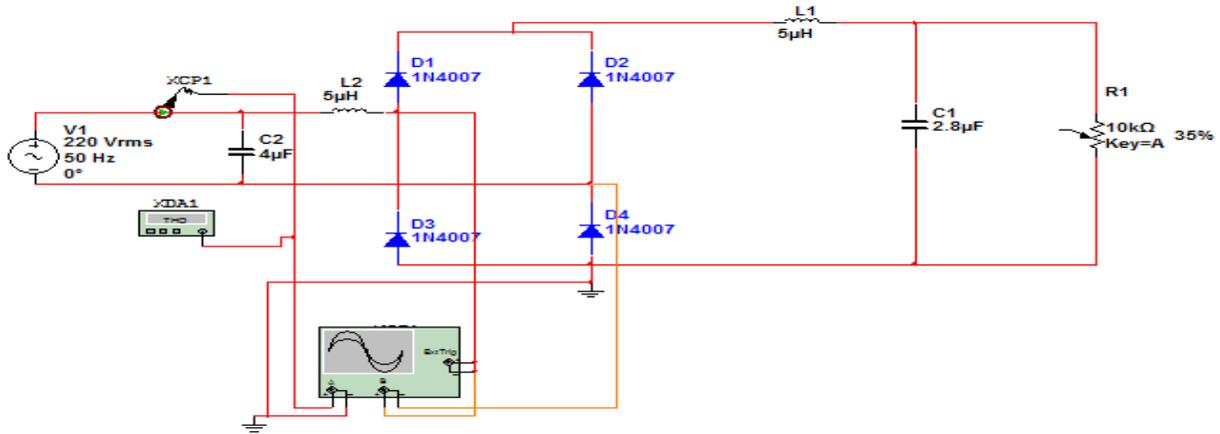


Figure IV.14. Schéma équivalent du circuit électrique amélioré de la lampe CFL Philips 11W essential.

IV.5.4 Calcul préliminaire des valeurs de la capacité et de l'inductance

On doit surveiller l'impédance de ce circuit à la fréquence 50 Hz, un mauvais choix des dimensions du filtre pourrait court-circuiter le fondamental, ainsi il faut veiller à ce que $LC\omega_1^2 \neq 1$.

On choisira une valeur de capacité et d'inductance du filtre LC dans le but d'avoir une $THD_I < 15(\%)THD$. On a opté pour une $THD_I=14.662(\%)$.

Ainsi notre choix portera sur :

$$\begin{cases} L = 5\mu H \\ C = 4\mu F \end{cases}$$

Ce choix permet d'avoir une distorsion en courant dans les limites acceptables par la CEI 61000-3-2 [3]. On pourrait affiner le filtrage encore plus, mais, en pratique cela va se traduire par des coûts supplémentaires inutiles.

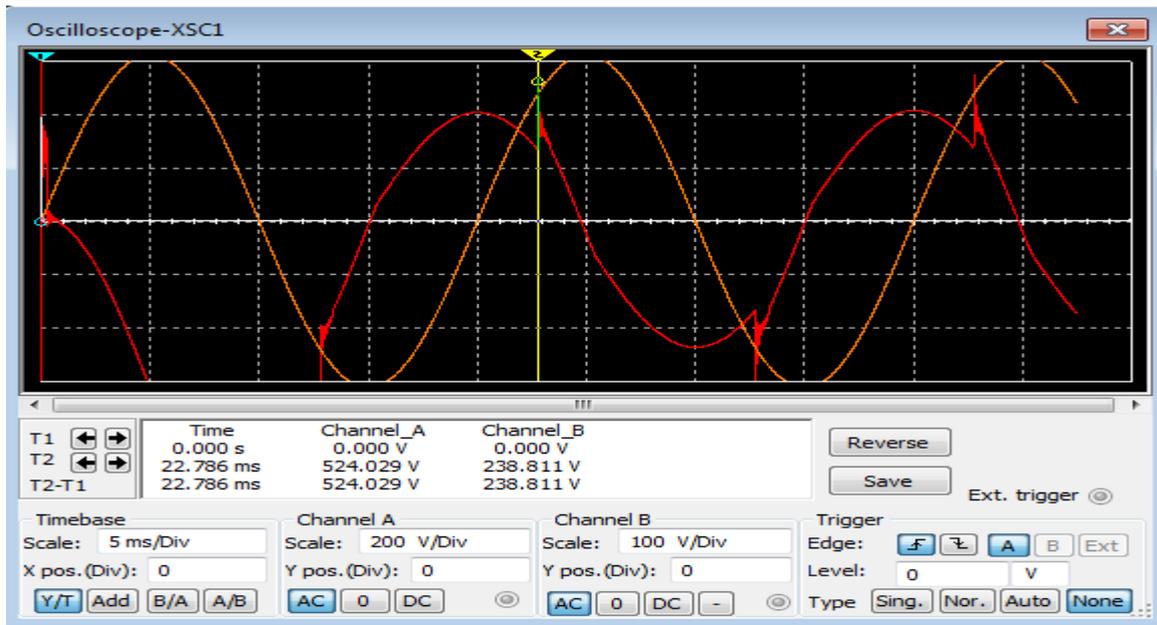


Figure IV.15. Formes d'ondes du courant et de la tension du circuit électrique amélioré de la lampe CFL Philips essential 11W (rouge=courant, orange=tension).

Mais ce choix d'amélioration de la THD_I se traduit par une dégradation du facteur de puissance et créera ainsi une augmentation de la puissance réactive consommée et le courant total augmente du double.

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. L'utilisation future vaste de lampes économes en énergie doit être associée à un filtrage simple et peu coûteux ainsi que d'autres techniques de correction du facteur de puissance. Mais la solution de filtrage CL que nous avons utilisée augmente la puissance réactive consommée, diminue le facteur de puissance et augmente le courant consommé.

Bibliographie

- [1] Ir. Martin, WU Kwok-tin, “Standard swith reference to the Code of Practise for energy Efficiency of Electrical Installations”, Office, Sept. 2003, pp.1-18.
- [2] A. E. Emanuel and L. Peretto, —The response of fluorescent lamp with magnetic ballast to voltage distortion, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, Jan. 1997, pp. 289-295.
- [3] CEI 61000 (pp.54). “Electromagnetic compatibility (EMC), Limits for harmonic current emissions (Equipment input current less than or equal to 16A per phase)”, 3, 2:2009
- [4] Kalle Hashmi,”Market Transformation Strategy, Compact Fluorescent in Residential Lighting”, Swedish Energy Agency, Oct, 2006, pp.2-32.
- [5] Rémy Rigo-Mariani, Ramesh K. Rayudu,Member, Mike S. Witherden and Edmund M-K. Lai, “Power Quality Indices of Compact Fluorescent Lamps for Residential Use – A New Zealand Study” IEEE Region 10 Conference, pp.647 – 652, TENCON 2010.
- [6] Bhim Singh, V. Khadkikar,”Power Factor correction Electronic Ballasts for Compact Fluorescent lamp IE(I) Journal – EL, Vol 87, Sept 2006, pp. 279 – 285.
- [7] “Power Quality implications of Compact Fluorescent Lamps in Residences”, National Electrical Manufacturers Association, Report LSD 8-1999.PP 1157-1166.
- [8] Jing Yong, Member, Liang Chen, Alexandre B. Nassif, and Wilsun Xu, “A Frequency-Domain Harmonic Model for Compact Fluorescent Lamps“Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 25 ,2010 ,pp .1182 – 1189.
- [9] E. Embriz-Santander, A. Domijan, and C. W. Williams, “A comprehen-sive harmonic study of electronic ballasts and their effect on a utility’s12 kV, 10 MVA feeder,”IEEE Trans. Power Del., vol. 10, no. 3, Jul. 1995. pp.1591–1599.
- [10] A. E. Emanuel and L. Peretto, —The response of fluorescent lamp with magnetic ballast to voltage distortion, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, Jan. 1997, pp. 289-295.
- [11] Kazimierzczuk, M.K. and Szaraniec, W., Electronic ballast for fluorescent lamps, IEEE Transactions on Power Electronics, Volume: 8, Issue: 4, Oct. 1993 pp. 386-395.
- [12] R. W. Erickson, Fundamentals of Power Electronics. New York, NY: Chapman & Hall, 1997. pp.393–399.
- [13] International Rectifier, —IRPLCFL2 42 Watt Compact Fluorescent Ballast Reference Design, <http://www.irf.com/technical-info/refdesigns/cfl-2.pdf>.
- [14] John C. W. Lam, and Praveen K Jain, “A High-Power-Factor Single-Stage Single-Switch electronic ballast for compact fluorescent Lamps”. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 8, august 2010, pp. 2045 – 2058.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

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 3 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 3, 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.

ANNEXE A

Caractéristiques des charges utilisées :

1. Les charges utilisées pour les essais:

1.1. Les trois types d'éclairages utilisés :



Lampe incandescente



Tube fluorescent



Lampe fluo compact

Figure 1 : les trois types d'éclairage utilisés.

Tableau 1 : Caractéristiques des trois types d'éclairages utilisés :

type	Eclairage incandescent	Eclairage Fluorescent	Eclairage fluo compact
Marque	Philips standard bulb (clear)	OSRAM	TORCH
Tension nominale (V)	230	220/240	220/240
Puissance (W)	75	36	40
fréquence	50	50/60	50/60
Luminosité (lumen)	55	2500	2520
Conformité	CE	CE	CE, ISO 9002

1.2. Le microordinateur :



Figure 2 : Vue du micro ordinateur

Tableau 2 : Caractéristiques du micro ordinateur utilisé :

	Unité centrale	Ecran
marque	ART	MEDION
model	ATX - P4	CRT, MD 1998 JB
Tension (V)	110/220	100/240
Courant (A)	6/4	2.5
Puissance (W)	300	-
Fréquence (Hz)	60/50	60/50
Conformité	CE	CE

1.3. Le four à microonde



Figure 3 : Vue du four à microonde.

Tableau 3 : Caractéristiques du four à micro-onde utilisé :

	Micro-onde
marque	Philips
model	WHIRPOOL
Tension (V)	220/240
Courant (A)	7.5
Puissance (W)	150 - 900
Fréquence (Hz)	60/50
Conformité	CE

2. La lampe utilisée pour la modélisation



Figure 4 : Vue de la Lampe fluo compact (Philips, Essential 11W).

Tableau 3 : Caractéristiques de la Lampe fluo compact (Philips, Essential 11W):

	Lampe fluo compact
marque	Philips
model	Essential
Tension (V)	220/240
Courant (A)	-
Puissance (W)	11
Fréquence (Hz)	60/50
Conformité	CE

ANNEXE B

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	RY	1.0	1.3

phase R	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 phase R	RY	1.0	1.7
	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 tension phase Y.	RY	0.5	0.1
	YB	1.0	0.5
	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	0.5	0.1
	YB	1.5	0.5
	BR	0.1	1.5
30 % de la tension phase R, et 30 % de la tension phase Y, 30 % de la tension phase B.	RY	0.3	0.3
	YB	0.3	0.3
	BR	0.3	0.3
40 % de la tension phase R, et 60 % de la tension phase B	RY	1.0	0.4
	YB	0.6	1.0
	BR	0.4	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
Règle1	$[x_V]=[111]$ 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 $X_{YB} \neq 1$ $X_{BR} \neq 1$, 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