

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou



Faculté de génie électrique et de l'informatique

Département d'électrotechnique

# *Mémoire de fin d'étude*

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat

En électrotechnique

Option : Réseaux électriques

## THÈME

**Mesure des grandeurs électriques en présence de charges non-linéaires : Cas de lampes fluo-compactes.**

Proposé et dirigé par : H.BESSAI

Présenté par :

M<sup>r</sup>. MERBOUTI ABDELKRIM

M<sup>r</sup>. AMEUR CHERIF

Promotion : 2009/2010

## *.Remerciements*

*Nous remercions dieu le tout puissant d'avoir guidé nos pas vers les portes du savoir tout en illuminant notre chemin, et nous avoir donné suffisamment du courage et de persévérance pour mener notre travail à terme.*

*On tient à exprimer notre profonde gratitude à nos parents pour leur protection filiale, leur engagement incessant à nos prendre en charge durant toutes les étapes de notre vie, surtout les plus difficiles ; et leur apport affectif et matériel inestimable. (Que Dieu les protège et veille sur eux).*

*Notre reconnaissance va à monsieur H.BESSAI, notre promoteur et monsieur S.RABAHALLAH pour leurs conseils précieux, et leurs sincères contributions dans la réalisation de notre travail.*

*Nos remerciements vont également à tous ceux et toutes celles qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

*A tous, merci.*



# *Dédicaces*

*Je dédie mon modeste travail :*

✚ *Aux personnes les plus chères à mon  
Cœur mes parents, source d'amour, de  
courage et d'encouragement (que dieu les  
garde)*

✚ *A mon frère, Sid Ali,*

✚ *A mes sœurs, soud, Djamila et Amel*

✚ *A toute ma famille,*

✚ *A mes tentes maternelles et paternelles*

✚ *A mes oncles maternels et paternels*

✚ *A tous mes amies...*

**Abdelkrim**

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I: généralité sur la qualité de l'énergie et les harmoniques</b>	
<b>I.1 Introduction</b> .....	1
<b>I.2 Qualité de l'énergie électrique</b> .....	3
<b>I.3 Les perturbations électriques</b> .....	3
I.3.1 Fluctuations de tension .....	4
I.3.2 Transitoires .....	4
I.3.3 Courant transitoires .....	4
I.3.4 Creux de tension et coupures brèves .....	4
I.3.5 Déséquilibre de tension .....	4
I.3.6 Variation de la fréquence.....	6
I.3.7 Surtensions.....	6
I.3.8 Surtension de manœuvre .....	6
I.3.9 Surtensions atmosphériques.....	6
I.3.10 Courts circuits .....	6
<b>I.4. Phénomène harmonique</b> .....	
I.4.1. Définition des harmoniques .....	7
I.4.2. Harmoniques pairs et impair .....	7
I.4.3. Les perturbations harmoniques .....	8
I.4.3.1. Caractérisation des perturbations.....	9
I.4.4. Rang harmonique .....	10
I.4.5. Caractéristique d'un signal périodique .....	10
I.4.6. Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier .....	11
<b>I.5 Inter-harmoniques</b> .....	13
<b>I.6 Foisonnement</b> .....	13
<b>I.7 Origine des harmoniques</b> .....	14
<b>I.8 Appareils générateurs d'harmoniques</b> .....	14
<b>I.9 Principaux effets des perturbations harmoniques</b> .....	14
<b>I.10 Présentation des lampes fluo-compactes (LFC)</b> .....	17
I.10.1 Historique .....	17
I.10.2 Présentation .....	18
I.10.3 Fonctionnement.....	18
I.10.4 Schéma de ballast électronique .....	19
Conclusion .....	20

## Chapitre II : Grandeurs électriques en présence des harmoniques

II.1 Introduction.....	2
II.2 Valeur efficace des grandeurs harmoniques.....	2
II.3 Harmonique de courant, de tension et impédance harmonique .....	2
II.4 Expression des puissances .....	2
II.4.1 Puissances électrique en régime sinusoïdal .....	2
II.4.2 Puissances en régime non sinusoïdal .....	2
II.5. Facteur de puissance et facteur de déphasage.....	2
II.6. Facteur de déformation.....	2
II.7. Facteur de puissance réel .....	2
II.8. facteur de crête .....	2
II.9 Distorsion harmoniques .....	2
II.10. Notion de phase .....	2
II.11. Harmoniques dans un système triphasé .....	2
II.11.1 Tensions triphasées équilibré.....	2
II.11.2 Courants triphasées équilibré.....	3
II.12. courant de neutre en triphasé .....	3
II.13. Rapport des valeurs efficaces des courants de neutre et de phase pour un réseau symétrique et équilibré .....	3
<b>Chapitre III : Mesures expérimentale</b>	
III.1 Introduction .....	3
III.2 Présentation de travail.....	3
III.3 Présentation de matériels.....	3
III.4 présentation des essais réalisés .....	3
1) Essai 1.....	36
2) Essai 2.....	47
3) Essai 3.....	60
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>6</b>

## Bibliographie

## Introduction générale

Ces dernières années le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture de l'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur.

Donc, le but est de fournir aux clients une forme de tension idéale (onde sinusoïdale) qui à deux caractéristiques très importants ce sont :

- Amplitude constante au niveau exigé.
- Fréquence constante et équilibrée en cas de triphasé.

Alors, pour que la transmission de puissance aux appareils électriques soit la meilleure possible, il est nécessaire d'avoir une tension la plus sinusoïdale possible. C'est à ce facteur auquel il faudra faire attention, et ce à toutes les étapes : production, distribution, exploitation.

Avec l'apparition de l'électronique de puissance, la tension s'est mise à se dégrader. Ce genre d'appareils participe à la « pollution » des réseaux de distribution électrique en émettant des perturbations électriques et plus particulièrement des distorsions de l'onde sinusoïdale de la tension. Ces récepteurs dits « non-linéaires » engendrent sur les réseaux des modifications de l'onde sinusoïdale de la tension variant principalement selon l'amplitude des courants déformés mais aussi selon les diverses impédances du réseau.

Aujourd'hui, vu la complexité des phénomènes physiques en électricité qui se sont développés avec les nouvelles technologies, on ne peut plus se contenter de mesurer la valeur efficace d'un signal. Il nous faut passer à d'autres types de mesure plus « pointues » comme la fréquence, l'allure, le facteur de puissance, le facteur de crête mais également le taux de distorsion harmonique.

Pour mieux comprendre le phénomène harmonique et à titre d'exemple on a choisi d'étudier les lampes fluo-compactes qui offrent une efficacité lumineuse jusqu'à cinq fois supérieure à celle de l'incandescence ; elles consomment de 4 à 5 fois moins et durent de 12 à 15 fois plus longtemps, ce qui permet de réduire les frais d'exploitation.

Toutefois, elles présentent l'inconvénient majeur de générer des courants harmoniques intenses qui peuvent contribuer fortement à la pollution harmonique des réseaux.

La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la présence d'un ballast électronique et d'un gaz.

Le but de notre travail consiste en l'étude expérimentale des perturbations harmoniques générées par les lampes fluo-compactes (basse consommation), il est constitué d'une part par des mesures prises sur les différents appareils (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre, Phasemètre), et d'autre part par des mesures prises sur le logiciel Wave star for oscilloscopes et l'analyse de l'onde et les spectres du courant et de la tension à l'aide d'un oscilloscope numérique.

# Introduction générale

---

Dans le premier chapitre, nous avons parlé de la qualité de l'énergie, des harmoniques et des principales caractéristiques de la lampe fluo-compacte.

Dans la deuxième partie, nous avons abordé les grandeurs électriques (courant, tension, puissance...etc.) en présence des harmoniques ainsi que les courants dans les conducteurs de neutre dans les réseaux triphasés.

Le troisième chapitre est consacré aux mesures expérimentales obtenues à l'aide des appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre, Phasemètre) et celles données par l'oscilloscope numérique connecté à un micro-ordinateur.

Différentes configurations sont présentées et analysées ; les résultats des essais seront comparés et interprétés.

Nous terminons notre rapport par une conclusion générale.

# Chapitre I

---

## Généralités sur la qualité de l'énergie et les harmoniques

---

## **I. Généralités sur la qualité de l'énergie et les harmoniques**

### **I.1. Introduction**

Le producteur (distributeur) de l'énergie électrique doit satisfaire certain engagement envers les clients qu'il dessert, il doit assurer la continuité et la qualité de l'énergie qu'il fournit.

L'énergie électrique est généralement distribué sous forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé, un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde (amplitude et fréquence constantes).

Aujourd'hui les critères de qualités ont évolué avec le développement des équipements industriels et domestiques, utilisant de plus en plus de circuits électroniques ayant un comportement non linéaire, ils engendrent dans les réseaux de distribution des courants non sinusoïdaux provoquant des effets nocifs.

Lorsque la forme de l'onde de tension n'est pas sinusoïdale on rencontre des perturbations touchant de nombreux équipements engendrant ainsi des dysfonctionnements et échauffement des récepteurs et appareillages raccordés sur un même réseau d'alimentation électrique.

### **I.2. Qualité de l'énergie électrique**

Il existe un grand nombre de définition de la qualité de l'électricité mais d'une façon générale, on peut distinguer deux aspects : la fiabilité de l'alimentation et la qualité de la tension.

La fiabilité de l'alimentation est caractérisé principalement par le nombre et la durée des coupures. La qualité de la tension, quant à elle, est liée aux distorsions de la forme d'onde autrement dit à l'écart engendré par les perturbations électriques par rapport à la forme sinusoïdale idéale de la tension (variation de tension, creux de tension, harmoniques, flicker (papillotement), courants transitoires.....etc.).

Le fournisseur de l'énergie doit assurer une tension toujours au voisinage de la tension nominale avec une variation tolérable (10%), et de (1%) de la fréquence.

### **I.3. Perturbations électriques [1] [2] [3]**

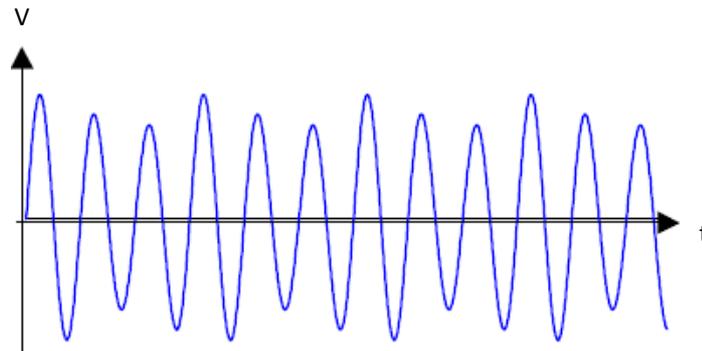
Les perturbations électriques naissent de la dégradation d'un ou plusieurs paramètres caractéristiques de réseaux électriques (forme des tensions, équilibre des tensions, fréquence et amplitude.....etc.).

L'altération d'un ou de plusieurs de ces paramètres engendre entre autre les perturbations suivantes :

### **I.3.1. Fluctuations de tension**

C'est une variation rapide de la tension comprise dans la plage normale de tension, en fonctionnement normale des réseaux.

Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc...etc.

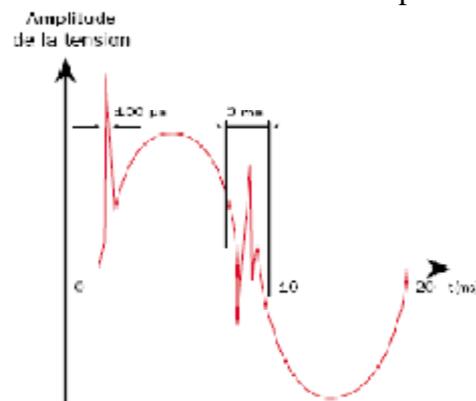


**Figure (I.1) : Fluctuation de tension**

### **I.3.2. Transitoires**

Les phénomènes transitoires sont essentiellement constitués de surtensions très élevées (jusqu'à 20 kV) et rapides, qui dépassent la plage nominale de variation qui est de 10 %, dus :

- Ø A la foudre.
- Ø Aux manœuvres ou aux défauts sur les réseaux HT et BT.
- Ø Aux arcs électriques de l'appareillage.
- Ø A la mise sous tension de circuits fortement capacitifs.



**Figure(I.2): Exemple de cas de surtensions transitoires**

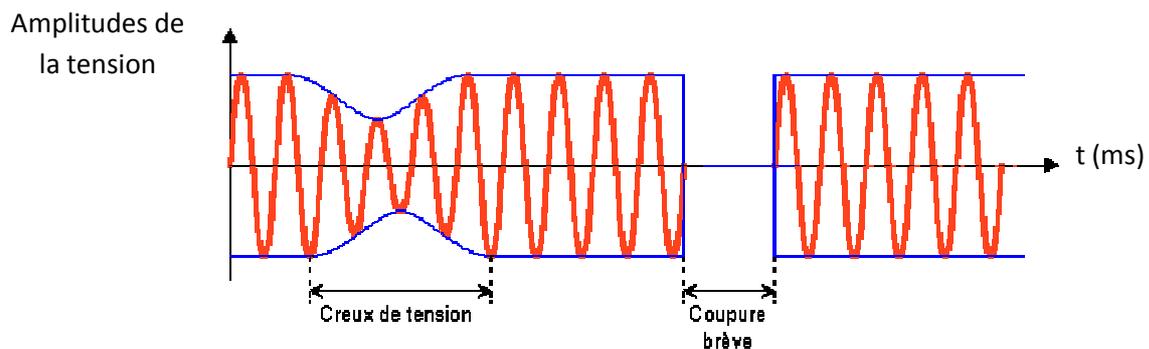
### **I.3.3. Courant transitoires**

L'enclenchement d'une charge génère une impulsion brève de courant qui affecte légèrement et de façon transitoire la forme de la tension.

### I.3.4. Creux de tension et coupures brèves

Les creux de tension sont définis comme une baisse de 10 % à 100 % de la valeur nominale de la tension pendant un temps compris entre 10 ms et quelques secondes, figures (I-3).

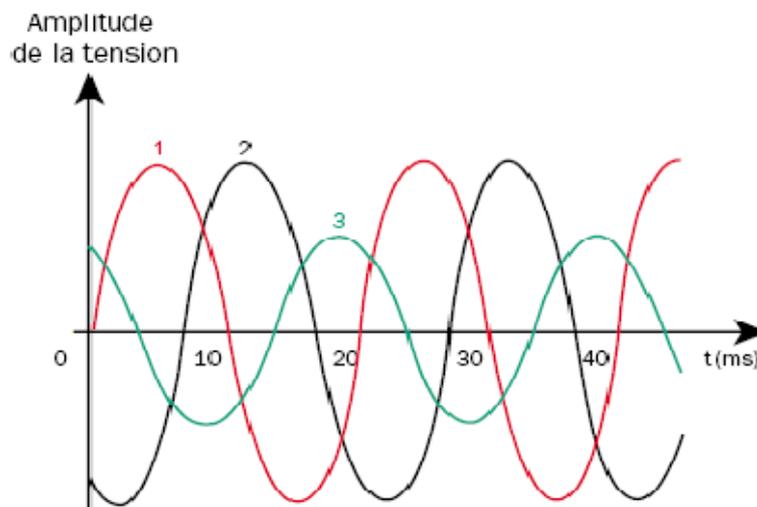
On parle de coupure brève lorsque cette baisse atteint les 100 %, elle est due généralement à des phénomènes transitoires, comme par exemple les court-circuits.



Figure(I.3) : Coupure brève et creux de tension

### I.3.5. Déséquilibre de tension

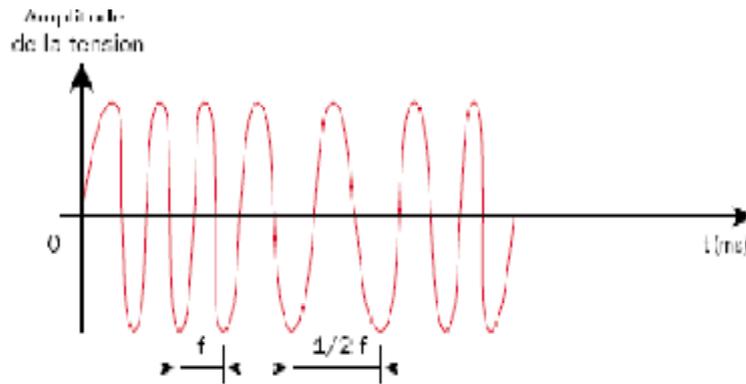
L'inégalité en amplitude des tensions des phases est due à l'inégalité des puissances appelées sur chaque phase. Ce déséquilibre résulte essentiellement de la présence de fortes charges monophasées raccordées de manière non uniforme au réseau.



Figure(I.4) : Représentation d'une non symétrie du système triphasé de tensions

### **I.3.6. Variation de la fréquence**

La variation de la fréquence du réseau qui est normalement fixée, elle est en général observée sur les perturbations des vitesses des moteurs ainsi que la précision des appareils de mesure.



**Figure (I.5) : Exemple de fluctuation de la fréquence**

### **I.3.7. Surtensions**

C'est l'augmentation de la tension jusqu'à dépassement de la plage nominale de variation qui est de 10%.

### **I.3.8. Surtension de manœuvre**

Ce sont généralement des surtensions dues aux manœuvres effectuées sur les réseaux MT, comme le déclenchement d'un transformateur ou enclenchement d'une batterie de condensateurs.

### **I.3.9. Surtension atmosphérique**

Elles sont dues aux coups de foudres directs (qui tombent sur une ligne ou une structure) et indirects (qui tombent sur la terre et augment son potentiel).

### **I.3.10. Court circuit**

Les courts circuits se traduisent par une excessive du courant dans les lignes pouvant atteindre jusqu'à 50 fois le courant nominal  $I_n$ , et une chute de tension jusqu'à la valeur zéro. La sévérité d'un court circuit est en fonction de sa nature.

## **I.4. Phénomène harmonique**

La pollution harmonique est un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

### **I.4.1. Définition des harmoniques [1]**

Sur les réseaux électriques, la forme d'onde des tensions et des courants est souvent assez différente de la sinusoïde pure sortant des centrales de production.

L'onde déformée est en fait constituée de la superposition d'une composante sinusoïdale à 50 Hz, dite fondamentale, et de composantes sinusoïdales à des fréquences multiples entiers de 50 Hz, appelées harmoniques. L'injection de courants harmoniques dans le réseau génère des tensions harmoniques traversant les diverses impédances du réseau et dégradant ainsi les qualités de ce dernier.

### **I.4.2. Harmoniques pairs et impairs [4]**

La quasi-totalité des charges sont symétriques. Ce qui donne des harmoniques de rangs pairs faible, voir inexistant. Donc, on trouve juste, les harmoniques de rangs impairs dans cette classe de charge.

En effet, la plupart des charges connectées au réseau sont symétriques, c'est-à-dire que les deux alternances (positive et négative) sont égales et opposées.

Ceci peut être écrit mathématiquement par la relation suivante :

$$I(\omega t + \pi) = -I(\omega t) \quad (\text{Pour le courant par exemple}) \quad (\text{I-1})$$

On suppose que le courant comporte des harmoniques de rang 2, il est possible de le décrire comme suite :

$$I(\omega t) = I_1 \sin(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t) \quad (\text{I-2})$$

$I_1$  : Amplitude du fondamental

$I_2$  : Amplitude de l'harmonique de rang 2.

On aura donc :

$$I(\omega t + \pi) = I_1 \sin(\omega t + \pi) + I_2 \sin(2(\omega t + \pi)) \quad (\text{I-3})$$

Ce qui donne :

$$I(\omega t + \pi) = -I_1 \sin(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t) \quad (\text{I-4})$$

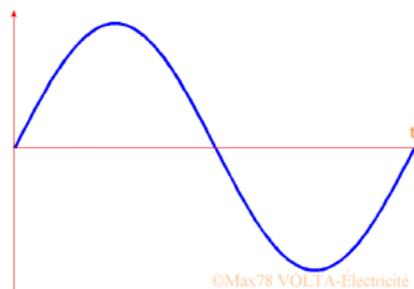
Ceci ne peut être égale à  $-I(\omega t)$  que si  $I_2$  amplitude de l'harmonique 2 est nulle, le raisonnement peut être étendu à tous les harmoniques des rangs pairs.

**I.4.3. Les perturbations harmoniques [1] [3] [6] [7]**

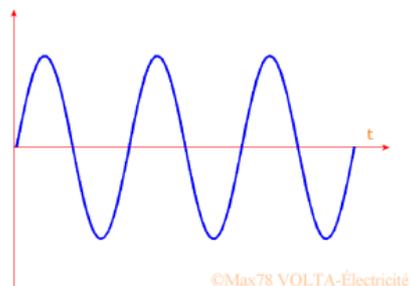
Les signaux (tension et courant) relevés sur le réseau sont des signaux déformés et loin d'être des sinusoïdes parfaites.

Un signal déformé est la superposition d'un signal fondamental (50Hz) et de signaux harmoniques de fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental (100,150, 200,250Hz....etc.).

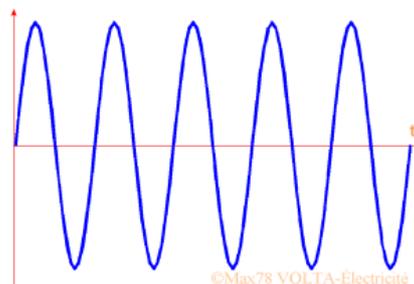
En pratique on ne s'intéresse qu'aux harmoniques significatifs (jusqu'au rang 13), les appareils de mesure peuvent aller au-delà (jusqu'à 25 pour les pinces harmoniques F25 etF27).



**Figure(I.6) : Fondamental de 50 Hz sur une période**



**Figure (I.7) : Harmonique de rang 3 sur une période du fondamental (F=150Hz)**



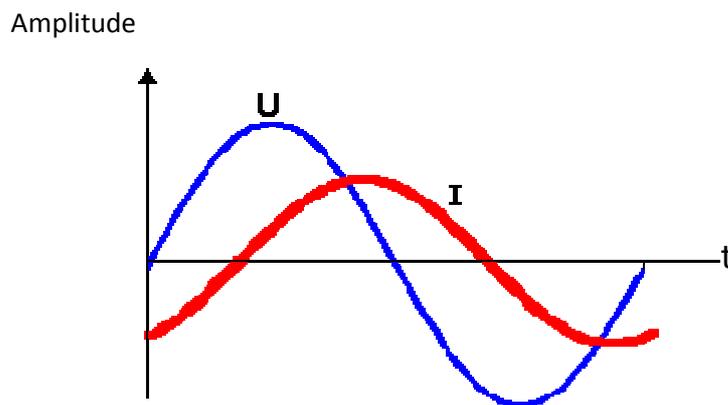
**Figure (I.8) : Harmonique de rang 5 sur une période du fondamental (F=250Hz)**

### **I.4.3.1. Caractérisation des perturbations harmoniques**

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales

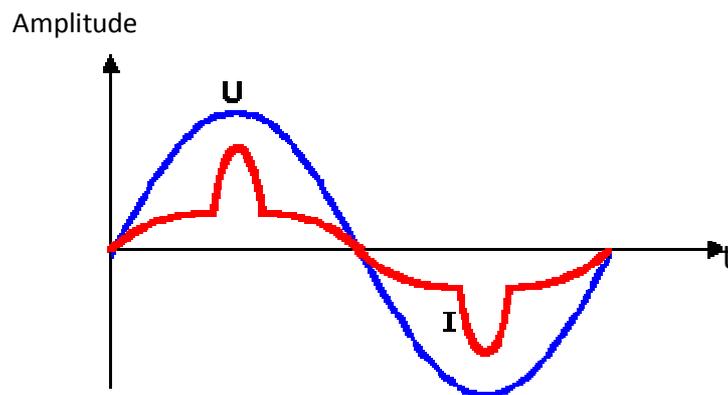
- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.



**Figure(I.9) : Charge linéaire**

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal.



**Figure (I.10) : Charge non- linéaire**

#### **I.4.4. Rang harmonique**

Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence à celle du fondamental.

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I-5})$$

#### **I.4.5. Caractéristiques d'un signal périodique**

On parle de grandeurs périodiques dès lors que les courants  $i$  et les tensions  $v$  présentent une période temporelle,  $T$ , telle que :

$$i(t) = i(t + T) \text{ ou } v(t) = v(t + T). \quad (\text{I-6})$$

On définit la fréquence de répétition de la grandeur périodique  $f = 1 / T$  Hertz (Hz) et  $T$  en secondes (S)

##### **✓ Valeur moyenne**

La valeur moyenne d'une fonction périodique  $y(t)$  de période  $T$ , est la moyenne de ses valeurs, elle est définie par l'expression suivante :

$$Y_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \cdot dt \quad (\text{I-7})$$

##### **✓ Valeur efficace**

La valeur efficace est définie par rapport à l'énergie transportée par un signal électrique.

La valeur efficace d'un signal  $y(t)$  périodique de période  $T$  est donnée par :

$$Y_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 \cdot dt} \quad (\text{I-8})$$

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

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

On définit aussi la valeur quadratique moyenne, son expression est donnée par :

$$Y_{\text{qm}} = Y_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 \cdot dt \quad (\text{I-9})$$

✓ **Facteur de forme**

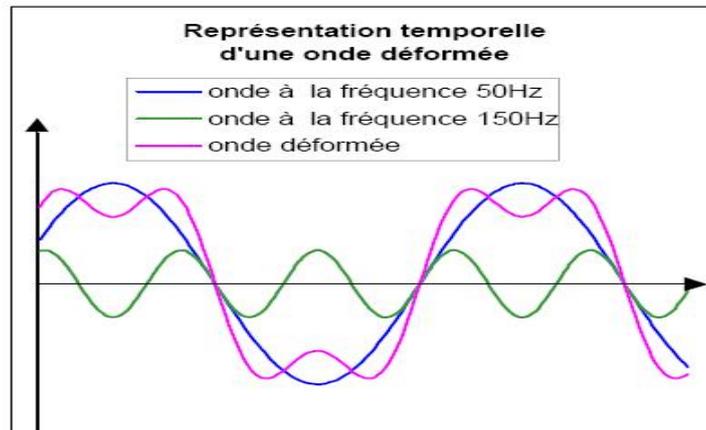
Il est utilisé pour quantifier la valeur efficace par rapport à la valeur moyenne.

$$F = \frac{Y_{qm}}{Y_0} \tag{I-10}$$

**I.4.6. Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier**

Le mathématicien français **Josef Fourier** a mis en évidence un théorème qui dit que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être développée en une série qui se compose :

- D'une composante continue.
- D'un terme sinusoïdal de fréquence fondamentale.
- Des termes sinusoïdaux (harmoniques) de fréquence multiples de celle du fondamental.



**Figure(I.11) : Onde déformée et sa décomposition**

Un autre moyen de traduire la notion d'harmonique sous forme d'histogramme, permet de donner une représentation de l'importance des harmoniques par rapport au fondamental en fonction du rang, on parle de spectre du signal.

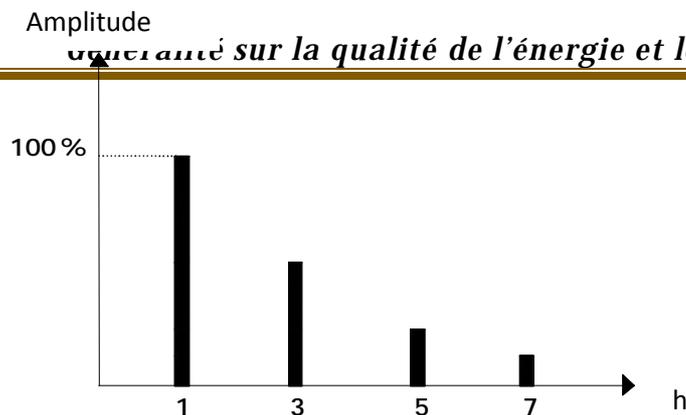


Figure (I.12) : Représentation spectrale d'un signal déformé

L'équation du développement harmonique d'un courant ou de la tension périodique est donnée par :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)] \quad (I-11)$$

Avec h : rang harmonique

$Y_0$  : Composante continue (valeur moyenne) donnée par l'expression suivante :

$$Y_0 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t). dt \quad (I-12)$$

$a_h$  et  $b_h$  : sont les eux coefficients de Fourier définis par :

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(h\omega t). dt \quad (I-13)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(h\omega t). dt \quad (I-14)$$

On peut écrire :

$$\begin{aligned} y(t) &= Y_0 + Y_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + Y_2\sqrt{2} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + Y_h\sqrt{2} \sin(h\omega t + \varphi_n) \\ &= Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h\sqrt{2} \sin(h\omega t + \varphi_h) \\ &= Y_0 + Y_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} Y_h\sqrt{2} \sin(h\omega t + \varphi_h) . \end{aligned} \quad (I-15)$$

$Y_1$  : Valeur efficace du fondamental.

$Y_h$  : Valeur efficace de l'harmonique de rang h ( $h \geq 2$ )

Avec

$$Y_h = \sqrt{\frac{a_h^2 + b_h^2}{2}} \quad (I-16)$$

$\varphi_h$  : Déphasage de l'harmonique de rang h par rapport au fondamental

Avec:

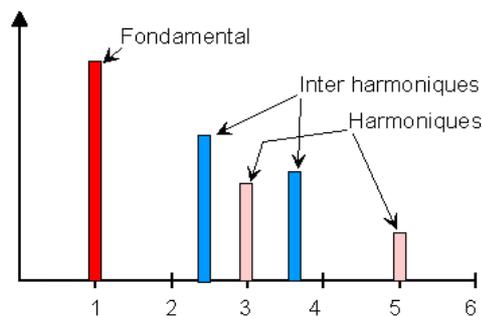
$$\varphi_h = \arctg\left(\frac{b_h}{a_h}\right) \quad (I-17)$$

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- Si la fonction est paire, les coefficients  $b_h$  sont nuls.
- Si la fonction est impaire, les coefficients  $a_h$  sont nuls.
- Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

### I.5. Inter-harmoniques [1]

Ce sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental. Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteurs tels que les fours à arc, les machines à souder et les convertisseurs de fréquences (variateurs de vitesse, cycloconvertisseurs).



Figure(I.13): Représentation spectrale d'harmoniques et d'inter-harmoniques

### I.6. Foisonnement [1]

L'effet de foisonnement est une diminution du niveau des perturbations à cause de la multiplication des sources de perturbation harmonique.

Différentes charges peuvent être connectées sur un réseau, il en résulte que les courants qui les alimentent ne sont pas obligatoirement en phase.

En effet, s'ils ne s'additionnent pas algébriquement, les harmoniques foisonnent. Cela est possible lorsque les harmoniques de même rang produits par différentes charges sont déphasés les uns par rapport aux autres.

### **I.7. Origine des harmoniques [8]**

Dans le passé, les récepteurs étaient dit "linéaires" ce qui signifie que la forme du courant consommé était identique à celui de la tension. Il y avait donc à chaque instant une relation de proportionnalité entre la tension et l'intensité. C'est le cas des résistances parfaites (résistance de chauffage, lampe à filament ...etc.) Pour les moteurs triphasés par exemple, lorsque la tension et l'intensité sont sinusoïdales il existe quand même un déphasage entre les deux grandeurs dans le temps. Vu que les signaux sont supposés parfaitement sinusoïdaux, on parle de  $\cos \varphi$  pour exprimer ce déphasage.

De nos jours, la présence de l'électronique de puissance aussi bien dans le milieu industriel, tertiaire que domestique entraîne des courants qui n'ont plus la même forme que la tension. Ceci est du aux récepteurs « non linéaires » soumis à une tension sinusoïdale et qui n'absorbe pas un courant sinusoïdal, Il n'y a donc plus de relation proportionnelle entre tension et intensité. Enfin de façon simple et précise, Vu que les courants consommés par les récepteurs « non-linéaires » ne sont pas sinusoïdaux on ne peut plus parler de  $\cos \varphi$ . On parle alors de facteur de puissance.

### **I.8. Appareils générateurs d'harmoniques [8]**

Comme dit précédemment, ce sont surtout les appareils utilisant de l'électronique de puissance qui sont responsables des harmoniques. On retrouve, entre autre :

- Les convertisseurs statiques de forte puissance ;
- Les fours à arc ;
- Les inductances saturées ;
- Les machines tournantes ;
- Les charges électrodomestiques (téléviseurs, magnétoscopes, la micro-informatique, etc.) ;
- L'éclairage par lampes à décharges, tubes fluorescents et les lampes fluo-compactes ;

#### **Ø Les convertisseurs statiques de forte puissance**

Ces appareils figurent parmi les pollueurs les plus répandus. Certains facteurs concourent à modifier les amplitudes de leurs harmoniques caractéristiques, ce sont en particulier :

- La dissymétrie de construction ;
- L'imprécision de l'instant d'ouverture des thyristors ;
- Le temps de commutation ;
- Le filtrage imparfait ;

De plus, dans le cas de ponts à thyristors, un déphasage des harmoniques en fonction de l'angle de retard à l'amorçage peut être observé. Les liaisons à courant continu figurent parmi les plus puissants convertisseurs statiques raccordés au réseau.

Ø **Les fours à arc**

Qu'ils soient alimentés en courant continu ou en courant alternatif, le four à arc représente un élément pollueur très important pour le réseau. Il constitue de plus une charge aléatoire, c'est-à-dire dont on ne connaît pas les injections harmoniques caractéristiques, contrairement aux convertisseurs statiques. Le spectre du courant émis par un four à arc contient de plus des inter-harmoniques, c'est-à-dire des composantes dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence fondamentale.

Ø **Les inductances saturées**

De telles inductances ont une impédance qui varie en fonction de l'amplitude de courant qui les traverse. De ce fait, elles provoquent une déformation notable de ce courant. C'est le cas dans certaine mesure des transformateurs qui, à vide, sont soumis à une surtension permanente.

Ø **Les machines tournantes**

Les machines tournantes produisent des harmoniques «de denture» de rangs élevés, et d'amplitudes généralement faibles. Les petites machines synchrones sont toutefois génératrices de tension harmonique de rang 3 non négligeables.

Ø **Les charges électrodomestiques**

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

Ø **L'éclairage (public ou domestique)**

L'éclairage public par lampes à décharges, tube fluorescents ou lampes fluo-compactes, est générateur de courants harmoniques. Dans certains cas, un taux de 25% de courant harmonique 3 peut être relevé. L'éclairage domestique par lampes fluorescentes compactes peut entraîner un taux d'harmoniques 3 proche de 100%.

## **I.9. Principaux effets des perturbations harmoniques [8]**

Les harmoniques superposées à l'onde fondamentale conjuguent leurs influences sur les appareils et équipements connectés au réseau. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés : il s'agit d'effets instantanés ou d'effets à terme dus aux échauffements.

## **EFFETS INSTANTANES**

### **Ø Perturbation des convertisseurs statiques et des matériels électronique**

Les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation des systèmes électroniques. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent ou multiplient les passages par zéro de la tension. Les appareils utilisant la valeur crête de la tension à des fins de régulation pourront également être perturbés.

Les compteurs d'énergie à induction présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques. Par exemple, un compteur de classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3% avec un taux de 5% d'harmonique 5 sur la tension et le courant.

### **Ø Vibrations, bruit**

Les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques en présence génèrent des vibrations et des bruits acoustiques dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances). Des couples mécaniques pulsatoires engendrent des vibrations dans les machines tournantes.

### **Ø Perturbations induites sur les lignes à courant faible**

Une ligne à courant faible, par exemple une ligne téléphonique, peut être perturbée lorsqu'elle chemine le long d'une canalisation de distribution électrique ou circulent des courants et tensions déformés.

### **Ø Perturbation des systèmes de télécommande centralisée**

La télécommande centralisée permet de piloter certains appareils au travers du réseau grâce à des signaux à 175 ou 188 Hz superposés aux ondes de tension et de courant à 50 Hz. Un taux d'harmoniques élevé peut entraîner l'enclenchement intempestif des relais commandés par ces signaux.

### **Ø Dysfonctionnement des systèmes de protection et de relais**

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

### **Ø Résonances**

Ce phénomène se caractérise par une valeur maximale de l'impédance du réseau vue par la charge. Et pour peu que cette dernière se comporte comme une source de courants harmoniques, on observera donc des surtensions, pouvant dépasser 7 à 8 fois la valeur de la tension considérée dans le cas d'un réseau pur (sans compensation).instantané.

## **EFFETS A TERME**

Hormis la fatigue mécanique des matériaux soumis aux vibrations, l'effet à terme prédominant est l'échauffement.

### **Ø *Echauffement des condensateurs***

Les condensateurs sont sensibles aux surtensions dues aux harmoniques qui favorisent les pertes. Ces dernières, causes de l'échauffement, sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans le diélectrique.

Les surchauffes des condensateurs, lors des surtensions, sont très nocives car s'il n'y a pas claquage immédiat ; pour une surtension de 10% il en résulte une augmentation de 7% de la température et une réduction de l'espérance de vie du condensateur de 30%.

### **Ø *Echauffement du aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs***

Les écarts de vitesse importants entre les champs tournants harmoniques et le rotor causent des pertes supplémentaires dans les machines. Les pertes supplémentaires des transformateurs sont dues à l'effet de peau qui se traduit par une augmentation de la résistance apparente du cuivre avec la fréquence, ainsi qu'à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.

### **Ø *Echauffement des câbles et des équipements***

L'effet de peau et l'élévation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable, sont responsables de cet échauffement.

## **I.10. Présentation des lampes fluo- compactes (LFC) [1] [3]**

### **I.10.1. Historique**

Les lampes fluo- compactes « basse consommation » (souvent appelées économiques ou fluo compactes) ont été produites après la crise du pétrole dans les années 70 ; lorsque des chercheurs ont eu l'idée de replier sur lui même un tube fluorescent.

Les premières lampes fluo compactes ont été commercialisées en Europe par Philips en 1980. Depuis, elles ont beaucoup évolué ; les premières lampes étaient volumineuses et lourdes et nécessitaient plusieurs minutes pour atteindre leur pleine puissance. L'encombrement des lampes actuelles a été sensiblement réduit de telle sorte qu'une partie des problèmes de compatibilité avec les luminaires existants devrait disparaître.

De même, l'introduction des ballasts électroniques en remplacement des ballasts électromagnétiques a amélioré les performances globales, réduit le poids et diminué le délai d'allumage.

### **I.10.2. Présentation**

La lampe fluorescente est une adaptation du tube industriel à usage domestique. C'est un tube fluorescent émettant de la lumière, dont le tube est miniaturisé (diamètre 10 à 15 mm) plié en deux, trois ou quatre, ou encore enroulé, doté d'un culot contenant un ballast électronique. Ce tube est rempli de gaz est doté de deux électrodes montées dans un embout. Il renferme un mélange basse pression d'argon gazeux, de vapeur de mercure.

On distingue deux grandes familles de lampes fluo compactes: les lampes de substitution et les lampes d'intégration.

Les lampes de substitution sont conçues pour remplacer les lampes à incandescence, principalement dans le secteur résidentiel. Elles présentent un culot identique à celui des sources à incandescence (vis ou douille) et intègrent les systèmes d'allumage nécessaires à leur fonctionnement.

Les lampes d'intégration à ballast séparé sont destinées prioritairement au secteur tertiaire et permettent de remplacer le seul tube en fin de vie. La lampe ne comprend qu'un tube fluorescent qui s'adapte directement sur le luminaire par le biais d'un culot spécifique, le ballast étant intégré dans le luminaire.



**Figure(I.14) : Modèles de lampes fluo compactes.**

### **I.10.3. Fonctionnement**

Le principe de l'éclairage des lampes fluo compactes est celui de la décharge d'un courant électrique dans une atmosphère gazeuse de vapeur de mercure. Lorsqu'on met le tube sous tension, des électrons sont émis par les deux électrodes situées aux extrémités du tube. Un arc électrique se propage alors à l'intérieur du tube provoquant un va-et-vient régulier d'électrons. Les électrons entrent en collision avec les atomes de mercure. Il en résulte une libération d'énergie sous forme de rayonnement ultraviolet invisible. Ce rayonnement est absorbé par la couche fluorescente (composé de sels de phosphore) présente sur la face interne du tube et converti en rayonnement visible. La qualité de la lumière produite dépend essentiellement des poudres fluorescentes déposées sur l'enveloppe.

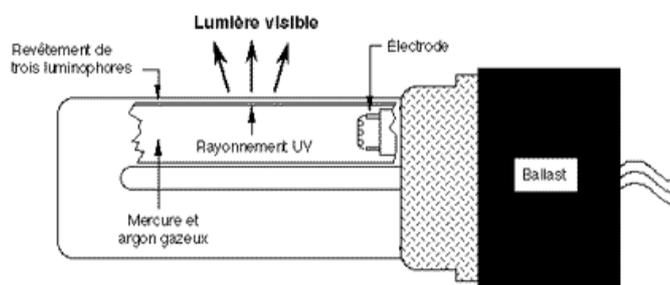


Figure (I.15) : Schéma d'une lampe fluo compacte

#### I.10.4. Schéma de ballast électronique

Un ballast électronique comprend essentiellement un étage redresseur (avec éventuellement une correction du facteur de puissance, Power Factor Correction –PFC) un condensateur de filtrage de la tension redressée, et un étage onduleur en demi pont. Son alimentation est également possible en courant continu.

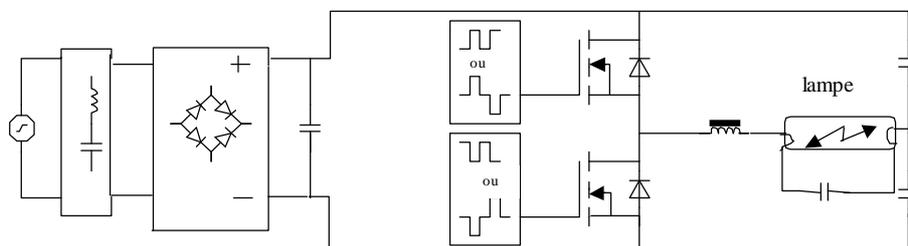
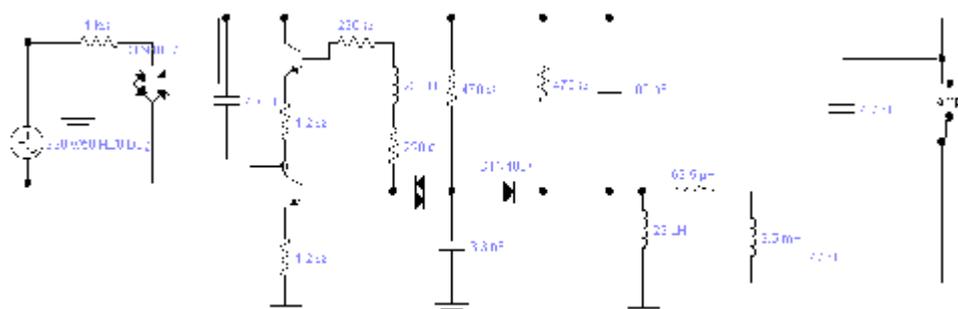


Figure (I.16) : Schéma de principe d'une lampe alimentée par un ballast électronique



Figure(I.17) : Circuit électrique d'un ballast électronique d'une lampe fluo compacte (CEGASA 16W).

L'accroissement des performances énergétiques des sources lumineuses est un des moteurs du progrès technique dans le secteur de l'éclairage, de même que la miniaturisation, l'amélioration de la qualité de la lumière et l'augmentation de la durée de vie des produits.

Les systèmes d'éclairage à fluorescents compacts offrent des possibilités d'économies substantielles, tant sur le plan monétaire qu'environnemental. Une gamme variée de combinaison tube-ballast permet de bien éclairer un espace de manière confortable favorisant la productivité.

### **Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté les différentes perturbations qui affectent le réseau électrique, on s'est intéressé aux causes et leurs effets sur ce dernier ou sur les charges qui y sont connectées.

Il s'avère que les charges non linéaires sont la cause majeure de la pollution harmonique dans un réseau. D'où l'intérêt d'une étude expérimentale des charges polluantes.



## Chapitre II

---

# Grandeurs électriques en présences des harmoniques

---

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons quelques définitions pour caractériser la pollution harmonique dans les réseaux électriques. Les grandeurs comme les puissances et facteurs de puissances en régimes non-sinusoïdales seront exposées, ainsi que le courant dans le conducteur du neutre en présence des charges non linéaires.

## II.2. Valeur efficace des grandeurs harmoniques [9]

La valeur efficace du signal  $y(t)$  est par définition :

$$Y_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt} \quad (\text{II-1})$$

Le théorème de **Parseval** nous dit que :

$$\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 dt = Y_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2 \quad (\text{II-2})$$

En général la valeur de la composante continue  $Y_0$ , est nulle, on a donc la relation suivante :

$$Y_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2} \quad (\text{II-3})$$

## II.3. Harmonique de courant, de tension et impédance harmonique [6] [7]

- **Harmonique de courant**

Dans la plus part des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques sont due à l'utilisation de charges non linéaires.

On qualifie de non linéaire toute charge qui, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale à 50HZ, n'absorbe pas un courant sinusoïdal à 50HZ.

Les charges non linéaires se comportent approximativement comme des sources de courants harmoniques, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau auquel sont raccordées.

L'expression du courant généré par une charge non- linéaire s'écrit comme suit :

$$i(t) = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sqrt{2} \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (\text{II-4})$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{II-5})$$

I : La valeur efficace du courant

$\alpha_h$  : Déphasage du courant harmonique de rang  $h$  par rapport à l'origine des phases

$I_h$  : Valeur efficace du courant de rang  $h$

La séparation de la composante fondamentale  $I_1$  des composantes harmoniques  $I_h$  donne :

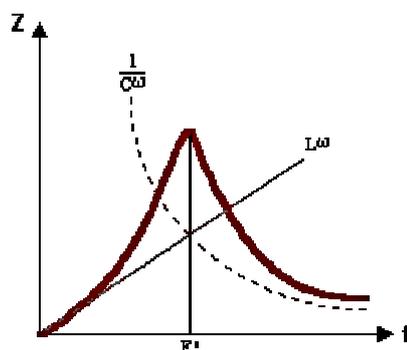
$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad \text{Avec} \quad I_H^2 = \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \quad (\text{II-6})$$

### • Impédance harmonique

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

Le produit des harmoniques de courant provenant des charges non linéaires par l'impédance harmonique du réseau en un point, crée des harmoniques de tension.

Dans ce cas pour chaque harmonique de courant  $I_h$  correspond une impédance  $Z_h$ .



Figure(II.1) : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence

$$X_L = L2\pi f = L\omega \quad (\text{II-7})$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{C\omega} \quad (\text{II-8})$$

$X_L, X_c$  Sont respectivement les réactances inductive et capacitive.

### • Tension harmonique

Les courants harmoniques qui circulent dans le réseau rencontrent l'impédance du réseau et créent une tension harmonique selon la loi d'Ohm :

$$\bar{U}_h = \bar{I}_h * \bar{Z}_h \quad (\text{II-9})$$

L'expression des tensions harmoniques est :

$$u(t) = U_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \beta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} U_n\sqrt{2} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (\text{II-10})$$

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (\text{II-11})$$

U : La valeur efficace de la tension.

$U_h$  : Valeur efficace de la tension harmonique de rang h.

$\beta_h$  : Déphasage de la tension harmonique de rang h par rapport à l'origine des phases.

La séparation de la composante fondamentale  $U_1$  des composantes harmoniques  $U_h$  donne :

$$U^2 = U_1^2 + U_H^2 \quad \text{Avec} \quad U_H^2 = \sum_{h=2}^{\infty} U_h^2 \quad (\text{II-12})$$

## II.4. Expressions des puissances

### II.4.1. Puissance électrique en régime sinusoïdal [12]

En régime sinusoïdal, les grandeurs dépendent du temps. On considère le cas général le plus répandu en électrotechnique d'un dipôle inductif, c'est-à-dire d'un courant déphasé en arrière d'un angle  $\varphi$  par rapport à la tension.

$$v(t) = V_{\max} \cos(\omega t) \quad (\text{II-13})$$

$$i(t) = I_{\max} \cos(\omega t - \varphi) \quad (\text{II-14})$$

- **Puissance instantanée**

En régime sinusoïdal la puissance instantanée est :

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (\text{II-15})$$

C'est-à-dire :

$$p(t) = V_{\max} \cos(\omega t) \cdot I_{\max} \cos(\omega t - \varphi) \quad (\text{II-16})$$

$$p(t) = V_{\max} I_{\max} \frac{\cos(\varphi)}{2} + V_{\max} I_{\max} \frac{\cos(2\omega t - \varphi)}{2} \quad (\text{II-17})$$

En utilisant les tensions et courants efficaces :

$$p(t) = U I \cos(\varphi) + U I \cos(2\omega t - \varphi) \quad (\text{II-18})$$

$$\text{Avec} \quad U = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{II-19})$$

U : La valeur efficace de la tension.

I : La valeur efficace du courant.

- **Puissance active**

C'est la valeur moyenne de la puissance instantanée, c'est-à-dire :

$$P = p(t)_{\text{moy}} = UI \cos(\varphi) \quad (\text{en W}) \quad (\text{II-20})$$

- **Puissance fluctuante**

C'est la partie variable de  $p(t)$

$$P_f(t) = UI \cos(2\omega t - \varphi) \quad (\text{II-21})$$

- **Puissance apparente**

Les grandeurs  $v(t)$  et  $i(t)$  étant périodiques, on les caractérise par leurs valeurs efficaces  $U$  et  $I$ .

On définit alors la puissance apparente comme la grandeur nommée  $S$  :

$$S = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = UI \quad (\text{en VA}) \quad (\text{II-22})$$

- **Puissance réactive**

On définit la puissance réactive comme celle due à la partie « réactive » du courant, c'est-à-dire  $I \sin \varphi$ . Son unité est le volt ampère réactif (VAR)

On retiendra la formule de cette puissance qu'on nomme classiquement  $Q$

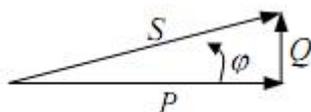
$$Q = UI \sin \varphi \quad (\text{en VAR}) \quad (\text{II-23})$$

- **Relation entre  $P$ ,  $Q$  et  $S$**

$$\text{Notons que : } P = UI \cos \varphi, \quad Q = UI \sin \varphi, \quad S = UI \quad (\text{II-24})$$

$$\text{D'où : } P^2 + Q^2 = S^2 \quad (\text{II-25})$$

Cette formulation fait apparaître une relation également graphique entre les différentes grandeurs. On parle alors de triangle des puissances :



$$\text{tang} \varphi = \frac{Q}{P} \quad (\text{II-26})$$

**II.4 .2. Puissance en régime non sinusoïdal [11]**

- **Puissance active**

La puissance active transportée par un signal périodique déformé est égale à la somme des puissances actives transportées par chaque harmonique de ce signal.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h \quad (\text{II-27})$$

$U_h$ : La valeur efficace de la tension harmonique de rang h

$I_h$ : La valeur efficace du courant harmonique de rang h

$\varphi_h$  : Déphasage entre le courant harmonique de rang h et la tension harmonique de rang h

- **Puissance réactive**

La puissance réactive en présence des harmoniques est donnée par :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h \quad (\text{II-28})$$

$U_h$ : La valeur efficace de la tension harmonique de rang h .

$I_h$ : La valeur efficace du courant harmonique de rang h.

$\varphi_h$  : Déphasage entre le courant harmonique de rang h et la tension harmonique de rang h.

- **Puissance apparente**

L'expression du carré de la puissance apparente est définie comme

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \quad (\text{II-29})$$

Ce qui nous donne

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{II-30})$$

- **Puissance déformante**

En présence d'harmoniques dans un réseau électrique, l'expression du carré de la puissance apparente est égale à:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{II-31})$$

Donc :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \Rightarrow D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (\text{II-32})$$

## II.5. Facteur de puissance et facteur de déphasage [9]

- **Facteur de puissance**

Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et la puissance réactive. Il est toujours compris entre 1 et 0.

$$F_P = \frac{P}{S} \quad (\text{II-33})$$

$F_P$  : Facteur de puissance

- **Facteur de déphasage (du fondamental)**

Le facteur de déphasage est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de la composante fondamentale :

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (\text{II-34})$$

$\varphi_1$  : Déphasage entre les composantes fondamentales de courant et de la tension.

## II.6. Facteur de déformation [9]

Il caractérise le lien entre le facteur de puissance et le facteur de déphasage :

$$F_d = \frac{F_P}{\cos \varphi_1} \quad (\text{II-35})$$

## II.7. Facteur de puissance réel [9]

Pour un dipôle alimenté en régime de courant variable au cours du temps (non-sinusoïdal), le facteur de puissance est égal à la puissance active consommée par ce dipôle divisée par la puissance apparente. Il est toujours compris entre 0 et 1.

En présence des harmoniques, la définition classique du facteur de puissance doit être modifiée pour tenir compte de cette distorsion.

On définit alors, le facteur de puissance comme suit :

$$F_P = \frac{I_1}{I_{eff}} \cos \varphi_1 \quad (\text{II-36})$$

$I_1$  : la valeur efficace du courant fondamental.

$I_{eff}$  : la valeur efficace du courant totale.

$\cos \varphi_1$ : le facteur de déphasage.

On parle alors de facteur de puissance réel (True power factor) .

### II.8. facteur de crête [1]

C'est le rapport de la valeur maximale du courant ou de la tension sur leur valeur efficace.

$$F_C = \frac{I_{\max}}{I_{\text{eff}}} \quad \text{Pour le courant} \quad (\text{II-37})$$

$$F_C = \frac{U_{\max}}{U_{\text{eff}}} \quad \text{Pour la tension} \quad (\text{II-38})$$

Dans le cas d'un signal sinusoïdal ce rapport est égale à  $\sqrt{2}$ , dans le cas d'un signal non sinusoïdal ce rapport est différent de  $\sqrt{2}$ .

### II.9. Distorsion harmonique [7]

Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation du signal.

- **Taux de distorsion individuel**

Il est utilisé pour estimer l'amplitude de l'harmonique de rang h par rapport au fondamental :

Pour la tension :

$$U_h \% = 100 \frac{U_h}{U_1} \quad (\text{II-39})$$

Pour le courant :

$$I_h \% = 100 \frac{I_h}{I_1} \quad (\text{II-40})$$

- **Taux de distorsion globale**

Le taux de distorsion globale caractérise le niveau de pollution dans un réseau électrique. La norme IEC6100-2-2 définit le taux de distorsion globale comme suit :

Pour la tension :

$$\text{THD}_u \% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (\text{II-41})$$

Pour le courant :

$$\text{THD}_i \% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (\text{II-42})$$

Il existe d'autres équations permettant le calcul du taux de distorsion de la tension et du courant :

$$\text{THD}_u = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{eff}}}{U_1}\right)^2 - 1} \quad \text{et} \quad \text{TDH}_i = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{eff}}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (\text{II-43})$$

Ces deux équations sont équivalentes aux précédentes et elles sont plus simples à manipuler.

- **Taux de distorsion pondérés**

A fin de tenir compte de la spécificité de certains types de matériels, tels les condensateurs, les inductances, on peut utiliser les taux de distorsion pondérés en tension  $D_w$ . Ils sont définis de la manière suivante :

Pour les condensateurs on a :

$$D_{wc} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} h^2 u_h^2} \quad (\text{II-44})$$

$h$  rang d'harmonique.

Avec  $u_h = \frac{U_h}{U_1}$  (II-45)

Soit  $I_c$  le courant circulant dans le condensateur et  $I_{1c}$  son fondamental ; alors :

$$I_c = I_{1c} \sqrt{1 + D_{wc}^2} \quad (\text{II-46})$$

Pour les inductances on a :

$$D_{wl} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (\text{II-47})$$

Soit  $I_l$  le courant circulant dans l'inductance et  $I_{1l}$  son fondamental ; alors :

$$I_l = I_{1l} \sqrt{1 + D_{wl}^2} \quad (\text{II-48})$$

Pour les moteurs on a :

$$D_{wM} = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h^2}{h}} \quad (\text{II-49})$$

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

## II .10. Notion de phase [6][7]

La phase d'un signal harmonique est une notion importante, qui permet de calculer la somme vectorielle de plusieurs courants harmoniques circulant dans un même conducteur, et d'identifier le sens de transit du courant harmonique.

- **Phases entre  $I_h$  et  $I_1$  (ou entre  $U_h$  et  $U_1$ )**

L'analyse de **Fourier** en courant suffit pour connaître le déphasage entre le courant harmonique de rang  $h$  et le courant fondamental, ce déphasage est noté.  $\beta_h$

Lorsqu'on veut faire la somme de courants sur une portion donnée du réseau, il est alors nécessaire d'effectuer une correction qui tient compte du déphasage du courant fondamental par rapport à la tension fondamentale  $\varphi_1$

- **Phase entre  $U_h$  et  $I_h$  ( $\varphi_h$ )**

Cette notion est introduite lors du calcul de puissance harmonique active ( $P_h$ ) et réactive ( $Q_h$ ). C'est l'angle entre la tension harmonique  $U_h$  et le courant harmonique  $I_h$

$$P_h = U_h I_h \cos \varphi_h \quad (\text{II-50})$$

$$Q_h = U_h I_h \sin \varphi_h \quad (\text{II-51})$$

- **Phase entre le courant  $I_h$  et la tension fondamentale  $U_1$**

Il est préférable de connaître l'angle entre le courant harmonique  $I_h$  et une référence de tension  $U_1$  qui est beaucoup plus stable en raison de la forme plus sinusoïdale du signal et de sa faible variation angulaire le long des réseaux de courte longueur.

## II .11. Harmoniques dans un système triphasé

### II .11 .1 Tensions triphasées équilibrés [12]

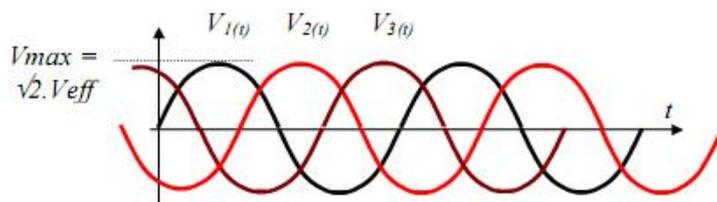
Un système triphasé est un système de trois tensions sinusoïdales de type :

$$V_{1,h}(t) = V_h \sqrt{2} \cos(h\omega t) \quad (\text{II-52})$$

$$V_{2,h}(t) = V_h \sqrt{2} \cos\left(h\omega t - \frac{2\pi h}{3}\right) \quad (\text{II-53})$$

$$V_{3,h}(t) = V_h \sqrt{2} \cos\left(h\omega t + \frac{2\pi h}{3}\right) \quad (\text{II-54})$$

La représentation temporelle de ces tensions est conforme au schéma ci-dessous.



**Figure (II.2) : tensions triphasées équilibrés**

### II.11.2 Courants triphasés équilibrés [7]

Si on alimente un système de charge triphasé équilibré (c'est-à-dire identiques sur les trois phases) par un système de tensions triphasé équilibré, il s'écoule des courants équilibrés  $i_a, i_b, i_c$ , (respectivement sur les trois phases a, b et c), tels que :

$$i_a(t) = i_a(t) \quad (\text{II-55})$$

$$i_b(t) = i_a\left(t - \frac{T}{3}\right) \quad (\text{II-56})$$

$$i_c(t) = i_a\left(t - \frac{2T}{3}\right) \quad (\text{II-57})$$

Les expressions des signaux harmoniques de rang  $h$  qu'ils contiennent sont :

$$i_{h,a}(t) = i_h \sin(h\omega t) \quad (\text{II-58})$$

$$i_{h,b}(t) = i_h \sin\left(h\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) = i_h \sin\left(h\omega t - \frac{2\pi h}{3}\right) \quad (\text{II-59})$$

$$i_{h,c}(t) = i_h \sin\left(h\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right) = i_h \sin\left(h\omega t - \frac{4\pi h}{3}\right) \quad (\text{II-60})$$

- Pour  $h = 3k + 1$  ( $k$  entier), les signaux s'expriment par :

$$i_h \sin(h\omega t) ; i_h \sin\left(h\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) ; i_h \sin\left(h\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II-61})$$

Les harmoniques forment **un système triphasé direct**.

- Pour  $h = 3k - 1$  ( $k$  entier), les signaux s'expriment par :

$$i_h \sin(h\omega t) ; i_h \sin\left(h\omega t - 4\frac{\pi}{3}\right) ; i_h \sin\left(h\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-62})$$

Les harmoniques forment **un système inverse**.

- Pour  $h = 3k$  ( $k$  entier), les signaux s'expriment

$$i_h \sin(h\omega t) ; i_h \sin(h\omega t) ; i_h \sin(h\omega t) \quad (\text{II-63})$$

Les harmoniques forment **un système homopolaire**. Si le réseau comporte un conducteur de neutre, les courants harmoniques dus aux trois phases s'y ajoutent arithmétiquement.

### II .13. Courant de neutre en triphasé [10]

En régime sinusoïdal, dans un système triphasé, la somme vectorielle des courants s'annule au point neutre. Il n'y a donc pas de courant dans le neutre. La norme autorise donc un sous-dimensionnement du neutre par rapport aux phases pour un gain financier.

Un signal déformé dû à une charge « non-linéaire » comprend une multitude d'harmoniques de fréquences multiples. Si l'on prend uniquement l'harmoniques de rang 3, le résultat de la somme vectorielle des courants n'est plus annulé au point neutre. Il y a donc une circulation de courant dans le neutre.

Les courants harmoniques de rang multiple de 3 correspondant aux trois phases s'additionnent ce qui crée un courant dans le neutre. Les harmoniques de rang 12 et plus sont généralement négligeables face à l'importance de l'harmonique de rang 3.

La valeur efficace de l'intensité dans le neutre est égale à la somme arithmétique des trois courants harmoniques de rang 3 des trois phases. Il peut y arriver qu'il y ait plus de courant dans le neutre que dans les phases les plus chargées.

### Cas réseau symétrique et équilibré.

On considère Un réseau triphasé équilibré avec le conducteur de neutre. En utilisant la transformée de **Fourier**, les courants de phase dans un réseau symétrique et équilibré s'écrivent :

$$I_a(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_5 \sin(5\omega t + \varphi_5) + \dots \quad (\text{II-64})$$

$$I_b(t) = I_1 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_1\right) + I_3 \sin\left(3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_3\right) + I_5 \sin\left(5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_5\right) + \dots \quad (\text{II-65})$$

$$I_c(t) = I_1 \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \varphi_1\right) + I_3 \sin\left(3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \varphi_3\right) + I_5 \sin\left(5\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \varphi_5\right) + \dots \quad (\text{II-66})$$

Le courant dans le conducteur de neutre est donné par l'addition des trois courants de phase:

$$I_N(t) = 0 + 3 * I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + 0 + \dots \quad (\text{II-67})$$

D'une manière générale, pour un réseau symétrique et équilibré, les courants harmoniques de rang multiples de 3 sont en phase et s'additionnent arithmétiquement dans le conducteur de neutre, alors que les composantes fondamentales et les harmoniques de rang non multiples de 3 s'annulent.

### II.9. Rapport des valeurs efficaces des courants de neutre et de phase pour un réseau symétrique et équilibré [10]

Pour un réseau triphasé symétrique et équilibré, le rapport des valeurs efficaces, du courant de neutre et du courant de phase est donné par la relation suivante :

$$\frac{I_N}{I_{\text{phase}}} = \frac{\sqrt{\sum (3I_{6k+3})^2}}{\sqrt{\sum (I_{6k+1})^2 + \sum (I_{6k+3})^2 + \sum (I_{6k+5})^2}} \quad (\text{II-68})$$

Avec :

$I_N$  : La valeur efficace de courant dans le neutre.

$I_{\text{ph}}$  : La valeur efficace de courant dans la phase.

$I_{6k+1}$ ,  $I_{6k+3}$ ,  $I_{6k+5}$  : Sont les valeurs efficaces des courants harmoniques des rangs  $6k+1$ ,  $6k+3$  et  $6k+5$  respectivement et qui sont présents dans le courant de phase ( $k=0, 1, 2, 3, \dots$ ).

En prenant le cas particulier où le courant de phase est constitué des rangs impairs  $I_{2n+1}$  avec :  $I_{2n+1} = q^n * I_1$  ( $0 \leq q \leq 1$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

On aura donc :  $I_3 = q * I_1$ ,  $I_5 = q^2 * I_1$ ,  $I_7 = q^3 * I_1$ ,  $I_9 = q^4 * I_1$ , ... etc

On a la valeur efficace du courant de phase est :

$$I_{\text{phase}} = \sqrt{1 + q^2 + q^4 + q^6 + \dots} * I_1 = \frac{1}{\sqrt{1-q^2}} I_1 \quad (\text{II-69})$$

La valeur efficace du courant de neutre est donnée par :

$$I_N = 3 * \sqrt{q^2 + q^8 + q^{14} + \dots} * I_1 = \frac{3*q}{\sqrt{1-q^6}} I_1 \quad (\text{II-70})$$

Le rapport des valeurs efficaces donne:

$$\frac{I_N}{I_{\text{phase}}} = 3q \sqrt{\frac{1-q^2}{1-q^6}} = 3q \sqrt{\frac{1-q^2}{(1-q^2)(1+q^2+q^4)}} = \frac{3q}{\sqrt{1+q^2+q^4}} \quad (\text{II-71})$$

On obtient une valeur maximum pour  $q=1$  et le rapport est égale à  $\sqrt{3}$ .



## Chapitre III

---

# Mesures expérimentale

---

### **III.1. Introduction**

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale des perturbations harmoniques générées par les lampes fluo compactes.

Dans notre travail, nous présenterons les mesures des courants, tensions et puissances consommées en présence des charges non linéaire (lampes fluo-compactes), nous comparerons les résultats trouvés à l'aide des appareils classiques (Ampèremètre, voltmètre, wattmètre et phasemètre) et ceux donnés par l'oscilloscope numérique TDS210 connecté à un micro-ordinateur.

Le logiciel wave star for oscilloscopes permet une analyse détaillée des signaux ; courants, tensions et puissances.

### **III.2. présentation de travail**

Dans notre étude nous allons analyser plusieurs configurations :

1) système monophasé.

- On place entre une phase et le neutre, une lampe à incandescence (classique) et on analyse les signaux courants, tensions et puissances.
- On place entre une phase et le neutre, une lampe fluo-compacte et on analyse les signaux courants, tensions et puissances.
- On place plusieurs lampes fluo-compactes en parallèles sur une même phase et on analyse les signaux courants, tensions et puissances.

2) système triphasé équilibré.

- On analyse le courant de neutre, pour un système triphasé équilibré.

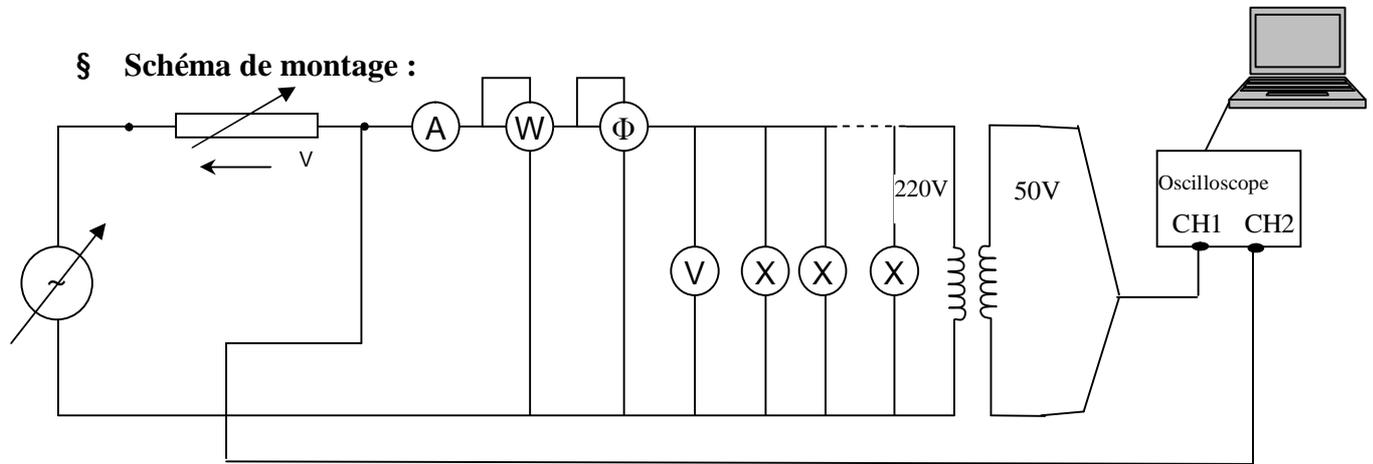


Fig. (III.1) : Schéma du montage monophasé

### III.3. Présentation du matériel utilisé

#### ⚡ Ampèremètre

L'ampèremètre utilisé est de classe (2,5) et calibre (600 mA).

#### ⚡ voltmètre

Le voltmètre utilisé est de classe (2,5) et calibre (300 mV).

#### ⚡ Wattmètre

Le wattmètre utilisé est de classe (1) et calibre (60W).

#### ⚡ Rhéostats

Nous avons utilisé un rhéostat pour chaque phase et un rhéostat pour le neutre, ces rhéostats servent à visualiser les courants des phases et le courant de neutre sur l'oscilloscope numérique ( $R_{ph} = 5,27\Omega$ ,  $R_N = 5,03\Omega$ ).

#### ⚡ Transformateur

Nous avons utilisé un transformateur abaisseur qui à un rapport de transformation

$$k = \frac{220}{50}.$$

#### ⚡ Phasemètre

### L'oscilloscope numérique TDS210

L'oscilloscope est un analyseur numérique équipé d'un microprocesseur qui assure le calcul des harmoniques et réalise diverses fonctions complémentaires, il peut fournir à des cadences élevées les décompositions spectrales simultanées de tensions et de courants en amplitude et en phase.

Pour visualiser le courant et la tension nous avons utilisés deux sondes une pour la tension et l'autre pour le courant car la sonde de courant est relié à la borne CH1 sous le calibre 1, et la deuxième sonde est relié à la borne CH2 sous le calibre 10.

#### Remarques :

1)

$I$  (A) : Valeur efficace de courant

$U$  (V) : Valeur efficace de la tension

$I_{wave\ star}$  : Courant donné par le logiciel wave star for oscilloscopes

$U_{wave\ star}$  : Tension donnée par le logiciel wave star for oscilloscopes

$P_{active}$  : Puissance active (P)

$P_{réactive}$  : Puissance réactive (Q)

$P_{apparente}$  : Puissance apparente (S)

$\cos \varphi_1$  : Facteur de déphasage

$FP_{réel}$  : Facteur de puissance réel

$THDg$  : Taux de distorsion harmonique globale

2)

Pour tenir compte des différents rapports du transformateur, des sondes utilisés, et des rhéostats nous présentons les résultats donnés par le logiciel wave star for oscilloscopes comme suit :

$$I = \frac{I_{waveStar}}{R_{ph}} \quad \text{avec } R_{ph} = 5,27\Omega \quad (\text{III.1})$$

$$U = \frac{U_{waveStar} * 10 * 220}{50} \quad (\text{III.2})$$

Avec  $U, I$  sont respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant.

3)

Les Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques sont calculés comme suit :

$$\text{Erreurs (\%)} = \frac{\text{valeur donnée par le logiciel wave star} - \text{valeur mesurée par les appareils}}{\text{valeur donnée par le logiciel wave star}} * 100 \quad (\text{II.3})$$

**III.4. Présentation des essais réalisés**

**1) ESSAI 1 :**

Dans cet essai, nous présentons les résultats de mesures pour une lampe à incandescence et des lampes fluo-compacte.

Les résultats de l'essai sont récapitulés dans les tableaux ci-dessous :

**A) Mesures effectuées sur une lampe à incandescence (classique) 100W**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \varphi_1$
$I$ (A)	0,45	102,6	0	102,6	102	1
$U$ (V)	228					

**Tableau (III.1) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) et valeurs calculées.**

	Valeur en (V)	Valeur du fondamental en (V)	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	2,5179	2,5118	3,741	13,148	1,8914	13,283	0,9898
$U_{wave\ star}$	5,2755	5,2688	3,328				

**Tableau (III.2) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,4777	0,476	3,741	109,753	15,797	110,884	0,9898
$U$ (V)	232,122	231,82	3,328				

**Tableau (III.3) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{apparente}$	$F_p$
Erreur (%)	5,65	1,77	7,06	7,47	1,02

**Tableau (III.4) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse harmonique des signaux

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.975 Hz	5.2688 V	100.000 %	0.0000	2.5118 V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.950 Hz	5.4271m V	0.103 %	169.82	14.820m V	0.590 %	83.151
Harmonic 3	149.93 Hz	22.061m V	0.419 %	73.044	34.854m V	1.388 %	-99.903
Harmonic 4	199.90 Hz	5.1070m V	0.097 %	-174.01	9.6292m V	0.383 %	-112.51
Harmonic 5	249.88 Hz	162.83m V	3.090 %	-23.981	79.447m V	3.163 %	-3.5158
Harmonic 6	299.85 Hz	2.2874m V	0.043 %	126.12	3.3744m V	0.134 %	97.950
Harmonic 7	349.83 Hz	55.629m V	1.056 %	-139.42	25.874m V	1.030 %	-107.56
Harmonic 8	399.80 Hz	2.5844m V	0.049 %	56.634	4.0217m V	0.160 %	84.949
Harmonic 9	449.78 Hz	11.980m V	0.227 %	-7.3189	9.5024m V	0.378 %	37.641
Harmonic 10	499.75 Hz	1.3325m V	0.025 %	-8.7965	6.1093m V	0.243 %	-162.10
Harmonic 11	549.73 Hz	19.392m V	0.368 %	54.400	5.1378m V	0.205 %	94.791
Harmonic 12	599.70 Hz	633.83u V	0.012 %	-96.188	6.0913m V	0.243 %	-41.273
Harmonic 13	649.68 Hz	8.1778m V	0.155 %	87.975	6.7633m V	0.269 %	159.86

Tableau (III.5) : Harmoniques de tension et de courant.

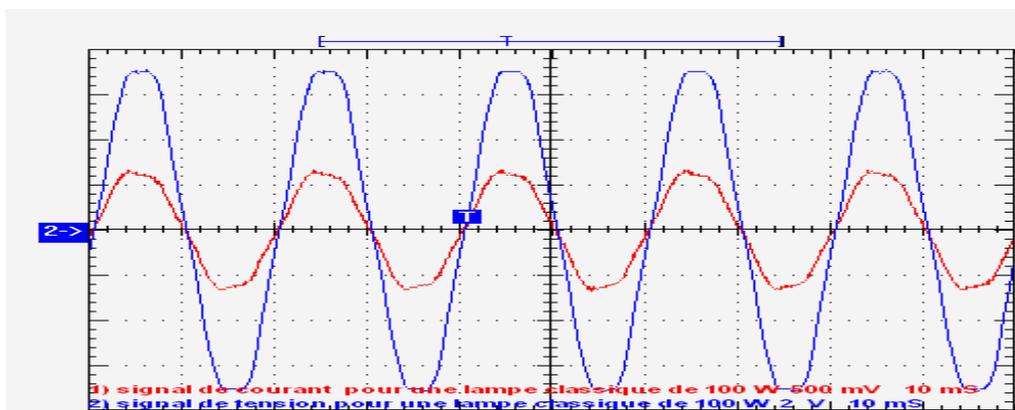


Fig. (III.2) : signaux courant et tension.

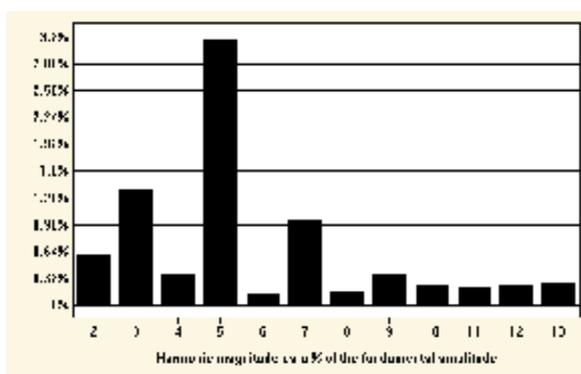


Fig. (III.3) : TDHi en courant .

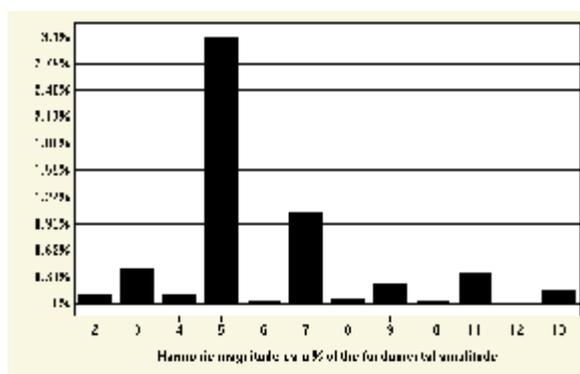


Fig. (III.4) : TDHi en tension.

**Interprétations:**

D'après les résultats obtenus, nous constatons une légère différence entre ceux trouvés à l'aide du logiciel et les résultats mesurés à l'aide des appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre).

Les erreurs sont dues probablement aux causes suivantes :

- 1) Erreurs sur la mesure de la résistance du rhéostat.
- 2) La tension donnée par le logiciel tient compte des harmoniques présents dans le réseau de distribution.
- 3) Erreurs de lecture sur les appareils.

Nous remarquons aussi que les ondes de tension et du courant sont sinusoïdales. Avec faible taux de distorsion ( $TDHg$  en courant = 3,741%,  $TDHg$  en tension = 3,349%).

**B) Mesures effectuées sur une lampe fluo-compacte de marque CROWN 45W**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \varphi_1$
$I$ (A)	0,125	28,391	5,911	29	30	0,979
$U$ (V)	232					

**Tableau (III.6) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) et valeurs calculées.**

	Valeur <i>en</i> (V)	Valeur du fondamental en (V)	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	1,2603	0,824	103,709	4,0982	5,3374	6,7293	0,609
$U_{wave\ star}$	5,3394	5,3311	3,349				

**Tableau (III.7) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,239	0,14	103,709	34,159	44,49	56,091	0,609
$U$ (V)	234,693	234,568	3,349				

**Tableau (III.8) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{réactive}$	$P_{apparente}$	$F_P$
Erreur (%)	47,7	1,15	12,17	86,71	48,3	60,75

**Tableau (III.9) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.3311 V	100.000 %	0.0000	824.74m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	6.0178m V	0.113 %	-178.37	8.4123m V	1.020 %	75.387
Harmonic 3	150.00 Hz	47.066m V	0.883 %	90.921	571.24m V	69.263 %	-27.800
Harmonic 4	200.00 Hz	3.9742m V	0.075 %	-178.71	5.9496m V	0.721 %	117.27
Harmonic 5	250.00 Hz	160.41m V	3.009 %	-27.795	346.47m V	42.009 %	130.98
Harmonic 6	300.00 Hz	1.5156m V	0.028 %	86.594	5.3393m V	0.647 %	-60.329
Harmonic 7	350.00 Hz	57.533m V	1.079 %	-125.23	309.36m V	37.510 %	-84.221
Harmonic 8	400.00 Hz	1.7877m V	0.034 %	68.444	4.7261m V	0.573 %	-93.245
Harmonic 9	450.00 Hz	19.555m V	0.367 %	44.177	312.91m V	37.941 %	77.426
Harmonic 10	500.00 Hz	1.0655m V	0.020 %	-56.605	10.417m V	1.263 %	30.370
Harmonic 11	550.00 Hz	12.286m V	0.230 %	106.00	244.27m V	29.618 %	-118.42
Harmonic 12	600.00 Hz	1.7424m V	0.033 %	122.03	10.243m V	1.242 %	-109.46
Harmonic 13	650.00 Hz	5.1052m V	0.096 %	-22.607	177.59m V	21.533 %	30.113

Tableau (III.10) : Harmoniques de tension et de courant.

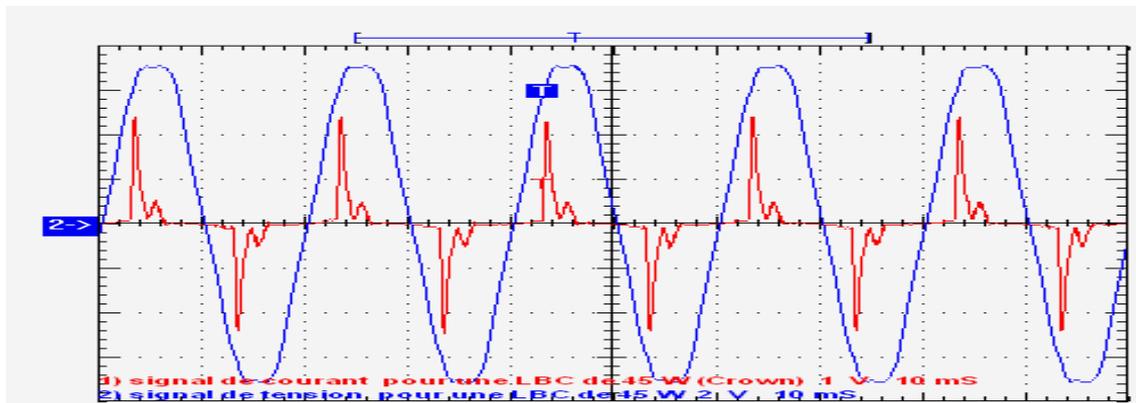


Fig. (III.5) : signaux courant et tension.

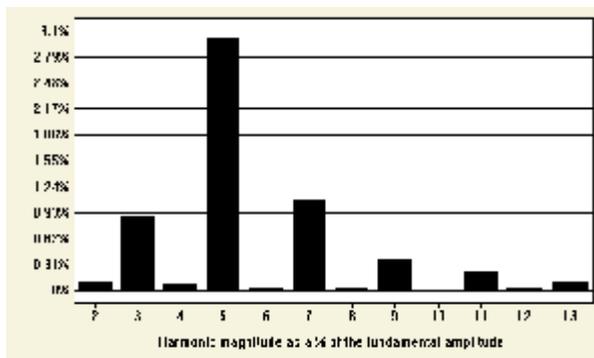


Fig. (III.6) : *TDHi* en tension.

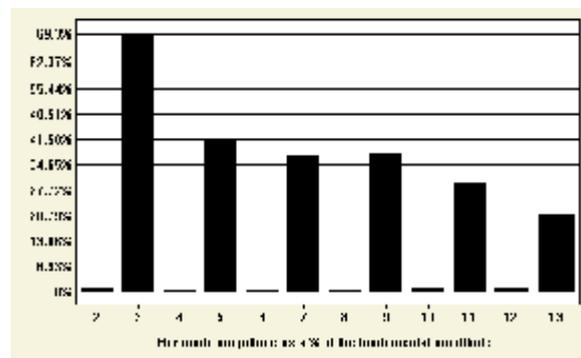


Fig. (III.7) : *TDHi* en courant.

**Interprétations:**

D'après les résultats de mesures effectués sur une lampe fluo-compacte CROWN 45W nous avons enregistré une différence importante entre les mesures prises par les appareils classiques et celles données par le logiciel wave star for oscilloscopes.

- Pour la mesure du courant, nous remarquons que la valeur donnée par l'ampèremètre est très proche de la valeur efficace du fondamental donnée par le logiciel.

Le courant donné par le logiciel représente le courant total avec les harmoniques :

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (I_h : \text{La valeur efficace du courant harmonique de rang } h)$$

L'erreur commise sur le courant est de l'ordre de 47%.

- Concernant le facteur de puissance, on constate que la mesure donnée par le Phasemètre (0,979) représente le facteur de déphasage donnée par :  $FD = \cos \varphi_1$  alors que la valeur donnée par le logiciel (0,609) représente le facteur de puissance réel donnée par :  $FP_{réel} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1$  ( $I_1$  la valeur efficace du courant fondamental et  $I$  la valeur efficace du courant total).

L'erreur commise sur le facteur de puissance est de l'ordre de 60%.

- Concernant la mesure de puissance active donnée par le wattmètre, elle est égale à :

$$P = U_1 \cdot I_1 \cos \varphi_1.$$

Et celle donnée par le logiciel est égale à :

$$P = U \cdot I \cdot FP_{réel} \quad \text{Avec} \quad U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}, \quad I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}.$$

L'erreur commise sur la puissance active est de l'ordre de 12,17%.

Si nous visualisons les signaux du courant et de la tension nous remarquons que la forme d'onde de la tension est sinusoïdale contrairement à celle du courant qui est très déformée.

Son taux de distorsion harmonique est très élevés ( $TDHg = 103,709\%$ ) par rapport à celui de la lampe à incandescence ( $TDHg = 3,741\%$ )

**C) Mesures effectuées sur une lampe fluo-compacte de marque CROWN 26W**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \phi_1$
$I$ (A)	0,07	16,153	3,107	16,45	16,25	0,982
$U$ (V)	235					

**Tableau (III.11) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) et valeurs calculés.**

	Valeur en (V)	Valeur du fondamental en (V)	$THDg\%$	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	0,7082	0,505	81,578	2,6122	2,7539	3,7957	0,688
$U_{wave\ star}$	5,3596	5,35	3,379				

**Tableau (III.12) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	$THDg\%$	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,134	0,095	81,578	21,74	22,932	31,6	0,688
$U$ (V)	235,822	235,4	3,379				

**Tableau (III.13) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{réactive}$	$P_{apparente}$	$F_p$
Erreur (%)	47,76	0,35	25,25	86,45	47,94	42,73

**Tableau (III.14) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.3503 V	100.000 %	0.0000	505.95m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	10.226m V	0.191 %	-163.38	7.8871m V	1.559 %	73.357
Harmonic 3	150.00 Hz	35.164m V	0.657 %	79.741	286.82m V	56.690 %	-46.126
Harmonic 4	200.00 Hz	5.6176m V	0.105 %	158.62	5.5254m V	1.092 %	-100.36
Harmonic 5	250.00 Hz	163.41m V	3.054 %	-25.449	162.99m V	32.214 %	93.790
Harmonic 6	300.00 Hz	928.62u V	0.017 %	164.62	3.1445m V	0.622 %	-16.166
Harmonic 7	350.00 Hz	63.578m V	1.188 %	-128.54	152.63m V	30.167 %	-134.26
Harmonic 8	400.00 Hz	980.88u V	0.018 %	35.018	5.9785m V	1.182 %	178.02
Harmonic 9	450.00 Hz	14.378m V	0.269 %	15.960	145.31m V	28.720 %	12.603
Harmonic 10	500.00 Hz	876.22u V	0.016 %	-125.35	6.2169m V	1.229 %	-6.0454
Harmonic 11	550.00 Hz	18.517m V	0.346 %	78.960	101.57m V	20.074 %	154.91
Harmonic 12	600.00 Hz	792.05u V	0.015 %	-130.23	4.1641m V	0.823 %	169.95
Harmonic 13	650.00 Hz	1.9280m V	0.036 %	69.461	81.202m V	16.049 %	-79.287

Tableau (III.15) : Harmoniques de tension et de courant

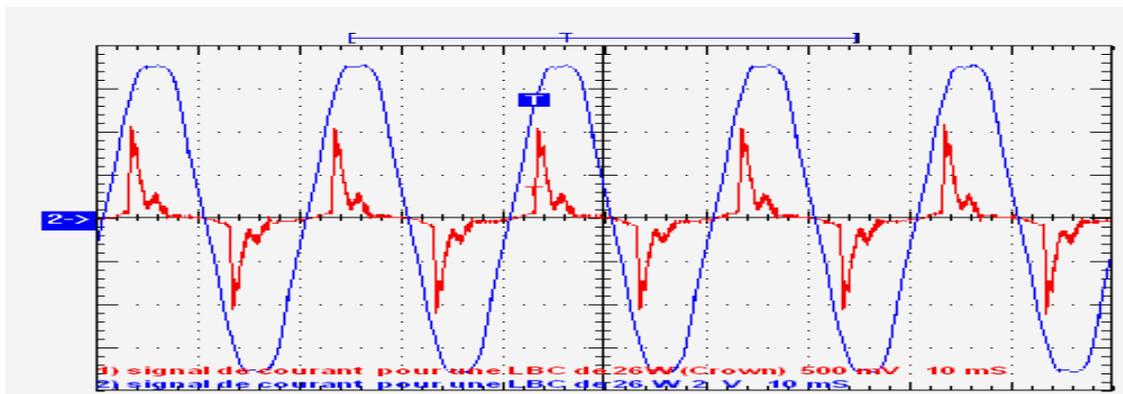


Fig. (III.8) : signaux courant et tension.

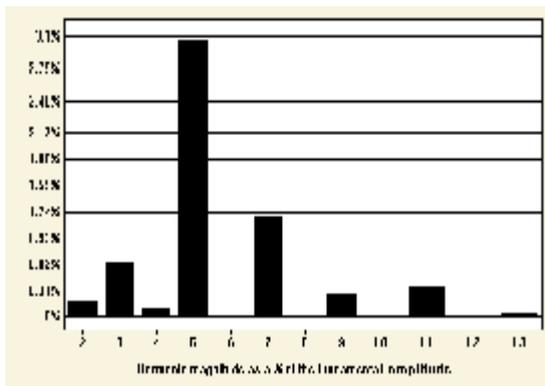


Fig. (III.9) : TDH<sub>i</sub> en tension.

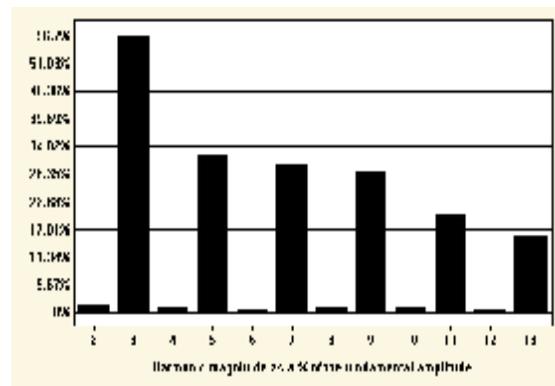


Fig. (III.10) : TDH<sub>i</sub> en courant.

**D) Mesures effectuées sur une lampe fluo-compacte de marque WATSONS 15W**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \varphi_1$
$I$ (A)	0,062	14,232	2,814	14.508	15	0,981
$U$ (V)	234					

**Tableau (III.16) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) et valeurs calculés.**

	Valeur en (V)	Valeur du fondamental en (v)	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	0,5656	0,412	82,073	2,1249	2,1672	3,0351	0,7001
$U_{wave\ star}$	5,3654	5,3553	3,261				

**Tableau (III.17) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,107	0,078	82,073	17,684	18,037	25,260	0,7001
$U$ (V)	236,077	235,633	3,261				

**Tableau (III.18) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{réactive}$	$P_{apparente}$	$F_P$
Erreur %	42,05	0,88	15,17	84,39	42,56	40,12

**Tableau (III.19) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.3553 V	100.000 %	0.0000	412.49m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	6.8439m V	0.128 %	-161.70	5.4211m V	1.314 %	66.325
Harmonic 3	150.00 Hz	26.679m V	0.536 %	75.098	239.40m V	58.039 %	-53.236
Harmonic 4	200.00 Hz	5.4636m V	0.102 %	156.61	1.9221m V	0.466 %	-154.38
Harmonic 5	250.00 Hz	160.18m V	2.991 %	-22.043	134.57m V	32.623 %	77.047
Harmonic 6	300.00 Hz	1.4577m V	0.027 %	-10.474	1.5620m V	0.379 %	136.07
Harmonic 7	350.00 Hz	57.331m V	1.071 %	-136.11	131.37m V	31.847 %	-152.30
Harmonic 8	400.00 Hz	1.2629m V	0.024 %	83.934	5.2527m V	1.273 %	139.42
Harmonic 9	450.00 Hz	13.916m V	0.260 %	-3.0560	111.96m V	27.141 %	-5.2375
Harmonic 10	500.00 Hz	1.5132m V	0.028 %	-80.960	1.7544m V	0.425 %	-117.77
Harmonic 11	550.00 Hz	19.560m V	0.365 %	67.528	71.811m V	17.409 %	122.03
Harmonic 12	600.00 Hz	1.3715m V	0.026 %	8.2619	3.8467m V	0.933 %	75.155
Harmonic 13	650.00 Hz	7.8101m V	0.146 %	141.58	64.439m V	15.622 %	-117.11

Tableau (III.20) : Harmoniques de tension et de courant.

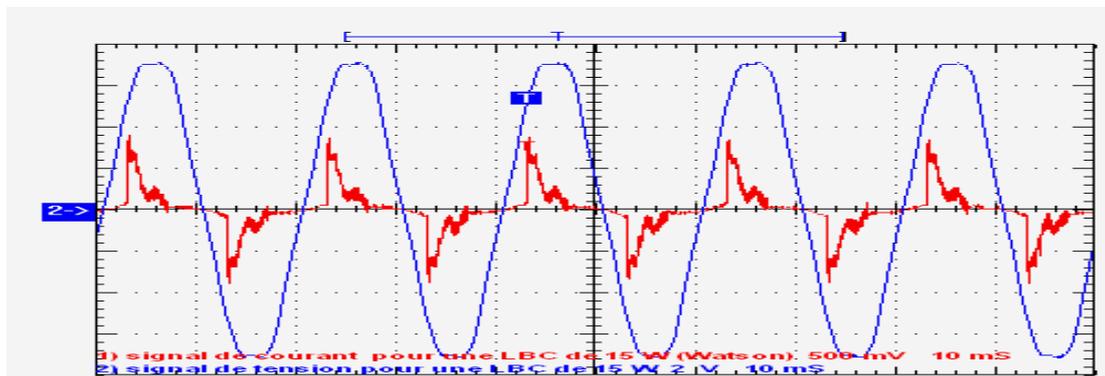


Fig.(III.11) : signaux de courants et de la tension pour une lampe fluo-compacte WATSONS 15W.

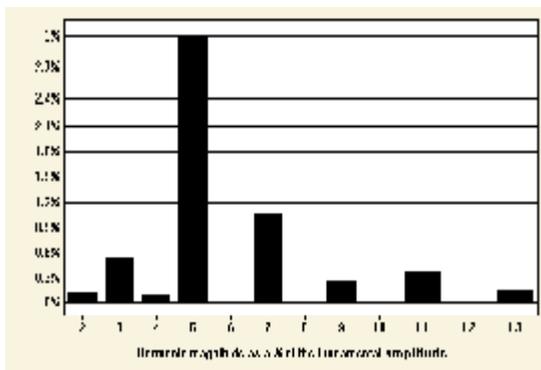


Fig. (III.12) : TDHi en tension.

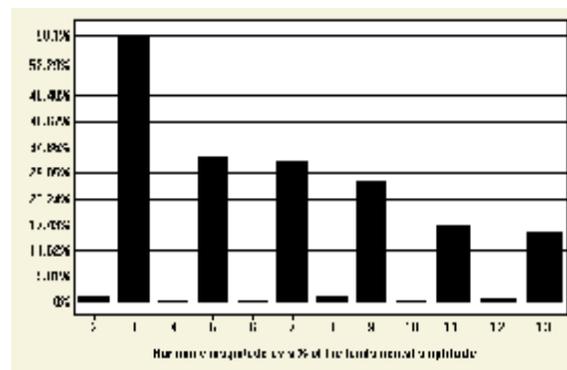


Fig. (III.13) : TDHi en courant.

## E) Tableau récapitulatif de l'essai 1

Type de lampe	$\frac{I_1}{I}$	$\frac{P_1}{P}$	$\frac{FP_{réel}}{\cos \varphi_1}$	TDH <sub>g</sub> de courant en (%)	Erreur sur <i>I</i> en (%)	Erreur sur <i>P</i> en (%)
Lampe classique	0,997	0,929	0,989	3,741	5,65	7,06
Crown 45W	0,585	0,878	0,622	103,709	47,7	12,17
Crown 26W	0,709	0,747	0,700	81,578	47,76	25,25
Wtsons 15W	0,729	0,848	0,713	82,073	42,05	15,17

Tableau (III.21) : Tableau récapitulatif des résultats trouvés pour l'essai 1

Avec :

$I_1$  : Valeur efficace du courant du fondamental

$I$  : Valeur efficace du courant total

$P_1$  : Valeur de la puissance active du fondamental

$P$  : Valeur de la puissance active totale

### Discussion des résultats :

D'après les résultats trouvés nous constatons que :

- Dans les cas des lampes fluo-compactes qui présentent des TDH en courants de l'ordre de 80 à 100 %, l'erreur sur les courants mesurés avec l'Ampèremètre est de l'ordre de 42 à 45 %, alors que l'erreur sur la puissance mesurée à l'aide du Wattmètre varie de 12 à 25 %.
- Le facteur de puissance réel pour la lampe fluo-compacte CROWN 45W, est de 0,61 et l'erreur commise en utilisant le phasemètre atteint 60%.
- Nous pouvons conclure à partir de ces résultats, de la nécessité d'utiliser des appareils plus performants comme l'oscilloscope numérique Pour les mesures des grandeurs électriques, en présences des charges à forts taux de distorsion harmonique.

2) ESSAI 2 :

Dans cet essai, on fait varier le nombre de lampes fluo-compactes de même type connectées en parallèle sur une même phase.

Le but de cet essai est de voir l'effet de foisonnement des harmoniques sur les différentes mesures prise par les différentes méthodes.

**A) Mesures prises pour 2 lampes fluo-compactes WATSONS 15W en parallèle sur une même phase**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \phi_1$
$I$ (A)	0,11	25,074	6,284	25,85	27,5	0,970
$U$ (V)	235					

**Tableau (III.22) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) et valeurs calculés.**

	Valeur en (V)	Valeur du fondamental en (V)	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	1,1144	0,766	89,242	3,7871	4,5896	5,9504	0,636
$U_{wave\ star}$	5,3393	5,3318	3,429				

**Tableau (III.23) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,211	0,145	89,242	31,526	38,252	49,57	0,636
$U$ (V)	234,93	234,60	3,429				

**Tableau (III.24) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{réactive}$	$P_{apparente}$	$F_P$
Erreur (%)	47,86	0,03	12,77	83,57	47,85	52,51

**Tableau (III.25) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.3318 V	100.000 %	0.0000	766.57m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	9.9237m V	0.186 %	-172.72	5.0848m V	0.663 %	101.17
Harmonic 3	150.00 Hz	42.394m V	0.795 %	80.954	465.49m V	60.723 %	-37.890
Harmonic 4	200.00 Hz	9.1386m V	0.171 %	153.36	873.49u V	0.114 %	-20.585
Harmonic 5	250.00 Hz	161.26m V	3.025 %	-23.361	276.57m V	36.079 %	106.34
Harmonic 6	300.00 Hz	2.8727m V	0.054 %	-139.62	2.4163m V	0.315 %	15.421
Harmonic 7	350.00 Hz	64.169m V	1.204 %	-126.17	274.00m V	35.744 %	-112.82
Harmonic 8	400.00 Hz	1.3973m V	0.026 %	96.524	5.4866m V	0.716 %	-155.29
Harmonic 9	450.00 Hz	22.531m V	0.423 %	5.2931	240.18m V	31.332 %	46.219
Harmonic 10	500.00 Hz	962.59u V	0.018 %	-93.203	5.3014m V	0.692 %	62.927
Harmonic 11	550.00 Hz	26.782m V	0.502 %	76.734	154.29m V	20.127 %	-167.04
Harmonic 12	600.00 Hz	1.0192m V	0.019 %	-153.67	2.7700m V	0.361 %	119.86
Harmonic 13	650.00 Hz	9.2155m V	0.173 %	146.22	134.59m V	17.558 %	-33.183

Tableau (III.26) : Harmoniques de tension et de courant.

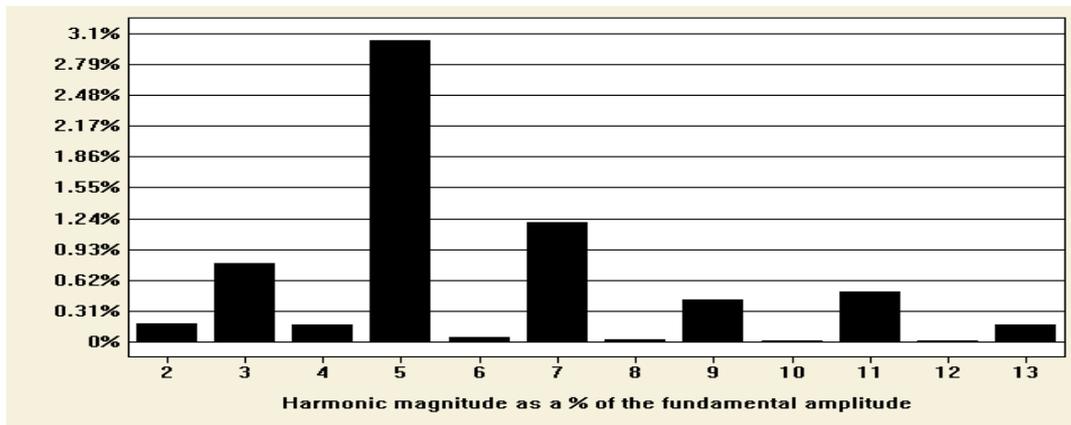


Fig. (III.14) : *TDHi* en tension.

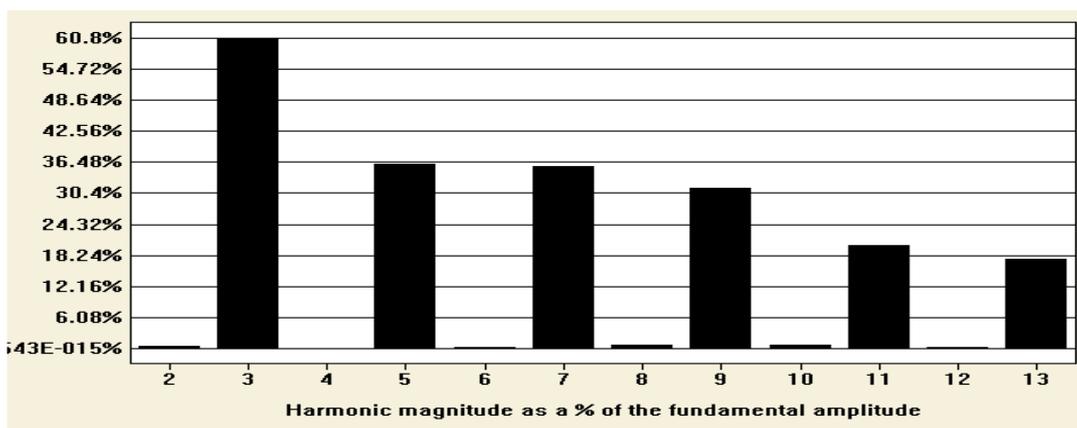


Fig.(III-15) : *TDHi* en courant.

**B) Mesures prises pour 3 lampes fluo-compactes en parallèle sur une Même phase WATSONS 15W.**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \phi_1$
$I$ (A)	0,162	36,547	10,66	38,07	38,5	0,96
$U$ (V)	235					

**Tableau (III.27) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) valeurs calculés.**

	Valeur <i>en</i> (v)	Valeur du fondamental en (v)	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	1,4720	1,037	95,484	5,0158	6,0445	7,8546	0,636
$U_{wave\ star}$	5,3359	5,3284	3,418				

**Tableau (III.28) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,279	0,196	95,484	41,66	50,545	65,50	0,636
$U$ (V)	234,78	234,45	3,418				

**Tableau (III.29) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{réactive}$	$P_{apparente}$	$F_P$
Erreur (%)	41,93	0,09	12,27	78,9	41,87	50,94

**Tableau (III.30) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.3284 V	100.000 %	0.0000	1.0370 V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	7.5170m V	0.141 %	-172.16	8.3255m V	0.803 %	109.10
Harmonic 3	150.00 Hz	50.970m V	0.957 %	84.520	672.68m V	64.869 %	-30.800
Harmonic 4	200.00 Hz	4.8982m V	0.092 %	167.98	1.0241m V	0.099 %	17.714
Harmonic 5	250.00 Hz	156.82m V	2.943 %	-24.743	404.76m V	39.033 %	122.96
Harmonic 6	300.00 Hz	3.2993m V	0.062 %	109.95	1.2611m V	0.122 %	-50.418
Harmonic 7	350.00 Hz	66.171m V	1.242 %	-120.96	391.20m V	37.725 %	-90.637
Harmonic 8	400.00 Hz	1.1592m V	0.022 %	14.400	4.2597m V	0.411 %	-151.70
Harmonic 9	450.00 Hz	27.072m V	0.508 %	24.007	354.26m V	34.163 %	74.619
Harmonic 10	500.00 Hz	2.2379m V	0.042 %	-91.354	7.5011m V	0.723 %	63.161
Harmonic 11	550.00 Hz	26.976m V	0.506 %	91.684	225.34m V	21.730 %	-128.86
Harmonic 12	600.00 Hz	1.7051m V	0.032 %	-171.67	5.3179m V	0.513 %	-134.67
Harmonic 13	650.00 Hz	5.1715m V	0.097 %	176.38	185.91m V	17.926 %	9.1144

Tableau (III.31) : Harmoniques de tension et de courant.

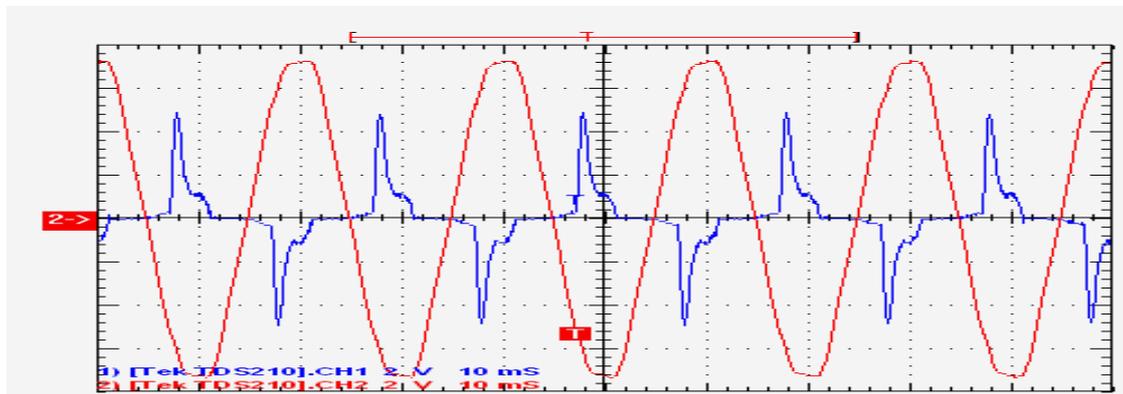


Fig.(III.16) : signaux courant et tension.

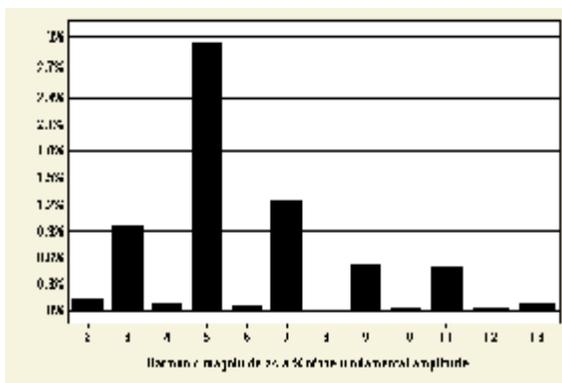


Fig. (III.17) : *TDH* en tension.

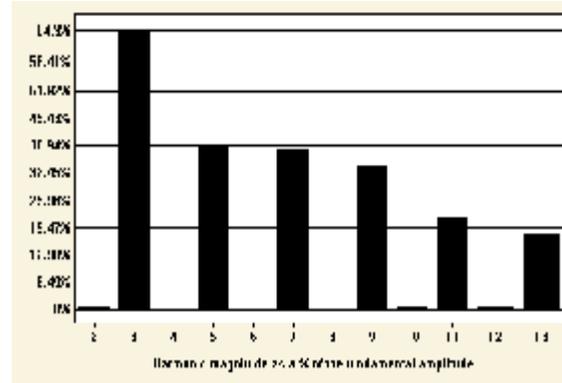


Fig. (III.18) : *TDH* en courant.

**C) Mesures prises pour 4 lampes fluo-compactes en parallèle sur une même phase WATSONS 15W.**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \phi_1$
$I$ (A)	0,217	49,006	14,102	50,995	50,5	0,961
$U$ (V)	235					

**Tableau (III.32) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) et valeurs calculés.**

	Valeur en (v)	Valeur du fondamental en (v)	THDg %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	1,9197	1,386	93,316	6,7183	7,8922	10,364	0,648
$U_{wave\ star}$	5,399	5,389	4,068				

**Tableau (III.33) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	THDg %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,364	0,262	93,316	56,032	65,859	86,470	0,648
$U$ (V)	237,556	237,116	4,068				

**Tableau (III.34) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{réactive}$	$P_{apparente}$	$F_p$
Erreur (%)	40,38	1,07	9,87	78,58	41,02	48,3

**Tableau (III.35) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.050 Hz	5.3898 V	100.000 %	0.0000	1.3866 V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.10 Hz	6.2834m V	0.117 %	-178.08	6.8130m V	0.491 %	-3.7847
Harmonic 3	150.15 Hz	69.474m V	1.289 %	88.685	860.95m V	62.091 %	-26.542
Harmonic 4	200.20 Hz	3.6858m V	0.068 %	129.99	7.9171m V	0.571 %	28.658
Harmonic 5	250.25 Hz	191.77m V	3.558 %	-21.245	515.45m V	37.174 %	120.49
Harmonic 6	300.30 Hz	3.9387m V	0.073 %	129.07	2.0533m V	0.148 %	89.229
Harmonic 7	350.35 Hz	63.880m V	1.185 %	-104.64	562.81m V	40.590 %	-87.182
Harmonic 8	400.40 Hz	4.3728m V	0.081 %	19.117	10.802m V	0.779 %	-94.829
Harmonic 9	450.45 Hz	36.124m V	0.670 %	38.021	470.12m V	33.905 %	85.290
Harmonic 10	500.50 Hz	2.7209m V	0.050 %	-52.927	6.3527m V	0.458 %	70.590
Harmonic 11	550.55 Hz	27.670m V	0.513 %	119.26	277.10m V	19.984 %	-119.42
Harmonic 12	600.60 Hz	1.4555m V	0.027 %	-10.371	4.0962m V	0.295 %	-62.483
Harmonic 13	650.65 Hz	14.329m V	0.266 %	-144.84	228.93m V	16.511 %	22.549

Tableau (III.36) : Harmoniques de tension et de courant.

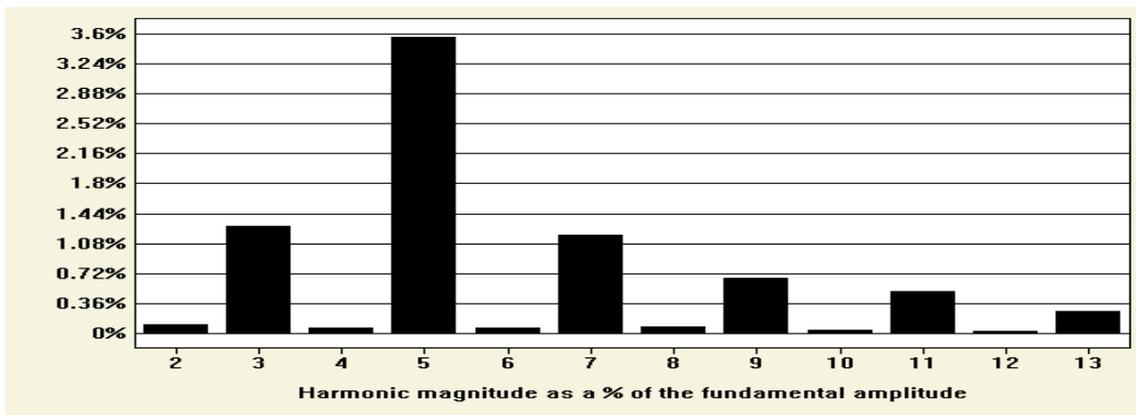


Fig. (III.19) : *TDHi* en tension.

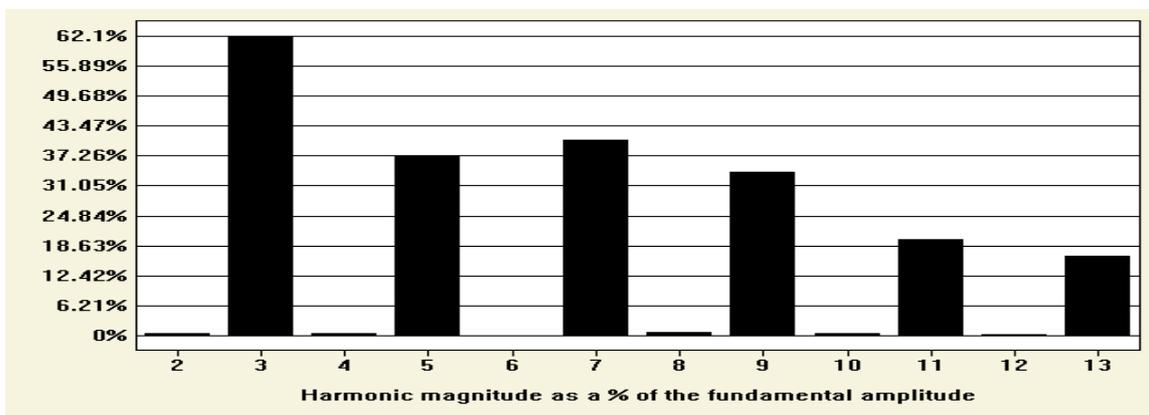


Fig. (III.20) : *TDHi* en courant.

**D) Mesures prises pour 5 lampes fluo-compactes en parallèle sur une même phase WATSONS 15W.**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \varphi_1$
$I$ (A)	0,278	62,983	18,370	65,608	62	0,960
$U$ (V)	236					

**Tableau (III.37) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) et valeurs calculés.**

	Valeur en (v)	Valeur du fondamental en (v)	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	2,2775	1,637	95,306	7,8867	9,4103	12,278	0,642
$U_{wave\ star}$	5,3910	5,379	4,101				

**Tableau (III.38) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,432	0,310	95,306	65,787	78,565	102,472	0,642
$U$ (V)	237,204	236,67	4,101				

**Tableau (III.39) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{réactive}$	$P_{apparente}$	$F_P$
Erreur %	35,64	0,5	5,75	76,61	35,97	49,53

**Tableau (III.40) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.3791 V	100.000 %	0.0000	1.6372 V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	7.9549m V	0.148 %	-166.80	6.6987m V	0.409 %	-91.502
Harmonic 3	150.00 Hz	77.641m V	1.443 %	91.484	1.0456 V	63.862 %	-24.067
Harmonic 4	200.00 Hz	5.0681m V	0.094 %	152.48	3.9471m V	0.241 %	-51.233
Harmonic 5	250.00 Hz	188.11m V	3.497 %	-24.705	623.22m V	38.066 %	127.73
Harmonic 6	300.00 Hz	3.8740m V	0.072 %	123.58	12.948m V	0.791 %	71.656
Harmonic 7	350.00 Hz	64.833m V	1.205 %	-99.850	674.56m V	41.202 %	-78.711
Harmonic 8	400.00 Hz	3.7418m V	0.070 %	67.785	12.470m V	0.762 %	-78.576
Harmonic 9	450.00 Hz	43.007m V	0.800 %	43.248	573.13m V	35.007 %	96.265
Harmonic 10	500.00 Hz	1.9384m V	0.036 %	-68.432	11.540m V	0.705 %	84.213
Harmonic 11	550.00 Hz	28.316m V	0.526 %	135.01	326.15m V	19.921 %	-102.07
Harmonic 12	600.00 Hz	2.0488m V	0.038 %	-172.48	8.9670m V	0.548 %	-98.876
Harmonic 13	650.00 Hz	16.313m V	0.303 %	-131.53	250.29m V	15.288 %	40.677

Tableau (III.41) : Harmoniques de tension et de courant.

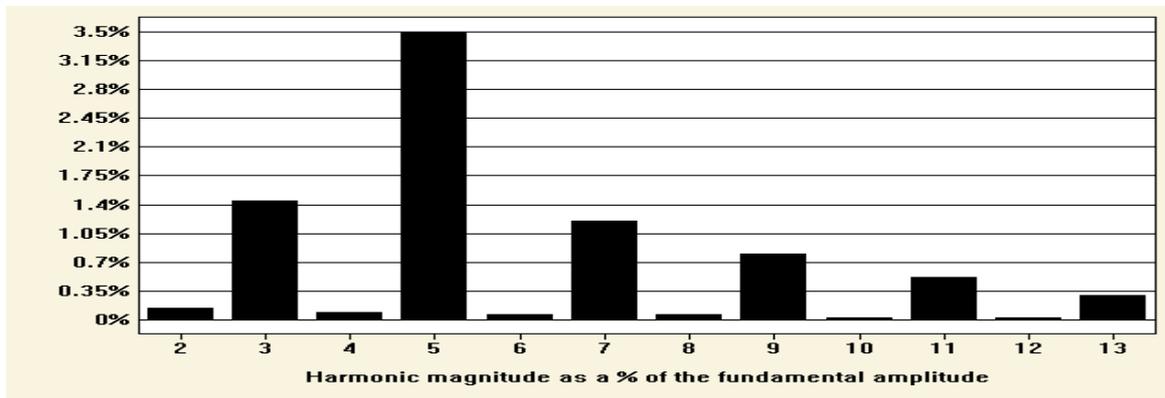


Fig. (III.21) : *TDHi* en tension.

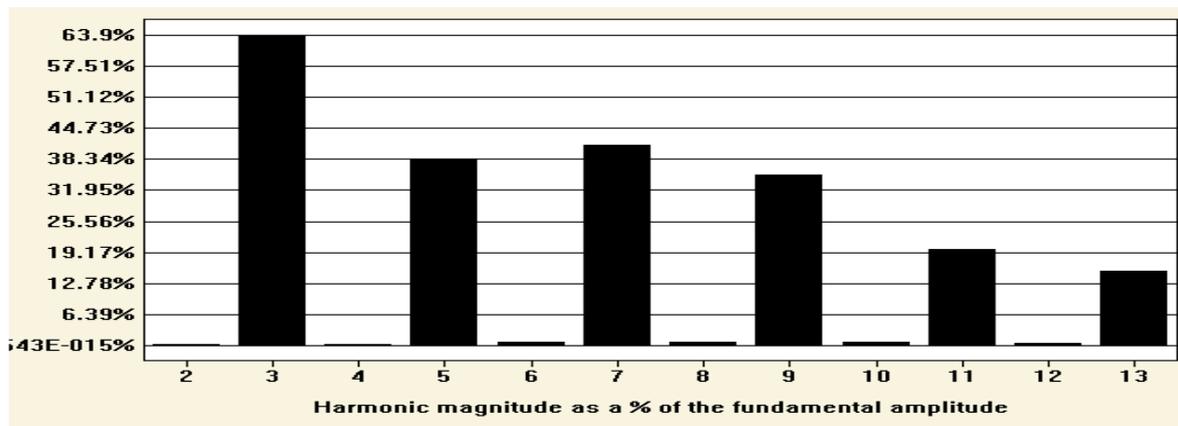


Fig. (III.22) : *TDHi* en courant.

**E) Mesures prises pour 6 lampes fluo-compactes en parallèle sur une même phase WATSONS 15W.**

	Valeur efficace	$P_{active}$ en (W) calculée	$P_{réactive}$ en (VAR) calculée	$P_{apparente}$ en (VA) calculée	$P_{active}$ en (W) mesurée	$\cos \phi_1$
$I$ (A)	0,318	72,046	21,013	75,048	75	0,960
$U$ (V)	236					

**Tableau (III.42) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre, Wattmètre et Phasemètre) et valeurs calculés.**

	Valeur en (v)	Valeur du fondamental en (v)	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I_{wave\ star}$	2,6779	1,91	96,225	9,1511	11,150	14,425	0,634
$U_{wave\ star}$	5,3865	5,373	4,202				

**Tableau (III.43) : Résultats relevés sur logiciel wave star for oscilloscopes.**

	Valeur efficace	Valeur efficace du fondamental	$THDg$ %	$P_{active}$ en (W)	$P_{réactive}$ en (VAR)	$P_{apparente}$ en (VA)	$FP_{réel}$
$I$ (A)	0,508	0,362	96,225	76,333	93,108	120,399	0,634
$U$ (V)	237,006	236,41	4,202				

**Tableau (III.44) : Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscopes après utilisation les différents facteurs.**

	$I$	$U$	$P_{active}$	$P_{réactive}$	$P_{apparente}$	$F_p$
Erreur %	37,4	0,42	1,74	77,43	37,66	51,42

**Tableau (III.45) : Erreurs sur les grandeurs mesurées par les appareils classiques.**

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.100 Hz	5.3733 V	100.000 %	0.0000	1.9109 V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.20 Hz	6.0430m V	0.112 %	-166.13	4.4616m V	0.233 %	-150.11
Harmonic 3	150.30 Hz	85.319m V	1.588 %	94.618	1.2391 V	64.848 %	-21.887
Harmonic 4	200.40 Hz	3.4348m V	0.064 %	150.74	4.0730m V	0.213 %	-93.353
Harmonic 5	250.50 Hz	188.54m V	3.509 %	-26.035	742.30m V	38.847 %	132.91
Harmonic 6	300.60 Hz	2.6252m V	0.049 %	64.614	10.866m V	0.569 %	68.081
Harmonic 7	350.70 Hz	68.850m V	1.281 %	-94.015	789.93m V	41.339 %	-73.158
Harmonic 8	400.80 Hz	4.6429m V	0.086 %	50.815	12.876m V	0.674 %	-104.92
Harmonic 9	450.90 Hz	47.312m V	0.881 %	47.783	670.54m V	35.091 %	103.52
Harmonic 10	501.00 Hz	3.1818m V	0.059 %	-16.424	4.4468m V	0.233 %	126.79
Harmonic 11	551.10 Hz	28.443m V	0.529 %	141.95	380.07m V	19.890 %	-91.270
Harmonic 12	601.20 Hz	1.6769m V	0.031 %	113.33	5.0677m V	0.265 %	-41.908
Harmonic 13	651.30 Hz	16.303m V	0.303 %	-118.88	275.54m V	14.420 %	50.937

Tableau (III.46) : Harmoniques de tension et de courant.

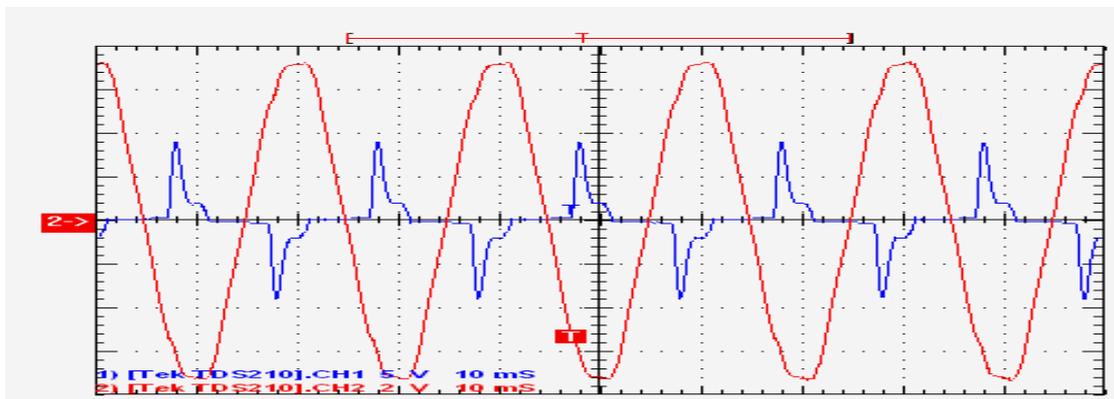


Fig. (III.23) : signaux courant et tension.

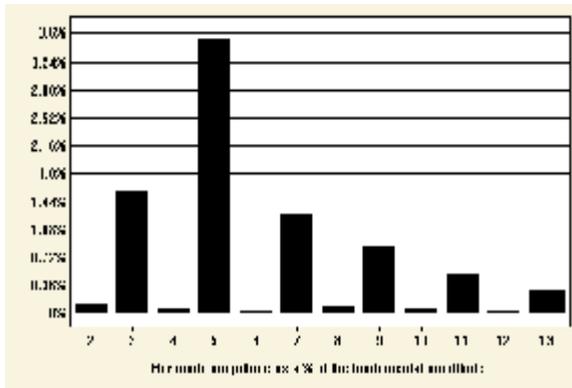


Fig. (III.24) : TDHi en tension.

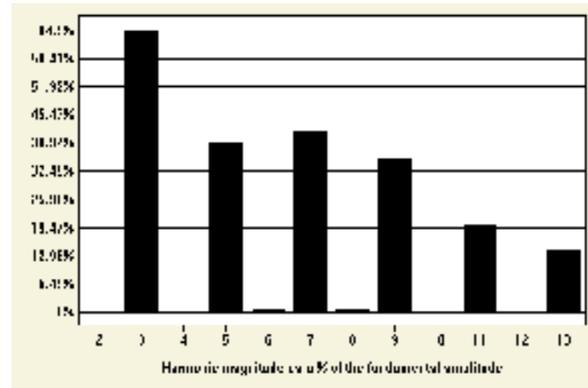


Fig. (III-25) : TDHi en courant.

## F) Tableau récapitulatif de l'essai 2

Nombre de lampes	$\frac{I_1}{I}$	$\frac{P_1}{P}$	$\frac{FP_{réel}}{\cos \varphi_1}$	$TDHg$ en (%)	Erreur sur $I$ en (%)	Erreur sur $P$ en (%)
1	0,729	0,848	0,713	82,073	42,05	15,17
2	0,687	0,872	0,655	89,242	47,86	12,77
3	0,702	0,924	0,662	95,484	41,93	12,27
4	0,719	0,901	0,674	93,316	40,38	9,87
5	0,717	0,942	0,668	95,306	35,65	5,75
6	0,712	0,982	0,660	96,225	37,4	1,74

Tableau (III.47) : Tableau récapitulatif des résultats trouvés pour l'essai 2.

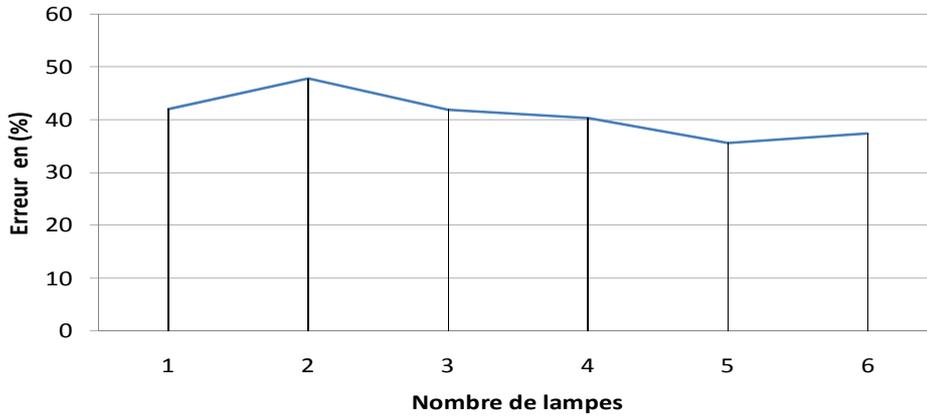


Fig. (III.26) : variation de l'erreur sur le courant en fonction de nombre de lampes

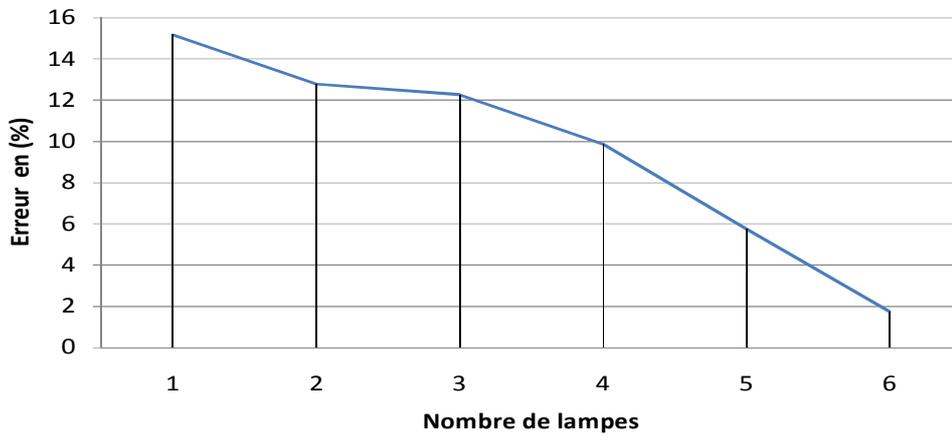


Fig. (III.27) : variation de l'erreur sur la puissance active en fonction de nombres de lampes

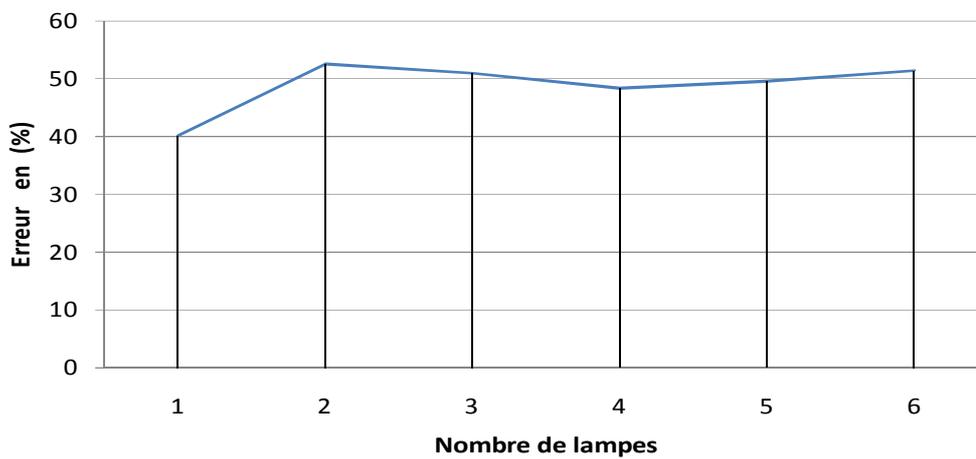


Fig. (III.28) : variation de l'erreur sur le facteur de puissance en fonction de nombre de lampes

**Discussion des résultats:**

Les résultats trouvés montrent que:

- Avec l'augmentation du nombre de lampes en parallèles, le rapporte  $\frac{I_1}{I}$  se stabilise autour de 0.71 et l'erreur sur le courant mesuré par l'Ampèremètre diminue légèrement pour atteindre 35 - 37%.
- Nous constatons également que le rapport  $\frac{P_1}{P}$  augmente sensiblement pour atteindre 0,982, ce qui ramène l'erreur sur la puissance mesuré par le wattmètre à 1.74% seulement.

On peut expliquer cette tendance par le fait que l'erreur commise sur le courant est compensée par l'erreur commise sur le facteur de puissance ou le rapport  $\frac{FP_{réel}}{\cos \varphi_1}$  se stabilise autour de 0.66.

- Nous pouvons conclure d'après cet essai, que l'augmentation du nombre de lampe branches en parallèle n'apporte pas une augmentation de l'erreur sur les grandeurs électriques mesurées par les appareils classiques, au contraire, nous constatons plutôt une diminution de ces erreurs, ce phénomène s'explique par le foisonnement des harmoniques.

Enfin pour une étude rigoureuse, il faut placer des dizaines voir des centaines de lampes fluo-compactes en parallèle pour pouvoir tirer des conclusions finales.

## 3) ESSAI 3 :

Dans cet essai, nous analysons le cas d'un système triphasé équilibré, sur chaque phase nous plaçons un nombre identique de lampes fluo-compactes.

## § Schéma de montage

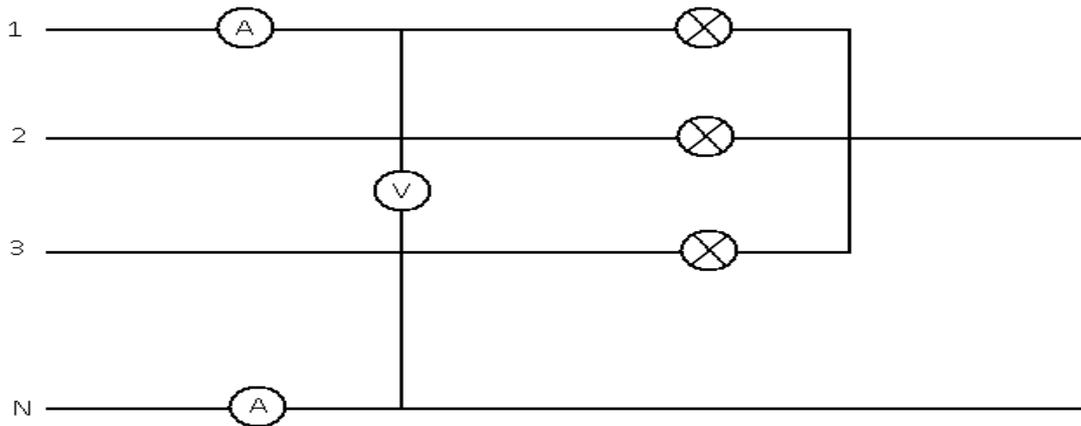


Fig. (III.29) : Schéma de montage triphasé équilibré.

A/ 1<sup>er</sup> Cas : une lampe WATSONS 15W sur chaque phase

- Courant de neutre mesuré à l'aide de l'Ampèremètre :

$$I_N = 0,130A$$

- Résultats donnés par le logiciel wave star for oscilloscopes

$I_N$ en (A)	$I_{N3}$ en (A)	$TDHg$ en (%)
0,139	0,118	428,035

Tableau. (III.49) : Résultats relevés sur le logiciel.

Avec :

$I_N$  : La valeur efficace du courant de neutre.

$I_{N3}$  : La valeur efficace du courant de rang 3 dans le neutre.

$TDHg$  : Taux de distorsion harmonique de courant de neutre.

- Erreur de mesure sur le courant de neutre = 6,47%

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.00 Hz	5.3677 V	100.000 %	0.0000	159.00m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.00 Hz	5.7021m V	0.106 %	-168.48	2.1629m V	1.360 %	144.30
Harmonic 3	150.00 Hz	49.455m V	0.921 %	92.851	596.91m V	375.413 %	70.763
Harmonic 4	200.00 Hz	2.7154m V	0.051 %	163.68	1.5397m V	0.968 %	-63.730
Harmonic 5	250.00 Hz	176.85m V	3.295 %	-20.313	5.1148m V	3.217 %	-16.179
Harmonic 6	300.00 Hz	2.5656m V	0.048 %	-83.746	2.3215m V	1.460 %	32.273
Harmonic 7	350.00 Hz	51.399m V	0.958 %	-139.31	7.4571m V	4.690 %	-76.988
Harmonic 8	400.00 Hz	2.6561m V	0.049 %	-74.114	3.3307m V	2.095 %	-35.646
Harmonic 9	450.00 Hz	23.357m V	0.435 %	22.812	326.42m V	205.295 %	-70.468
Harmonic 10	500.00 Hz	2.0106m V	0.037 %	-14.190	5.5260m V	3.475 %	45.004
Harmonic 11	550.00 Hz	20.016m V	0.373 %	72.554	13.418m V	8.439 %	101.50
Harmonic 12	600.00 Hz	3.3306m V	0.062 %	61.851	2.2519m V	1.416 %	-29.965
Harmonic 13	650.00 Hz	5.9745m V	0.111 %	129.84	3.9815m V	2.504 %	-179.25

Tableau (III.50) : Harmoniques du courant de neutre et de la tension de phase.

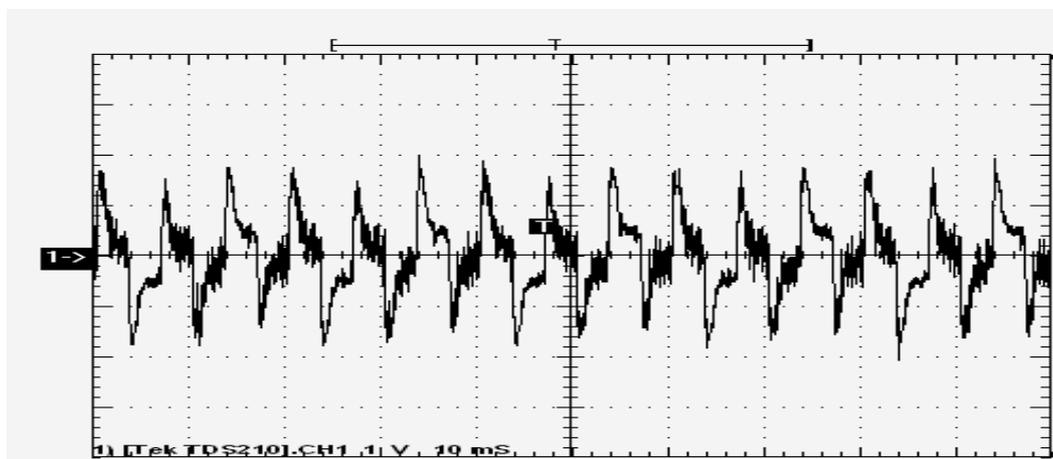


Fig.(III.30) :signale du courant de neutre.

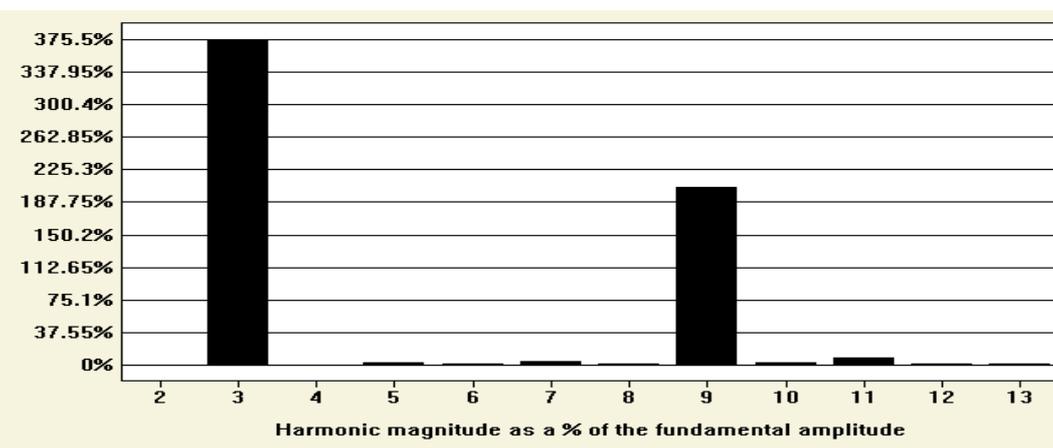


Fig. (III.31) : TDHi en courant.

**B/ 2<sup>eme</sup> Cas : 2 lampes WATSONS 15W sur chaque phase**

- Courant de neutre donné par l'Ampèremètre

$$I_N = 0,245 \text{ A}$$

- Résultats donnés par le logiciel wave star for oscilloscopes

$I_N$ en (A)	$I_{N3}$ en (A)	$TDHg$ en (%)
0,277	0,232	1210,373

**Tableau. (III.52) : Résultats relevés sur le logiciel.**

- Erreur de mesure sur le courant de neutre = 11,55%

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.3384 V	100.000 %	0.0000	109.98m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.00 Hz	7.7908m V	0.146 %	165.20	10.200m V	9.274 %	54.547
Harmonic 3	150.00 Hz	70.833m V	1.327 %	-82.911	1.1678 V	1061.801 %	-112.98
Harmonic 4	200.00 Hz	1.0061m V	0.019 %	-107.28	4.1386m V	3.763 %	-87.096
Harmonic 5	250.00 Hz	171.11m V	3.205 %	159.31	27.603m V	25.097 %	-85.311
Harmonic 6	300.00 Hz	3.9287m V	0.074 %	137.68	9.0428m V	8.222 %	-107.00
Harmonic 7	350.00 Hz	54.631m V	1.023 %	41.867	9.2851m V	8.442 %	-118.45
Harmonic 8	400.00 Hz	5.0160m V	0.094 %	179.27	7.1473m V	6.498 %	-86.484
Harmonic 9	450.00 Hz	29.312m V	0.549 %	-141.82	637.62m V	579.740 %	89.712
Harmonic 10	500.00 Hz	6.1322m V	0.115 %	-177.18	9.2126m V	8.376 %	113.91
Harmonic 11	550.00 Hz	18.577m V	0.348 %	-95.101	18.410m V	16.739 %	-148.77
Harmonic 12	600.00 Hz	3.9677m V	0.074 %	-132.88	6.1023m V	5.548 %	154.87
Harmonic 13	650.00 Hz	9.6239m V	0.180 %	-5.4183	9.9157m V	9.016 %	80.991

Tableau (III.53) : Harmoniques du courant de neutre et de la tension de phase.

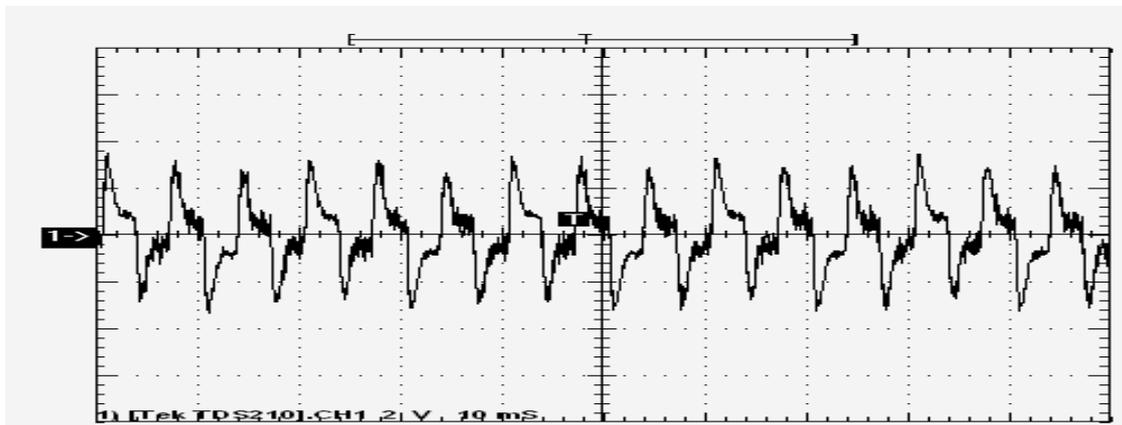


Fig.(III.32) : signale du courant de neutre.

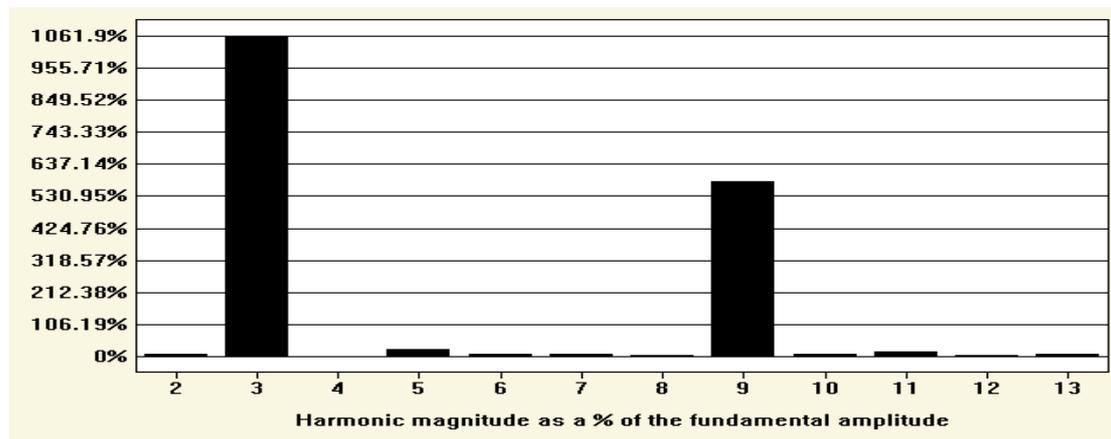


Fig. (III.33) : TDH*i* en courant.

**C/ 3<sup>eme</sup> Cas : 2 lampes (1 WATSONS 15W, 1 CROWN 45W) sur chaque phase**

- Courant de neutre donné par l'Ampèremètre

$$I_N = 0,410 \text{ A}$$

- Résultats donnés par le logiciel wave star for oscilloscopes

$I_N$ en (A)	$I_{N3}$ en (A)	$TDHg$ en (%)
0,485	0,404	1386,690

**Tableau. (III.55) : Résultats relevés sur le logiciel.**

- Erreur de mesure sur le courant de neutre = 15,46%

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.3880 V	100.000 %	0.0000	170.01m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	5.4366m V	0.101 %	179.02	7.2468m V	4.263 %	108.59
Harmonic 3	150.00 Hz	95.738m V	1.777 %	104.48	2.0319 V	1195.177 %	73.896
Harmonic 4	200.00 Hz	4.1843m V	0.078 %	155.85	2.7980m V	1.646 %	-98.551
Harmonic 5	250.00 Hz	186.35m V	3.459 %	-18.431	27.435m V	16.138 %	96.492
Harmonic 6	300.00 Hz	4.6363m V	0.086 %	-104.56	6.5947m V	3.879 %	46.958
Harmonic 7	350.00 Hz	43.323m V	0.804 %	-121.57	54.947m V	32.321 %	-80.159
Harmonic 8	400.00 Hz	2.1653m V	0.040 %	-28.544	4.5463m V	2.674 %	-118.34
Harmonic 9	450.00 Hz	45.403m V	0.843 %	70.344	1.0744 V	631.992 %	-75.402
Harmonic 10	500.00 Hz	902.35u V	0.017 %	160.78	3.8960m V	2.292 %	103.54
Harmonic 11	550.00 Hz	11.923m V	0.221 %	93.482	54.781m V	32.223 %	95.015
Harmonic 12	600.00 Hz	1.5549m V	0.029 %	68.860	3.7811m V	2.224 %	-37.521
Harmonic 13	650.00 Hz	3.3995m V	0.063 %	-24.489	53.370m V	31.393 %	-166.53
Harmonic 14	700.00 Hz	607.04u V	0.011 %	-104.92	5.1343m V	3.020 %	-52.508
Harmonic 15	750.00 Hz	13.699m V	0.254 %	51.570	470.45m V	276.723 %	143.35
Harmonic 16	800.00 Hz	109.29u V	0.002 %	-171.07	6.3729m V	3.749 %	-133.24

Tableau (III.56) : Harmoniques du courant de neutre et de la tension de phase.

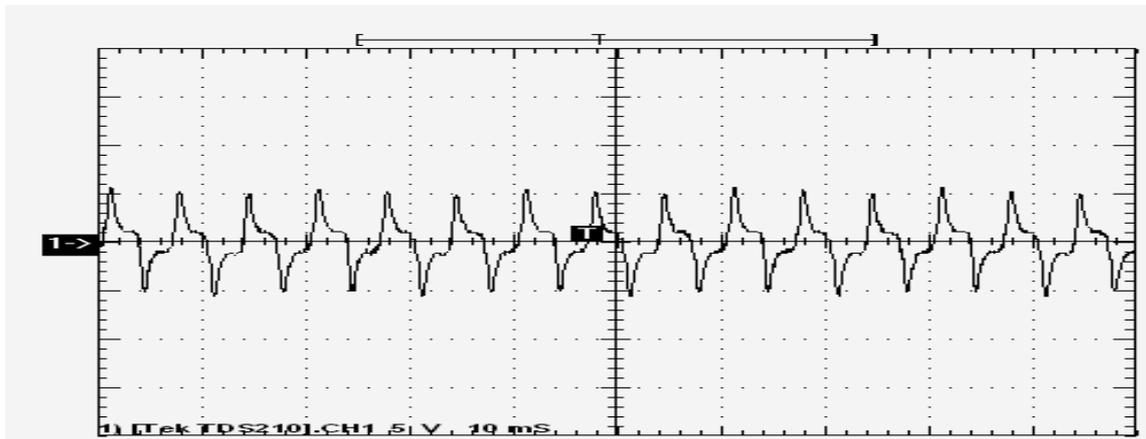


Fig.(III.34) : signale du courant de neutre .

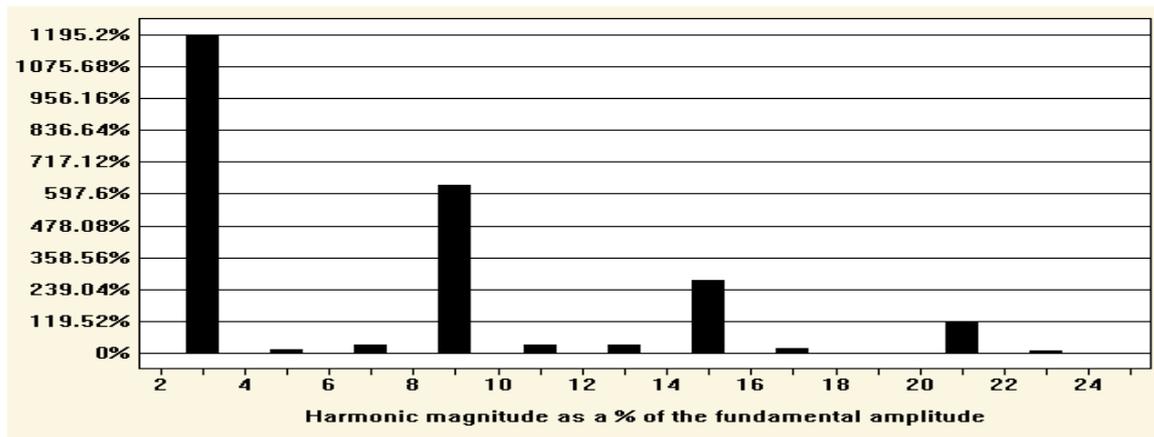


Fig. (III.35) : TDHi en courant.

**D/ 4<sup>eme</sup> Cas : 3 lampes (2 WATSONS 15W, 1 CROWN 45W) sur chaque phase**

- Courant de neutre donné par l'ampèremètre

$$I_N = 0,510 \text{ A}$$

- Résultats donnés par le logiciel wave star for oscilloscopes

$I_N$ en (A)	$I_{N3}$ en (A)	$TDHg$ en (%)
0,549	0,504	1680,752

**Tableau. (III.58) : Résultats relevés sur le logiciel.**

- Erreur de mesure sur le courant de neutre = 7,10%

• Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.900 Hz	5.3834 V	100.000 %	0.0000	169.22m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.800 Hz	6.5055m V	0.121 %	178.58	13.687m V	8.089 %	79.451
Harmonic 3	149.70 Hz	112.90m V	2.097 %	-72.708	2.5356 V	1498.412 %	-97.266
Harmonic 4	199.60 Hz	1.4542m V	0.027 %	-155.64	4.0924m V	2.418 %	-92.597
Harmonic 5	249.50 Hz	183.25m V	3.404 %	160.73	36.525m V	21.585 %	-66.455
Harmonic 6	299.40 Hz	1.3186m V	0.024 %	143.99	10.327m V	6.103 %	-44.284
Harmonic 7	349.30 Hz	47.194m V	0.877 %	65.324	38.804m V	22.931 %	95.235
Harmonic 8	399.20 Hz	7.9736m V	0.148 %	-158.49	9.9096m V	5.856 %	-51.330
Harmonic 9	449.10 Hz	48.945m V	0.909 %	-109.88	1.2135 V	717.149 %	138.29
Harmonic 10	499.00 Hz	5.0079m V	0.093 %	156.33	18.476m V	10.919 %	152.35
Harmonic 11	548.90 Hz	14.1151m V	0.263 %	-103.05	66.390m V	39.233 %	-48.655
Harmonic 12	598.80 Hz	915.52u V	0.017 %	-125.48	10.104m V	5.971 %	-151.14
Harmonic 13	648.70 Hz	1.4946m V	0.028 %	3.4302	45.191m V	26.706 %	101.40
Harmonic 14	698.60 Hz	1.3818m V	0.026 %	-69.139	6.9777m V	4.124 %	156.25
Harmonic 15	748.50 Hz	11.055m V	0.205 %	-123.61	391.71m V	231.481 %	25.726
Harmonic 16	798.40 Hz	1.4524m V	0.027 %	-108.25	13.428m V	7.936 %	23.390

Tableau (III.59) : Harmoniques du courant de neutre et de la tension de phase.

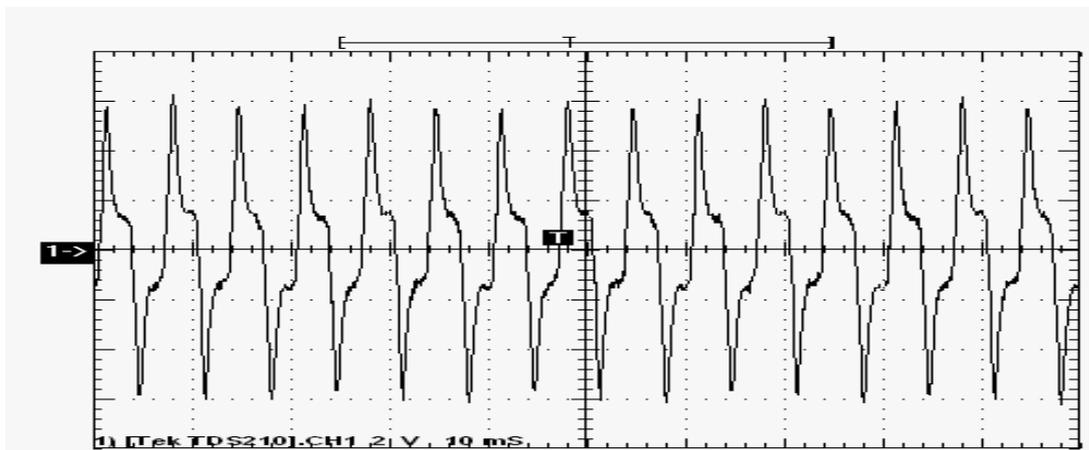


Fig.(III.36) : signale du courant de neutre .

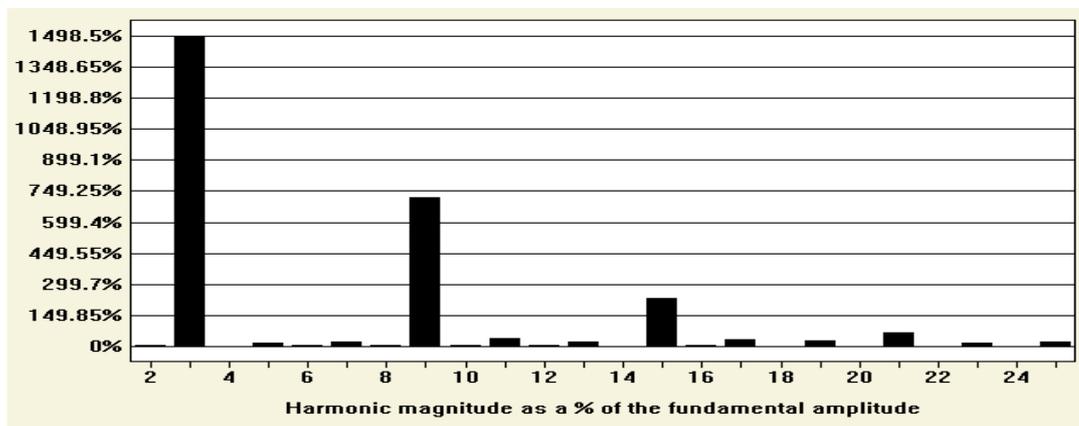


Fig. (III.37) : TDHi en courant.

## E/ Tableau récapitulatif de l'essai 3

Nombre de cas	$\frac{I_{NA}}{I_N}$	$\frac{I_{NA}}{I_{N3}}$	$TDH_g$ en (%)	Erreur sur $I$ en (%)
1 <sup>er</sup> cas	0,935	1,101	428,035	6,47
2 <sup>eme</sup> cas	0,884	1,056	1210,373	11,55
3 <sup>eme</sup> cas	0,845	1,015	1386,69	15,46
4 <sup>eme</sup> cas	0,928	1,012	1680,75	7,10

Tableau (III.60) : Tableau récapitulatif des résultats trouvés pour l'essai 3

Avec :

$I_N$  : Courant efficace donné par le logiciel de.

$I_{N3}$  : Valeur efficace du courant de l'harmonique de rang 3 .

$I_{NA}$  : Courant mesuré par l'Ampèremètre.

**Discussion des résultats :**

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'erreur commise sur le courant mesuré à l'aide de l'Ampèremètre n'est pas aussi importante comme les deux essais précédant, malgré les taux très élevés de la distorsion harmonique du courant du neutre.

En effet pour le 4<sup>eme</sup> cas, l'erreur n'est que de 7%, pour un  $TDH_g$  de 1680%.

Ces résultats s'expliquent par le fait que l'ampèremètre mesure dans ce cas la valeur efficace du rang harmonique le plus dominant qui est le troisième (1500% du fondamentale pour le 4<sup>eme</sup> cas), et on voit bien dans le tableau récapitulatif précédant que les rapports  $\frac{I_{NA}}{I_{N3}}$  sont tous proche de l'unité.

### **Conclusion générale :**

Parmi les effets connus des perturbations harmoniques, on peut citer les erreurs de mesures dans les appareils classiques, dus à la distorsion des ondes des signaux courant et tension. Les appareils mesurant une valeur crête fournissent une valeur erronée.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux mesures des grandeurs électriques (courant, tension, puissance) dans le cas des lampes fluo-compactes qui sont connues pour leurs taux élevés de distorsion harmonique du courant.

Dans l'essai 1, nous avons comparé, les résultats obtenus à partir des appareils classiques et ceux obtenus à l'aide d'un oscilloscope numérique performant.

Les résultats traités à l'aide du logiciel wave star for oscilloscopes montrent que l'erreur commise sur la mesure du courant varie de 42 à 47% alors que l'erreur sur la mesure de puissance varie de 12 à 25%.

L'erreur commise sur la mesure du facteur de puissance peut atteindre dans ce cas les 60%.

A partir de l'essai, nous concluons de la nécessité d'utiliser des appareils plus performants, ceux qui font un échantillonnage du signal.

Dans l'essai 2, nous avons placé plusieurs lampes branchés en parallèle, et nous avons constatés que les erreurs de mesures ont plutôt tendance à diminuer, surtout pour le cas de la mesure de puissance active, ce qui peut être expliqué par le phénomène du foisonnement des harmoniques.

Dans l'essai 3, nous avons mesuré le courant du neutre dans un système triphasé en présence des lampes fluo-compactes, et nous avons remarqué une diminution très significative de l'erreur commise sur la mesure du courant et nous avons montré que l'Ampèremètre dans ce dernier cas mesure plutôt la valeur efficace de l'harmonique 3.

Ce travail, nous a été très bénéfique pour la compréhension des harmoniques, et nous espérons que cette étude sera poursuivie à l'avenir pour une étude plus exhaustive

# Bibliographie

# Bibliographie

**[1] N.AMICHE et L.LAOUISSET**

«*Etude expérimentale des perturbations harmoniques générées par des lampes fluo-compactes* »  
Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2008.

**[2] Schneider Electric : cahiers techniques**

N0141 : « *Les perturbations électriques en BT* »

N° 183 : « *Harmoniques: convertisseur propre et compensateur actif* »

N° 152 : « *Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement* »

N° 199 : « *La qualité de l'énergie électrique* ».

N° 199 : « *L'alimentation des circuits d'éclairage* »

**[3] Documents internet**

[www.volta électricité- les perturbations electriques.fr](http://www.volta-electricite-les-perturbations-electriques.fr)

[www.syndicat-éclairage.fr](http://www.syndicat-eclairage.fr)

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

[www.afe-éclairage.com.fr](http://www.afe-eclairage.com.fr)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe a incandescence classique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_a_incandescence_classique)

[http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe fluorescente](http://fr.wikipedia.org/wiki/Lampe_fluorescente)

**[4] M .Saïd**

«*Gestion de la pollution harmonique dans les installations électriques*» MEMOIRE DE DEUA  
U.M.M.T.O 2008.

**[5] Alain Charoy**

«*CEM, parasites et perturbations électriques*», Tome I DUNDOD paris 1992

**[6] E.Felice**

« *Perturbations harmoniques, effets, origines, mesures, diagnostic, remèdes* » DUNOD, Paris, 2000.

**[7] T.Deflandre, P.Mauras**

«*Les harmoniques sur les réseaux électriques*» Direction des études et recherches de  
EDF.EYROLLES, Paris, 1998.

**[8] H.BESSAI**

« *Etude déterministe de la propagation des harmoniques dans les réseaux d'énergie électrique* ».  
Mémoire de magistère, U.M.M.T.O, 2000

**[9] Christophe Prévé**

« *Les réseaux électriques industriels 2* »  
Edition, LAVOISIER, 2005

**[8] J. Desmet, I. Sweertvaegher, G. Vanalme, K. Stockman et R. Belmans**

«*Analysis of the neutral conductor current in a three phase supplied network with non-linear single phase loads* »

Article IEEE

PHD Thesis

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY GOTEBORG SWEDEN 1999.

**[11] STEFAN SVENSSON**

*«Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions: the significance of harmonics for the measurement of power and other AC quantities».*

**[12] LUC, JC .Gianduzzo, Didier. Geoffrey uniffroy**

*«Rappels fondamentaux: puissances électriques, Systèmes triphasés, circuit magnétiques, transformateurs, harmoniques, régimes transitoire, réseau électrique»*

Université bordeaux 1, 07-09-2007.

**[13] Karle Johnson et Robert Zavaldil**

*« Assessing the impacts of non linear loads on power quality in commercial building- An overview »*

0-7803-0453-5/91 1991 IEEE