

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
Département D'Electrotechnique



MEMOIRE de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme
D'ingénieur d'état en électrotechnique
Option : Réseaux Electriques

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA POLLUTION HARMONIQUE
DUE AUX LAMPES FLUO-COMPACTES

Présenté par : **Mr. ZAIDI KHELIFA**
Mr. SEKKAI YASSINE

Dirigé par : **Mr. BESSAI HAMZA**

Promotion : 2011

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier notre promoteur monsieur BESSAI pour ses orientations et sa disponibilité constante tout au long de notre travail.

Nous tenons également à remercier monsieur RABAHALLAH et monsieur CHALLAL pour leurs précieux aides .

Nos remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui nous ont apporté leurs aides de près ou de loin à réaliser ce modeste travail.

DÉDICACES

*A ma très chère mère, mon père, ma famille et tous mes amis.
A la mémoire de mes regrettables amis SOFIANE et AMINE.*

Z.KHELIFA.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

➤ *Les deux personnes les plus chères à moi : mes parents qui ne cessent pas de me motiver et encourager !!*

Ils m'ont appris que si on tombe c'est pour mieux apprendre à se remettre sur pieds !!

Je leurs souhaite longue vie.

➤ *Mes chers frères et sœurs.*

➤ *la mémoire de mes grands parents*

➤ *la mémoire de mon regrettable ami AMINE*

➤ *tous ceux qui occupent une place dans mon cœur*

S.yassine

SOMMAIRE

Introduction générale	2
Chapitre I : DEFINITIONS ET ASPECTS THEORIQUES	
1 DEFINITIONS ET ASPECTS THEORIQUES.....	4
1.1 Harmonique d'un signal périodique	4
Introduction	4
1.1.1 Décomposition d'un signal en série de Fourier.....	5
1.1.2 Analyse d'un signal	6
1.2 Harmonique de courant et de tension.....	9
1.2.1 Harmonique de courant.....	9
1.2.2 Tension harmonique.....	10
1.2.3 Impédance Harmonique.....	10
1.3 Distorsion harmonique.....	11
1.3.1 Taux de distorsion harmonique global (TDHg).....	11
1.3.2 TDH en courant ou en tension.....	11
1.3.3 Taux de distorsion harmonique individuel (TDHi).....	12
1.3.4 Taux de distorsion pondéré.....	12
1.3.5 Intérêt de chacun des indicateurs.....	13
1.4 Facteur d'influence.....	13
1.4.1 Les harmoniques de rangs impairs multiples de 3.....	14
1.4.2 Les harmoniques de rangs impairs non multiples de 3.....	14
1.4.3 Les harmoniques de rangs paires (2, 4, 6.....)	14
1.5 Notion de phase.....	14
1.5.1 Phase entre I_h et I_1 (ou entre V_h et V_1).....	14
1.5.2 Phase entre le courant I_h et la tension fondamentale V_1	15
1.5.3 Phase entre la tension V_h et le courant harmonique I_h	15
1.6 Foisonnement.....	15
1.7 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	15
1.7.1 Charge linéaire.....	16
1.7.2 Charge non linéaire.....	16
2 ORIGINE DES HARMONIQUES	17
2.1 Appareils générateurs d'harmoniques.....	17
3 PRINCIPAUX EFFETS DES PERTURBATIONS HARMONIQUES.....	18
3.1 Effets instantanés.....	18
3.2 Effets à termes.....	18
4. PRESENTATION DES LAMPES FLUO- COMPACTES (LFC).....	20
Introduction.....	20
4.1 Historique.....	20
4.2 Présentation.....	20
4.3 Principe de fonctionnement d'une ampoule fluo compacte.....	22
4.4 Le ballast électronique.....	22
4.5 Les principales parties constitutives du ballast électronique.....	24
4.6 Rôle du ballast électronique.....	24

4.7 Avantages des lampes fluo compactes.....	25
4.8 Les Inconvénients.....	26
4.9 Tableau d'équivalence.....	26
4.10 Effets de la température sur la performance des lampes fluo compactes.....	27

Chapitre II : HARMONIQUES DANS LES RESEAUX TRIPHASES

Introduction.....	29
1 EXPRESSIONS DES PUISSANCES.....	29
1.1 Puissance électrique en régime sinusoïdal.....	29
1.1.1 Puissance instantanée.....	29
1.1.2 Puissance active.....	30
1.1.3 Puissance fluctuante.....	30
1.1.4 Puissance apparente.....	30
1.1.5 Puissance réactive.....	30
1.2 Puissance en régime non sinusoïdal.....	31
1.2.1 Puissance active	31
1.2.2 Puissance réactive.....	31
1.2.3 Puissance apparente.....	31
1.2.4 Puissance déformante.....	32
1.3 Facteur de puissance et facteur de déphasage.....	32
1.3.1 Le facteur de puissance.....	32
1.3.2 Facteur de déphasage (du fondamental).....	33
1.3.3 Facteur de déformation.....	33
1.3.4 Facteur de puissance réel.....	33
1.3.5 Facteur de forme.....	33
2 PRESENTATION DES APPAREILS DE MESURE.....	34
2.1 Classifications des appareils à déviation.....	34
2.1.1 Les appareils magnétoélectriques en courant alternatif.....	34
2.1.2 Les appareils magnétoélectriques avec redresseur.....	34
2.1.3 Les appareils ferromagnétiques.....	35
2.2 Description des appareils de mesures usuels.....	36
2.2.1 L'oscilloscope	36
2.2.2 Les capteurs.....	37
3 HARMONIQUE DANS UN SYSTEME TRIPHASE.....	38
3.1 Tensions triphasées équilibrés.....	38
3.2 Courants triphasés équilibrés.....	38
3.3 Courant de neutre en triphasé.....	39
a. allure du courant dans le neutre.....	41
b. calcul de la valeur efficace du courant neutre.....	42
c. rapport des valeurs efficace des courants de neutre et de phase pour un réseau symétrique et équilibré.....	44
4 LES REMEDES.....	45
4.1 Transformateurs d'isolement à couplages particuliers.....	46
4.1.1 Transformateur triangle étoile.....	46
4.1.2 Transformateur à secondaire zigzag.....	47

CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE

Introduction.....	49
1 ESSAIS EN MONOPHASE	49
Essai à vide.....	50
1.2 Mesures effectuées sur une lampe à incandescence (classique) 60W.....	50
1.3 Mesures effectuées sur une lampe fluo-compacte de marque Philips 20W.....	52
1.4 Mesures prises pour 2 lampes fluo-compactes phillips 20W en parallèle sur une même phase.....	55
1.5 Mesures prises pour 3 lampes fluo-compactes Phillips 20W en parallèle sur une même phase.....	57
1.6 Mesures prises pour 5 lampes fluo-compactes Phillips 20W en parallèle sur une même phase.....	59
1.7 Mesures prises pour 6 lampes fluo-compactes Phillips 20W en parallèle sur une même phase.....	61
1.8 Mesures prises pour 7 lampes fluo-compactes Phillips 20W en parallèle sur une même phase	63
1.9 Récapitulation des résultats.....	65
1.10 Comparaison entre les différents essais.....	67
2. ESSAIS EN TRIPHASE.....	69
2.1 Charge linéaire.....	70
2.2 Charge non linéaire.....	76
2.2.1 Une lampe fluo-compacte sur chacune des trois phases du réseau.....	76
2.2.2 Deux lampes fluo-compactes sur chacune des trois phases du réseau.....	82
2.1 Récapitulation des résultat.....	88
Conclusion générale.....	93

Introduction

INTRODUCTION GENERALE

La théorie classique de l'énergie électrique ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux et équilibrés. Cependant les signaux électriques présents sur les réseaux (surtout les courants) sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux ni équilibrés. Dans le domaine de la qualité de l'énergie, il est indispensable de bien connaître tous les échanges entre le réseau et les différentes charges de façon à pouvoir compenser les éventuelles perturbations.

L'analyse des signaux non sinusoïdaux et déséquilibrés est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les harmoniques et les composantes symétriques, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés (non sinusoïdaux et déséquilibrés) en composantes idéales et perturbations.

Le concept d'harmoniques a été introduit au début du XIX^{ème} siècle par JOSEF FOURIER, en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquences discrètes.

Notre travail consiste en l'étude expérimentale des perturbations harmoniques générées par les lampes fluo-compactes (LFC), il présente des mesures effectuées au laboratoire pour différents essais en utilisant des appareils classiques et le logiciel « WAVE STAR FOR OSCILLOSCOPE », ainsi que l'analyse des ondes du courant et de tension à l'aide d'un oscilloscope numérique TDS 210, ce qui nous permettra de mettre en évidence la contribution de ces générateurs de courants harmoniques à la perturbation des réseaux électriques.

Dans le premier chapitre nous avons présenté quelques généralités sur le phénomène harmonique et une présentation de la lampe fluo-compacte ainsi que ses principales caractéristiques.

Dans le deuxième chapitre nous avons évoqué les harmoniques dans un système triphasé ainsi quelques solutions portées pour l'élimination de certains rangs d'harmoniques, nous avons aussi présenté brièvement les différents appareils de mesure usuels.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats de l'étude expérimentale. Il est reparti en deux : la première englobe les résultats expérimentaux des différents essais en monophasé, la deuxième partie résume les essais en triphasé.

Chapitre I

Définitions et aspects théoriques

1 Définitions et aspects théoriques

1.1 Harmonique d'un signal périodique

- **Introduction**

La forme des ondes de courant et de tension relevées sur les réseaux d'énergie et dans les réseaux industriels et tertiaires s'éloigne assez souvent de la sinusoïde idéale pure. On sait que la déformation de la tension résulte de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux.

Une question pratique est de savoir quel est l'impact qu'aura sur la tension l'ensemble de tous les courants non sinusoïdaux. Nous ne savons répondre qu'en partie à cette question : comme tous les éléments du réseau ont un comportement linéaire, l'effet sur la tension de l'ensemble de ces courants est une superposition de l'effet qu'aurait chaque courant individuellement.

Reste une question de fond : *Quel effet a un courant sur la tension ?*

En introduisant les notions d'impédance complexe ou de diagramme de Fresnel (pour généraliser les lois du courant continu), l'effet est connu lorsque le courant est sinusoïdal (fondamental). Mais comme les formes de courant peuvent être très différentes, cela devient donc plus compliqué. La solution consiste à utiliser une décomposition en série de FOURIER qui s'appuie sur le fait que tout signal périodique peut être représenté par une onde à la fréquence fondamentale (50Hz), et d'ondes de fréquence multiple, de la fréquence fondamentale (harmoniques).

Alors, quel que soit le courant injecté, grâce à la linéarité du comportement du réseau, nous sommes amenés à examiner l'effet d'un courant sinusoïdal injecté dans le réseau (courant et tension dans chaque élément).

L'effet global s'obtient en superposant chaque effet élémentaire.

Cette décomposition, dite harmonique, est un artifice mathématique très commode. Ceux qui l'utilisent parlent des Harmoniques comme un phénomène physique distinct. En réalité, nous n'observons que des signaux non sinusoïdaux. Sans cette décomposition, nous aurons à résoudre des équations du type :

$$V(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{I-1})$$

Nous nous retrouvons ainsi dans le domaine temporel. En notation complexe ou de Fresnel, le paramètre temps n'apparaît pas de façon explicite, mais apparaît le terme $\omega = 2\pi f$

D'où la dénomination de domaine fréquentiel, qui traite d'équations algébriques du type :

$$V = RI + jL \omega I \quad (I-2)$$

L'intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs de réseaux, car l'étude à 50 Hz est dissociée de celles relatives aux fréquences harmoniques. Le problème global est traité comme autant de problèmes linéaires que de rangs harmoniques :

$$\begin{aligned} U_1 &= Z_1 \cdot I_1 \\ U_h &= Z_h \cdot I_h \end{aligned} \quad (I-3)$$

Notons que U_h , Z_h et I_h sont des grandeurs vectorielles décrites par des amplitudes et des phases.

Grâce à cette décomposition du signal, l'analyse des phénomènes est simplifiée en se situant non plus dans le domaine temporel mais fréquentiel. En effet, l'analyse des impédances rencontrées par les courants harmoniques peut être représentée sous forme d'amplitude ou de phase en fonction de la fréquence. La connaissance des vecteurs de courant et des impédances du réseau permet de déterminer les vecteurs de tension harmonique en chaque point du réseau.

1.1.1- Décomposition d'un signal en série de Fourier [1]

Le mathématicien FOURIER a démontré que toute grandeur périodique peut représenter un courant ou une tension de période T , donc de fréquence $f = 1/T$ et de pulsation $\omega = 2\pi f$, ce signal $S(t)$ se décompose de la façon suivante :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cdot \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cdot \sin(h\omega t) \quad (I-4)$$

$$\text{Avec : } a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) \cdot dt \quad (I-5)$$

Pour $h \geq 1$:

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cdot \cos(h\omega t) \cdot dt \quad (I-6)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cdot \sin(h\omega t) \cdot dt \quad (I-7)$$

Cette somme de l'équation est équivalente à :

$$\sum_{h=1}^{\infty} a_h \cdot \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cdot \sin(h\omega t) = \sum_{h=1}^{\infty} c_h \cdot \sin(h\omega t) \quad (\text{I-8})$$

On peut écrire:

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \cdot \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (\text{I-9})$$

$$\theta_h = \text{Arc tan}(a_h / b_h) \quad (\text{I-10})$$

$$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (\text{I-11})$$

Le terme a_0 est une constante qui représente la valeur moyenne de la fonction $S(t)$ périodique, il donne par exemple, la tension continue (moyenne) à la sortie d'un redresseur

- C_h : l'amplitude de l'harmonique de rang h .
- $C_{heff} = C_h/\sqrt{2}$: représente la valeur efficace d'harmonique de rang h .
- θ_h : la phase de l'harmonique de rang h .
- C_1 : l'amplitude de la composante fondamentale

De plus, il existe quelques prérequis 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.

1.1.2 Analyse d'un signal [1]

a. 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:

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

Considérations pratiques

Une valeur moyenne est mesurée avec un appareil magnétoélectrique (symbole ) s'il est analogique (ces appareils tendent à disparaître) ou numérique en position continue (symbole $(\hat{=})$).

b. Valeur efficace

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

$$Y_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 \cdot dt} \quad (\text{I-13})$$

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

$$Y_{\text{eff}} = \left(\sum_{h=1}^{\infty} (Y_h)^2 \right)^{1/2} \quad (\text{I-14})$$

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 :

$$Y_{\text{qm}} = Y_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T y(t)^2 \cdot dt \quad (\text{I-15})$$

Remarque

- La valeur efficace est toujours positive. Si elle est nulle, la fonction est identiquement nulle (propriété des fonctions positives) ;
- La valeur efficace est exprimée par un carré ; elle est donc liée à la puissance $p(t)$ (Ex : résistance, $P_R(t) = R \cdot i^2(t)$ donc $w(t) = R \cdot I_{\text{eff}}^2$).

Considérations pratiques

Une valeur efficace est mesurée avec un appareil :

- Ferromagnétique (symbole ).
- Magnétoélectrique à redresseur (symbole ).
- Ou numérique en position RMS (*Root mean square*, $\sqrt{\langle s(t)^2 \rangle}$).

c. Rang de l'harmonique [2]

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental, (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz)

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad \text{Par principe, le fondamental } f_1 \text{ a le rang } 1.$$

d. Représentation spectrale [1]

Le spectre (décomposition en fréquence du signal) donne une autre représentation des signaux électriques, et permet d'évaluer leur déformation. C'est un histogramme fournissant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de son rang.

L'examen du spectre permet d'apprécier à la fois quels sont les harmoniques en présence et leur importance respective.

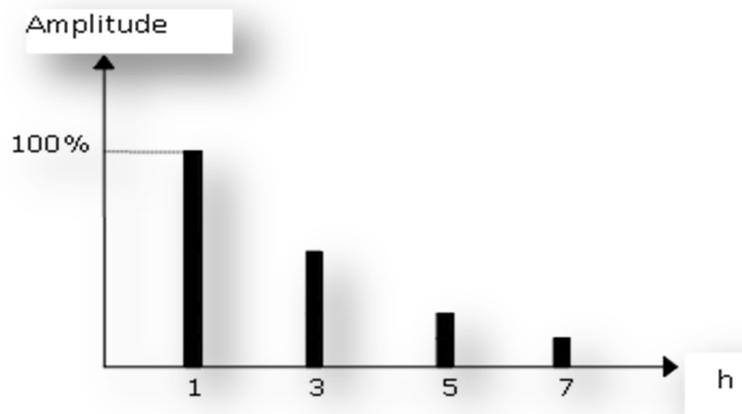


Figure (I.1) : Décomposition spectrale d'un signal $S(t)$ en fréquence

e. Facteur de forme

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

$$F = \frac{Y_{qm}}{Y_0}$$

f. Facteur de crête

C'est le rapport entre la valeur de crête du courant ou de la tension (I_m ou U_m) et la valeur efficace

$$k = \frac{I_m}{I_{eff}} \quad \text{Ou bien} \quad k = \frac{U_m}{U_{eff}} \quad (I.16)$$

- Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est donc égale $\sqrt{2}$.
- Pour un signal non sinusoïdal, il peut être soit inférieur, soit supérieur à $\sqrt{2}$.
- Ce facteur est plus particulièrement utile pour attirer l'attention sur la présence de valeurs de crêtes exceptionnelles par rapport à la valeur efficace.
- Un facteur de crête élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités, détectées pas les dispositifs de protection peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs.

1.2 Harmonique de courant et de tension [3], [4]**1.2.1 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 les charges 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 :

$$i(t) = I_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sqrt{2} \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (I-17)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (I-18)$$

I : La valeur efficace du courant.

α_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 :

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 \quad \text{Avec} \quad I_H^2 = \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \quad (I-19)$$

1.2.2 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 :

$$\bar{U}_h = \bar{I}_h * \bar{Z}_h \quad (I-20)$$

L'expression des tensions harmoniques est :

$$u(t) = U_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \beta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} U_n \sqrt{2} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (I-21)$$

$$U = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (I-22)$$

U : La valeur efficace de la tension.

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

β_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 :

$$U^2 = U_1^2 + U_H^2 \quad \text{Avec} \quad U_H^2 = \sum_{h=2}^{\infty} U_h^2 \quad (I-23)$$

1.2.3- Impédance Harmonique

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

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 .

$$\bar{V}_h = \bar{Z}_h \cdot \bar{I}_h \quad (I-24)$$

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

1.3 Distorsion harmonique [4]

1.3.1 Taux de distorsion harmonique global (TDH_g)

Le terme TDH_g correspond au taux de distorsion harmonique global. Le taux de distorsion harmonique est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif.

Pour un signal y , le taux de distorsion harmonique TDH est défini par la formule :

$$\text{TDH} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} \quad (I-25)$$

Noter que sa valeur peut dépasser 1.

Selon la norme CEI, h peut être généralement limité à 50. Cette grandeur permet d'évaluer à l'aide d'un nombre unique la déformation d'une tension ou d'un courant circulant en un point du réseau.

Le taux de distorsion harmonique est habituellement exprimé en pourcentage.

1.3.2 TDH en courant ou en tension

Lorsqu'il s'agit d'harmoniques de courant, l'expression devient :

$$\text{TDH}_g = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (I.26)$$

I_h : courant harmonique de rang h

I_1 : fondamental de courant

Cette formule est équivalente à la formule suivante, plus directe et plus facile à utiliser lorsque l'on connaît la valeur efficace totale :

$$\text{TDH}_g = \sqrt{\left(\frac{I_{eff}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (1.27)$$

Lorsqu'il s'agit d'harmoniques en tension, l'expression devient :

$$\text{TDH}_g = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (1.28)$$

U_h : tension harmonique de rang h .

U_1 : fondamental de la tension.

1.3.3 Taux de distorsion harmonique individuel (TDH_i)

Il donne une mesure de l'importance de chaque harmonique par rapport au fondamental. Le taux individuel est le rapport de la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique de rang h à celle du fondamental.

1.3.4 Taux de distorsion pondéré [6]

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

- **Condensateurs :**

$$D_{wc} = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} h^2 u_h^2} \quad (1.29)$$

Avec
$$u_h = \frac{U_h}{U_1}$$

1.3.5 Intérêt de chacun des indicateurs

a. Valeurs des TDHgu mesurées et phénomènes observés dans une installation

Le *TDHgu* caractérise la déformation de l'onde de tension lorsque sa valeur est :

- inférieure à 5 % : normale, aucun dysfonctionnement n'est à craindre,
- de 5 à 8 % : pollution harmonique significative, quelques dysfonctionnements sont possibles,
- supérieure à 8 % : pollution harmonique importante, des dysfonctionnements sont probables. Une analyse approfondie et la mise en place de dispositifs d'atténuation sont nécessaires.

b. Valeurs des TDHi mesurées et phénomènes observés dans une installation

Le *TDHi* caractérise la déformation de l'onde de courant.

La recherche du pollueur s'effectue en mesurant le *TDHi* sur l'arrivée et sur chacun des départs des différents circuits, afin de s'orienter vers le perturbateur. Lorsque sa valeur est :

- inférieure à 10 % : normale, aucun dysfonctionnement n'est à craindre,
- de 10 à 50 % : pollution harmonique significative, il y a risque d'échauffements, ce qui implique le surdimensionnement des câbles et des sources,
- supérieure à 50 % : pollution harmonique importante, des dysfonctionnements sont probables. Une analyse approfondie et la mise en place de dispositifs d'atténuation sont nécessaires.

1.4 Facteur d'influence [4]

D'après leur mode d'apparition, on distingue trois groupes d'harmoniques, auxquels correspondent trois spectres différents.

1.4.1 Les harmoniques de rangs impairs multiples de 3

Ces harmoniques (3, 9, 15, ...) sont homopolaires et n'apparaissent habituellement que dans les réseaux basse tension avec conducteurs neutres. On ne les trouve dans les réseaux moyens et hautes tension que lorsqu'ils sont mis à la terre rigidement.

Quand les trois tensions de phase harmoniques (ou les trois courants harmoniques) du réseau basse tension sont asymétriques, une partie du déséquilibre peut passer dans le réseau moyenne et haute tension.

1.4.2 Les harmoniques de rangs impairs non multiples de 3

Ce sont les harmoniques (5, 7, 11, 13, ...) usuellement produits par les générateurs ou consommateurs non linéaires. Ils forment dans le réseau des systèmes triphasés directs ou inverses.

1.4.3 Les harmoniques de rangs paires (2, 4, 6...)

Sont dus aux consommateurs caractérisés par des demi-ondes de courant asymétriques. Ils sont aussi dus aux appareils équipés d'un pont triphasé semi contrôlé.

1.5 Notion de phase [4]

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

1.5.1 Phase entre I_h et I_1 (ou entre V_h et V_1)

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

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

1.5.2 Phase entre le courant I_h et la tension fondamentale V_1

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

1.5.3 Phase entre la tension V_h et le courant harmonique I_h

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

1.6 Foisonnement [4]

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.

1.7 Caractérisation des perturbations harmoniques [4]

L'énergie électrique est distribuée sous forme de trois tensions sinusoïdales constituant le réseau triphasé équilibré. Selon leurs caractéristiques d'entrée, certaines charges peuvent perturber cette distribution.

1.7.1 Charge linéaire

Une charge est dite "linéaire" si le courant qu'elle absorbe est sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur ne génère pas d'harmonique.

Ex. : convecteurs, moteurs en régime établi, ...etc.

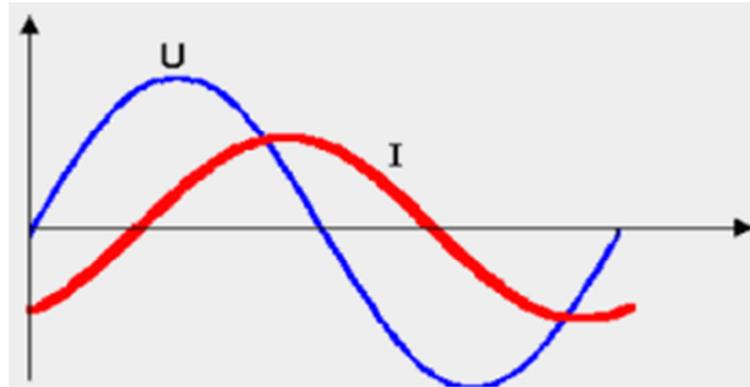
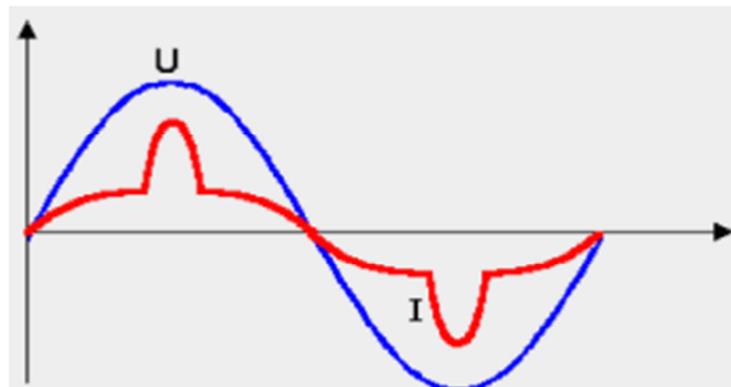


Figure (I.2): Charge linéaire

1.7.2 Charge non linéaire

Une charge est dite "non linéaire" si le courant absorbé n'est pas sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur est générateur des d'harmoniques.

Ex. : alimentation à découpage, moteurs au démarrage, mise sous tension de transformateurs, ...



2 Origine des harmoniques [7]

Dans le passé, les récepteurs étaient dit "linéaires" ce qui signifie que la forme du courant consommé était identique à celle 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 due aux récepteurs « non linéaires » soumis à une tension sinusoïdale et qui n'absorbent 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.

2.1 Appareils générateurs d'harmoniques

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.

3 Principaux effets des perturbations harmoniques [7]

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.

3.1 Effets instantanés

- Perturbation des convertisseurs statiques et des matériels électroniques.
- Vibrations, bruit.
- Perturbations induites sur les lignes à courant faible.
- Perturbation des systèmes de télécommande centralisée.
- Dysfonctionnement des systèmes de protection et de relai.
- Résonances.

3.2 Effets à termes

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

- Echauffement et vieillissement des condensateurs
 - Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs
 - Echauffement des câbles et des équipements
- *Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.*

Nature du matériel électrique	Effet de la «pollution harmonique »
Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	<ul style="list-style-type: none"> - Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans les enroulements statoriques. - Couples oscillatoires. - Augmentation du bruit
Transformateurs	<ul style="list-style-type: none"> - Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). - Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.

Câbles	- Augmentation des pertes sur tout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. - Pertes diélectriques supplémentaires.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, transistors... etc.)	- Troubles fonctionnels liés la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Condensateurs de puissance	- Pertes diélectriques supplémentaires aboutissants à un vieillissement prématuré des condensateurs
Ordinateur	- Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des Moteurs d'entraînement des supports magnétiques
Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs)	- Fonctionnement intempestif
Compteur d'énergie	- Erreurs de mesure
Téléviseurs	- Déformation d'image
Lampes à décharge	- Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2

➤ **Les harmoniques ont un impact économique important Causant :**

Le vieillissement prématuré du matériel conduit à le remplacer plus tôt, à moins de l'avoir initialement surdimensionné,

Les surcharges du réseau obligent à augmenter la puissance souscrite, et impliquent, à moins d'un surdimensionnement des installations, des pertes supplémentaires,

Les déformations du courant provoquant des déclenchements intempestifs et l'arrêt des installations de production.

Ces coûts de matériel, pertes énergétiques et perte de productivité entraînent une baisse de la compétitivité des entreprises.

4. Présentation des lampes fluo-compactes (LFC)

• Introduction

De l'incandescence à la fluorescence, l'éclairage a connu une évolution considérable en vue d'adapter la lumière émise aux besoins propre des diverses activités et limiter l'impact économique d'utilisation de l'énergie électrique pour l'éclairage public. Ainsi d'un principe simple sont nées les lampes fluo-compactes intégrées ; appelées aussi lampes à basse consommation (LBC), plus de lumière émise moins d'énergie consommée.

4.1 Historique [4]

Les lampes fluorescentes compactes ont été produites en 1974, lorsque des chercheurs ont eu l'idée de replier sur lui-même un tube fluorescent.

Ces lampes sont apparues sur le marché au début des années 1980, proposées par le groupe hollandais Philips. Elles pénètrent peu à peu le marché des lampes électriques domestiques, dominé par les lampes à incandescence classique et, dans une moindre mesure par les lampes à incandescence halogène. Les consommateurs, en ce début de XXI^e siècle, de plus en plus sensibilisés, commencent à prendre conscience des enjeux écologiques et économiques que peut représenter l'utilisation de ce type de lampes électriques.

4.2 Présentation [4]

Les lampes à basse consommation fonctionnent selon le principe de la fluorescence. Elles sont constituées d'un tube fluorescent qui renferme un mélange basse pression d'argon gazeux, de vapeur de mercure et de mercure liquide, plié en forme U et dotées d'un ballast électronique intégré au culot, qui inclut un starter et un condensateur de filtrage ; ce qui les rendent moins encombrantes.

Ces lampes peuvent facilement se substituer aux lampes à incandescence, et se présentent sous différentes formes : circulaire, tubulaire à deux tubes et tubulaire à trois tubes.

Le ballast électromagnétique intégré à la lampe a toutefois augmenté son poids la rendant aussi peu pratique. C'est alors qu'un système électronique appelé ballast électronique est venu remplacer ces accessoires lourds et bruyants, pour donner naissance à une nouvelle génération de lampes fluo compactes.

La lampe basse consommation à ballast électronique, outre sa durée de vie très élevée (8000 h en moyenne) présente maints avantages :

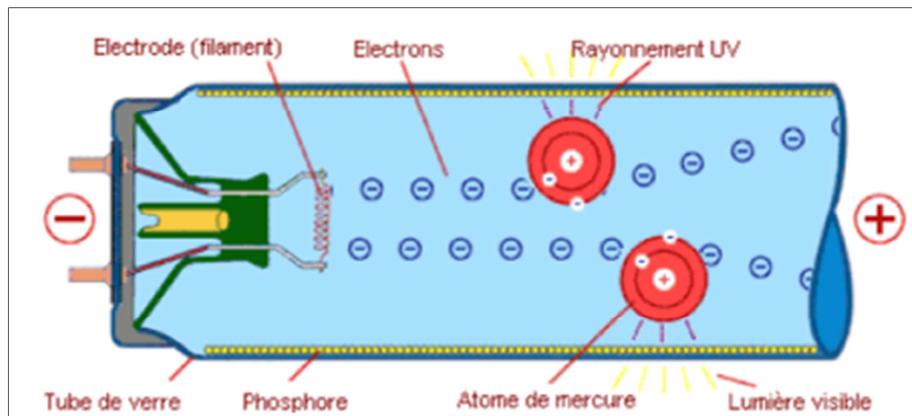
- Un allumage instantané sans starter et sans papillotement.
- Absence de bourdonnement.
- Élimination de l'effet stroboscopique à la fréquence du réseau.

Il existe trois familles de lampes fluo compactes : sans ballast, avec ballast magnétique intégré et avec ballast électronique intégré. Elles existent en forme double, quadruple, carrée, circulaire et à branches multiples. Selon la méthode d'amorçage on distingue des lampes à moyen d'amorçage interne ou externe, avec ou sans starter.



Figure(I.4) : modèle de lampe fluo-compacte

4.3 Principe de fonctionnement d'une ampoule fluo compacte [4]



Figure(I.5) : Principe de fonctionnement d'une lampe fluo-compacte

Lorsque la lampe est allumée, les cathodes sont tout d'abord chauffées durant une brève période (1 à 2 secondes) ce qui a pour effet de leur faire émettre des électrons. Puis, une tension élevée est appliquée entre les deux cathodes pour que la décharge électrique s'établisse dans le gaz et la vapeur de mercure. Le flux d'électrons (c'est-à-dire le courant électrique) heurte les atomes de mercure vaporisés et leur communique leur énergie qui est restituée par le mercure sous forme de rayonnement ultraviolet (UV). L'intérieur du tube est recouvert d'une poudre fluorescente, désignée sous le terme de "phosphore". Les UV provoquent l'émission de lumière visible par le phosphore, mais uniquement durant l'exposition aux UV.

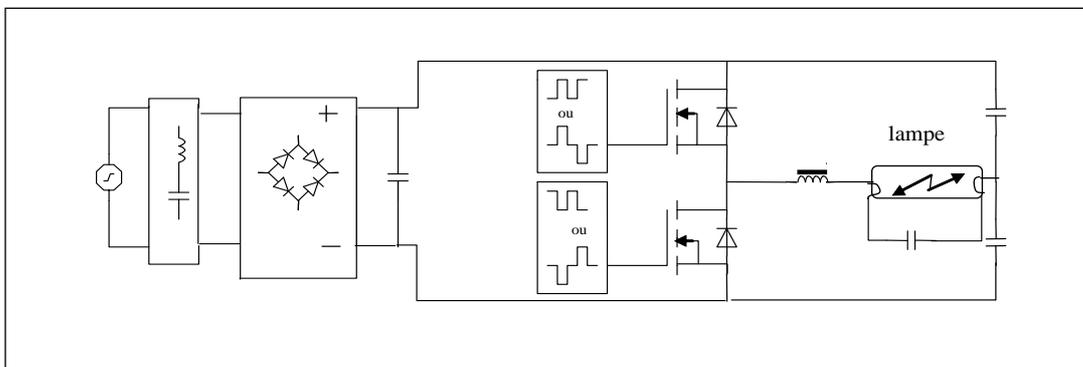
La décharge dans l'argon ou dans le mélange argon/krypton provoque un scintillement bleuté, uniquement observable lorsque le tube n'est pas revêtu de phosphore. Cette lumière représente environ 3 % de la lumière totale émise par la lampe, les 97 % restants sont générés par le phosphore.

4.4 Le ballast électronique [4]

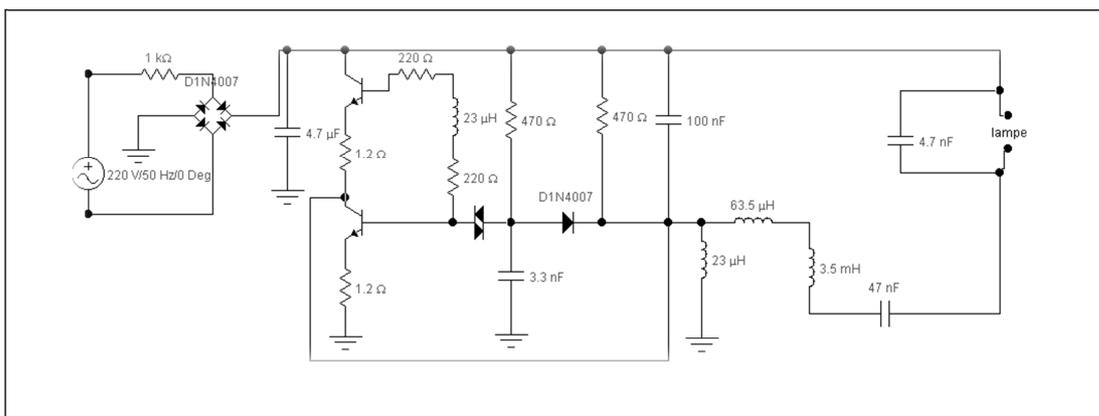
Les ballasts électroniques remplacent l'ensemble ballast ferromagnétique – amorceur – condensateur pour l'alimentation des lampes à décharge. L'intérêt d'utiliser ce type de dispositif d'alimentation réside dans le fait que la fréquence d'alimentation de la lampe est augmentée à quelques dizaines de kHz par rapport à la fréquence du réseau basse tension (50 Hz), en fonction de la technologie utilisée. En effet, en haute fréquence le gaz dans le tube ne peut pas se dé ioniser entre deux périodes. Cela se traduit par une meilleure efficacité, une durée de vie plus longue et la disparition du phénomène de flicker. En même temps, l'inductance permettant de fournir la tension d'amorçage de la lampe est moins encombrante, diminuant ainsi les pertes Joule.

On distingue deux types de ballasts électroniques, le ballast LPF (Low Power Factor = faible facteur de puissance) généralement utilisé pour les lampes et le ballast HPF (High Power Factor = facteur de puissance élevé) utilisé pour les tubes fluorescents et les lampes à décharge haute pression. Les ballasts HPF ont un facteur de puissance proche de 1, grâce à leur correction intégrée et leur redressement de type sinusoïdal. Cette correction, peut-être de type passive (self de choc à l'entrée du ballast) ou active (convertisseur de type booste dans l'étage redresseur). Pour les ballasts LPF utilisés en nombre très important, une compensation globale du facteur de puissance de type filtrage est nécessaire au niveau du réseau électrique.

Le schéma de principe d'un ballast électronique pour l'alimentation des lampes à décharge est montré dans les figures suivantes



Figure(I.6) : Schéma de principe d'une lampe alimentée par un ballast électronique



Figure(I.7): Circuit électrique d'un ballast électronique d'une lampe fluo compacte (CEGASA 16W).

4.5 Les principales parties constitutives du ballast électronique

Un ballast électronique comprend essentiellement :

- le filtre CEM d'entrée;
- l'étage redresseur (avec ou sans circuit de correction du facteur de puissance);
- le condensateur de lissage de la tension redressée;
- l'étage onduleur (demi-point capacitif).

➤ **Le filtre d'entrée :**

Utilisé pour atténuer l'interférence électromagnétique générée par les étages haute fréquence du ballast. Il protège aussi le ballast contre d'éventuels phénomènes transitoires du réseau.

➤ **Le redresseur :**

Consiste en un pont de diodes et un condensateur de filtrage de la tension au niveau du bus continu. Ce type de conversion est caractérisé par un facteur de puissance très faible et donc des perturbations harmoniques sont attendues notamment en harmonique 3.

➤ **L'étage haute fréquence :**

Consiste en général en un onduleur en demi-point capacitif. Ce dernier permet l'alimentation de la lampe en haute fréquence et l'inductance en sortie de l'onduleur permet de limiter de courant dans la décharge.

Le dernier sous-système, celui dédié au contrôle du ballast, est composé de système qui permet d'injecter le courant correspondant pour chaque phase de fonctionnement de la lampe. Le système de contrôle peut être soit un système simplifié soit composé par des systèmes très complexes basés sur des microprocesseurs en fonction du type de ballast et de lampe.

Remarque :

Si des équipements de filtrage ne sont pas utilisés, la non-linéarité du ballast électronique introduit dans les réseaux électriques des perturbations harmoniques importantes. En effet, pour les équipements d'alimentation des lampes avec une puissance nominale supérieures à 25W, la correction du facteur de puissance est recommandée.

4.6 Rôle du ballast électronique [4]

Le ballast électronique rend la fréquence du signal électrique (courant et tension) aux bornes de la lampe en régime permanent et en régime de préchauffage bien plus élevée que celle

de réseau (50Hz). En effet, l'alimentation de la lampe par une tension à haute fréquence permet d'éliminer le phénomène de papillotement et les effets stroboscopiques. Le courant en régime de préchauffage est en retard sur la tension aux bornes de la lampe et que le courant en régime permanent est en phase avec la tension aux bornes de la lampe.

Les ballasts électroniques disposent de condensateurs antiparasitage responsables de la circulation d'un courant de fuite permanent de l'ordre de 0,5 à 1mA par ballast. Ceci conduit à limiter le nombre de ballasts qu'il est possible d'alimenter par un Dispositif Différentiel à courant Résiduel (DDR). A la mise sous tension, la charge de ces condensateurs peut provoquer également la circulation d'une pointe de courant dont l'amplitude peut atteindre quelques ampères ce qui peut provoquer le déclenchement intempestif.

4.7 Avantages des lampes fluo compactes

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.
- La lampe à fluorescence présente plusieurs avantages par rapport à la lampe à incandescence classique
- Un meilleur coefficient de performance : la lampe à incandescence a une efficacité de 14 à 25 lumens par watt, alors que la lampe fluorescente a une efficacité de l'ordre de 60 à 70 lumens par watt (ainsi une lampe fluorescente de 11 W produira le même éclairage qu'une lampe à incandescence de 40 à 60 W)
- Une durée de vie de six à quinze fois plus longue que la lampe à incandescence (soit 6 000 à 15 000 heures contre 1 000 heures).
- Ainsi, bien que le prix d'achat soit supérieur à celui d'une lampe à incandescence, ses performances élevées en font un produit attractif à l'usage dès le premier achat pour le particulier. À l'échelle d'une nation, le bénéfice énergétique est important
- L'échauffement étant réduit, les risques de dégâts dus à la chaleur sont réduits proportionnellement (incendie, déformation des luminaires, etc.).

4.8 Les Inconvénients

Les inconvénients des lampes basses consommation sont :

- Ces lampes sont particulièrement polluantes en cas de rejet non contrôlé ou de casse pour l'environnement à cause du mercure qu'elles contiennent.
- A cause du fonctionnement en haute fréquence, ces luminaires produisent des champs électromagnétiques qui pourraient perturber la santé et l'environnement. Elles génèrent d'importants rayonnements radioélectriques (gêne pour les équipements de radiocommunication). Par exemple, contrairement aux ampoules classiques, les champs produits par les lampes fluo compactes allumées détectés à 20cm atteignent entre 4 et 180V/m pour des puissances allant de 11 à 20 Watts. Ce n'est qu'à une distance d'un mètre qu'on retrouve une valeur de 0,2 V/m, (la norme imposant 28V/m maximum). A ce jour, il est donc déconseillé d'utiliser ces lampes en tant que lampes de chevet ou de bureau.
- Elles sont peu adaptées à un usage extérieur, notamment en cas de températures négatives.
- Ces lampes ne sont pas forcément adaptées à certains contextes d'utilisation où le risque de bris est important (par exemple, les baladeuses) du fait que leur destruction accidentelle pourrait induire un risque pour la santé.
- L'allumage et l'extinction trop répétitive de la lampe diminue la durée de vie de celle-ci.
- Certaines couleurs sont déformées, car le spectre de la lumière n'est pas complet.
- En raison de l'absence quasi généralisée de circuits correcteurs de facteur de puissance dans la partie redresseur des ballasts électroniques incorporés dans leurs culots, ces lampes absorbent un courant très déformé, conduisant à un taux de distorsion harmonique pouvant atteindre 150 % et un facteur de puissance très inférieur à l'unité (de l'ordre de 0,5).

4.9 Tableau d'équivalence

En moyenne, les lampes fluorescentes consomment quatre fois moins d'électricité, pour une production de lumière théoriquement équivalente.

Lampes fluorescentes	9 watts	11 watts	15 watts	20 watts	27 watts
Lampes classiques à incandescences	30 watts	40 watts	60 watts	75 watts	100 watts

4.10 Effets de la température sur la performance des lampes fluo compactes [4]

La température ambiante dans laquelle baigne une lampe fluo-compacte peut avoir un important effet sur le rendement lumineux et l'efficacité du tube. Le point le plus froid de la surface du tube est là où se condense le mercure gazeux, la température de ce point (la température minimale de la paroi du tube) déterminant la pression de vapeur à l'intérieur du tube. La température optimale de paroi du tube FC est habituellement de 100 °F (38 °C). À températures inférieures, la vapeur de mercure se condense sur le point froid, phénomène qui réduit le nombre d'atomes de mercure émettant du rayonnement UV, d'où chute du rendement lumineux. À températures supérieures, le tube renferme trop de vapeur de mercure qui absorbe le rayonnement UV avant qu'il n'excite les luminophores : le rendement lumineux chute également.

Chapitre II

Harmoniques dans les réseaux triphasés

Introduction

Dans ce chapitre nous allons évoquer les expressions des puissances en régime sinusoïdal et non sinusoïdal suivi d'une brève description des appareils de mesure usuels, puis les notions d'harmoniques dans un système triphasé et on conclura par des solutions apportées pour l'élimination de certains rangs d'harmoniques.

1 Expressions des puissances

1.1 Puissance électrique en régime sinusoïdal [8]

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 (φ) par rapport à la tension.

$$v(t) = V_{max} \cos(\omega t) \quad (\text{II-1})$$

$$i(t) = I_{max} \cos(\omega t - \varphi) \quad (\text{II-2})$$

1.1.1 Puissance instantanée

En régime sinusoïdal la puissance instantanée est :

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (\text{II-3})$$

C'est-à-dire :

$$p(t) = V_{max} \cos(\omega t) \cdot I_{max} \cos(\omega t - \varphi) \quad (\text{II-4})$$

$$p(t) = V_{max} I_{max} \frac{\cos(\varphi)}{2} + V_{max} I_{max} \frac{\cos(2\omega t - \varphi)}{2} \quad (\text{II-5})$$

En utilisant les tensions et courants efficaces :

$$p(t) = U I \cos(\varphi) + U I \cos(2\omega - \varphi) \quad (\text{II-6})$$

Avec $U = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$ et $I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$ (II-7)

U : La valeur efficace de la tension.

I : La valeur efficace du courant.

1.1.2 Puissance active

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

$$P = p(t)_{moy} = UI \cos(\varphi) \quad \text{En}(W) \quad (\text{II-8})$$

1.1.3 Puissance fluctuante

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

$$P_f(t) = UI \cos(2\omega t - \varphi) \quad (\text{II-9})$$

1.1.4 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 :

$$S = U_{eff} I_{eff} = UI \quad (\text{En VA}) \quad (\text{II-10})$$

1.1.5 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

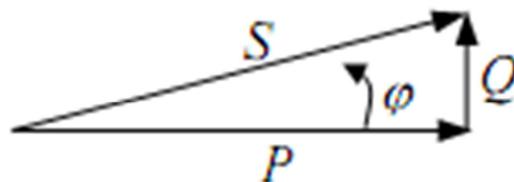
$$Q = UI \sin \varphi \quad \text{En}(VAR) \quad (\text{II-11})$$

❖ Relation entre P , Q et S

$$\text{Notons que : } (P = UI \cos \varphi, Q = UI \sin \varphi \text{ et } S = UI) \quad (\text{II-12})$$

$$\text{D'où : } P^2 + Q^2 = S^2 \quad (\text{II-13})$$

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



$$\text{Avec : } \tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (\text{II-14})$$

1.2 Puissance en régime non sinusoïdal [6]

1.2.1 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.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h \quad (\text{II-15})$$

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

I_h : La valeur efficace du courant harmonique de rang h

φ_h : Déphasage entre le courant harmonique de rang h et la tension harmonique de rang h

1.2.2 Puissance réactive

La puissance réactive en présence des harmoniques est donnée par :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h \quad (\text{II-16})$$

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

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

φ_h : Déphasage entre le courant harmonique de rang h et la tension harmonique de rang h.

1.2.3 Puissance apparente

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

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \quad (\text{II-17})$$

Ce qui nous donne

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{II-18})$$

Si TDH_{gi} et TDH_{gu} sont les taux de distorsion en courant et en tension la formule devient :

$$S = \sqrt{U_1^2 \left(1 + \frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}\right) I_1^2 \left(1 + \frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}\right)} \quad (\text{II-19})$$

$$S = U_1 I_1 \sqrt{\left(1 + \left(\frac{TDH_{gu}}{100}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{TDH_{gi}}{100}\right)^2\right)} \quad (\text{II-20})$$

1.2.4 Puissance déformante

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

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{II-21})$$

Donc :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad \Rightarrow \quad D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (\text{II.22})$$

1.3 Facteur de puissance et facteur de déphasage [9]

1.3.1 Le facteur de puissance

Le facteur de puissance est égal au rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

$$FP = \frac{p}{S} \quad (\text{II.23})$$

Dans le langage des électriciens, il est très souvent confondu avec le $\cos(\varphi)$, dont la définition est :

$$\cos \varphi = \frac{p_1}{S_1} \quad (\text{II.24})$$

p_1 = Puissance active du fondamental.

S_1 = Puissance apparente du fondamental.

Or, le $\cos(\varphi)$ se rapporte uniquement à la fréquence fondamentale, et, en présence d'harmoniques, est donc différent du facteur de puissance FP.

Le facteur de puissance FP permet d'évaluer le surdimensionnement à appliquer à l'alimentation d'une installation.

1.3.2 Facteur de déphasage (du fondamental)

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

$$\cos(\varphi_1) = \frac{P_1}{S_1} \quad (\text{II-25})$$

φ_1 : Déphasage entre les composantes fondamentales de courant et de la tension.

1.3.3 Facteur de déformation

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

$$F_d = \frac{F_P}{\cos \varphi_1} \quad (\text{II-26})$$

1.3.4 Facteur de puissance réel [9]

Pour un dipôle alimenté en régime de courant variable au cours du temps (non-sinusoidal), 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 :

$$F_P = \frac{I_1}{I_{eff}} \cos \varphi_1 \quad (\text{II-27})$$

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).

1.3.5 Facteur de forme

Pour quantifier la valeur efficace par rapport à la valeur moyenne, on définit le facteur de forme d'un signal $s(t)$ par :

$$F = \frac{S_{eff}}{S_0} = \frac{\sqrt{\langle S^2(t) \rangle}}{\langle S(t) \rangle} \quad (\text{II-28})$$

2 Présentation des appareils de mesure [10]

Dans les pages qui suivent, nous allons en décrire le fonctionnement et l'utilisation des instruments de laboratoire le plus souvent utilisés en électrotechnique.

On distingue deux types d'appareils de mesure

- Appareils analogiques
- Appareils numériques

2.1 Classifications des appareils à déviation

La classification usuelle des appareils à déviation utilise la nature du phénomène physique qui régit le fonctionnement de l'appareil. On distingue plusieurs types d'appareils, dont les principaux types sont :

2.1.1 Les appareils magnétoélectriques en courant alternatif

D'après le principe de fonctionnement de ces appareils, le dispositif qui fait dévier l'aiguille est sensible à la composante continue du signal. La déviation de l'aiguille de ces appareils est proportionnelle à la valeur moyenne du signal.

On peut schématiser ce type d'appareils par le schéma synoptique suivant :



Figure(II.1): Schéma synoptique d'un appareil magnétoélectrique en courant alternatif.

2.1.2 Les appareils magnétoélectriques avec redresseur

Le symbole de la diode, caractérise l'existence d'un montage redresseur à l'intérieur de l'appareil de mesure. Ce type d'appareils, réalise le redressement du signal à mesurer (redressement simple alternance ou double alternance), puis l'aiguille dévie proportionnellement à la valeur moyenne du signal redressé. Le dispositif magnétoélectrique mesure la valeur moyenne du signal mesuré.

Comme en courant alternatif, on a besoin souvent de la valeur efficace du signal mesuré. Les fabricants de ce type d'appareils, utilisent un facteur correctif dans les graduations de l'échelle de l'appareil pour avoir une correspondance entre la valeur mesurée par le dispositif et la valeur que doit lire l'utilisateur, en effet :

Cas d'un redresseur simple alternance, le facteur correctif est :

$$K = \frac{\frac{V_{MAX}}{\sqrt{2}}}{\frac{V_{MAX}}{\pi}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2.22 \quad (II.29)$$

Cas d'un redresseur double alternance, le facteur correctif est :

$$K = \frac{\frac{V_{MAX}}{\sqrt{2}}}{\frac{2V_{MAX}}{\pi}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1.11 \quad (II.30)$$



Figure(II.2) : Schéma synoptique d'un appareil magnétoélectrique avec redresseur en courant alternatif.

Le facteur correctif (k) est calculé pour le cas d'un signal sinusoïdal, cela est due au fait qu'on manipule dans la plus part des cas des signaux sinusoïdaux.

2.1.3 Les appareils ferromagnétiques

Le principe de fonctionnement d'un appareil ferromagnétique est basé sur l'action d'un champ créé par un circuit parcouru par un courant sur une ou plusieurs pièces de fer doux et dont certaines sont mobiles.

On distingue deux types d'appareils à attraction ou à répulsion. Pour le type d'appareil à attraction, le principe utilisé est l'action magnétique produite par une bobine fixe traversée par un courant sur une palette en fer doux (organe mobile) montée sur deux pivots. Cet équipement mobile est muni d'une aiguille et d'un dispositif d'amortissement.

Pour le type d'appareil à répulsion, le champ magnétique créé par la bobine fixe agit sur deux palettes placées dans ce champ qui subissent une aimantation de même sens. La répulsion des deux palettes fait dévier l'aiguille.

Un appareil ferromagnétique est très simple à construire, robuste, utilisable en courant continu et en alternatif. La graduation de son échelle est non linéaire.

Les appareils ferromagnétiques sont reconnus par le Symbole suivant :



2.2 Description des appareils de mesures usuels

2.2.1 L'oscilloscope [4]

Un oscilloscope est un instrument de mesure destiné à visualiser un signal électrique, le plus souvent variable au cours du temps. Il est utilisé par de nombreux scientifiques afin de visualiser soit des tensions électriques, soit diverses autres grandeurs physiques préalablement transformées en tension au moyen d'un convertisseur adapté.

On distingue généralement les oscilloscopes analogiques qui utilisent directement un multiple de la tension d'entrée pour produire la déviation du spot et les oscilloscopes numériques qui transforment, préalablement à tout traitement, la tension d'entrée en nombre. L'affichage est reconstruit après coup. Il devient alors une fonction annexe de l'appareil qui peut même en être dépourvu, la visualisation du signal étant effectuée par un ordinateur extérieur relié à l'oscilloscope

➤ Les oscilloscopes analogiques

Ce type d'appareil est en voie d'obsolescence car il ne permet généralement que l'observation de tensions périodiques. Il est de plus en plus remplacé par les oscilloscopes numériques.

➤ Les oscilloscopes numériques

Contrairement aux modèles analogiques, le signal à visualiser est préalablement numérisé par un convertisseur analogique-numérique (interface A/D). La capacité de l'appareil à afficher un signal de fréquence élevée sans distorsion dépend de la qualité de cette interface.

Les principales caractéristiques à prendre en compte sont :

- La résolution du convertisseur analogique-numérique.
- La fréquence d'échantillonnage en Mé/s (méga échantillons par seconde) ou Gé/s (gigaéchantillons par seconde).
- La profondeur mémoire.

L'appareil est couplé à des mémoires permettant de stocker ces signaux et à un certain nombre d'organes d'analyse et de traitement qui permettent d'obtenir de nombreuses caractéristiques du signal observé :

- Mesure des caractéristiques du signal : valeur de crête, valeur efficace, période, fréquence, etc.
- Transformation rapide de Fourier qui permet d'obtenir le spectre du signal.
- Filtres perfectionnés qui, appliqués à ce signal numérique, permettent d'accroître la visibilité de détails.

L'affichage du résultat s'effectue de plus en plus souvent sur un écran à cristaux liquides, ce qui rend ces appareils faciles à déplacer et, beaucoup moins gourmands en énergie.

Les oscilloscopes numériques ont désormais complètement supplanté leurs prédécesseurs analogiques, grâce à leur plus grande portabilité, une plus grande facilité d'utilisation et, surtout, leur coût réduit.

2.2.2 Les capteurs [10]

Comme souvent en électricité, les seules mesures effectuées sont des mesures de tension et de courant. Ce sont des mesures ordinaires mais elles sont effectuées sur un réseau capable de délivrer une énergie considérable. Il y a donc un risque. La tension est élevée, sa valeur minimale est 220 V. Chaque mesure doit être effectuée par l'intermédiaire d'un capteur et, dès qu'on dépasse le niveau de la basse tension (BT) (et même la plupart du temps en BT), le capteur assure un isolement galvanique.

a Les capteurs de courant

Les capteurs de courant sont presque toujours des transformateurs de courant. Il y en a de deux types : Ceux utilisés pour fournir une information à un système de protection et ceux destinés à une mesure dans une situation normale du réseau.

Dans le premier cas, la précision nécessaire n'est pas le paramètre principal, mais il ne faut pas qu'une surintensité (c'est une situation de fonctionnement des protections) ne vienne saturer le circuit magnétique du transformateur, même si cette surintensité a une composante apériodique.

Dans le deuxième cas, le courant a une valeur comprise entre zéro et la valeur maximale du courant normal ; il n'y a pas de composante apériodique. La précision demandée est généralement très grande, particulièrement quand la mesure est utilisée pour élaborer l'information puissance et compter l'énergie. S'il y a un défaut sur le réseau (court-circuit ou autre), la mesure ne sera pas juste et donc non pertinente pendant le temps de fonctionnement des protections.

b Les capteurs de tension

Là encore, on a toujours besoin d'une mesure avec un isolement galvanique. Le transformateur constitue évidemment la technologie la plus usuelle. Il est utilisé même en basse tension pour apporter un isolement entre le système de mesure et le réseau. Lui aussi, tout comme le transformateur de courant, ne comporte que des matériaux usuels : Du fer et du cuivre. Le coût de ces transformateurs augmente très rapidement avec la valeur des tensions mesurées : C'est le coût de l'isolement.

3 Harmoniques dans un système triphasé [7]

3.1 Tensions triphasées équilibrées

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

$$V_{1,h}(t) = V_h \sqrt{2} \cos(h\omega t) \quad (\text{II-31})$$

$$V_{2,h}(t) = V_h \sqrt{2} \cos\left(h\omega t - \frac{2\pi h}{3}\right) \quad (\text{II-32})$$

$$V_{3,h}(t) = V_h \sqrt{2} \cos\left(h\omega t + \frac{2\pi h}{3}\right) \quad (\text{II-33})$$

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

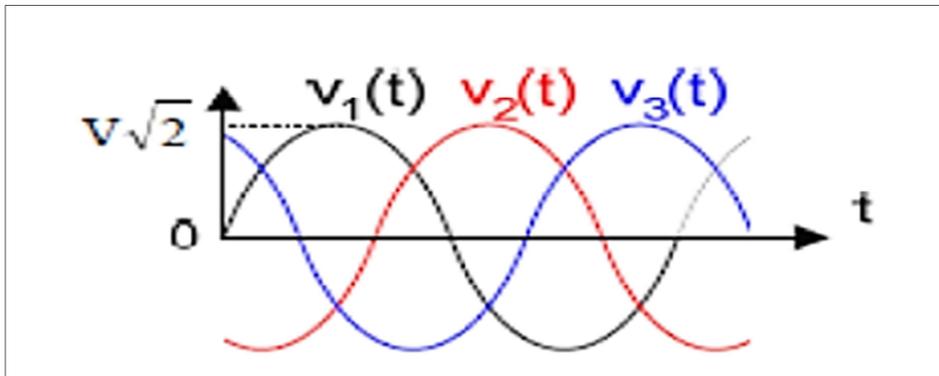


Figure (II.3) : Tensions triphasées équilibrées

3.2 Courants triphasés équilibrés

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 :

$$i_a(t) = i_a(t) \quad (\text{II-34})$$

$$i_b(t) = i_a\left(t - \frac{T}{3}\right) \quad (\text{II-35})$$

$$i_c(t) = i_a\left(t - \frac{2T}{3}\right) \quad (\text{II-36})$$

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

$$i_{h,a}(t) = i_h \sin(h\omega t) \quad (\text{II-37})$$

$$i_{h,b}(t) = i_h \sin\left(h\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) = i_h \sin\left(h\omega t - \frac{2\pi h}{3}\right) \quad (\text{II-38})$$

$$i_{h,c}(t) = i_h \sin\left(h\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right) = i_h \sin\left(h\omega t - \frac{4\pi h}{3}\right) \quad (\text{II-39})$$

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

$$i_h \sin(h\omega t); i_h \sin\left(h\omega t - \frac{2\pi}{3}\right); i_h \sin\left(h\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II-40})$$

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

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

$$i_h \sin(h\omega t); i_h \sin\left(h\omega t - 4\frac{\pi}{3}\right); i_h \sin\left(h\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II-41})$$

➡ Les harmoniques forment **un système inverse**.

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

$$i_h \sin(h\omega t); i_h \sin(h\omega t); i_h \sin(h\omega t) \quad (\text{II-42})$$

➡ 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.

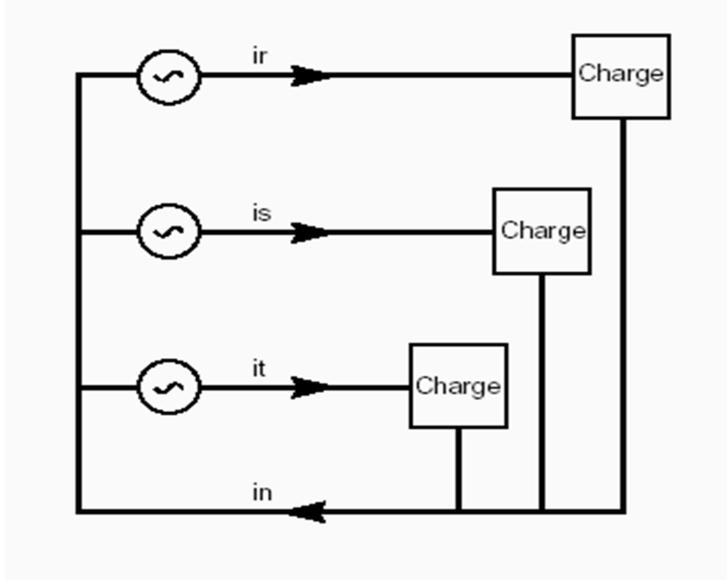
3.3 Courant de neutre en triphasé [7]

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'harmonique 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.

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.



Figure(II.4) : Charge triphasée

➤ **Dans le cas d'un 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 :

$$I_a(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + I_5 \sin(5\omega t + \varphi_5) + \dots \text{etc} \quad (\text{II-43})$$

$$I_b(t) = I_1 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_1\right) + I_3 \sin\left(3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_3\right) + I_5 \sin\left(5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \varphi_5\right) + \dots \text{etc} \quad (\text{II-44})$$

$$I_c(t) = I_1 \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \varphi_1\right) + I_3 \sin\left(3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \varphi_3\right) + I_5 \sin\left(5\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \varphi_5\right) + \dots \text{etc} \quad (\text{II-45})$$

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

$$I_N(t) = 0 + 3 * I_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + 0 + \dots \quad (\text{II-46})$$

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

a. Allure du courant dans le neutre

La (figure II.5) représente les courants circulant dans les phases de trois charges monophasées non linéaires identiques, connectées entre phases et neutre, ainsi que le courant résultant dans le conducteur neutre.

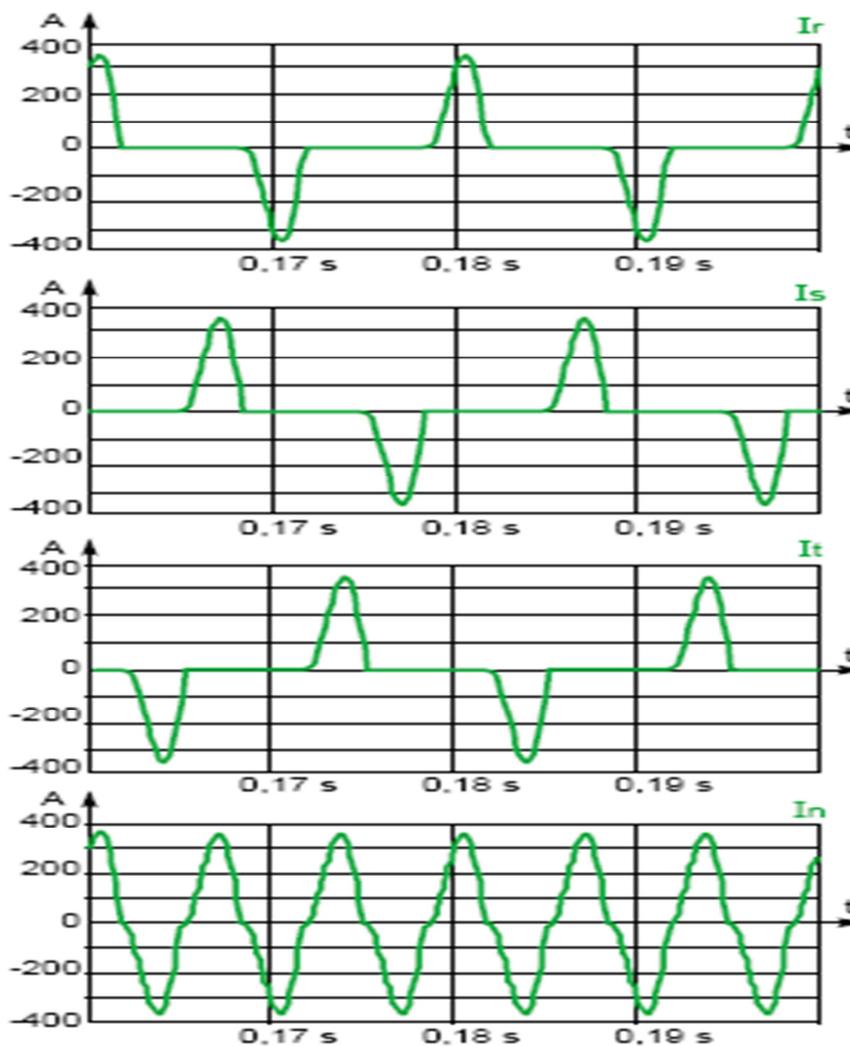
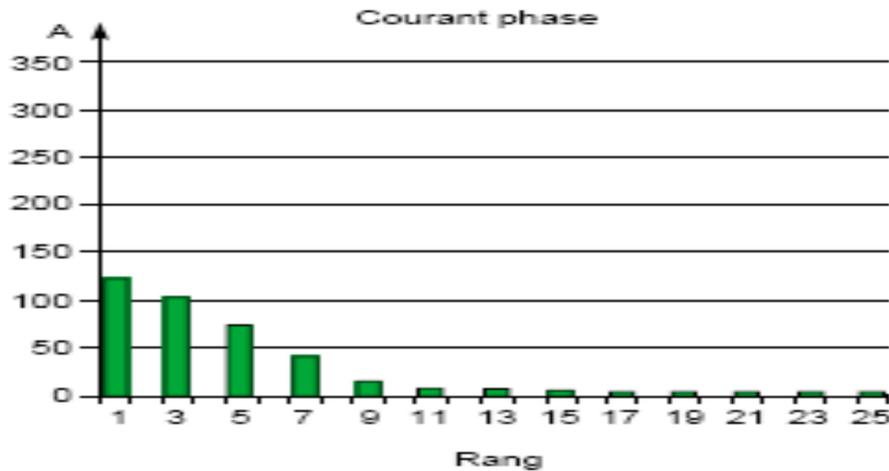
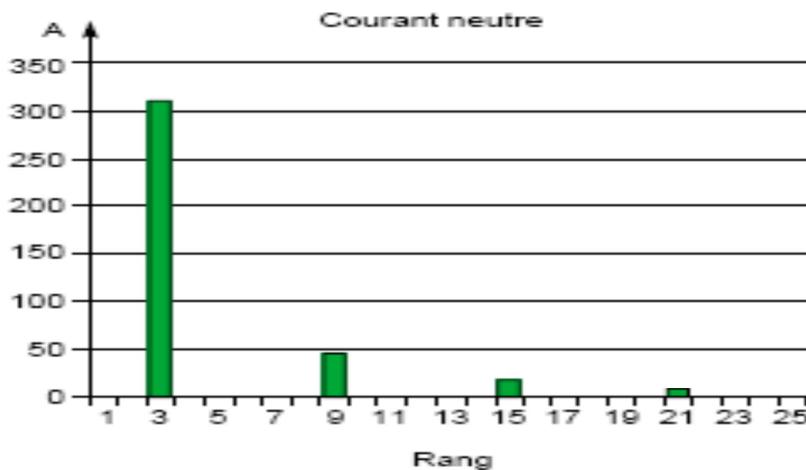


Figure.(II.5) : Courant de phases et du neutre alimentant des charges monophasées non linéaire

Les spectres de ces courants sont représentés sur les figures(II.6) et (II.7). A noter que le courant du neutre ne contient que des composantes de rang impair multiples de 3 (3, 9, 15, ...), dont les amplitudes sont trois fois supérieures à celles des courants de phase.



Figure(II.6) : Spectre du courant de phase alimentant des charges monophasées non linéaires



Figure(II.7) Spectre du courant du neutre absorbé par des charges monophasées non linéaires

b. Calcul de la valeur efficace du courant neutre

Supposons, comme sur la (figureII.5), que les ondes de courant des 3 phases ne se chevauchent pas. Sur une période T du fondamental, le courant d'une phase est constitué d'une onde positive et d'une onde négative séparée d'un intervalle où le courant est nul. La valeur efficace du courant de ligne peut être calculée par la formule :

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_t^2 dt} \quad (\text{II.47})$$

La valeur efficace du courant du neutre peut être calculée sur un intervalle égal à $T/3$. Sur cet intervalle, le courant du neutre est également constitué d'une onde positive et d'une onde négative, identiques à celles du courant de phase. La valeur efficace du courant du neutre peut donc être calculée de la manière suivante :

$$I_N = \sqrt{\frac{1}{T/3} \int_0^{T/3} i_n^2 dt} \quad (\text{II.48})$$

$$I_N = \sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/3} i_n^2 dt} \quad (\text{II.49})$$

$$I_N = \sqrt{3} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_t^2 dt} = \sqrt{3} I_L \quad (\text{II.50})$$

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

Lorsque les ondes de courant des trois phases se chevauchent, comme dans l'exemple de la (figure(II.8)), la valeur efficace du courant dans le neutre est inférieure à $\sqrt{3}$ fois la valeur efficace du courant dans une phase (figure(II.9)). Dans les installations où l'on trouve un grand nombre de charges non linéaires, comme des alimentations à découpage de matériel informatique, le courant dans le neutre peut dépasser le courant dans chaque phase. Cette situation, quoique peu fréquente, nécessite un conducteur neutre renforcé.

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

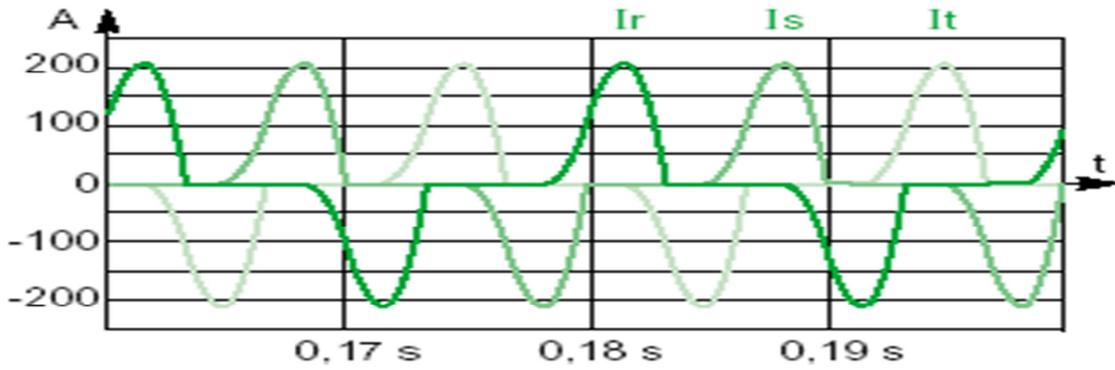


Figure.(II.8) : Courant dans les trois phases

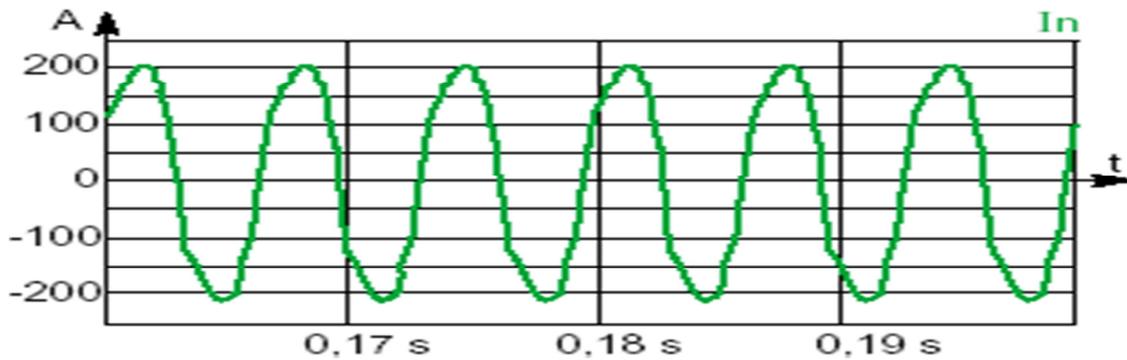


Figure (II.9) : Courant dans le neutre

c. Rapport des valeurs efficaces des courants de neutre et de phase pour un réseau symétrique et équilibré [7]

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 :

$$\frac{I_N}{I_{phase}} = \frac{\sqrt{\sum (3I_{6k+3})^2}}{\sqrt{\sum (I_{6k+1})^2 + \sum (I_{6k+3})^2 + \sum (I_{6k+5})^2}} \quad (\text{II-51})$$

Avec :

I_N : La valeur efficace de courant dans le neutre.

I_{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 $6k+1$; $6k+3$; $6k+5$ 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 :
 $I_{2n+1} = q^n * I_1$ ($0 \leq q \leq 1$; $n= 1, 2, 3, \dots$ etc.).

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 :

$$I_{phase} = \sqrt{1 + q^2 + q^4 + q^6 + \dots} * I_1 = \frac{1}{\sqrt{1-q^2}} I_1 \quad (II-52)$$

La valeur efficace du courant de neutre est donnée par :

$$I_N = 3 * \sqrt{q^2 + q^8 + q^{14} + \dots} * I_1 = \frac{3*q}{\sqrt{1-q^6}} I_1 \quad (II-53)$$

Le rapport des valeurs efficaces donne:

$$\frac{I_N}{I_{phase}} = 3q \sqrt{\frac{1-q^2}{1-q^6}} = 3q \sqrt{\frac{1-q^2}{(1-q^2)(1+q^2+q^4)}} = \frac{3q}{\sqrt{1+q^2+q^4}} \quad (II-54)$$

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

4 Les remèdes

• Introduction

La présence d'harmoniques est synonyme d'une onde (tension ou courant) Déformée. Cette déformation se traduit par des perturbations importantes causées par la présence des charges non linéaires dans les réseaux électriques.

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

Un certain nombre de solutions ont été développées pour l'élimination de la pollution au moyen d'équipements adaptés.

4.1 Transformateurs d'isolement à couplages particuliers [7]

L'effet de couplage de transformateurs permet la suppression de certains rangs d'harmoniques. En fonction des types de couplages, différents rangs d'harmoniques sont arrêtés.

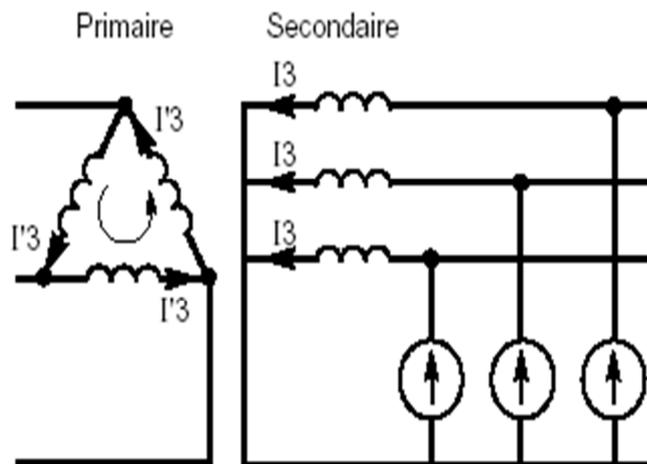
4.1.1 Transformateur triangle étoile

Considérons un transformateur triangle – étoile, alimentant des charges non linéaires, identiques, connectées entre phases et neutre. Chacune de ces charges génère un courant harmonique de rang 3. Rappelons que ces courants (I_3), harmoniques de rang 3, sont égaux. Les courants harmoniques de rang 3 dans les enroulements primaires du transformateur sont donc également identiques entre eux, et notés I'_3 .

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

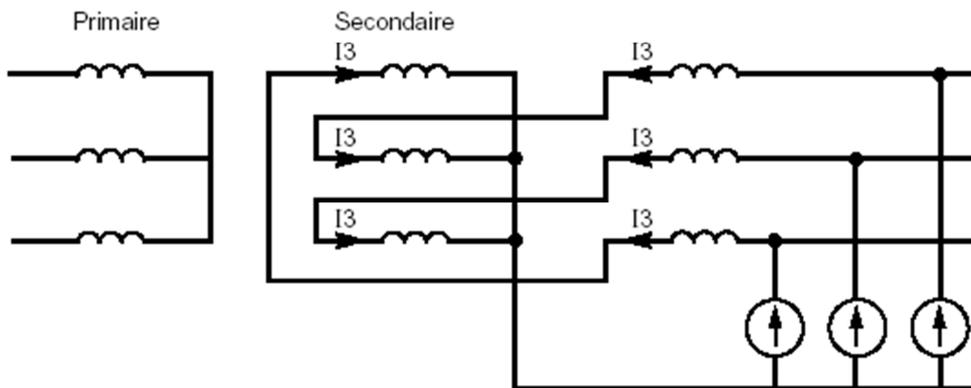
Les courants harmoniques de rang 3 ne sont donc pas transmis au réseau. Par contre, ces courants circulent dans les enroulements primaires du transformateur et provoquent donc un échauffement supplémentaire.

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



Figure(II.10) : courant harmonique circulant dans un transformateur D-Y

4.1.2 Transformateur à secondaire zigzag



Figure(II.11) : courant harmonique circulant dans un transformateur Y-Z

Considérons un transformateur à secondaire zigzag, alimentant des charges non linéaires, identiques, connectées entre phases et neutre. Chacune de ces charges génère un courant harmonique de rang 3. Rappelons que ces courants harmoniques de rang 3 sont égaux.

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

Chapitre III

Partie expérimentale

Introduction

Dans ce chapitre nous allons quantifier les perturbations harmoniques provoquées par les charges non linéaires (lampes fluo-compactes), il est divisé en deux parties :

- La première partie est consacrée aux essais en monophasé en présence de charges linéaires et non linéaires.
- La seconde quant à elle englobe les essais en triphasés en présence de charges linéaires et non linéaires .

1 Essais en monophasé

Dans cette partie nous allons effectuer trois essais; le premier pour visualiser l'allure de la tension à vide, le deuxième pour relever les différentes grandeurs électriques en présence de charge linéaire en utilisant une lampe classique et le dernier en présence de charges non linéaires (lampes fluo-compactes) .

• **Materiel utilisé**

- ✓ Source de tension équilibrée 220 volt
- ✓ 1 ampèremètre ferromagnétique.
- ✓ 2 voltmètres ferromagnétiques.
- ✓ 1 shunt de $1\ \Omega$.
- ✓ Un capteur de courant et de tension.
- ✓ Un oscilloscope numérique TDS210.
- ✓ Un micro-ordinateur.
- ✓ Une lampe classique de 60W.
- ✓ Des lampes fluo compactes (Philips 20W).

• **Schéma de montage**

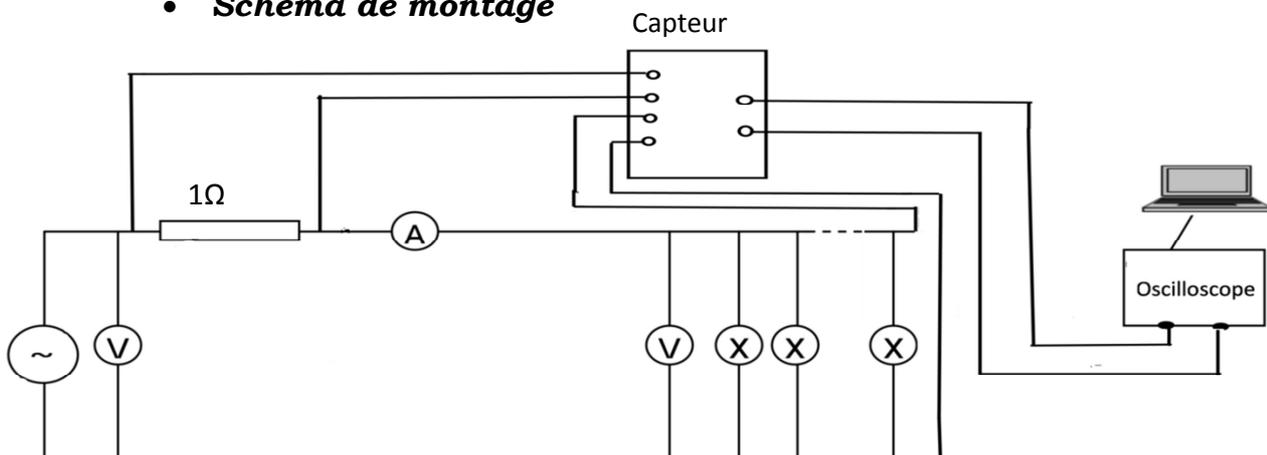


Figure (III.1) : schéma de montage de l'essai en monophasé

1.1 Essai à vide

Dans cet essai, nous visualisons l'allure de la tension du réseau à vide.

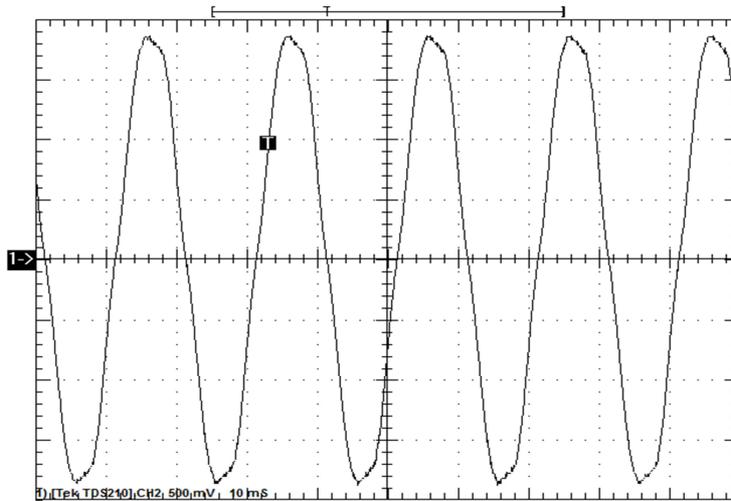


Figure (III.2) : *Forme de la tension à vide*

- **Interpretation de la courbe**

L'allure de la tension n'est pas parfaitement sinusoidale, à cause de la distorsion existante dans le réseau.

1.2 Mesures effectuées sur une lampe à incandescence (classique) 60W

a. Courbes des signaux (courant et tension)

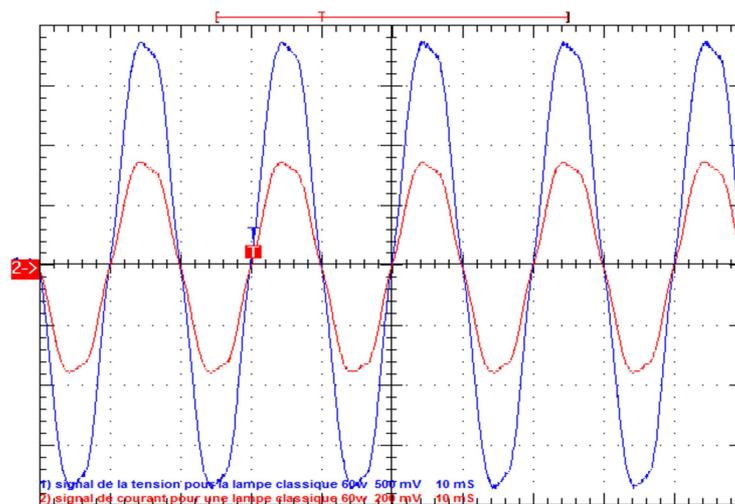


Figure (III.3) : *Signaux courant et tension.*

b. Spectres de la tension et du courant

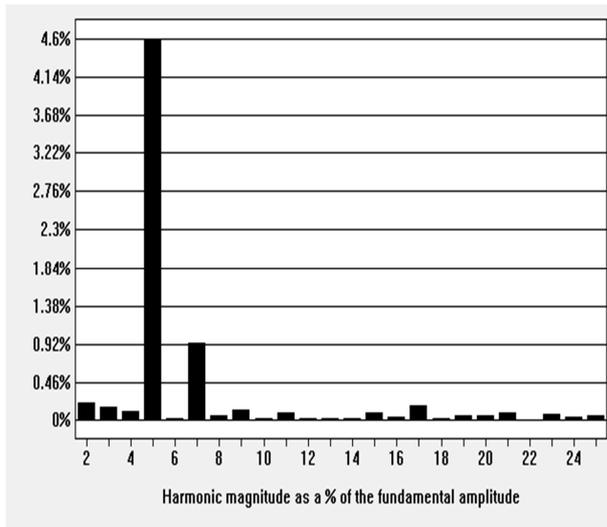


Figure. (III.4) : TDH_i en tension.

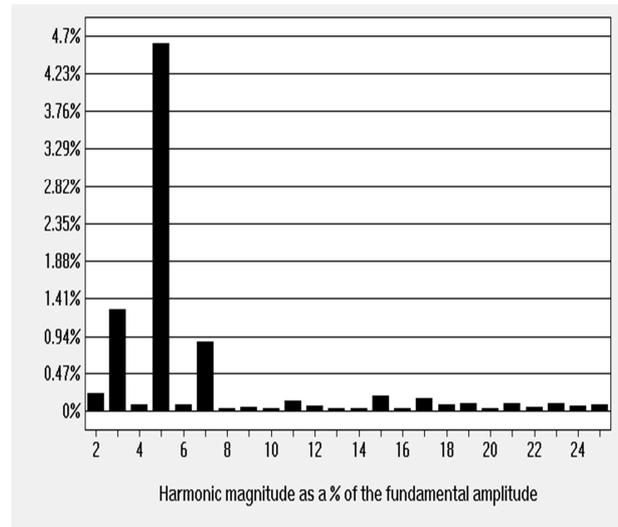


Figure. (III.5) : TDH_i en courant.

c. Valeurs mesurées

	Valeurs mesurées par les appareils classiques	Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH_g %
I (A)	0.25	0.252	0.251	4.88
U (V)	220	215.184	214.816	4.683

Tableau (III.1) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre) Et ceux donnés par l'oscilloscope

Valeurs données par l'oscilloscope			
Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
54.28	2.256	54.32	0.999

Tableau(III.2) : Résultats donnés par l'oscilloscope

d. Analyse harmonique des signaux

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	1.3426 V	100.000 %	0.0000	251.57m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.00 Hz	2.8671m V	0.214 %	-165.90	548.57u V	0.218 %	168.88
Harmonic 3	150.00 Hz	2.2181m V	0.165 %	118.87	3.2036m V	1.273 %	-95.248
Harmonic 4	200.00 Hz	1.4000m V	0.104 %	-155.09	216.54u V	0.086 %	-147.07
Harmonic 5	250.00 Hz	61.323m V	4.568 %	16.052	11.589m V	4.607 %	19.392
Harmonic 6	300.00 Hz	390.01u V	0.029 %	156.73	198.94u V	0.079 %	79.763
Harmonic 7	350.00 Hz	12.604m V	0.939 %	-42.885	2.1937m V	0.872 %	-34.832
Harmonic 8	400.00 Hz	821.56u V	0.061 %	-106.67	89.520u V	0.036 %	-125.38
Harmonic 9	450.00 Hz	1.6286m V	0.121 %	55.858	136.10u V	0.054 %	50.862
Harmonic 10	500.00 Hz	428.64u V	0.032 %	-101.72	82.935u V	0.033 %	-160.94
Harmonic 11	550.00 Hz	1.3328m V	0.099 %	-8.3245	335.91u V	0.134 %	13.806
Harmonic 12	600.00 Hz	317.33u V	0.024 %	-95.077	191.77u V	0.076 %	136.13
Harmonic 13	650.00 Hz	263.43u V	0.020 %	94.692	81.933u V	0.033 %	105.50
Harmonic 14	700.00 Hz	408.62u V	0.030 %	-149.89	100.92u V	0.040 %	-96.918
Harmonic 15	750.00 Hz	1.2085m V	0.090 %	115.49	469.19u V	0.187 %	87.266
Harmonic 16	800.00 Hz	467.78u V	0.035 %	174.08	93.642u V	0.037 %	70.860

Tableau (III.3): Harmoniques de tension et de courant.

❖ **Commentaire des résultats**

- L’allure du courant absorbé par la lampe à incandescence (charge linéaire) est la même que celle de la tension qui est sinusoïdale.
- Les taux de distorsions harmoniques globaux en tension et en courant sont faibles (TDHg en courant=4.98% ,TDHg en tension= 4.68%) donc on a aucun dysfonctionnement.
- Nous avons constaté une légère chute de tension due probablement aux différents appareils de mesure.

1.3 Mesures effectuées sur une lampe fluo-compacte de marque Philips 20W

a. Courbes des signaux (courant et tension)

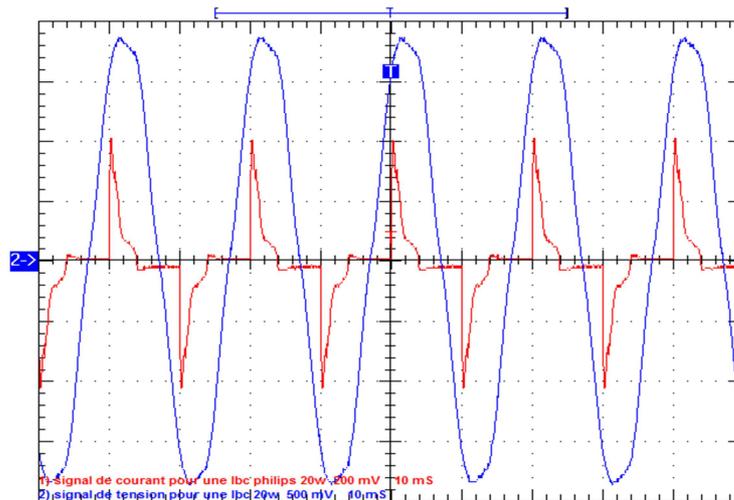


Figure (III.6): Signaux courant et tension.

b. Spectres de la tension et du courant

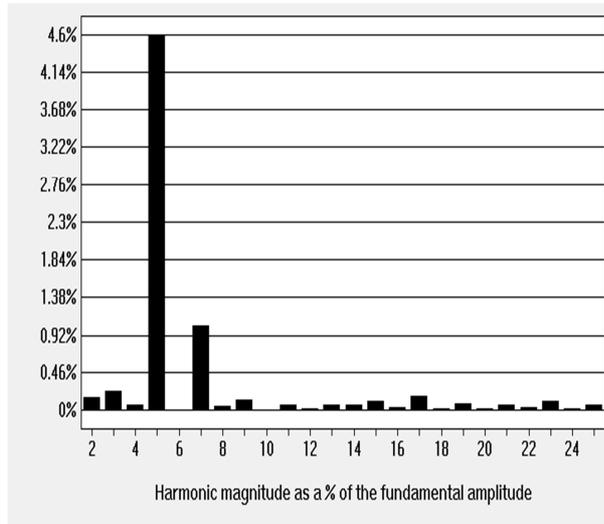


Figure. (III.7) : TDHi en tension.

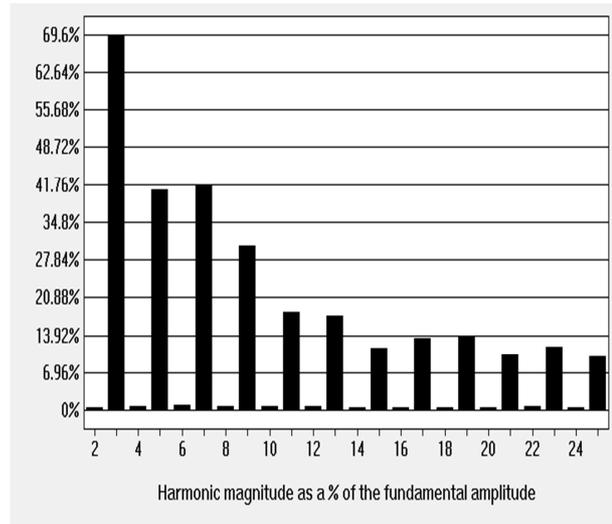


Figure. (III.8) : TDHi en courant

c. Valeurs mesurées sur une lampe fluo-compacte Phillips 20W

	Valeurs mesurées par les appareils classiques	Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
I (A)	0.075	0.123	0.0846	104.66
U (V)	220	215.76	215.408	4.711

Tableau (III.4) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre) Et ceux donnés par l'oscilloscope

Valeurs données par l'oscilloscope			
Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
16.64	20.64	26.56	0.629

Tableau(III.5) :Résultats donnés par l'oscilloscope

d. Analyse harmonique des signaux

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.950 Hz	1.3463 V	100.000 %	0.0000	84.639m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.900 Hz	2.1808m V	0.162 %	-169.13	458.86u V	0.542 %	130.42
Harmonic 3	149.85 Hz	3.1537m V	0.234 %	123.09	58.833m V	69.511 %	-3.8154
Harmonic 4	199.80 Hz	890.32u V	0.066 %	-164.07	649.71u V	0.768 %	-31.505
Harmonic 5	249.75 Hz	61.536m V	4.571 %	14.766	34.594m V	40.872 %	158.92
Harmonic 6	299.70 Hz	162.80u V	0.012 %	69.318	854.02u V	1.009 %	159.88
Harmonic 7	349.65 Hz	13.905m V	1.033 %	-34.891	35.005m V	41.359 %	-36.769
Harmonic 8	399.60 Hz	634.95u V	0.047 %	-148.51	769.65u V	0.909 %	-31.158
Harmonic 9	449.55 Hz	1.8194m V	0.135 %	60.243	25.712m V	30.379 %	144.60
Harmonic 10	499.50 Hz	201.16u V	0.015 %	-97.382	643.23u V	0.760 %	142.34
Harmonic 11	549.45 Hz	857.79u V	0.064 %	-21.219	15.454m V	18.258 %	-62.739
Harmonic 12	599.40 Hz	388.14u V	0.029 %	-71.152	626.54u V	0.740 %	-58.578
Harmonic 13	649.35 Hz	898.02u V	0.067 %	45.848	14.859m V	17.556 %	92.817
Harmonic 14	699.30 Hz	890.75u V	0.066 %	-157.32	495.87u V	0.586 %	83.936
Harmonic 15	749.25 Hz	1.5882m V	0.118 %	114.58	9.7579m V	11.529 %	-109.10

Tableau (III.6) : Harmoniques de tension et de courant.

❖ Commentaires et interprétations des résultats

- La forme d'onde de la tension est sinusoïdale contrairement à celle du courant qui est déformée et comporte beaucoup d'harmoniques.
- Le TDH_g en tension est faible il est de l'ordre de 4.71% tandis que le TDH_g en courant est assez important, il est de l'ordre de 104.66%.
- Concernant les spectres en tension, le rang 5 est le plus important avec un TDH_i=4.6% ce qui est tolérable.
- Pour les spectres en courant l'harmonique de rang 3 est le plus important avec un TDH_i=69.6%. Les harmoniques de rang 5, 7, 9, et 11 ont des TDH_i compris entre 10% et 50%.
- Les appareils classiques de mesure ne tiennent pas compte des composantes harmoniques, ils nous donnent uniquement la valeur efficace du fondamental.

1.4 Mesures prises pour 2 lampes fluo-compactes phillips 20W en parallèle sur une même phase

a. Courbes des signaux (courant et tension)

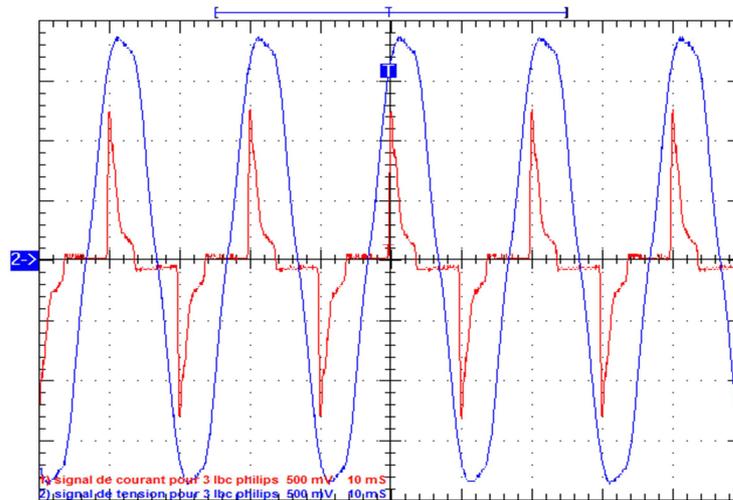


Figure (III.9) : Signaux courant et tension

b. Spectres de la tension et du courant

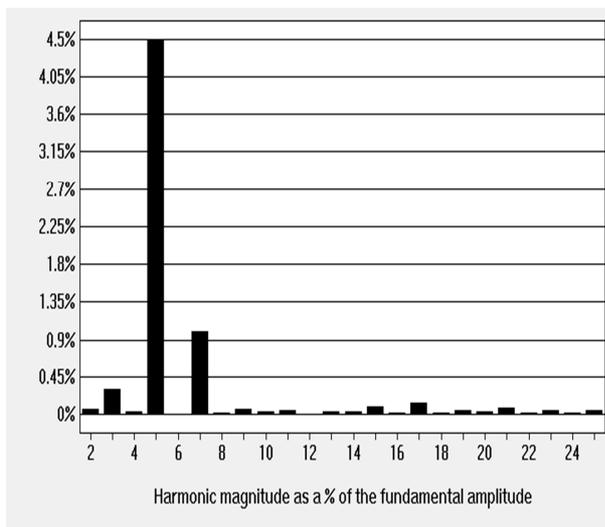


Figure. (III.10) : TDHi en tension.

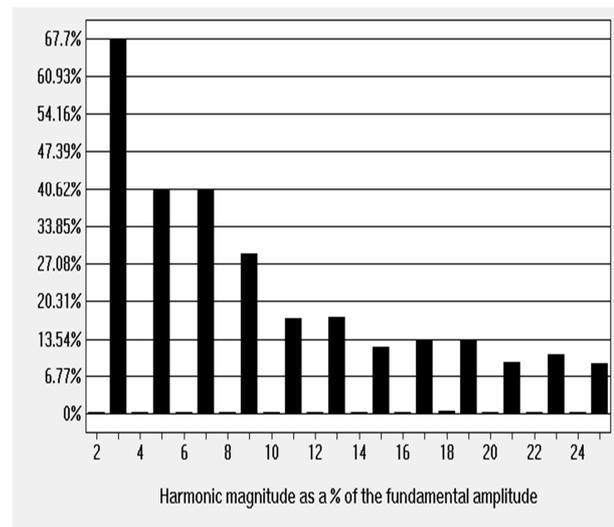


Figure. (III.11) : TDHi en courant.

c. Valeurs mesurées sur deux lampes fluo-compacte Phillips 20W

	Valeurs mesurées par les appareils classiques	Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
I (A)	0.160	0.251	0.175	101.86
U (V)	220	216.08	215.616	4.624

Tableau (III.7) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre) Et ceux donnés par l'oscilloscope

Valeurs données par le wave star for oscilloscope			
Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
34.72	41.76	54.4	0.638

Tableau(III.8) :Résultats donnés par l'oscilloscope

d. Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.100 Hz	1.3476 V	100.000 %	0.0000	175.91m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.20 Hz	983.87u V	0.073 %	-94.788	407.84u V	0.232 %	142.28
Harmonic 3	150.30 Hz	4.0939m V	0.304 %	133.85	119.07m V	67.688 %	-5.7983
Harmonic 4	200.40 Hz	421.20u V	0.031 %	-44.928	410.30u V	0.233 %	-91.168
Harmonic 5	250.50 Hz	60.552m V	4.493 %	16.443	70.839m V	40.271 %	155.99
Harmonic 6	300.60 Hz	196.70u V	0.015 %	-76.208	615.32u V	0.350 %	-165.08
Harmonic 7	350.70 Hz	13.511m V	1.003 %	-38.362	71.104m V	40.422 %	-40.204
Harmonic 8	400.80 Hz	295.56u V	0.022 %	-18.487	738.23u V	0.420 %	-2.4842
Harmonic 9	450.90 Hz	886.53u V	0.066 %	63.585	50.838m V	28.901 %	139.37
Harmonic 10	501.00 Hz	463.08u V	0.034 %	-119.80	568.90u V	0.323 %	108.38
Harmonic 11	551.10 Hz	631.08u V	0.047 %	-34.849	30.327m V	17.240 %	-71.649
Harmonic 12	601.20 Hz	94.233u V	0.007 %	-104.81	590.48u V	0.336 %	-91.788
Harmonic 13	651.30 Hz	428.07u V	0.032 %	73.646	30.960m V	17.600 %	82.773
Harmonic 14	701.40 Hz	432.07u V	0.032 %	-107.71	546.46u V	0.311 %	74.130
Harmonic 15	751.50 Hz	1.3406m V	0.099 %	93.097	21.500m V	12.223 %	-118.80

Tableau (III.9) : Harmoniques de tension et de courant.

1.5 Mesures prises pour 3 lampes fluo-compactes Phillips 20W en parallèle sur une même phase.

a. Courbes des signaux (courant et tension)

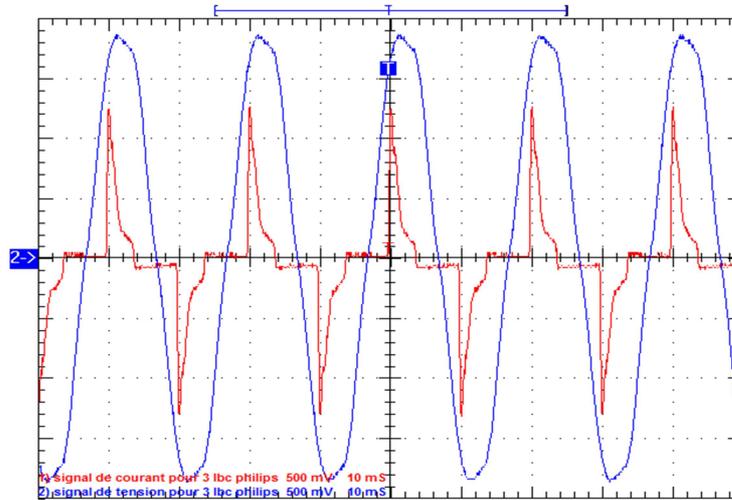


Figure (III.12) : Signaux courant et tension.

b. Spectres de la tension et du courant

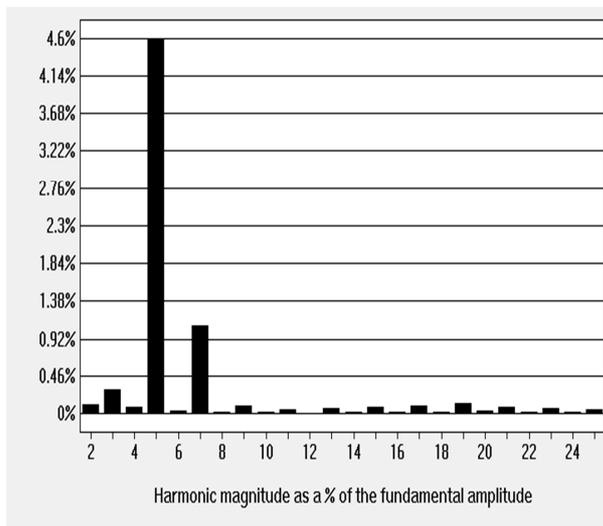


Figure (III.13) : TDHi en tension

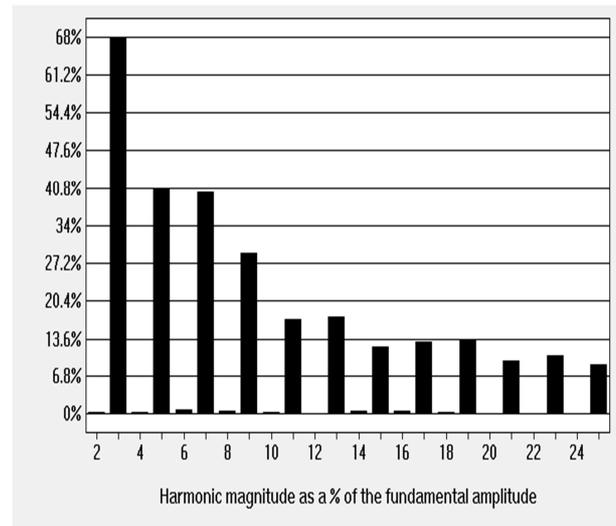


Figure (III.14) : TDHi en courant.

c. Valeurs mesurées sur trois lampes fluo-compactes Phillips 20W

	Valeurs mesurées par les appareils classiques	Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
I (A)	0.240	0.375	0.262	101.90
U (V)	220	216.08	215.712	4.731

Tableau (III.10) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre) Et ceux donnés par l'oscilloscope

Valeurs données par le wave star for oscilloscope			
Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
51.68	62.4	81.12	0.638

Tableau (III.11) : Résultats donnés par l'oscilloscope

d. Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	1.3482 V	100.000 %	0.0000	262.15m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.00 Hz	1.6005m V	0.119 %	-153.56	938.74u V	0.358 %	165.60
Harmonic 3	150.00 Hz	3.9596m V	0.294 %	126.71	178.22m V	67.981 %	-5.4136
Harmonic 4	200.00 Hz	1.1396m V	0.085 %	-122.47	790.72u V	0.302 %	-48.702
Harmonic 5	250.00 Hz	61.758m V	4.581 %	17.243	106.05m V	40.452 %	156.28
Harmonic 6	300.00 Hz	462.70u V	0.034 %	-141.57	2.1419m V	0.817 %	145.99
Harmonic 7	350.00 Hz	14.720m V	1.092 %	-31.656	105.23m V	40.140 %	-41.174
Harmonic 8	400.00 Hz	335.21u V	0.025 %	-148.91	1.6326m V	0.623 %	-24.494
Harmonic 9	450.00 Hz	1.3751m V	0.102 %	87.029	76.286m V	29.099 %	137.66
Harmonic 10	500.00 Hz	208.96u V	0.015 %	17.963	1.1533m V	0.440 %	151.65
Harmonic 11	550.00 Hz	683.52u V	0.051 %	-12.857	45.300m V	17.280 %	-73.734
Harmonic 12	600.00 Hz	136.13u V	0.010 %	-50.389	211.42u V	0.081 %	-141.17
Harmonic 13	650.00 Hz	829.02u V	0.061 %	62.036	45.988m V	17.542 %	80.180
Harmonic 14	700.00 Hz	282.97u V	0.021 %	89.051	1.4773m V	0.564 %	65.056
Harmonic 15	750.00 Hz	1.1487m V	0.085 %	70.670	32.207m V	12.285 %	-121.66

Tableau (III.12) : Harmoniques de tension et de courant.

1.6 Mesures prises pour 5 lampes fluo-compactes Phillips 20W en parallèle sur une même phase.

a. Courbes des signaux (courant et tension)

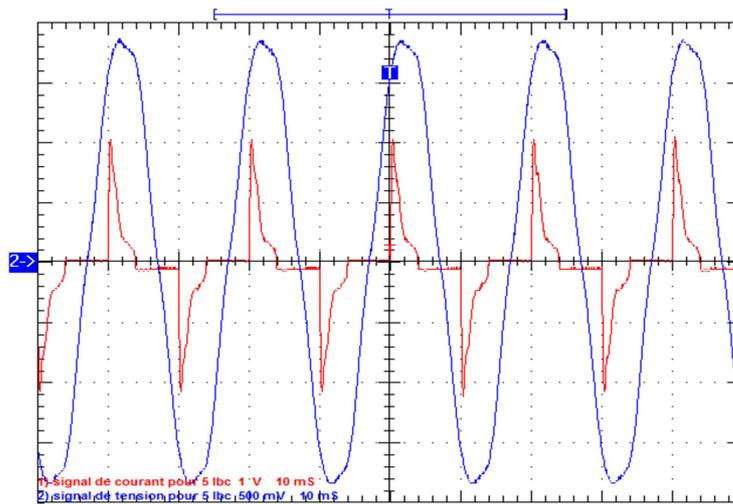


Figure (III.15) : signaux courant et tension.

b. Spectres de la tension et du courant

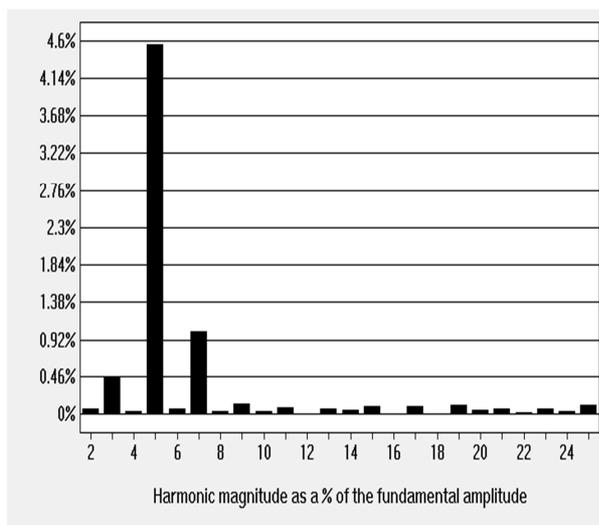


Figure. (III.16) : TDHi en tension

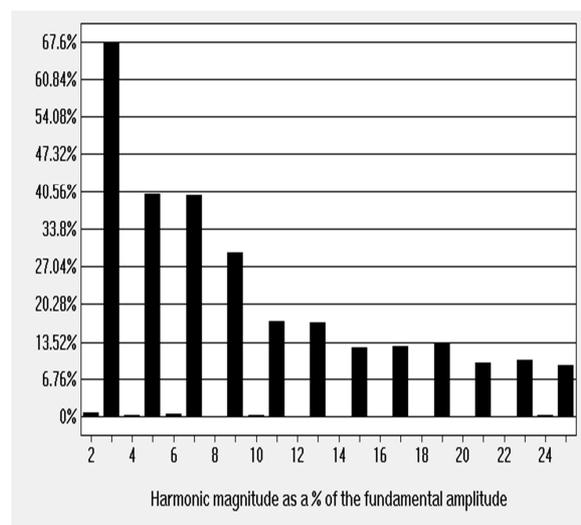


Figure. (III.17) : TDHi en courant.

c. Valeurs mesurées sur cinq lampes fluo-compacte Phillips 20W

	Valeurs mesurées par les appareils classiques	Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
I (A)	0.400	0.625	0.439	101.215
U (V)	220	214.56	214.288	4.694

Tableau (III.13) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre) Et ceux donnés par l'oscilloscope

Valeurs données par le wave star for oscilloscope			
Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
87.04	102.08	134.28	0.648

Tableau (III.14) : Résultats donnés par l'oscilloscope

d. Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	1.3393 V	100.000 %	0.0000	439.37m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	945.31u V	0.071 %	-107.21	2.9751m V	0.677 %	132.70
Harmonic 3	150.00 Hz	5.9495m V	0.444 %	128.78	296.61m V	67.509 %	-5.3234
Harmonic 4	200.00 Hz	528.20u V	0.039 %	-54.682	1.1656m V	0.265 %	-54.020
Harmonic 5	250.00 Hz	60.833m V	4.542 %	16.973	176.28m V	40.120 %	156.42
Harmonic 6	300.00 Hz	823.98u V	0.062 %	-96.295	1.9644m V	0.447 %	149.74
Harmonic 7	350.00 Hz	13.817m V	1.032 %	-25.598	175.25m V	39.886 %	-42.179
Harmonic 8	400.00 Hz	520.61u V	0.039 %	179.93	759.13u V	0.173 %	-12.577
Harmonic 9	450.00 Hz	1.6365m V	0.122 %	90.658	129.89m V	29.563 %	136.21
Harmonic 10	500.00 Hz	514.79u V	0.038 %	-69.313	1.2781m V	0.291 %	95.551
Harmonic 11	550.00 Hz	1.0555m V	0.079 %	-94.067	76.375m V	17.383 %	-73.179
Harmonic 12	600.00 Hz	144.53u V	0.011 %	-74.986	596.62u V	0.136 %	-98.692
Harmonic 13	650.00 Hz	1.0032m V	0.075 %	53.680	75.404m V	17.162 %	78.962
Harmonic 14	700.00 Hz	739.30u V	0.055 %	-136.08	427.61u V	0.097 %	13.808
Harmonic 15	750.00 Hz	1.3391m V	0.100 %	68.090	55.080m V	12.536 %	-121.27

Tableau (III.18) : Harmoniques de tension et de courant.

1.7 Mesures prises pour 6 lampes fluo-compactes Phillips 20W en parallèle sur une même phase.

a. Courbes des signaux (courant et tension)

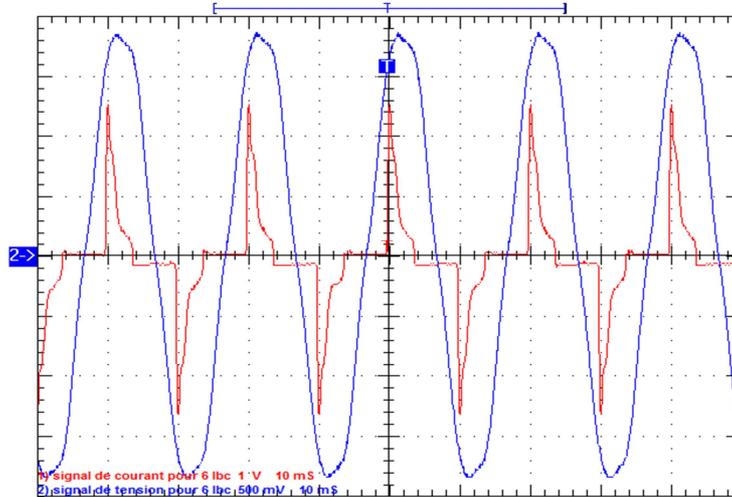


Figure (III.18) : Signaux courant et tension.

b. Spectres de la tension et du courant

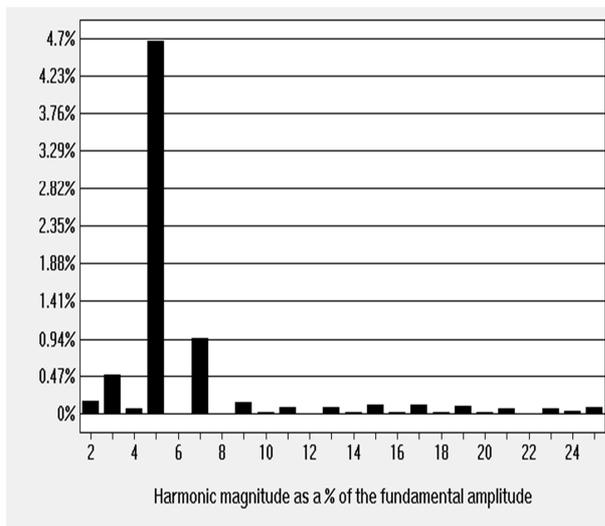


Figure (III.19) : TDHi en tension

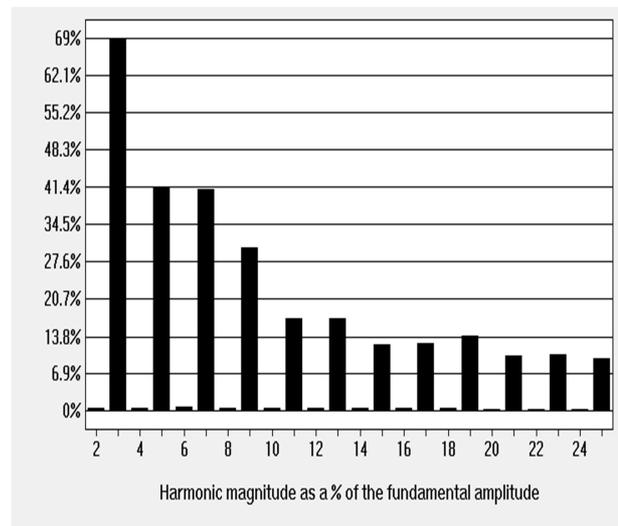


Figure (III.20) : TDHi en courant.

c. Valeurs mesurées sur six lampes fluo-compactes Phillips 20W

	Valeurs mesurées par les appareils classiques	Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
I (A)	0.460	0.772	0.535	103.349
U (V)	220	215.008	214.432	4.807

Tableau (III.15) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre) Et ceux donnés par l'oscilloscope

Valeurs données par l'oscilloscope			
Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
105.44	128.16	166.064	0.635

Tableau (III.16) : Résultats donnés par l'oscilloscope

d. Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.100 Hz	1.3402 V	100.000 %	0.0000	535.51m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.20 Hz	2.2225m V	0.166 %	-156.92	3.6417m V	0.680 %	162.55
Harmonic 3	150.30 Hz	6.4684m V	0.483 %	102.63	369.27m V	68.957 %	-6.6477
Harmonic 4	200.40 Hz	862.17u V	0.064 %	-136.78	3.3799m V	0.631 %	-41.340
Harmonic 5	250.50 Hz	62.555m V	4.668 %	20.943	221.45m V	41.353 %	155.28
Harmonic 6	300.60 Hz	128.47u V	0.010 %	122.65	3.8336m V	0.716 %	139.87
Harmonic 7	350.70 Hz	12.855m V	0.959 %	-20.881	218.32m V	40.768 %	-43.041
Harmonic 8	400.80 Hz	149.71u V	0.011 %	-138.49	3.5519m V	0.663 %	-42.034
Harmonic 9	450.90 Hz	1.9671m V	0.147 %	95.754	161.98m V	30.247 %	135.45
Harmonic 10	501.00 Hz	377.63u V	0.028 %	-168.13	2.9268m V	0.547 %	116.65
Harmonic 11	551.10 Hz	1.1122m V	0.083 %	-79.821	92.195m V	17.216 %	-73.527
Harmonic 12	601.20 Hz	182.25u V	0.014 %	-102.05	2.7876m V	0.521 %	-99.751
Harmonic 13	651.30 Hz	1.1812m V	0.088 %	32.793	91.922m V	17.165 %	76.442
Harmonic 14	701.40 Hz	222.95u V	0.017 %	-104.31	3.6575m V	0.683 %	74.504
Harmonic 15	751.50 Hz	1.5235m V	0.114 %	82.136	66.849m V	12.483 %	-123.96

Tableau (III.17) : Harmoniques de tension et de courant.

1.8 Mesures prises pour 7 lampes fluo-compactes Philips 20W en parallèle sur une même phase

a. Courbes des signaux (courant et tension)

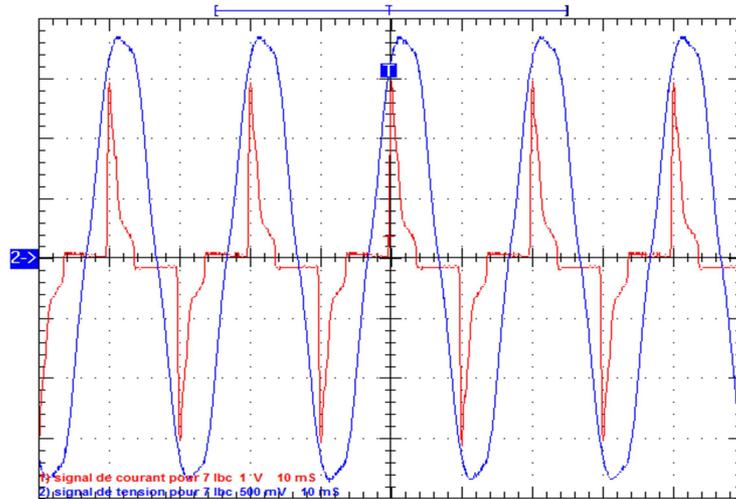


Figure (III.21) : signaux courant et tension.

b. Spectres de la tension et du courant

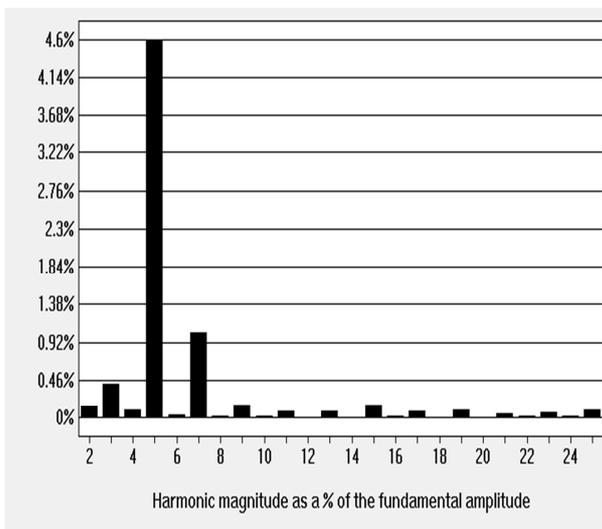


Figure (III.22) : TDHi en tension

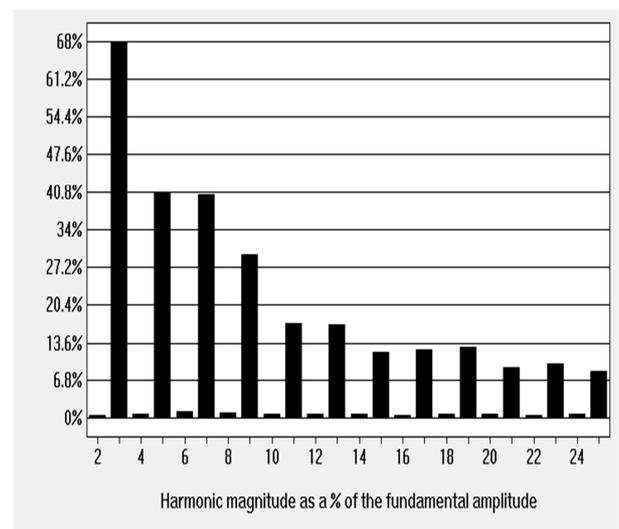


Figure (III.23) : TDHi en courant

c. Valeurs mesurées sur sept lampes fluo-compactes Phillips 20W

	Valeurs mesurées par les appareils classiques	Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
I (A)	0.55	0.905	0.634	100.762
U (V)	220	214.592	214.08	4.733

Tableau (III.18) : Résultats relevés sur les appareils classiques (Ampèremètre, Voltmètre) Et ceux donnés par l'oscilloscope

Valeurs données par l'oscilloscope			
Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
124.64	148.96	194.4	0.641

Tableau (III.19) : Résultats donnés par l'oscilloscope

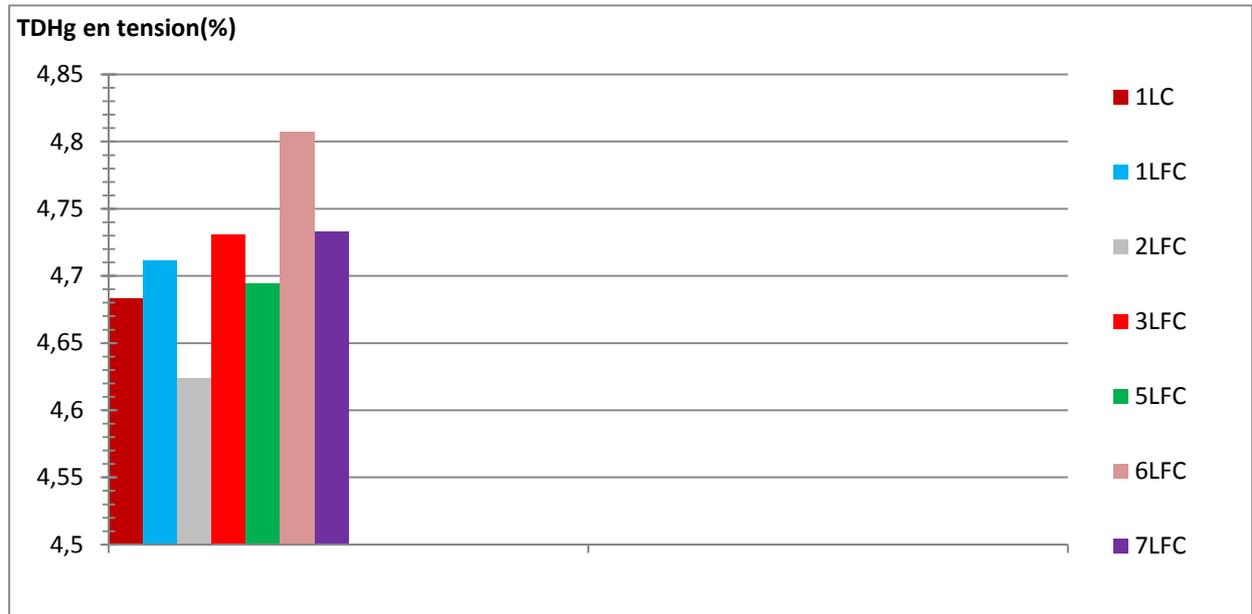
d. Analyse Harmonique des signaux.

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	1.3381 V	100.000 %	0.0000	634.30m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.00 Hz	1.8339m V	0.137 %	-165.38	2.8597m V	0.451 %	141.54
Harmonic 3	150.00 Hz	5.6749m V	0.424 %	106.83	431.28m V	67.993 %	-7.0261
Harmonic 4	200.00 Hz	1.3710m V	0.102 %	-158.55	4.5744m V	0.721 %	-29.284
Harmonic 5	250.00 Hz	61.296m V	4.581 %	18.022	258.26m V	40.716 %	153.65
Harmonic 6	300.00 Hz	444.72u V	0.033 %	158.15	7.8840m V	1.243 %	145.67
Harmonic 7	350.00 Hz	13.988m V	1.045 %	-24.195	255.56m V	40.290 %	-44.466
Harmonic 8	400.00 Hz	206.61u V	0.015 %	-33.260	6.4655m V	1.019 %	-26.289
Harmonic 9	450.00 Hz	2.2123m V	0.165 %	94.066	186.61m V	29.419 %	133.97
Harmonic 10	500.00 Hz	212.94u V	0.016 %	-168.04	4.9632m V	0.782 %	128.43
Harmonic 11	550.00 Hz	1.1470m V	0.086 %	-63.710	108.68m V	17.133 %	-76.633
Harmonic 12	600.00 Hz	167.35u V	0.013 %	-18.534	5.2808m V	0.833 %	-84.553
Harmonic 13	650.00 Hz	1.1246m V	0.084 %	-773.00m	107.96m V	17.020 %	75.315
Harmonic 14	700.00 Hz	193.82u V	0.014 %	150.73	4.2999m V	0.678 %	65.944
Harmonic 15	750.00 Hz	2.0684m V	0.155 %	53.094	75.476m V	11.899 %	-125.04

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

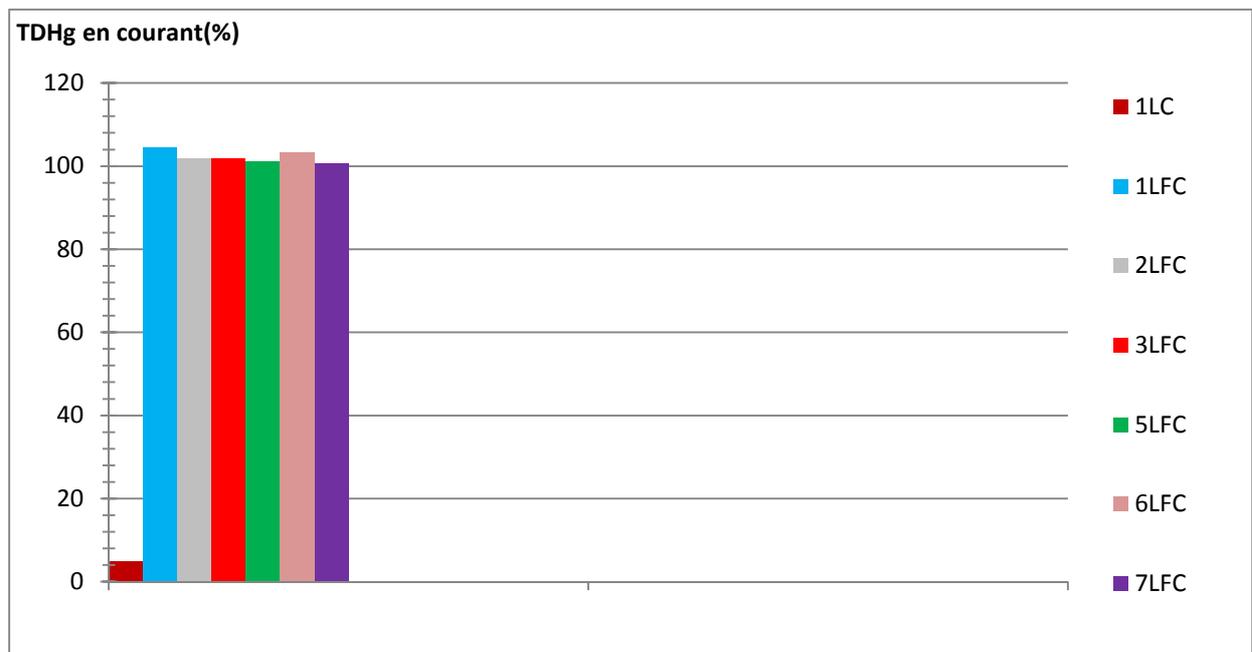
1.9 Récapitulation des résultats

a. TDH globaux en tension en fonction du nombre de lampes



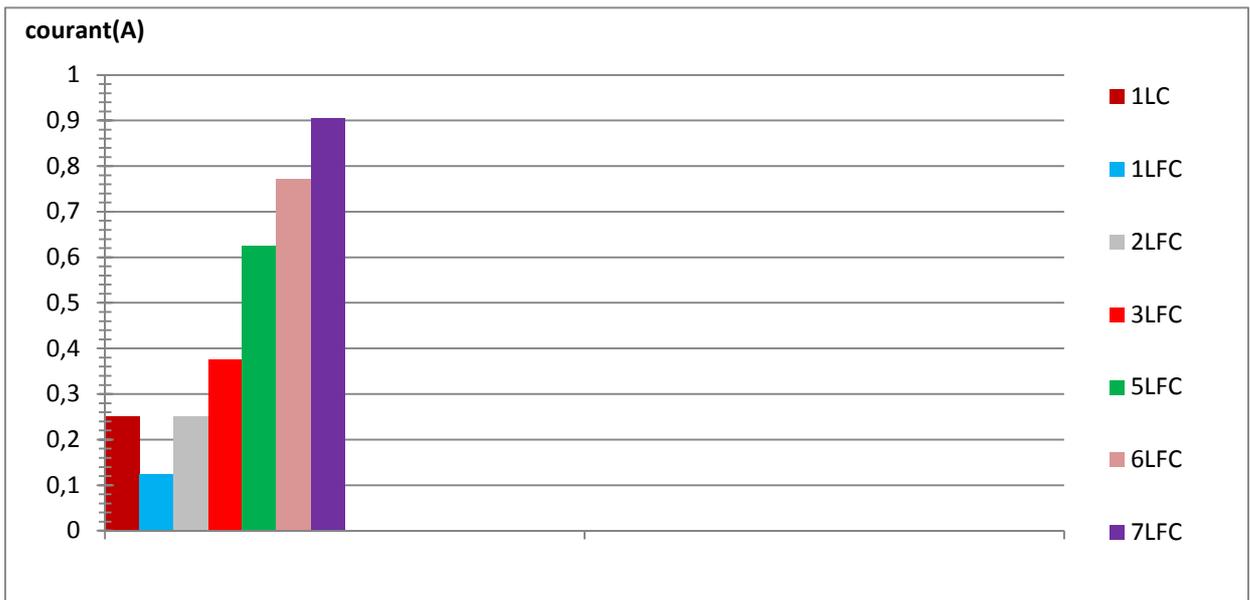
Histogramme (III.1) : TDHg des tensions en fonction du nombre de lampes

b. TDH globaux en courant en fonction du nombre de lampes



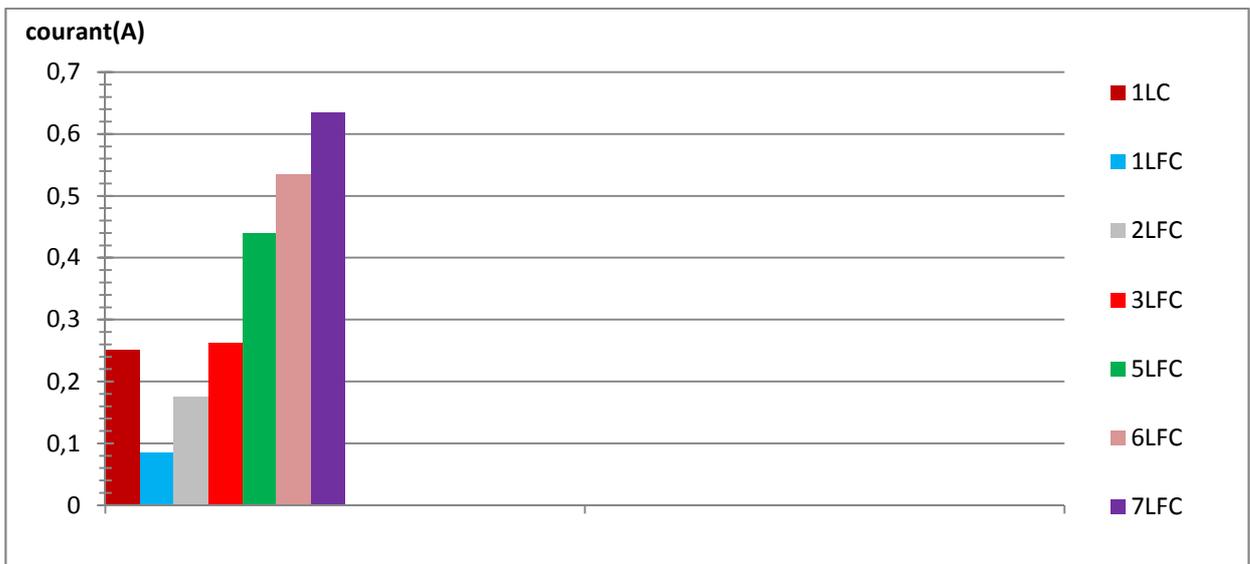
Histogramme (III.2) : TDHg des courants en fonction du nombre de lampes

c. Valeurs efficaces globales des courants en fonction du nombre de lampes



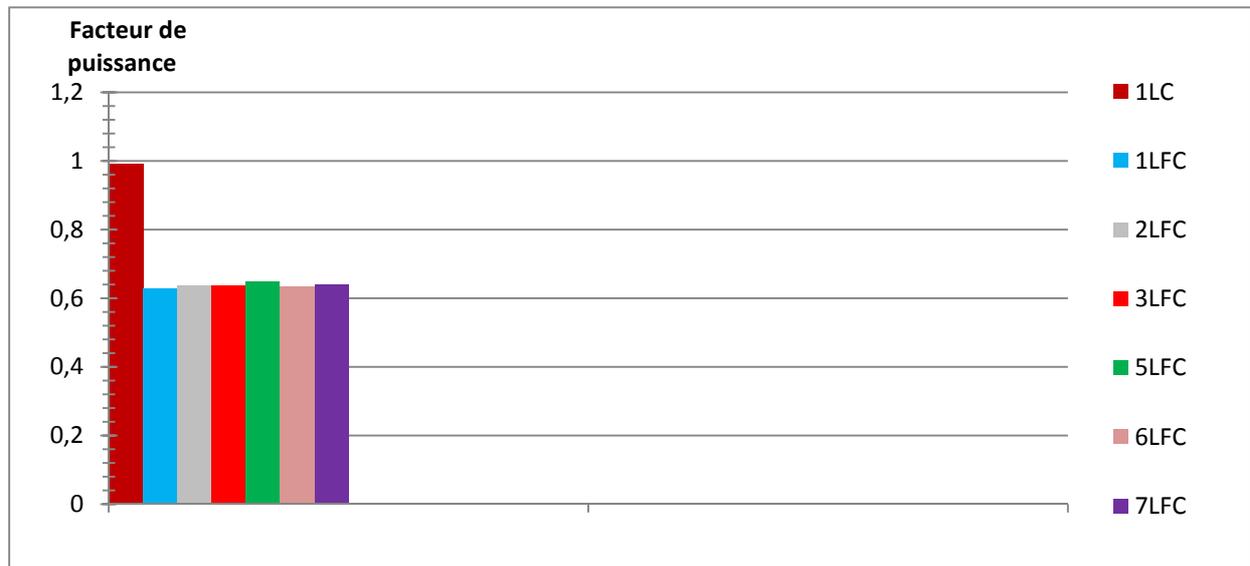
Histogramme (III.3) : Valeurs efficaces globales des courants en fonction du nombre de lampes

d. Valeurs efficaces des courants fondamentaux en fonction du nombre de lampes



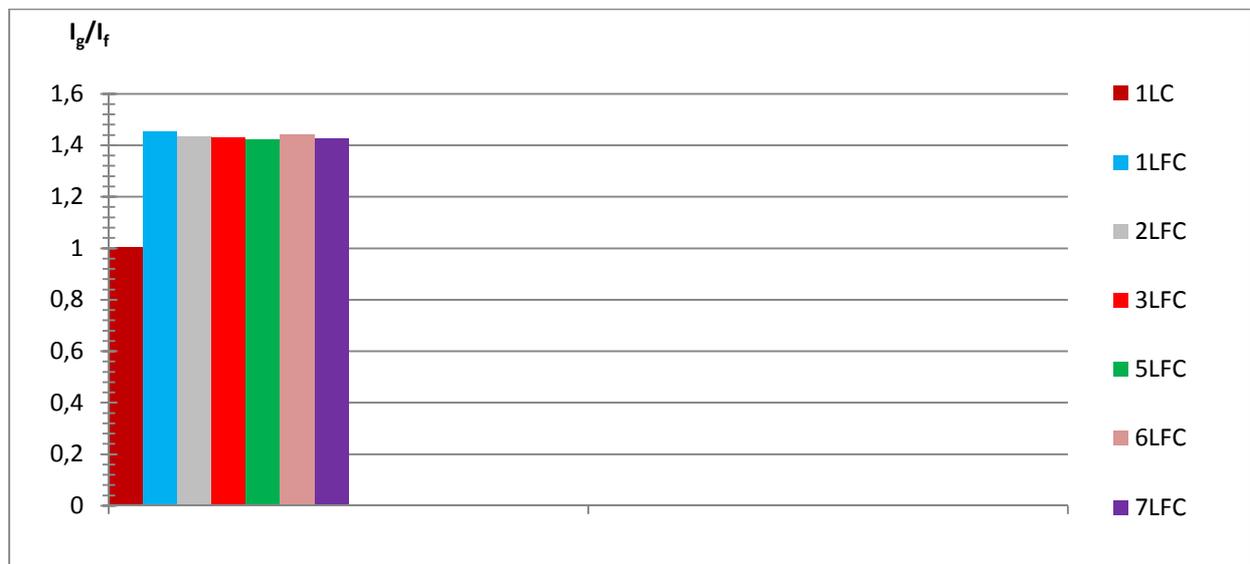
Histogramme (III.4) : Valeurs efficaces des courants fondamentaux en fonction du nombre de lampes

e. Variation du facteur de puissance en fonction du nombre de lampes



Histogramme (III.5) : Variation du facteur de puissance en fonction du nombre de Lampes

f. Rapport du courant global I_g sur le courant fondamental I_f en fonction du nombre de lampes



Histogramme (III.6) : Rapport du courant global I_g sur le courant fondamental I_f en fonction du nombre de lampes

❖ Commentaires et interprétations des résultats

Dans ces essais nous avons fait varier le nombre de lampes fluo-compactes branchées sur le réseau basse tension, il ressort des résultats trouvés que :

- Les TDH_g en tension ne sont pas affectés d'une manière significative (TDH_g (%) autour de 4.7%)
- Les TDH_g en courant restent pratiquement inchangés lorsqu'on augmente le nombre de lampes.
- Les valeurs efficaces globales de tension sont presque égales aux valeurs efficaces fondamentales.
- Les valeurs efficaces globales de courant sont largement supérieures aux valeurs efficaces fondamentales en raison de la présence importante d'harmoniques.
- La variation aléatoire des TDH_g en courant s'explique par le phénomène de foisonnement.
- Le facteur de puissance reste faible en augmentant le nombre de lampes.

En conclusion on peut dire que :

- L'utilisation massive des lampes fluo-compactes dans les réseaux basse tension peut altérer l'onde de tension et provoquer des TDH importants.
- L'utilisation massive des lampes fluo-compactes nécessite une compensation de la puissance réactive
- Pour bien mesurer les grandeurs électriques (courant, tension et puissance) en présence de charges non linéaire, il est nécessaire d'utiliser des oscilloscopes numériques.

2 Essais en triphasé

Dans cet essai, nous analysons le cas d'un système triphasé équilibré, sur chaque phase, nous plaçons un nombre identique de charges linéaires puis des charges non linéaires

• *Materiel utilisé*

- ✓ Source de tension triphasée équilibrée 3×220 volt
- ✓ 4 ampèremètres ferromagnétiques.
- ✓ 3 voltmètres ferromagnétiques.
- ✓ 4 shunts de $4 \times 1\Omega$.
- ✓ Un transformateur abaisseur avec un rapport de transformation $k = \frac{220}{50}$.
- ✓ Un oscilloscope numérique TDS210.
- ✓ Un micro-ordinateur.
- ✓ 3 résistances $3 \times 220\Omega$
- ✓ Des lampes fluo compactes (Philips 20W).

• *Schéma de montage*

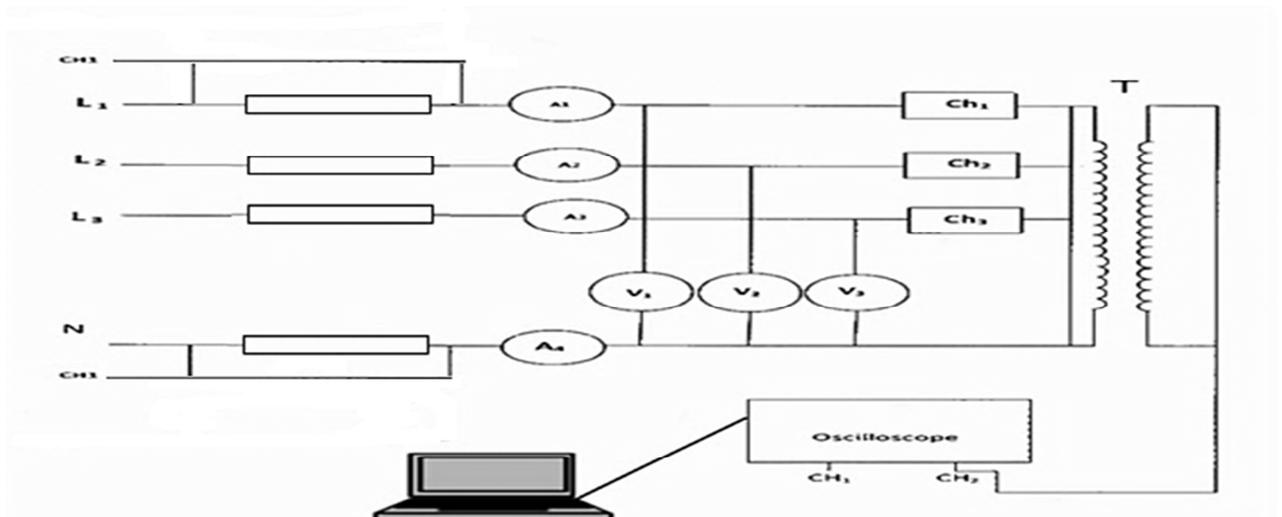
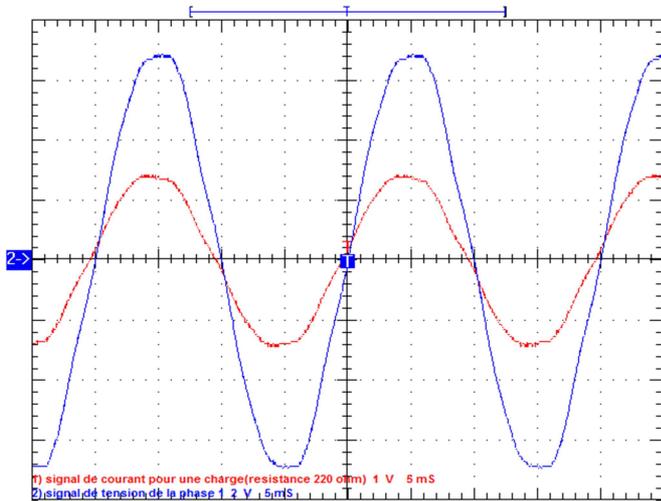


Figure. (III.24) : Schéma du montage de l'essai en triphasé.

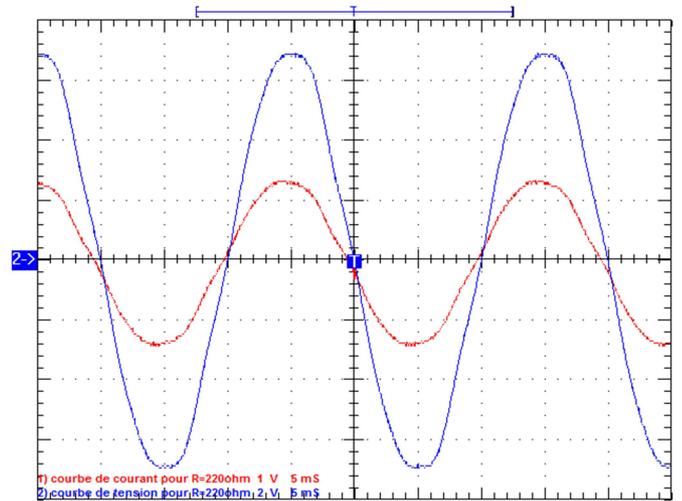
2.1 Charge linéaire

On utilise dans cet essai une charge linéaire (résistive) triphasée, $R = 220 \Omega$

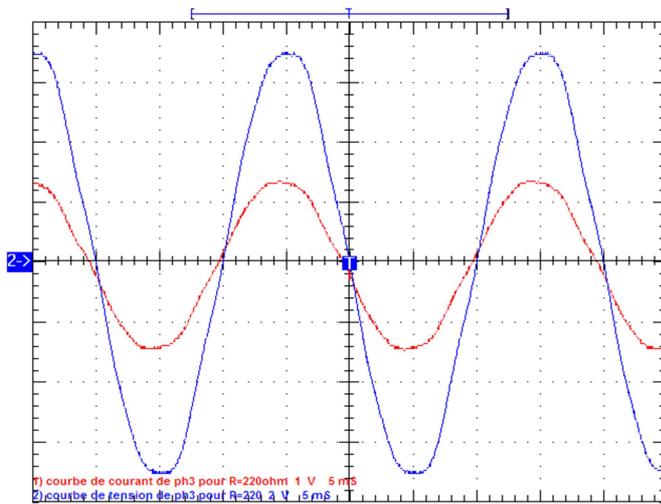
a. Courbes des signaux (courant et tension)



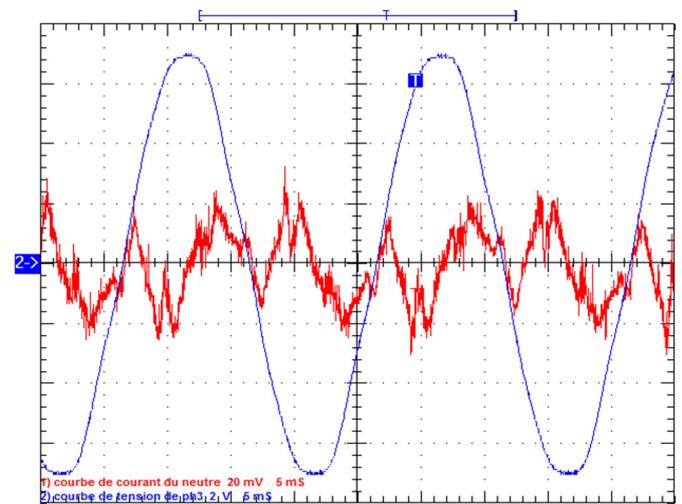
Figure(II.25) : Courbes de la phase « A »



Figure(III.26) : Courbes de la phase « B »

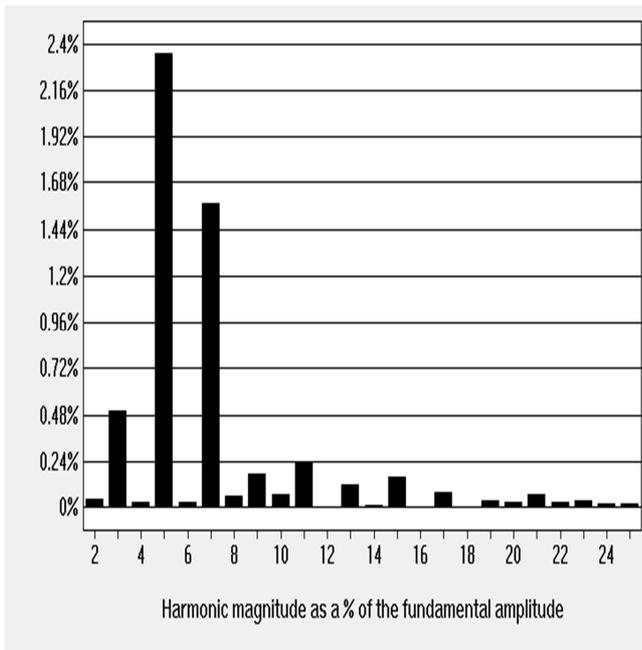


Figure(III.27) : Courbes de la phase « C »

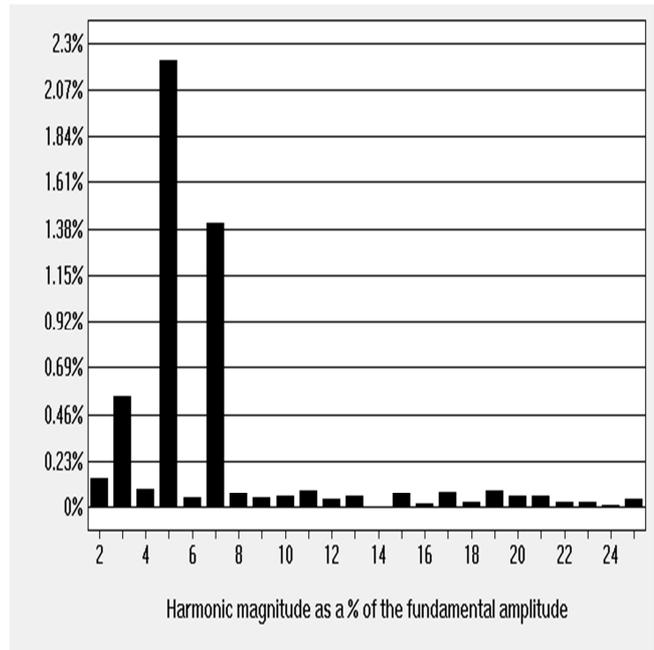


Figure(III.28) : Courbes du neutre

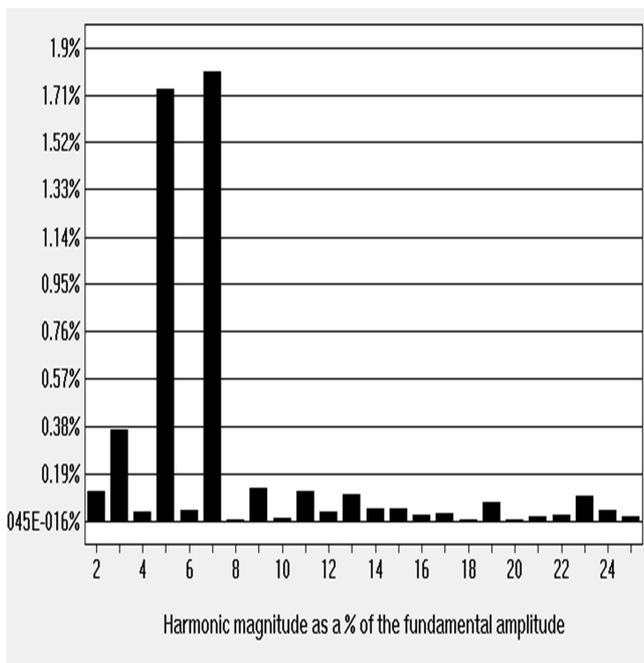
b. Spectres des tensions



Figure(III.29) : Spectres de tension de la phase « A »

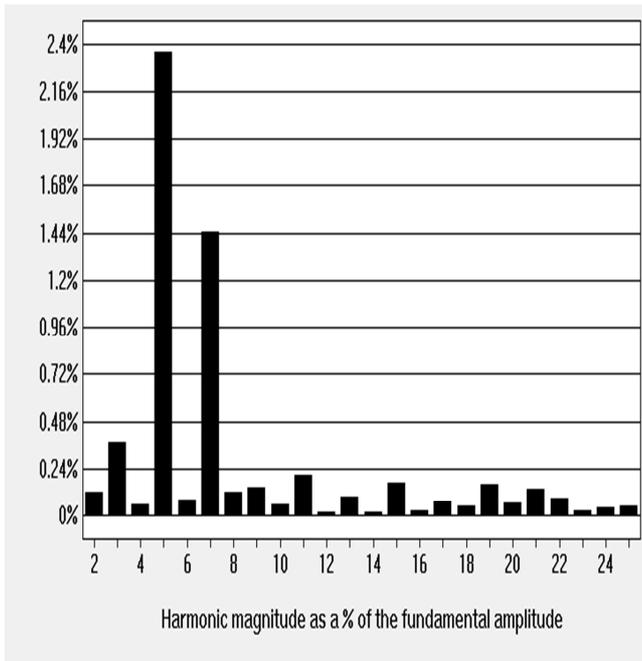


Figure(III.30) : Spectres de tension de la phase « B »

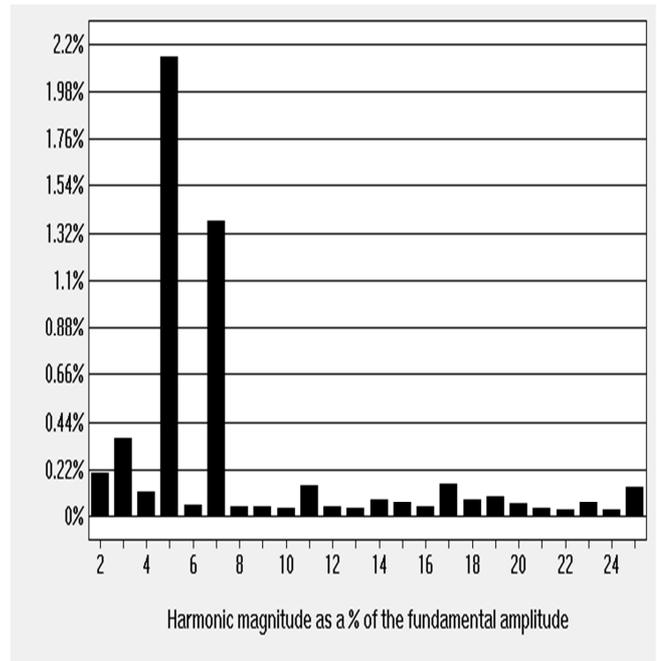


Figure(III.31) : Spectres de tension de la phase « C »

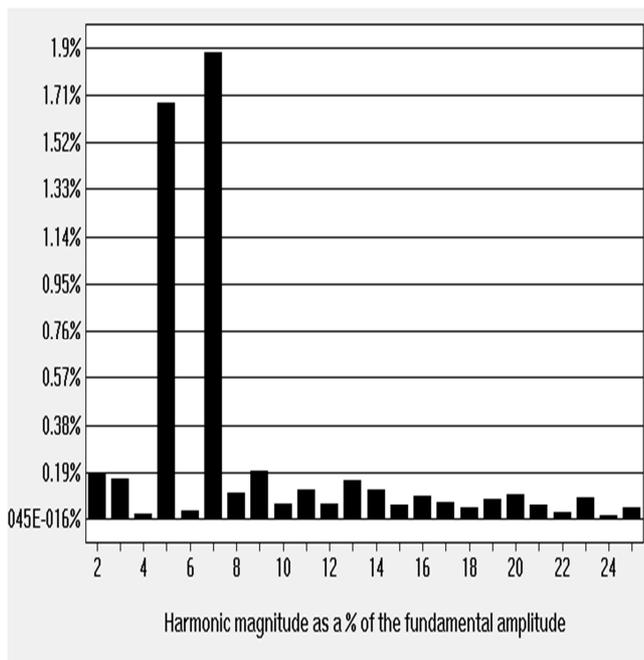
c. Spectres des courants



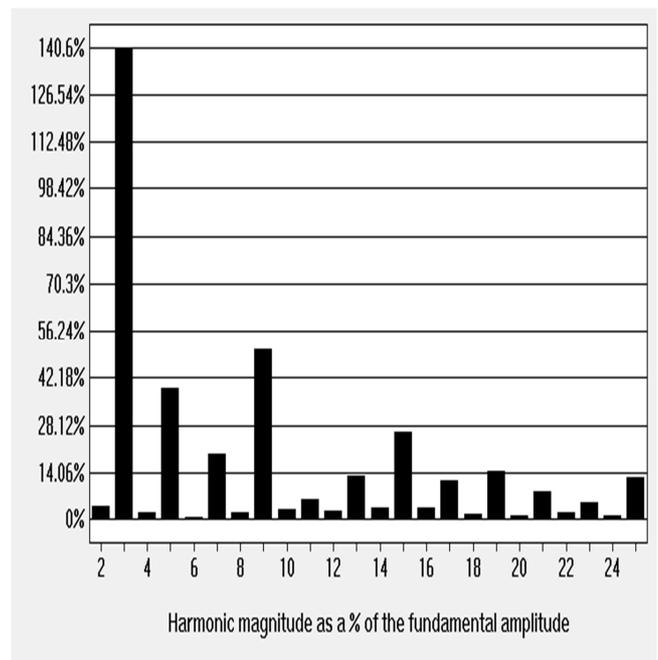
Figure(III.33) : Spectres de courant de la phase « A »



Figure(III.34) : Spectres de courant de la phase « B »



Figure(III.35) : Spectres de courant de la phase « C »



Figure(III.36) : Spectres de courant du neutre

d. Valeurs mesurées**➤ Résultats relevés sur les appareils classiques.**

- En plaçant le voltmètre entre la phase « A » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
218	0.920	0.920	0.950	0.011

Tableau (III.21) : Résultat relevés sur les appareils classiques

- En plaçant le voltmètre entre la phase « B » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
218	0.925	0.925	0.950	0.011

Tableau (III.22) : Résultat relevés sur les appareils classiques

- En plaçant le voltmètre entre la phase « C » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
220	0.920	0.925	0.950	0.011

Tableau (III.23) : Résultat relevés sur les appareils classiques**➤ Résultats relevés avec le logiciel wave star for oscilloscope****• Valeurs des tensions et des courants**

		Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
Phase « A »	U (V)	220.035	219.93	2.891
	I (A)	1.0302	1.0292	2.814
Phase « B »	U (V)	220.38	219.90	2.691
	I (A)	0.984	0.982	2.58
Phase « C »	U (V)	223.08	222.83	2.543
	I (A)	1.0070	1.0057	2.554
Neutre	I (A)	0.0113	0.00591	156.68

Tableau (III.24) Résultats relevés avec le logiciel wave star for oscilloscope.

• Valeurs des puissances

	Valeurs données par l'oscilloscope			Facteur de puissance reel
	Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	
Phase « A »	224.48	31.41	226.67	0.99
phase « B »	214.61	31.152	216.86	0.989
Phase « C »	223.43	23.276	224.655	0.994

Tableau (III.25) Résultats relevés avec le logiciel wave star for oscilloscope

e. Analyse harmonique des signaux

➤ Phase « A »

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.950 Hz	4.9984 V	100.000 %	0.0000	1.0292 V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.900 Hz	2.1306m V	0.043 %	131.78	1.2273m V	0.119 %	153.86
Harmonic 3	149.85 Hz	25.292m V	0.506 %	102.70	3.8655m V	0.376 %	131.81
Harmonic 4	199.80 Hz	1.3161m V	0.026 %	-148.01	651.21u V	0.063 %	65.124
Harmonic 5	249.75 Hz	117.47m V	2.350 %	-46.280	24.289m V	2.360 %	-19.115
Harmonic 6	299.70 Hz	1.5470m V	0.031 %	6.4819	845.25u V	0.082 %	-74.622
Harmonic 7	349.65 Hz	78.457m V	1.570 %	-129.19	14.886m V	1.446 %	-90.168
Harmonic 8	399.60 Hz	2.8627m V	0.057 %	-109.30	1.2393m V	0.120 %	57.063
Harmonic 9	449.55 Hz	8.9915m V	0.180 %	-73.475	1.4993m V	0.146 %	-13.894
Harmonic 10	499.50 Hz	3.3983m V	0.068 %	171.47	599.25u V	0.058 %	-160.47
Harmonic 11	549.45 Hz	11.496m V	0.230 %	128.03	2.1576m V	0.210 %	-175.88
Harmonic 12	599.40 Hz	256.48u V	0.005 %	175.07	184.10u V	0.018 %	-26.058
Harmonic 13	649.35 Hz	6.2468m V	0.125 %	128.31	983.74u V	0.096 %	-159.38

Tableau (III.26) : Harmoniques de tensions et de courants.

➤ Phase « B »

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.050 Hz	4.9978 V	100.000 %	0.0000	982.97m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.10 Hz	7.4544m V	0.149 %	-150.06	2.0051m V	0.204 %	115.63
Harmonic 3	150.15 Hz	27.485m V	0.550 %	-76.134	3.6204m V	0.368 %	-27.027
Harmonic 4	200.20 Hz	4.7409m V	0.095 %	120.41	1.2105m V	0.123 %	103.34
Harmonic 5	250.25 Hz	110.72m V	2.215 %	135.35	21.023m V	2.139 %	161.56
Harmonic 6	300.30 Hz	2.4288m V	0.049 %	-174.22	560.63u V	0.057 %	104.41
Harmonic 7	350.35 Hz	70.268m V	1.406 %	62.444	13.516m V	1.375 %	96.846
Harmonic 8	400.40 Hz	3.6675m V	0.073 %	-165.98	447.60u V	0.046 %	73.651
Harmonic 9	450.45 Hz	2.4477m V	0.049 %	65.664	453.72u V	0.046 %	105.18
Harmonic 10	500.50 Hz	2.8067m V	0.056 %	-116.68	360.95u V	0.037 %	-65.505
Harmonic 11	550.55 Hz	4.3720m V	0.087 %	-63.936	1.4285m V	0.145 %	-16.585
Harmonic 12	600.60 Hz	2.1409m V	0.043 %	-164.43	468.71u V	0.048 %	-91.708
Harmonic 13	650.65 Hz	2.6867m V	0.054 %	-133.25	422.77u V	0.043 %	15.258
Harmonic 14	700.70 Hz	292.92u V	0.006 %	-144.92	797.15u V	0.081 %	12.744
Harmonic 15	750.75 Hz	3.5225m V	0.070 %	171.15	660.32u V	0.067 %	-110.54

Tableau (III.27) : Harmoniques de tensions et de courants.

➤ **Phase « C »**

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.0645 V	100.000 %	0.0000	1.0057 V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	6.3073m V	0.125 %	-155.03	1.9162m V	0.191 %	-118.55
Harmonic 3	150.00 Hz	18.524m V	0.366 %	-89.515	1.6955m V	0.169 %	-66.114
Harmonic 4	200.00 Hz	2.0412m V	0.040 %	-174.70	248.72u V	0.025 %	141.79
Harmonic 5	250.00 Hz	87.743m V	1.733 %	130.01	16.876m V	1.678 %	158.44
Harmonic 6	300.00 Hz	2.4198m V	0.048 %	160.61	373.51u V	0.037 %	155.02
Harmonic 7	350.00 Hz	91.458m V	1.806 %	37.379	18.878m V	1.877 %	74.621
Harmonic 8	400.00 Hz	330.79u V	0.007 %	-58.337	1.1164m V	0.111 %	-151.07
Harmonic 9	450.00 Hz	6.6921m V	0.132 %	101.83	1.9721m V	0.196 %	160.17
Harmonic 10	500.00 Hz	725.19u V	0.014 %	67.501	668.20u V	0.066 %	-88.989
Harmonic 11	550.00 Hz	6.2423m V	0.123 %	-94.287	1.2349m V	0.123 %	-9.6896
Harmonic 12	600.00 Hz	2.1380m V	0.042 %	-83.922	655.78u V	0.065 %	154.16
Harmonic 13	650.00 Hz	5.6785m V	0.112 %	-81.375	1.6310m V	0.162 %	-71.610
Harmonic 14	700.00 Hz	2.6799m V	0.053 %	168.16	1.2338m V	0.123 %	-80.757
Harmonic 15	750.00 Hz	2.6855m V	0.053 %	144.91	601.69u V	0.060 %	-106.14

Tableau (III.28) : Harmoniques de tensions et de courants.

➤ **Neutre**

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.950 Hz	5.0483 V	100.000 %	0.0000	5.9815m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.900 Hz	10.559m V	0.209 %	173.98	247.36u V	4.135 %	168.58
Harmonic 3	149.85 Hz	19.957m V	0.395 %	84.269	8.4091m V	140.586 %	-63.748
Harmonic 4	199.80 Hz	3.1818m V	0.063 %	-133.78	116.01u V	1.939 %	39.663
Harmonic 5	249.75 Hz	97.209m V	1.926 %	-49.276	2.3472m V	39.240 %	-172.45
Harmonic 6	299.70 Hz	3.2377m V	0.064 %	-119.96	48.835u V	0.816 %	79.117
Harmonic 7	349.65 Hz	77.742m V	1.540 %	-132.20	1.1860m V	19.828 %	37.152
Harmonic 8	399.60 Hz	2.5578m V	0.051 %	-139.19	121.11u V	2.025 %	131.19
Harmonic 9	449.55 Hz	7.6917m V	0.152 %	-104.78	3.0429m V	50.872 %	-120.80
Harmonic 10	499.50 Hz	2.0859m V	0.041 %	-86.389	171.40u V	2.865 %	109.27
Harmonic 11	549.45 Hz	6.1723m V	0.122 %	125.25	364.35u V	6.091 %	-136.66
Harmonic 12	599.40 Hz	486.94u V	0.010 %	-120.77	158.32u V	2.647 %	-119.37
Harmonic 13	649.35 Hz	4.4924m V	0.089 %	128.40	794.48u V	13.282 %	-179.19
Harmonic 14	699.30 Hz	1.7157m V	0.034 %	-69.322	202.67u V	3.388 %	-77.818
Harmonic 15	749.25 Hz	1.6788m V	0.033 %	-27.668	1.5813m V	26.436 %	79.109

Tableau (III.29) : Harmoniques de tensions et de courants

❖ **Commentaires et interprétations des résultats**

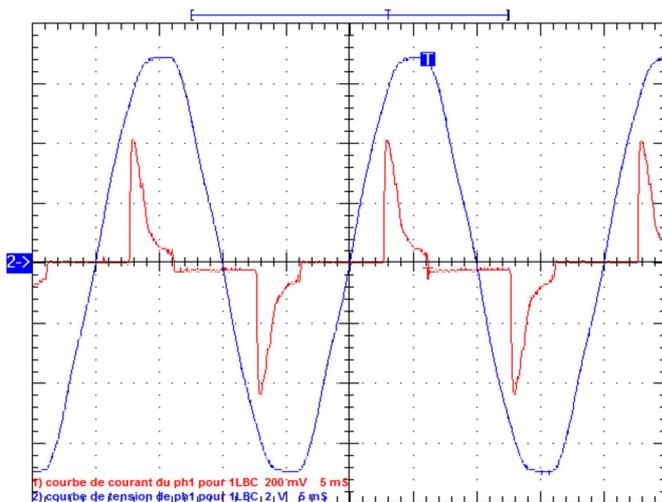
- Les formes d'ondes des courants et de la tension des trois phases sont sinusoïdales.
- les TDH_g (%) des tensions des trois phases sont proches et inférieures à 3%.
- Le spectre de la tension de la phase C et légèrement différent des phases A et B.
- Le courant du neutre (11mA) est dû au léger déséquilibre du réseau et des charges, et sa principale composante est l'harmonique 3.

2.2 Charge non linéaire

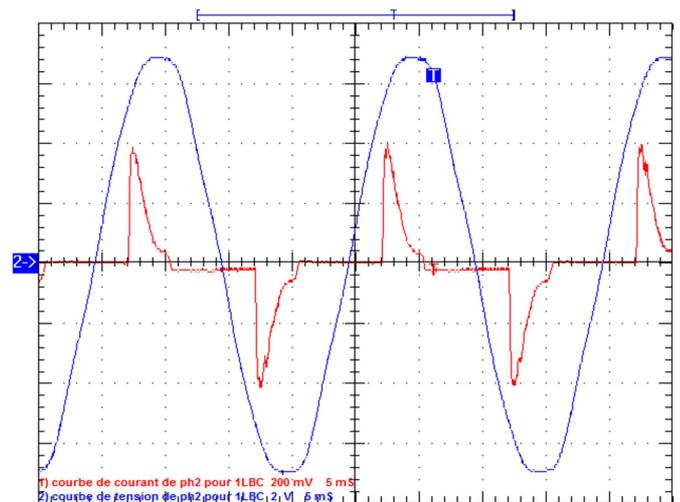
Dans cet essai nous placerons; une lampe puis deux lampes basse consommation de marque Phillips de 20 watts sur chacune des trois phases du réseau et on visualisera à la fin le courant du neutre.

2.2.1 Une lampe fluo-compacte sur chacune des trois phases du réseau.

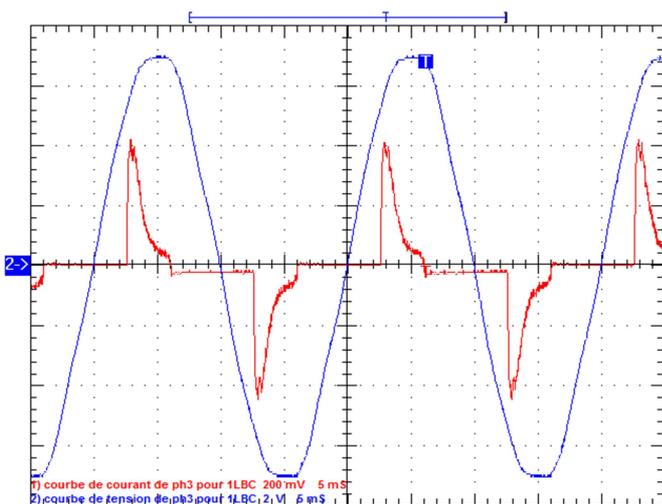
a. Courbes des signaux (courant et tension)



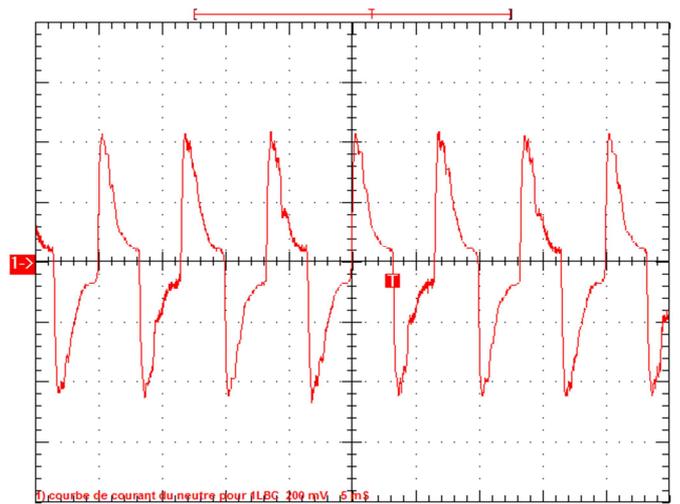
Figure(III.37) : courbes de la phase « A »



Figure(III.38) : courbes de la phase « B »

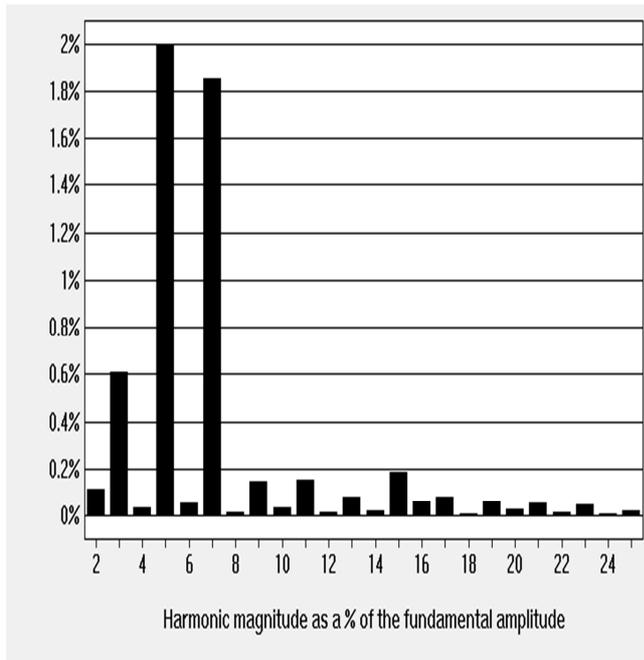


Figure(III.39) : Courbes de la phase « C »

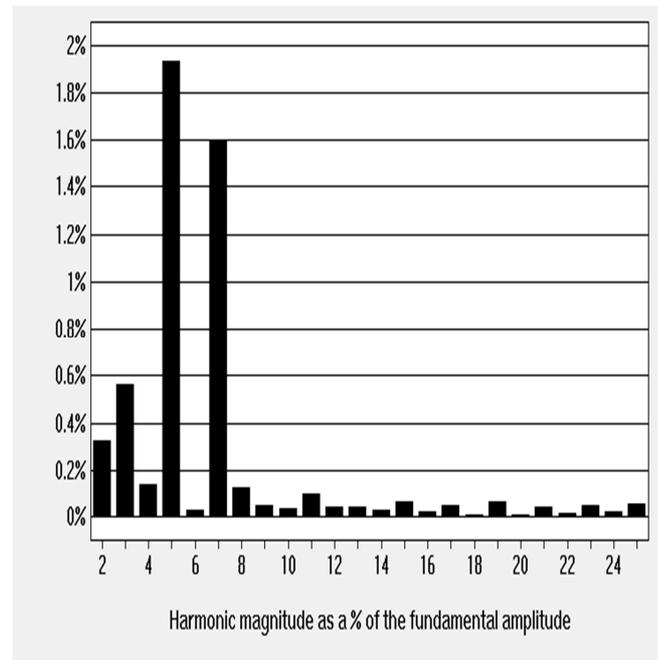


Figure(III.40) : Courbes du neutre

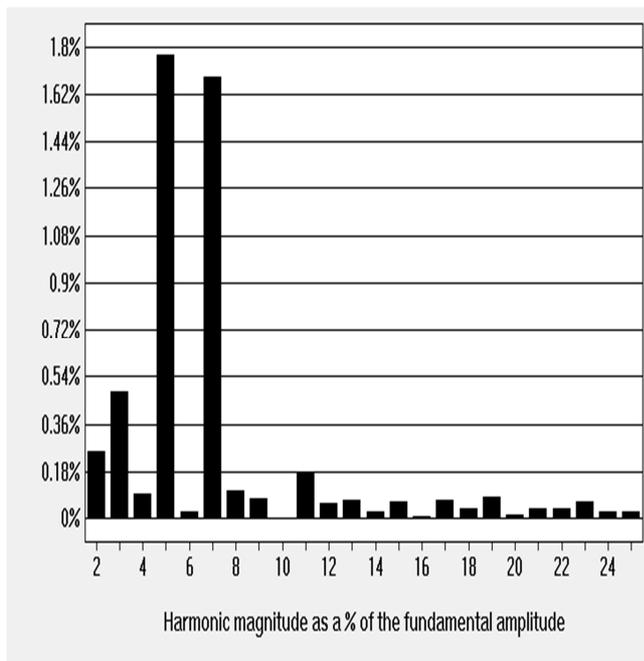
b. Spectres des tensions



Figure(III.41) : Spectres de tension de la phase « A »

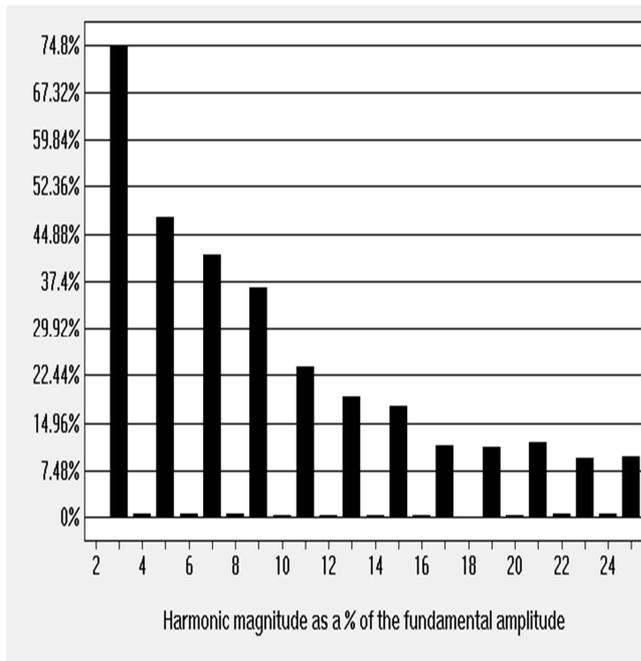


Figure(III.42) : Spectres de tension de la phase « B »

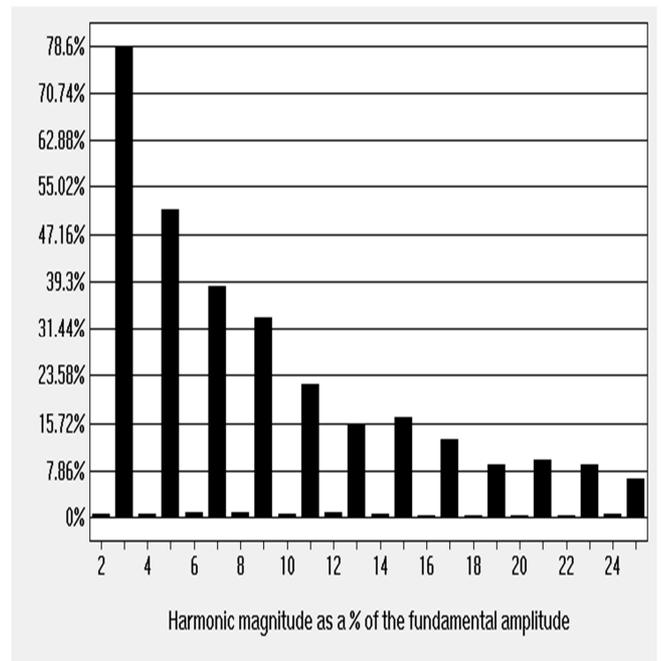


Figure(III.43) : Spectres de tension de la phase « C »

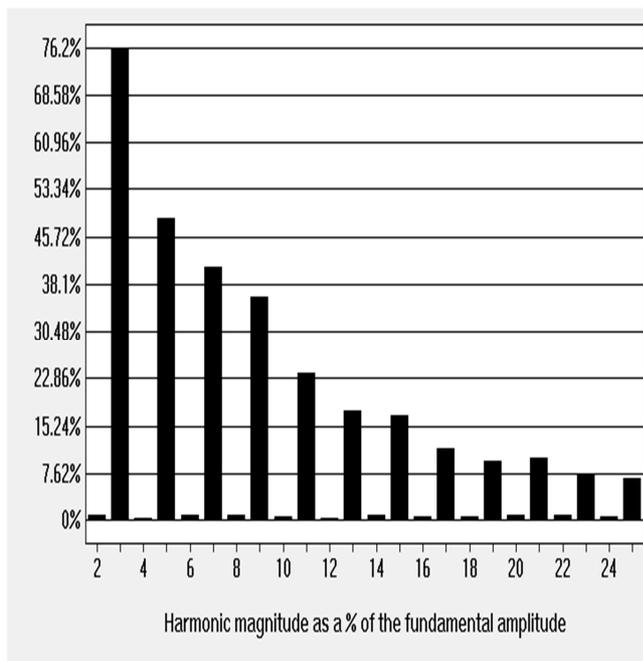
c. Spectres des courants



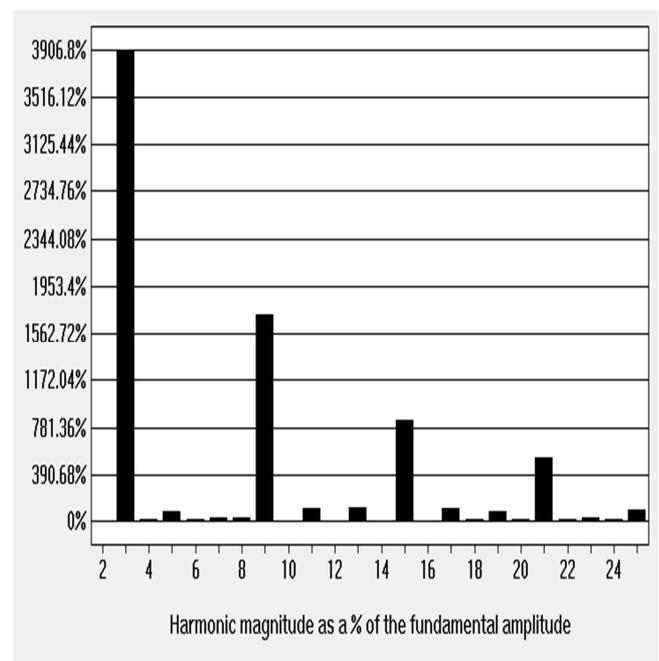
Figure(III.45) : Spectres de courant de la phase « A »



Figure(III.46) : Spectres de courant de la phase « B »



Figure(III.47) : Spectres de courant de la phase « C »



Figure(III.48) : Spectres de courant du neutre

d. Valeurs mesurées**➤ Résultats relevés sur les appareils classiques.**

- En plaçant le voltmètre entre la phase « A » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
220	0.083	0.0825	0.084	0.189

Tableau (III.30) : Résultat relevés sur les appareils classiques

- En plaçant le voltmètre entre la phase « B » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
220	0.083	0.083	0.0845	0.190

Tableau (III.31) : Résultat relevés sur les appareils classiques

- En plaçant le voltmètre entre la phase « C » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
221	0.085	0.0845	0.085	0.192

Tableau (III.32) : Résultat relevés sur les appareils classiques**➤ Résultats relevés avec le logiciel wave star for oscilloscope.**

- Valeurs des tensions et des courants

		Valeurs données par le wave star for oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
Phase « A »	U (V)	221.33	222.03	2.603
	I (A)	0.125	0.08	111.05
Phase « B »	U (V)	221.06	220.81	2.597
	I (A)	0.1226	0.080	110.078
Phase « C »	U (V)	223.32	223.10	2.517
	I (A)	0.127	0.082	109.611
Neutre	I (A)	0.236	0.0053	4271.18

Tableau (III.33) Résultats relevés avec le logiciel wave star for oscilloscope

- **Valeurs des puissances**

	Valeurs données par le wave star for oscilloscope			
	Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
Phase « A »	12.58	24.548	27.582	0.481
phase « B »	11.132	24.684	27.104	0.411
Phase « C »	15.92	23.48	28.39	0.562

Tableau (III.34) Résultats relevés avec le logiciel wave star for oscilloscope

e. Analyse harmonique des signaux

➤ **Phase « A »**

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.996 Hz	5.0335 V	100.000 %	0.0000	82.423m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.992 Hz	5.7058m V	0.113 %	78.624	154.52u V	0.187 %	102.32
Harmonic 3	149.99 Hz	30.652m V	0.609 %	-108.37m	61.579m V	74.712 %	-124.56
Harmonic 4	199.98 Hz	1.7705m V	0.035 %	139.46	450.11u V	0.546 %	77.437
Harmonic 5	249.98 Hz	100.10m V	1.989 %	-155.88	39.089m V	47.425 %	-48.532
Harmonic 6	299.98 Hz	2.8247m V	0.056 %	-111.00	468.17u V	0.568 %	-83.388
Harmonic 7	349.97 Hz	93.259m V	1.853 %	106.14	34.315m V	41.633 %	-149.44
Harmonic 8	399.97 Hz	973.77u V	0.019 %	177.15	437.61u V	0.531 %	64.514
Harmonic 9	449.96 Hz	7.5580m V	0.150 %	136.06	29.986m V	36.381 %	28.231
Harmonic 10	499.96 Hz	1.8621m V	0.037 %	-117.15	391.20u V	0.475 %	-158.12
Harmonic 11	549.95 Hz	7.7022m V	0.153 %	33.949	19.661m V	23.854 %	-162.04
Harmonic 12	599.95 Hz	904.23u V	0.018 %	-19.570	379.35u V	0.460 %	3.0757
Harmonic 13	649.95 Hz	4.2340m V	0.084 %	31.924	15.860m V	19.243 %	-9.5190
Harmonic 14	699.94 Hz	1.1016m V	0.022 %	147.32	290.17u V	0.352 %	166.12
Harmonic 15	749.94 Hz	9.3458m V	0.186 %	-146.97	14.525m V	17.622 %	161.14

Tableau (III.35) : Harmoniques de tensions et de courants

➤ **phase « B »**

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.950 Hz	5.0185 V	100.000 %	0.0000	80.024m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.900 Hz	16.384m V	0.326 %	175.84	515.60u V	0.644 %	-131.17
Harmonic 3	149.85 Hz	28.477m V	0.567 %	97.787	62.833m V	78.517 %	68.513
Harmonic 4	199.80 Hz	7.1017m V	0.142 %	-172.76	590.64u V	0.738 %	42.700
Harmonic 5	249.75 Hz	96.805m V	1.929 %	-45.696	40.967m V	51.193 %	-110.33
Harmonic 6	299.70 Hz	1.3695m V	0.027 %	-139.97	770.97u V	0.963 %	-137.86
Harmonic 7	349.65 Hz	79.970m V	1.594 %	-131.82	30.834m V	38.531 %	54.820
Harmonic 8	399.60 Hz	6.6027m V	0.132 %	-162.46	733.66u V	0.917 %	57.470
Harmonic 9	449.55 Hz	2.3339m V	0.047 %	130.54	26.629m V	33.276 %	-131.34
Harmonic 10	499.50 Hz	1.9414m V	0.039 %	163.84	545.55u V	0.682 %	-134.05
Harmonic 11	549.45 Hz	5.1091m V	0.102 %	93.787	17.774m V	22.211 %	42.964
Harmonic 12	599.40 Hz	2.2023m V	0.044 %	161.89	631.46u V	0.789 %	22.272
Harmonic 13	649.35 Hz	2.1333m V	0.043 %	45.494	12.450m V	15.558 %	-167.72
Harmonic 14	699.30 Hz	1.5551m V	0.031 %	-141.70	551.76u V	0.689 %	-153.44
Harmonic 15	749.25 Hz	3.3218m V	0.066 %	-33.735	13.404m V	16.750 %	-6.2726

Tableau (III.36) : Harmoniques de tensions et de courants

➤ **phase « C »**

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.950 Hz	5.0705 V	100.000 %	0.0000	82.903m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.900 Hz	13.171m V	0.260 %	169.30	642.18u V	0.775 %	172.90
Harmonic 3	149.85 Hz	24.646m V	0.486 %	82.112	63.125m V	76.144 %	-13.124
Harmonic 4	199.80 Hz	5.0535m V	0.100 %	175.60	330.40u V	0.399 %	-28.758
Harmonic 5	249.75 Hz	89.650m V	1.768 %	-44.217	40.382m V	48.711 %	162.96
Harmonic 6	299.70 Hz	1.4414m V	0.028 %	-118.74	692.43u V	0.835 %	134.97
Harmonic 7	349.65 Hz	85.355m V	1.683 %	-144.21	33.797m V	40.768 %	-34.711
Harmonic 8	399.60 Hz	5.4524m V	0.108 %	-176.16	713.50u V	0.861 %	-34.753
Harmonic 9	449.55 Hz	4.0762m V	0.080 %	-74.646	29.892m V	36.056 %	141.77
Harmonic 10	499.50 Hz	224.22u V	0.004 %	-79.546	613.72u V	0.740 %	147.94
Harmonic 11	549.45 Hz	8.8645m V	0.175 %	116.31	19.754m V	23.828 %	-44.525
Harmonic 12	599.40 Hz	3.0382m V	0.060 %	-157.38	342.25u V	0.413 %	-93.373
Harmonic 13	649.35 Hz	3.8769m V	0.076 %	85.953	14.611m V	17.625 %	106.58
Harmonic 14	699.30 Hz	1.3527m V	0.027 %	140.29	660.94u V	0.797 %	67.574
Harmonic 15	749.25 Hz	3.6032m V	0.071 %	-39.079	14.111m V	17.021 %	-87.848

Tableau (III.37) : Harmoniques de tensions et de courants

➤ **neutre**

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.950 Hz	5.0596 V	100.000 %	0.0000	5.3026m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.900 Hz	6.9172m V	0.137 %	-174.57	90.852u V	1.713 %	41.041
Harmonic 3	149.85 Hz	19.447m V	0.384 %	89.243	207.16m V	3906.794 %	-108.39
Harmonic 4	199.80 Hz	3.1558m V	0.062 %	-133.91	1.0740m V	20.254 %	15.715
Harmonic 5	249.75 Hz	84.535m V	1.671 %	-49.079	4.1274m V	77.837 %	52.455
Harmonic 6	299.70 Hz	334.88u V	0.007 %	-142.61	784.55u V	14.796 %	-10.764
Harmonic 7	349.65 Hz	92.554m V	1.829 %	-146.34	1.4758m V	27.831 %	155.30
Harmonic 8	399.60 Hz	2.5613m V	0.051 %	150.17	1.4003m V	26.407 %	-150.51
Harmonic 9	449.55 Hz	5.5483m V	0.110 %	-72.287	90.997m V	1716.096 %	122.40
Harmonic 10	499.50 Hz	2.4913m V	0.049 %	-146.64	373.48u V	7.043 %	-99.372
Harmonic 11	549.45 Hz	5.1171m V	0.101 %	77.431	5.7007m V	107.509 %	-158.32
Harmonic 12	599.40 Hz	761.23u V	0.015 %	-150.76	305.79u V	5.767 %	-38.492
Harmonic 13	649.35 Hz	4.5025m V	0.089 %	77.280	6.5086m V	122.745 %	32.002

Tableau (III.38) : Harmoniques de tensions et de courants

❖ **Commentaires**

- Nous constatons que les spectres des courants des différentes phases sont très proches.
- Le courant du neutre est principalement constitué de l'harmonique 3 et de ses multiples impaires .

2.2.2 Deux lampes fluo-compactes sur chacune des trois phases du réseau

a. Courbes des signaux (courant et tension)

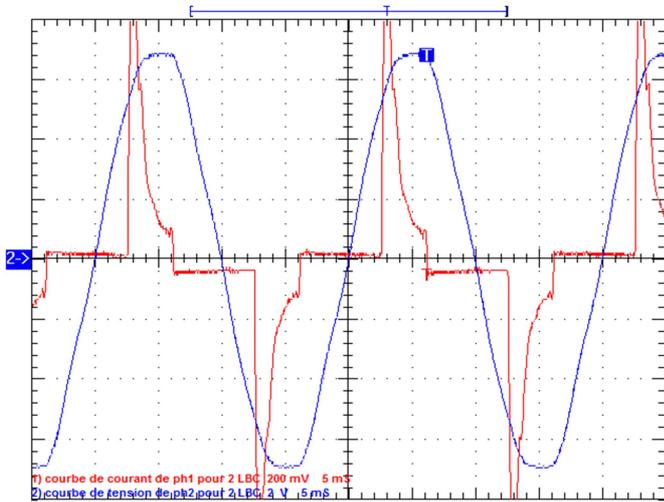
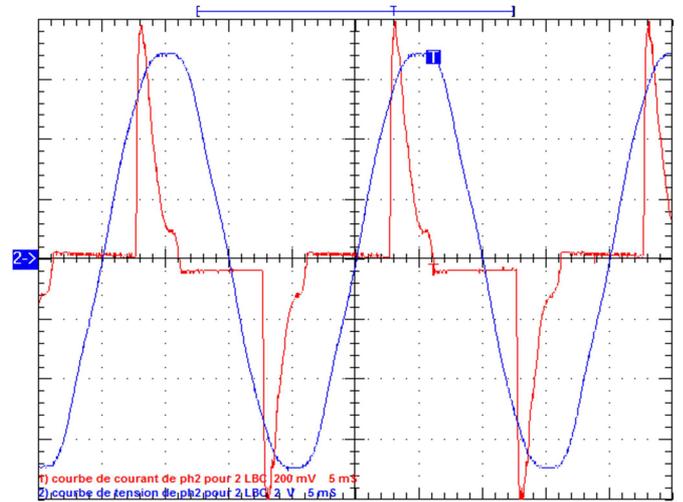


Figure (III.49): Courbes de la phase « A »



Figure(III.50) : Courbes de la phase « B »

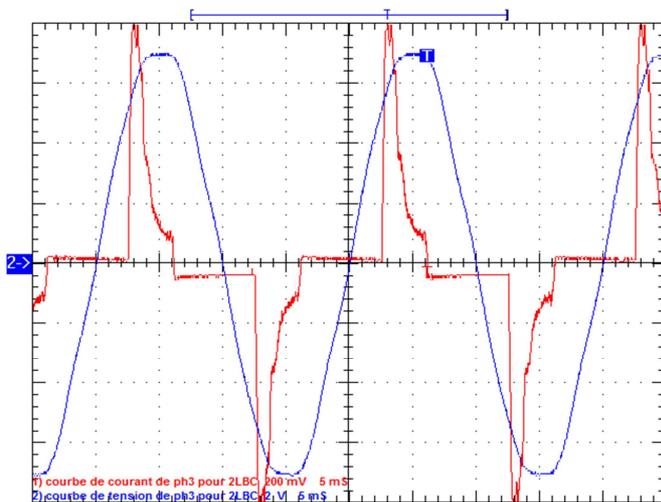


Figure (III.51): Courbes de la phase « C »

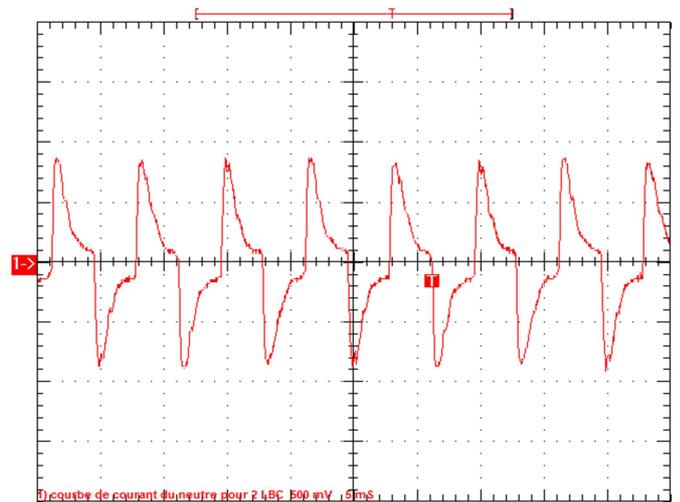
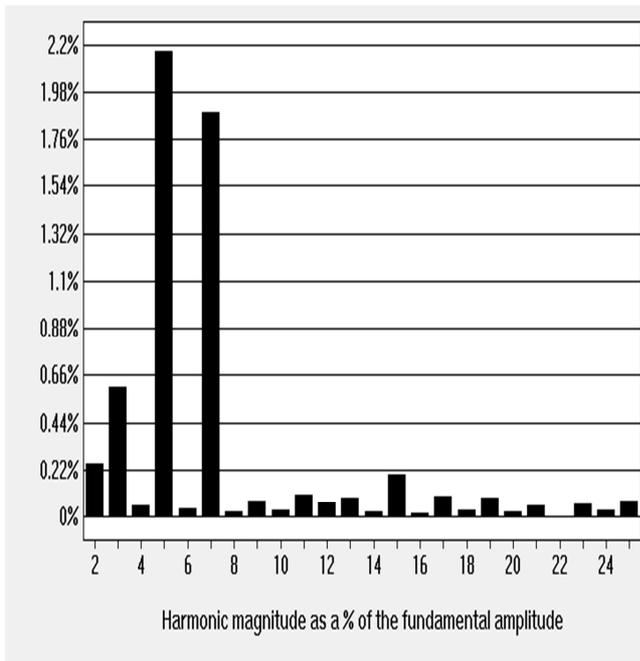
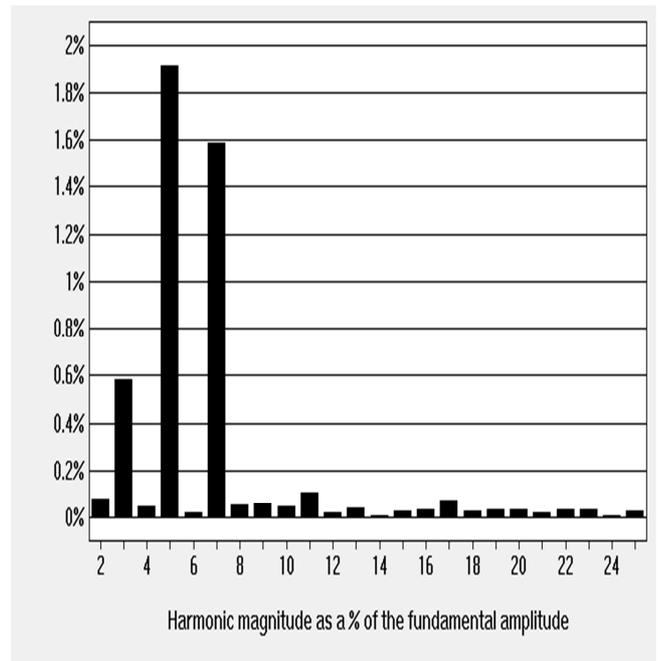


Figure (III.52): Courbe du neutre

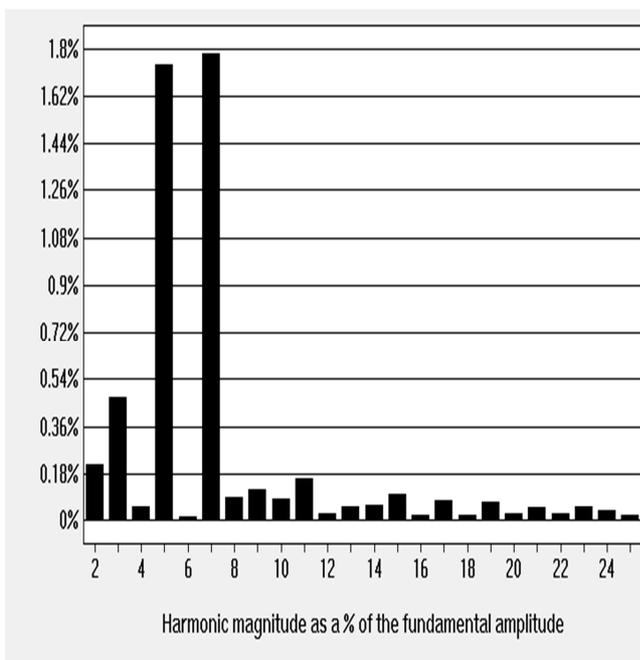
b. Spectres des tensions



Figure(III.53) : Spectres de tension de la phase « A »

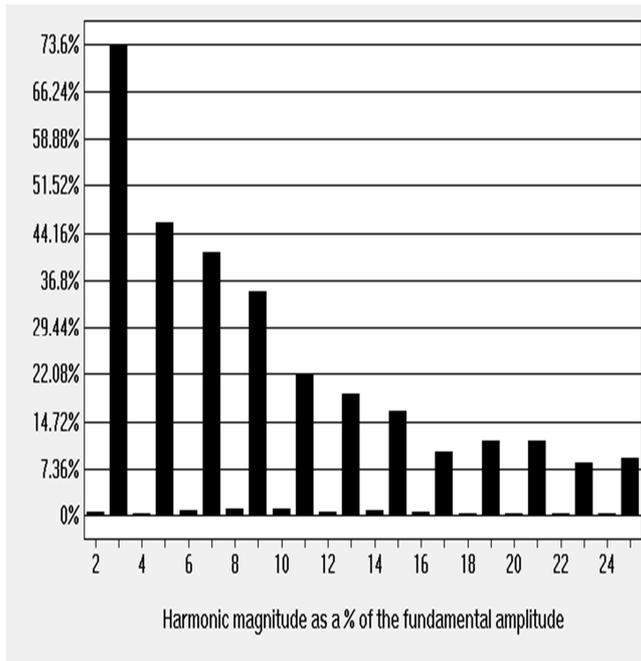


Figure(III.54) : Spectres de tension de la phase « B »



Figure(III.55) : Spectre de tension de la phase « C »

c. Spectres des courants



Figure(III.57) : Spectres de courant de la phase « A »

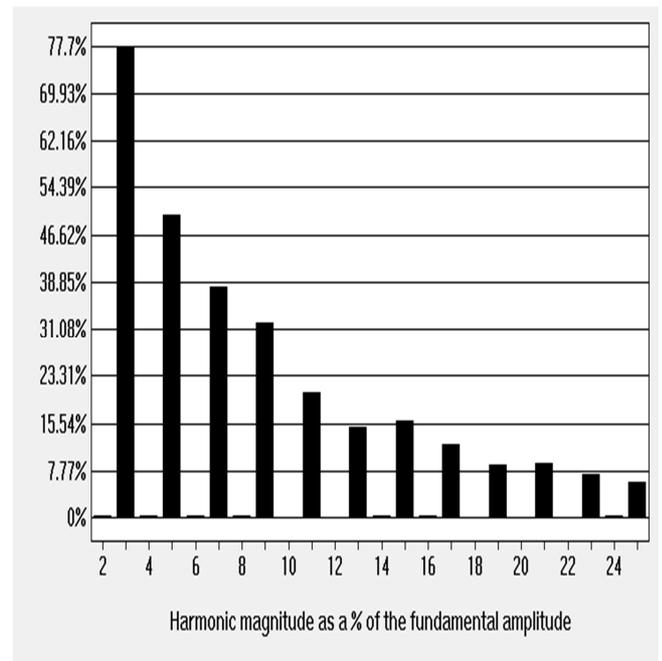
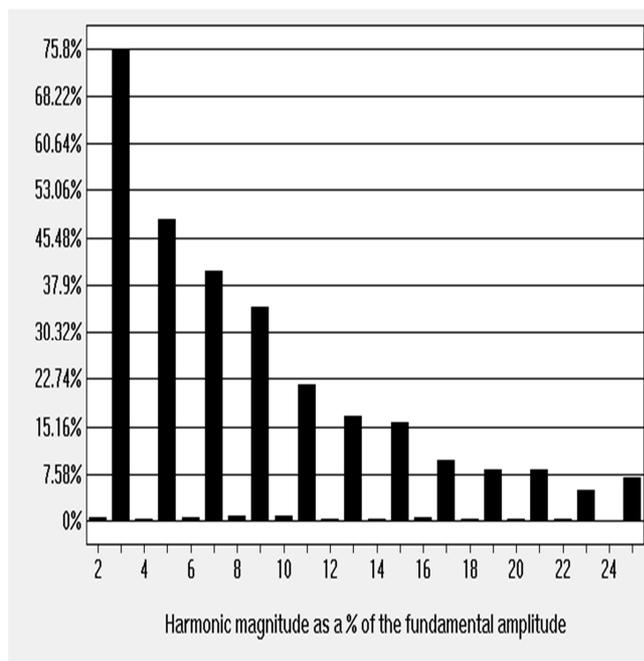
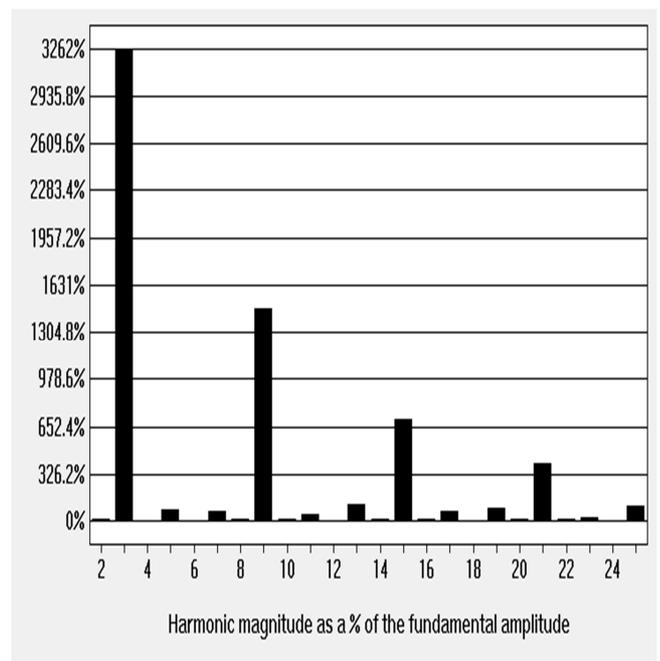


Figure (III.58): Spectres de courant de la phase « B »



Figure(III.59) : Spectres de courant de la phase « C »



Figure(III.60) : Spectres de courant du neutre

d. Valeurs mesurées sur deux lampes fluo compactes sur chacune des trois phases du réseau

➤ **Résultats relevés sur les appareils classiques.**

- En plaçant le voltmètre entre la phase « A » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
220	0.15	0.152	0.149	0.4

Tableau (III.39) : Résultats relevés sur les appareils classiques

- En plaçant le voltmètre entre la phase « B » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
219	0.150	0.152	0.15	0.4

Tableau (III.40) : Résultats relevés sur les appareils classiques

- En plaçant le voltmètre entre la phase « C » et le neutre

U (V)	I _A (A)	I _B (A)	I _C (A)	I _{NEUTRE} (A)
220	0.15	0.155	0.155	0.4125

Tableau (III.41) : Résultats relevés sur les appareils classiques

➤ **Résultats relevés avec le logiciel wave star for oscilloscope**

- **Valeurs des tensions et des courants**

		Valeurs données par l'oscilloscope		
		Valeur efficace globale	Valeur efficace du fondamental	TDH _g %
Phase « A »	U (V)	221.007	220.73	2.954
	I (A)	0.2633	0.175	106.304
Phase « B »	U (V)	220.66	220.27	2.561
	I (A)	0.2521	0.1677	107.93
Phase « C »	U (V)	223.38	223.08	2.55
	I (A)	0.257	0.170	107.89
Neutre	I (A)	0.447	0.01219	3579.13

Tableau (III.42) Résultats relevés avec le logiciel wave star for oscilloscope

- Valeurs des puissances

	Valeurs données par l'oscilloscope			
	Puissance active(W)	Puissance reactive(VAR)	Puissance apparente(VA)	Facteur de puissance reel
Phase « A »	33.792	47.37	58.20	0.5809
phase « B »	31.85	45.58	55.61	0.572
Phase « C »	32.824	47.34	57.464	0.566

Tableau (III.43) Résultats relevés sur le logiciel wave star for oscilloscope

e. Analyse harmonique des signaux

➤ **Phase « A »**

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.0167 V	100.000 %	0.0000	175.95m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.00 Hz	12.571m V	0.251 %	161.75	1.0183m V	0.579 %	178.83
Harmonic 3	150.00 Hz	30.366m V	0.605 %	99.320	129.41m V	73.554 %	-12.644
Harmonic 4	200.00 Hz	2.6902m V	0.054 %	-151.85	844.33u V	0.480 %	-36.796
Harmonic 5	250.00 Hz	108.82m V	2.169 %	-44.988	80.719m V	45.877 %	158.99
Harmonic 6	300.00 Hz	1.8639m V	0.037 %	146.47	1.3862m V	0.788 %	133.02
Harmonic 7	350.00 Hz	94.595m V	1.886 %	-139.76	72.287m V	41.085 %	-39.428
Harmonic 8	400.00 Hz	1.2367m V	0.025 %	111.59	2.0439m V	1.162 %	-43.631
Harmonic 9	450.00 Hz	3.8714m V	0.077 %	-79.336	61.846m V	35.150 %	138.48
Harmonic 10	500.00 Hz	1.6979m V	0.034 %	-138.99	1.7899m V	1.017 %	143.12
Harmonic 11	550.00 Hz	5.3132m V	0.106 %	107.99	39.172m V	22.264 %	-53.606
Harmonic 12	600.00 Hz	3.3101m V	0.066 %	-139.79	1.2786m V	0.727 %	-55.810
Harmonic 13	650.00 Hz	4.6304m V	0.092 %	138.70	33.465m V	19.020 %	98.335
Harmonic 14	700.00 Hz	1.1845m V	0.024 %	71.855	1.3504m V	0.768 %	109.34
Harmonic 15	750.00 Hz	9.9063m V	0.197 %	-51.198	28.828m V	16.385 %	-90.974

Tableau (III.44) : Harmoniques de tensions et de courants

➤ **Phase « B »**

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.100 Hz	5.0063 V	100.000 %	0.0000	167.70m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.20 Hz	4.0222m V	0.080 %	164.69	444.31u V	0.265 %	108.40
Harmonic 3	150.30 Hz	29.225m V	0.584 %	110.10	130.24m V	77.661 %	-11.790
Harmonic 4	200.40 Hz	2.6359m V	0.053 %	174.68	619.89u V	0.370 %	-155.50
Harmonic 5	250.50 Hz	95.704m V	1.912 %	-45.201	83.488m V	49.784 %	168.45
Harmonic 6	300.60 Hz	1.0432m V	0.021 %	1.3439	701.84u V	0.419 %	49.034
Harmonic 7	350.70 Hz	79.631m V	1.591 %	-132.92	63.689m V	37.978 %	-26.884
Harmonic 8	400.80 Hz	2.8979m V	0.058 %	-77.978	670.92u V	0.400 %	-119.47
Harmonic 9	450.90 Hz	3.0475m V	0.061 %	158.62	54.095m V	32.257 %	147.58
Harmonic 10	501.00 Hz	2.6326m V	0.053 %	147.43	303.58u V	0.181 %	64.908
Harmonic 11	551.10 Hz	5.3985m V	0.108 %	94.903	34.787m V	20.744 %	-39.804
Harmonic 12	601.20 Hz	991.65u V	0.020 %	-99.420	315.98u V	0.188 %	160.25
Harmonic 13	651.30 Hz	2.2569m V	0.045 %	34.204	25.201m V	15.027 %	106.80
Harmonic 14	701.40 Hz	354.55u V	0.007 %	-73.044	442.71u V	0.264 %	6.1409
Harmonic 15	751.50 Hz	1.5873m V	0.032 %	-55.437	26.902m V	16.042 %	-89.773

Tableau (III.45) : Harmoniques de tensions et de courants

➤ Phase « C »

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.000 Hz	5.0702 V	100.000 %	0.0000	170.98m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	100.000 Hz	10.923m V	0.215 %	-165.81	993.59u V	0.581 %	156.26
Harmonic 3	150.00 Hz	23.984m V	0.473 %	90.786	129.54m V	75.764 %	-13.518
Harmonic 4	200.00 Hz	2.9459m V	0.058 %	179.22	763.25u V	0.446 %	-41.943
Harmonic 5	250.00 Hz	88.128m V	1.738 %	-47.864	82.592m V	48.306 %	162.91
Harmonic 6	300.00 Hz	881.25u V	0.017 %	136.61	1.1545m V	0.675 %	135.67
Harmonic 7	350.00 Hz	90.217m V	1.779 %	-141.75	68.680m V	40.169 %	-33.543
Harmonic 8	400.00 Hz	4.6742m V	0.092 %	-167.41	1.5616m V	0.913 %	-45.531
Harmonic 9	450.00 Hz	6.2795m V	0.124 %	-103.20	58.991m V	34.502 %	143.75
Harmonic 10	500.00 Hz	4.2365m V	0.084 %	-131.58	1.4941m V	0.874 %	146.94
Harmonic 11	550.00 Hz	8.3418m V	0.165 %	113.56	37.460m V	21.910 %	-43.881
Harmonic 12	600.00 Hz	1.3246m V	0.026 %	145.58	607.36u V	0.355 %	-42.389
Harmonic 13	650.00 Hz	2.7444m V	0.054 %	117.78	28.695m V	16.783 %	106.25
Harmonic 14	700.00 Hz	3.1670m V	0.062 %	-78.901	775.33u V	0.453 %	77.969
Harmonic 15	750.00 Hz	5.2911m V	0.104 %	-31.422	27.201m V	15.909 %	-84.650

Tableau (III.46) : Harmoniques de tensions et de courants

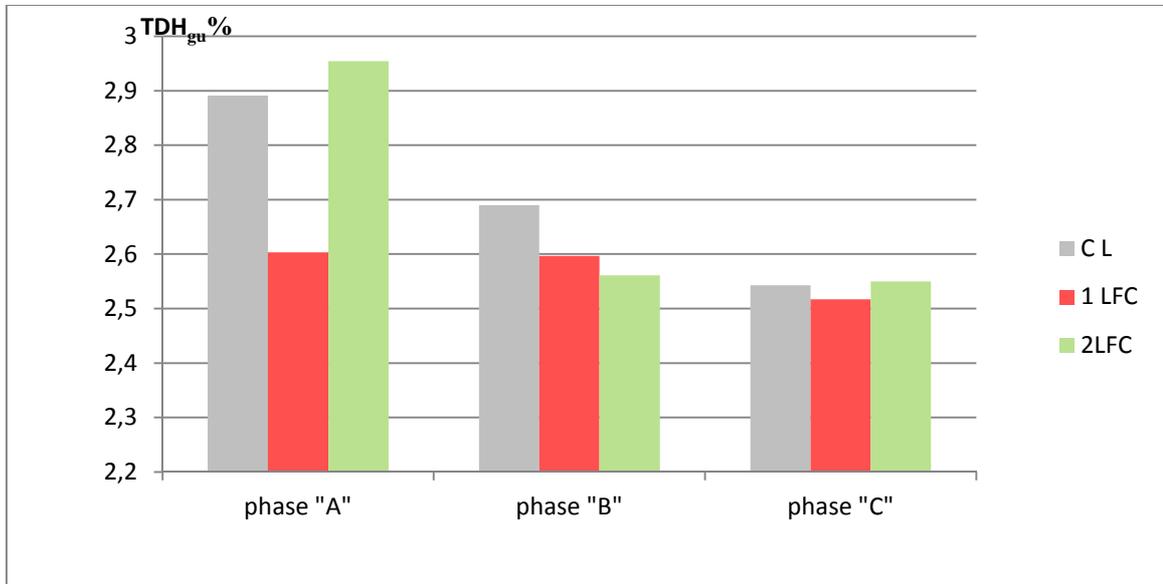
➤ Neutre

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.950 Hz	5.0120 V	100.000 %	0.0000	12.192m V	100.000 %	0.0000
Harmonic 2	99.900 Hz	9.6183m V	0.192 %	-165.20	2.5330m V	20.776 %	81.255
Harmonic 3	149.85 Hz	31.700m V	0.632 %	-80.394	397.70m V	3261.998 %	36.811
Harmonic 4	199.80 Hz	3.9658m V	0.079 %	128.62	1.1228m V	9.210 %	-154.21
Harmonic 5	249.75 Hz	111.19m V	2.218 %	135.88	9.8220m V	80.561 %	-53.826
Harmonic 6	299.70 Hz	3.2977m V	0.066 %	-47.370	906.44u V	7.435 %	-19.848
Harmonic 7	349.65 Hz	92.709m V	1.850 %	40.989	8.6691m V	71.104 %	81.124
Harmonic 8	399.60 Hz	3.4920m V	0.070 %	-132.39	2.3750m V	19.480 %	-154.42
Harmonic 9	449.55 Hz	2.5187m V	0.050 %	124.59	178.54m V	1464.368 %	160.71
Harmonic 10	499.50 Hz	3.7129m V	0.074 %	-167.29	1.8644m V	15.292 %	-58.231
Harmonic 11	549.45 Hz	5.7295m V	0.114 %	-88.397	5.6453m V	46.304 %	-11.558
Harmonic 12	599.40 Hz	1.1836m V	0.024 %	123.07	718.17u V	5.890 %	-15.996
Harmonic 13	649.35 Hz	3.1363m V	0.063 %	-80.862	15.288m V	125.393 %	-129.76
Harmonic 14	699.30 Hz	961.43u V	0.019 %	141.78	1.4533m V	11.920 %	-52.989
Harmonic 15	749.25 Hz	10.303m V	0.206 %	137.01	85.661m V	702.602 %	-103.48

Tableau (III.47) : Harmoniques de tensions et de courants

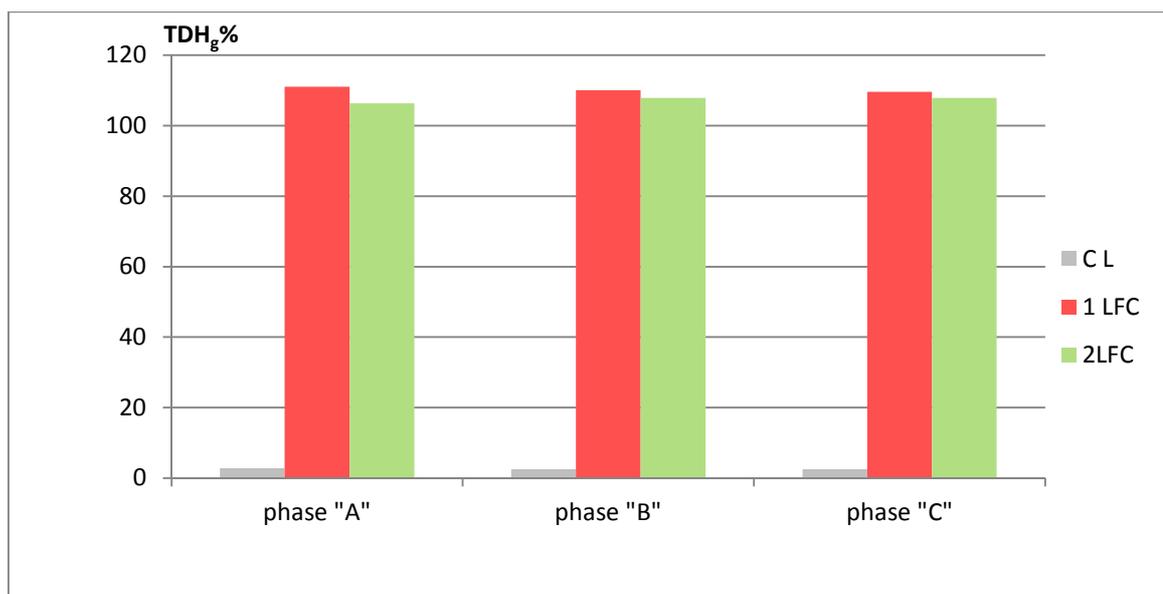
2.3 Récapitulation des résultats

a. TDH globaux en tensions en fonction du nombre de charges sur chaque phase



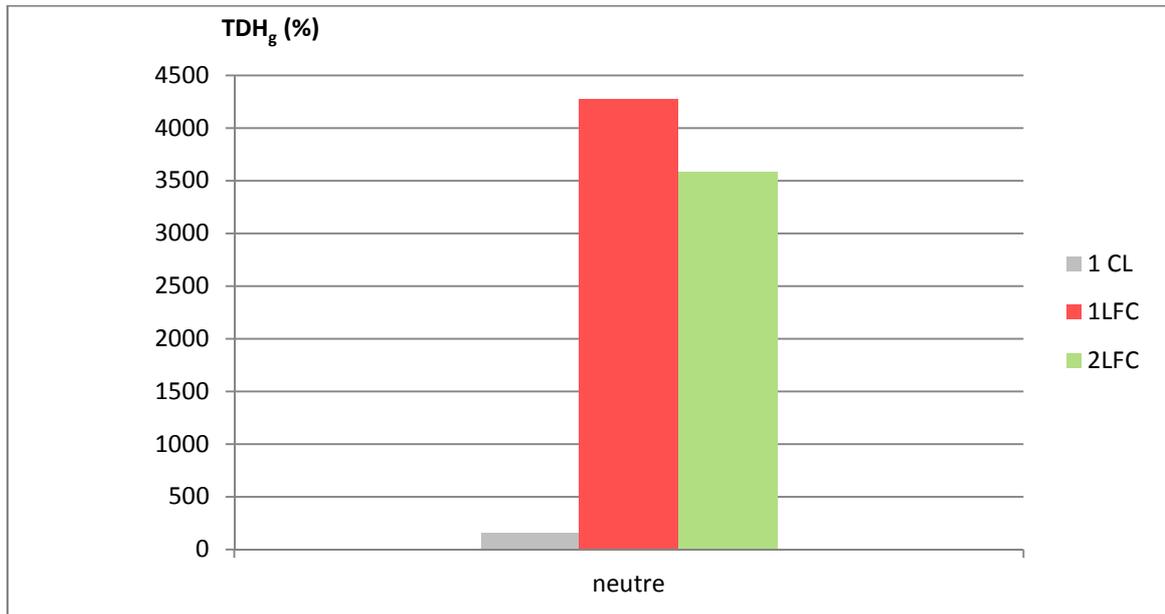
Histogramme (III.7) : TDH_g en tension en fonction du nombre de charges sur chaque phase

b. TDH globaux en courants en fonction du nombre de charges sur chaque phase



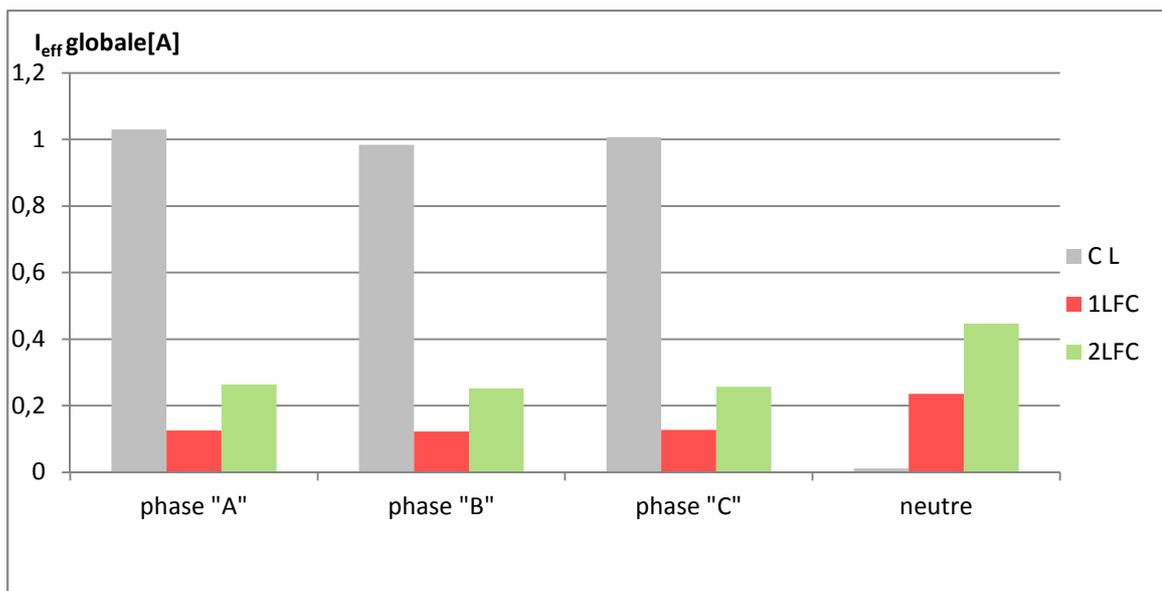
Histogramme (III.8) : TDH_g en courant en fonction du nombre de charges sur chaque phase.

c. TDH globaux des courants du neutre



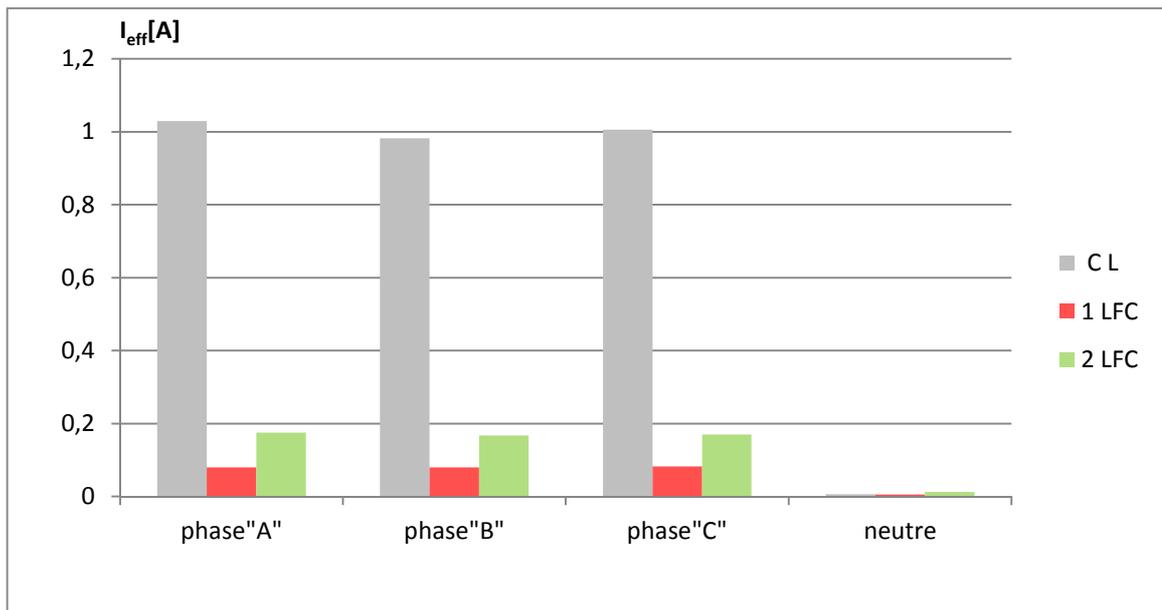
Histogramme (III.9) : TDH_g en courant du neutre.

d. Valeurs efficaces globales des courants en fonction du nombre de charge sur chaque phase



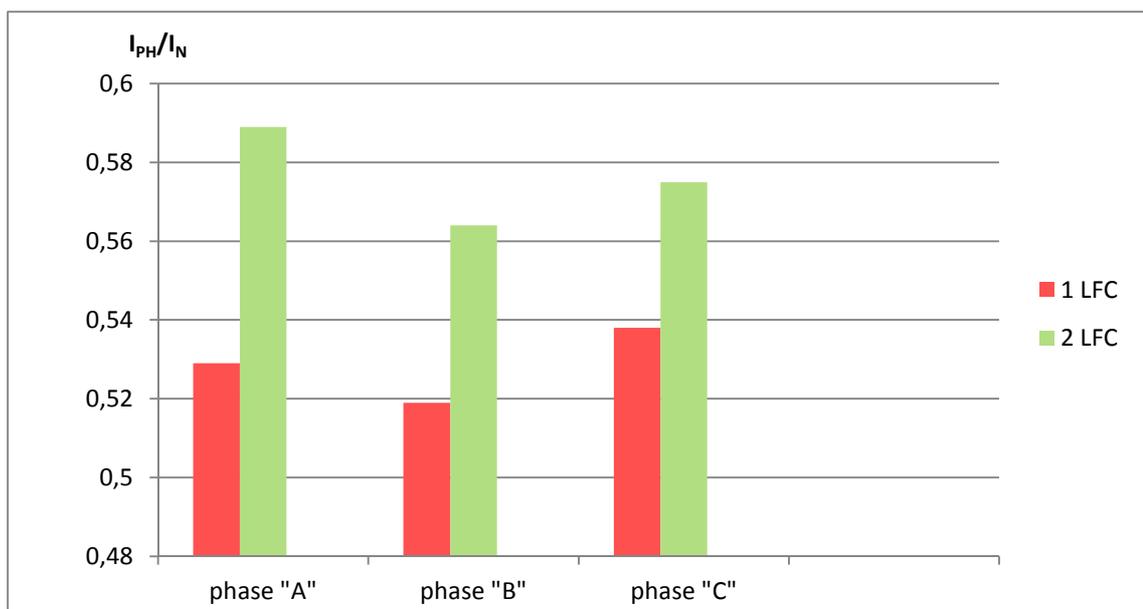
Histogramme (III.10) : Valeurs efficaces globales des courants en fonction du nombre de charges sur chaque phase

e. Valeurs efficaces des courants fondamentaux en fonction du nombre de charge sur chaque phase



Histogramme(III.11) : Valeurs efficaces des courants fondamentaux en fonction du nombre de charge sur chaque phase

f. Rapports des valeurs efficaces globales des courants des phases sur les courants du neutre.



Histogramme(III.12) : Rapports des valeurs efficaces globales des courants des phases sur les courants du neutre.

❖ **Commentaires et interprétations des résultats**

- Vu le nombre réduit des lampes fluo-compactes utilisées dans nos essais la forme d'onde de la tension reste sinusoïdale contrairement à celle du courant.
- L'onde du courant est déformée et presque identique sur les trois phases par ce qu'on a un système triphasé équilibré.
- Le courant du neutre prend une valeur importante par rapport aux courants des phases, ces derniers contiennent des harmoniques en particulier du rang 3 et ont les mêmes amplitudes ($I_{3A} = I_{3B} = I_{3C}$), ils sont en phase et s'additionnent arithmétiquement dans le conducteur neutre, tandis que les composantes fondamentales et les harmoniques non multiple de 3 s'annulent.

($I_N = 3I_{3A}$). Donc la fréquence du courant du neutre est **$f_N = 150Hz$** .

- Le TDH varie de peu avec la variation de la puissance de la charge non linéaire (en ajoutant des lampes) par contre la valeur efficace du courant du neutre augmente avec l'augmentation de la charge.
- Les courants des 3 phases sont riches en harmoniques impaires, les prépondérants sont ceux des rangs 3, 5, 7,9 et 11. Alors qu'au neutre on trouve seulement les harmoniques impaires multiples de 3.
- La valeur efficace globale du courant dans le neutre est supérieure à $\sqrt{3}$ fois celle du courant dans une phase.

3. Conclusion

Tout au long de ce chapitre nous avons présenté les résultats de l'analyse expérimentale de la perturbation harmonique produite par les lampes fluo-compactes.

Les courants absorbés par ce type de charge sont distordus (TDH>100%), de ce fait leur contribution à la pollution harmonique des réseaux de distribution basse tension pourrait atteindre des valeurs relativement importantes, risquant de dépasser le seuil actuellement en vigueur imposé par les distributeurs d'énergie. Donc il est indispensable de réduire de façon significative les courants harmoniques injectés par ce type de matériel d'éclairage, si l'on ne veut pas risquer de voir augmenter sensiblement les niveaux de perturbation des réseaux, d'où la nécessité de concevoir une solution pour éliminer leur effets.

Conclusion

CONCLUSION GENERALE

Dans notre travail nous avons présenté les résultats de l'analyse expérimentale de la perturbation harmonique produite par les lampes fluo-compactes, ce qui nous a permis de voir l'impact d'une implantation de ces dernières sur les réseaux électriques.

Les essais effectués en monophasé montrent que les lampes fluo-compactes sont très économiques, mais elles sont polluantes vu les TDH enregistrés par l'oscilloscope qui sont compris entre (100.76 % et 104.66%) en courant et entre (4.62% et 4.80%) en tension.

Les amplitudes des courants les plus élevées sont celles des rangs 3, 5,7 et 11 et celles des tensions sont des rangs 5 et 7.

La variation aléatoire des TDH en courant en fonction du nombre de lampes s'explique par le phénomène de foisonnement.

La présence d'harmoniques conduit à la dégradation du facteur de puissance variant entre 0.62 et 0.64.

Les résultats des premiers essais sont confirmés par les différentes allures et spectres de courant et tension.

Concernant les résultats obtenus dans les essais en triphasé, les courants des trois phases sont riches en harmoniques impaires ; les prépondérants sont ceux des rangs 3, 5,7 et 11, contrairement au conducteur neutre ou circule uniquement les harmoniques des rangs impairs multiple de trois.

L'amplitude du courant du neutre peut dépasser $\sqrt{3}$ fois la valeur de courant d'une phase pour les charges non linéaires contrairement au cas des charges linéaires où le courant du neutre est nul.

En tenant compte des valeurs des courants traversant le conducteur neutre, une attention particulière doit être portée à la détermination de sa section.

La diffusion à grande échelle d'un nouveau système d'éclairage (fluo-compacte) risque de contribuer fortement à la pollution harmonique du réseau, il est donc important de faire une étude pour évaluer l'incidence d'une implantation massive de ces lampes sur la pollution harmoniques des réseaux électriques.

BIBLIOGRAPHIE

[1] THIERRY DEFLANDRE, PHILIPPE MAURAS « LES HARMONIQUES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES » DIRECTION DES ETUDES ET RECHERCHES D'ELECTRICITE DE FRANCE 5^{ème} EDITION EYROLLES 1998.

[2] THIERRY DEFLANDRE, PHILIPPE MAURAS, M.LE BITOUX « QUALITE DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE (2^{ème} partie) »

Les cahiers de l'ingénieur, N 58, note d' EDF, décembre 1995

[3] H.BESSAI « ETUDE DETERMINISTE DE LA PROPAGATION DES HARMONIQUES DANS LES RESEAUX D'ENERGIE ELECTRIQUES » MEMOIRE DE MAGISTER U.M.M.T.O 2000

[4] DOCUMENT INTERNET

[WWW.AMPOULE.FLUOCOMPACTE -EKOPEDIA](http://WWW.AMPOULE.FLUOCOMPACTE-EKOPEDIA) [PORTAIL ENERGIE]

WWW.TEKTRON.LX.COM

[5] D OLLIVIER « LES SIMULATIONS DES PERTURBATIONS HARMONIQUES » DIRECTION DES ETUDES ET RECHERCHES DE L'EDF.SERIE B N°1 1991

[6] CHRISTOPHE PREVE « LES RESEAUX ELECTRIQUES INDISTRUELS » EDITION LAVOISIER 2005

[7] SCHNEIDER ELECTRIC : CAHIER TECHNIQUES

N°152 : PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES RESEAUX POLLUES ET LEURS TRAITEMENT

N°159 : ONDULEURS ET HARMONIQUES (CAS DES CHARGES NON LINEAIRE)

N°183 : HARMONIQUES CONVERTISSEURS PROPRES ET COMPENSATEURS ACTIFS

N°199 : LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

N°202 : LES SINGULARITES DE L'HARMONIQUE 3

[8] KARLE JOHNSON ET ROBERT ZAVALDIL « ASSESSING THE IMPACTS OF NON LINEAIRE LOADS ON POWER QUALITY IN COMMERCIAL BUILDING AN OVER VIEW » 0-7803-0453-5/91 1991 IEEE

[9] STEPHANE SVENSSON « POWER MEASUREMENT TECHNIQUE FOR NON-SINUSOIDAL CONDITIONS: THE SIGNIFICANCE OF HARMONICS FOR THE MEASUREMENT OF POWER AND OTHER AC QUANTITIES » PHD Thesis

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY GOTEBORG SWEDEN 1999.

[10] ANDRE LE CONTE « APPAREILS DE MESURE DE CONTROLE EN ELECTROTECHNIQUE » R : 950

[11] ERIC FILICE « PERTURBATIONS HARMONIQUES, EFFETS, ORIGINES, MESURES, DIAGNOSTIC, REMEDES » DUNOD, PARIS, 2000

RESUME ET MOTS CLES

RESUME

La théorie classique de l'énergie électrique ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux et équilibrés. Cependant les signaux électriques présents sur les réseaux (surtout les courants) sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux ni équilibrés.

L'analyse des signaux non sinusoïdaux et déséquilibrés est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les harmoniques et les composantes symétriques.

Le concept d'harmoniques a été introduit au début du XIX^{ème} siècle par JOSEF FOURIER, en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquences discrètes.

Dans notre travail nous avons présenté les résultats de l'analyse expérimentale de la perturbation harmonique produite par les lampes fluo-compactes, ce qui nous a permis de voir l'impact d'une implantation de ces dernières sur les réseaux électriques.

La diffusion à grande échelle d'un nouveau système d'éclairage (fluo-compacte) risque de contribuer fortement à la pollution harmonique du réseau, il est donc important de faire une étude pour évaluer l'incidence d'une implantation massive de ces lampes sur la pollution harmoniques des réseaux électriques.

MOTS CLES

TDH_g : Taux de distorsion harmonique global

TDH_i : Taux de distorsion individuel

CL : charge linéaire

LC : lampe classique

LFC : lampe fluo-compacte