

PA013/11B

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Electrotechnique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme

D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème

Qualité de l'Energie Electrique Etude de Cas

Proposé par :
Dr. R. TAHMI

Etudié par :
Mr. GHENNA Sofiane
Mr. HADBI Djamel

Soutenu le 27 Juin 2011 devant le jury composé de :

Président **Pr. R. IBTIOUEN**

Examineur **Pr. O. TOUHAMI**

ENP - 2011

ملخص

نتناول في هذا العمل مفهوم جودة الطاقة الكهربائية، مبينين أهم العوامل الرئيسية المساهمة في تدهورها، أصولها، آثارها، ونتائجها على المستهلك الكهربائي.

ونقدم من خلاله تقنية حديثة وفعالة لتحليل هذه الظاهرة ألا وهي تقنية الشعاع الفضائي بأمتثلة عن ذلك بتطبيقها على الواقع الاستهلاكي.

كما نقترح حلولاً لمعالجة وتحسين جودة الطاقة الكهربائية، وفي الأخير نعرض أعمالاً تطبيقية بيداغوجية بغرض دراسة وفهم الظاهرة.

الكلمات المفتاحية: جودة الطاقة الكهربائية، تقنية الشعاع الفضائي

Résumé

Nous allons présenter dans ce travail la problématique de la Qualité de l'Energie Electrique, les phénomènes principaux qui la dégradent, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements et appareillages électriques.

Pour les besoins de notre étude nous aurons recourt à un ensemble d'outils et de méthodes dont la Méthode du Vecteur d'Espace qui est une nouvelle méthode pour l'analyse des perturbations électriques. Nous procéderons à des études de cas réels de dégradation de la qualité de l'énergie à travers des essais de laboratoire ou l'efficacité de notre démarche sera prouvée.

Pour finir, nous proposerons un ensemble de mesures pour préserver la qualité de l'énergie électrique et l'améliorer si possible.

En conclusion, des travaux pratiques pédagogiques seront proposés pour les futurs élèves ingénieurs dans le cadre des nouveaux programmes.

Mots Clés : Qualité de l'Energie Electrique, Méthode du Vecteur d'Espace

Abstract

In this work, we are going to present the problem of Power Quality, the main phenomena that degrade the Power Quality, their origins and their effects on electrical equipments.

For our study we need some tools and methods to analyze these problems. A new inserting technique called Vector Space Method is presented. There will be practical cases of degradation in power quality through laboratory tests too.

At the end, we propose measures to preserve the Power Quality and improve it if possible.

In conclusion, we propose practical works which be included in new programs to understand this topic.

Key Words : Power Quality, Vector Space Method

Remerciements



Nous voudrions remercier notre Promoteur **Mr. Redouane TAHMI**, pour son soutien et ses recommandations judicieuses. Aussi, remercions nous tout le personnel de l'ENP ayant contribué de près ou de loin au bon déroulement du projet.

Non loin de tout projet ambitieux, il existe des gens qui partagent sans jamais se lasser leurs meilleurs et leurs pires moments. Ces personnes nous ont soutenus dans chacun de nos instants de faiblesse, et qui, sans leur extrême attention et gentillesse, nous ne serions pas ce que nous sommes devenus aujourd'hui. En tête de liste de ces gens nous placerons nos familles bien aimées qui n'ont jamais hésité à nous offrir le meilleur qu'elles pouvaient. Viennent alors tous nos camarades de promotion ainsi que tous nos amis qui nous ont aidés de façon directe ou tout simplement par leur présence et leur soutien moral.

On voudrait aussi exprimer notre vive reconnaissance envers tous les enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique et ses travailleurs ainsi que tous ceux qui ont participé à notre formation. Pour le savoir qu'ils nous ont transmis, mais aussi pour la fierté et l'ambition que leurs personnes nous aspirent.

Table des matières



Introduction

Chapitre 1 : Perturbations de la tension

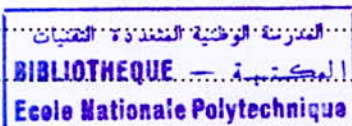
1.1	Qualité de l'énergie électrique	07
1.2	Creux de tension et coupures brèves	08
1.2.1	Définition, origines.....	08
1.2.2	Effets et perturbations sur les charges et procédés	09
1.2.3	Analyse des chutes de tension	08
1.2.3.1	Signature d'un creux de tension	09
1.2.3.2	Propagation en amont et en aval du réseau.....	10
1.2.3.3	Propagation via les transformateurs	10
1.2.3.4	Paramètres déterminant le type du creux de tension	10
1.2.3.5	Classification	11
1.3	Surtensions	12
1.3.1	Définition, origines	12
1.3.2	Effets et perturbations sur les charges et procédés	13
1.4	Variations et fluctuations de la tension	13
1.4.1	Définition, origines	13
1.4.2	Effets et perturbations sur les charges et procédés	14
1.5	Déséquilibre	13
1.5.1	Définition, origines	14
1.5.2	Effets et perturbations sur les charges et procédés	15
1.6	Harmoniques et interharmonique	15
1.6.1	Définition, origines	15
1.6.2	Effets et perturbations sur les charges et procédés	17

Chapitre 2 : Méthode d'analyse des perturbations électriques

2.1	Creux de tension, coupure brèves et surtensions.....	19
2.1.1	Estimation de l'amplitude	19
2.1.1.1	Valeur efficace.....	19
2.1.1.2	Signal analytique	19
2.1.1.3	Composante fondamentale	20
2.1.1	Segmentation.....	20
2.1.2	Classification	20
2.1.3	Signal analytique	20
2.1.4	Caractérisation.....	21

Table des matières

2.2 Harmoniques	22
2.2.1 Outils d'analyse.....	22
2.2.1.1 Série de Fourier	22
2.2.1.2 Transformation de Fourier.....	23
2.2.2 Caractérisation.....	23
2.3 Variation de tension et de fréquence	24
2.3.1 Outils d'analyse.....	24
2.3.2 Représentation statistique.....	24
2.3.2.1 Fonction de répartition, densité de probabilité.....	24
2.3.2.2 Moment statistiques : espérance, variance et écart type.....	24
2.4 Déséquilibre.....	24



Chapitre 3 : Méthode du vecteur d'espace

3.1 Transformation du vecteur d'espace	27
3.2 Représentation et caractéristiques du vecteur d'espace dans le plan complexe....	28
3.2.1 Perturbations au niveau du fondamental	28
3.2.2 Perturbations harmoniques	29
3.3 La transformation du vecteur d'espace pour l'analyse des perturbations électriques	30
3.3.1 Vecteur d'espace et composante homopolaire en cas de creux de tension	30
3.3.1.1 Creux de tension monophasés	31
3.3.1.2 Creux de tension biphasés	35
3.3.1.3 Creux de tension triphasés.....	39
3.3.1.4 Creux de tension avec surtensions.....	41
3.3.2 Analyse des creux de tension par la transformation du vecteur d'espace..	41
3.3.2.1 Extraction des traits caractéristiques des tensions mesurées...	42
3.3.2.2 Segmentation	43
3.3.2.3 Classification	44
3.3.2.4 Caractérisation.....	47

Chapitre 4 : Etude de cas de perturbation de la qualité de l'énergie électrique

4.1 Cas de perturbations sur l'amplitude.....	49
4.1.1 Déséquilibre en courant de charges linéaires	49
4.1.2 Déséquilibre en tension de charges linéaires.....	50
4.2 Etude du facteur de puissance et l'influence de son amélioration sur les harmoniques....	51
4.2.1 Etude de facteur de puissance de plusieurs types de charges.....	51
4.2.2 Influence du type de montage sur les harmoniques.....	58

Table des matières

4.2.2.1 Montage triangle.....	58
4.2.2.2 Montage étoile.....	62
4.2.3 Etude de l'amélioration du facteur de puissance.....	65
4.2.3.1 Amélioration du facteur de puissance d'un redresseur commandé ..	65
4.2.3.2 Elévation du facteur de puissance de l'éclairage fluorescent.....	71

Chapitre 5 : Amélioration de la Qualité de l'Energie Electrique

5.1 Creux de tension et coupures	76
5.1.1 Réduction du nombre de creux de tension et de coupures	76
5.1.2 Réduction de la profondeur des creux de tension.....	76
5.2 Harmoniques et inter harmoniques	77
5.2.1 Réduction des courants harmoniques générés.....	77
5.2.2 Modification de l'installation	77
5.2.3 Filtrage	78
5.2.3.1 Filtres passifs	78
5.2.3.2 Filtres actifs	79
5.2.3.3 Transformateur d'isolement.....	79
5.3 Surtension.....	80
5.4 Variations et fluctuations de la tension	81
5.5 Déséquilibre	81

Chapitre 6 : Travaux Pratiques sur la Qualité de l'Energie Electrique

TP n°1 : Facteur de Puissance et Harmoniques.....	84
TP n°2 : Influence du type de montage sur les harmoniques	88
TP n°3 : Compensation du facteur de puissance d'une charge non linéaire.....	90
TP n°4 : Application de la Méthode du Vecteur d'Espace sur un Déséquilibre ...	91

Conclusion Générale

Annexes

Bibliographie

Introduction Générale

Depuis quelques années la qualité de l'énergie électrique est devenue un sujet prépondérant de grand intérêt, les règles du jeu dans le secteur électrique ont évolué, avec l'ouverture du marché de l'énergie électrique et la rivalité entre producteurs d'électricité, et donc la possibilité pour les consommateurs d'électricité de choisir leurs fournisseurs. Les distributeurs d'énergie électrique s'efforcent donc d'assurer une qualité maximale de la fourniture en énergie électrique. Les premiers travaux se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur mais rapidement les enjeux liés à la qualité ont changé la façon d'aborder ce sujet.

Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements, l'électronique prend sa place dans les systèmes de commande et de contrôle mais d'un autre côté ces dispositifs sensibles dégradent également la qualité de la tension. Pour les industriels, une mauvaise qualité de l'énergie électrique peut entraîner un dysfonctionnement ou même l'arrêt des outils de production, des pertes de matières premières, une vieillissement prématurée des équipements ; le coût des perturbations peut donc être très élevé, car il doit tenir compte du manque à produire et de la remise en marche de l'outil de production.

Les principales perturbations pouvant altérer le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont : les creux de tension et les coupures brèves, les surtensions et les variations de la tension et de la fréquence, le déséquilibre et les harmoniques et inter harmonique. Afin de caractériser et de quantifier ces perturbations, on procède par deux grands axes de recherche : les solutions prophylactiques et thérapeutiques d'une part, et le monitoring d'autre part c'est à dire décrire les facteurs primordiaux qui dégradent la Qualité de l'Energie Electrique (QEE), leurs provenances, évaluer leurs impacts et les conséquences sur les équipements mais aussi les solutions les plus appropriées économiquement et techniquement ce qui a pour but une meilleure qualité d'alimentation particularisée et adaptée aux besoins de l'utilisateur.

Ce mémoire a pour but de sensibiliser les intervenants du domaine de l'électricité à l'importance de la notion de Qualité de l'Energie Electrique en mettant l'accent sur les différents phénomènes perturbateurs, analyser les performances d'un réseau et présenter des solutions qui permettent de résoudre les différents anomalies et ceci en appliquant une nouvelle technique qui se base sur la Méthode du Vecteur d'Espace.

Cette méthode consiste à analyser automatiquement les différentes perturbations, d'ailleurs c'est l'outil le plus performant en ce qui concerne la dégradation de la tension en amplitudes tant par sa simplicité que son efficacité, ce moyen permet de détecter les différents types de perturbations, de les classer précisément d'évaluer leur poids avec un minimum de variables. Nous l'appliquerons sur des cas pratiques de laboratoire afin de valider la méthode puis nous utiliserons les résultats obtenus pour trouver des solutions aux perturbations. Nous présenterons à la fin une petite synthèse sous forme de travaux pratiques qui résumant les différentes étapes qui doivent être suivies pour améliorer la Qualité de l'Energie Electrique.

Chapitre 1

Perturbations de la tension

La Qualité de l'Energie Electrique (QEE) est une dualité entre la qualité de la tension et la qualité du courant. Ce premier chapitre sert à présenter le thème de la Qualité de l'Energie Electrique à travers la qualité de la tension, les phénomènes principaux qui la dégradent, leurs origines, et leurs conséquences sur les équipements et appareillages électriques.

1.1 Qualité de l'Energie Electrique

Dans la distribution de l'énergie électrique, la tension constitue le support de la puissance et le courant représente l'énergie réelle qui transite d'un point à un autre. Un système de tension triphasé est caractérisé par quatre grandeurs différentes, toute variation de ces grandeurs constitue une perturbation électrique :

- amplitude : c'est généralement la première exigence imposée au distributeur d'énergie. On impose des variations limites de la tension nominale, généralement $\pm 10\%$ de la valeur nominale. Ces variations sont aussi associées à la notion de temps, de 10 ms à quelques minutes.
- Fréquence : la norme EN 50160 fixe à 1% la variation de la fréquence pendant 95% d'une semaine et à $[-6\%, +4\%]$ en cas de perturbations importantes. A noter que les marges de variations sont plus importantes pour les réseaux autonomes.
- forme de l'onde : dans le cas idéal, la forme des trois tensions formant le système triphasé doit être le plus proche possible d'une sinusoïde de fréquence 50Hz mais on considère en général que le signal est composé d'un fondamental de fréquence 50Hz auquel se superpose des signaux de fréquences différentes appelées harmoniques.
- Symétrie : la symétrie impose aux trois tensions d'avoir la même amplitude et le même déphasage qui est de $\frac{2\pi}{3}$ pour le système triphasé.

On peut classifier ces perturbations selon deux critères :

- classification selon le caractère de la tension modifié : en effet comme mentionné précédemment, les différentes perturbations sont identifiées selon le paramètre perturbé ; il peut se présenter des cas où plusieurs perturbations se superposent causant ainsi des anomalies dans différents paramètres.
- classification selon la durée de la perturbation : c'est un facteur déterminant dans l'identification de la perturbation, on distingue entre :
 - les perturbations transitoires : moins d'une demi-période.
 - les perturbations de courte durée : plus d'une demi-période.
 - les perturbations permanentes : ce type de perturbations existent à cause de la présence de charges non linéaire et se traduit par de faibles variations de l'amplitude.

Durée	Type de perturbation	Amplitude	Origine	Conséquences
<10ms	Transitoires (impulsion et oscillations)	-	Déclenchement des appareils, enclenchement des condensateurs, commutations	Dysfonctionnements gênants
10ms-1min	Creux de tension	0.1-0.9 pu	Courts-circuits, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Coupures brèves	<0.1 pu	Courts-Circuits	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Surtension	1.1-1.8 pu	Courts-circuits, débranchement des charges importantes	Déclenchement, dangers pour les personnes et pour les matériels

Régime établi	Déséquilibre	-	Charges asymétriques ou monophasées	Echauffement des machines tournantes, vibrations
	Variation rapide de tension (Flicker)	0.1-7%	Charges fluctuantes (fours à arc, moteurs à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0-20%	Charges non linéaires (structure d'électronique de puissance, arcs électriques)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels
	Interharmoniques	0-2%	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Bruit	0-1%	Fours à arc, charges non linéaires	Echauffements, pertes, vieillissements
	Variations de la fréquence	-	Déséquilibre entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

Tableau 1.1 Vue d'ensemble des principales perturbations électriques [1]

1.2 Creux de tension et coupures brèves

1.2.1 Définition, origines

Un creux de tension (figure 1.1) est une chute brutale de l'amplitude de la tension d'alimentation suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Il est caractérisé par :

- sa profondeur (ΔU)
- sa durée (Δt).

D'après la norme EN50160, la diminution de la tension a une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de $\frac{1}{2}$ période, à 50 Hz elle peut durer de 10 ms jusqu'à une minute. La mesure de la tension efficace est effectuée indépendamment sur chacune des trois tensions composées, la mesure de ces creux se fait par des prélèvements à chaque demi-période.

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension de profondeur supérieure à 90 % (IEEE) caractérisée uniquement par un seul paramètre : la durée, qui est inférieure à 3 minutes (CENELEC), ailleurs sont dites coupures longues.

Les creux de tension sont notamment occasionnés par les courts-circuits affectant les réseaux électriques (ils peuvent affecter une à trois phases et peuvent même provoquer un déphasage supplémentaire entre elles), le démarrage des moteurs à forte puissance dont le courant de démarrage atteint 5 à 7 fois le courant nominal (une variation de 10 % de l'amplitude de la tension se traduira par une perte de couple de 19 % pour une machine asynchrone), l'apparition de défauts sur le réseau de distribution ou sur l'installation elle-même.

Les coupures brèves sont principalement dues au fonctionnement des automatismes de réseau tels que les réenclencheurs rapides et/ou lents, isolations de défaut, les permutateurs de transformateurs ou de lignes. [2]

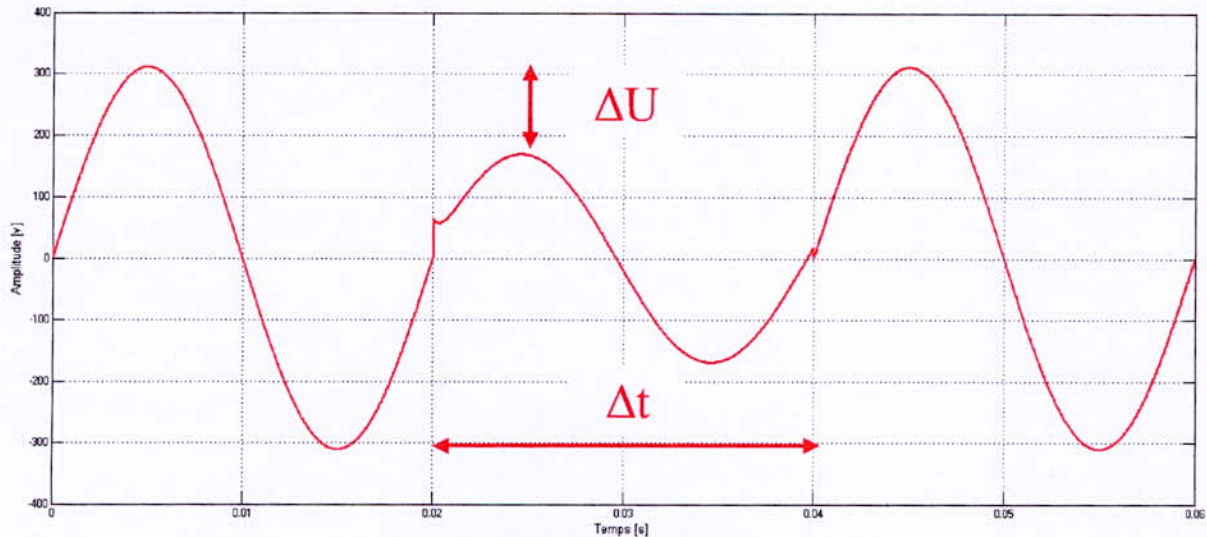


Figure 1.1: Creux de tension

1.2.2 Effets et perturbations sur les charges et procédés

Les creux de tension sont les perturbations les plus pénalisantes du fait de leurs fréquences et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels, ils provoquent des arrêts et/ou perte de données des automates et ordinateurs, retombée de relais et contacteurs, verrouillage des variateurs électroniques de vitesse, diminution de l'éclairage, et vieillissement prématuré des lampes à incandescence et des tubes fluorescents, baisse de couple des moteurs, et même à une certaine limite il peut y avoir décrochage, et à signaler que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves, après une coupure le retour de la tension engendre un courant très proche de celui de démarrage. [3]

1.2.3 Analyse des chutes de tension

1.2.3.1 Signature d'un creux de tension

Un creux de tension se caractérise par :

- son amplitude qui dépend de la proximité du défaut, sa nature et la puissance de court-circuit du réseau.
- sa phase
- sa durée qui est liée au temps que mettent les dispositifs de protection du réseau à réagir.

L'analyse des creux de tension dans le plan complexe se fait à travers les phaseurs (amplitudes et phase). La relation entre ces phaseurs est appelée signature (figure 1.2), elle caractérise le type du creux de tension. [1]

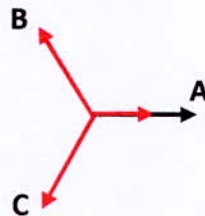


Figure 1.2 Exemple de signature d'un creux de tension monophasé

1.2.3.2 Propagation en amont et en aval du réseau

En amont, la propagation dépend de la distance entre l'endroit du défaut et le point de mesure ($Z_d = CL$) et la puissance de court-circuit ($Z_s = \frac{c'}{P_{cc}}$). Si un court-circuit se produit au point D, on relèvera une tension au point A (en amont) :

$$V_A = \frac{Z_d}{Z_d + Z_s} E$$

On voit bien que plus la distance est grande, et que plus la puissance de court-circuit est importante moins le creux de tension est importante.

En aval le creux de tension n'est pas atténué. En effet si le court-circuit se produit avant le point A, on aura $V_A = V_D = 0$

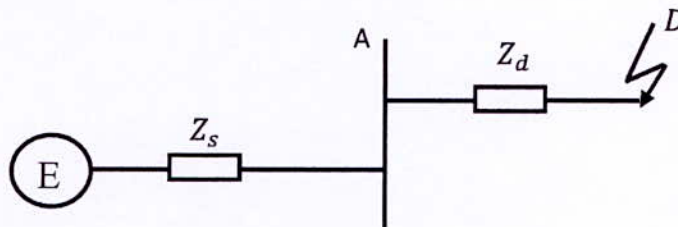
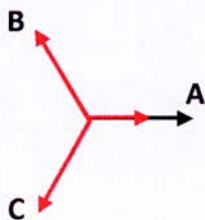


Figure 1.3 Diviseur de tension pour l'étude de la propagation des creux de tension [1]

1.2.3.3 Propagation via les transformateurs :

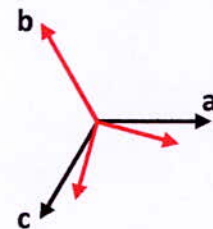
Le passage par un transformateur peut ou non modifier la signature d'un creux de tension, par exemple si on a un creux de tension monophasé sur la phase A, le passage par un transformateur Dy11 donne :



$$V_a = k(V_A - V_B)$$

$$V_b = k(V_B - V_C)$$

$$V_c = k(V_C - V_A)$$



On se retrouve avec deux phases (a et c) affectées par le creux de tension modulant un facteur k.[1]

1.2.3.4 Paramètres déterminant le type du creux de tension

1-Type du court-circuit

- court-circuit monophasé : 70% des cas, il peut engendrer des surtensions sur les autres phases selon le régime du neutre.
- court-circuit biphasé isolé : 15% des cas, il n'affecte que les deux phases touchées par le CC.
- court-circuit biphasé terre : 10% des cas.
- court-circuit triphasé : 5% des cas, c'est le cas le plus sévère.

2-Le régime du neutre

Un creux de tension peut engendrer des surtensions dans d'autres phases selon le régime du neutre, deux cas à prévoir :

- Régime du neutre direct :

$$i_a + i_b + i_c = i_n$$

Si i_a venait à augmenter suite à un court-circuit, la surintensité n'affectera pas les deux autres phases elle se dirigera vers la terre (impédance faible).

- Régime du neutre isolé :

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

Tout changement dans l'intensité d'une phase influera certainement sur les deux autres phases.

3-Endroit du défaut

Il influe sur la propagation du creux de tension.

4-Type de mesure

Deux types de mesures sont utilisés :

- mesures entre phase et neutre (ou terre) : elles donnent généralement plus d'informations (nombre de défauts, leur localisation ...)
- mesure entre phases : elles permettent de mesurer les perturbations telles qu'elles sont subies par les charges. [1]

1.2.3.5 Classification

La classification universelle reconnue [4] distingue entre 7 principaux types de creux de tension dénotés de A à G.

On distingue

Les creux monophasés : B, D et F

Les creux biphasés : C, E et G

Les creux Triphasés : A

Les creux de tension de type H présentent une chute de tension sur une phase et des surtensions sur les deux autres phases.

Le type I est caractérisé par une chute de tension sur deux phases et une surtension sur la troisième. La figure 1.4 résume les neuf classes (les sept classes de la classification universelle et les deux creux de tension avec surtension).

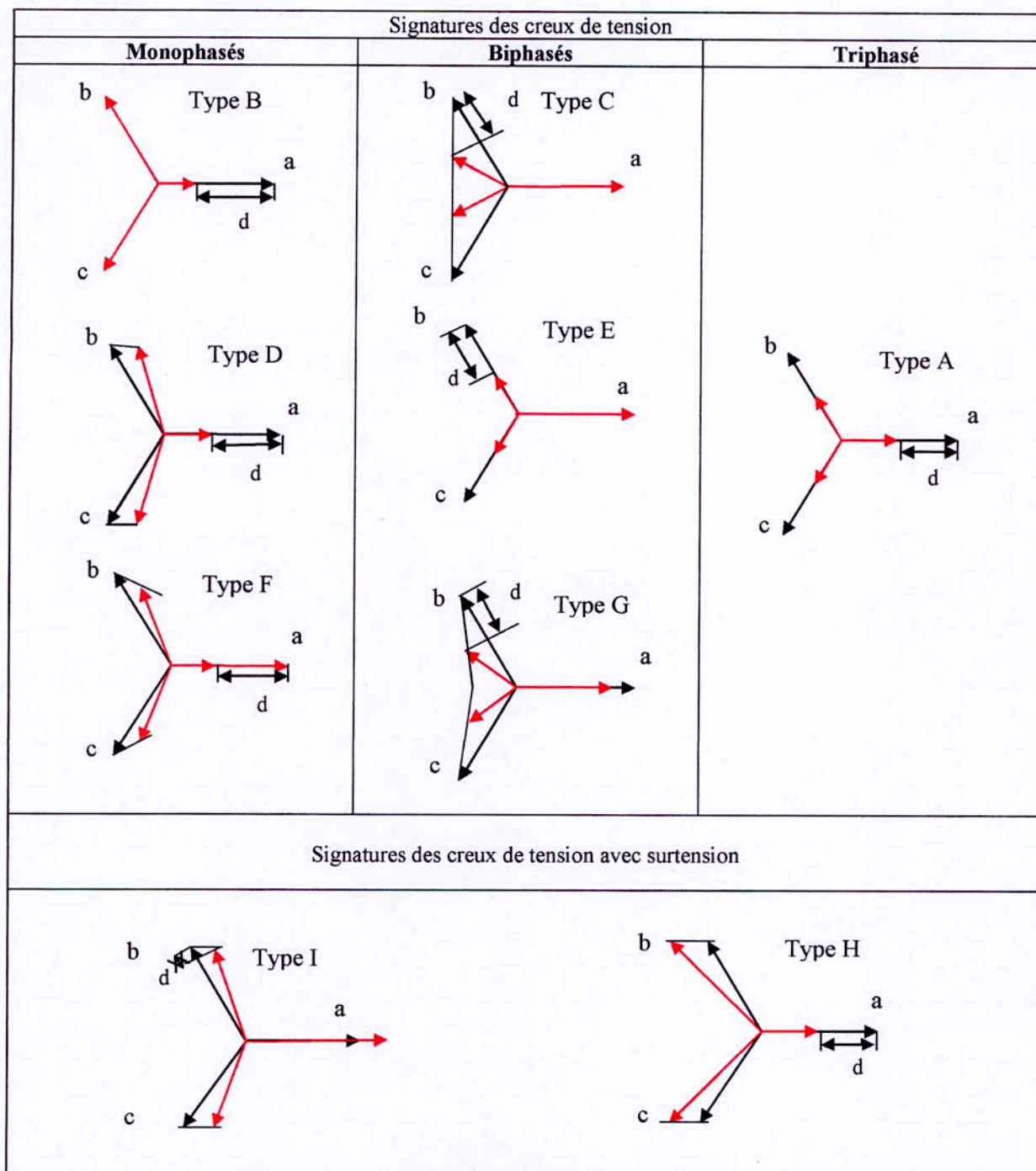


Figure 1.4 : Les différents types de creux de tension [4]

1.3 Surtensions

1.3.1 Définition et origines

On appelle surtension toute tension appliquée à un équipement dont la valeur dépasse la tension crête du régime de travail, provoquant la détérioration des installations des utilisateurs. Les niveaux de surtensions selon la norme EN50160 sont donnés par les schémas de liaison à la terre de l'installation :

- pour les réseaux à neutre à la terre, raccordés directement ou avec une impédance la surtension ne devra pas dépasser 1,7 Un.
- pour les réseaux à neutre isolé ou résonant, la surtension ne devra pas dépasser 2Un.

Les surtensions sont de trois natures :

- surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz) : sont à la même fréquence que celle du réseau, elles peuvent apparaître lors d'un défaut sur le réseau public ou dans l'installation de l'utilisateur, défaut d'isolement entre phase et terre lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une ferrorésonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur. Il est à noter que la norme NF EN 50-160 ne fixe pas de valeurs maximales pour ces surtensions. A titre indicatif, les surtensions en BT ne dépassent pas généralement la valeur efficace de 1500 V.
- surtensions de manoeuvre : résultent d'une modification de la structure du réseau liée à la manoeuvre d'un disjoncteur ou d'un sectionneur, d'une durée de quelques dizaines microsecondes à quelques millisecondes.
- surtensions atmosphériques : due au foudroiement d'une ligne à haute tension. [3]

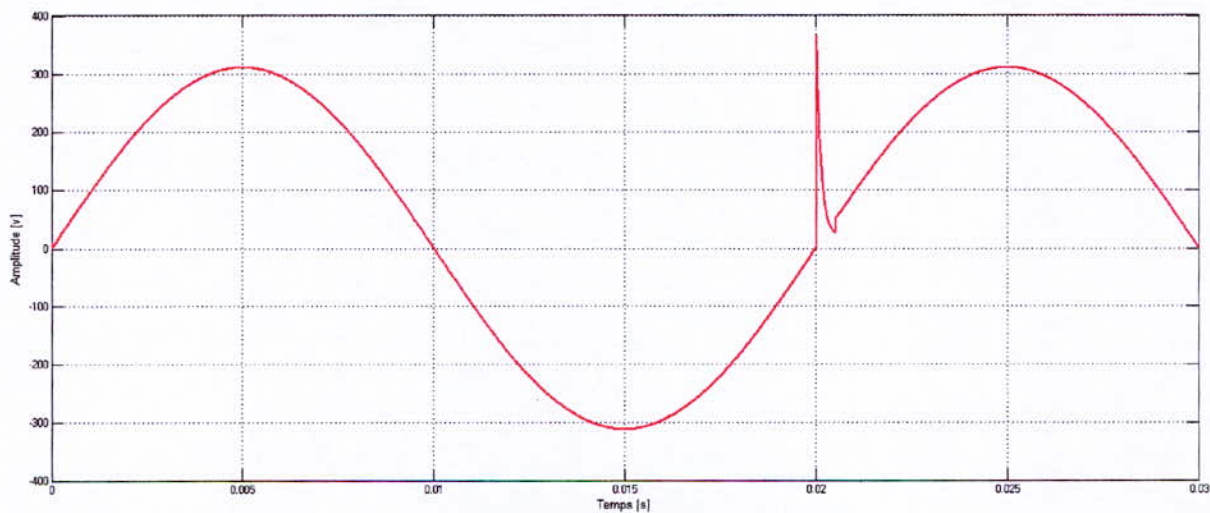


Figure 1.5 : Surtension

1.3.2 Effets et perturbations sur les charges et procédés

Les surtensions provoquent vieillissement et destruction des équipements, principalement des composants électroniques principalement par claquage diélectrique. Plusieurs facteurs influent sur les conséquences éventuelles de ces perturbations : le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, la raideur du front de montée, la fréquence. Tous ces effets entraînent des pertes économiques par le remplacement des éléments endommagés, ainsi que le coût indirect de l'interruption des processus de production. De plus, ces effets peuvent entraîner un risque pour les personnes, ce qu'il faudra éviter selon les lois de prévention des risques du travail applicables selon le pays et d'autres normes plus spécifiques. [3]

1.4 Variations et fluctuations de la tension

1.4.1 Définition et origines

En général, le distributeur d'énergie fixe la plage de variation nominale de la tension réseau à $\pm 10\%$ de la tension composée, on distingue plusieurs phénomènes à l'origine des variations de la tension. Quand ils surviennent chez les producteurs ce sont des phénomènes aléatoires comme la foudre ou les courts-circuits accidentels qui sont responsables, coté consommateur les causes

proviennent essentiellement de l'installation elle-même ainsi le bronchement de fortes charges peut provoquer les variations de tension, tous les procédés industriels sont susceptibles d'en produire si la puissance de court-circuit au point de raccordement est faible. On peut cependant classer ces perturbations en deux grandes catégories : les fluctuations lentes et les fluctuations rapides.

- Les fluctuations lentes de la tension : ce sont des variations de la valeur efficace dans laquelle elles subissent une diminution de 10 % de la tension nominale et ont pour origine les charges réactives lentement variables connectées au réseau.
- Les fluctuations rapides de la tension, engendrent le flicker, ont principalement pour origine les charges industrielles rapidement variables comme les activités métallurgiques, fours à arc, laminoirs, machines à souder [5]

Remarque : La fluctuation de tension est une suite de variations de tension

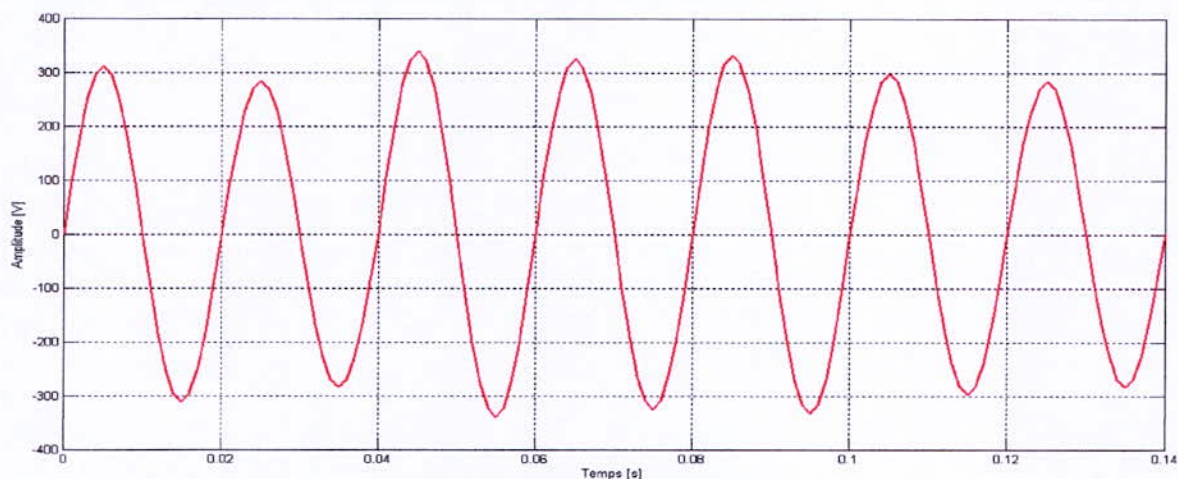


Figure 1.6 : Fluctuation de la tension

1.4.2 Effets et perturbations sur les charges et procédés

Les moteurs asynchrones sont les plus sensibles aux variations de la tension, elles entraînent un changement du couple (le couple est proportionnel au carré de la tension d'alimentation, $\Gamma = K \left(\frac{U_s}{f}\right)^2$) ainsi la diminution de la tension réduit le couple maximale et donc réduit les possibilités optimales de la machine: si la tension diminue de 10% par exemple le couple diminue de 19%. D'un autre côté l'augmentation de cette tension provoque une augmentation du courant magnétisant, ceci a pour effet de diminuer le facteur de puissance du moteur et d'augmenter les pertes dans le fer ainsi que l'échauffement de la machine. [6]

1.5 Déséquilibre

1.5.1 Définition et origines

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de ± 120 . Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré. Un déséquilibre est causé par les charges triphasées non symétriques ou par des charges monophasées qui n'absorbent pas le même courant sur chaque phase. Le niveau du déséquilibre dépend de :

- La puissance de court-circuit du réseau amont
- Le bouclage des réseaux.

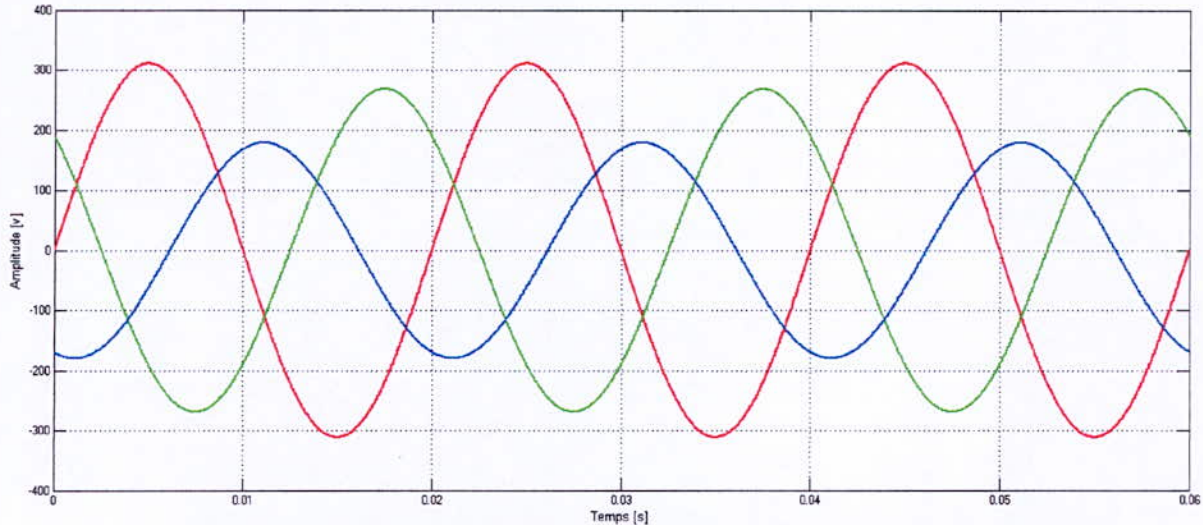


Figure 1.7 : Déséquilibre du système triphasé en phase et en amplitude

La quantification du phénomène fait appel à la décomposition de la composante fondamentale selon les composantes symétriques de Fortescue. On définit un degré de déséquilibre inverse et un degré de déséquilibre homopolaire. Le degré de déséquilibre inverse est le rapport entre la composante inverse du fondamental de la tension et sa composante directe :

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \quad \Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|}$$

Dans les conditions normales d'exploitation, la norme EN 50-160 impose que sur chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes de la composante inverse de la tension d'alimentation ne dépassent pas 2 % de la composante directe. [2]

1.5.2 Effets et perturbations sur les charges et procédés

Un léger déséquilibre des tensions triphasées produit des composantes inverses de courant, qui provoque des couples de freinage parasite et des échauffements dans les machines asynchrones triphasées (un déséquilibre de tension de 3.5% peut faire augmenter la température de 15 c°). [6]

1.6 Harmoniques et interharmonique

1.6.1 Définitions et origines

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont provoqués par des charges dites non-linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, postes de soudure), dont la caractéristique est d'absorber un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension. Celle-ci peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples à celle du fondamental selon Fourier. Chaque composante est caractérisée par son rang et par son amplitude exprimée en pourcentage par rapport à celle du fondamental. [5]

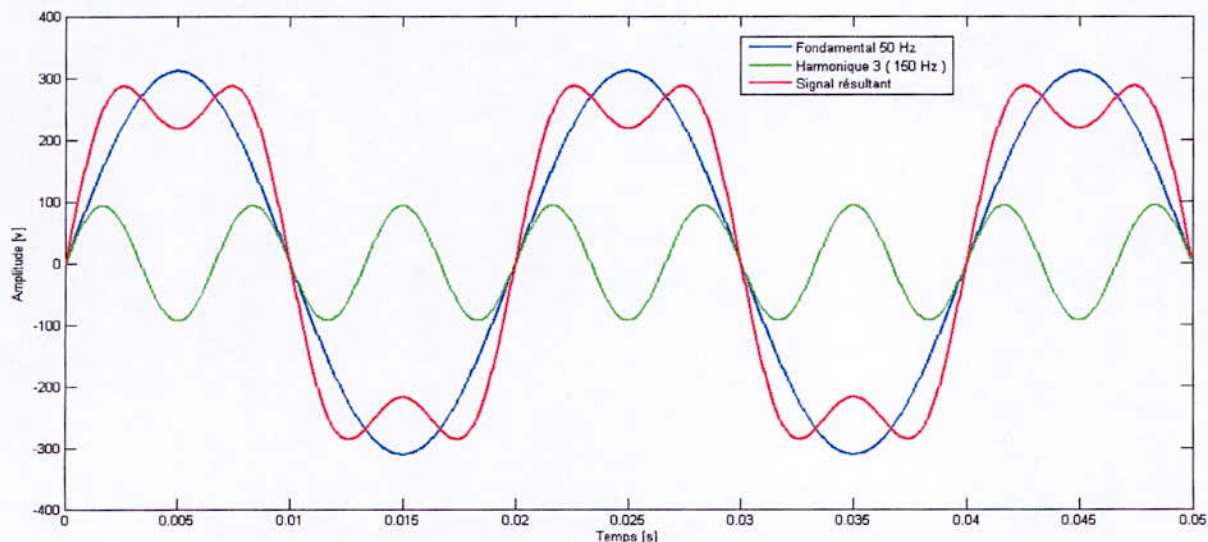


Figure 1.8: Représentation temporelle d'une onde déformée

Les interharmonique sont une autre forme de déformation de l'onde de tension avec des fréquences qui ne sont pas multiples de la fréquence industrielle. Elles sont en augmentation du fait du développement de certains types de convertisseurs d'électronique de puissance (convertisseur de fréquence).

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant d'après la norme EN 50-160. Ce rapport est exprimé en pourcent, entre la valeur efficace des composantes harmoniques et l'amplitude du fondamental.

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2}$$

La norme EN 50-160 impose que dans des conditions normales d'exploitation, pendant chaque période d'une semaine, 95 % des valeurs moyennées sur 10 mn des taux individuels ne dépassent les valeurs indiquées dans le tableau suivant. Le taux global quant à lui ne devant pas dépasser 8%. Toutefois des taux plus élevés pour un rang donné peuvent être observés suite à des résonances.

Harmonique Non multiple de 3		Harmonique multiple de 3		Harmonique paire	
Rang	Seuil (%)	Rang	Seuil (%)	Rang	Seuil (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	15	4	1
11	3.5	15 à 21	0.5	6 à 24	0.5
13	3				
17	2				
19 23 25	0.5				

Tableau1.2 Valeurs des tensions harmoniques aux points de fourniture, jusqu'au rang d'harmonique 25, exprimée en pourcentage de la tension nominale U_n

1.1 Effets et perturbations sur les charges et procédés

Les conséquences peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques: troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), qui est en fonction du niveau de pollution .On peut aussi avoir des erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie et des échauffements supplémentaires induits peuvent, à moyen terme, diminuer la durée de vie des machines tournantes, des condensateurs, des transformateurs de puissance et des conducteurs de neutre qui dépendent toujours du taux de distorsion que l'indique le tableau suivant. [5]

Nous le savons, les récepteurs « non-linéaires » créent des courants harmoniques. Nous savons également que par l'intermédiaire de ces courants et de l'impédance du réseau, une tension harmonique se crée. C'est cette tension harmonique qui va perturber l'onde sinusoïdale de la tension "normal" dont l'on va se servir pour détecter la présence d'harmoniques.

Taux de distorsion harmonique en tension	Conséquences
THD < 5%	Pas de conséquences
5% < THD < 7%	Dysfonctionnement des appareils "sensibles"
7% < THD < 9%	Dysfonctionnement des appareils "normaux"
THD > 9%	Dysfonctionnement de quasi tous les appareils, destruction de certains matériels sur le court, moyen et long terme quasi certaine.

Tableau 1.3 Effets de la distorsion de la tension [7]

Chapitre 2

Méthodes d'analyse des perturbations électriques

Dans ce chapitre, nous présenterons des techniques et des méthodes utilisées dans l'analyse des perturbations qui touchent la qualité de la tension. Ces outils sont différents selon que la dégradation touche l'amplitude, la forme de l'onde ou la fréquence du signal.

2.1 Creux de tension, coupure brèves et surtensions

Les perturbations de la tension entraînant une variation de l'amplitude sont traitées avec les mêmes méthodes qui suivent :

2.1.1 Estimation de l'amplitude

Elle se fait généralement par l'intermédiaire de la valeur efficace, c'est la valeur estimée par la plupart des appareils de mesure. D'autres techniques reposant sur l'estimation de l'enveloppe du signal ou son fondamental peuvent être utilisées.

2.1.1.1 Valeur efficace

On effectue un échantillonnage du signal, puis on estime la valeur efficace sur des fenêtres glissantes de longueur multiple d'une demi-période. Si on utilise des fenêtres de longueurs non multiples d'une demi-période, l'estimation comportera une erreur sous forme d'oscillations.

$$x_{eff} = \sqrt{\frac{1}{kT_0} \int_{t-\frac{kT_0}{2}}^{t+\frac{kT_0}{2}} x(\tau)^2 d\tau}$$

L'amplitude estimée est alors $A_x(t) = \sqrt{2} x_{eff}$

L'intérêt de cette méthode réside dans la facilité et la réalisabilité de l'estimateur. La méthode est fiable uniquement pour les signaux sinusoïdaux. En effet, elle n'est pas performante dans le cas où le signal comporte des harmoniques ou du bruit. La taille de la fenêtre étant supérieure à une demi-période ne permet pas de détecter les variations brusques de l'amplitude.

2.1.1.2 Signal analytique

Il permet de fournir plus d'informations sur le signal, il est utilisé pour estimer l'amplitude, la phase et la fréquence instantanée d'un signal sinusoïdal en fonction du temps. Le signal analytique d'un signal $x(t)$ est défini comme suit :

$$x_a(t) = x(t) + j * Hilibert(x(t))$$

j étant la racine complexe de -1. La transformation de Hilbert du signal $x(t)$ est égale au même signal déphasé de $\frac{\pi}{2}$. Ainsi par exemple la transformation de Hilbert d'un cosinus est un sinus. De façon simplifiée, $x(t)$ est la partie réelle du signal complexe $x_a(t)$:

$$x_a(t) = A(t)e^{j(\omega t + \varphi)}$$

$$A(t) = |x_a(t)|$$

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de suivre instantanément le développement du signal et donc de détecter les perturbations au niveau de l'amplitude avec une meilleure précision de leur durée, particulièrement intéressante dans le cas de perturbations de très courte durée (moins de deux périodes du fondamental). En revanche, certains bruits dont la valeur moyenne est nulle comme les bruits blancs, peuvent affecter instantanément le signal mesuré et donc froisser l'estimation. [1]

2.1.1.3 Composante fondamentale

On définit le fondamental d'un signal périodique comme suit :

$$x_{fond} = \frac{2}{T_0} \left| \int_{t-\frac{kT_0}{2}}^{t+\frac{kT_0}{2}} x(\tau) e^{-j\frac{2\pi\tau}{T_0}} d\tau \right|$$

L'estimation par la composante fondamentale permet d'isoler le signal des bruits et autres perturbations harmoniques pouvant affecter le signal à estimer.

2.1.2 Segmentation

Avant d'analyser une perturbation, il faut la détecter et l'isoler. La segmentation est le processus de décomposition des signaux mesurés en segments constants ou faiblement variables. Les méthodes de segmentation peuvent agir dans le domaine temporel, fréquentiel ou bien être basées sur un modèle du signal.

Dans une première étape, on utilisera l'un des estimateurs présentés au paragraphe précédent sur les trois phases puis afin d'isoler et de détecter les perturbations éventuelles on procédera à une comparaison avec des signaux théoriques établis sur des modèles ne comportant pas de perturbations. [1]

2.1.3 Classification

C'est le processus d'identification du type de creux de tension à partir des formes d'ondes enregistrées. Il permet en outre la localisation du défaut.

- Méthode des six tensions :

Elle consiste à comparer l'amplitude des trois tensions simples et des trois tensions composées normalisées. La tension dont l'amplitude est la plus faible indique la ou les phases ou la chute de tension est la plus importante.

Cette méthode permet de différencier entre les creux de tension monophasés, biphasés et triphasés et de localiser la ou les phases affectées. L'algorithme qui permet de faire cela est présenté dans la figure 2.1

$$V_{min} = \min \left\{ V_a, V_b, V_c, \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}, \frac{V_{bc}}{\sqrt{3}}, \frac{V_{ca}}{\sqrt{3}} \right\}$$

$$V_{max} = \max \left\{ V_a, V_b, V_c, \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}, \frac{V_{bc}}{\sqrt{3}}, \frac{V_{ca}}{\sqrt{3}} \right\}$$

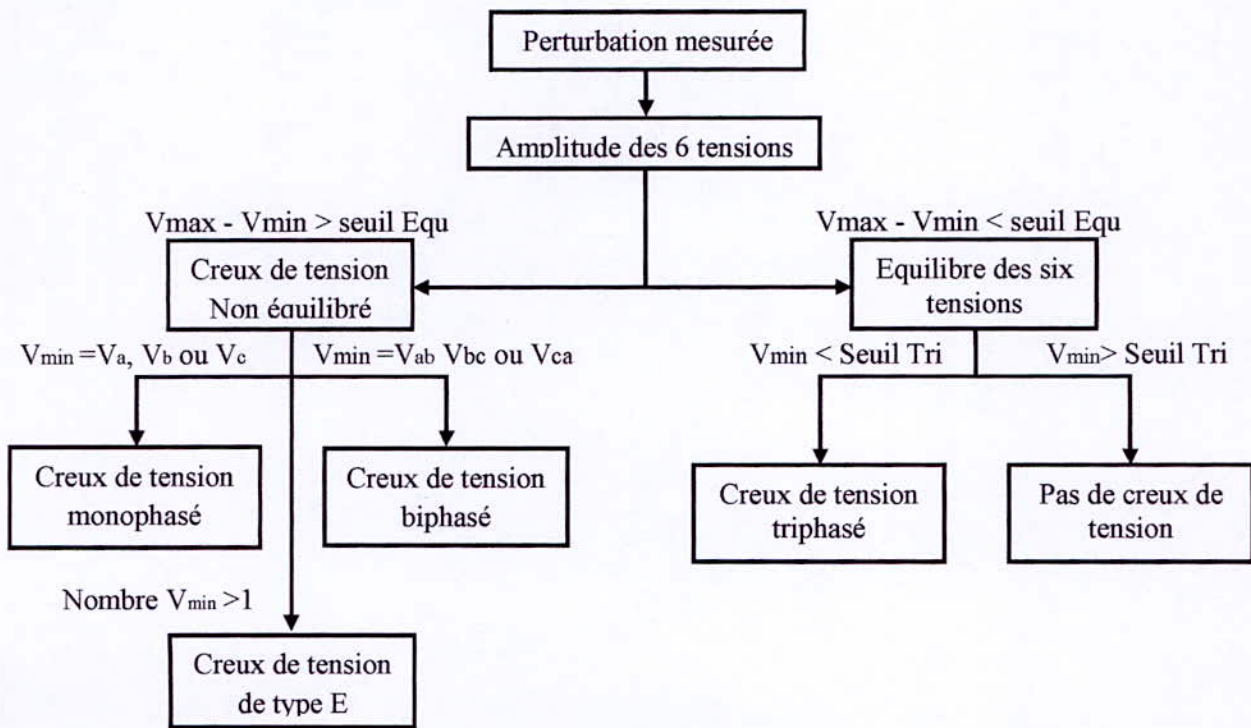


Figure 2.1 : Algorithme de classification des creux de tension basé sur la méthode des six tensions [1]

2.1.4 Caractérisation

La dernière étape dans l'analyse d'un creux de tension consiste à déterminer la sévérité du creux et son impact sur les équipements électriques. Deux paramètres sont à observer, l'amplitude et la durée. On peut donc représenter un creux de tension sur un repère à deux dimensions, amplitude en pourcentage en ordonnée et durée en abscisse. Ces courbes obtenues dites « courbes de sensibilité » sont semblable aux limites fixées par les courbes de la compatibilité électromagnétique, en effet différents bandes existent pour situer les zones à risque pour différents appareils. Des indices sont utilisés pour traduire les résultats sous forme algébrique. Parmi lesquelles on cite :

- La perte de tension :

$$L_V = \int (1 - V(t)) dt$$

- La perte d'énergie :

$$L_E = \int (1 - V(t))^2 dt$$

Ces indices prennent en compte la profondeur du creux et sa durée. D'autres indices caractérisèrent les creux de tension triphasés :

- Le score du creux ou « sage score » :

$$V = 1 - \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$$

Ou V_a , V_b et V_c sont les valeurs efficaces des tensions en unité relative.

Un autre indice équivalent à la perte d'énergie :

$$W = \sum_{i=1}^3 (1 - V_i)^{3.14} T_i$$

Ou V_i et T_i sont respectivement l'amplitude et la durée de la chute de tension sur la phase i . [1]

2.2 Harmoniques

2.2.1 Outils d'analyse

2.2.1.1 Série de Fourier

Un signal $x(t)$ périodique de période T_0 peut se décomposer sous les conditions de Dirichlet (fonction périodique de période T_0 lisse par morceau sur l'intervalle $[-\frac{T_0}{2}, \frac{T_0}{2}]$) en une série convergente de la forme :

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) - b_k \sin(k\omega_0 t)]$$

Ou

a_0 représente la valeur moyenne du signal.

$$a_k = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) \cos(k\omega_0 t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} x(t) \sin(k\omega_0 t) dt$$

Il existe une forme complexe de la décomposition :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} x_k = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \langle x \rangle_k e^{jk\omega_0 t}$$

Ou

$$\langle x \rangle_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) e^{jk\omega_0 t} dt$$

La décomposition en série de Fourier permet d'extraire le signal utile appelé fondamental et les harmoniques qui se superposent à lui.

2.2.1.2 Transformation de Fourier

Les signaux non périodiques peuvent eux aussi sous certaines conditions être décomposés en une somme d'exponentielles complexes :

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{Ou} \quad X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$$

Avec $x(t)$ étant le signal temporelle et $X(\omega)$ sa transformée de Fourier dans le domaine fréquentiel.

2.2.2 Caractérisation

Différents indices existent pour quantifier les harmoniques dans un signal :

- Taux de distorsion (Facteur de distorsion) :

$$THD\% = DF\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2}}$$

- Taux global de distorsion

$$D\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

Souvent, le module des harmoniques est trop petit devant la valeur du fondamental, on confond alors les deux facteurs THD% et D%.

- Taux individuel d'harmoniques

$$H_n\% = 100 \frac{Y_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2}} \quad \text{selon la CEI}$$

$$H_n\% = 100 \frac{Y_n}{Y_1} \quad \text{selon la CIGRE}$$

Ce facteur permet de comparer les harmoniques au fondamentale et de les classer.

- Le facteur de puissance et le facteur de déphasage ($\cos\varphi_1$) sont deux facteurs utilisés en Electrotechnique pour caractériser la qualité de l'énergie :

Le facteur de puissance $Fp = \frac{P}{S}$

Le facteur de déphasage $\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$

- Le facteur de déformation donne la relation entre les facteurs de puissance et de déphasage :

Le facteur de déformation $v = \frac{Fp}{\cos\varphi_1}$

Cas particulier ou on aurait un signal purement sinusoïdal : $v = 1$, on aurait égalité entre facteur de puissance et $\cos\varphi_1$. [8]

2.3 Variation de tension et de fréquence

2.3.1 Outils d'analyse

La fréquence et l'amplitude étant des grandeurs variant dans le temps on utilise des outils comme le spectrogramme, ou la transformée de Wigner-Ville. (Représentation en 3D : le temps en abscisse, la fréquence comme ordonnée et l'énergie suivant le 3eme axe)

2.3.2 Représentation statistique

Les variations des grandeurs électriques sont le plus souvent aléatoires donc on peut les considérer comme variables aléatoires.

2.1 Fonction de répartition, densité de probabilité

Si X est une variable aléatoire alors :

$F_X(x) = \text{prob}(X \leq x)$ est la fonction de répartition de la variable aléatoire X.

$p_X(x) = \text{Prob}(x < X < x + dx) = \frac{dF_X(x)}{dx}$ est sa densité de probabilité.

Ces deux grandeurs permettent de caractériser parfaitement la variable aléatoire X. Un moyen simple pour estimer une densité de probabilité est de mesurer son histogramme et de le normaliser pour que son intégrale soit égale à 1.

2.3.2.2 Moments statistiques : espérance, variance et écart type

Le moment statistique d'ordre n d'une variable aléatoire est défini par

$$E(X^n) = \int x^n p_X(x) dx$$

La valeur moyenne est le moment d'ordre 1, le moment d'ordre 2 est la variance.

$$\text{Var}(X) = E[(X - E(X))^2] = E(X^2) - E^2(X)$$

L'écart Type : $\sigma_X = \sqrt{\text{Var}(X)}$

Les estimateurs de ces grandeurs

- Moyenne empirique :

$$\mu_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

- Variance empirique :

$$\sigma_X^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_X)^2$$

2.4 Déséquilibre

Il est quantifié par le facteur de déséquilibre, pour une mesure entre phase et neutre ou phase et terre, le facteur est défini par :

$$V_u = \left| \frac{V_a + a^2V_b + aV_c}{V_a + aV_b + a^2V_c} \right| \times 100\%$$

Chapitre 3

Méthode du Vecteur d'Espace

Nous allons présenter dans ce chapitre une technique pour l'étude des problèmes liés à la Qualité de l'Energie Electrique. Cette méthode dite Méthode du Vecteur d'Espace est une transformation vectorielle qu'on applique aux grandeurs triphasées, il en résulte une grandeur complexe, le vecteur d'espace et une grandeur réelle qui est la composante homopolaire. L'analyse de ces deux grandeurs permet d'identifier le type de perturbation, la ou les phases concernées et aussi la sévérité du problème.

3.1 Transformation du vecteur d'espace

La transformation du vecteur d'espace est dérivée de celle des composantes symétriques également appelée transformation de Fortescue. Un bref historique sur les transformations des composantes symétriques et leur lien avec la transformation du vecteur d'espace est présenté dans ce paragraphe.

Les composantes symétriques ont été introduites en 1918 par Fortescue. La transformation de Fortescue, applicable aux phaseurs des fonctions sinusoïdales, permet l'analyse des systèmes triphasés asymétriques sous conditions sinusoïdales. Plus tard, Lyon reprend la transformation de Fortescue et la modifie de manière à être applicable à des grandeurs dépendant du temps, quelles que soient les conditions (sinusoïdales ou non) cette transformée générale et instantanée donnée par :

$$\begin{pmatrix} x_d(t) \\ x_i(t) \\ x_0(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Ou $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

Le coefficient de normalisation $\frac{1}{3}$ est choisi de manière à conserver les amplitudes entre les systèmes triphasés avant et après transformation.[1]

Si les grandeurs du système de départ $x_a(t)$, $x_b(t)$ et $x_c(t)$ sont à valeurs réelles, les composantes directe et inverse de la transformation de Lyon x_d et $x_i(t)$ sont complexes conjuguées l'une de l'autre. Ces grandeurs portent alors la même information et sont redondantes. En effet, pour décrire complètement les trois grandeurs scalaires réelles du système triphasé d'origine, seule une grandeur scalaire complexe et une grandeur scalaire réelle suffisent.

Par la suite, la matrice de transformation de Lyon a été modifiée par Clarke pour éviter la redondance précédente dans le cas de grandeurs triphasées à valeurs réelles :

$$\begin{pmatrix} x_\alpha(t) \\ x_\beta(t) \\ x_0(t) \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

La matrice obtenue est cette fois-ci à valeurs réelles, tout comme les trois composantes du système triphasé transformé $x_\alpha(t)$, $x_\beta(t)$ et $x_c(t)$. Les deux premières composantes forment le vecteur d'espace :

$$\overrightarrow{x(t)} = x_\alpha(t) + j x_\beta(t) \quad (3.3)$$

La troisième représente la composante homopolaire. En combinant (3.2) et (3.3), la transformation du vecteur d'espace peut également être représentée sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \overline{x(t)} \\ x_0(t) \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

En comparant (3.4) avec (3.1), on remarque que la transformée du vecteur d'espace calcule les mêmes composantes que la transformée de Lyon, mis à part la composante inverse $x_i(t)$. Ceci montre que cette transformation est particulièrement adaptée à l'analyse des grandeurs triphasées à valeurs réelles puisque dans ce cas, $x_i(t)$ n'apporte pas d'information supplémentaire.

La transformation inverse du vecteur d'espace est définie par :

$$\begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ a^2 & \frac{1}{2} \\ a & \frac{1}{2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \overline{x(t)} \\ x_0(t) \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

On remarque dans cette expression que pour pouvoir reconstruire les grandeurs triphasées d'origine, le vecteur d'espace et la composante homopolaire sont tous deux nécessaires. Le vecteur d'espace ne décrit donc pas complètement le système triphasé d'origine que si sa composante homopolaire est nulle. Cette dernière ne peut donc pas être négligée pour l'analyse des problèmes de la qualité de l'énergie électrique puisque les perturbations électriques se traduisent souvent par des modifications de la composante homopolaire. [1]

3.2 Représentation et caractéristiques du vecteur d'espace dans le plan complexe

3.2.1 Perturbations au niveau du fondamental

Si on ne tient compte que du fondamental de pulsation ω_0 , les grandeurs d'un système triphasé sont supposées être de forme sinusoïdale et de pulsation ω_0 . Chacune de ces grandeurs est décomposable en deux phaseurs multipliés par des exponentielles complexes de pulsation $\pm\omega_0$ en appliquant la formule d'Euler. Pour la phase a on obtient :

$$\begin{aligned} x_a &= X_a \cos(\omega_0 t + \varphi_a) \\ x_a &= \left(\frac{x_a}{2} e^{j\varphi_a}\right) e^{j\omega_0 t} + \left(\frac{x_a}{2} e^{-j\varphi_a}\right) e^{-j\omega_0 t} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Dans plan complexe, chacune de ces exponentielles complexes est représentée par un vecteur qui parcourt un cercle à la vitesse angulaire $\pm\omega_0$. Les exponentielles complexes de fréquence positive (respectivement négative) tournent dans le sens trigonométrique (respectivement trigonométrique inverse). Le vecteur d'espace étant une fonction linéaire des trois grandeurs de phase, il peut également s'exprimer comme la somme d'un vecteur tournant dans le sens trigonométrique et d'un autre, tournant dans le sens inverse :

$$\overline{x(t)} = x_p e^{+j\omega_0 t} + x_n e^{-j\omega_0 t} \quad (3.7)$$

Où $x_p = |x_p| e^{j\varphi_p}$ et $x_n = |x_n| e^{j\varphi_n}$ sont des phaseurs complexes.

Dans le cas général où les deux phaseurs ont des amplitudes et des phases différentes, le vecteur d'espace prend la forme d'une ellipse dans le plan complexe (figure 3.1).

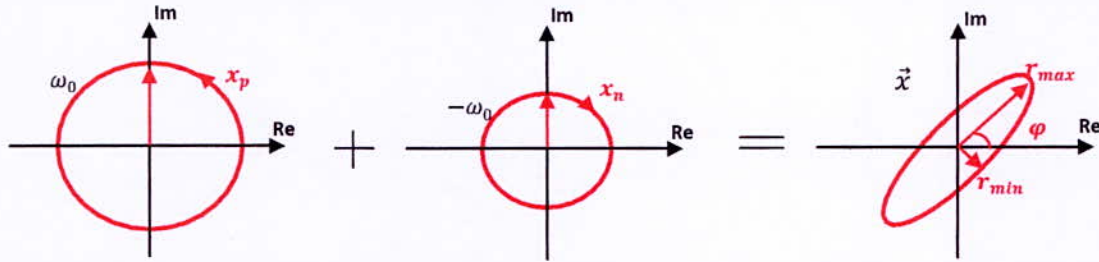


Figure 3.1 Représentation du vecteur d'espace dans le plan complexe par la somme de deux vecteurs tournants de fréquence angulaire opposée, d'amplitudes et de phases différentes

On montre à partir de l'équation (3.7), que le grand rayon et le petit rayon de l'ellipse dépendent directement des amplitudes des deux phaseurs, alors que l'angle d'inclinaison de l'ellipse est fonction de leurs phases :

$$r_{maj} = |x_p| + |x_n| \tag{3.8}$$

$$r_{min} = \left| |x_p| - |x_n| \right| \tag{3.9}$$

$$\phi_{inc} = \frac{1}{2}(\varphi_p + \varphi_n) \tag{3.10}$$

Dans le cas particulier où l'amplitude d'un des vecteurs tournants est égale à 0, le vecteur d'espace parcourt un cercle dans le plan complexe. Si par contre, les amplitudes des deux vecteurs tournants sont égales, le vecteur d'espace parcourt alors un segment de droite centré sur l'origine.

Pour caractériser la forme du vecteur d'espace dans le plan complexe, on introduit un facteur de forme SI (Shape Index). Sa valeur est déterminée par le rapport entre le petit rayon et le grand rayon de l'ellipse :

$$SI = \frac{r_{min}}{r_{maj}} = \frac{\left| |x_p| - |x_n| \right|}{|x_p| + |x_n|} \tag{3.11}$$

La valeur du facteur de forme peut être vue comme le coefficient de corrélation de la forme suivie par le vecteur d'espace et un cercle :

$$\left\{ \begin{array}{ll} SI=1 & : \text{ c'est un cercle} \\ 0 < SI < 1 & : \text{ c'est une ellipse} \\ SI = 0 & : \text{ c'est une ligne droite} \end{array} \right. \quad [1]$$

3.2.2 Perturbations harmoniques

Dans le cas de perturbations harmoniques, le vecteur d'espace peut être exprimé sous la forme d'une somme infinie de vecteurs tournant à la fréquence fondamentale $\pm\omega_0$ et à ses multiples $\pm k\omega_0$:

$$\overrightarrow{x(t)} = \sum_{k=0}^{\infty} [x_{pk}(t) e^{+jk\omega_0 t} + x_{nk}(t) e^{-jk\omega_0 t}] \tag{3.12}$$

Où k est le rang des harmoniques présents dans les grandeurs triphasées.

Par conséquent, la forme du vecteur d'espace dans le plan complexe se caractérise par des déformations caractéristiques comme montré à la figure 3.2, la composante homopolaire est également modifiée et peut être représentée sous la forme classique d'une série de Fourier.

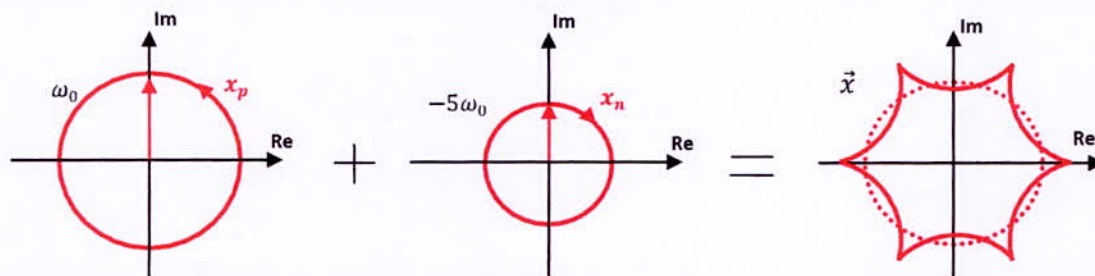


Figure 3.2 Représentation du vecteur d'espace par la somme de deux vecteurs tournants (fondamental et l'harmonique de rang 5) [1]

3.3 La transformation du vecteur d'espace pour l'analyse des perturbations électriques

L'utilisation de la transformation du vecteur d'espace permet l'identification et la description illustrative de tous les types de perturbations. En effet, dans le cas d'un système triphasé équilibré et non perturbé, le vecteur d'espace est constitué d'un seul vecteur tournant dans le sens trigonométrique. Il parcourt donc un cercle dans le plan complexe dont le rayon est égal à la valeur nominale des grandeurs triphasées d'origine. De plus, la composante homopolaire est dans ce cas nulle. Toute perturbation de la forme d'onde des trois grandeurs triphasées d'origine mène à des modifications de la forme du vecteur d'espace (figure 3.1) et/ou de la composante homopolaire. L'analyse de ces modifications en plus de celle de la composante homopolaire permet de remonter au type de creux de tension et son amplitude. Ce même procédé est utilisé pour analyser les autres perturbations qui touchent l'amplitude et la phase du système triphasé de type surtension, surintensité et déséquilibre.

Les perturbations harmoniques, quant à elles, se traduisent par des déformations caractéristiques de la forme décrite par le vecteur d'espace (figure 3.2), ou par des modifications de la composante homopolaire. L'application de la méthode du vecteur d'espace donne une idée générale sur le type de perturbation, la description complète de ce genre de perturbation n'est possible qu'avec l'utilisation d'outils de traitement de signal de type transformation de Fourier. [1]

3.3.1 Vecteur d'espace et composante homopolaire en cas de creux de tension

L'observation et la mesure des modifications dans le vecteur d'espace et la composante homopolaire permettent d'identifier et de décrire le type de creux de tension. Plus la perturbation est importante et plus les modifications sur la forme de la représentation dans le plan complexe le sont. Ce paragraphe permettra de montrer l'efficacité de la méthode du vecteur d'espace sur les creux de tension dont les caractères ont été cités dans le chapitre 1.

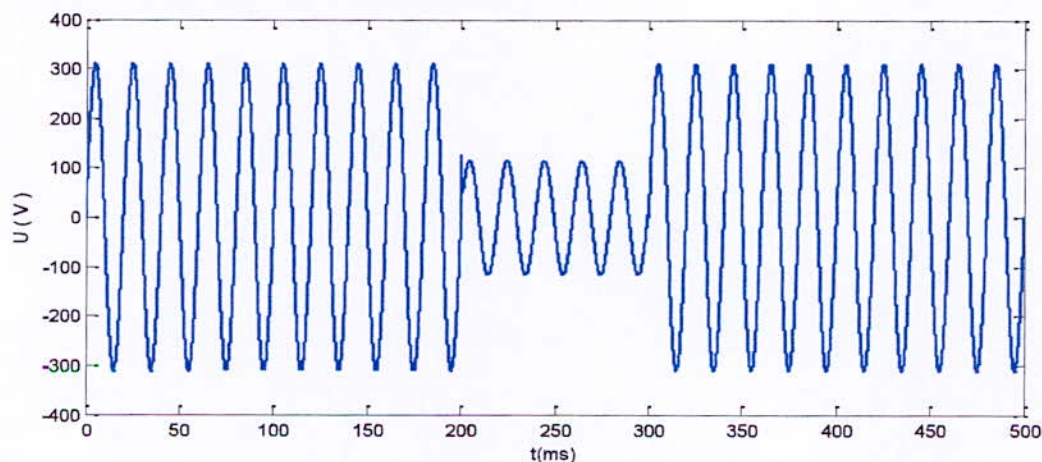


Figure 3.3 Creux de tension d'une durée de cinq périodes

On va revenir sur chaque signature et l'expliciter puis on va faire le développement avec la Méthode du Vecteur d'Espace et enfin comparer les résultats théoriques avec des résultats obtenus par simulation à l'aide de l'outil MATLAB SIMULINK.

3.3.1.1 Creux de tension monophasés

Creux de tension de type B

Dans le cas d'un creux de tension de type B, seule la tension d'une des phases est affectée par le défaut.

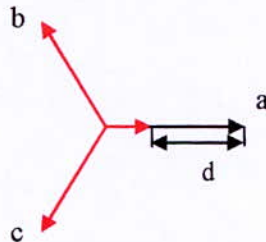


Figure 3.4 Creux de tension de type B

Le calcul permet d'exprimer les modifications sur le vecteur d'espace et la composante homopolaire.

$$\begin{cases} V_a = (1 - d) V \cos(\omega_0 t + \varphi) \\ V_b = V \cos\left(\omega_0 t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c = V \cos\left(\omega_0 t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.11)$$

d étant la profondeur du creux de tension.

En appliquant la formule d'Euler aux trois tensions de phase et en utilisant la transformation du vecteur d'espace, on peut exprimer le vecteur d'espace et la composante homopolaire pour ce type de creux de tension de la manière suivante :

$$\begin{cases} \overline{x(t)} = (1 - \frac{d}{3}) V e^{j\phi} e^{-j\omega_0 t} + \frac{d}{3} V e^{j(\frac{5\pi}{3} - n\frac{2\pi}{3} - \phi)} e^{-j\omega_0 t} \\ x_0(t) = -\frac{d}{3} V \cos\left(\omega_0 t + \phi + (n - 1)\frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (3.12)$$

Selon que ce soit la phase a, b ou c qui est touchée par la perturbation, on aura un déphasage supplémentaire dans la composante homopolaire d'où le terme en n. Le vecteur d'espace pour un creux de tension de type B est donc constitué de deux vecteurs tournants à des vitesses angulaires opposées, d'amplitude et de phase différentes. Par conséquent, il est représenté par une ellipse dans le plan complexe, dont les paramètres (rayons et inclinaison) sont calculés à partir de l'équation (3.8-10).

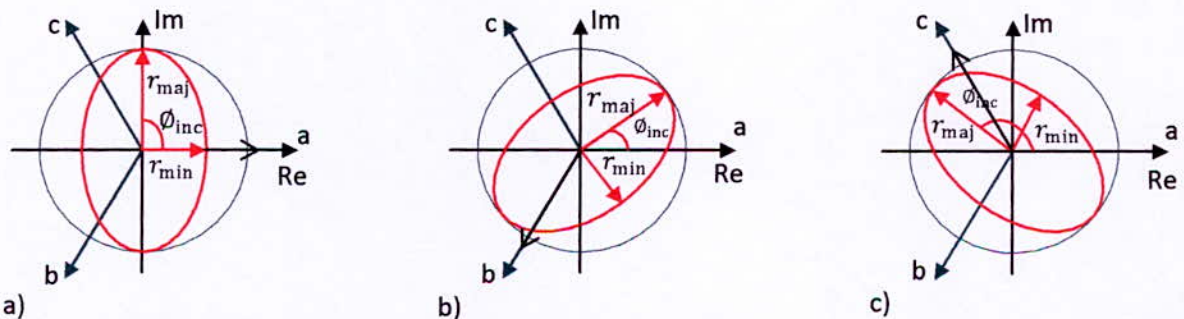


Figure 3.5 Vecteur d'espace pour creux de tension monophasé de type B sur les phases a, b et c

Le grand rayon reste égal à la tension nominale $r_{maj} = V$, car la forme originale suivie par le vecteur d'espace est « compressée » le long d'un seul axe. La valeur du petit rayon dépend directement de la profondeur du creux de tension : $r_{min} = (1 - \frac{2d}{3}) V$, pour une profondeur maximale de creux de tension $d = 1$ le petit rayon reste supérieur à 0, car seule une tension est modifiée et prend la valeur $r_{min} = \frac{1}{3}$.

Les modifications dans la composante homopolaire sont dues au déplacement du neutre. L'amplitude de la composante homopolaire est proportionnelle à la profondeur du creux de tension :

$|x_0| = \frac{d}{3}$, et sa phase dépend de la phase affectée par le défaut. Ainsi, dans le cas d'une chute de tension sur la phase a, on observe un déplacement du neutre dans le sens de la diminution de la tension et par conséquent, la phase de la composante homopolaire est égale à π . Pour une chute de tension sur les phases b et c, sa phase devient $-\frac{\pi}{3}$ et $\frac{\pi}{3}$ respectivement.

Exemple de chute de tension profondeur $d=0.5$ sur la deuxième phase

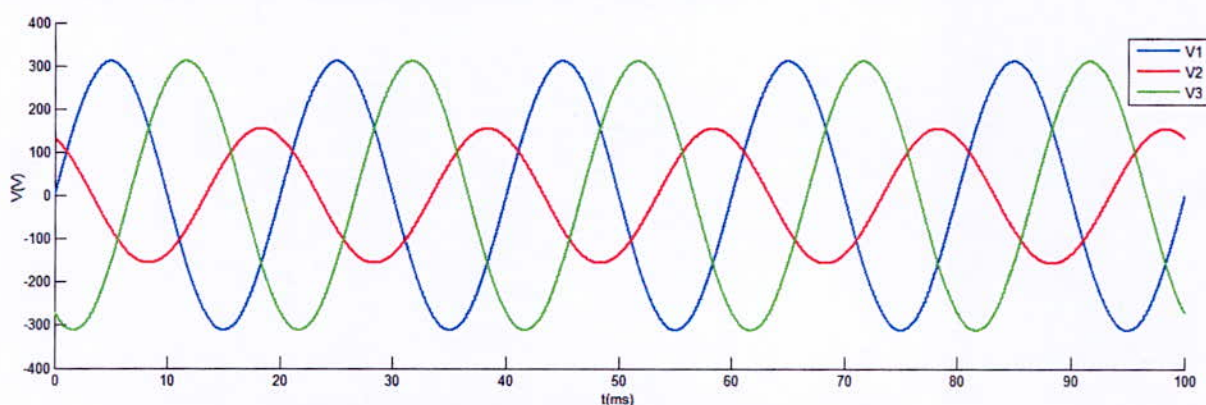


Figure 3.6 Allure du système de tension triphasé

Résultats prédéterminés par les formules théoriques				Application de l'algorithme de la M.V.E		
$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(\circ)$	x_0	$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(\circ)$
311.1	207.3	30°	$51.85 \cos(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3})$	311.1	207.4	+30.04

Tableau 3.1 Résultats selon la M.V.E

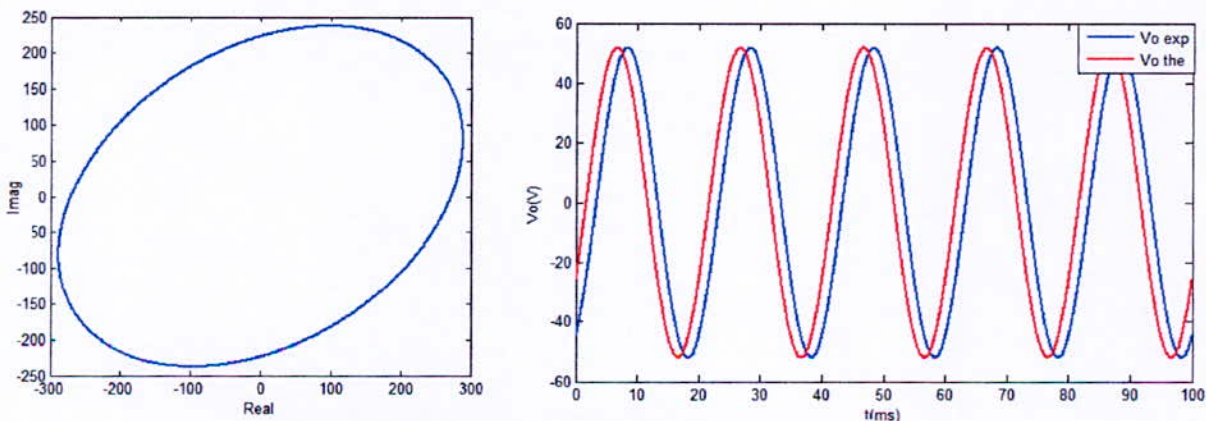


Figure 3.7 Résultats de l'application de la M.V.E

Creux de tension de type D

Le creux de tension de type D se caractérise par des modifications des tensions sur les trois phases le long du même axe.

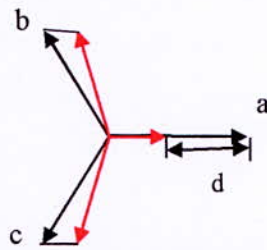


Figure 3.8 Creux de tension de type D

Comme dans le cas précédent, le vecteur d'espace parcourt alors une ellipse dont le grand rayon est égal à la tension nominale $r_{maj} = (1 - \frac{d}{3})V$, et le petit rayon dépend de la profondeur du creux de tension : $r_{min} = (1 - d)V$. Cette fois-ci, pour des creux de tension sévères ($d = 1$), les trois tensions sont alignées sur le même axe, le petit rayon est égal à 0 et le vecteur d'espace parcourt un segment de droite dans le plan complexe et non une ellipse. Les inclinaisons possibles de l'ellipse sont identiques à celles d'un creux de tension de type B : $\phi_{inc} = \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{6}, \frac{5\pi}{6}$ pour un creux de tension sur les phases a, b et c respectivement.

La composante homopolaire pour ce type de creux reste égale à 0. En effet, ce type de creux de tension provient de mesures effectuées à un niveau de tension différent du niveau de tension où le défaut a été produit, et la composante homopolaire n'est alors pas modifiée comme indiqué dans le chapitre 1.

Exemple : Creux de tension de profondeur $d=30\%$ soit 93.33 V sur la phase 1 avec déphasage de -8° et $+8^\circ$ sur les phases 2 et 3 respectivement.

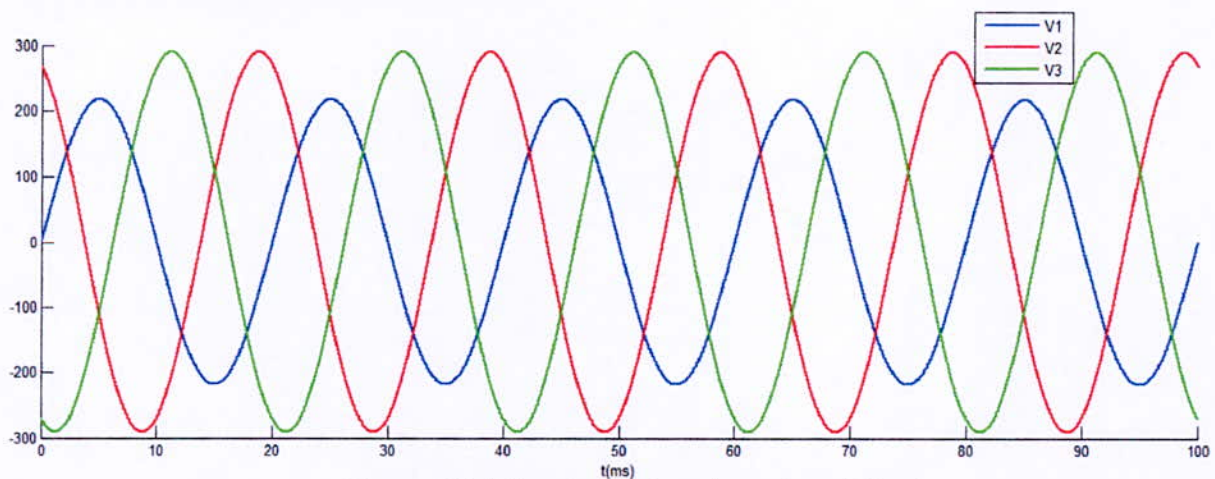


Figure 3.9 Allure du système de tension triphasé

résultats prédéterminés par les formules théoriques				Application de l'algorithme de la M.V.E		
$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$	x_0	$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$
311.1	217.8	90°	0	311.1	217.7	90.00

Tableau 3.2 : Résultats selon la M.V.E

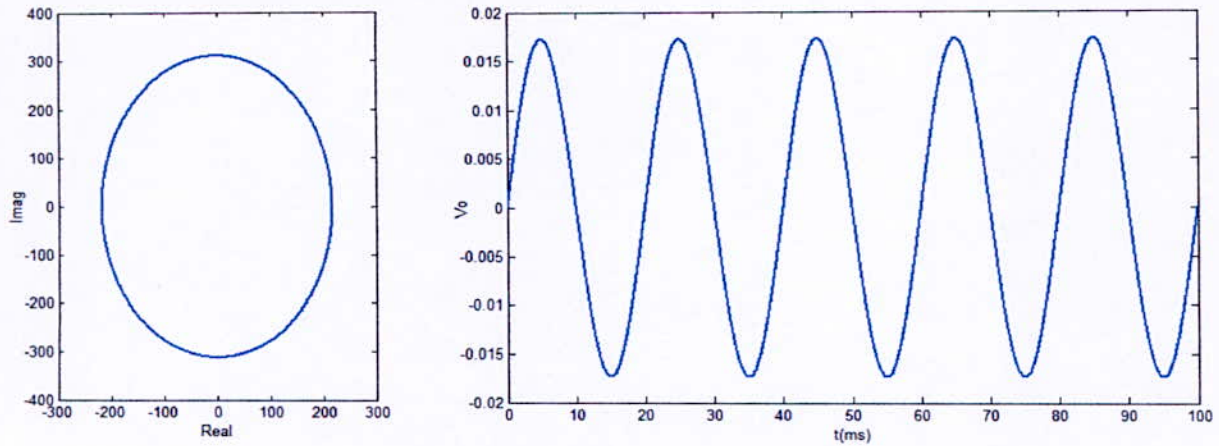


Figure 3.10 Résultat de l'application de la M.V.E

Creux de tension de type F

Pour un creux de tension de type F, on observe des réductions de tensions sur les trois phases le long d'axes différents.

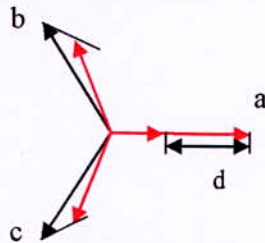


Figure 3.11 Creux de tension de type F

Par exemple, pour un creux de tension de type F sur la phase a, la tension dans la phase a diminue le long de l'axe réel, alors que les phases b et c se caractérisent par des faibles chutes de tension le long de l'axe réel, mais également le long de l'axe imaginaire.

Le grand rayon de l'ellipse parcourue par le vecteur d'espace dans le plan complexe devient inférieur à la tension nominale et dépend de la profondeur du creux de tension : $r_{maj} = (1 - \frac{d}{3})V$. Le petit rayon de l'ellipse dépend également de la profondeur du creux de tension $r_{min} = (1 - d)V$. Les inclinaisons possibles de l'ellipse restent les mêmes que dans le cas des creux de tensions de type B et D. La composante homopolaire reste également nulle dans ce cas.

Exemple : Creux de tension de profondeur d=40% soit 124.44 V sur la phase 3 avec déphasage de -9° et +9° sur les phases 1 et 2 respectivement plus une chute de 17% sur leurs amplitudes.

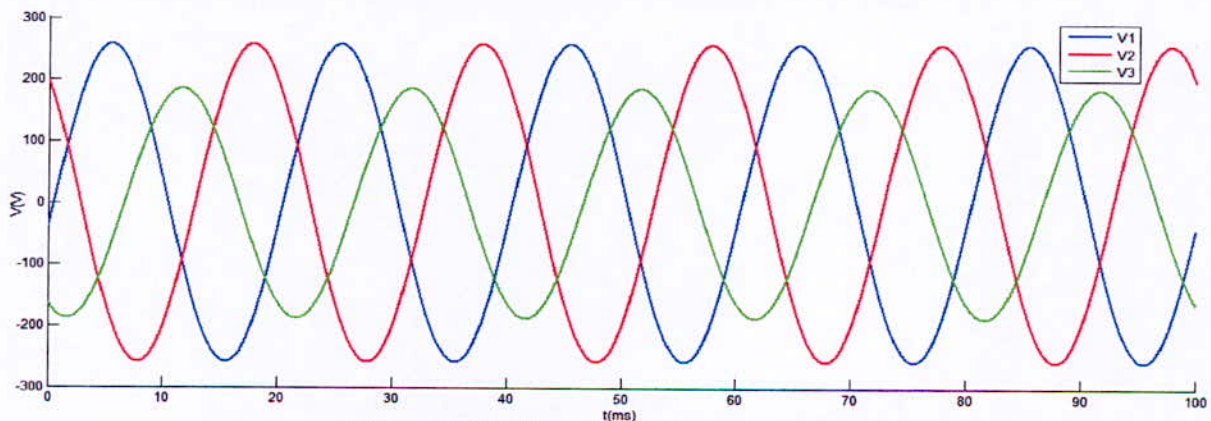


Figure 3.12 Allure du système de tension triphasé

résultats prédéterminés par les formules théoriques				Application de l'algorithme de la M.V.E		
$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$	x_0	$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$
269.62	186.66	-30	/	278.3	186.1	-30.04

Tableau 3.3 : Résultats et selon la M.V.E

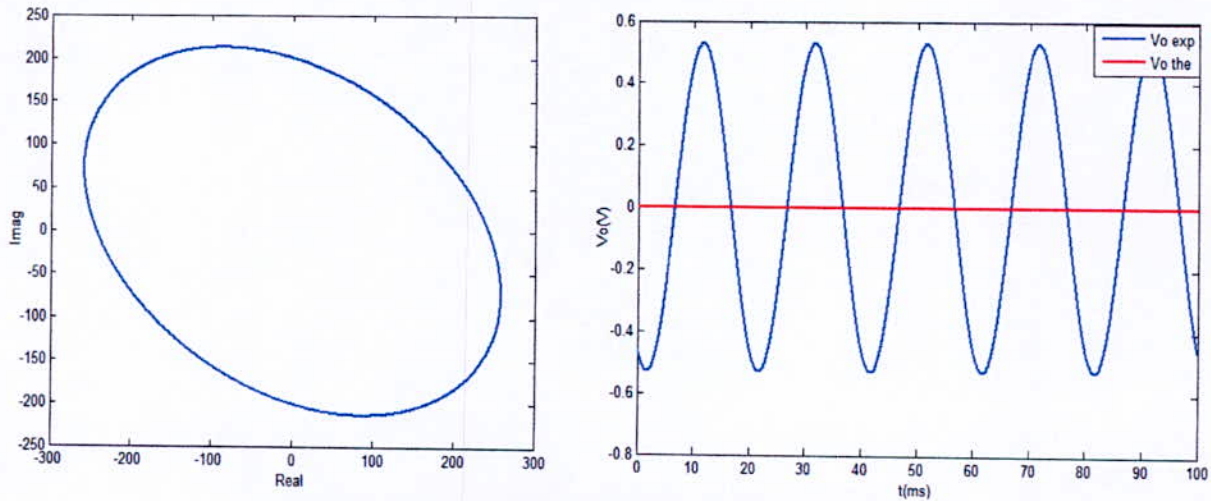


Figure 3.13 résultat de l'application de la M.V.E

Le même constat est fait encore, les chutes de tensions sur les deux phases 1 et 2 et leurs déphasages entraînent une différence entre les résultats théoriques et les résultats pratiques.

TYPE	Vecteur d'espace				Composante homopolaire x_0
	SI	ϕ_{inc}	r_{min}	r_{maj}	
B	$(1 - \frac{2d}{3})$	$\frac{5\pi}{3} - n\frac{2\pi}{3}$	$(1 - \frac{2d}{3})V$	V	$-\frac{d}{3} V \cos(\omega_0 t + \phi + (n-1)\frac{2\pi}{3})$
D	1-d	$\frac{5\pi}{3} - n\frac{2\pi}{3}$	$(1-d)V$	V	0
F	$3(\frac{1-d}{3-d})$	$\frac{5\pi}{3} - n\frac{2\pi}{3}$	$(1-d)V$	$(1 - \frac{d}{3})V$	0

Tableau 3.4 Caractéristiques des creux de tension monophasés [1]

3.3.1.2 Creux de tension biphasés

La figure 3.14 représente les modifications sur la signature d'un système triphasé lors de creux de tension biphasés, les flèches indiquent le sens des modifications.

Creux de tension de type C

Dans le cas d'un creux de tension de type C, deux des trois tensions sont modifiées le long du même axe.

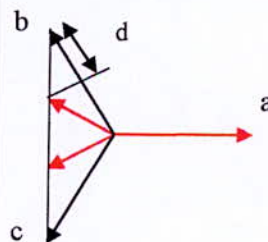


Figure 3.14 Creux de tension de type C

Le grand rayon de l'ellipse parcourue par le vecteur d'espace reste égal à la tension nominale et son petit rayon dépend de la profondeur du creux. Lors d'un creux de tension sur les phases b et c (figure 3.14) l'inclinaison de l'ellipse est de $\phi_{inc} = 0$. Cette inclinaison devient $\phi_{inc} = \frac{\pi}{3}$ pour une chute de tension sur les phases a et b et $\phi_{inc} = \frac{2\pi}{3}$ en cas de creux de tension sur les phases a et c. Enfin, ce type de creux de tension se caractérise par une composante homopolaire égale à 0.

Creux de tension de type C, exemple : creux de tension de profondeur $d = 22.2\%$ avec déphasages supplémentaires de 10° sur les phases 2 et 3.

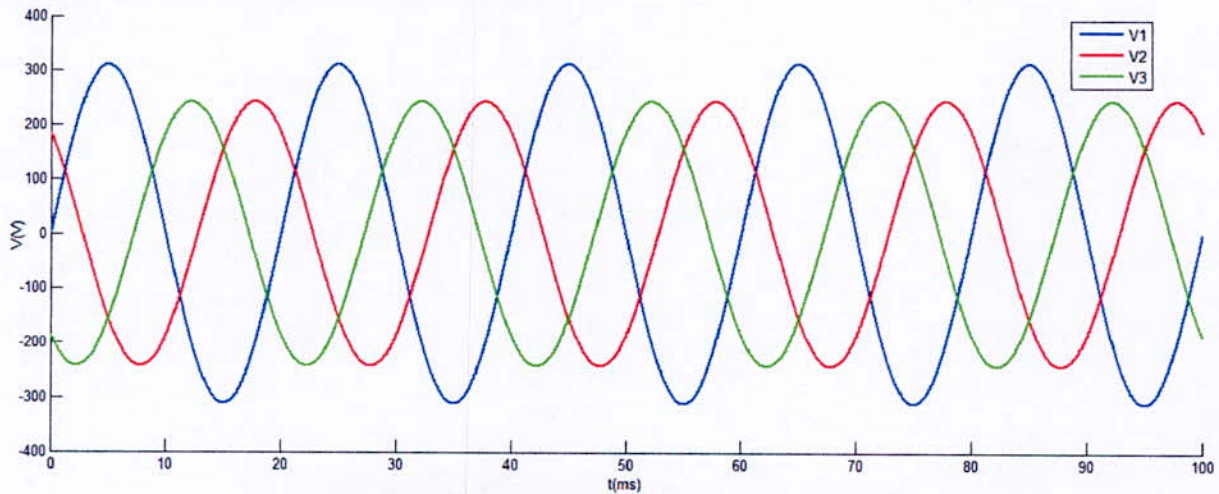


Figure 3.15 Allure du système de tension triphasé

résultats prédéterminés par les formules théoriques				Application de l'algorithme de la MVE		
$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$	x_0	$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$
311.1	219.8	0	0	311.4	214.6	0

Tableau 3.5 : Résultats selon la MVE

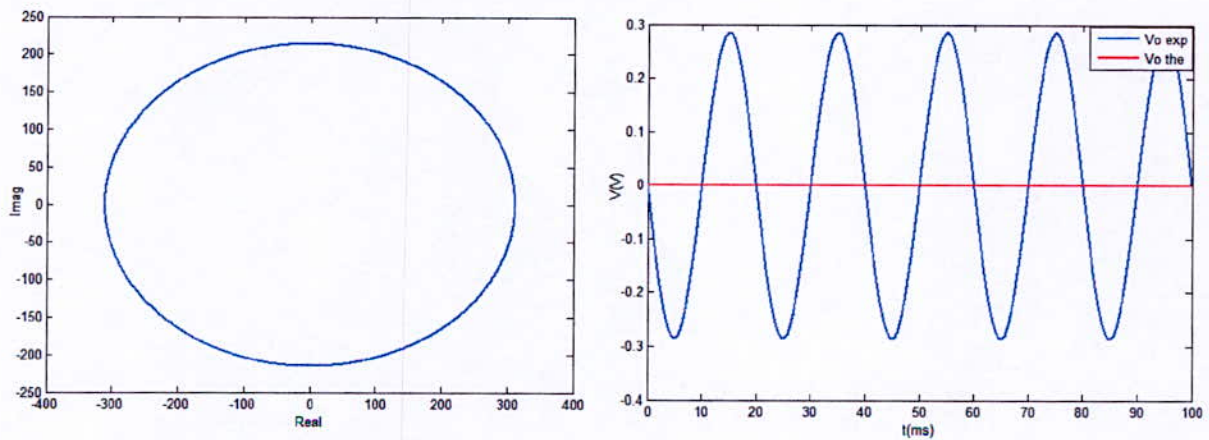


Figure 3.16 Résultat de l'application de la M.V.E

Creux de tension de type E

Dans le cas des creux de tension de type E, les tensions affectées par un court-circuit sont modifiées le long d'axes différents

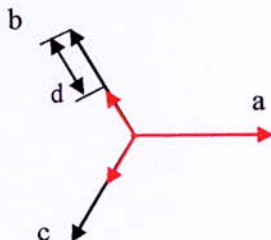


Figure 3.17 Creux de tension de type E

Par exemple, pour un creux de tension sur les phases b et c, on observe une réduction de la tension le long de l'axe imaginaire, mais également une réduction moins importante le long de l'axe réel. Par conséquent, le vecteur d'espace parcourt une ellipse dans le plan complexe avec un grand rayon inférieur à la tension nominale et petit rayon dépendant de la profondeur du creux de tension. Les inclinaisons possibles des ellipses sont les mêmes que dans le cas d'un creux de tension de type C. De plus, puisque ce type de creux est mesuré au même niveau de tension où le défaut a été produit, sa composante homopolaire est non nulle. Son amplitude est proportionnelle à la profondeur du creux, et sa phase dépend des phases affectées par le défaut.

Exemple : Chute de tension de d=50% sur les amplitudes des phases 1 et 3

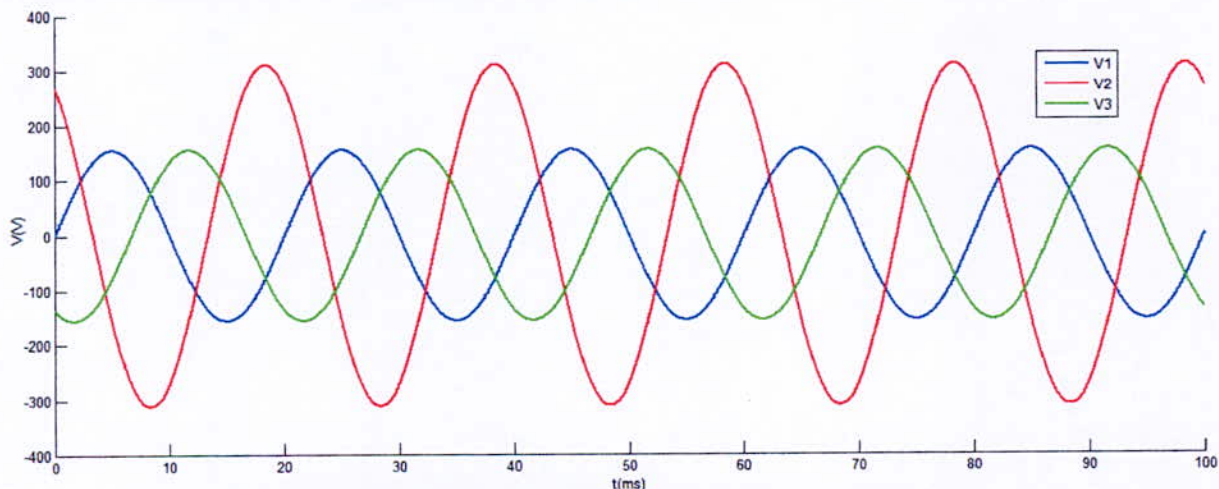


Figure 3.18 Allure du système de tension triphasé

résultats prédéterminés par les formules théoriques				Application de l'algorithme de la MVE		
$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$	x_0	$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$
259.25	155.55	-60	$-51.83 \cos(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3})$	259.3	155.6	-59.96

Tableau 3.6 : Résultats d'application théorique et selon la MVE

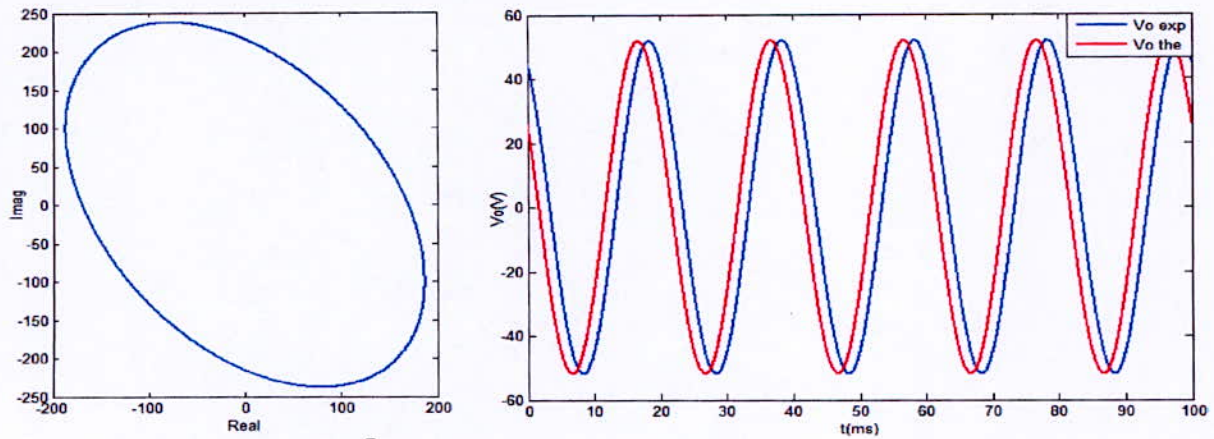


Figure 3.19 Résultats de selon la M.V.E

Creux de tension de type G

Dans le creux de tension de type G, les modifications touchent les trois phases le long d'axes différents.

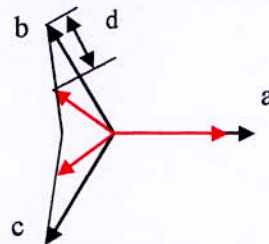


Figure 3.20 creux de tension de type G

Le vecteur d'espace parcourt également une ellipse dans le plan complexe avec des rayons dépendant de la profondeur de creux et des inclinaisons identiques à celles en cas de creux de tension de type C et E. La composante homopolaire, quant à elle reste nulle.

Exemple : Chute de tension de profondeur $d=12.5\%$ sur les phases 1 et 2 avec déphasages supplémentaire de 10° .

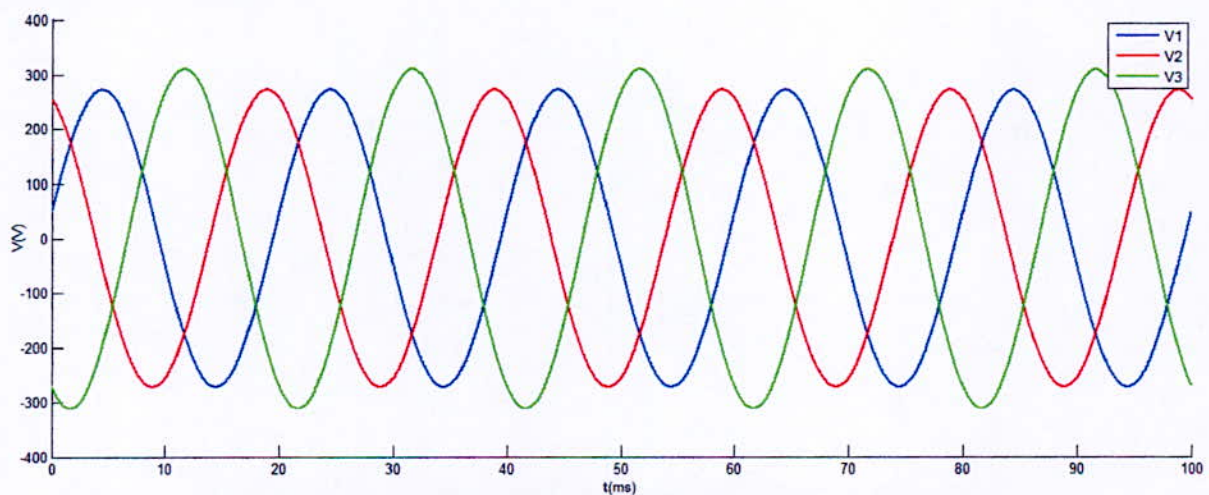


Tableau 3.21 : Résultats d'application théorique et selon la MVE

résultats prédéterminés par les formules théoriques				Application de l'algorithme de la M.V.E		
$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$	x_0	$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^\circ)$
295.4	264.1	-120	0	323.9	240.5	-120.04

Tableau 3.7 : Résultats selon la M.V.E

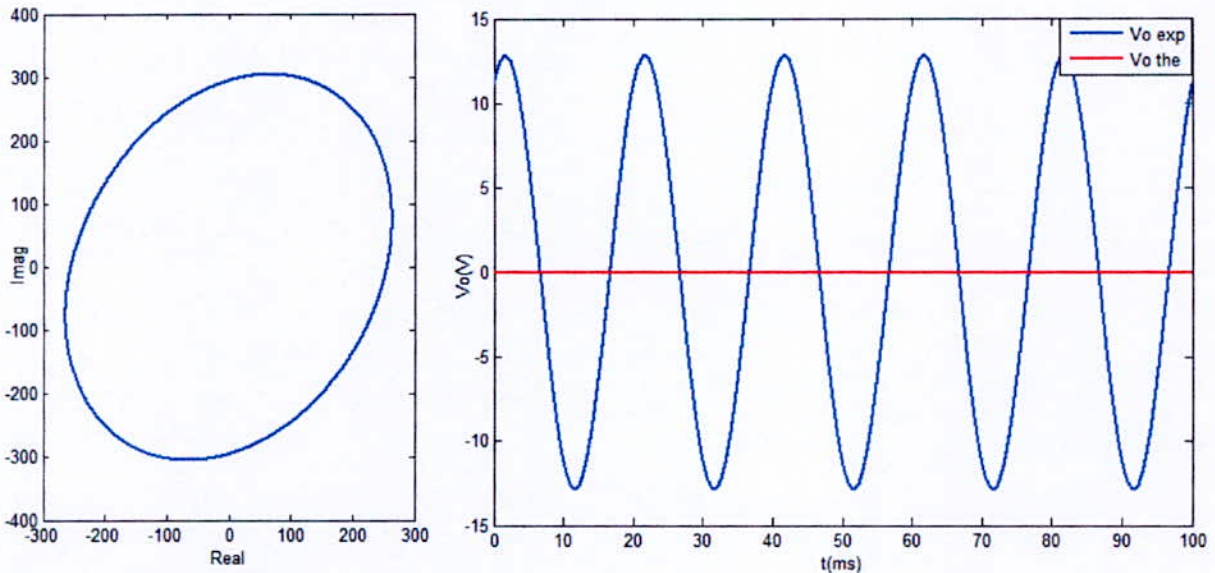


Figure 3.20 Résultats de l'application de la M.V.E

TYPE	Vecteur d'espace				Composante homopolaire x_0
	SI	ϕ_{inc}	r_{min}	r_{maj}	
C	$(1 - \frac{4d}{3})$	$(n-1)\frac{\pi}{3}$	$(1 - \frac{4d}{3})V$	V	0
E	$3(\frac{1-d}{3-d})$	$(n-1)\frac{\pi}{3}$	$(1-d)V$	$(1 - \frac{d}{3})V$	$\frac{d}{3} V \cos(\omega_0 t + \phi - (n-1)\frac{2\pi}{3})$
G	$(\frac{5-6d}{5-2d})$	$(n-1)\frac{\pi}{3}$	$(1 - \frac{6d}{5})V$	$(1 - \frac{2d}{3})V$	0

Tableau 3.8 Caractéristiques des creux de tension biphasés [1]

3.3.1.3 Creux de tension triphasés

Dans le cas d'un creux triphasé équilibré de type A (figure 3.39), les trois tensions sont modifiées le long des axes réel et imaginaire de manière uniforme. En conséquence, le vecteur d'espace conserve sa forme circulaire ($SI = 1$), mais avec un rayon dépendant de la gravité de défaut

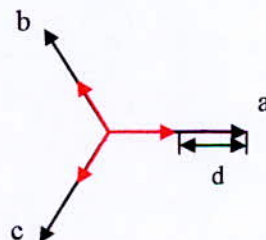


Figure 3.21 Signature des creux de tension triphasés

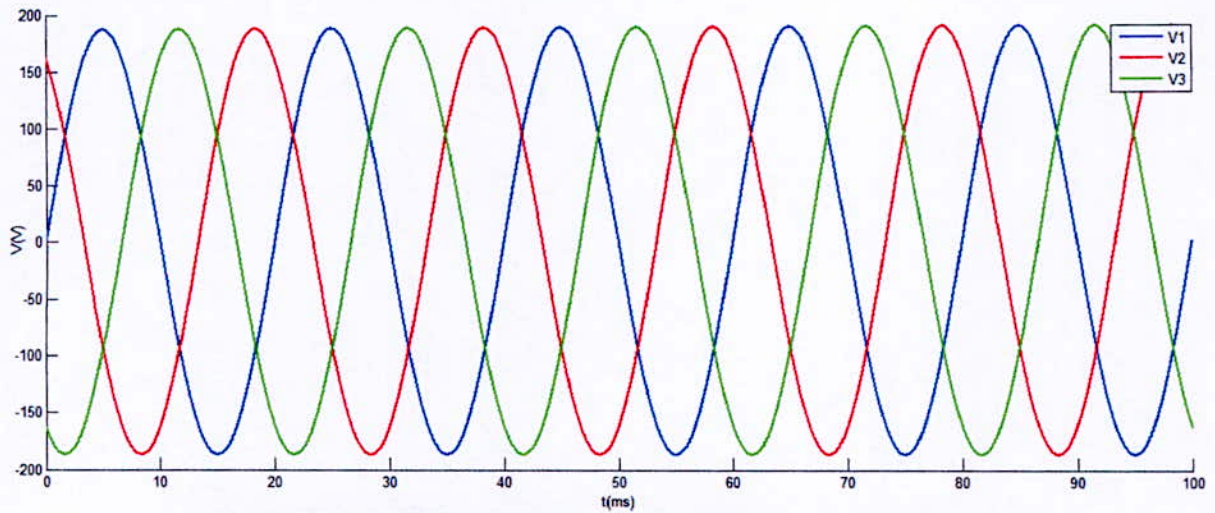


Figure 3.22 : Résultats d'application théorique et selon la MVE

résultats prédéterminés par les formules théoriques				Application de l'algorithme de la MVE		
$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^{\circ})$	x_0	$r_{maj}(V)$	$r_{min}(V)$	$\Phi_{inc}(^{\circ})$
186.7	186.7	-	0	186.7	186.7	-

Tableau 3.9 Caractéristiques des creux de tension biphasés

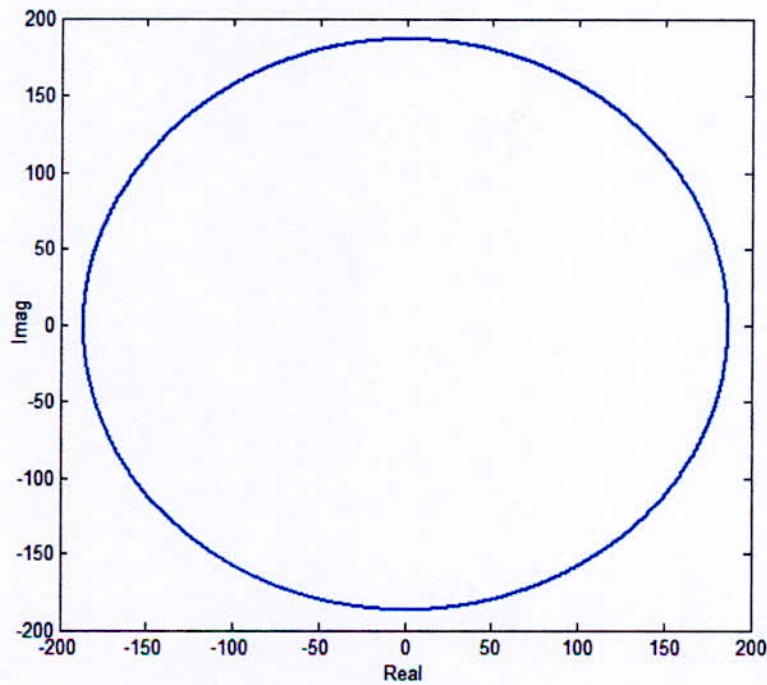


Figure 3.23 résultat de l'application de la M.V.E

TYPE	Vecteur d'espace				Composante homopolaire x_0
	SI	ϕ_{inc}	r_{min}	r_{maj}	
A	1	-	$(1-d)V$	$(1-d)V$	0

Tableau 3.10 Caractéristiques des creux de tension triphasés [1]

3.3.1.4 Creux de tension avec surtensions

Ces creux de tension sont particuliers, les modifications de la signature des systèmes triphasés sont représentées à la figure 3.24.

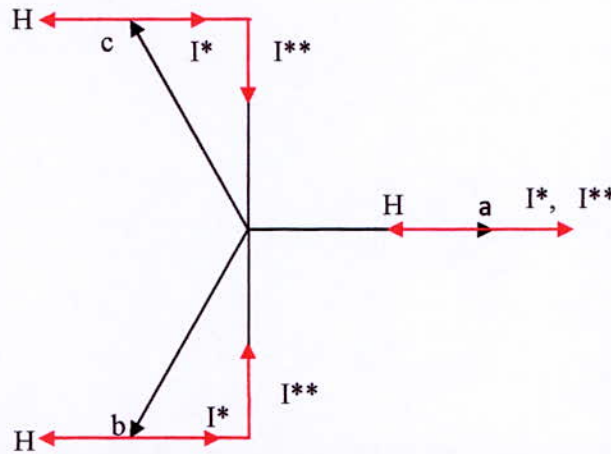


Figure 3.24 Signature des creux de tension avec surtension

Ce type de creux de tension est rare, sa particularité est de présenter en plus des chutes de tension sur les phases affectées par le défaut, des surtensions sur les phases restantes. Il se caractérise essentiellement par sa composante homopolaire, le tableau 3.4 résume l'ensemble de ces modifications.

TYPE	Vecteur d'espace				Composante homopolaire x_0
	SI	ϕ_{inc}	r_{min}	r_{maj}	
H	1	-	V	V	$-dV \cos(\omega_0 t + \varphi - (n-1)\frac{2\pi}{3})$
I*	1	-	V	V	$2dV \cos(\omega_0 t + \varphi - (n-1)\frac{2\pi}{3})$
I**	$\frac{4}{3}(1-d)V$	$(1-n)\frac{\pi}{3}$	$\frac{4}{3}(1-d)V$	V	$\frac{V}{2} \cos(\omega_0 t + \varphi - (n-1)\frac{2\pi}{3})$

Tableau 3.4 Caractéristiques des creux de tension avec surtension [1]

3.1 Analyse des creux de tension par la transformation du vecteur d'espace

L'analyse des creux de tension comprend quatre étapes : prétraitement, segmentation, classification et caractérisation. Chacune des étapes s'appuie sur les caractéristiques du vecteur d'espace et de la composante homopolaire.

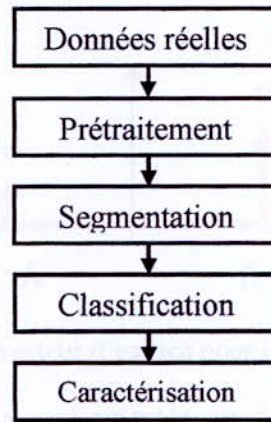


Figure 3.25 Etapes dans l'analyse des creux de tension

L'étape de prétraitement consiste à déterminer le vecteur d'espace et la composante homopolaire, et à extraire leurs traits caractéristiques. Dans l'étape suivante, les tensions enregistrées sont découpées en segments durant lesquels le système triphasé est sain ou subit un creux de tension. Les segments pour lesquels un creux de tension est détecté sont ensuite analysés et le type exact des creux est déterminé. La caractérisation est la dernière étape, durant laquelle la gravité des creux de tension est estimée. [1]

3.3.2.1 Extraction des traits caractéristiques des tensions mesurées

Le vecteur d'espace et la composante homopolaire sont déterminés par la transformation du vecteur d'espace à partir des tensions mesurées (équation 3.4). Les paramètres du vecteur d'espace utilisés pour l'analyse des creux de tension sont les rayons et l'inclinaison de la forme (cercle ou ellipse) qu'il parcourt dans le plan complexe. Ces paramètres ne peuvent pas être correctement estimés géométriquement en utilisant directement cette forme. En effet, les harmoniques et le bruit présents le plus souvent au sein des tensions mesurées déforment le cercle ou l'ellipse que devrait parcourir le vecteur d'espace. Ces déformations peuvent introduire des erreurs importantes dans l'estimation des paramètres du vecteur d'espace et par la suite, dans les étapes suivantes d'analyse des creux de tension.

Afin d'éviter l'effet néfaste des harmoniques et du bruit, on cherche à estimer les phaseurs positif et négatif du vecteur d'espace à la fréquence fondamentale : x_p et x_n . A partir de ces deux grandeurs, les caractéristiques de la forme du vecteur d'espace dans le plan complexe sont correctement estimées. Afin d'obtenir x_p et x_n , la transformée de Fourier est appliquée au vecteur d'espace. Pour la fréquence fondamentale, on obtient :

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x_p e^{j\omega_0 t} + x_n e^{-j\omega_0 t}) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} x_p e^{-j2\pi(f+f_0)t} dt + \int_{-\infty}^{+\infty} x_n e^{-j2\pi(f-f_0)t} dt \quad (3.13)$$

$$X(\omega) = x_p \delta(f + f_0) + x_n \delta(f - f_0) \quad (3.14)$$

où f_0 et ω_0 sont respectivement la fréquence et la pulsation fondamentale et $\delta(f)$ est l'impulsion de Dirac. L'équation 3.14 montre que la transformée de Fourier permet d'isoler facilement x_p et x_n grâce aux impulsions de Dirac à $\pm f_0$. Les modules de x_p et de x_n sont utilisés pour calculer les rayons de l'ellipse et leurs phases pour estimer son inclinaison (équations 3.8-10).

1) Estimation de r_{\min}

Le vecteur d'espace est estimé à chaque échantillon du signal en utilisant la transformée du vecteur d'espace instantanée (3.4). Ensuite, la transformée de Fourier discrète est appliquée à ce vecteur d'espace à chaque échantillon et sur une fenêtre glissante d'une période du fondamental. Les valeurs des phaseurs correspondants à la fréquence fondamentale positive (x_p) et négative (x_n) sont alors relevées, et le petit rayon est déterminé à partir de l'équation (3.8).

Le calcul de la TFD sur une fenêtre glissante d'une période implique que les variations brusques de l'amplitude des tensions triphasées seront représentées par des variations d'au moins une période dans

r_{\min} .

2) Segmentation de r_{\min}

Les variations dans la valeur de r_{\min} sont détectées par une double application de l'algorithme Cusum. Cet algorithme a été choisi grâce à sa simplicité et ses bonnes performances. L'algorithme Cusum part de l'hypothèse que le signal d'intérêt r_{\min} est de type aléatoire, à échantillons indépendants et identiquement distribués. Sa loi est supposée être de type gaussien, et sa moyenne est constante par morceaux. Son principe général est d'effectuer un test d'hypothèse séquentiel réalisé à chaque échantillon, afin de décider si la valeur moyenne des tous derniers échantillons a dévié de sa valeur courante. Ce test est basé sur la propriété du logarithme de la vraisemblance de changer le signe de sa valeur moyenne en fonction des changements de la valeur moyenne du signal.

3) Détermination de la zone de creux de tension à partir de r_{\min}

En sortie de l'algorithme de segmentation, on dispose donc du petit rayon r_{\min} décomposé en plusieurs segments. En effet, les appareils de mesure enregistrent les formes d'onde avant, pendant et après le défaut et de ce fait deux changements sont normalement détectés dans la valeur de r_{\min} pour un creux. Dans le cas de creux de tension à plusieurs niveaux, le nombre de changements détectés est alors supérieur à deux. La valeur moyenne de r_{\min} pour chaque segment est comparée à un seuil afin de déterminer si le segment considéré comporte un creux de tension. La valeur de ce seuil est fixée à partir de la définition des creux de tension. En effet, on a vu au chapitre 1 qu'un creux de tension représente une chute de la tension efficace de 0,1 pu à 0,9 pu. En conséquence, la profondeur minimale du creux de tension peut être estimée à 10% de la tension nominale, soit 0,1 pu.

4) Détermination de la zone de creux de tension à partir de x_0

Si un creux de tension n'est pas détecté grâce à r_{\min} , la même approche est appliquée à l'amplitude de la composante homopolaire afin de détecter un éventuel creux de tension de type H ou I. Si le nombre de segments est supérieur à 1, le segment affecté par le défaut est déterminé en comparant la valeur moyenne de x_0 à un seuil de 0,1 pu. Si des changements dans la composante homopolaire ne sont pas détectés, la forme d'onde enregistrée ne comporte pas de creux de tension.

Pour l'analyse ultérieure des creux de tension, la première et la dernière demi période du segment ne sont pas prises en compte (sauf dans le cas des creux de tension de durée inférieure à deux périodes), afin d'éviter l'impact des transitoires.

En fonction du type de mesure et du régime de neutre, l'algorithme peut être réduit à la segmentation d'une seule grandeur. En effet, dans le cas de mesures entre phases ou bien pour des systèmes à neutre mis à la terre, les creux de tension avec surtensions de type H et I n'ont pas lieu, et la segmentation est effectuée seulement sur le petit rayon.

La technique de segmentation proposée ici présente l'avantage d'analyser au maximum deux grandeurs (r_{\min} et x_0), d'être fiable et de nécessiter moins de temps du calcul que les méthodes classiques. [1]

3.1.1 Classification

L'introduction de la méthode du vecteur d'espace permet d'utiliser de nouvelles techniques de classification différentes de celles déjà vu au chapitre 2. On va présenter l'une de ces méthodes. Elle permet une classification exhaustive des creux de tension en différenciant également les creux de tension avec signature semblables (par exemple les trois types de creux monophasés et les trois types

de creux biphasés) L'algorithme de classification des creux de tension est présenté en figure 3.11. Il est constitué des étapes suivantes :

- 1) La transformation du vecteur d'espace est appliquée aux grandeurs triphasées pour le segment analysé (équation 3.4).
- 2) Les phaseurs du vecteur d'espace sont estimés à la fréquence fondamentale positive et négative en utilisant la transformée de Fourier discrète. Ils sont ensuite utilisés pour calculer les caractéristiques du vecteur d'espace dans le plan complexe : facteur de forme SI, angle d'inclinaison ϕ_{inc} , et rayons r_{min} et r_{maj} de l'ellipse.

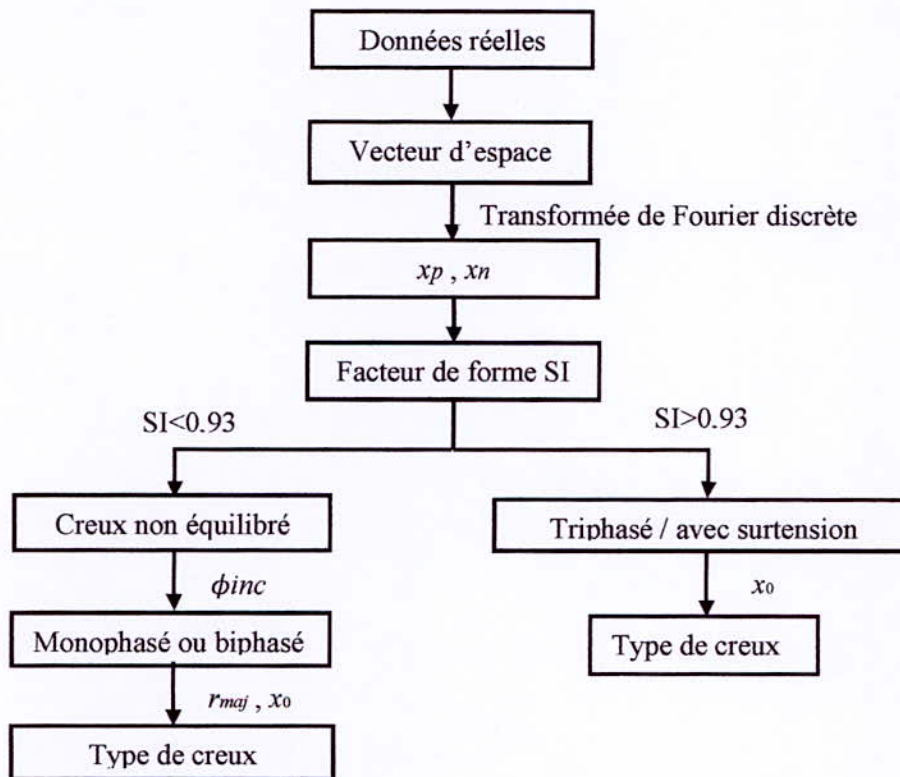


Figure 3.11 Algorithme de classification des creux de tension

3) Les creux de tension non équilibrés sont différenciés des creux de tension triphasés et des creux de tension avec surtensions grâce au facteur de forme SI.

Théoriquement, le facteur de forme est inférieur à 1 pour les creux de tension non équilibrés et égal à 1 pour les creux de tension triphasés ou avec surtensions. Cependant, en pratique, les creux de tension triphasés ou avec surtensions se caractérisent par un facteur de forme qui est proche, mais inférieur à cette valeur théorique, dû au fait que l'amplitude des tensions pendant le creux varie souvent en fonction de temps.

Une valeur limite pour le facteur de forme SI permettant de différencier les creux non équilibrés des creux triphasés ou avec des surtensions doit donc être déterminée. La définition des creux de tension vue au chapitre 1 permet d'affirmer que la profondeur minimale d'un creux est de $d = 0,1pu$, ce qui correspond à un facteur de forme maximal allant de 0,86 à 0,93 en fonction du type de creux (voir Tableau 3.1-4). De ce fait, un creux de tension avec un facteur de forme supérieur à 0,933 est considéré comme un creux de tension triphasé ou avec surtension, et un creux de tension avec un facteur de forme inférieur à cette valeur est considéré comme un creux de tension monophasé ou biphasé.

4) L'inclinaison de l'ellipse différencie les creux monophasés des creux biphasés et détermine la/les phase(s) en chute. En effet, l'angle entre le grand rayon de l'ellipse et l'axe réel ϕ_{inc} défini à la figure 3.12 permet de déterminer les phases en chute. Ce résultat est illustré à la figure 3.11, où les creux

monophasés sont désignés par Mono et les creux biphasés par Bi, suivi des phases affectées par le creux.

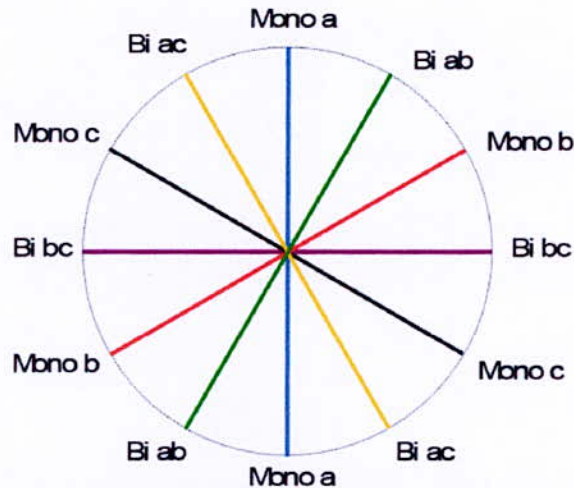


Figure 3.12 Type de creux de tension en fonction de l'angle d'inclinaison de l'ellipse

L'angle d'inclinaison de l'ellipse prend rarement des valeurs exactement multiples de 30° . Pour cette raison, l'index k est introduit afin de déterminer le type de creux et de faciliter l'intégration de l'algorithme dans un logiciel dédié. La relation entre l'index k , l'angle d'inclinaison de l'ellipse et les types de creux de tension sont donnés au tableau 3.5.

ϕ_{inc}	$0 \pm 15^\circ$	$30^\circ \pm 15^\circ$	$60^\circ \pm 15^\circ$	$90^\circ \pm 15^\circ$	$120^\circ \pm 15^\circ$	$150^\circ \pm 15^\circ$
K	0	1	2	3	4	5
Type de creux	BI bc	Mono b	Bi ab	Mono a	Bi ac	Mono c

Tableau 3.5 Type de creux de tension en fonction de l'inclinaison de l'ellipse

5) Déterminer le type du creux de tension en utilisant la tension homopolaire et le grand rayon de l'ellipse. Comme dans le cas de facteur de forme, des seuils doivent être introduits pour la composante homopolaire et le grand rayon de l'ellipse. Ces seuils peuvent être calculés à partir de la profondeur du creux estimée à partir de la valeur de r_{min} , ou déterminés par des observations du réseau analysé.

6) Différencier les creux de tension triphasés et les creux de tension avec surtension, Si la perturbation mesurée est classifiée comme un creux de tension triphasé ou comme un creux de tension avec surtension, la composante homopolaire est utilisée pour la détermination exacte du type de creux. Si l'amplitude de la tension homopolaire est en dessous d'un certain seuil positif, le creux de tension est classifié comme triphasé. Dans le cas contraire, le creux de tension mesuré se caractérise par des surtensions. Dans ce cas, la phase de la composante homopolaire indique le type de creux : monophasé (type H) ou biphasé (type I), ainsi que les phases affectées par le défaut comme indiqué à la figure 3.12.

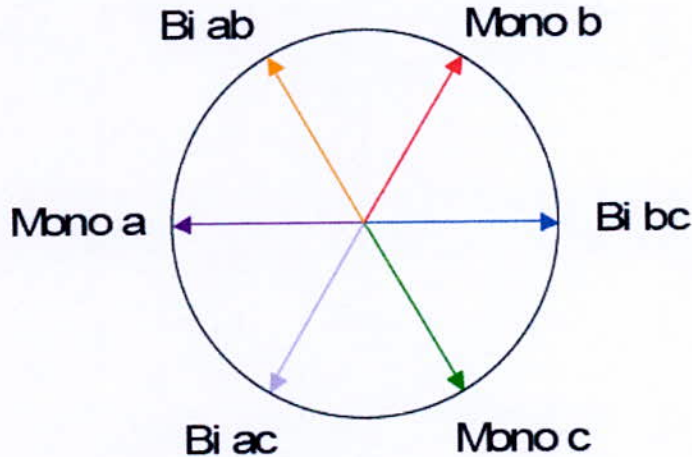


Figure 3.13 Type de creux de tension en fonction de la phase de la composante homopolaire [1]

3.3.2.4 Caractérisation

Deux approches pour estimer la gravité des creux de tension par la transformation du vecteur d'espace sont possibles. La première approche consiste à évaluer la gravité des creux de tension par leur profondeur. Pour des creux de tension de type de A à G, la gravité des creux est estimée par le petit rayon de l'ellipse r_{\min} , qui dépend directement de la profondeur des creux de tension d (voir Tableau 3.1-3). Pour des creux de tension de type H et I, le petit rayon de l'ellipse reste égal à la tension nominale. Dans ce cas, l'amplitude de la composante homopolaire est utilisée pour estimer la gravité des creux de tension, car elle est proportionnelle à leur profondeur (voir Tableau 3.4).

La deuxième approche consiste à estimer la gravité des creux de tension par la surface de la forme parcourue par le vecteur d'espace dans le plan complexe. En effet, elle est directement proportionnelle à l'impact des creux de tension sur les équipements. Par exemple, pour une durée et une profondeur de creux de tension données, les creux de tension triphasés sont les plus sévères, suivis par les creux de tension biphasés puis monophasés. Les creux de tension avec surtensions se caractérisent par la même surface pour la forme parcourue par le vecteur d'espace qu'en conditions normales. En effet, ces types de creux de tension ne se propagent pas et ne sont pas « vus » par les charges généralement connectées en triangle au niveau MT, et ne sont donc pas considérés comme sévères. Cette approche est donc très appropriée pour l'analyse des creux de tension triphasés. [1]

CONCLUSION

L'analyse des problèmes de la qualité de l'énergie électrique par la transformation du vecteur d'espace est abordée dans ce chapitre. Une approche générale a été présentée pour le cas de perturbations de type creux de tension mais qui reste valable pour les perturbations qui touchent l'amplitude (déséquilibre). La transformation du vecteur d'espace présente l'avantage de faciliter l'analyse des perturbations en utilisant moins de variables. De plus, elle est applicable à tous les types de perturbations avec des performances qui varient selon le type de perturbation.

Chapitre 4 : Etude de cas pratiques de détérioration de la Qualité de l'Energie Electrique

Ce chapitre a pour but l'étude des cas réels de dégradation de l'énergie électrique en utilisant les notions vues dans le chapitre 1 et les techniques et outils d'analyse présentés dans les chapitre 2 et 3. Cela permettra de mieux connaître certaines perturbations, leurs mesures et leurs conséquences pour aboutir à des solutions qui seront présentées et explicitées plus loin. L'ensemble des manipulations sera à la base des travaux pratiques présentés en conclusion de la thèse et qui abordera le thème de la qualité de l'énergie électrique.

4.1 Cas de perturbations sur l'amplitude

déséquilibre est une perturbation qu'on retrouve souvent dans les circuits triphasés. C'est une perturbation permanente qui touche l'amplitude ou la phase dans un système triphasé. Deux cas sont proposés, le premier c'est un déséquilibre en charge donc en courant et le deuxième c'est une simulation de déséquilibre de tension. L'outil principal utilisé pour analyser ces deux cas sera la Méthode du Vecteur d'Espace déjà exposé au chapitre précédent.

4.1.1 Déséquilibre en courant de charges linéaires

On dispose de lampes à incandescences (charges linéaires) de puissance de 40 W, qu'on va répartir de façon inégale sur les trois phases sous 220V montage étoile; deux lampes sur les phases une et deux et une seule lampe sur la troisième phase. On va relever les courants qui circulent dans chaque phase et donc la signature du déséquilibre qu'on va analyser à l'aide de la M.V.E.

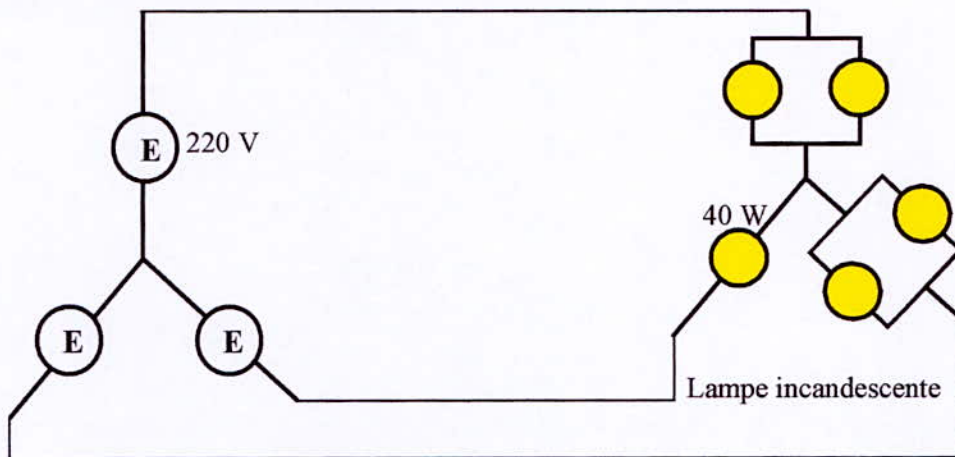


Figure 4.1 Schéma du montage

Résultats

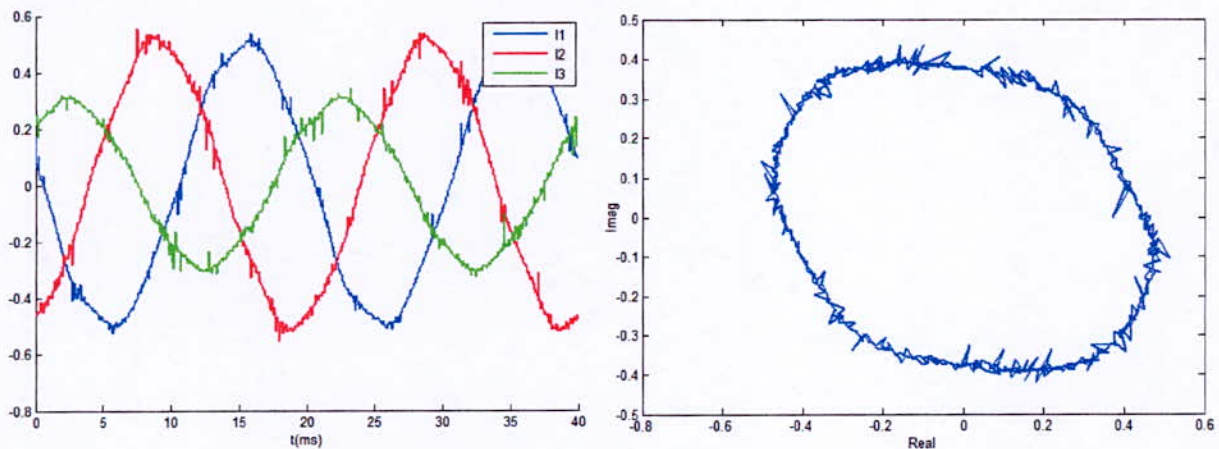


Figure 4.2 Représentation temporelle et dans le plan complexe d'un déséquilibre de courant causé par un déséquilibre de charges

$r_{maj}(A)$	$r_{min}(A)$	$\varphi_{inc}(^\circ)$
0.55	0.33	150.53

Analyse

On va utiliser l'algorithme de classification des creux de tension (figure 3.11) mais cette fois on l'applique à notre cas. Le facteur de forme est de : $S/I = 0.60$, il s'agit donc d'une perturbation qui ne touche pas toutes les phases. Le grand axe fait un angle de 150.53° avec l'axe des réels, d'après la figure 3.12 qui donne les inclinaisons des différents types de creux de tension (déséquilibre de courant dans notre cas) il s'agit bien d'une perturbation qui touche uniquement la phase 3.

4.1.2 Déséquilibre en tension sur des charges linéaires

On va simuler un système triphasé déséquilibré (220, 220, (1-d)*220, d=0.5), le tous qui alimente une charge triphasé équilibré (80W, $F_p= 1$)

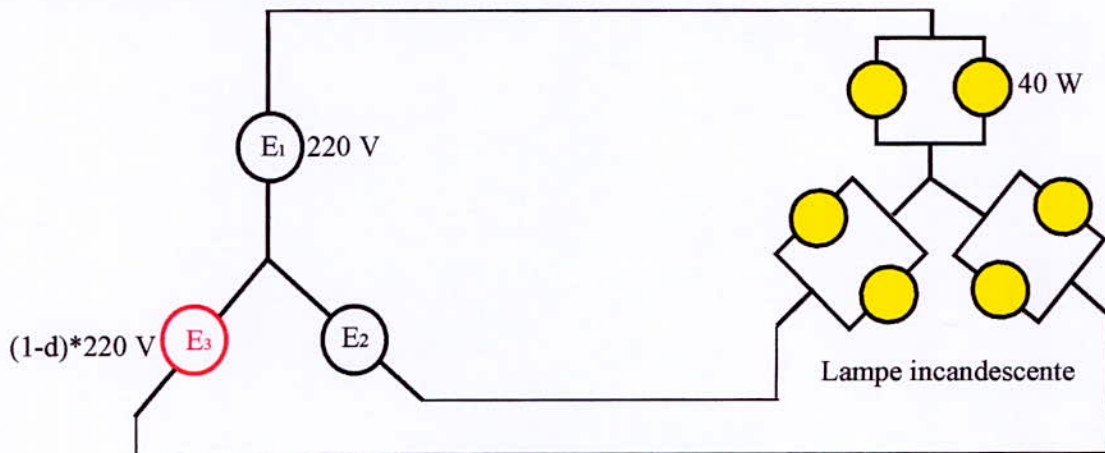


Figure 4.3 Schéma du montage

Résultats

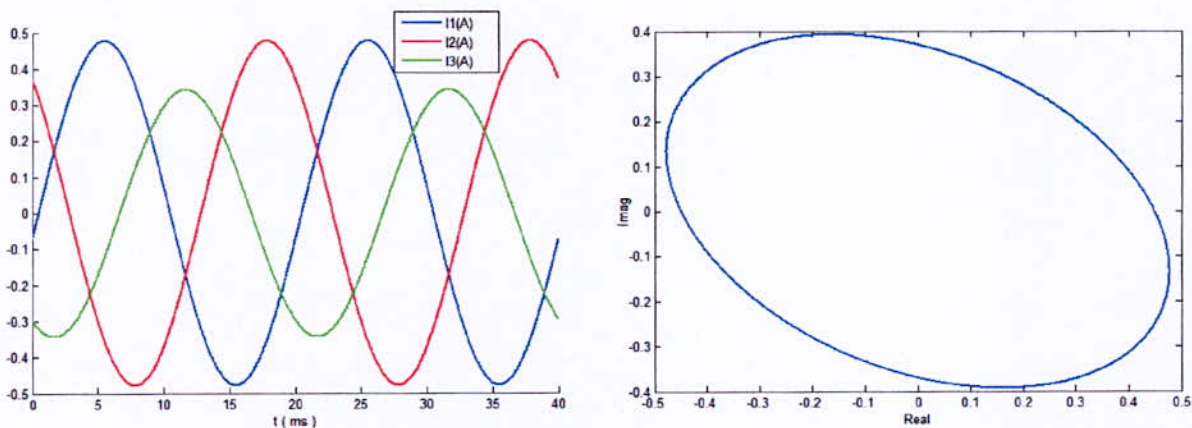


Figure 4.4 Représentation temporelle et dans le plan complexe d'un déséquilibre en courant causé par un déséquilibre en tension

$r_{maj}(A)$	$r_{min}(A)$	$\varphi_{inc}(^\circ)$
0.51	0.34	150.04

Analyse

On retrouve la même signature que dans le cas précédent, pour deux perturbations différentes la signature est la même. Ceci nous interpelle sur le fait de prendre en considération les deux grandeurs tension et courant lorsqu'on veut analyser ce type de perturbation, en effet les tensions dans les deux cas sont différentes, dans le premier cas le système de tension est équilibré alors que dans le deuxième ce n'est pas le cas.

Différents défauts peuvent entraîner des perturbations identiques si on ne prend en considération que la grandeur courant, une bonne analyse est celle où les deux grandeurs tension/courant sont prises en comptes.

4.2 Etude du Facteur de puissance et l'influence de son amélioration sur les harmoniques

On va à présent s'intéresser à un autre type de perturbations qui touchent de plus en plus de réseaux électriques, il s'agit des perturbations harmoniques qui modifient la forme de l'onde. Deux exemples de charges non linéaires sont étudiés, d'abord l'éclairage ou le souci des économies d'énergies poussent vers de nouveaux concepts de lampes qui peut être consomment moins mais consomment différemment, puis un autre exemple avec un convertisseur AC-DC (redresseur commandé) ou le but est de sensibiliser à l'utilisation grandissante de l'électronique de puissance qui provoque un certain nombre de problèmes.

4.2.1 Etude du facteur de puissance de plusieurs types de charges

Dans cette première étude, nous allons montrer l'existence des harmoniques et mettre en évidence leurs conséquences directes sur la dégradation du facteur de puissance, on va aussi lever l'amalgame qu'on fait souvent entre facteur de puissance (Fp) et facteur de déphasage ($\cos\phi$). Pour cela, nous ferons une comparaison entre trois types d'éclairage qui sont d'ailleurs les plus utilisées et on va vérifier certaines idées reçues sur ce type de charges.

Grandeurs et indices utilisés

Afin d'identifier les charges étudiées, nous allons présenter les notions et définitions suivantes :

La puissance active (P) : c'est la puissance moyenne consommée :

$$P = \int_0^T v(t) \times i(t) dt \quad (4.1)$$

Les normes imposent aux fournisseurs une tension comportant au plus une déformation de 5% , l'onde de tension est presque sinusoïdale

$$V = V_1$$

Par contre le courant lui peut comporter des harmoniques si la charge alimentée est non linéaires :

$$P = \int_0^T V\sqrt{2} \cos(\omega t) \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \cos(n\omega t - \varphi_n) dt$$

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} 2 V_1 \times \int_0^T I_n \cos(\omega t) \cos(n\omega t - \varphi_n) dt$$

$$P = 2 V I_1 \int_0^T \cos(\omega t) \cos(\omega t - \varphi) dt + \sum_{n=2}^{\infty} 2 V_1 \times \int_0^T I_n \cos(\omega t) \cos(n\omega t - \varphi_n) dt$$

$$P = V I_1 \int_0^T \frac{1}{2} (\cos(\varphi) + \cos(2\omega t - \varphi)) dt + \sum_{n=2}^{\infty} V \times \int_0^T \frac{1}{2} I_n (\cos((n-1)\omega t - \varphi_n) + \cos((n+1)\omega t - \varphi_n)) dt$$

$$P = 2 V I_1 \left(\frac{1}{2} (\cos(\varphi) + \int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt) \right) + \sum_{n=2}^{\infty} 2 V \times \int_0^T \frac{1}{2} I_n (\cos((n-1)\omega t - \varphi_n) + \cos((n+1)\omega t - \varphi_n)) dt$$

$$P = 2 V I_1 \left(\frac{1}{2} (\cos(\varphi) + \int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt) \right) + \sum_{n=2}^{\infty} 2 V \times \int_0^T \frac{1}{2} I_n (\cos((n-1)\omega t - \varphi_n) + \cos((n+1)\omega t - \varphi_n)) dt$$

Sachant que $\int_0^T \cos(k\omega t - \varphi) = 0$ pour $k \neq 0$

On obtient

$$P = V I_1 \cos(\varphi) \tag{4.2}$$

La puissance apparente (S) : c'est le produit des valeurs efficaces de courant et de la tension

$$S = V \times I \tag{4.3}$$

$$S^2 = V^2 \times I^2$$

$$S^2 = V^2 \times \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2$$

$$S^2 = V^2 \times I_1^2 + V_1^2 \times \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2$$

$$S^2 = V^2 \times I_1^2 (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) + V_1^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

La puissance réactive (Q) : cette composante de la puissance normale est due au déphasage entre les ondes des fondamentales de la tension et du courant, ce déphasage reflète le caractère inductif ou capacitif de la charge.

$$Q = V I_1 \sin \varphi \tag{4.4}$$

$$THD(I) = \frac{D}{S} \tag{4.10}$$

En remplaçant la puissance déformante de l'équation (4.9) et la puissance normale de l'équation (4.6) dans l'équation (4.10) ; on peut faire le lien entre les différents facteurs :

$$THD(I) = \sqrt{(1 - Fp^2(1 + tg^2\varphi))} \tag{4.11}$$

Tous les grandeurs qu'on vient d'exposer peuvent être ramenés à trois variables qui permettent de décrire complètement la consommation électrique, qui sont :

La puissance active P,

Le facteur de déphasage $\cos\varphi$ ou le taux de distorsion harmonique THD(I).

Le facteur de puissance Fp

Tension utilisée

La première étape dans le processus d'étude est de faire des essais pour identifier complètement les charges. On va pour cela utiliser une alimentation 220V dont les caractéristiques sont les suivantes :

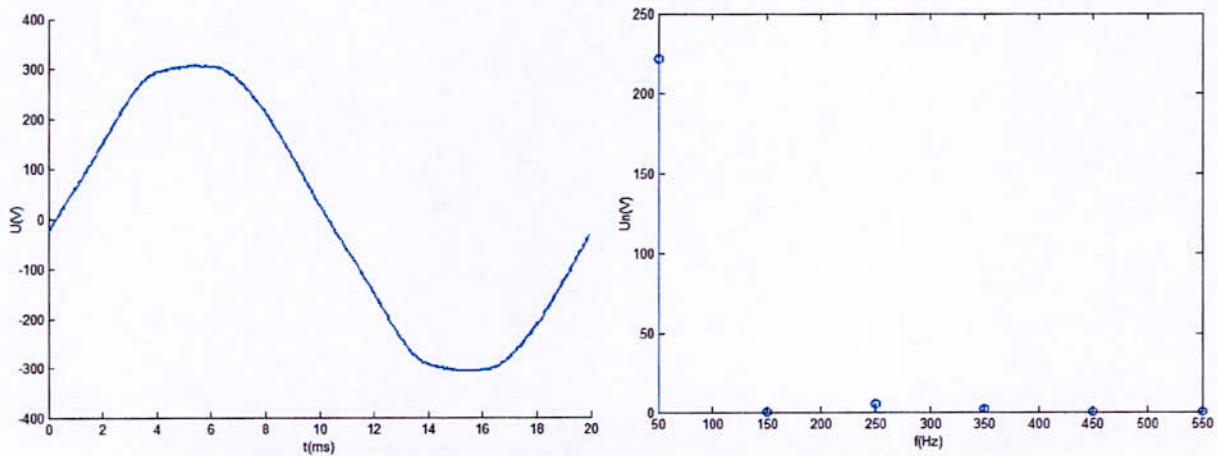
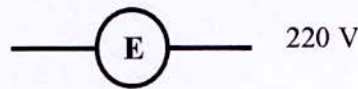


Figure 4.5 Représentation temporelle et spectre de la tension du réseau

$$V_{eff} = 222.0616 \text{ V}$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante U_n en V	221.97	0.37	5.53	2.21	0.18	0.25
Taux individuel de distorsion H_n en %	99.96	0.17	2.49	0.99	0.08	0.11

Taux global de distorsion $THDV(V) = 2.72 \%$

Il s'agit donc d'une tension presque parfaitement sinusoïdale avec une valeur efficace qui est de 1% supérieur à 220V.

Charges utilisées :

On choisi comme objet d'étude trois concepts d'éclairages qui sont les lampes à incandescence, les tubes fluorescents et les lampes fluo compacts. L'éclairage incandescent est le premier concept qui a été développé (Annexe 1), d'autres inventions ont vu le jour comme les tubes fluorescents utilisés généralement pour l'éclairage de grandes superficies. Les lampes fluo compacts appelées aussi lampes à basse consommation sont la dernière génération de ces tubes, leur principe de fonctionnement a été étudié pour réduire au maximum leur consommations, d'ailleurs dans un certain nombre de pays leur utilisation deviendra obligatoire pour remplacer les lampes à incandescence et ceci bien qu'ils suscitent toujours un vif débat au sein de la communauté scientifique sur la réalité de leurs efficacité d'un coté et de leurs conséquences éventuelles sur la santé de l'autre. Nous allons essayer d'apporter quelques réponses sur le sujet par notre étude.

a) Lampes à incandescence

Il s'agit deux lampes de puissance 40W qu'on va mettre en parallèle sous une tension de 220V. Les caractéristiques du constructeur sont données dans l'annexe A. On va relever le courant qui est absorbé par cette charge à l'aide d'un shunt de 1A et d'un oscilloscope numérique connecté à un ordinateur : la GS2020 (annexe B).

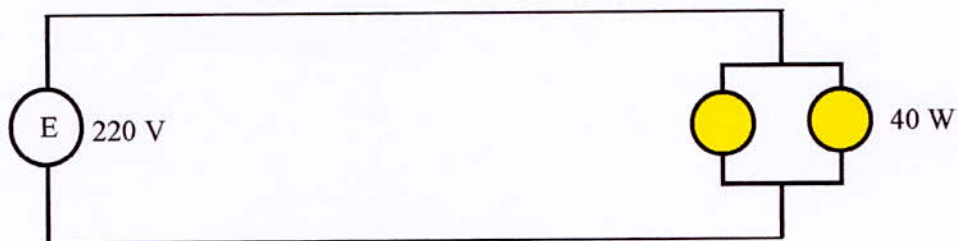


Figure 4.6 Schéma du montage

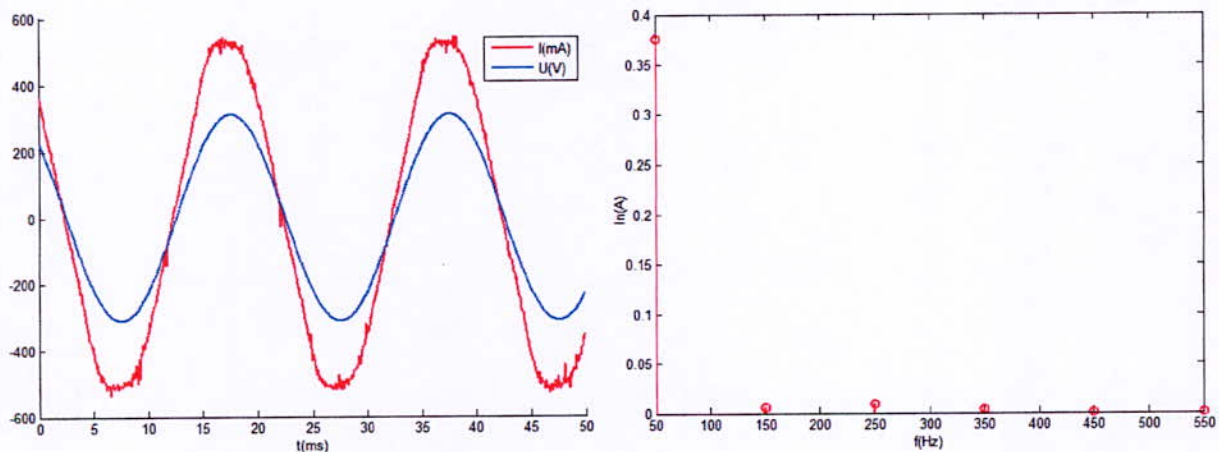


Figure 4.7 Caractéristiques du courant absorbé par un éclairage à incandescence

Valeur du courant efficace :

$$I_{eff} = 0.38 A$$

Valeur du courant efficace donné par l'ampèremètre :

$$I_{eff} = 0.36 A$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.3759	0.0053	0.0092	0.0032	0.0004	0.0005
Taux individuel de distorsion H_n en %	99.60	1.40	2.44	0.85	0.11	0.13

Taux global de distorsion en courant $THD(I) = 3.09 \%$

P(W)	Q(VAR)	D(VA)	S(VA)	$\cos(\varphi)$	Facteur de puissance
82.43	6.73	2.55	82.75	0.9967	0.9962

b) Tubes fluorescents

Il s'agit de deux règles (tubes) fluorescents qu'on monte en parallèle et qu'on alimente sous 220V. Les caractéristiques données par le constructeur sont également données dans l'annexe A. Le même procédé de mesure est répété.

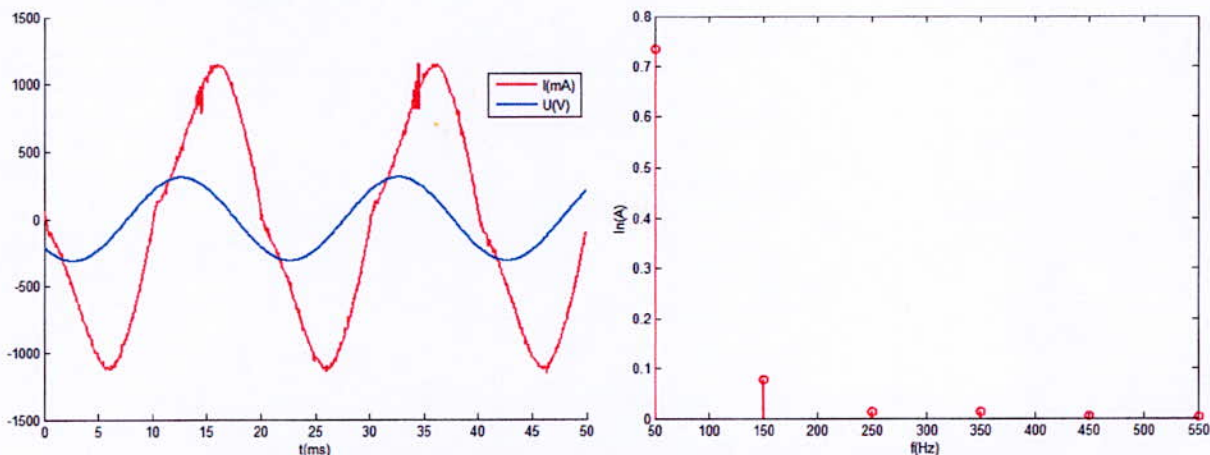


Figure 4.8 Caractéristique du courant absorbé par un éclairage fluorescent

Valeur efficace du courant

$$I_{eff} = 0.74 A$$

Valeur efficace du courant donnée par l'ampèremètre

$$I_{eff} = 0.67 A$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.7353	0.0776	0.0132	0.0131	0.0056	0.0035
Taux individuel de distorsion H_n en %	99.22	10.47	1.78	1.77	0.76	0.48

Taux global de distorsion $THD(I) = 10.90 \%$

P(W)	Q(VAR)	D(VA)	S(VA)	$\cos(\varphi)$	Facteur de puissance
96.39	129.91	17.74	162.73	0.5959	0.5923

c) Lampes à basse consommation

Le dernier type d'éclairage étudié est celui qui est dit basse consommation, on utilise une seule lampe par phase, les caractéristiques du constructeurs sont également données dans l'annexe A.

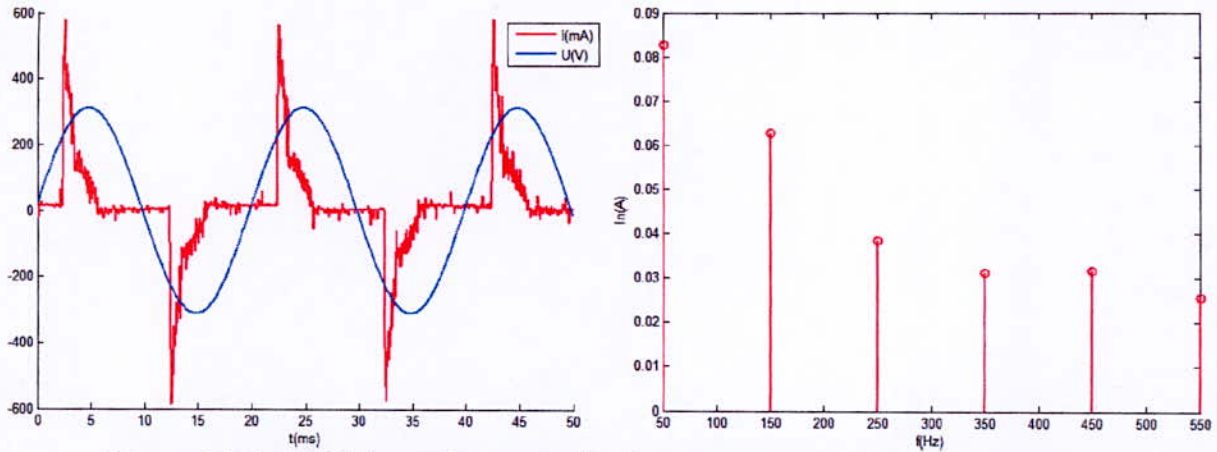


Figure 4.9 Caractéristiques du courant absorbé par un éclairage basse consommation

Valeur efficace du courant

$$I_{eff} = 0.13 \text{ A}$$

Valeur efficace du courant donné par l'ampèremètre

$$I_{eff} = 0.07 \text{ A}$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.0828	0.0628	0.0385	0.0313	0.0315	0.0257
Taux individuel de distorsion H_n en %	63.11	47.87	29.35	23.86	24.01	19.59

Taux global de distorsion

$$THD(I) = 77.73 \%$$

P(W)	Q(VAR)	D(VA)	S(VA)	cos(φ)	Facteur de puissance
15.80	9.05	22.50	28.95	0.8678	0.5459

Récapitulation

	lampes à incandescence	tubes fluorescents	Lampes à basse consommation
P(W)	82.43	96.39	15.80
Q(VAR)	6.73	129.91	22.50
D(VA)	2.55	17.74	22.55
S(VA)	82.75	162.73	28.95

I(A)	0.38	0.74	0.13
cos (φ)	0.9967	0.5923	0.8678
Facteur de puissance	0.9962	0.5959	0.5459
THD(I) (%)	3.09	10.90	77.73

Analyse

- Une lampe ordinaire consomme la même puissance active qu'un tube fluorescent mais consomme cinq fois la puissance d'une lampe à basse consommation.
- Si on regarde maintenant le courant total appelé à travers la puissance normale(S), une lampe à basse consommation consomme 3 fois moins qu'une lampe ordinaire et non pas cinq alors qu'un tube fluorescent consomme carrément le double pour la même puissance active.
- Les lampes à basse consommation sont très polluantes d'un point de vue harmonique mais cette pollution est tempérée par la faible puissance de ces lampes, les tubes fluorescents ont une distorsion plus faible que les L.B.C mais vu que leur puissance est nettement supérieure, la déformation qui en résulte est du même ordre.
- Les appareils de mesure classiques ne peuvent pas relever correctement les valeurs efficaces du courant lorsqu'il est pollué, et plus il y'a d'harmonique et moins le résultat est fiable.
- Une comparaison rigoureuse entre les charges étudiées ne doit pas se contenter d'une analyse superficielle de la puissance active consommée, les autres facteurs doivent être pris en compte pour un éventuel choix de dimensionnement d'une installation.

4.2.2 Influence du type de montage sur les harmoniques

Les harmoniques peuvent être atténuées ou amplifiées selon le montage. Dans cette partie nous allons suivre la propagation des harmoniques dans les deux montages : étoile et triangle pour déterminer les montages qui permettent de réduire la pollution harmonique.

4.2.2.1 Montage triangle

Comme charge triphasée équilibrée, nous utilisons les tubes fluorescents (THD(I)=10%), deux règles par phase puis des lampes à basse consommation (THDI=75%), une seule lampe par phase sous 220 V. Nous allons relever le spectre du courant de phase puis du courant de ligne.

a) Tubes fluorescents

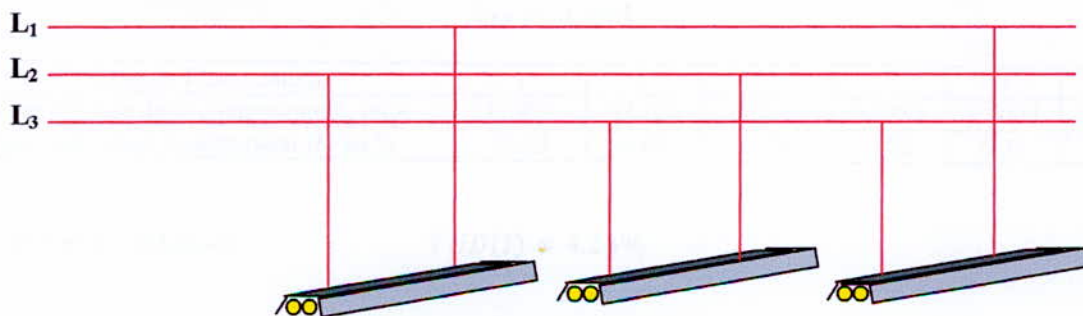


Figure 4.10 Schéma du montage

c) Lampes à basse consommation

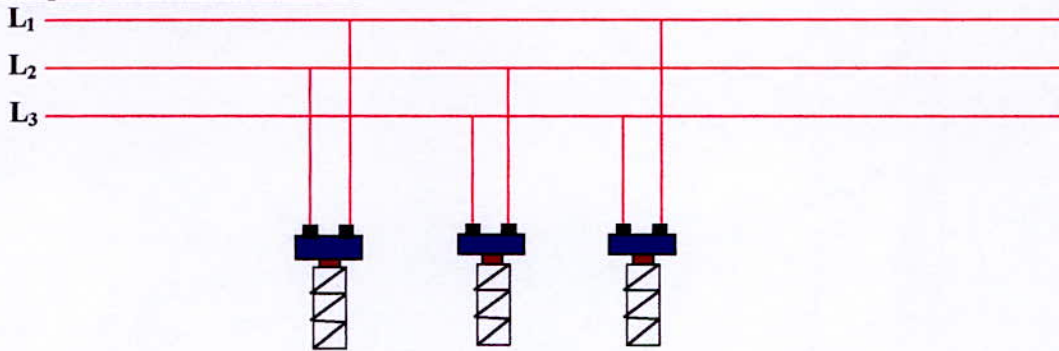


Figure 4.13 Schéma du montage

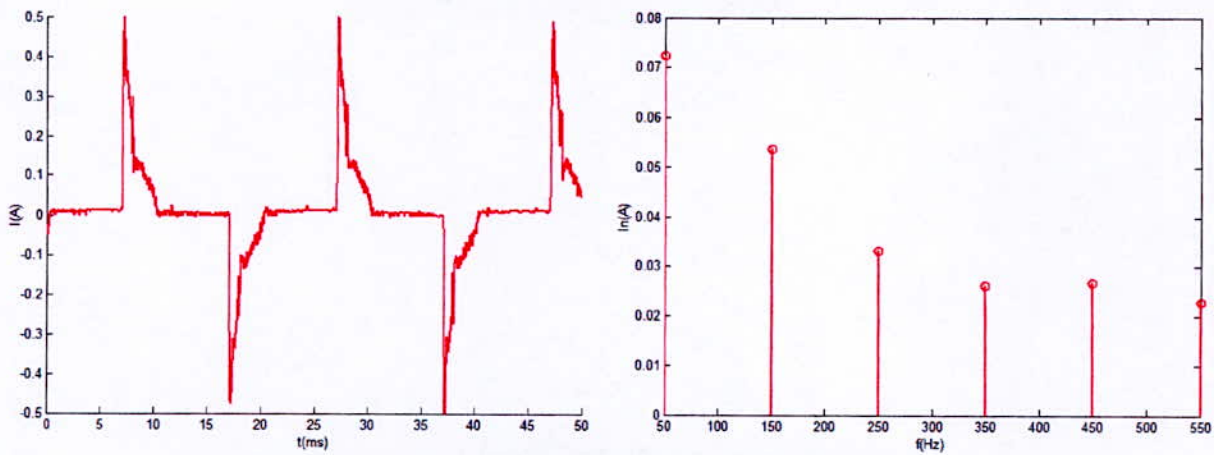


Figure 4.14 caractéristiques du courant de phase

$$J_{eff} = 0.11 A$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante J_n en A	0.0724	0.0537	0.0331	0.0262	0.0267	0.0229
Taux individuel de distorsion H_n en %	63.90	47.40	29.22	23.12	23.57	20.21

Taux global de distorsion

$$THD(J) = 76.94 \%$$

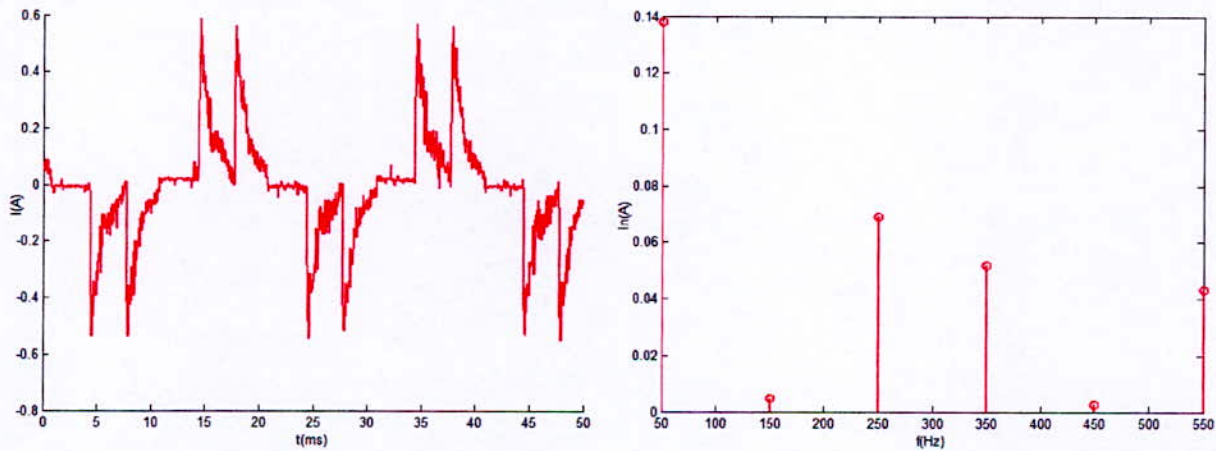


Figure 4.15 caractéristiques du courant de ligne

$$I_{eff} = 0.18 \text{ A}$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.1381	0.0047	0.0689	0.0520	0.0028	0.0432
Taux individuel de distorsion H_n en %	75.59	2.57	37.71	28.46	1.53	23.65

Taux global de distorsion $THDI(I) = 63.34 \%$

Tableau récapitulatif

	Tubes fluorescents		Lampes fluo compacts	
	Phase	Ligne	Phase	Ligne
Valeur efficace du courant(V)	0.80	1.40	0.11	0.18
Taux de distorsion THD(I) (%)	10.64	4.24	76.94	63.34

Analyse

Quand on compare les spectres des courants de phase et de ligne, on remarque que l'harmonique 3 et plus généralement les harmoniques de rang $3k$ sont fortement atténués. Pour expliquer ce phénomène nous allons revenir au développement de Fourier :

$$\left\{ \begin{array}{l} J_1 = \sum_{n=1}^{\infty} J_n \cos n(\omega t - \varphi_n) \\ J_2 = \sum_{n=1}^{\infty} J_n \cos n(\omega t - \varphi_n - \frac{2\pi}{3}) \\ J_3 = \sum_{n=1}^{\infty} J_n \cos n(\omega t - \varphi_n - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right.$$

Le courant dans la ligne sera comme suit :

$$I_{12} = J_1 - J_2$$

Si on s'intéresse aux harmoniques de rang $n=3k$ du courant composé on trouve :

$$I_{12-3k} = \sum_{k=1}^{\infty} J_{3k} \cos 3k(\omega t - \varphi_{3k}) - \sum_{k=1}^{\infty} J_{3k} \cos 3k(\omega t - \varphi_{3k} - \frac{2\pi}{3})$$

$$I_{12-3k} = \sum_{k=1}^{\infty} J_{3k} \cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k}) - \sum_{k=1}^{\infty} J_{3k} \cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k} - 3k\frac{2\pi}{3})$$

$$I_{12-3k} = \sum_{k=1}^{\infty} J_{3k} (\cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k}) - \cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k} - 2k\pi)) = 0$$

Une solution simple pour se débarrasser des harmoniques de rang $3k$ lorsqu'elles existent serait de faire un choix de transformateur étoile-triangle.

Atténuer les harmoniques de façon générale et l'harmonique 3 de façon particulière qui est généralement celle avec l'amplitude la plus importante, permet de diminuer la distorsion et donc de relever le facteur de puissance ce qui va se traduire par un courant total plus faible.

4.2.2.2 Montage étoile

Dans cette partie nous allons nous intéresser au spectre des courants de phase et dans le neutre. On va montrer ce qui se passe quand es harmoniques se rejoignent dans le neutre.

a) Tubes fluorescents

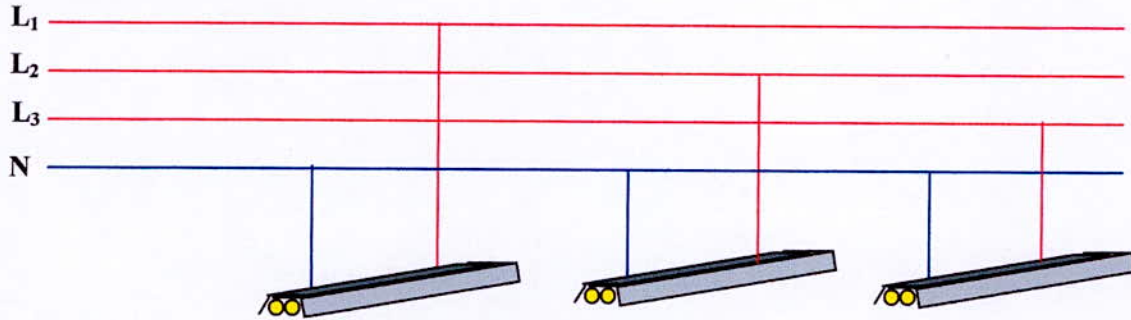


Figure 4.16 schémas du montage

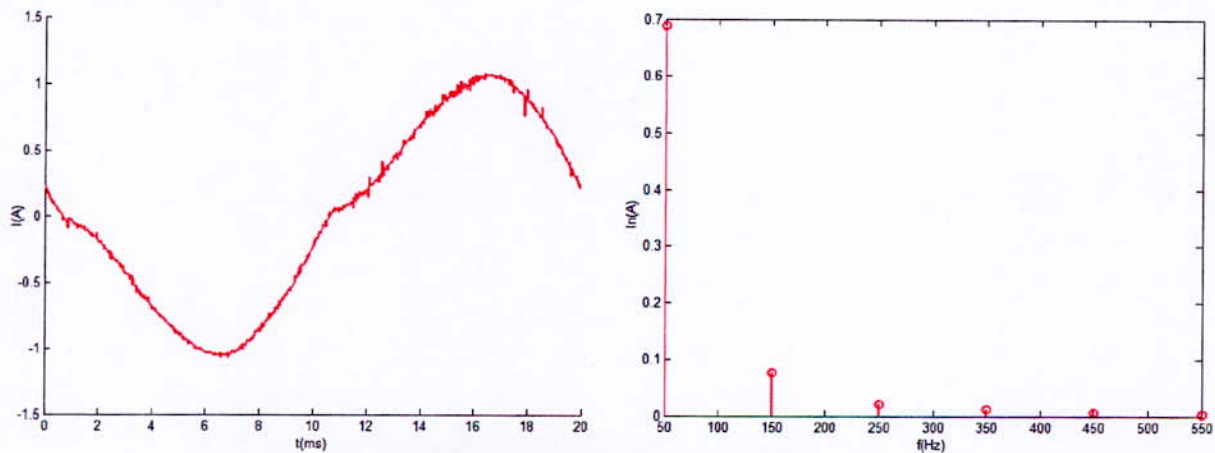


Figure 4.17 Caractéristique du courant dans de phase

$$I_{eff} = 0.69 A$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.6880	0.0757	0.0208	0.0121	0.0069	0.0030
Taux individuel de distorsion H_n en %	99.29	10.93	3.01	1.75	1.00	0.43

Taux global de la distorsion

$$THD(I) = 11.58 \%$$

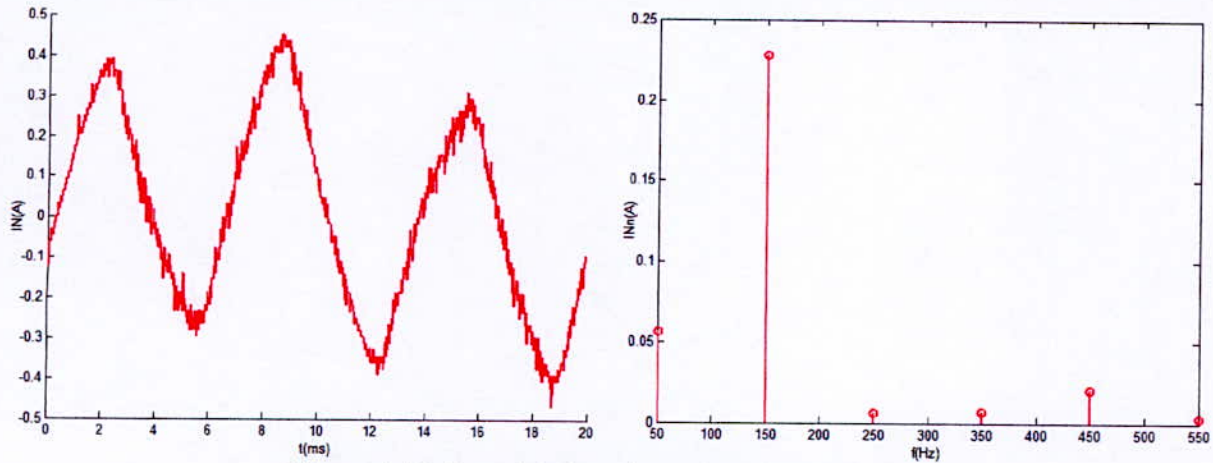


Figure 4.18 Caractéristique du courant dans el neutre

$$I_{Neff} = 0.24 A$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante IN_n en A	0.0563	0.2278	0.0059	0.0006	0.0199	0.0027
Taux individuel de distorsion H_n en %	23.79	96.24	2.49	0.25	8.41	1.14

Taux global de la distorsion $THD(I_N) = 96.79 \%$

b) Lampes à basse consommation

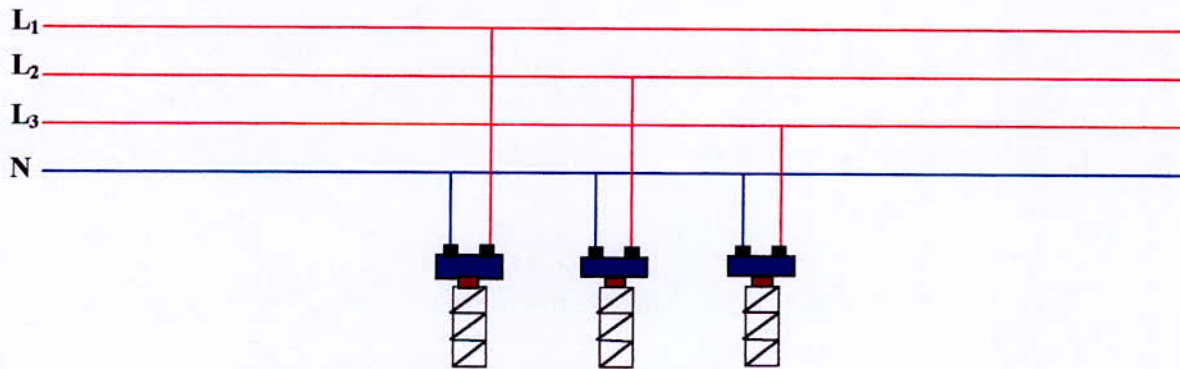


Figure 4.19 schémas du montage

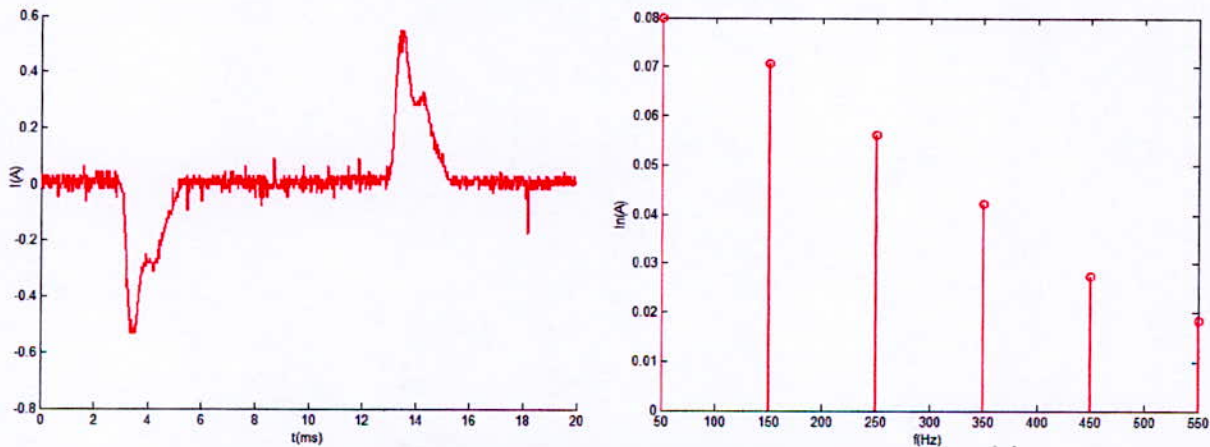


Figure 4.20 Caractéristique du courant de la phase

$$I_{eff} = 0.14 A$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.0799	0.0708	0.0562	0.0421	0.0274	0.0184
Taux individuel de distorsion H_n en %	57.15	50.64	40.20	30.11	19.60	13.16

Taux global de la distorsion

$$THD(I) = 80.95 \%$$

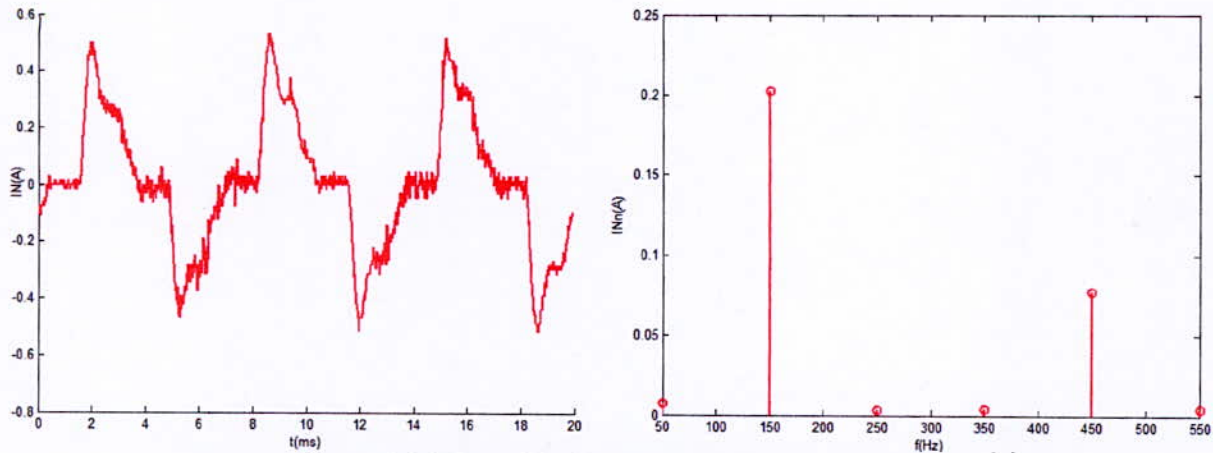


Figure 4.21 Caractéristique du courant dans le neutre

$$I_{Neff} = 0.23 A$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_{Nn} en A	0.0074	0.2024	0.0033	0.0045	0.0772	0.0040
Taux individuel de distorsion H_n en %	3.26	89.05	1.45	1.98	33.96	1.76

Taux global de la distorsion

$$THD(I_N) = 99.52 \%$$

Tableau récapitulatif

	Tubes fluorescents		Lampes fluo compacts	
	Phase	Neutre	Phase	Neutre
Valeur efficace du courant(V)	0.68	0.24	0.14	0.23
Taux de distorsion THD(I) (%)	11.58	96.79	80.95	99.52

Analyse

La rencontre des trois courants de phase dans le neutre donne une composante du fondamentale nulle, c'est le cas des harmoniques de rang $6k-1$ et $6k+1$, ce qui n'est pas le cas des autres composantes (harmoniques). On a relevé un courant dans le neutre qui a une fréquence égale à trois fois la fréquence du réseau (150hz) avec une amplitude qui est à peu près égale à trois fois l'amplitude de l'harmonique 3 dans chaque phase. L'analyse de Fourier permet d'expliquer tous cela :

$$\begin{cases} J_1 = \sum_{n=1}^{\infty} J_n \cos n(\omega t - \varphi_n) \\ J_2 = \sum_{n=1}^{\infty} J_n \cos n(\omega t - \varphi_n - \frac{2\pi}{3}) \\ J_3 = \sum_{n=1}^{\infty} J_n \cos n(\omega t - \varphi_n - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

$$I_N = J_1 + J_2 + J_3$$

$$I_N = \sum_{n=1}^{\infty} J_n (\cos n(\omega t - \varphi_n) + \cos n(\omega t - \varphi_n - \frac{2\pi}{3}) + \cos n(\omega t - \varphi_n - \frac{4\pi}{3}))$$

Si on s'intéresse aux harmoniques de rang $3k$:

$$I_{N-3k} = \sum_{n=1}^{\infty} J_{3k} (\cos(3k)(\omega t - \varphi_{3k}) + \cos(3k)(\omega t - \varphi_{3k} - \frac{2\pi}{3}) + \cos(3k)(\omega t - \varphi_{3k} - \frac{4\pi}{3}))$$

$$I_{N-3k} = \sum_{n=1}^{\infty} J_{3k} (\cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k}) + \cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k} - 3k\frac{2\pi}{3}) + \cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k} - 3k\frac{4\pi}{3}))$$

$$I_{N-3k} = \sum_{n=1}^{\infty} J_{3k} (\cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k}) + \cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k} - 2k\pi) + \cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k} - 4k\pi))$$

$$I_{N-3k} = \sum_{n=1}^{\infty} 3 \times J_{3k} \cos(3k\omega t - 3k\varphi_{3k})$$

Ce type de montage peut présenter un danger quand le dimensionnement du neutre ne prend pas en considération les courants harmoniques qui peuvent y circuler. La superposition des harmoniques de rang $3k$ peut créer des surintensités surtout quand les puissances mises en jeu sont élevées, ce paramètre doit être pris en considération lors du dimensionnement du câble du neutre.

4.2.3 Etude de l'amélioration du facteur de puissance

4.2.3.1 Amélioration du facteur de puissance d'un redresseur commandé

Pour cette simulation (Annexe C), on choisira comme charge un redresseur à thyristor débitant sur une charge résistive. Un redresseur à thyristors à double alternance possède un facteur de puissance :

$$Fp = Fp_0 \times \cos(\alpha)$$

Où, dans notre cas : $Fp_0 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0.90$, la chute du facteur de puissance vient essentiellement de l'angle d'amorçage.

a) Etude du facteur de puissance avec angle d'amorçage des thyristors égale à 30°

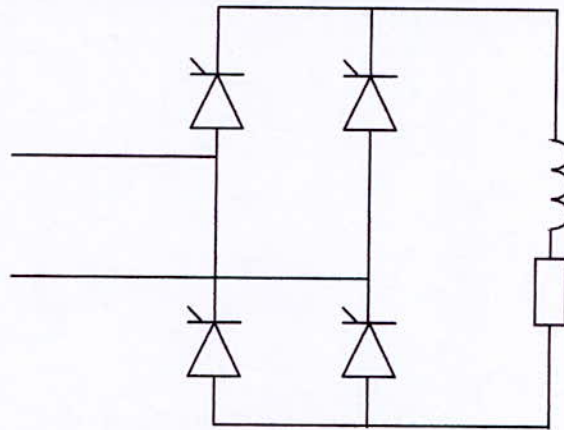


Figure 4.22 Modèle de la simulation

Le montage consiste en un pont de Graetz à thyristors alimenté par le secondaire d'un transformateur qui débite sur une charge R avec une self de lissage de valeur assez importante pour obtenir un courant lissé. L'angle d'amorçage des thyristors est de 30°.

Le courant absorbé par le redresseur est donné par la figure suivante :

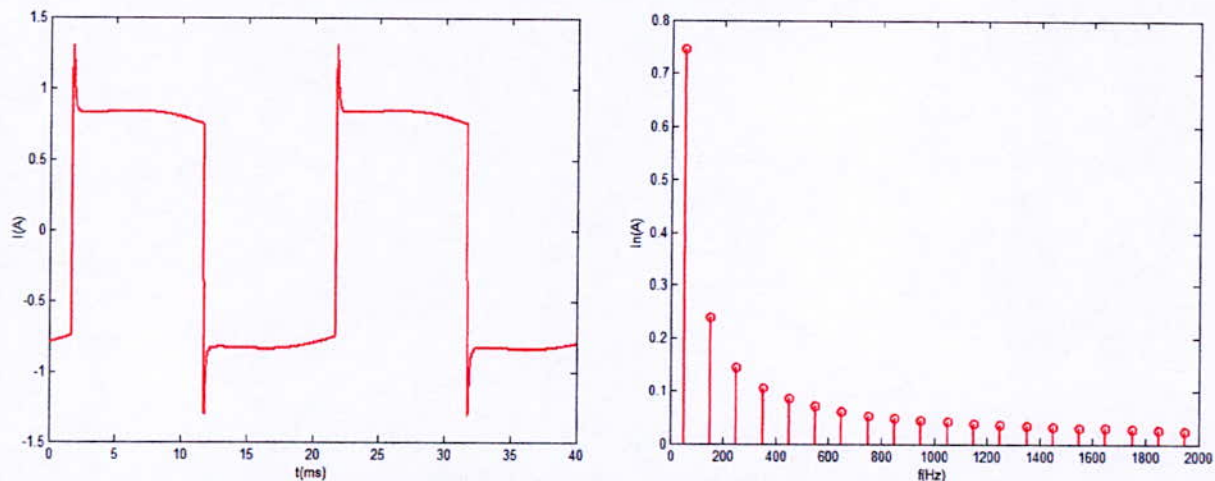


Figure 4.23 Caractéristiques du courant absorbé par le redresseur

$$I_{eff} = 0.83 \text{ A}$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.7460	0.2387	0.1448	0.1057	0.0843	0.0704
Taux individuel de distorsion H_n en %	90.01	28.80	17.47	12.75	10.17	8.49

Taux global de distorsion $THD(I) = 43.47 \%$

P(W)	Q(VAR)	D(VA)	S(VA)	cos (φ)	Facteur de puissance
144.212	78.33	79.22	182.23	0.8787	0.7914

b) Réduction de la puissance réactive

Dans le but de relever le facteur de puissance, nous avons pensé en premier lieu à compenser la puissance réactive et ceci par l'insertion d'une capacité de valeur :

$$C = \frac{Q}{U^2 \omega} = 5.1516 \mu F$$

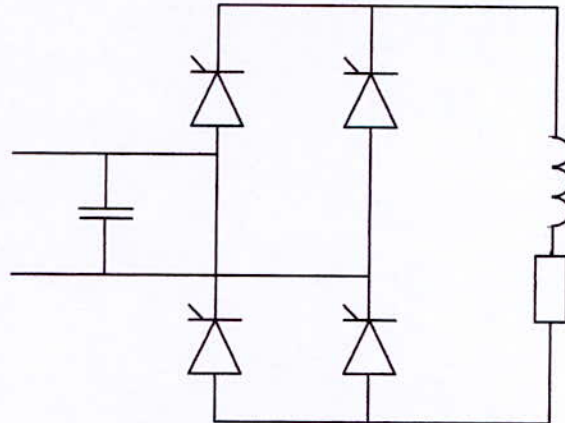


Figure 4.24 modèle avec insertion de la capacité de compensation de l'énergie réactive

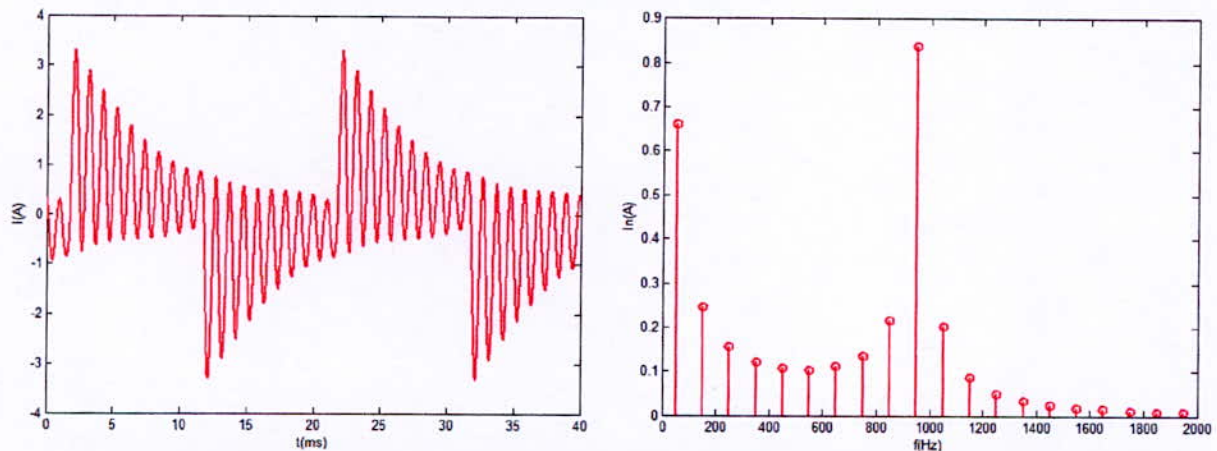


Figure 4.25 Caractéristiques du courant absorbé après compensation de l'énergie réactive

$$I_{eff} = 1.18 A$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.6603	0.2457	0.1557	0.1211	0.1065	0.1034
Taux individuel de distorsion H_n en %	56.00	20.83	13.20	10.27	9.03	8.77

n : Rang de l'harmonique	13	15	17	19	21	23
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.1108	0.1354	0.2148	0.8381	0.2030	0.0864
Taux individuel de distorsion H_n en %	9.40	11.48	18.22	71.07	17.22	7.33

Taux global de distorsion $THD(I) = 82.85 \%$

P(W)	Q(VAR)	D(VA)	S(VA)	$\cos(\varphi)$	Facteur de puissance
145.19	0	214.93	259.41	1.0000	0.5599

Le facteur de déphasage est égal à 1, cependant le facteur de puissance n'est pas amélioré pour autant, au contraire il s'est détérioré. On note une augmentation des harmoniques et de la valeur efficace du courant. On peut d'ailleurs situer la fréquence de résonance du montage en visionnant le spectre

harmonique du courant. L'amélioration du facteur de puissance par réduction de la puissance réactive a entraîné une augmentation de la puissance déformante ce qui a abouti à un résultat inverse de ce qui était souhaité.

On sait que l'augmentation de la puissance déformante est directement liée à la distorsion en courant ; rappelons ici la formule 4.10 :

$$D = S \times THD(I)$$

Il faut donc diminuer cette puissance déformante, ceci passe par un filtrage. On va se concentrer sur l'harmonique la plus importante, c'est l'harmonique 19(950 Hz).

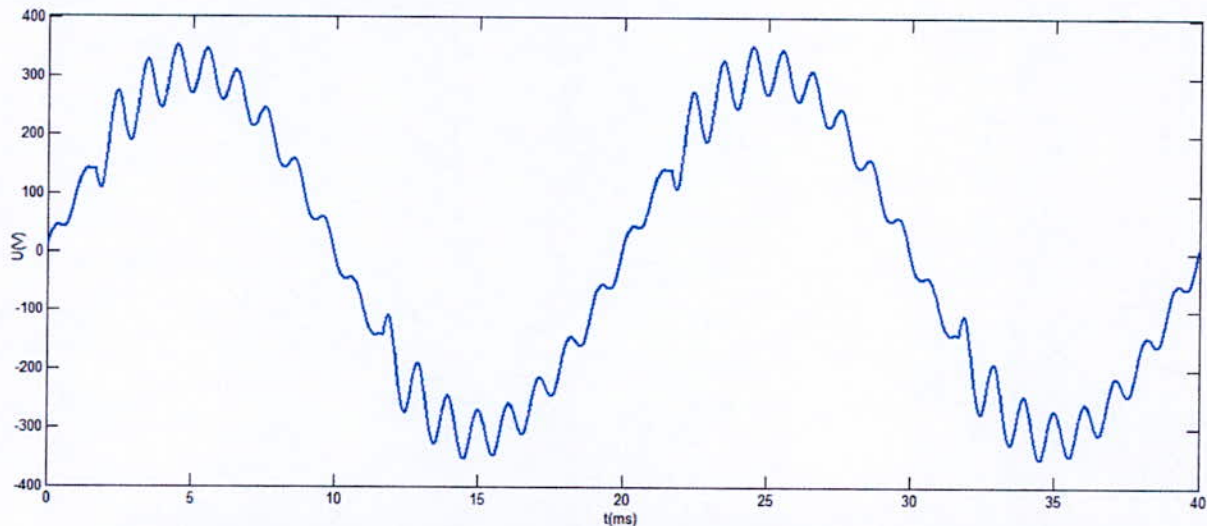


Figure 4.26 Forme de l'onde de la tension après compensation de l'énergie réactive

Taux global de distorsion $THD(U) = 12.35 \%$

Lorsque les courants harmoniques circulent dans le réseau, ils peuvent détériorer la qualité de la tension en passant par les impédances de sortie des transformateurs ou des alternateurs. Une tension qui comporte des harmoniques représente un danger pour les charges (tableau 1.4).

c) Réduction de D

Afin de réduire la déformation, on va placer un filtre pour annuler l'harmonique d'amplitude la plus élevée, c'est l'harmonique de résonance.

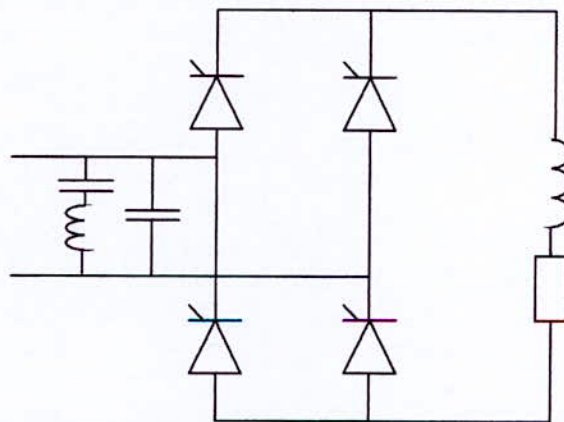


Figure 4.27 Modèle avec insertion du filtre pour éliminer l'harmonique de résonance

$$Z_{19} = jL_{19}\omega + \frac{1}{jC_{19}\omega} = \frac{1 - L_{19}C_{19}\omega^2}{jC_{19}\omega}$$

$$L_{19}C_{19}\omega_{19}^2 = 1$$

$$L_{19}C_{19} = \frac{1}{(2 * \pi * 950)^2} = 2.8067e - 008 \text{ rad}^{-2} . s^2$$

On doit faire le choix des valeurs de la self et de la capacité tout en observant l'impédance à 50 Hz, elle doit être assez grande pour ne pas court-circuiter le courant du fondamental.

On fait donc un choix qui prend C_{19} la plus petite possible.

En théorie, on pourrait choisir une capacité aussi petite et une inductance aussi grande que ce qu'on veut mais en pratique il faudra tenir compte des limites sur le choix d'une grande inductance (cout et encombrement), pour cela on va faire la simulation pour deux choix différents des valeurs de la capacité et de l'inductance.

1^{er} choix :

$$\begin{cases} C_{19} = 1\mu F \\ L_{19} = 28.07 \text{ mH} \end{cases}$$

On doit surveiller l'impédance de ce circuit à la fréquence de 50 Hz, un mauvais choix des dimensions du filtre pourrait court-circuiter le fondamental.

$$Z_1 = \left| \frac{1 - L_{19}C_{19}\omega^2}{C_{19}\omega} \right| = 3.1743e + 003 \Omega$$

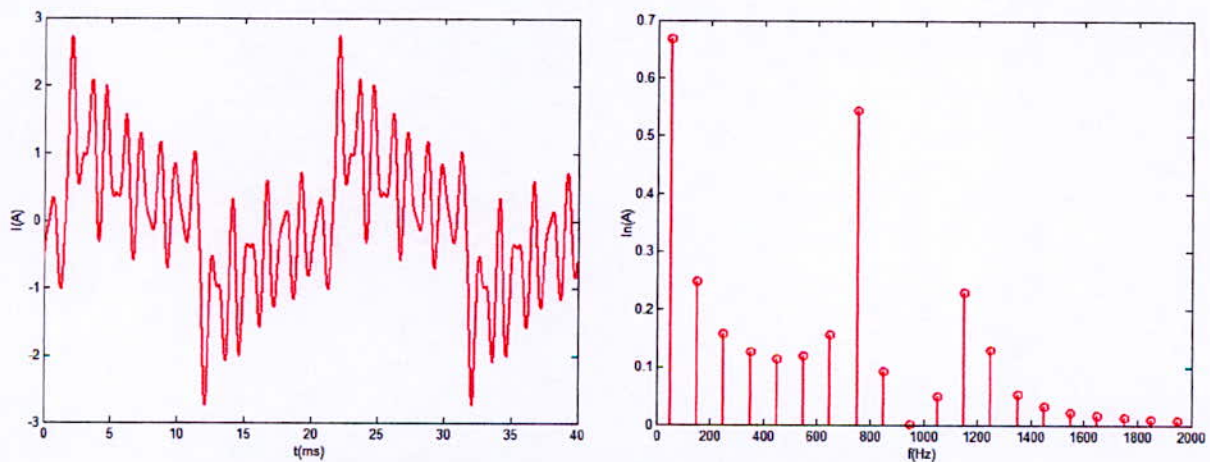


Figure 4.28 Caractéristiques du courant après filtrage

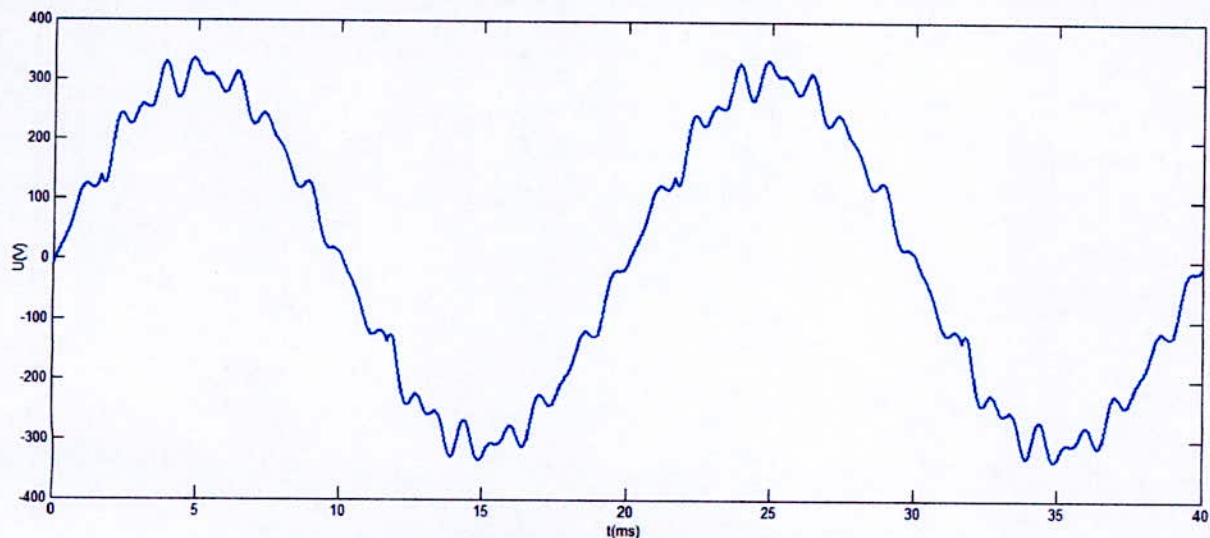


Figure 4.29 Forme de l'onde de la tension

I_{eff} (A)	THDI(%)	Fp	THD(U) (%)
0.9862	73.6291	0.6730	7.86

2^{ème} choix :

$$\begin{cases} C_{19} = 0.1 \mu F \\ L_{19} = 280.7 \text{ mH} \end{cases}$$

On doit surveiller l'impédance de ce circuit à la fréquence de 50 Hz.

$$Z_1 = \left| \frac{1 - L_{19}C_{19}\omega^2}{C_{19}\omega} \right| = 3.1743e + 004 \Omega$$

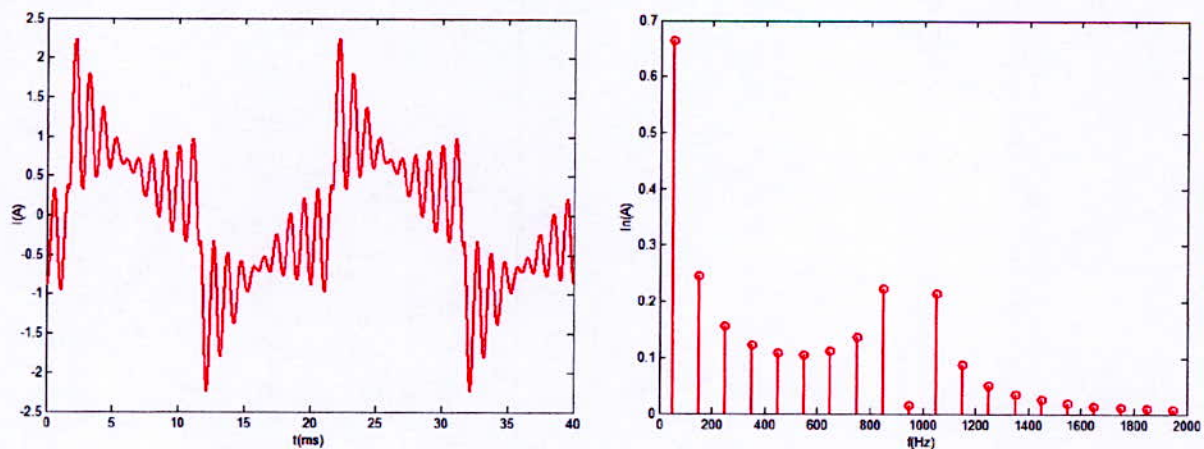


Figure 4.30 Caractéristiques du courant après filtrage

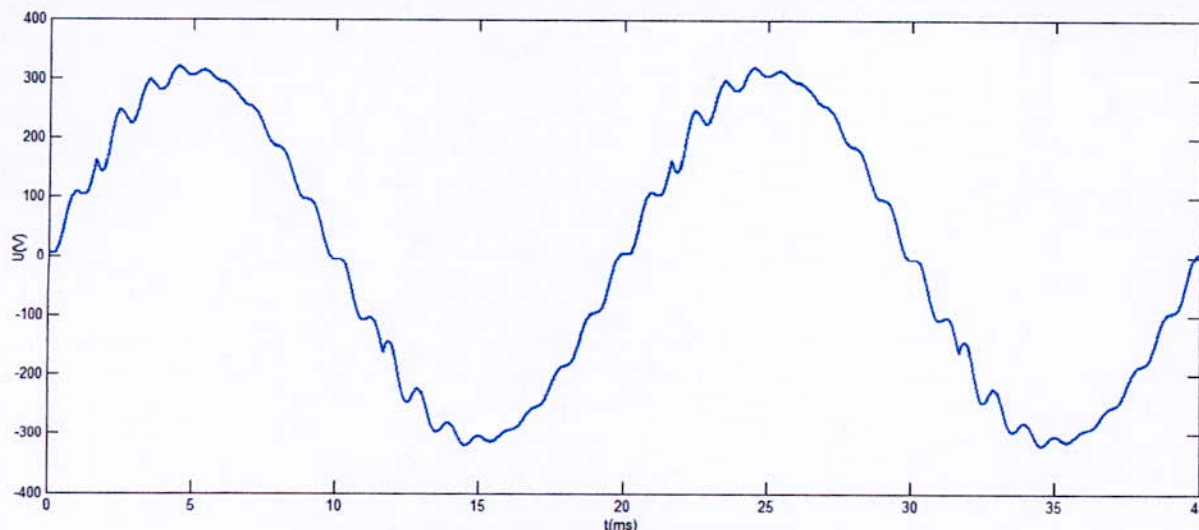


Figure 4.31 Forme de la tension après filtrage

I_{eff} (A)	THDI(%)	Fp	THD(U)(%)
0.8404	61.2580	0.7906	4.84

On voit bien que plus la valeur de l'inductance est grande et plus celle de la capacité est faible plus le facteur de puissance est amélioré.

Ce choix permet d'avoir une distorsion en tension dans les limites acceptable (tableau 1.4). On pourrait affiner le filtrage encore plus mais en pratique cela va se traduire par des couts supplémentaires inutiles.

4.2 Elévation du facteur de puissance d'un éclairage fluorescent

a) Consommation normale de Tubes fluorescents

On va alimenter un ensemble de quatre règles (tubes fluorescents) en parallèle sous 220V pour avoir une puissance assez importante (le nombre des règles a été fait de façon à avoir des valeurs de capacité compatible avec les unités de 30 μ F dont on dispose au laboratoire).

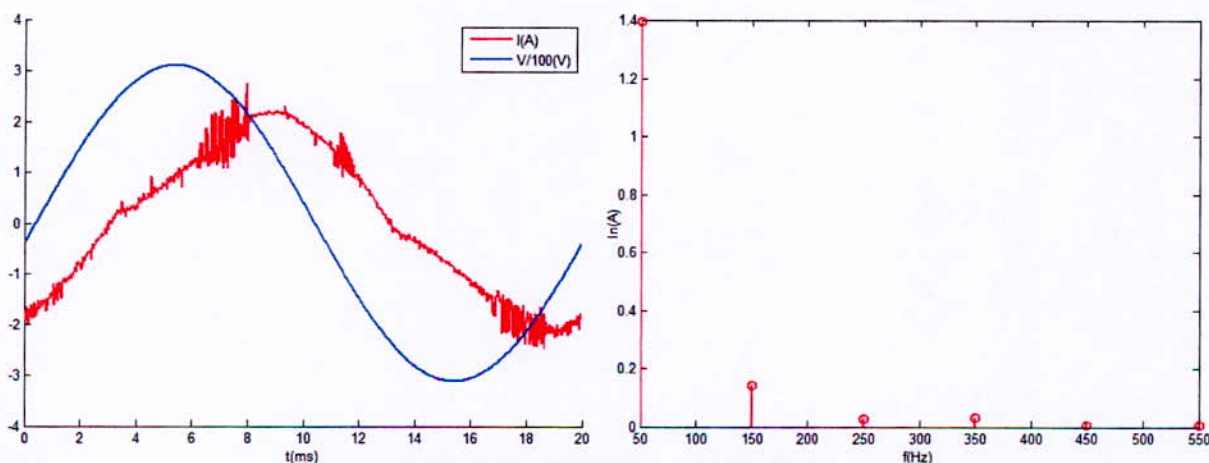


Figure 4.32 Caractéristique du courant absorbé

Valeur efficace du courant

$$I_{eff} = 1.41 \text{ A}$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	1.3936	0.1437	0.0272	0.0319	0.0046	0.0061
Taux individuel de distorsion H_n en %	98.82	10.19	1.92	2.26	0.33	0.43

Taux global de distorsion

$$THD(I) = 12.06 \%$$

P(W)	Q(VAR)	D(VA)	S(VA)	cos(φ)	Facteur de puissance
168.4762	256.1587	37.2533	308.8516	0.5495	0.5455

b) Compensation de la puissance réactive

On va installer des condensateurs pour compenser la puissance réactive que consomment les tubes fluorescents.

$$C = \frac{Q}{U^2 \omega} = \frac{256.1587}{220^2 \cdot 100 \pi} = 16.84 \mu F$$

On va installer deux condensateur en série de capacité $30 \mu F$ chacun ce qui fera une capacité équivalente de $15 \mu F$

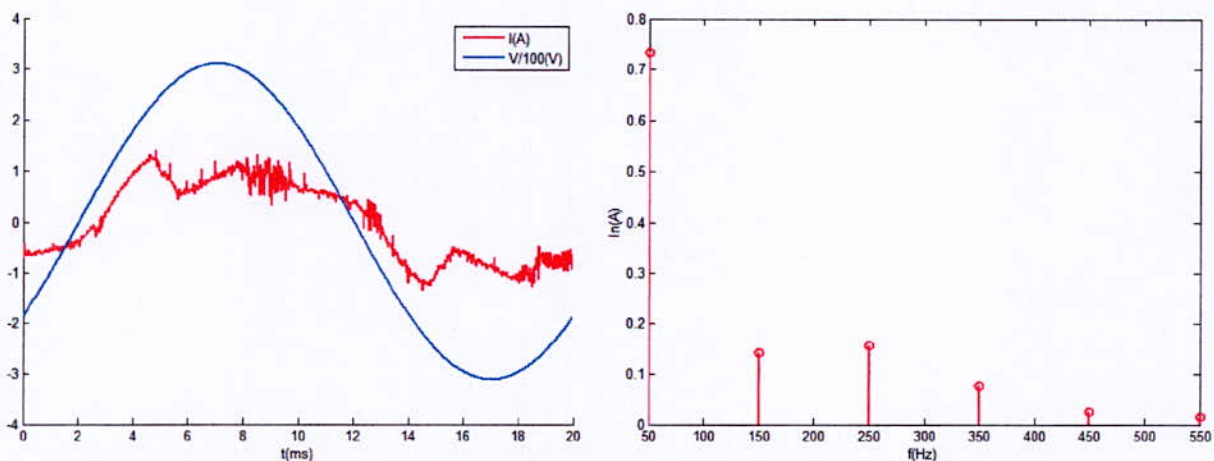


Figure 4.33 Caractéristiques du courant après compensation de l'énergie réactive

Valeur efficace du courant

$$I_{eff} = 0.77 \text{ A}$$

n : Rang de l'harmonique	1	3	5	7	9	11
Valeur efficace de la composante I_n en A	0.7328	0.1434	0.1576	0.0770	0.0259	0.0147
Taux individuel de distorsion H_n en %	94.60	18.51	20.35	9.94	3.34	1.90

Taux global de distorsion

$$THD(I) = 30.58 \%$$

P(W)	Q(VAR)	D(VA)	S(VA)	cos (φ)	Facteur de puissance
160.74	12.43	51.79	169.33	0.9970	0.9492

Analyse

La compensation de l'énergie réactive fait diminuer la puissance réactive puisqu'elle en constituait la majeure partie, le courant total diminue de moitié, le $\cos(\varphi)$ est presque égal à 1 et le facteur de puissance s'améliore.

D'un autre côté, l'insertion d'une capacité crée un phénomène de résonance avec l'inductance du ballast ce qui amplifie les harmoniques et donc on voit bien que la puissance déformante augmente ainsi que le taux de distorsion global qui est augmenté de trois fois.

CONCLUSION

L'étude de la Qualité de l'Energie Electrique est en elle-même une discipline. Elle a pour objectif la meilleure consommation possible en énergie électrique dans une installation donnée.

La première étape dans une démarche de qualité est de dresser un bilan, une description complète et détaillée de l'énergie électrique consommée. Ceci passe par le choix approprié des outils et des méthodes de mesure mais aussi des points où sont faites ces mesures. On a vu dans la première manipulation qu'une même signature pourrait provenir de deux perturbations différentes. Cette remarque peut se généraliser aux cas des creux de tension où le passage par un transformateur peut changer la signature et donc fausser l'analyse qui suit. On peut aussi se retrouver dans une situation analogue avec les harmoniques. L'existence d'harmoniques de rang 3k dans les phases peut être cachée par un éventuel transformateur Dy qui serait placé en aval.

Une fois relevées les données décrivant la consommation électrique d'une installation, des solutions peuvent être apportées à condition de tenir compte des éventuels effets du changement dans l'installation d'un côté et de l'évaluation technico économique de l'autre.

Par exemple, un particulier qui désire éclairer une grande cour, choisira de prendre deux tubes fluorescents au lieu de plusieurs lampes à incandescences pour diminuer sa consommation en Watts et donc sa facture. Mais d'un autre côté, le coût de l'installation sera affecté par la cherté du type de lampes choisies et la plus grosse section de câble imposée par le courant plus élevé qui les alimente. Au final il faudra concilier les économies sur la facture et le retour sur investissement en tenant compte de la durée de vie de lampes et de leurs impacts sur le distributeur.

Si maintenant il préfère l'option des lampes fluo compacts (plusieurs pays vont passer à cette technologie en 2014), il est clair que la facture sera moins lourde et sans problème de dimensionnement puisque le courant est plus faible. Mais si on tient compte du coût d'achat de ces lampes qui reste élevé et de la grande distorsion qu'elles génèrent et qui risque de dépasser les normes imposés par le distributeur et donc entraîner des amendes ou l'obligation de placer des filtres, la balance économique risque de changer de sens.

Le même problème est posé aux grands consommateurs où les puissances mises en jeu sont d'un tout autre ordre. Ils sont confrontés à plus de problèmes encore. Un consommateur MT dispose

Chapitre 5 : Amélioration de la Qualité de l'Energie Electrique

Ce chapitre est la dernière étape dans notre démarche de traitement de la Qualité de l'Energie Electrique, il propose un ensemble de solutions générales et simples pour réduire ou annuler dans la mesure du possible les phénomènes qui dégradent la Qualité de l'Energie Electrique.

La dégradation de la qualité de l'énergie électrique peut provoquer un certain nombre de problèmes et de risques qui touchent principalement la santé et la sécurité des personnes en plus d'un impact économique négatif lié au dysfonctionnement ou destruction d'installations sujettes à ces perturbations.

Réfléchir à des solutions nous conduit à agir sur trois facteurs principaux :

- les générateurs de perturbations : c'est le point de départ de toute démarche visant à améliorer la Q.E.E, il faut d'abord identifier la cause ou la source de la perturbation.
- les récepteurs sensibles : selon le degré de sensibilité des dispositifs et équipements électriques, des actions doivent être entreprises pour les immuniser.
- le chemin de propagation : il s'agit d'agir de manière préventive en vu du raccordement de charges polluantes.

Le choix des solutions est très important, il est conditionné par :

- le degré de sensibilité des équipements.
- le niveau d'immunité et de performance souhaité.
- les conséquences financières des dysfonctionnements et l'amortissement des investissements décidés pour palier à ces derniers.

Selon la nature de la perturbation, des solutions existent ; on va présenter des mesures pour chaque perturbation sachant que dans une démarche de maintien de la Q.E.E, les solutions sont souvent globales et complémentaires entre elles pour offrir de bons résultats.

5.1 Creux de tension et coupures

Une solution efficace passe par un bon diagnostic. La réduction voir l'élimination de ces défauts nécessite une bonne connaissance de l'architecture du réseau, des protections, des automatismes de réalimentation et des niveaux de fiabilité des matériels. En voici quelques solutions proposées :

5.1.1 Réduction du nombre de creux de tensions et de coupures :

Ceci peut être effectué par les voies et moyens suivants :

- la fiabilisation des ouvrages (maintenance préventive ciblée, renouvellement, mise en souterrain).
- la restructuration des réseaux (raccourcissement de la longueur en souterrain).
- remplacer les disjoncteurs déclencheurs-réenclencheurs automatiques par des disjoncteurs shunt au sein des réseaux a neutre impédant qui ont pour avantage de ne pas provoquer de coupures sur le départ avarié en cas de défaut fugitif à la terre (réduction du nombre de coupure brèves).

5.1.2 Réduction de la durée et de la profondeur des creux de tension

Au niveau du réseau :

- augmentation les possibilités de bouclage (nouveaux postes sources, interrupteur de bouclage).
- amélioration du niveau de performance des protections électriques (sélectivité, automatisme de reprise d'alimentation, organes télécommandés en réseau, téléconduite, remplacement des éclateurs par des parafoudres...).

- augmentation de la puissance de court circuit du réseau.

Au niveau des équipements :

- Diminution de la puissance absorbée par les charges de fortes puissances lors de leur mise sous tension avec des compensateurs automatiques en temps réel et des démarreurs progressifs qui limitent les pointes de courant ainsi que les sollicitations mécaniques.

Insensibilisation des installations industrielles et tertiaires :

C'est la compensation du manque d'énergie par un dispositif à réserve d'énergie intercalé entre le réseau et l'installation. Pour un bon choix de ce dispositif il faut tenir compte des informations suivantes :

- La qualité de la source (niveau maximal de perturbations présent).
- Les exigences des récepteurs (sensibilité dans le plan durée-profondeur).

Il est souvent intéressant d'étudier les solutions en distinguant l'alimentation du contrôle-commande et des régulations de celle des moteurs et des gros consommateurs d'énergie. En effet, un creux de tension ou une coupure (même brève) peut être suffisante pour faire ouvrir tous les contacteurs dont les bobines sont alimentées par le circuit de puissance. Les récepteurs commandés par des contacteurs ne sont alors plus alimentés lors du retour de la tension. [3]

5.2 Harmoniques et inter harmoniques

Trois orientations sont possibles :

5.2.1 Réduction des courants harmoniques générés

- Inductance de ligne : l'introduction d'une inductance en série avec l'alimentation (ou intégrée dans le bus continu pour les convertisseurs de fréquence) permet de réduire les harmoniques de courant de ligne (en particulier ceux de rang élevés) et donc la valeur efficace du courant absorbé ainsi que la distorsion au point de raccordement du convertisseur. Il est possible de l'installer sans intervenir sur le générateur d'harmoniques et d'utiliser des inductances communes à plusieurs variateurs.
- Utilisation de redresseurs dodécaphasés : cela permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes). Elle nécessite un transformateur à deux secondaires, l'un en étoile, l'autre en triangle.
- Appareils à prélèvement sinusoïdal: cette méthode repose sur l'utilisation de la MLI pour réduire l'effet déformant d'un redresseur classique par exemple. [3]

5.2.2 Modification de l'installation

Elle présente les avantages suivants :

- augmenter la puissance de court-circuit de l'installation : donc réduire l'impédance interne ce qui va réduire l'effet des harmoniques de courant sur l'onde de la tension

- confiner les charges polluantes : il faut raccorder les charges sensibles le plus proche de la source, puis il faut identifier et séparer les charges polluantes par exemple en les alimentant par des transformateurs indépendants
- surdimensionnement des condensateurs. [3]

5.2.3 Filtrage

Dans beaucoup de cas, les phénomènes d'harmoniques peuvent être éliminés ou du moins évités en choisissant des filtres adaptés pour ne pas causer des problèmes de résonance. Dans le cas d'une batterie automatique, la puissance de chaque gradin doit être sélectionnée pour éviter la résonance. La solution la plus utilisée pour la réduction d'harmonique est d'insérer un filtre afin de proposer aux courants harmoniques un chemin basse impédance, afin qu'ils les traversent au lieu de remonter vers la source. Le filtre peut être dimensionné pour une seule harmonique ou pour une bande plus large selon le besoin. Il est parfois nécessaire de concevoir un filtre plus complexe pour augmenter l'impédance série aux fréquences harmoniques, en réduisant ainsi le niveau de courant qui remonte vers l'alimentation. De simples filtres série rejeteur de bande sont parfois proposés, à installer soit sur la phase, soit sur le neutre. Les clients doivent donc limiter le courant harmonique et prévoir le cas échéant une filtration harmonique.

D'une manière générale, il existe trois méthodes.

Ce sont :

- Les filtres passifs
- Les filtres actifs
- Les transformateurs d'isolement Dy et autres.

Les principaux avantages des filtres harmoniques

- Soulager les transformateurs et augmenter leur capacité du réseau en kVA.
- Réduire les pertes par effet Joule, économie d'énergie en kWh.
- S'aligner aux normes internationales pour la distorsion du courant ($THD(I) < 10\%$) et la distorsion de la tension ($THD(V) < 5\%$).
- Réduire la puissance réactive en kVAr.
- Améliorer le facteur de puissance F_p en le portant à des valeurs proches de 1.
- Protéger complètement les charges traitées.
- Supprimer les transitoires causés par les batteries de condensateurs automatiques et par le changement de la charge.
- 99% des filtres présentent ont une consommation négligeable. [8]

5.2.3.1 Filtres Passifs

La solution la plus utilisée pour la réduction d'harmonique est le filtre passif passe-bande. Le filtre fournit de la puissance réactive comme une batterie de condensateurs mais les réactances installées déterminent une résonance série qui détourne le courant harmonique dans le filtre. Afin d'empêcher un dysfonctionnement, les filtres doivent s'enclencher en commençant par les

harmoniques inférieures. Les filtres passifs sont généralement étudiés en considérant une fréquence d'accord légèrement différente de l'harmonique à filtrer. [8]

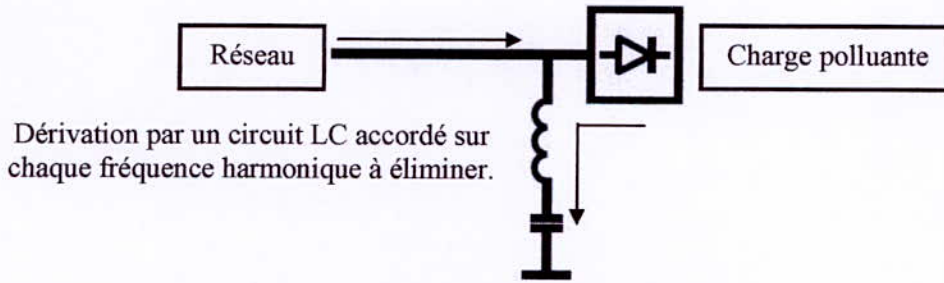


Figure 5.1 : Filtre passif

5.2.3.2 Filtres actifs

Les filtres actifs, représentent une nouvelle typologie d'équipements pour la réduction des harmoniques produites par des charges non linéaires. Ces produits réinjectent un courant opposé correspondant à la composante harmonique totale, donc au sommet du point de connexion du filtre, le réseau est parcouru par un courant égal à la seule composante fondamentale. [8]

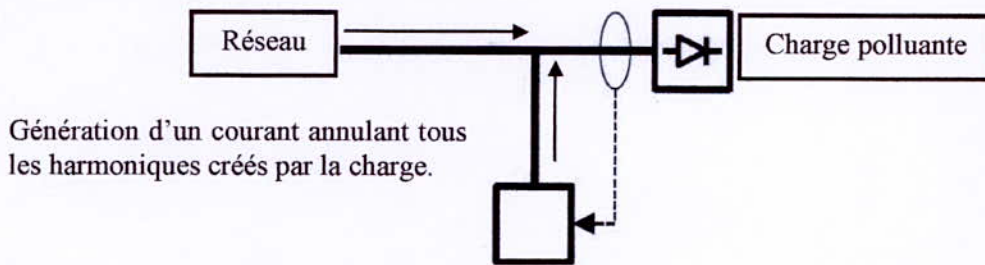


Figure 5.2 : filtre actif

5.2.3.3 Transformateurs d'isolement

Les courants de rang trois et multiples circulent dans les enroulements couplés en triangle des transformateurs ; bien que cela représente un problème pour les fabricants et les prescripteurs de transformateurs - la charge supplémentaire doit être prise en compte – cela présente un intérêt, car les harmoniques de rang trois et multiples ne remontent plus vers l'alimentation.

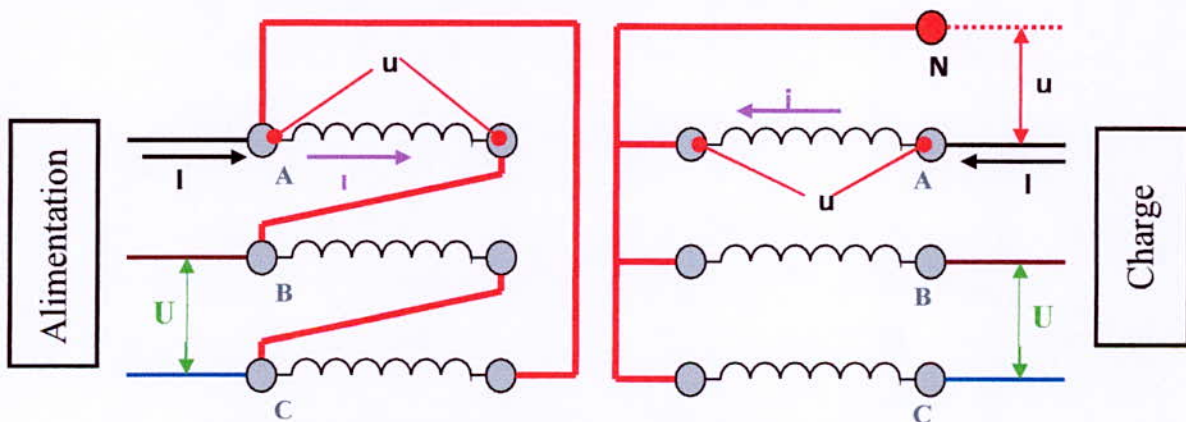


Figure 5.3 : transformateur d'isolement triangle étoile

Le même résultat peut être obtenu en utilisant un transformateur à couplage zigzag.

Les transformateurs zigzags sont des transformateurs à couplage étoile avec une imbrication des phases particulières entre les enroulements connectés en parallèle avec l'alimentation comme l'indiqué la figure ci-dessous. [8]

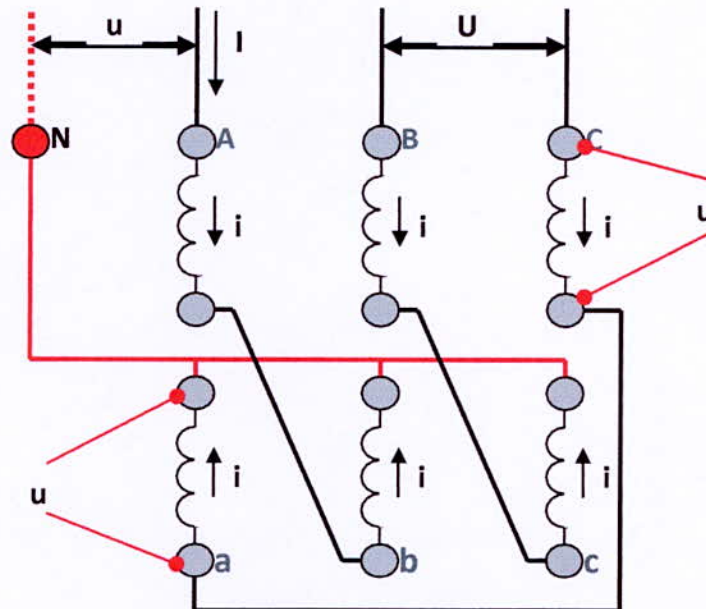


Figure 5.4 : Secondaire d'un transformateur d'isolement Zig-zag

5.3 Surtensions

Le but est d'obtenir une bonne coordination d'isolement, réaliser la protection des personnes et des équipements contre les surtensions avec le meilleur compromis technico-économique. Ceci passe par :

- connaître le niveau et l'énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau,
- choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes.
- utiliser des protections quand cela est nécessaire. En fait, les solutions à retenir dépendent du type de surtensions rencontrées.

Concernant les surtensions temporaires

- isoler tout ou une partie des condensateurs en période de faible charge.
- éviter toute configuration qui présente un risque de résonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène de surtensions de manœuvre.
- installation de self de choc et des résistances de pré insertion pour limiter les transitoires provoqués par les manœuvres de condensateurs. Les compensateurs automatiques statiques qui permettent de maîtriser l'instant d'enclenchement sont particulièrement adaptés aux applications BT n'acceptant pas les surtensions transitoires (automates industriels, informatique).
- Placer des inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence pour limiter les effets des surtensions transitoires.

Surtensions atmosphériques

- protection primaire : elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câbles de garde / fil tendu).
- protection secondaire : elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre. Des parafoudres (de moins en moins des éclateurs) sont installés sur les points des réseaux HT et en MT particulièrement exposés et à l'entrée des postes MT/BT. En BT, ils sont installés à la fois le plus en amont possible de l'installation BT (afin de protéger le plus globalement possible) et le plus près possible des récepteurs électriques. La mise en cascade de parafoudres est parfois nécessaire : un, en tête d'installation, et un, au plus près des récepteurs. Un parafoudre BT est toujours associé à un dispositif de déconnexion. D'autre part, l'utilisation d'un disjoncteur de branchement différentiel sélectif en BT évite que l'écoulement du courant à la terre par le parafoudre ne provoque de déclenchement intempestif du disjoncteur de tête incompatible avec certains récepteurs (congélateur, programmeur...). A noter que les surtensions peuvent se propager jusqu'à l'appareil par d'autres voies que l'alimentation électrique : les lignes téléphoniques (téléphone, fax), les câbles coaxiaux (liaisons informatiques, antennes de télévision). Il existe sur le marché des protections adaptées. [3]

5.4 Variations et fluctuations de tension

Les fluctuations produites par les charges industrielles peuvent affecter un grand nombre de consommateurs alimentés par la même source. L'amplitude de la fluctuation dépend du rapport entre l'impédance de l'appareil perturbateur et celle du réseau d'alimentation. Les solutions consistent à :

- Changer de mode d'éclairage : les lampes fluorescentes ont une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence.
- Installer une alimentation sans interruption : elle peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés.
- Modifier le perturbateur : le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités.
- Modifier le réseau :
 - Augmenter la puissance de court circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point de l'alimentation.
 - Eloigner « électriquement » la charge perturbatrice des circuits d'éclairage en alimentant la charge perturbatrice par un transformateur indépendant.
- Utiliser un compensateur automatique. Cet équipement réalise une compensation en temps réel phase par phase de la puissance réactive. [3]

5.5 Déséquilibre

Les solutions consistent à :

- équilibrer les charges monophasées sur les trois phases : lorsqu'un déséquilibre est identifié, il faut essayer de rééquilibrer la charge de la phase touchée sur les deux autres ceci peut se faire de manière définitif ou par l'action d'inverseurs automatiques qui fonctionne en boucle fermée avec des capteurs pour distribuer les charges sur les phases en cas de changement dans le régime de travail.
- diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles,
- prévoir une protection adaptée des machines. [3]

Chapitre 6 : Travaux Pratiques sur le Qualité de l'Energie Electrique

La problématique de la Qualité de L'Energie Electrique est une préoccupation récente mais très importante dans la mesure où elle revêt une importance capitale pour tous les acteurs du domaine énergétique, que ce soit les sociétés de production et de distribution de l'énergie, les consommateurs ou les organismes de surveillance et de réglementation. Afin de sensibiliser les futurs ingénieurs à ces nouvelles orientations de l'Electrotechnique, nous proposons une série de travaux pratiques qui traitent un des principaux phénomènes responsables de la dégradation de la Q.E.E : les harmoniques.

Les manipulations sont proposées de façon progressive, le premier TP est le plus important car il introduit toutes les notions nécessaires à la suite des TP. Chaque TP est divisé en deux parties : une première partie où l'étudiant doit effectuer un travail de préparation pour lui permettre d'acquérir de nouvelles connaissances, la deuxième partie quand elle doit aider les étudiants à bien assimiler les notions étudiées. Cela va sans dire que des questions précises et qu'un esprit critique permettent une meilleure compréhension.

En ce qui concerne les comptes rendu, l'étudiant devra remettre un seul rapport sous forme d'un mini projet qui contiendra en plus des résultats de l'expérimentation et autres analyses des recherches personnelles qui contribueront à améliorer l'approche de l'étudiant et de passer du cas particulier du TP étudié aux cas généraux qu'on rencontre dans l'industrie de nos jours.

TP n°1 : Facteur de Puissance et Harmoniques

Objectifs

- Etudier le facteur de puissance d'une charge non linéaire et connaître les conséquences des harmoniques sur la Q.E.E.
- Se familiariser avec les outils qui servent à caractériser le Facteur de Puissance et les utiliser pratiquement.

Contexte

Le facteur de puissance est l'un des indices les plus utilisés pour caractériser la consommation des charges électriques, c'est la première préoccupation après le niveau de tension. Les fournisseurs et les distributeurs d'énergie électrique fixent des limites aux consommateurs pour assurer la meilleure tenue du réseau, c'est donc un gage de qualité qui doit être respecté d'autant plus que la puissance consommée est grande.

1- Introduction

Le facteur de puissance est l'un des indices principaux utilisés pour évaluer la qualité de l'énergie électrique, on le retrouve toujours sur les plaques signalétiques des appareils électriques ainsi que dans les normes, les communications destinées à réglementer le marché de l'électricité. Il traduit le degré de conformité d'une charge par rapport à une charge idéale « charge linéaire purement résistive ». Deux informations principales sont combinées dans ce facteur :

- Dans un régime purement sinusoïdal, la consommation réactive de la charge est évaluée par le déphasage entre le courant et la tension. Ceci est exprimé avec un facteur de déphasage

$$Fp = \cos\varphi = \frac{P}{S}$$

- Dans le cas où on aurait des charges non linéaires cette définition n'est plus valable, le courant comporte en plus du fondamental assimilé au régime sinusoïdal d'autres composantes appelées harmoniques. Il faut tenir compte de la déformation et donc de l'énergie déformante qui traduit une troisième composante qui vient s'ajouter aux puissances active et réactive.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Le facteur de déphasage dans ce cas traduit le déphasage entre le fondamental du courant et celui de la tension :

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

On peut nommer la partie de la puissance apparente comme étant le fondamental de la puissance apparente par analogie avec le courant

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Le rapport entre cette composante et la puissance apparente total est appelé facteur de déformation

$$v = \frac{S_1}{S} = \frac{I_1}{I}$$

La tension est considérée comme purement sinusoïdale.

Le Facteur de puissance quant à lui est toujours le rapport entre la puissance qui est réellement utilisée et la puissance apparente, il peut être décomposer comme étant le produit des deux facteur cité précédemment :

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{S_1 \cos\varphi}{\frac{S_1}{v}} = v \times \cos\varphi$$

En plus de ces trois facteurs, d'autres grandeurs existent, elles apportent des informations sur la nature de la consommation électrique :

- L'énergie réactive : $Q = S_1 \sin\varphi$ (VAr)
- +L'énergie déformante : $D = \sqrt{S^2 - P_1^2 + Q^2}$ (VA)
- Le taux de distorsion du courant : $THDI = 100 \left(\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \right) = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I^2}$ (%)
- Le taux individuel de distorsion : $H_n = 100 \frac{I_n}{I}$ (%)

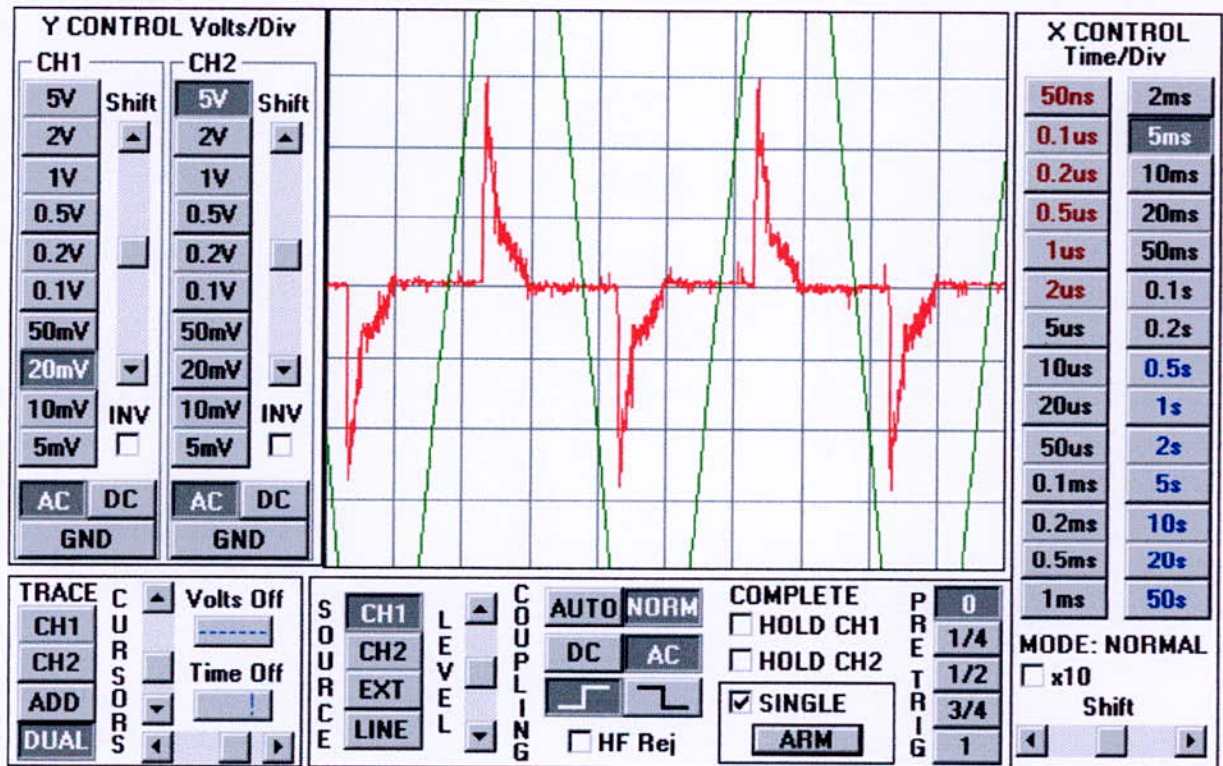
2- Travail de préparation

- Effectuer une recherche sur le fonctionnement des tubes fluorescents.
- Exprimer la puissance de déformation (D) et le taux de distorsion en courant (THD(I)) en fonction de P,φ et Fp.
- Nous allons prendre comme objet d'étude de charge non linéaire des tubes fluorescent utilisés dans l'éclairage, voici les données

Puissance	Tension	Fp	THD
95 W	220 V	0.59	10%

Calculer :

- La puissance apparente (S)
 - La puissance de déformation (D)
 - La puissance réactive et déduire (Q) le facteur de déphasage (cosφ)
 - Le courant efficace total et sa composante fondamentale
- Nous disposons d'un oscilloscope numérique : GS2020 qu'on utilisera pour relever les signaux de courant et de la tension, il permet de relever mille points (1000) dans une durée égale à dix fois le calibre de temps utilisé comme le montre la figure suivante :



- Pour le calibre de 2 ms
 - 1) Quelle est la longueur du signal (T)
 - 2) Quel est la fréquence d'échantillonnage
 - 3) Quelle est la fréquence maximale qu'on peut prélever avec ce calibre
 - 4) Ecrire un SCRIPT sous MATLAB qui a comme données les vecteurs courant et tension et qui permet de calculer et d'afficher les différentes grandeurs suivantes : P, Q, V (valeur efficace), I (valeur efficace), le spectre du courant, le facteur de puissance, le taux de distorsion global et les taux de distorsion individuels. (utiliser la fonction FFT : Fast Fourier Transform pour cela)

3- Manipulations

3.1- Montage

- Prendre 2 tubes fluorescents et connectez les en parallèle, alimentez sous 220V en mettant le shunt de courant correctement pour la mesure simultanée des deux signaux (courant total et tension).
- Placer les deux sondes pour relever les signaux du courant et de la tension (attention aux choix des shunts, des rapports des sondes pour avoir la meilleur résolution et n'oubliez pas de corriger les données numériques dans vos programme en multipliant par les facteurs des différentes partie du schéma de mesure)
- Placer un ampèremètre pour la lecture du courant.

3.2- Essais

- Alimenter les tubes fluorescents et relever les signaux de courant et de tension ainsi que la valeur du courant donné par l'ampèremètre.
- Implémenter les données de l'expérimentation dans le programme MALAB et calculez les différentes grandeurs.
- Affichez les courbes du courant et de la tension sur le même graphe.
- Affichez le spectre du courant dans un graphe indépendant.
- Comparez entre les valeurs données par votre programme et celle donnés par le constructeur.
- A quoi est due la différence qu'il y a entre la valeur du courant donné par le programme et celle donné par l'ampèremètre ?
- Commentez les résultats.

Il existe des appareils de mesure qui permettent de donner une description complète d'une installation électrique. Il serait intéressant d'en utiliser quelques uns pour vérifier la véracité des résultats obtenus par la procédure : Oscilloscope et Programme MATLAB.

TP n° 2 Influence du type de montage sur les harmoniques

Objectifs

- Etudier des charges non linéaires montées en triangle et en étoile.
- Prendre en considération les harmoniques lors des dimensionnement et de connexion des charges non linéaires.

Contexte

On utilise certains couplages dans l'alimentation des charges polluante afin de réduire les harmoniques générées par ceux la. Cette méthode bien que rudimentaire est une très bonne solution contre les harmoniques d'autant qu'elle ne nécessite que des transformateurs parmi lesquels les transformateurs à couplage Dy. Si un bon choix de montage permet d'atténuer certaines harmoniques ; un mauvais choix peut les amplifier.

1- Introduction

Les montages des charges non linéaires peuvent selon des cas atténuer ou amplifier certains harmoniques, ce phénomène est particulièrement visible lors du passage par les transformateurs. Dans cette partie nous allons suivre les harmonique a travers différentes parties du circuit électrique, pour cela nous utiliserons les mêmes outils vu dans le premier travail pratique et plus exactement :

- Le taux global de distorsion en courant (THD(I) %)
- Les taux individuels de distorsion (Hn %)

A noter la relation qui existe entre ces deux facteurs

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} H_n^2}$$

2- Travail de préparation

Soit une charge qui absorbe le courant triphasé suivant :

$$\begin{cases} J_a = J_1 \cos(\omega t) + J_3 \cos(3\omega t) + J_5 \cos(5\omega t) \\ J_b = J_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + J_3 \cos\left(3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) + J_5 \cos\left(5\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \\ J_c = J_1 \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + J_3 \cos\left(3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right) + J_5 \cos\left(5\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \end{cases}$$

- Calculer la somme des courants : $J_a + J_b + J_c$
- Calculer la différence : $J_a - J_b$

Si on considère que les courants (J_a, J_b, J_c) sont des courants de phases dans un montage étoile, quelle est la valeur du courant qui passerait dans le neutre ? Quelle est sa fréquence ?

Si maintenant on considère que les courants (J_a, J_b, J_c) sont des courants de phases dans un montage triangle, quelle est la valeur du courant de ligne.

Si on donne les valeurs efficaces des différentes composantes en p.u

J_1	J_3	J_5
0.996	0.090	0.010

Calculez :

- THD (J_a), THD ($J_a + J_b + J_c$), THD ($J_a - J_b$)
- Commenter

3- Manipulations

3.1- Montage étoile

- Répartir 6 tubes fluorescents équitablement sur les 3 phases et les alimenter en étoile sous 220V en raccordant le neutre de la charge au neutre du réseau.
- Relever le courant de phase puis le courant dans le neutre.
- Utiliser le même programme préparé dans le TP n°1 pour calculer : Les valeurs efficaces du courant (I), les valeurs des harmoniques de courants (I_n), le taux de distorsion global (THDI), les taux individuels de distorsion (H_n).
- Affichez les spectres du courant de phase et du courant dans le neutre dans deux graphes différents.
- Commentez les résultats.

3.2- Montage triangle

- Répartir 6 tubes fluorescents équitablement sur les 3 phases et les alimenter en triangle sous 220V.
- Répéter les mêmes étapes vues dans le montage étoile

TP n°3 Compensation du facteur de puissance d'une charge non linéaire

Objectifs

- Etudier l'effet d'une compensation de l'énergie réactive sur la Qualité de l'Energie Electrique.

Contexte

Les grands consommateurs d'énergie électrique sont soumis à des normes strictes en ce qui concerne le facteur de puissance, le fournisseur d'énergie impose des seuils limites en dessous desquels le consommateur devra payer des amendes. Afin d'éviter cela et pour la meilleur conduite du réseau, des solutions existent et permettent aux industriels maintenir un facteur de puissance qui respecte les seuils et qui permettent de faire des économies en terme de puissance consommée mais aussi dans le dimensionnement de leurs propres installations.

1- Introduction

Une charge qui a un facteur de puissance différent de 1 absorbe d'avantage de courant qu'une charge de même puissance mais qui a un facteur de puissance unitaire. Ce phénomène conduit à une surcharge des lignes électriques, des surdimensionnements des lignes et des appareils de controle/sécurité et à des pertes plus importantes. Relever le facteur de puissance c'est faire en sorte que les deux facteurs ; de déphasage et de déformation soient le plus proches de 1.

2- Manipulations

2.1 Partie 1

- Pour avoir une consommation assez conséquente, prendre quatre (4) tubes fluorescents et les connecter en parallèle.
- Faire le schéma de mesure du courant et de la tension en plaçant le shunt de courant (attention au neutre commun)
- Réaliser l'essai et relever le courant et la tension.
- A l'aide du programme MATLAB déjà établie dans le TP n°1, calculer :
 - 1) La puissance active P.
 - 2) La puissance apparente S, et le courant efficace I.
 - 3) La puissance de déformation D et la puissance réactive Q.
 - 4) le facteur de puissance, le $\cos\phi$ et le taux de distorsion THD.

2.2 Partie 2

- Connaissant la valeur de la puissance réactive absorbée par les tubes fluorescents, calculer la valeur de la capacité à insérer en parallèle pour avoir une puissance réactive nulle.
- Placer la capacité dont la valeur a été calculée..
- Refaire l'essai avec la capacité et relever les signaux de courant et de tension.
- Affichez les courbes.
- Recalculer les grandeurs et facteurs P,S, I, D, Q, Fp, $\cos\phi$ et THD.
- Commenter les résultats.

TP n°4 Application de la Méthode du Vecteur d'Espace sur un déséquilibre

Objectifs

- Etude d'un cas de perturbation qui touche l'amplitude.
- Utiliser une méthode vectorielle dans l'analyse des perturbations électriques.

Contexte

La problématique de la Qualité de l'Energie Electrique est un sujet de recherche d'actualité. On développe sans cesse de nouvelle méthode et de nouvelles approches pour ce sujet de grande importance. La Méthode du Vecteur d'Espace est le résultat de ces efforts, elle présente un moyen simple mais efficace surtout pour les perturbations qui touchent l'amplitude du signal.

1 Introduction

La Méthode du Vecteur d'Espace est une transformation vectorielle appliquée aux systèmes triphasés. Elle donne lieu a deux grandeurs, l'une complexe qui est le vecteur d'espace et l'autre réelle qui est la composant homopolaire. La représentation du vecteur d'espace dans le plan complexe est une ellipse dont les caractéristiques en plus de la composante homopolaire nous renseignent sur la nature de la perturbation.

$$\begin{pmatrix} \overline{x(t)} \\ x_0(t) \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix}$$

$$\overline{x(t)} = x_p e^{+j\omega_0 t} + x_n e^{-j\omega_0 t}$$

Où $x_p = |x_p| e^{j\varphi_p}$ et $x_n = |x_n| e^{j\varphi_n}$ sont des phaseurs complexes.

$$r_{\text{maj}} = |x_p| + |x_n|$$

$$r_{\text{min}} = \left| |x_p| - |x_n| \right|$$

$$\phi_{\text{inc}} = \frac{1}{2}(\varphi_p + \varphi_n)$$

On propose d'appliquer cette méthode à un cas de déséquilibre. La méthode est efficace pour toutes les perturbations qui touchent l'amplitude de la tension ou du courant notamment les creux de tension mais on a choisit le déséquilibre pour faciliter les mesure et la manipulation sachant que le déséquilibre est une perturbation permanente et donc ça ne nécessite pas des dispositifs supplémentaire pour créer artificiellement le défaut.

Les perturbations qui touchent l'amplitude quand elles sont représentées par des phaseurs peuvent être classées en sept grandes signatures, chaque représente un type particulier qui a ses propres caractéristiques et qui traduit un défaut particulier.

2 Travail de préparation

La M.V.E peut s'appliquer à toutes les signatures, dans ce TP on va étudier une seule signature uniquement, l'étude des autres signatures pourra se faire façon analogue. On propose d'étudier le cas d'un défaut sur une phase uniquement.

$$\begin{cases} I_a = I \cos(\omega_0 t + \varphi) \\ I_b = I \cos\left(\omega_0 t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_c = (1 - d) I \cos\left(\omega_0 t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

d est représenté la diminution du courant qui est du au déséquilibre qui touche la phase.

- Appliquer la transformation du Vecteur d'espace au système de courant triphasé et trouvez ses caractéristiques en fonction de d .
- Remplir le tableau suivant, les valeurs du courant son données en unité relative.

Vecteur d'espace			Composante homopolaire
ϕ_{inc}	r_{min}	r_{maj}	

3 Manipulations

- Réaliser le montage de la figure ; prendre comme charges des lampes à incandescence et placer 2 lampes sur la première et deuxième phase et une seule lampe uniquement sur la troisième phase.
- La puissance d'une seule lampe est de 40W, quel est le meilleur choix du shunt de courant qui permet la meilleure mesure ?
- Relevez les courants dans les trois phases à l'aide de l'oscilloscope numérique(GS2020).
- Tracez les formes des trois courants sur la même figure puis appliquer la méthode du vecteur d'espace à ce système triphasé.
- Représenter l'ellipse dans le plan complexe et calculer ses paramètres caractéristiques.
- Comparez avec les valeurs théoriques de la partie préparation.
- Commenter les résultats.

Conclusion Générale

L'Énergie Électrique est à la base de notre civilisation, cette énergie vient principalement des combustibles fossiles, des combustibles qui deviennent de plus en plus rare. Il faut donc trouver d'autres sources d'énergie mais il est tout aussi nécessaire de mieux l'utiliser et éviter de la gaspiller, c'est l'efficacité énergétique qui permet de réduire notre consommation. Le travail présenté dans ce mémoire va dans ce sens, il nous interpelle sur une problématique nouvelle de l'Électrotechnique c'est la qualité de l'énergie électrique.

A la lumière de l'étude bibliographique, nous avons pu constater l'intérêt grandissant des industriels et de la communauté scientifique pour les problèmes de qualité et ceci a travers les différents séminaires et conférences sur le sujet. Le mémoire de doctorat Madame Vanya IGNATOVA qui a fait l'objet d'une publication internationale est l'un des travaux de recherche les plus récents qui aborde la Qualité de l'Énergie Électrique avec une démarche globale et différente des travaux de recherche antérieures qui ont abordés les phénomènes qui dégradent la Q.E.E séparément. Le cahier technique 199 de Shneider Electric permet de bien cerner l'importance et les enjeux majeurs de cette nouvelle discipline dans le secteur énergétique et industriel. Cette discipline se développe en parallèle avec d'autres courants de l'Électrotechnique moderne comme la Compatibilité Electromagnétique.

Le premier chapitre est une présentation générale du thème de la Qualité de l'Énergie Électrique, les phénomènes principaux qui dégradent la (QEE), leurs origines, leurs conséquences sur les équipements et appareillages électriques. Bien connaître ces perturbations est une étape clef qui permet ensuite de diriger et de cibler les efforts pour atteindre les objectifs prédéterminés.

Afin d'analyser et d'étudier ces phénomènes, des outils sont présentés dans le chapitre 2. Il s'agit d'un ensemble d'approches différentes selon le cas de détérioration de la Q.E.E. Une nouvelle méthode dite Méthode du Vecteur d'Espace est présentée dans le chapitre 3. Elle est sensée s'appliquer à toutes les perturbations mais à travers nos applications pour valider cette méthode nous avons pu constater qu'elle donnait des résultats qualitatives pour ce qui est des perturbations harmoniques alors qu'elle permet d'identifier entièrement les perturbations qui touche l'amplitude ou la phase du signal. Au lieu de lui implémenter des méthodes du traitement du signal qui la rendrait complexe et lourde en termes d'utilisation, on a préféré utiliser directement les outils du T.S ce qui a donné de bons résultats.

Le chapitre 4 est la projection de notre étude théorique sur des cas réels de perturbations, on a utilisé l'essentiel des techniques exposés pour effectuer une analyse qui soit la plus complète possible et qui soit aussi simple et adéquate. L'étude du facteur de puissance de différents types d'éclairage nous a permis de faire le lien avec les vraies préoccupations des acteurs du réseau électrique. Comprendre le facteur de puissance, comment l'améliorer l'impact de ces changements sur les harmoniques a attiré notre attention sur les défis et les problèmes que rencontre le monde de l'industrie.

Une fois notre étude bien poussée, nous avons essayé de faire une synthèse des solutions générales les plus performantes et les plus utilisées en industrie dans le chapitre 5 qui clos notre mémoire, notre participation à ces efforts a été timide parce que notre travail s'inscrit dans le monitoring c'est-à-dire l'analyse des perturbations électriques.

Notre mémoire pourra être le point de départ à des travaux de recherches ; des partenariats pourront être signés avec le fournisseur public de l'énergie électrique pour conduire des

Conclusion

efforts dans l'identification et la mesure des perturbations. D'autres projets pourront être faits en association avec les industriels pour essayer de leur apporter des solutions aux problèmes liés à la Qualité de l'Energie Electrique auxquels ils sont confrontés surtout si on tient compte des efforts de normalisation qui imposent aux professionnels du domaine énergétique des règles de plus en plus strictes.

Le chapitre 6 est une maigre participation aux efforts de réformes des programmes ou on a essayé de proposer une série de travaux pratiques pour sensibiliser les étudiants à l'évolution permanente des programmes scientifiques nécessaire pour accompagner les secteurs d'activité de l'industrie. Ces travaux pratiques pourront ouvrir la voix vers des stages pratiques conduit en milieu industriel pour développer l'intérêt des futurs ingénieurs à la discipline de la Qualité de l'Energie Electrique et sa place réelle dans l'Electrotechnique.

Annexes

Annexe A : les trois types d'éclairage utilisés lors des essais

Le 22 octobre 1879, l'Américain Thomas Edison inventeur de génie et fondateur de General Electric réussit à produire un éclairage durable en faisant passer du courant à travers un filament de carbone, dans une ampoule sous vide. Cette première lampe à incandescence dure pendant quarante heures ; c'était le premier concept d'éclairage électrique qui a vu le jour. C'est le même principe qui est utilisé dans les lampes à incandescence actuelles avec des améliorations qui ont touché les composants de ces lampes.

L'éclairage est maintenant la charge électrique la plus répondeuse, ceci est la réponse à un besoin vital ; on trouve des lampes partout ; dans les maisons, les usines, les hôpitaux, aéroports ... Les concepts de lampes ont évolué et il y'a désormais une multitude de générations pour toutes les utilisations. La consommation d'une seule lampe est insignifiante mais si on considère l'ensemble de l'éclairage comme une seule charge on verra que la part de l'énergie électrique réservée alloué à cela est assez conséquente.

L'énergie électrique vient en majeure partie des énergies faciles dont les stocks s'amenuisent de jour en jour, et parmi les solutions apportées à ce problème est la diminution de la consommation électrique et ceci dans un souci d'efficacité et d'économie énergétique. Ceci pousse les ingénieurs et les chercheurs à inventer de nouvelles charges éclairantes comme les tubes fluorescents ou les lampes fluo compacts.

Lampes à incandescence

Le principe utilisé est le même que celui inventé par Thomas Edison, ce sont les composants qui ont été améliorés :

L'enveloppe

L'enveloppe est en verre pour les lampes standards. L'étanchéité du verre permet de contenir l'atmosphère gazeuse qui convient au filament et sa transparence permet aux radiations émises par le filament d'être visibles. Elle est parfois appelée "verrine" ou ampoule.

L'atmosphère gazeuse

L'atmosphère gazeuse est le plus souvent un mélange d'azote, d'argon, auquel est ajouté parfois du krypton ou du xénon. Certaines lampes miniatures ne contiennent aucun gaz.

Le filament

Aujourd'hui, toutes les lampes à incandescence ont un filament en tungstène. C'est le métal qui permet la montée en température la plus importante tout en restant solide (2 250° C à 2 500 ° C).

Les supports de filament

Ils permettent de positionner le filament dans la verrine. Leur présence n'est pas obligatoire et dépend de la longueur du filament. Plus la tension de la lampe est grande, plus le filament est long.

Le dumet

C'est la liaison électrique entre la base et les arrivées de courant. Cette partie est souvent utilisée comme fil fusible sur les lampes d'éclairage 230 V. Le dumet est souvent un alliage de ferro-nickel cuivré dont la propriété est d'avoir le même coefficient de dilatation que le verre (c'est important car les dumets sont prisonniers du pincement, qui est en verre).

Le queusot

Cette partie en verre en forme de tube permet de remplir l'ampoule de gaz lors la fabrication de la lampe. Il est refermé hermétiquement lorsque l'ampoule est complètement remplie. [10]

Tubes fluorescents

Le tube est rempli de gaz rare (argon, néon...) et de vapeurs de mercure. Les électrodes en tungstène, placées aux extrémités du tube, chauffent et émettent des électrons. Ces électrons en se déplaçant d'une électrode à l'autre, heurtent les atomes de mercure et leur communiquent une énergie. Les atomes de mercure libèrent ensuite cette énergie sous forme de rayonnement ultra-violet. Cette lumière est transformée en lumière visible proche du blanc, par la couche fluorescente qui tapisse la surface interne du tube. La fluorescence est la propriété que possèdent certaines molécules (appelées fluorochromes ou fluorophores) d'absorber la lumière à certaines longueurs d'ondes correspondant à une certaine couleur et de réémettre une lumière à une autre longueur d'onde correspondant à une autre couleur. Ces molécules, à l'état de repos, absorbent l'énergie émise par une source lumineuse et gagnent un niveau d'énergie supérieur en faisant passer un électron d'une couche à une autre. L'électron va ensuite rapidement regagner son niveau original et libérer l'énergie acquise sous forme de lumière. Il existe un grand choix de fluorochromes, avec des spectres d'excitation et d'émission variés.

Starter

Le starter est un petit tube rempli de gaz, muni d'un contact (bilame). Lors de la mise sous tension, il s'amorce. L'arc électrique produit chauffe le bilame qui se déforme : le contact se ferme et l'arc électrique disparaît. Cette phase permet le préchauffage des électrodes du tube. Au bout d'une seconde environ, le bilame a refroidi et le contact s'ouvre, coupant ainsi le courant du circuit. Le ballast magnétique crée alors une surtension qui amorce le tube. La tension aux bornes du tube diminue et rend impossible l'amorçage du starter jusqu'à la prochaine mise sous tension.

Ballast magnétique

Le ballast magnétique permet :

- de produire la surtension nécessaire à l'amorçage du tube
- de limiter l'intensité de l'arc lorsque le tube est amorcé

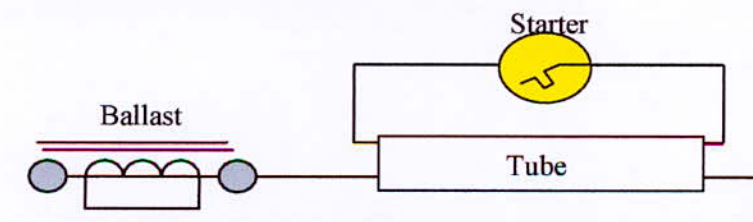


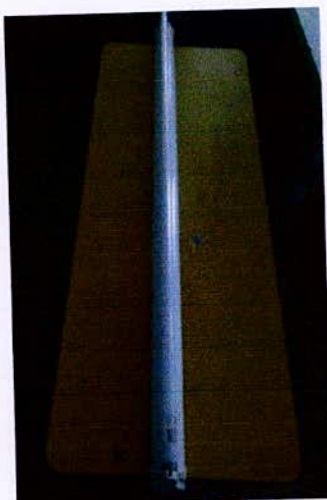
Schéma simplifié d'un tube fluorescent [11]

Lampes fluo compact

La fluocompacte est créée et introduite par Philips éclairage au début des années 80 suite aux chocs pétroliers des années 70 et l'accroissement des coûts énergétiques. La lampe est conçue dès l'origine pour pouvoir remplacer les ampoules à incandescence sur la douille des luminaires. Les premières générations de fluocompactes intègrent des ballasts ferromagnétique ce qui pose des problèmes de rendements et de dimensions ce qui limite le déploiement de cette technologie dans les habitations. Ce n'est que vers 1985 que les premières générations de fluocompactes avec ballasts électronique feront leurs apparitions réglant ainsi les problèmes de rendements et de dimensions. Au fil des années jusqu'à nos jours la fluocompacte s'est améliorée en termes de fonctionnement, de rendement lumineux, de forme, de taille, de durée de vie et au niveau de l'impact sur l'environnement notamment grâce à l'évolution de son électronique interne. [12]



Lampe incandescente



Tube fluorescent



lampe à basse consommation

	Eclairage incandescent	Eclairage Fluorescent	Eclairage basse consommation
Tension nominale (V)	220	220	220
Puissance (W)	40	40	15

Précaution lors de l'utilisation des lampes fluo compacts

Rayonnement ultraviolet : il n'y a aucun danger à plus de 30 cm (les gens atteints de maladies auto-immunes comme le lupus sont particulièrement sensibles aux UV)

Champ électromagnétique : à plus de 20 cm, l'intensité du champ électromagnétique est si faible qu'il n'y a pas de danger sur la santé de l'homme.

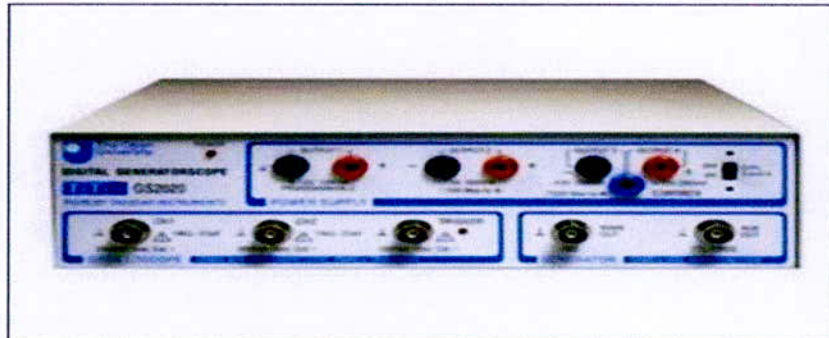
Vapeur de mercure présente dans la lampe : une quantité infime qui ne représente donc aucun risque sur les utilisateurs, même si elle est brisée, le risque est minime, il faut cependant suivre une procédure de nettoyage.

Annexes

Bourdonnement et scintillement : Les nouvelles lampes qui travaillent avec des fréquences élevés ne causent pas ce problème qui n'est plus perceptible.

D'une façon générale les lampes fluo compacts ne constituent aucun danger sur la santé humaine lorsqu'elles sont utilisées à plus de 30 cm, il faut donc éviter de les utiliser comme lampe de bureau ou veilleuse (lampe de chevet). [13]

Annexe B : GS-2020



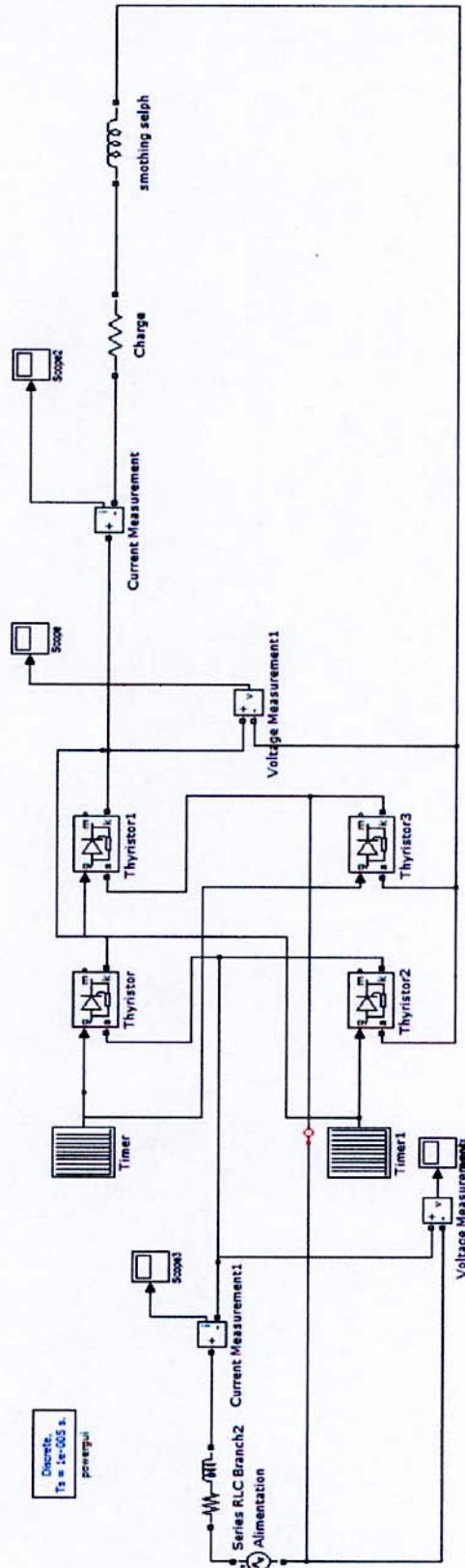
GS-2020 GeneratorScope for Windows

La GS-2020 est un oscilloscope numérique avec les caractéristiques suivantes :

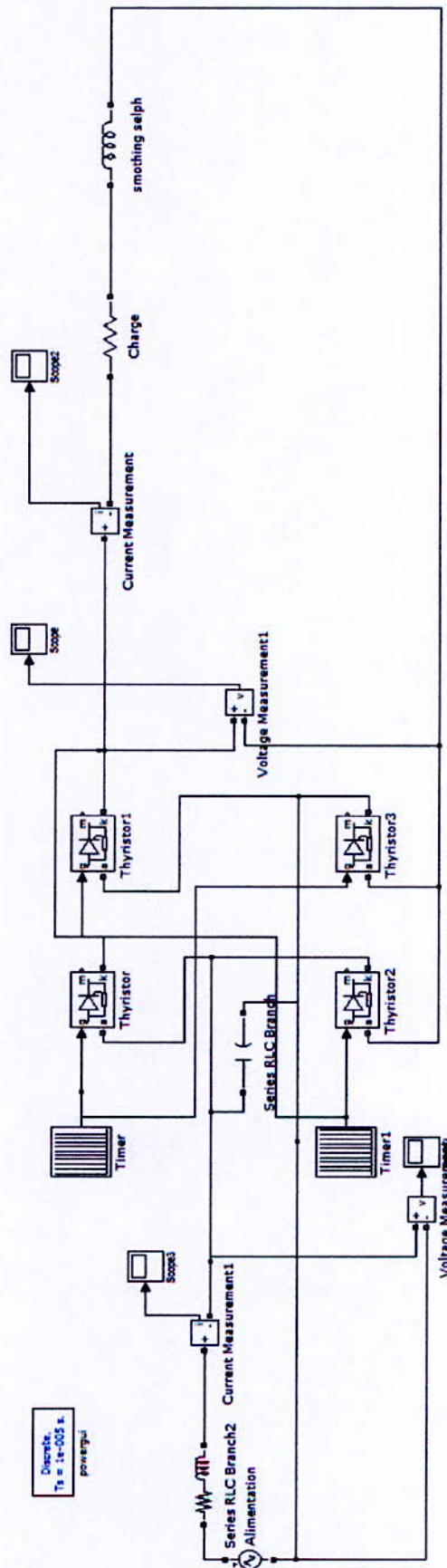
- Oscilloscope numérique, générateur et PSU
- 2 canaux de 20MHz
- Générateur de formes d'ondes avec capacité arbitraire
- Quatre sorties de l'alimentation en courant continu
- WaveCad logiciel d'édition de forme d'onde arbitraire
- Port d'extension pour relier à d'autres équipements
- Connexion par port parallèle simple
- Les instruments peuvent être actionnés indépendamment

Annexe C : Modèles sous MATLAB SIMULINK

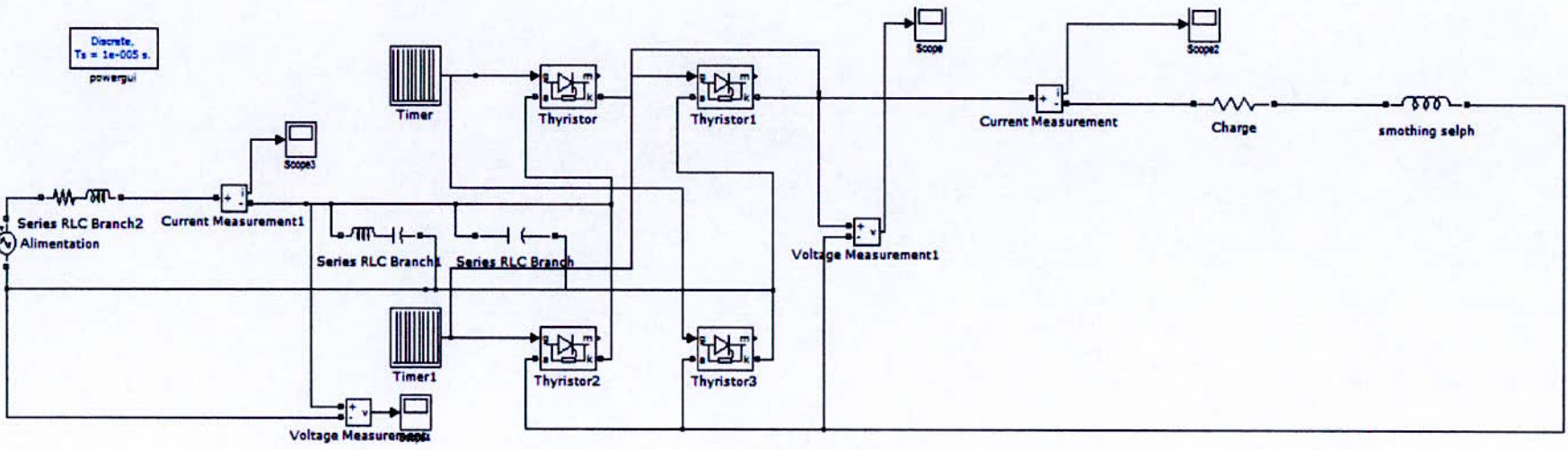
1- Modélisation d'un redresseur a thyristor



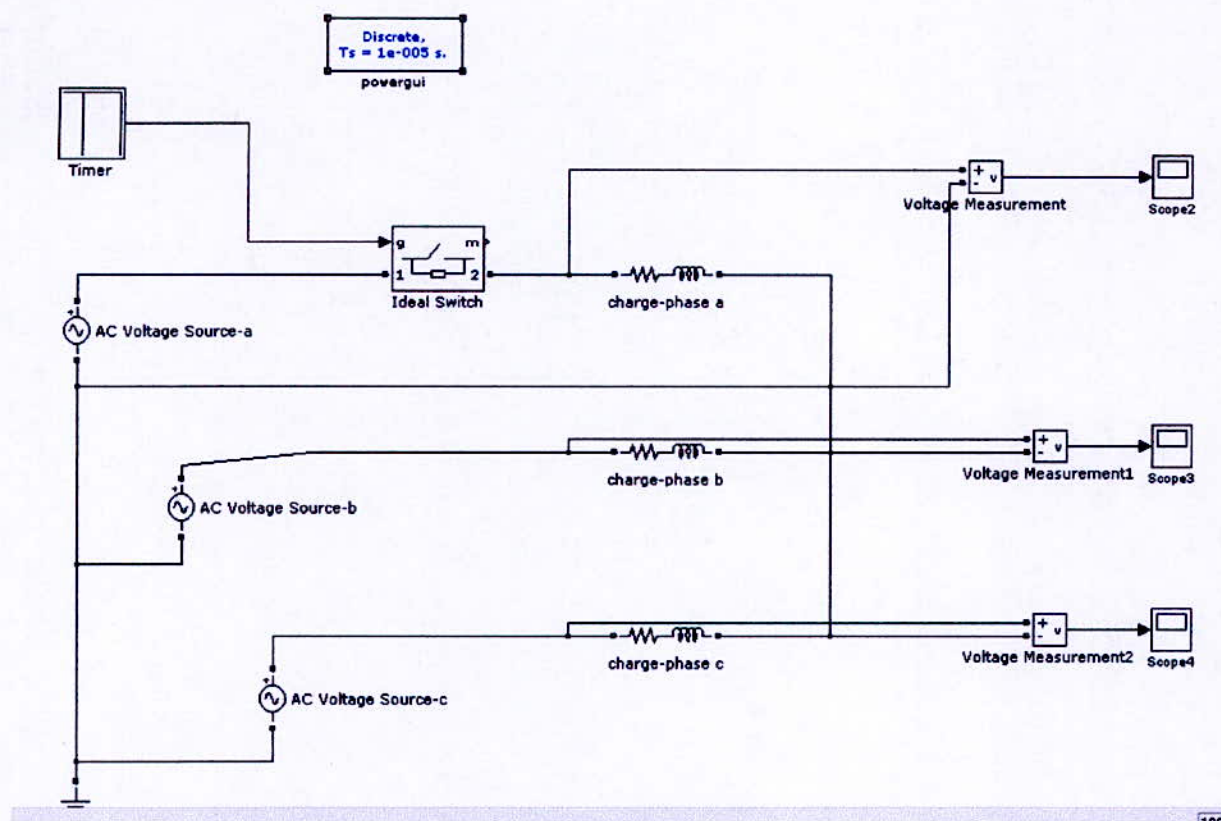
2- Insertion de la capacité



3- Filtrage



4- Creux de tension



Bibliographie

Bibliographie

- [1] Vanya IGNATOVA. Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique. Thèse de Doctorat. Spécialité : « Génie électrique ». Grenoble : Université JOSEPH FOURIER, 20 Octobre 2006, 169.
- [2] Bertrand Charie. Qualité de l'Energie Electrique et Enseignement de l'Electrotechnique [**en ligne**]. disponible sur : < http://bcharier.free.fr/setup/qualite_livret.pdf> (consulté le 29.05.2011).
- [3] Philippe FERRACCI. La qualité de l'énergie électrique. Cahier technique n° 199. Shneider Electric: Collection technique, octobre 2001, 36.
- [4] Math H. BOLLEN. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. 1st edition. Wiley-IEEE Press. September 1999, p.99. ISBN 978-0-7803-4713-7 .
- [5] CHAUVIN ARNOUX. Perturbations BF : la qualité de la tension se mesure ! [**en ligne**]. Disponible sur : < http://www.chauvin-arnoux.com/Groupe/pdf_mag/dossier_F_PTM_CAM54.pdf> (consulté le 15.03. 11).
- [6] Théodore WILDI, Gilbert SYBILLE. Electrotechnique. 3^{ème} édition. Canada. De Boeck université, 1992, p.553. ISBN 2-7637-7593-4
- [7] VOLTA Electricité. Perturbations électriques - Les effets des harmoniques [**en ligne**]. Disponible sur : <<http://www.volta-electricite.info/articles.php?lng=fr&pg=11561>> (consulté le 27.05.2011).
- [8] Jean Noël FIORINA. Onduleurs et harmoniques (cas des charges non linéaires). Cahier technique n° 159. Shneider Electric: juin 1992, 20.
- [9] Angelo BAGGINI. Comprendre la Qualité de l'Energie Electrique. Leonardo ENERGY. Engineering Consulting & Design, Septembre 2009, 23 p.
- [10] Mister lumière. La lampe à incandescence [**en ligne**]. Disponible sur : < <http://www.mister-lumiere.com/conseils/la-lampe-a-incandescence>> (consulté le 27.05.2011)
- [11] Patrick ABATI. Eclairage fluorescent [**en ligne**]. Disponible sur : < <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/fluo.htm>> (consulté le 27.05.2011)

Bibliographie

[12] Entraidelec. La lampe fluocompacte - ampoule économique **[en ligne]**. Disponible sur :<
<http://entraidelec.com/article-62-La-lampe-fluocompacte-ampoule-economique.html>> (consulté le
27.05.2011)

[13] Santé Canada. Utilisation sécuritaire des ampoules fluocompacts **[en ligne]**. Disponible sur :<
<http://www.hc-sc.gc.ca/hl-vs/iyh-vsv/prod/cfl-afc-fra.php>> (consulté le 27.05.2011)