

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهرميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

N° d'enregistrement

/...../...../...../...../.....

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

## Licence professionnelle

Domaine : Sciences et technologies,

Filière : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables et environnement

### Thème

**Etude et simulation d'un filtre d'harmonique**

Présenté par :

BEN KRANE Khadidja

BOUHAMIDA Wissal

Soutenue publiquement le 21/05/2025

Devant le jury composé de :

Bahri Ahmed

MCA

Université de Ghardaïa

Président(e)

MOSBAH Mustafa

Docteur

Université de Ghardaïa

Encadreur

.....

.....

Université.....

Co-encadreur

BOUSNANE Toufik

MCB

Université de Ghardaïa

Examineur(trice)

Année universitaire 2024/2025

# Remerciements

Premièrement, je tiens à remercier sincèrement notre Dieu « Allah » source de toute connaissance, qui me donne la force, la volonté et le courage pour achever ce travail.

Je remercie très sincèrement mon encadreur Monsieur **MOSBAH Mustafa** enseignant à l'université de Ghardaïa pour leur soutien, son patience, son confiance et ses conseils tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je tiens également à remercier mon parrain Monsieur **CHAMKHA Tahar** Chef service de contrôle exploitation d'électricité à la direction de SONELGAZ distribution de la wilaya de Ghardaïa pour leur soutien, son patience, son confiance et ses conseils tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je voudrais vivement remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.

Un grand merci à mes familles pour leurs soutiens aussi bien moraux que financiers et pour leurs sacrifices.

Finalement, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

# Résumé

Le réseau électrique est sujet à de nombreuses perturbations, y compris les harmoniques qui présentent de plus en plus une véritable préoccupation aux producteurs, distributeurs et utilisateurs de l'énergie électrique, surtout avec l'accroissement de l'utilisation des charges non linéaires. Ce travail est dédié à l'étude d'une des solutions palliatives aux problèmes des harmoniques à savoir le filtre passif. Ce filtre est dimensionné en fonction des harmoniques ciblées, qui sera générer un courant perturbateur afin d'éliminer l'harmonique en question. L'efficacité du filtre a été prouvée par le taux de distorsion harmonique obtenu avant et après filtrage.

**Mots-clés :** Harmonique, qualité d'énergie, filtre passif.

## ملخص

تتعرض الشبكة الكهربائية للعديد من الاضطرابات، بما في ذلك التوافقيات، التي أصبحت مصدر قلق حقيقي للمنتجي وموزعي ومستخدمي الطاقة الكهربائية، خاصة مع تزايد استخدام الأحمال غير الخطية. هذا العمل مخصص لدراسة أحد الحلول الممكنة لمشاكل التوافقيات، وهو المرشح السلبي. يتم تحديد أبعاد هذا الفلتر وفقاً للتوافقيات المستهدفة، والتي ستولد تياراً مضطرباً من أجل القضاء على التوافقيات المعنية. وقد تم إثبات فعالية الفلتر من خلال معدل التشوه التوافقي الذي تم الحصول عليه قبل التنقية وبعدها.

**الكلمات المفتاحية:** التوافقيات، جودة الطاقة، المرشح الخامل.

## Abstract

The electricity network is subject to numerous disturbances, including harmonics which are increasingly a real concern to producers, distributors and users of electrical energy, especially with the increase in the use of non-linear loads. This work focuses on the study of one of the palliative solutions to harmonic problems: the passive filter. This filter is sized according to the targeted harmonics, which will generate a disturbing current to eliminate the harmonic in question. The effectiveness of the filter was demonstrated by the harmonic distortion rate obtained before and after filtering.

**Keywords:** Harmonics, power quality, passive filter

# Table des matières

Remerciements.....	i
Résumé.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Table des matières.....	iii
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux .....	xii
Liste des abréviations .....	xii
Introduction générale .....	1
Chapitre 1 : Généralités des réseaux électriques .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Système de puissance.....	3
1.2.1 Production d'énergie électrique.....	4
1.2.2 Transport d'énergie électrique .....	4
1.2.2.1 Réseau maillé.....	5
1.2.2.2 Réseau bouclé.....	5
1.2.2.3 Réseau radiaux.....	6
1.2.3 Distribution d'énergie électrique.....	6
1.2.3.1 Réseaux de distribution à moyen tension .....	6
1.2.3.2 Réseau de distribution à basse tension .....	7
1.2.3.3 Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ.....	7
1.2.3.4 Lignes et câble utilisés dans la distribution .....	7
1.2.3.5 Différentes types des lignes aériennes.....	7
1.2.4 Consommation d'énergie électrique .....	11
1.3 Réseaux MT.....	11
1.3.1 Réseaux MT aériens .....	12

1.3.2	Réseaux MT souterrain.....	12
1.3.3	Poste source HT/MT.....	13
1.4	Réseaux BT .....	14
1.4.1	Réseaux BT aérienne.....	14
1.4.2	Réseaux BT souterrain.....	15
1.4.3	Postes HTA/BT.....	16
1.4.3.1	Poste sur poteau.....	16
1.4.3.2	Poste bas simplifier sous capot.....	16
1.4.3.3	Poste de type urbain raccordés en souterrain .....	16
1.5	Alimentation des poste HTA/BT.....	17
1.5.1	Alimentation en coupure d'artère.....	17
1.5.2	Alimentation en simple dérivation ou antenne.....	18
1.5.3	Alimentation en double dérivation.....	18
1.6	Conclusion.....	19
Chapitre 2 : Qualité d'énergie électrique .....		20
2.1	Introduction.....	20
2.2	Définition de la qualité énergie électrique .....	21
2.3	Indices de la qualité d'énergie électrique .....	21
2.3.1	Qualité de tension.....	21
2.3.1.1	Amplitude.....	21
2.3.1.2	Fréquence .....	22
2.3.1.3	Forme d'onde.....	22
2.3.1.4	Symétrie .....	22
2.3.2	Qualité du courant.....	22
2.4	Compatibilité électromagnétique (CEM).....	23
2.5	Perturbation de la qualité de l'énergie électrique .....	24

2.5.1	Creux et coupures de tension.....	24
2.5.1.1	Définition .....	24
2.5.1.2	Origine.....	25
2.5.1.3	Conséquences des creux de tension.....	26
2.5.2	Surtension .....	26
2.5.2.1	Définition .....	26
2.5.2.2	Origine.....	26
2.5.2.3	Conséquences .....	27
2.5.3	Fluctuations de Tension (Flicker) .....	27
2.5.3.1	Définition .....	27
2.5.3.2	Origine.....	28
2.5.3.3	Conséquences .....	28
2.5.4	Variations de fréquences.....	29
2.5.4.1	Définition .....	29
2.5.4.2	Origine.....	29
2.5.4.3	Conséquences .....	29
2.5.5	Déséquilibre de système triphasé .....	30
2.5.5.1	Définition .....	30
2.5.5.2	Origine.....	30
2.5.5.3	Conséquences .....	31
2.5.6	Harmonique .....	31
2.5.6.1	Définition .....	31
2.5.6.2	Origine.....	32
2.5.6.3	Conséquences .....	33
2.7	Conclusion .....	35
Chapitre 3 : Problèmes d'harmonique dans le réseau électrique .....		36

3.1	Introduction.....	36
3.2	Définition des harmoniques et inters harmoniques.....	36
3.2.1	Harmoniques .....	36
3.2.2	Inters harmoniques.....	37
3.3	Harmonique de Courant et de tension.....	37
3.4	Décomposition d'un signal périodique .....	38
3.5	Puissances en présence des harmoniques.....	39
3.6	Taux de Distorsion Harmonique (THD).....	40
3.7	Origines et sources des harmoniques .....	41
3.7.1	Emission en tension.....	41
3.7.1.1	Alternateurs .....	41
3.7.1.2	Transformateurs.....	41
3.7.1.3	Alimentations statiques sans interruption (ASI).....	42
3.7.2	Emission en courant.....	42
3.7.2.1	Redresseur triphasé à thyristors .....	42
3.7.2.2	Charges non linéaires.....	42
3.8	Conséquences des harmoniques .....	43
3.9	Norme .....	44
3.10	Principe de compensation .....	46
3.11	Solutions traditionnelles de la dépollution .....	46
3.11.1	Filtrages passifs .....	47
3.11.1.1	Filtre passif parallèle.....	47
3.11.1.2	Filtre passif série.....	48
3.11.2	Inconvénients des filtres passifs .....	49
3.12	Solutions modernes.....	50
3.12.1	Filtre actif.....	50

3.12.1.1	Principe de fonctionnement du filtre actif.....	50
3.12.1.2	Classification de filtre actif.....	50
3.13	Conclusion .....	53
Chapitre 4 : Résultats et simulation .....		54
4.1	Introduction.....	54
4.2	Filtre passif.....	54
4.3	Simulation différentes charges .....	55
4.3.1	Charge linéaire.....	55
4.3.2	Charge moteur CC .....	56
4.3.3	Charge Led .....	57
4.3.4	Charge Led avec une ligne impédance .....	58
4.3.5	Thyristor avec une charge résistive.....	59
4.3.6	Charge UPS.....	60
4.3.7	Réseau électrique BTA sans filtre passif.....	61
4.3.8	Charge non linéaire avec filtrage h5, h7, h11 et h13 .....	62
4.4	Interprétations des résultats .....	63
4.5	Conclusion.....	64
Conclusion générale.....		65
Bibliographies.....		66

# Liste des figures

Figure 1-1 : Flux traditionnel de l'énergie électrique .....	4
Figure 1-2 : Structure maillée .....	5
Figure 1-3 : Structure bouclée.....	5
Figure 1-4 : Structure en coupure d'artère .....	6
Figure 1-5 : Structure arborescente.....	6
Figure 1-6 : Schéma d'un conducteur isolé (Torsadé).....	8
Figure 1-7 : Réseaux MT aériens .....	12
Figure 1-8 : Réseau MT souterrain.....	13
Figure 1-9 : Schéma d'un poste HT/MT .....	13
Figure 1-10 : Schéma du principe d'une rame MT.....	14
Figure 1-11 : Réseau BT aérienne .....	15
Figure 1-12 : Réseau BT souterrain.....	15
Figure 1-13 : Structures des postes HTA/BT .....	17
Figure 1-14 : Poste alimenté en coupure d'artère .....	18
Figure 1-15 : Poste alimenté en simple dérivation.....	18
Figure 1-16 : Poste alimenté en double dérivation .....	19
Figure 2-1 : Composantes de la compatibilité électromagnétique .....	23
Figure 2-2 : Différentes perturbations .....	24
Figure 2-3 : Creux et coupure brève.....	25
Figure 2-4 : Amplitude d'un creux de tension .....	26
Figure 2-5 : Exemple de surtension .....	27
Figure 2-6 : Fluctuation de tensions .....	29
Figure 2-7 : Variation de fréquence.....	30
Figure 2-8 : Déséquilibre du système .....	31

Figure 2-9 : Exemple d'allures de signaux déformés.....	33
Figure 3-1 : Forme de l'onde d'un courant déformé avec les harmoniques.....	38
Figure 3-2 : Principe de filtre passif.....	47
Figure 3-3 : Filtre passif parallèle (a), filtre passif haut (b).....	48
Figure 3-4 : Filtre passif série.....	48
Figure 3-5 : Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle.....	50
Figure 3-6 : Structure du filtre actif parallèle .....	51
Figure 3-7 : Structure du filtre actif série.....	52
Figure 3-8 : Structure du filtre active hybride (série, parallèle).....	52
Figure 4-1 : Schéma d'un filtre passif.....	54
Figure 4-2 : Schéma bloc charge linéaire.....	55
Figure 4-3 : Forme de tension et du courant charge linéaire .....	55
Figure 4-4 : Schéma charge DC moteur .....	56
Figure 4-5 : Forme de tension et du courant DC moteur .....	56
Figure 4-6 : Schéma charge Led .....	57
Figure 4-7 : Forme de tension et du courant charge Led.....	57
Figure 4-8 : Schéma charge Led avec une ligne impédance .....	58
Figure 4-9 : Forme de tension et du courant charge Led avec une ligne impédance.....	58
Figure 4-10 : Schéma charge thyristor avec une résistive R .....	59
Figure 4-11: Forme de tension et du courant charge thyristor avec une résistive R.....	59
Figure 4-12 : Schéma bloc pour charge UPS .....	60
Figure 4-13 : Forme de tension et du courant charge UPS.....	60
Figure 4-14: Schéma de bloc globale du réseau électrique BTA sans filtre passif .....	61
Figure 4-15: Forme de tension et du courant de la charge sans filtre .....	61
Figure 4-16 : Forme du Spectre du courant au réseau électrique avant filtrage .....	61
Figure 4-17 : Schéma de bloc de la charge non linéaire avec filtrage h5,h7,h11 et h13.....	62

Figure 4-18 : Forme de tension et du courant d'une charge non linéaire avec filtrage h5, h7, h11 et h13.....	62
Figure 4-19 : Forme du Spectre du courant et tension après filtrage.....	62

# Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Domaines de tension .....	7
Tableau 2-1 : Vue d'ensemble des principales perturbations électriques.....	34
Tableau 3-1 : Limites CEI 1000-2-4.....	45
Tableau 3-2 : Limites CEI 1000-3-2.....	45

# Liste des abréviations

**BT** Basse tension

**MT** Moyenne tension

**THT** Très haut tension

**HT** Haut tension

**HTA** Haut tension catégorie A

**HTB** Haut tension catégorie B

**BTA** Basse tension catégorie A

**BTB** Basse tension catégorie B

**EP** Ecoulement de puissance

**PRC** Polyéthylène réticulé chimiquement

**ILT** L'intensité maximale de courant limite

**IEEE** Institute of Electrical and Electronics Engineers

**CEM** Comptabilité électromagnétique

**QEE** Qualité d'énergie électrique

**FP** Facteur de puissance

**THD** Taux de distorsion harmonique

**ASI** Alimentation statiques sans interruption

**ISO** Organisation internationale de normalisation

**CEI** Communauté des États indépendants

**FA** Filtre actif

**FAS** Filtre actif série

**FAP** Filtre actif parallèle

**UPS** Uninterruptible power supply

# Introduction générale

Avec la révolution technologique et industrielle mondiale, la demande d'énergie électrique a connu une augmentation continue. Pour répondre à ces besoins il faut avoir livré cette énergie avec une bonne qualité et avec une continuité assurée par les distributeurs [1].

La sensibilisation à la Qualité de l'Energie Electrique (QEE) est devenue incontournable aujourd'hui depuis les évolutions réglementaires qui ont eu lieu ces dernières années [2]. Les distributeurs ainsi que les transporteurs d'énergie électrique s'efforcent afin de garantir cette qualité de l'électricité fournie. Dans ce nouveau contexte, le distributeur de l'énergie électrique doit assumer une certaine responsabilité pour la livraison de l'électricité selon les normes et techniques en vigueur. Cette responsabilité implique que la surveillance systématique de la qualité de l'énergie deviendra de plus en plus une pratique courante. Elle est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années [3].

Pour cette fin, des normes de limites pour chaque problème technique tel que les harmoniques ont été exigées, afin de réduire ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie fournie. Il existe plusieurs solutions, parmi lesquelles : des filtres passifs, souvent appelés filtres de superposition d'harmoniques sont installés pour éliminer ces harmoniques.

L'objectif de ce mémoire est de faire une étude et simulation du phénomène des harmoniques dans le réseau électrique de distribution dû au raccordement des charges non linéaires. Pour démontrer le problème des harmoniques, nous avons à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK fait de différents scénarios représentés par des blocs de simulation à savoir : un circuit avec une charge linéaire, une charge avec moteur à courant continu, une charge à lampe Led, une charge avec une impédance, une charge avec thyristors et une charge comme UPS (Uninterruptible Power Supply). A la fin de la simulation nous avons simulé un filtre installé en présence de la charge non linéaire pour voir leur influence sur l'élimination des harmoniques dans le réseau électrique considéré.

Pour cela, nous avons structuré notre mémoire comme suit :

**Chapitre 1** : Des généralités des réseau électrique, à savoir nous avons également les niveaux de tension existants, les différentes étapes de la fourniture de l'électricité, ainsi que les structures des réseaux de transport ensuite les différents équipements des réseaux moyenne et basse tension.

**Chapitre 2 :** Nous abordons tout d'abord les différents problèmes qui affectent la qualité de l'énergie électrique, et nous montrons les principaux types de perturbations, leurs origines, causes et conséquences sur les installations, et essayons de dégager des solutions pour remédier à ces problèmes. Nous nous concentrons sur les harmoniques, car elles sont dangereuses avec l'augmentation des charges non linéaires.

**Chapitre 3 :** Etalera les différents problèmes des harmoniques dans les réseaux électriques. Ensuite nous proposons des filtres comme solution pour éliminer ces harmoniques.

**Chapitre 4 :** Dans ce chapitre, nous établissons des blocs de simulation de différents scénarios ciblés en utilisant MATLAB-Simulink à savoir la simulation d'un circuit avec une charge linière, un circuit avec moteur à courant continu, une charge comme lampe Led, une charge à lampe Led avec résistance, une charge à lampe Led avec une impédance, une charge contient des thyristors, une charge comme UPS (Uninterruptible Power Supply). En fin de ce chapitre, nous avons installé un filtre en présence de la charge non linéaire pour voir leur influence sur l'élimination des harmoniques dans le réseau électrique simulé.

Travaux à venir : Conception d'un filtre active pour réduire le taux d'harmonique dans le réseau électrique de distribution basse tension.

# Chapitre 1 : Généralités des réseaux électriques

## 1.1 Introduction

Un système de puissance est considéré parmi les processus les plus compliqués à gérer et ceci est dû à sa taille et sa composition diversifiées depuis la production d'énergie, son transport, sa distribution et finalement le grand nombre de consommateurs [4]. Pour remédier à ces contraintes, le gestionnaire du réseau (cas de l'Algérie), a divisé ces tâches (production, transport et distribution) sur trois filiales indépendantes l'une de l'autre. Dans ce chapitre nous allons présenter ces différentes parties du système de puissance.

## 1.2 Système de puissance

Un système de puissance classique se compose des sources électriques centralisées, d'un réseau de transport, d'un réseau de distribution et des consommateurs. La production est généralement définie comme l'acte de produire de l'énergie dont les ressources énergétiques primaire sont le charbon, le gaz naturel, le nucléaire, le pétrole et les sources renouvelables (solaires ou photovoltaïques, éoliennes, hydroélectriques ...) [5, 4]. Ces centrales de production sont généralement situées à une grande distance des consommateurs. Le réseau de transport a pour mission d'acheminer l'énergie électrique produite vers les points de consommation. Enfin, la distribution désigne le processus de distribuer cette énergie aux clients finaux dont la majeure partie d'entre eux est alimentée par le réseau basse tension (pavillons, immeubles d'habitation, écoles, artisans, commerçants, professions libérales, exploitations agricoles...) [4].

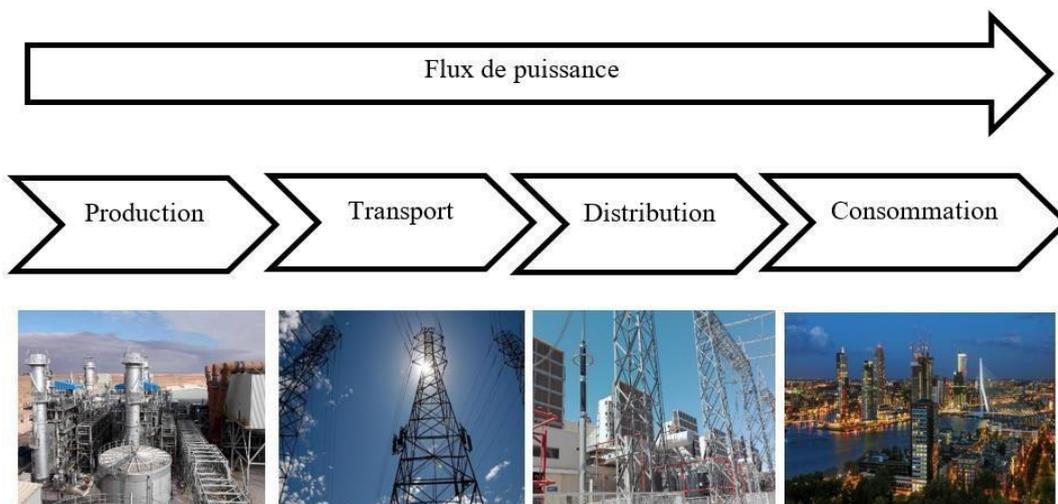


Figure 1-1 : Flux traditionnel de l'énergie électrique [4].

### 1.2.1 Production d'énergie électrique

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur de groupe. L'ordre de grandeur de la puissance active produite par ces groupes est compris entre 100 MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1650 MW pour les plus puissantes tranches des centrales nucléaires.

La production peut être classée suivant le type d'énergie primaire utilisée pour générer de l'électricité [6].

### 1.2.2 Transport d'énergie électrique

Les réseaux de transport assurent le transfert de grandes quantités en énergie électrique sur de longues distances. Ces réseaux sont à haute tension catégorie B (de 60 kV à 400 kV pour le cas de l'Algérie) afin de minimiser les pertes actives dans les lignes. Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont maillés ou interconnectés afin de collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer vers les zones de consommation, et de permettre une exploitation économique et sécurisée des moyens de production. La structure de ces réseaux est essentiellement de type aérien. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes car ces lignes sont vitales pour la stabilité et la sécurité du système tout entier. L'écoulement de puissance (EP) peut ainsi être réparti

entre toutes les lignes du réseau. Leur gestion est par contre complexe : Les transferts de puissance entre zones de production et zones de consommation sont très importants et variables. Ils rendent l'optimisation technicoéconomique des réseaux difficiles. Par conséquent, de manière générale, les réseaux de transport, comparativement aux réseaux de distribution, sont très supervisés afin de pouvoir effectuer des contrôles de la tension, de la fréquence, la répartition de l'EP et des coûts de production, etc. En Algérie (SONELGAZ) les niveaux de tension pour le réseau de transport sont : 400 kV, 220 kV et 60 kV [4].

### 1.2.2.1 Réseau maillé

Les réseaux maillés sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées formant ainsi une structure analogue à la maille d'un filet. Ils sont utilisés pour les réseaux de distribution à basse tension (BT) et pour les réseaux de transport [7].

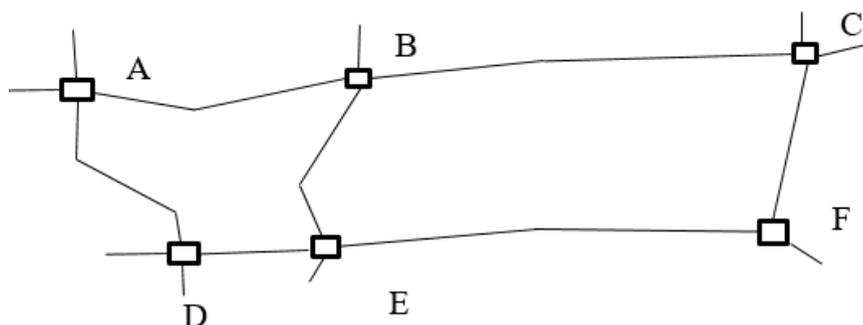


Figure 1-2 Structure maillée [8].

### 1.2.2.2 Réseau bouclé

Est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution moyenne tension (MT). Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés [9].

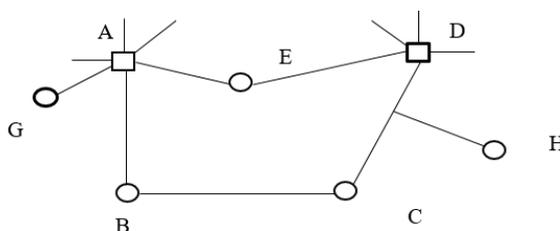


Figure 1-3 Structure bouclée [8].

### 1.2.2.3 Réseaux radiaux

Les réseaux radiaux sont exploités débouclés, et la sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée. On rencontre deux types principaux de structures :

- **En coupure d'artère** typique des réseaux souterrains, ces réseaux sont conçus pour un éventuel fonctionnement en bouclé.



Figure 1-4 Structure en coupure d'artère [8].

- **A structure arborescente** typique des réseaux ruraux aériens, ces réseaux comptent des points de bouclage pour assurer un secours par la moyenne tension [10].

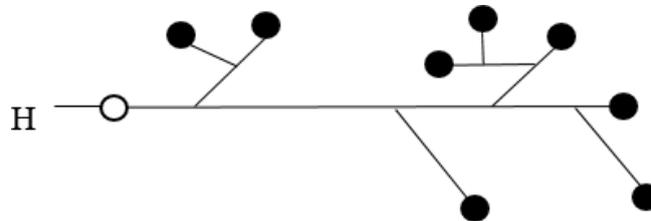


Figure 1-5 Structure arborescente [8].

## 1.2.3 Distribution d'énergie électrique

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique [11].

### 1.2.3.1 Réseaux de distribution à moyenne tension

Les lignes moyennes tension permettent le transport de l'électricité à l'échelle locale vers les petites industries HTA (30 et 10 kV le plus répandu)

- Neutre à la terre par une résistance
- Limitation à 300 A pour les réseaux aériens.

- Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains.
- Réseaux souterrains en boucle ouverte [12].

### 1.2.3.2 Réseaux de distribution à basse tension

Les lignes basse tension sont les plus petites lignes du réseau, ce sont celles qui nous servent tous les Jours pour alimenter nos appareils ménagers BT (230 / 400 V) :

- Neutre directement à la terre.
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés [12].

### 1.2.3.3 Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative, comme suit :

Tableau 1-1 Domaines de tension [11].

Domaines de Tension		Valeur de tension composée nominale ( $U_n$ en volts)	
		Tension Alternatif	Tension Continu
Très basse tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haut tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n \leq 50000$	$1500 < U_n \leq 75000$
	HTB	$U_n > 50000$	$U_n > 75000$

### 1.2.3.4 Lignes et câbles utilisés dans la distribution

La destitution de l'énergie est actuellement assurée par des lignes aériennes ou des câbles souterrains. Le choix entre ces deux techniques est basé essentiellement sur des considérations de contraintes climatiques, d'occupation du sol, d'urbanisation et d'esthétique et surtout des considérations économiques [13].

### 1.2.3.5 Différents types des lignes aériennes

Le réseau de distribution aérien qui existe actuellement est réalisé avec deux catégories de lignes :

## A. Lignes classiques

Elles permettent l'alimentation en énergie électrique à partir de cinq (5) fils établis en conducteurs nus, montés en drapeau.

- ❖ Le fil le plus haut de la ligne qui est le neutre.
- ❖ Les trois fils du milieu correspondent aux trois phases.
- ❖ Le fil le plus bas pour l'éclairage public [13].

## B. Lignes torsadées

Elles sont les plus utilisées actuellement puisqu'elles permettent de sécuriser les phases en les isolant à la couverture des conducteurs. Les renforcements et les remplacements des lignes effectués actuellement, ne se font qu'avec des lignes torsadées. Le torsadé BT se présente sous forme de faisceau composé de :

- 01 conducteur neutre porteur central en Almélec autour duquel on trouve :
- 03 conducteurs de phase en Aluminium (1 2 et 3) de la phase et imprimé et marqué soit à l'aide d'un produit indélébile blanc soit en creux sur l'isolant.
- 01 ou 02 conducteur (s) de section plus faible pour l'éclairage public. Chaque conducteur est recouvert d'une gaine isolante en PRC noire (Polyéthylène réticulé chimiquement) en raison de sa souplesse à basse température et de sa bonne résistance mécanique à chaud [14].

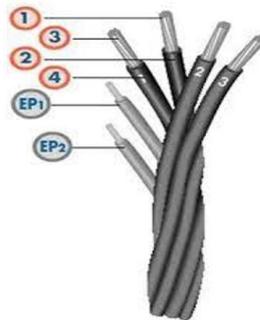


Figure 1-6 Schéma d'un conducteur isolé (Torsadé) [14].

## C. Sections les plus utilisées par SONELGAZ

Les sections retenues par SONELGAZ sont :

- 16 mm<sup>2</sup> et 25 mm<sup>2</sup> : pour les branchements (usagers domestiques) et l'éclairage public.
- 36 mm<sup>2</sup> et 70 mm<sup>2</sup> : pour les conducteurs de phases.
- 54,6 mm<sup>2</sup> : pour le conducteur du neutre porteur central en Almélec
- 120 mm<sup>2</sup> et 150 mm<sup>2</sup> : ont été introduites récemment pour les départs de forte densité de charge dont le but est de remplacer les conducteurs en Cuivre, souvent utilisées dans les sorties des transformateurs MT/BT [14].

#### **D. Avantages de l'utilisation des lignes torsadées**

Les réseaux BT en conducteurs isolés ou torsadés présentent de nombreux avantages par rapport aux lignes en conducteurs nus :

- Les chutes de tension sont réduites du fait de la faible valeur de la réactance linéique ( $L_w=0,1W/km$  au lieu de  $0,35W/km$  pour les lignes en conducteurs nus).
- L'intervention en exploitation, notamment en travaux sous tension est facile.
- La facilité et l'économie dans le raccordement des branchements.
- Le risque d'électrocution des êtres vivants est pratiquement nul, il y a la suppression des risques d'incendie en cas de chute des conducteurs dans les zones boisées.
- La réduction des distances de garde (à respecter) par rapport aux immeubles et aux autres lignes aériennes (électricité, télécommunication, etc.), d'où une latitude accrue dans le choix des tracés.
- En cas de rupture de support, il y a maintien en fonctionnement temporaire du réseau.
- Les âmes isolées sont soustraites aux contacts accidentels des corps étrangers [14].

#### **E. Domaine d'utilisation**

Les réseaux aériens BT en conducteurs isolés, torsadés sont utilisés pour la desserte des :

- Zones rurales.
- Zones urbaines dont la densité de consommation est inférieure à 200A. Ils permettent une charge de 100 KVA par départ.
- A l'extrémité du réseau [14].

## F. Intensité maximale admissible par les conducteurs

L'intensité admissible par les conducteurs ou autrement appelée la capacité de transit des conducteurs, est la valeur de courant limite à ne pas dépasser qu'un conducteur d'une section déterminée peut transiter l'intensité maximale de courant limite (ILT) des différents conducteurs selon les matériaux et les sections sont données par les fabricants pour les lignes en Almélec et Aluminium. Acier ; celles des lignes en Cuivre sont calculées à l'aide de la formule :

$$ILT = 21. S^{0.6} \quad (1-1)$$

Avec :

S : La section du conducteur en (mm<sup>2</sup>) [14].

## G. Supports

Les supports de lignes aériennes sont couramment des poteaux en bois ou en béton armé, ou bien des pylônes métalliques de formes très variées [13].

## H. Supports en bois

Les essences de bois utilisées sont presque toujours des résineux (les poteaux de pin, sapin, épicéa) que l'on imprègne de produits antiseptiques pour les protéger contre les attaques biologiques par insectes et champignons, ils sont utilisés surtout pour les lignes à basse tension et ils sont utilisés en portique. La durée de vie moyenne d'un poteau en bois est de 35 à 40 ans [13].

## I. Propriétés des poteaux en bois

Les supports en bois présentent certains avantages :

- Leur légèreté qui rend plus facile leur transport et leur mise en place.
- Leur prix est peu élevé.
- Leur grande fiabilité (un poteau en bois est capable de prendre de très grandes flèches sans se rompre) [13].

## J. Supports en béton armé

Les poteaux en béton armé sont généralement obtenus par moulage.

## **K. Propriétés des poteaux en béton armé**

Bien que plus lourds et plus chers que les poteaux en bois, ils ont l'avantage d'être fabriqués suivant une gamme très étendue de résistances et de hauteurs, en particulier dans les fortes valeurs d'effort. Ils peuvent donc être utilisés pour des conducteurs d'assez forte section et pour des portées grandes longueurs. Ceci permet donc de diminuer le nombre de poteaux par kilomètre [13].

## **L. Supports en acier**

Ces supports sont utilisés dans la distribution soit en moyenne ou en basse tension. Une des caractéristiques intéressantes des ensembles composés en acier (soit des pylônes ou les potelets fixés aux murs et aux toitures dans les villes, ferrures d'armement pour les supports en bois et en béton) est qu'ils peuvent se transporter et se monter par éléments, car leur assemblage est facile (par tronçons ou par partie), certains assemblages de barres peuvent se faire par soudure. Cette technique est fréquemment utilisée sur les pylônes tubulaires.

La protection des divers pylônes contre l'oxydation due à l'humidité ou aux pollutions marines ou industrielles se fait par une peinture métallisée [13].

### **1.2.4 Consommation d'énergie électrique**

La consommation d'énergie électrique sur un territoire est éparpillée car elle est répartie sur de différents appareils électriques. Ces appareils sont soit des appareils thermiques comme les radiateurs électriques ou des dispositifs destinés au chauffage, des appareils industriels comme les moteurs électriques ou des appareils lumineux comme l'éclairage. En Algérie, les consommateurs basse tension sont connectés sur le réseau de distribution. Dans les réseaux électriques, les consommateurs sont appelés charges, caractérisées par leurs puissances active et réactive consommées. Nous pouvons classer les types de consommateurs basse tension en trois catégories à savoir des consommateurs commerciaux et consommateurs domestique [15].

## **1.3 Réseaux MT**

Le réseaux MT sont composés d'un ensemble de lignes aériennes et souterraines conçues pour distribuer de l'énergie provenant d'un poste HT/MT aux postes MT des abonnés et aux postes de distribution publics MT/BT, ils sont en triphasé pour une exploitation soit à 30 kV (réseaux aériens), soit à 10 kV (réseaux souterrains) [16].

### 1.3.1 Réseaux MT aériens

La structure des réseaux MT aériens est arborescente à deux ordres de lignes : dorsales (de forte section et de grande fiabilité) et dérivations (de section et de fiabilité plus faibles), des sous dérivations peuvent être utilisées pour alimenter des charges isolées, ils sont utilisés souvent dans les zones rurales, car les densités et les conditions d'exploitation justifient généralement le maintien de ce genre de réseau [16]. La figure 1-7 représente le réseaux MT aériens.



Figure 1-7 Réseaux MT aériens.

### 1.3.2 Réseau MT souterrain

Ils sont utilisés dans les zones urbaines, leur structure est à un seul type de ligne « les dorsales », ces réseaux, de par leur construction (faible longueur et forte section des conducteurs) sont le siège des chutes de tension réduites. De ce fait, en tenant compte de l'importance des incidents (charges coupées et durée d'interruption plus élevée qu'en réseau aérien), ils seront prévus d'une réalimentation soit par des réseaux voisins ou par un câble de secours. Les contraintes liées à l'environnement urbain font que les réseaux MT sont les plus souvent réalisés en canalisation souterraine, en général : en coupure d'artère, en boucle ouverte, ou parfois en double dérivation [16]. La figure 1-8 représente le réseau MT souterrain.



Figure 1-8 Le réseau MT souterrain.

### 1.3.3 Poste source HT/MT

Le réseau de distribution moyenne tension commence à partir du poste source HT/MT d'où partent plusieurs départs MT constitués d'un ensemble de conducteurs et d'appareils de coupure qui alimentent les charges moyenne tension ou les postes de distribution publique (MT/BT). Ce type de poste (figure 1-9) est constitué d'un transformateur (T1) alimenté par une ligne HT (HT1). Avec l'augmentation des charges à desservir, on peut y adjoindre un deuxième (T2), puis, en stade final, un troisième transformateur (T3) généralement en double attache [17].

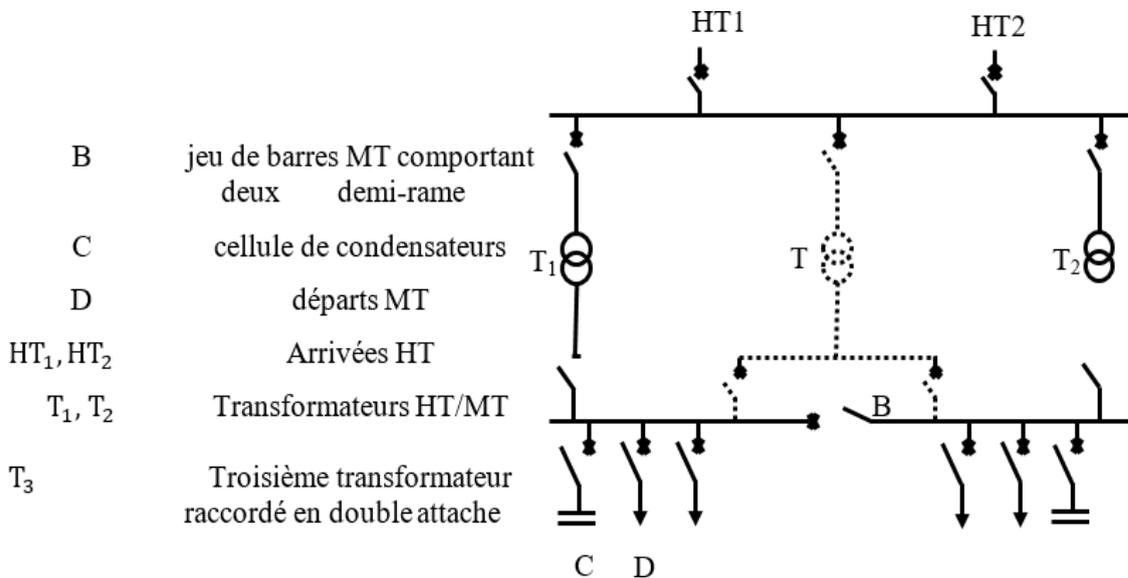
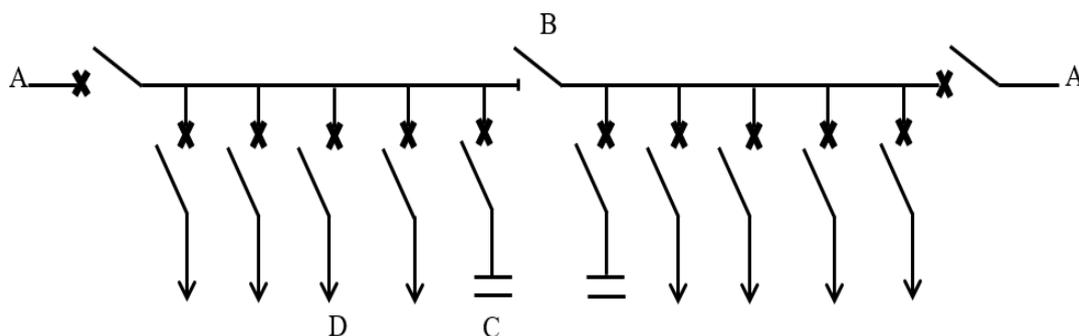


Figure 1-9 Schéma d'un poste HT/MT.

En même temps que le deuxième transformateur, on raccorde généralement une deuxième Arrivée HT (HT2), dite garantie ligne, opérant en cas de défaut sur la première. Le ou les Transformateurs débitent sur un tableau MT qui forme un jeu de barres composé de rames. Chaque rame est un ensemble d'une dizaine de cellules environ, organisée en deux demi rames+ 2 Re- liées entre elles par un organe de couplage, en sectionnement de barre (figure 1 -10). Le demi. Rame élémentaire comprend :

- Une arrivée de transformateur.
- Plusieurs départs MT.
- Une cellule de condensateurs (compensation de l'énergie réactive).
- Éventuellement, un disjoncteur shunt [17].



A	arrivée de transformateur	C	cellules de condensateurs
B	couplage entre demi-rames	D	départs HTA

Figure 1-10 Schéma du principe d'une rame MT [17].

## 1.4 Réseau BT

Le réseau en basse tension sont constitués de lignes aériennes et des câbles souterrains, permettant de transiter l'énergie électrique depuis un poste de transformation MT/BT jusqu'aux consommateurs, qui sont alimentés par une tension simple de 230V (Branchement 2fils « phase. Neutre ») ou une tension composée de 400 V (Branchement 4 fils « 3 phases. Neutre ») [18].

### 1.4.1 Réseau BT aérienne

Le réseau à basse tension alimenté par un poste MT/BT est destiné à la desserte des habitants individuels ou des lotissements émergents (nouveaux), il est utilisé couramment dans les zones

rurales et semi-rurales. La structure des réseaux aériens sera à deux ordres de lignes : les dorsales et les dérivations, la connexion avec des lignes adjacentes sont justifiables que lorsqu'elles ont lieu de façon naturelle ; soit avec un investissement marginal, généralement en conducteurs nus sur isolateurs mais à l'heure actuelle, tous les réseaux neufs sont faits avec des câbles isolés (torsadés) [16]. La figure 1-11 représente le réseau BT aérienne.



Figure 1-11 Réseau BT aérienne.

#### 1.4.2 Réseau BT souterrain

Le réseau souterrain consiste à alimenter en énergie électrique les immeubles collectifs généralement les zones urbaines ou mixtes, la desserte au départ commence à partir du poste MT/BT jusqu'au coffret du bloc de l'immeuble et se poursuit pour constituer une boucle avec les autres coffrets [16]. La figure 1-12 suivante représente le réseau BT souterrain.



Figure 1-12 Réseau BT souterrain.

### **1.4.3 Postes HTA/BT**

Ils sont l'interface entre les réseaux HTA et BT. Ils ont essentiellement un rôle de transformation HTA/BT auquel peuvent éventuellement être associées une fonction d'exploitation HTA et une fonction de répartition BT, suivant la charge à desservir. Une des caractéristiques essentielles des postes HTA/BT est leur puissance nominale. On rencontre à travers le monde des puissances comprises entre quelques kilos Voltampères et plusieurs méga Voltampères. On peut citer plusieurs types de postes HTA/BT de niveau de complexité croissante (figure 1-13) [17].

#### **1.4.3.1 Poste sur poteau**

C'est le poste le plus simple, utilisé dans un réseau aérien. Apparu dans les années 50, son principe de conception est de considérer qu'il fait partie intégrante de la ligne. Sur le même poteau sont supportés l'arrivée HTA (du type à simple dérivation sans organe de coupure), un transformateur apparent et une sortie BT avec un disjoncteur BT en milieu de poteau, ce disjoncteur a un rôle de protection contre les surintensités. Ce type de poste est simple et peu coûteux. Les puissances normalisées du transformateur sont : 63, 100 et 160 KVA [19].

#### **1.4.3.2 Poste bas simplifier sous capot**

Généralement préfabriqué, raccordé exclusivement sur des réseaux aériens HTA, ce type de poste (relativement simplifié et compact, 3 m<sup>2</sup> et 1,50 m de hauteur), permet de délivrer des puissances (160 ; 250 ; 400 kVA) supérieures à celles du H61, dans des conditions encore économiques. La liaison avec le réseau HTA s'effectue par descente aéro souterraine en câble sec sans organe de coupure, le raccordement au transformateur étant réalisé par prise embrochable.

L'énergie BT peut être répartie par un ensemble comportant un organe de coupure et jusqu'à quatre départs protégés par fusibles. Ce type de poste remplace les conceptions plus anciennes en maçonnerie traditionnelle (cabines basses), coûteuses et aujourd'hui abandonnées [19].

#### **1.4.3.3 Poste de type urbain raccordés en souterrain**

Suivant les contraintes d'environnement rencontrées, diverses solutions sont utilisées pour l'enveloppe du poste : enterrée dans le domaine public, local en immeuble, cabine en maçonnerie traditionnelle ou préfabriquée manœuvrable soit de l'extérieur, soit de l'intérieur. Du fait des structures de réseau HTA en coupure d'artère ou en double dérivation, ils comportent un appareillage HTA composé en général de deux arrivées MT (MT1, MT2) avec cellules interrupteurs



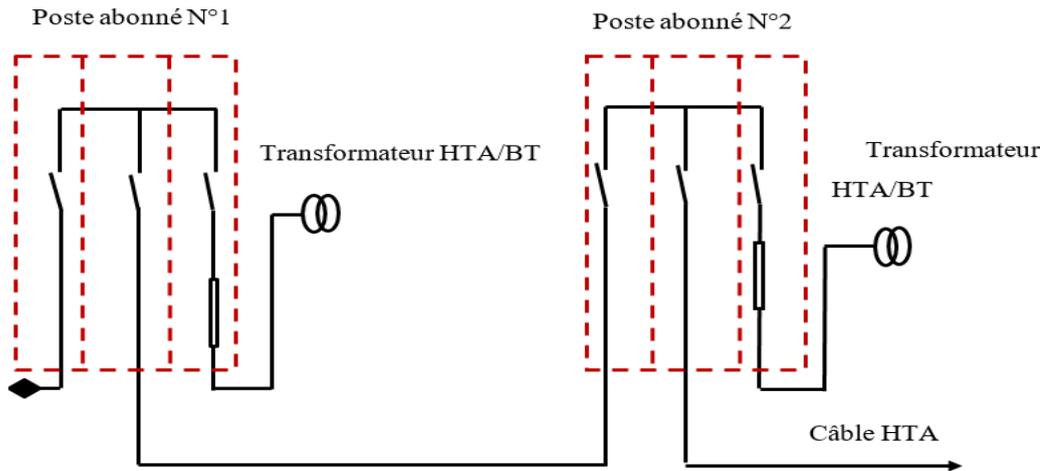


Figure 1-14 Poste alimenté en coupure d'artère [20].

### 1.5.2 Alimentation en simple dérivation ou antenne

C'est le schéma le plus simple, généralement utilisé pour les postes ruraux et quelquefois pour les postes urbains (installations provisoires, postes de chantier). Un seul câble ou ligne aérienne alimente le poste figure (1-15). En cas défaut sur un de câble ou dans un poste dans la majorité des cas (le bouclage en basse tension n'étant généralement pas possible), les utilisateurs sont privés d'alimentation la réparation [18].

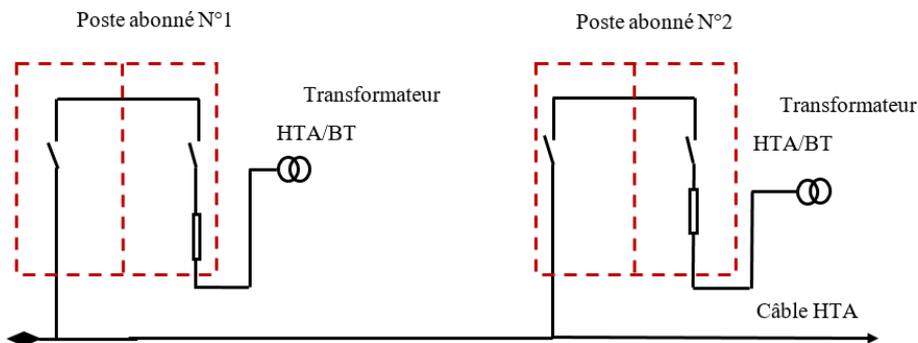


Figure 1-15 Poste alimenté en simple dérivation [15].

### 1.5.3 Alimentation en double dérivation

La distribution en double dérivation (figure 1-16) permet dans les zones de forte densité de maintenir un haut niveau de disponibilité de l'énergie électrique. Les postes de livraison sont connectés au réseau par leur câble « travail » et sont permutés soit automatiquement en cas de défaut, soit par télécommande en cas de travaux [20].

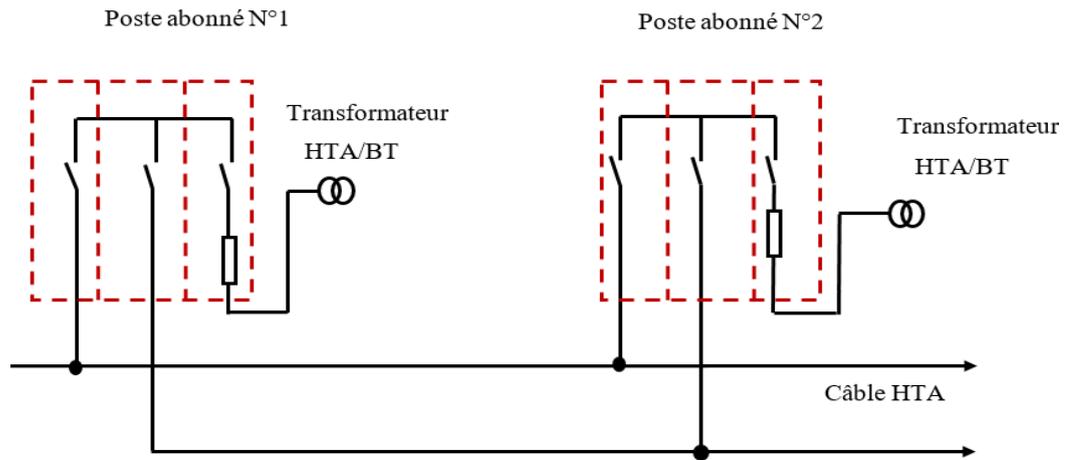


Figure 1-16 Poste alimenté en double dérivation [20].

## 1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons démontré les différentes étapes de la fourniture d'électricité depuis les centrales de production en passant par la production, le transport, la distribution et arrivant les consommateurs finaux, ensuite nous avons présenté les différents équipements du réseau de distribution, à savoir poste source HT/MT, poste HTA/BT (Poste sur poteau dit H61, 2 Poste bas simplifier sous capot, Poste de type urbain raccordés en souterrain), les lignes aériennes (lignes classiques et lignes torsadée), et Les supports (supports en bois, supports en béton armé et les supports en acier).

## Chapitre 2 : Qualité d'énergie électrique

### 2.1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique est un terme très répandu dans le domaine scientifique et industriel. Ce concept détermine les paramètres qui définissent les propriétés du produit électricité en conditions normales, en terme de continuité de la fourniture et des caractéristiques de la tension (symétrie, fréquence, amplitude, forme d'onde). Cette vision a pour but de déterminer les caractéristiques de la fourniture électrique afin de limiter son influence sur les différentes charges connectées au réseau, les principales perturbations électriques ainsi que leurs origines, caractéristiques et conséquences. Selon l'IEEE, on appelle "power quality problem" toute variation dans l'alimentation en puissance électrique, ayant pour conséquence le dysfonctionnement ou l'avarie d'équipements des utilisateurs, telle que : creux de tension, surtension, transitoire, fluctuations de tension, harmoniques, déséquilibre... Cependant, tous ces phénomènes affectent essentiellement la tension qui est fournie à l'utilisateur. Si ce dernier n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie. C'est pourquoi on dit parfois que la qualité de l'énergie se réduit à la qualité de la tension ("power quality = voltage quality") [21].

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites tertiaires ou industriels, et les constructeurs d'équipements, essentiellement pour les raisons suivantes :

- La nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises.
- La généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations.
- L'ouverture du marché de l'électricité [22].

## 2.2 Définition de la qualité énergie électrique

Utilisez La notion de la qualité d'énergie électrique est définie à travers des concepts dédiés à l'énergie qu'il repose sur trois critères principaux : la continuité de l'alimentation, la qualité de tension et la qualité de service [23].

Dans une définition générale, on retient la formule :

Qualité de l'électricité=Qualité la tension + Continuité de l'alimentation+ la Qualité de service

Qui se déchiffre comme :

- Qualité de l'onde de la tension : aptitude à alimenter de façon continue et satisfaisante les appareils qui utilisent l'électricité.
- Continuité de l'alimentation : elle est affectée par les interruptions fortuites, longues ou brèves, et est interruptions programmées. Elle se mesure par le nombre de coupures d'alimentation en un point donné : coupure/unité de temps.
- Qualité de service : elle caractérise la relation entre le gestionnaire ou fournisseur et l'utilisateur des réseaux (abonnés) [24].

## 2.3 Indices de la qualité d'énergie électrique

La qualité de l'énergie électriques est considérée comme une combinaisons de la qualité de la tension et la qualité de courant.

### 2.3.1 Qualité de tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie [21].

#### 2.3.1.1 Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, L'am-

plitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions [25].

### **2.3.1.2 Fréquence**

Idéalement, les trois tensions sont de type sinusoïdal alternatif avec une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon les pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production.

Toutefois, ces différences sont généralement très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dotés de réseaux interconnectés, la norme EN 50160 stipule que la fréquence fondamentale mesurée sur 10 secondes doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$  pendant 99,5 % de l'année. Il convient également de noter que les différences de fréquence peuvent être beaucoup plus importantes pour des réseaux indépendants [26].

### **2.3.1.3 Forme d'onde**

Un sinusoïdale d'une fréquence de 50 Hz représente une onde idéale, mais des distorsions se produisent et laisse apparaître harmoniques dues à des charges non linéaires. Donc cette onde n'est plus une onde sinusoïdale, on peut considérer en tant qu'onde fondamentale à 50 Hz, elle est associée aux harmoniques et aux ondes, toutes fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz[27].

### **2.3.1.4 Symétrie**

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre [28].

## **2.3.2 Qualité du courant**

La qualité de courant est relative à une dérive de courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de  $2\pi/3$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension » [29].

## 2.4 Comptabilité électromagnétique (CEM)

La CEM est l'aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante, sans émettre des perturbations insupportables ni être perturbé par les autres appareils [30].

Dans le cadre de la normalisation, on tend à utiliser le terme CEM au sens large. Il s'agit d'assurer la compatibilité par une bonne coordination des niveaux d'immunité des appareils sensibles et des niveaux d'émission des appareils perturbateurs qui couvrent tous les phénomènes.

Dans le langage courant, on considère le plus souvent que CEM et Qualité de l'Electricité couvrent deux domaines distincts, mettant en œuvre des techniques d'analyse et de compensation différentes, avec certains recouvrements (la Qualité de l'Electricité se soucie des perturbations à basse fréquence, pénétrant par l'alimentation électrique ; la CEM se soucie des perturbations à haute fréquence, ou des perturbations pénétrant par d'autres voies que l'alimentation électrique - les prises de terre, les entrées/sorties de signaux, par couplage inductif ou capacitif, par rayonnement) [31].

Les générateurs de perturbations ou sources vont, par l'intermédiaire de chemins de propagation, agir sur une victime.

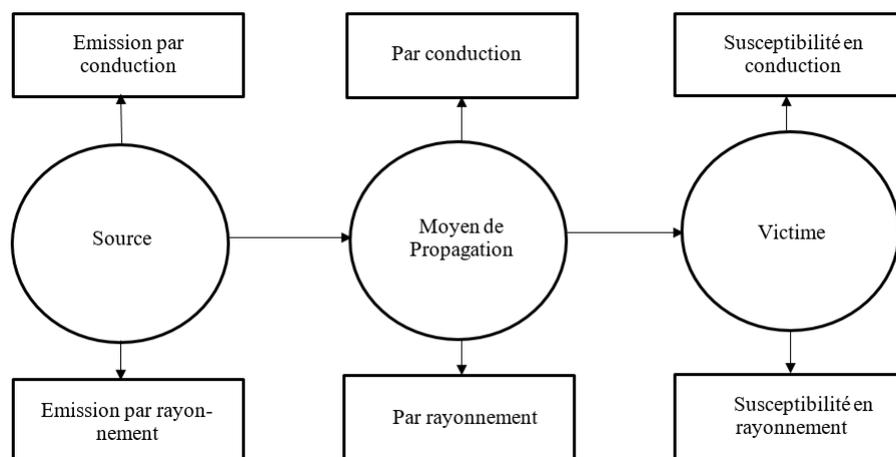


Figure 2-1 Composantes de la compatibilité électromagnétique [32].

## 2.5 Perturbations de la qualité de l'énergie électrique

Le schéma ci-après représente les différentes perturbations affectant la qualité de l'électricité :

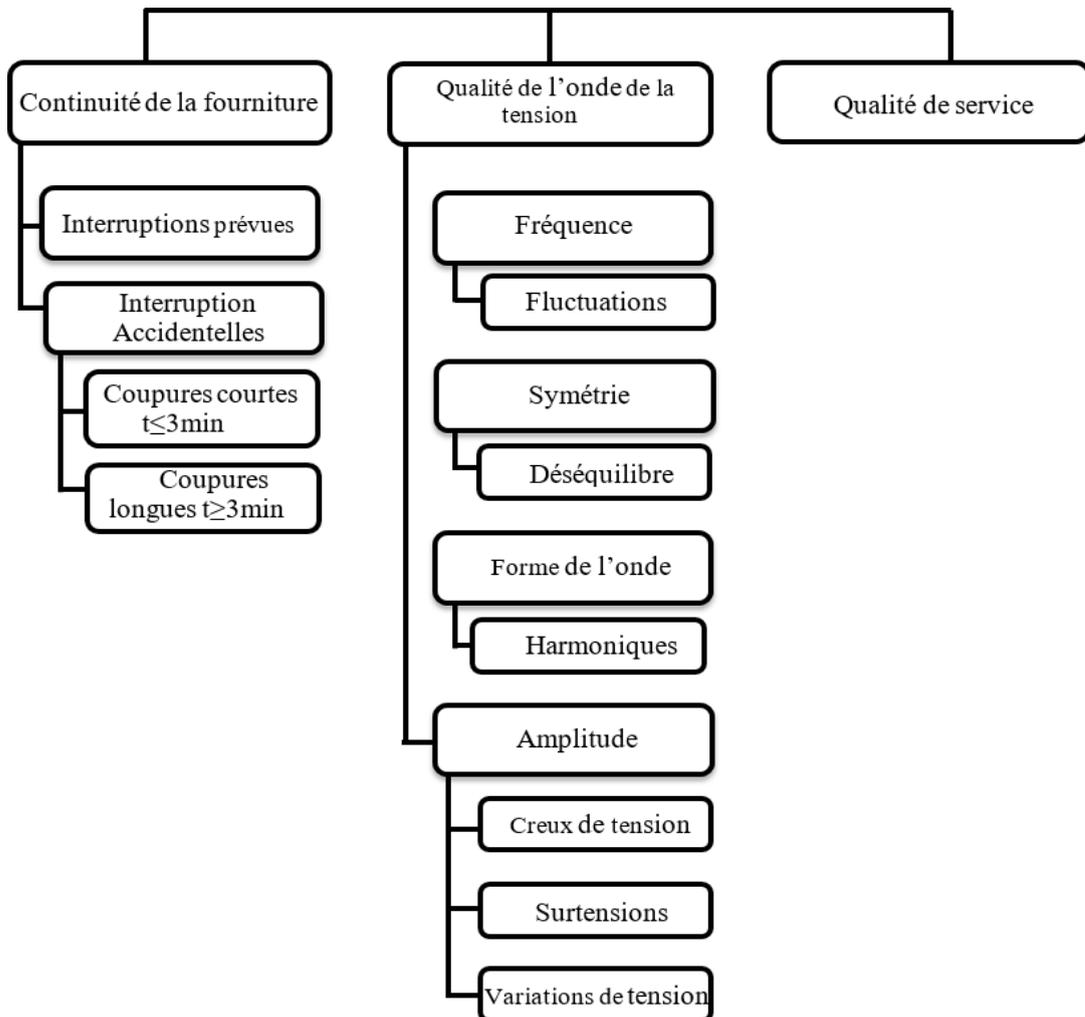


Figure 2-2 Différentes perturbations [33].

### 2.5.1 Creux et coupures de tension

#### 2.5.1.1 Définition

- **Creux de tension**

Par définition On appelle creux de tension (figure 2-3) toute diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 %, de la tension nominale et ce, pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 min (La norme EN 50160). Il est caractérisé par sa profondeur  $\Delta U$  et sa durée  $\Delta T$  [34].

- **Coups de tension**

Les coups de tension, (selon la norme EN 50160) est la condition dans laquelle la tension aux points de fourniture est inférieure à 1% de la tension déclarée [33].

- **Coups brèves**

Les coups brèves sont définies comme étant des disparitions de la tension d'alimentation pendant un temps qui n'excède pas une minute. Par convention de langage une coupure brève est un creux de tension de 100% de l'amplitude de la tension (figure2 -3) [35].

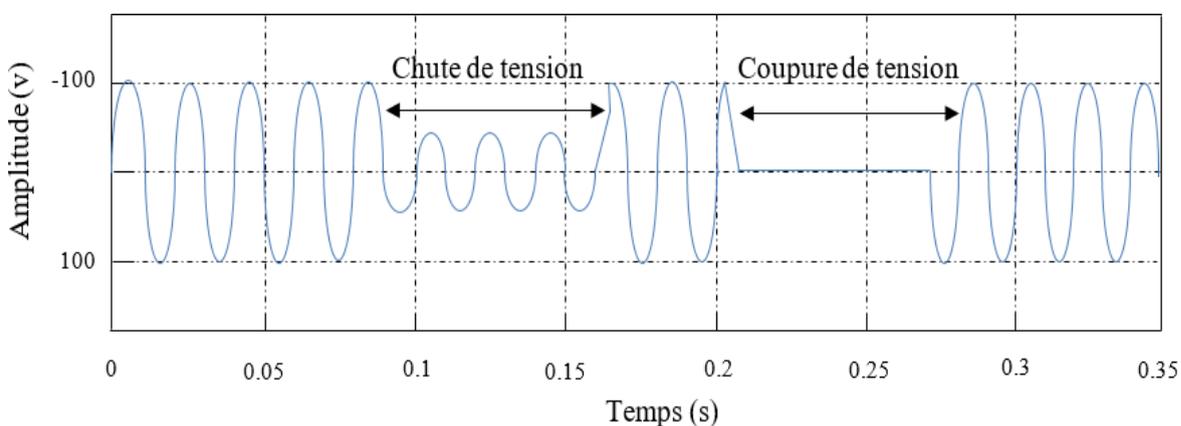


Figure 2-3 Creux et coupure brève [33].

### 2.5.1.2 Origine

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).

Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc.).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées [36].

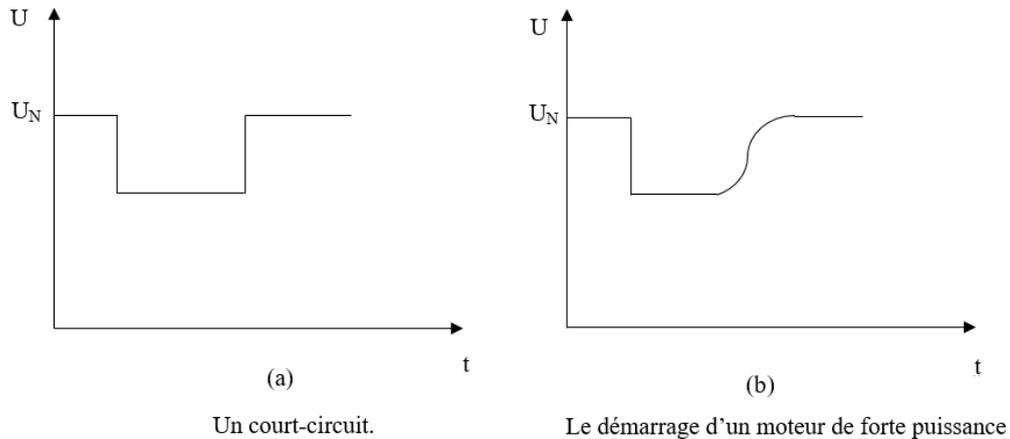


Figure 2-4 Amplitude d'un creux de tension [23].

### 2.5.1.3 Conséquences des creux de tension

Les creux de tension peuvent provoquer des perturbations sur les couples pour les machines tournantes, perturbation d'appareillage électronique, pannes intempestives, déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours, pertes de données informatiques, dégâts aux produits, voire aux équipements de production...) [37].

## 2.5.2 Surtension

### 2.5.2.1 Définition

Les phénomènes de surtensions sont, également, des phénomènes brefs aléatoires dans leur durée et dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale pendant une durée inférieure à une seconde (voir figure 2-5) [38].

### 2.5.2.2 Origine

- Leurs origines sont, essentiellement, liées :
- A la foudre.
- Aux différentes manœuvres opérées sur le réseau (coupure de courant de court-circuit, enclenchement de ligne à vide ...).

- Aux fonctionnements anormaux du réseau (variation brusque de la charge, résonances...) [35].

### 2.5.2.3 Conséquences

Les effets de surtensions les plus importantes sont :

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériels sensible (composant électronique).
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel.
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication.
- Arrêt ou démarrage incontrôlé [39].

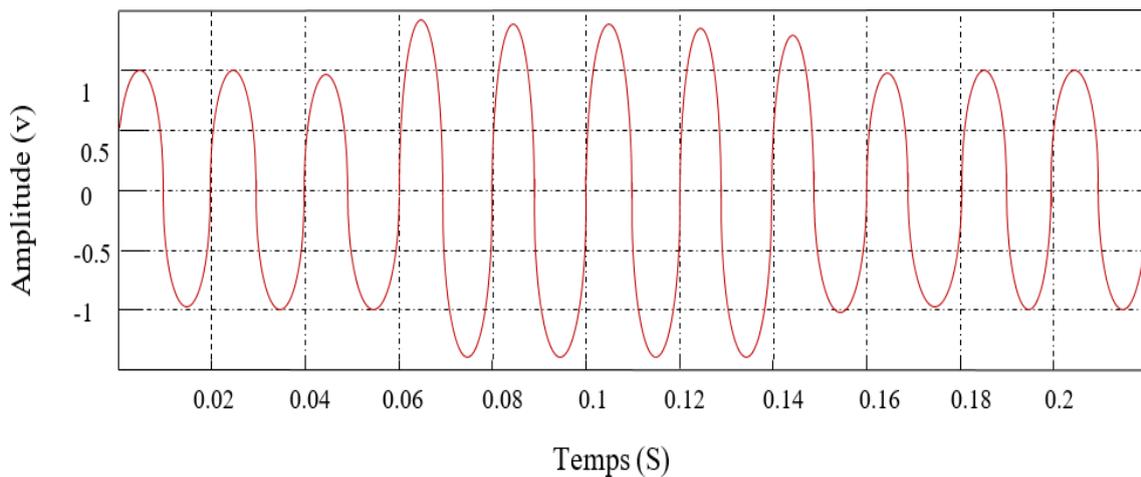


Figure 2-5 Exemple de surtension [38].

## 2.5.3 Fluctuations de Tension (Flicker)

### 2.5.3.1 Définition

Les variations de tension (Fluctuations) sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale. Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude (Voir figure 2-6) [40].

### 2.5.3.2 Origine

#### ➤ **Dysfonctionnement du système d'éclairage**

Une fluctuation du flux lumineux peut également être due à un mauvais fonctionnement du système d'éclairage. C'est la première hypothèse à vérifier en cas de problème.

#### ➤ **Four à arc**

Le four à arc est le principal générateur de flicker. Les fluctuations de tension, que son fonctionnement normal fait naître, sont d'autant plus ressenties que la puissance des fours est élevée, en particulier par rapport à la puissance de court-circuit du réseau : elle se chiffre couramment en dizaines de MVA.

#### ➤ **Machines à charges fluctuantes**

Les moteurs puissants, ou groupes de moteurs, à démarrages et arrêts fréquents, ou à charge variable, (tels ceux des laminoirs), ainsi que les machines à couple résistant alternatif (Compresseurs), peuvent produire du flicker.

#### ➤ **Machines à souder**

Les soudeuses à arc de puissance relativement faible sont peu gênantes (Sauf utilisation intensive chez un abonné BT). Par contre les cycles répétitifs des soudeuses par résistance, à des fréquences comprises entre 0,1 et 1 Hz, sont à l'origine de perturbations sous la forme d'à-coups de tension [39].

### 2.5.3.3 Conséquence

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas  $\pm 10\%$ , la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation [41].

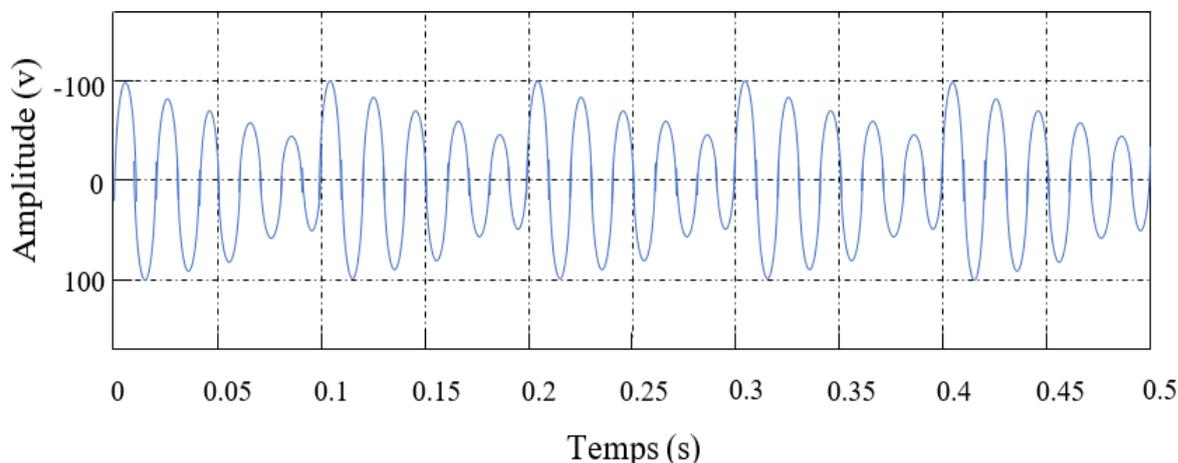


Figure 2-6 Fluctuation de tensions [42].

## 2.5.4 Variations de fréquences

### 2.5.4.1 Définition

Taux de répétition de la composante fondamentale de la tension d'alimentation, mesure pendant un intervalle de temps donné. La fréquence d'un réseau alternatif de distribution publique est directement liée à la vitesse de rotation des alternateurs (Centrale).

La valeur moyenne de la fréquence fondamentale mesurée pendant 10 secondes sur des réseaux de distribution doit être comprise dans l'intervalle.

Pour des réseaux reliés à des systèmes interconnectés :

- $50\text{Hz} \pm 1\%$  (De 49.5Hz a 50.5Hz) pendant 95 % d'une semaine.
- $50\text{Hz} +4\% -6\%$  (De 47Hz a 52 Hz) pendant 100% d'une semaine [33].

### 2.5.4.2 Origine

Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des déséquilibres entre « production et consommation (charge) » [24].

### 2.5.4.3 Conséquence

Ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques [24].

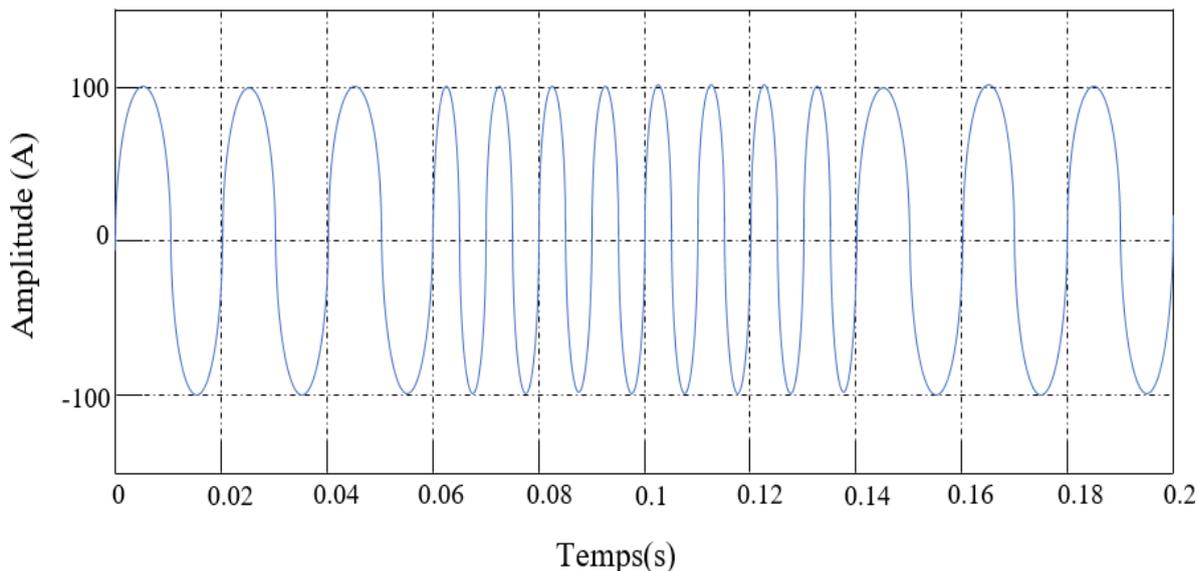


Figure 2-7 Variation de fréquence [42].

## 2.5.5 Déséquilibre de système triphasé

### 2.5.5.1 Définition

Un système triphasé déséquilibré est un système dont les tensions ou les courants ne vérifient pas les conditions de phases ou d'amplitudes lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres. La fréquence est par contre identique pour les trois grandeurs (voir figure 2-8) [43].

### 2.5.5.2 Origine

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions.

Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques. On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de  $120^\circ$ .

Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont [28].

### 2.5.5.3 Conséquence

Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage). Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension). Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande. La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine. Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [37].

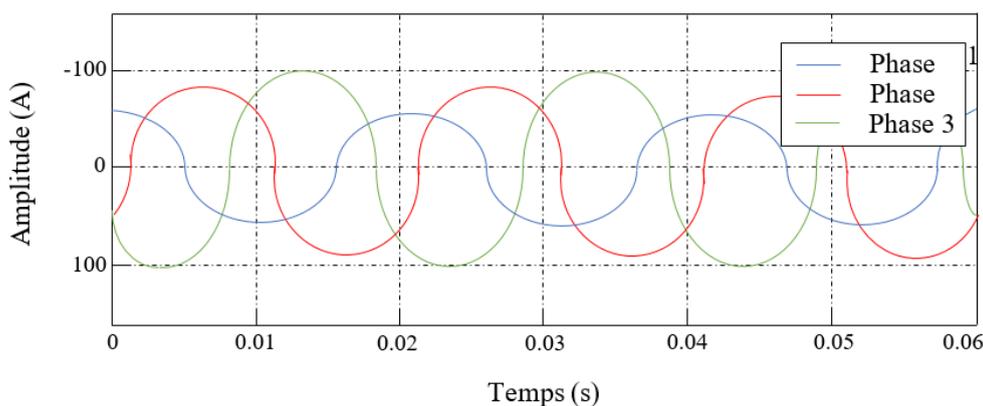


Figure 2-8 Déséquilibre du système [42].

## 2.5.6 Harmonique

### 2.5.6.1 Définition

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle de la fondamentale, due

à la présence des harmoniques. Les récepteurs absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de tension comme l'indique la figure 2-9. Le domaine de fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40 [44].

### II.5.6.2 Origine

Dans les secteurs industriels et domestiques on constate un accroissement de générateurs d'harmoniques. Il s'agit des dispositifs, tels que les convertisseurs statiques, contenant des éléments de commutation ainsi que d'autres dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire :

- Convertisseurs statiques : Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :
  - Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée.
  - Les cyclo-convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif
  - Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage de chauffage.
  - Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.
- Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire, on distingue :
  - Les fours à arc et à induction.
  - Les transformations.
  - Les machines tournantes.
  - Inductances saturées, etc. [36].

### II.5.6.3 Conséquence

Les tensions et les courants harmoniques ont des effets indésirables et néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques :

- Alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques.
- Lignes : pertes ohmiques supplémentaires.
- Transformateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet Joule et dans le noyau par courant de Foucault.
- Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus réchauffement du moteur.
- Condensateur de puissance : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissement rapide du condensateur.
- Equipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension [45].

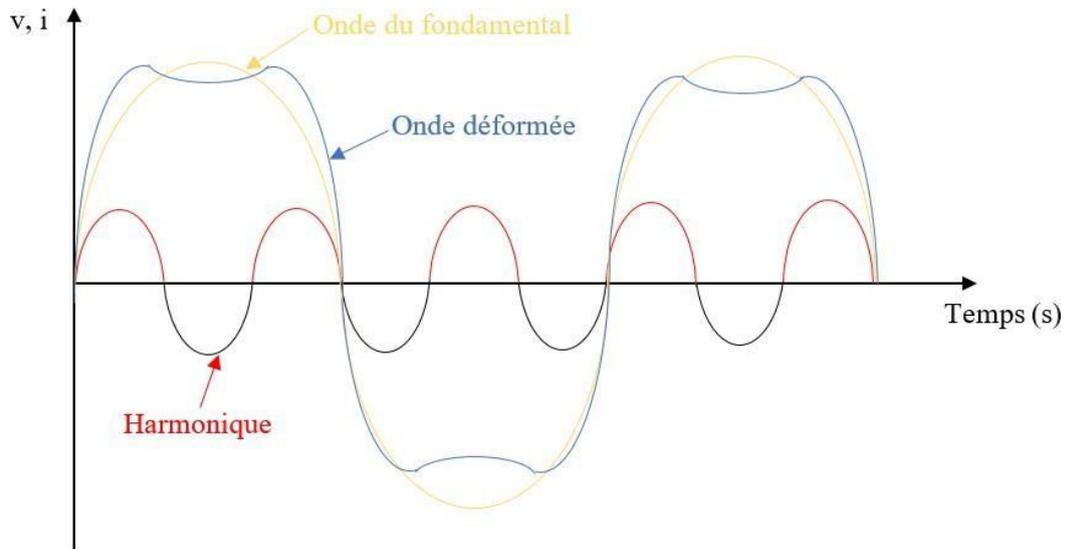


Figure 2-9 Exemple d'allures de signaux déformés [44].

- **Résumé**

Tableau 2-1 Vue d'ensemble des principales perturbations électriques [28].

Durée	Type de perturbations	Amplitude	Origine	Conséquences
10ms – 1min	Creux de tension	0.1 – 0.9 pu	Court-circuit, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Coupures brèves	<0.1 pu	Court-circuit	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Surtensions	1.1 – 1.8 pu	Court-circuit, débranchement des charges importantes	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour les matériels
Régime établi	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour les matériels	-	Charges asymétriques ou monophasées	Echauffements des machines tournantes, vibrations
	Variations rapides de tension (Flicker)	0.1 – 7 %	Charges fluctuantes (fours à arc, moteur à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0 – 20%	Charges non linéaires (structures d'électronique de puissance, arcs électriques)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels
	Variations de la fréquence	-	Déséquilibre entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la notion de qualité d'énergie électrique et nous avons constaté que cette dernière dépend à la fois de la qualité de la tension et de celle du courant. Nous avons aussi constaté que la qualité l'énergie électrique est exposée à des perturbations électriques qui influencent sa qualité. A la fin du chapitre, nous avons donné comment Mesure et acquisition de données de la qualité d'énergie électrique.

# Chapitre 3 : Problèmes d'harmonique dans le réseau électrique

## 3.1 Introduction

L'énergie électrique est généralement livrée par le distributeur d'énergie sous forme d'un système triphasé de tensions, dont la fréquence, l'amplitude et la forme d'onde doivent être sinusoïdales. Cependant, ces dernières années, grâce à l'évolution de la technologie d'électronique de puissance et à son utilisation croissante dans divers appareils industriels, cela entraîne de graves problèmes de perturbations dans les réseaux électriques. De cette manière, on observe une hausse constante du taux de distorsion harmonique, une perturbation des courants et une consommation élevée d'énergie réactive, ainsi qu'une augmentation des pertes d'énergie. Vus les nombreux effets néfastes créés par les harmoniques sur les appareils électriques industriels, plusieurs solutions ont été envisagées afin de pouvoir garantir un niveau de qualité et de sécurité suffisant à l'ensemble de l'installation. Dans ce chapitre, nous présenterons brièvement les harmoniques, ainsi que leurs origines, leurs conséquences et leurs méthodes d'élimination.

## 3.2 Définition des harmoniques et inters harmoniques

### 3.2.1 Harmoniques

Les récepteurs non linéaires (fours à arc, éclairages, convertisseurs, redresseurs et onduleurs...etc.) absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de l'onde de la tension et celle du courant d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition des fréquences harmoniques.

La distorsion harmonique est une forme de pollution du réseau électrique susceptible de poser des problèmes si la somme de ces courants harmoniques est supérieure à certaines valeurs limites. En général, les fréquences harmoniques prises en compte dans un réseau électrique sont supérieures à 100 Hz et inférieures à 2500 Hz, c'est - à dire des rangs 2 à 50 [46].

On définit le rang harmonique comme le rapport de sa fréquence  $f_h$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (3-1)$$

### 3.2.2 Inters harmoniques

Un inter harmonique contrairement à l'harmonique est un signal dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence du fondamental. Certains de ces signaux peuvent être engendrés par les charges non linéaires, d'autres sont générés et injectés intentionnellement par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais, et ainsi piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels [47].

### 3.3 Harmonique de courant et de tension

Les harmoniques présents sur les réseaux électriques sont le résultat de l'utilisation de charges. Non linéaires. Lorsqu'elles sont reliées au réseau à une fréquence spécifique, elles reçoivent un courant non sinusoïdal mais de même fréquence.

Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tensions harmoniques selon la loi d'Ohm :

$$V_h = Z_h \times I_h \quad (3-2)$$

$V_h$  : Tension harmonique de rang h.

$Z_h$  : Impédances harmoniques de rang h.

$I_h$  : Courant harmonique de rang h.

Soit par exemple la figure suivante représentant la forme de l'onde d'un courant pollué avec, en même temps, la figure des différents courants harmoniques le constituant qu'on peut exprimer grâce à une représentation en série de Fourier du courant global [48] :

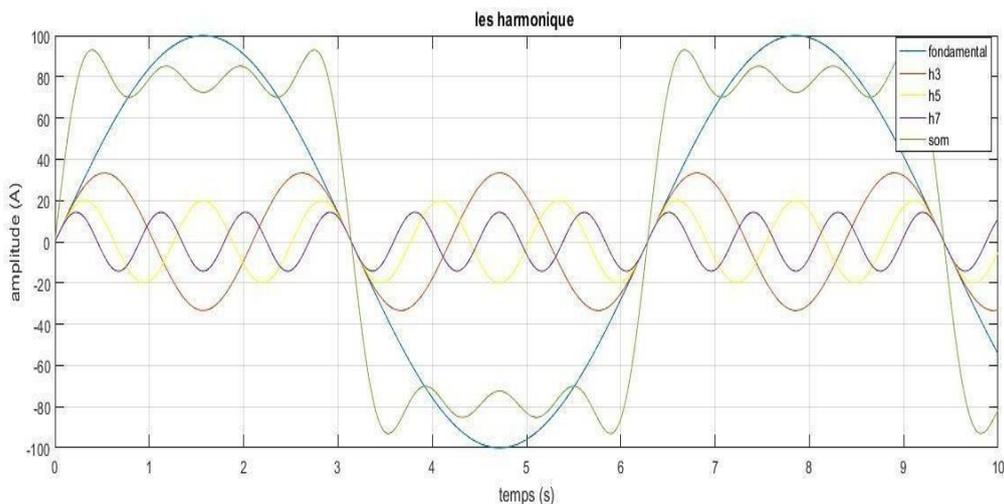


Figure 3-1 La forme de l'onde d'un courant déformé avec les harmoniques.

### 3.4 Décomposition d'un signal périodique

En analyse mathématique, les séries de Fourier sont un outil fondamental dans l'étude des fonctions périodiques. C'est à partir de ce concept que s'est développée la branche des mathématiques connue sous le nom d'analyse harmonique. Un signal périodique de fréquence et de forme quelconque peut être obtenu en ajoutant à une sinusoïde de fréquence (fondamentale), des sinusoïdes dont les fréquences sont des multiples entiers. Ces signaux ont des amplitudes et des positions de phase appropriées. De même, on peut décomposer toute onde récurrente en une somme de sinusoïdes (fondamentale et harmoniques). [49].

- **Décomposition en série de Fourier**

La décomposition en série de Fourier est essentielle pour analyser et comprendre les signaux périodiques, que ce soit en électronique, en physique, ou dans d'autres domaines où des phénomènes périodiques sont observés. Elle offre une méthode puissante pour étudier et manipuler ces signaux de manière mathématique et pratique.

Le signal  $v(t)$  de la figure 3.1 peut représenter un courant ou une tension périodique de période  $T$ , donc de fréquence  $f = \frac{1}{T}$  et de pulsation  $\omega = 2\pi f$ . Ce signal se décompose de la façon [48].

Suivante :

$$V(t) = a_0 + \left(\sum_{h=1}^{\infty} (A \cos(\omega h t) + B \sin(\omega h t))\right) \tag{3-3}$$

Avec :

$$a = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (3-4)$$

Et Pour  $h \geq 1$  :

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(\omega h t) dt \quad (3-5)$$

$$\beta_h = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin(\omega h t) dt \quad (3-4)$$

- La valeur efficace d'un signal

L'efficace d'un signal  $v(t)$  et par définition :

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (3-7)$$

D'après le théorème de PARSEVAL :

$$\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt = V_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 \quad (3-8)$$

On a donc la relation suivante :

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} V_h^2}, \quad V_0 = 0 \quad (3-9)$$

De même :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (3-10)$$

### 3.5 Puissances en présence des harmoniques

En présence d'harmoniques,  $(S^2)$  n'est pas la résultante de

$$P^2 + Q^2 \quad (3-11)$$

On introduit la notion de puissance de distorsion ou déformante

D telle que :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3-12)$$

S : est la puissance apparente.

P : la puissance active.

Q : la puissance réactive et D : la puissance déformante ou de distorsion.

P et Q : ne dépendent que du fondamental du courant, de la tension (supposée sinusoïdale) et de l'angle  $\phi$ .

$\Phi$  : est le déphasage entre le fondamental du courant et la tension.

D : dépend uniquement des courants harmoniques.

(FP) : Facteur de puissance et de déphasage  $\cos \phi$ .

Le facteur de puissance noté (FP) est le rapport de la puissance active (P) à la puissance apparente (S). Il tient compte des harmoniques.

$$FP = P / S \quad (3-13)$$

Le facteur de puissance (FP) ne doit pas être confondu avec le cosinus  $\phi$  ( $\cos \phi$ ) appelé aussi facteur de déplacement de la puissance (DPF) [50].

### 3.6 Taux de Distorsion Harmonique (THD)

Notre étude se limite au cas où la source est sinusoïdale et/ou le courant absorbé par la charge est entaché de composants harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmoniques THD est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Il s'évalue par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde déformée du courant. Il est donné par l'expression [51].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H V_h^2}}{V_1} \quad (3-14)$$

$V_h$  : est la tension de l'harmonique h.

$V_1$  : est la tension du signal fondamental.

H : est le nombre total d'harmoniques considérées.

Pour le courant :

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2}}{I_1} \quad (3-15)$$

$I_h$  : est le courant de l'harmonique h.

$I_1$  : est le courant du signal fondamental.

NB : Le sommet commence à 2 car le signal fondamental est considéré comme la première harmonique [48].

### 3.7 Origines et sources des harmoniques

Dans la plupart des cas, les harmoniques de tensions ou de courants présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires, tels que les convertisseurs statiques.

#### 3.7.1 Emission en tension

L'émission harmonique en tension due aux matériels du réseau entre pour une faible part, et avec des taux généralement faibles, dans la distorsion du réseau. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques...) des bobinages des machines tournantes, des moteurs, des transformateurs [52].

##### 3.7.1.1 Alternateurs

Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques (<0.5% selon la norme harmonique IEEE 519 (1992)) Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5% à vide et inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.

##### 3.7.1.2 Transformateurs

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours inférieur au pourcent.

### 3.7.1.3 alimentations statique sans interruption (ASI)

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau protégé alimente généralement des charges non linéaires comme du matériel informatique.

Pour une ASI d'une puissance de 80KVA, le taux de distorsion harmonique en tension est inférieur à 4% pour une charge linéaire, est inférieur à 7% pour une charge non linéaire.

En général, le taux de distorsion harmonique en tension diminue avec l'augmentation de la puissance de l'ASI.

Il faut bien noter qu'en charge, le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires qui sont alimentées par l'ASI [52].

## 3.7.2 Emission en courant

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdal. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

### 3.7.2.1 Le redresseur triphasé à thyristors

Le redresseur triphasé à thyristors, ou pont de Graëtz, constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Il représente 55% de la puissance des matériels électroniques de puissance. Dans le domaine de la vitesse variable, les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel [52].

### 3.7.2.2 Charges non linéaires

On distingue trois types des charges non linéaires. Ce sont, d'une part, les lampes et les petits moteurs dans les secteurs tertiaire, domestique et industriel et d'autre part, les fours à arc dans le secteur industriel.

- **Lampes**

Deux types de lampes produisent des courants harmoniques :

Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression. Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage.

La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination, ainsi qu'à la présence d'un ballast.

- **Appareils à arc électrique**

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu [52].

### 3.8 Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client ce qui donne lieu à des sur coûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type : les effets instantanés et les effets à terme.

#### a) Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques :** En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs :** Les effets sur ces équipements peuvent manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- **Erreurs dans les appareils de mesure :** Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- **Vibrations et bruits :** Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

### b) Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

- **Echauffement des câbles et des équipements :** Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement du neutre et les enroulements comme pour les transformateurs ou les moteurs.
- **Echauffement des condensateurs :** L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- **Echauffement due aux pertes supplémentaires des machines électriques et des transformateurs :** L'échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines électriques et principalement dans leurs circuits rotoriques à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques gênent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques [53].

### 3.9 Norme

Les normes, d'après la définition de l'ISO, sont « des accords documentés contenant des spécifications techniques ou autres critères précis destinés à être utilisés systématiquement en tant que règles, lignes directrices ou définitions de caractéristiques pour s'assurer que des matériaux, produits, processus et services sont aptes à l'emploi ». En ce qui concerne la qualité de l'énergie, les normes ont un double objectif :

- Etablir la définition des caractéristiques nominales de la fourniture, c'est-à-dire les valeurs nominales comme les déviations admissibles de la tension et de la fréquence.

- Définir les perturbations qui peuvent agir sur le réseau (par exemple le seuil qui sépare un creux de tension d'une interruption etc.), comme la quantité ou l'intensité maximale de perturbations pouvant avoir lieu dans un réseau particulier.

Ci-dessous les tableaux 3-1 et 3-2 montrent, respectivement, les limites CEI 1000-2-4 des émissions de courants harmoniques et les limites CEI 1000-3-2 pour la distorsion harmonique de la tension [47].

Tableau 3-1 Limites CEI 1000-2-4 [47].

Harmoniques impairs	
Ordre	Courant (A)
3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.4
11	0.33
13	0.21

Tableau 3-2 Limites CEI 1000-3-2 [47].

Harmoniques impairs					
Non multiple de 3			Multiple de 3		
Ordre	A)	b)	ordre	A)	b)
5	2%	6%	3	2%	5%
7	2%	5%	9	1%	1.5%
11	1.5%	305%	15	0.3%	0.3%
13	1.5%	3%	21	0.2%	0.2%
17	1%	2%	>21	0.2%	0.2%
19	1%	1.5%			
23	0.7%	1.5%			
25	0.7%	1.5%			
>25	0.2+(12.5/h)	0.2+(1.3*25/h)			

- a)  $100 \text{ kV} \geq V > 30 \text{ kV}$  (avec un THD  $< 3\%$ )
- b)  $30 \text{ kV} \geq V > 1 \text{ kV}$  (avec un THD  $< 8\%$ )

La norme EN 50160 étant une description des caractéristiques de la tension réseau, elle ne détermine que les valeurs limites des harmoniques de tension. Ces limites sont pratiquement identiques à celles fixées par la CEI. En ce qui concerne l'IEEE, la norme IEEE 519 : 1992, détermine les procédures pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de pollution admissible de la part des clients et de distorsion harmonique globale dans le réseau [47].

### **3.10 Principe de compensation**

Les perturbations engendrées par les charges peuvent être atténuées soit :

- Avec un système auxiliaire de filtrage pour les perturbations harmoniques.
- En limitant la consommation de puissance réactive.
- En modifiant la topologie du convertisseur pour limiter l'amplitude des sources de courants harmoniques.

Alors, selon la littérature, les techniques de dépollution des réseaux électriques peuvent être classées en deux groupes :

- Les techniques traditionnelles.
- Les techniques modernes [51].

### **3.11 Solutions traditionnelles de la dépollution**

Des solutions existent pour éviter la propagation des harmoniques dans les réseaux électriques. Elles nécessitent l'utilisation de composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau est aussi une solution. En effet, l'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Donc l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande.
- L'utilisation d'inductances anti-harmoniques est une solution qui consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance

en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents.

- Le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire d'un pont dodécaphasé est une solution onéreuse [54].

### 3.11.1 Filtrages passifs

Une perturbation harmonique basse fréquence est réduite par un filtre passif composé d'une inductance et d'un condensateur en série et accordé sur la fréquence harmonique à atténuer. Les filtres passifs les plus utilisés sont les filtres résonnants et les filtres passe-haut. En effet, la dépollution d'une installation se fait par une association de filtres passifs résonnants, chacun accordé sur une fréquence harmonique différente. Le filtre correspondant au dernier harmonique à atténuer est en général amorti et du second ordre (résistance en parallèle avec une inductance) afin de réduire les tensions harmoniques de rang supérieur. La figure suivante représente le principe de filtre passif. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible [51].

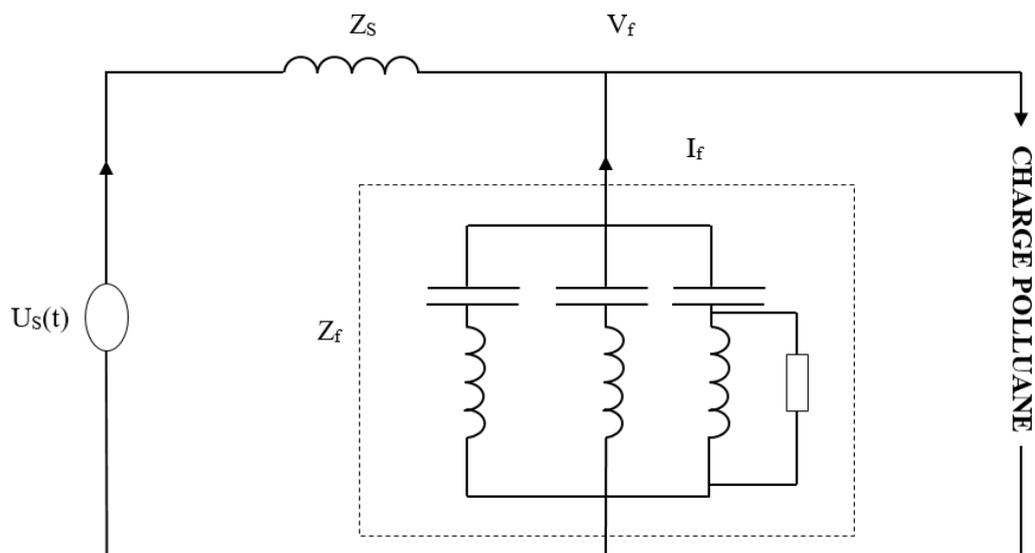


Figure 3-2 Principe de filtre passif.

#### 3.11.1.1 Filtre passif parallèle

On place en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible accordée à la fréquence de l'harmonique à piéger.

On a alors cette structure :

$$Z_{\text{éq}} = \frac{1 - jLC\omega^2}{C\omega} \quad (3.16)$$

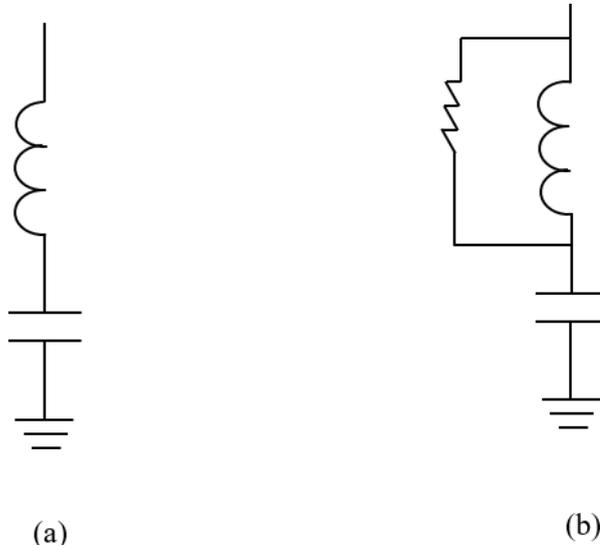


Figure 3-3 Filtre passif parallèle (a), filtre passif haut (b).

On peut également mettre en filtre passe-haut pour les harmoniques supérieurs à h 11 ce qui aura pour effet de diminuer le nombre de filtres.

En jouant sur la valeur de R on rend le filtre plus ou moins sélectif [55].

### 3.11.1.2 Filtre passif série

Le principe de ce filtre est le même que le précédent mais au lieu de piéger les harmoniques on les empêche de remonter à la source. Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon [55].

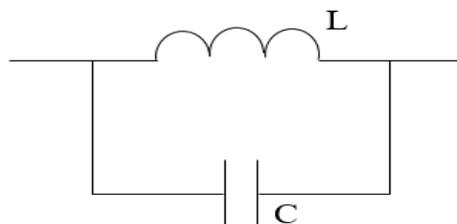


Figure 3-4 Filtre passif série.

Où, on peut empêcher les harmoniques de passer pour

$$w = w_0 \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.17)$$

### 3.11.2 Inconvénients des filtres passifs

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- Equipements volumineux.
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques, afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux).
- Le filtre actif hybride (série, parallèle).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées [56].

### 3.12 Solutions modernes

Les solutions de dépollution traditionnelles ne répondent pas au changement des réseaux électriques et des charges à protéger, donc des solutions modernes sont proposées. En effet, les filtres actifs s'adaptent aux évolutions du réseau électrique et de la charge. Tout en fournissant aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie, même si le fonctionnement est perturbé [54].

#### 3.12.1 Filtre actif

##### 3.12.1.1 Principe de fonctionnement du filtre actif :

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs. Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

Le filtre actif peut être connecté au réseau en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courants harmoniques [57].

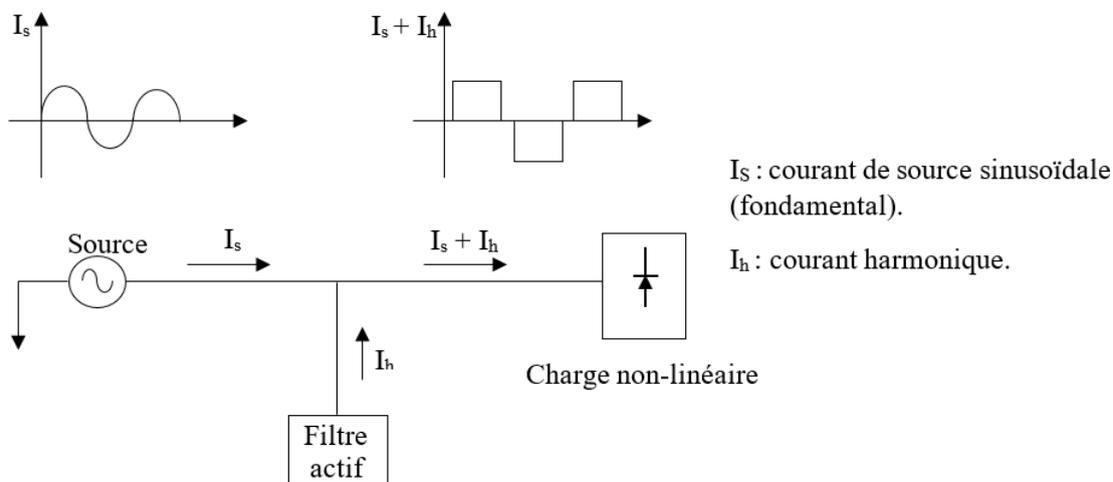


Figure 3-5 Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle.

##### 3.12.1.2 Classification de filtre actif

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification

selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les FA peuvent être en série, en parallèle ou mixtes [57].

### A. Filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci.

Le courant coté réseaux sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre.

Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionne selon ce principe. [49].

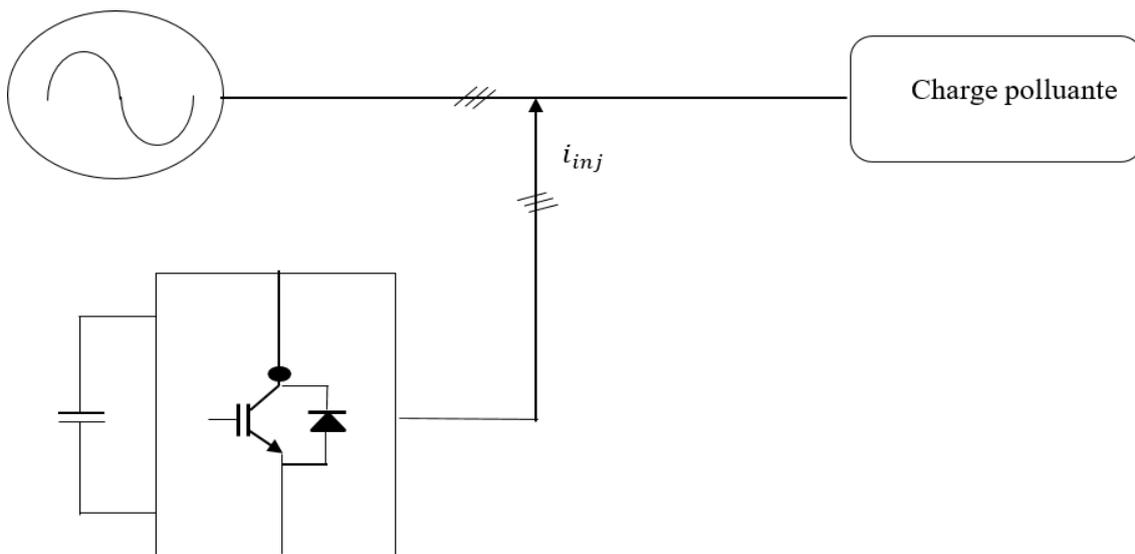


Figure 3-6 Structure du filtre actif parallèle.

### B. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure 3-7, comme une source de tension qui s'oppose aux tension perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale [56].

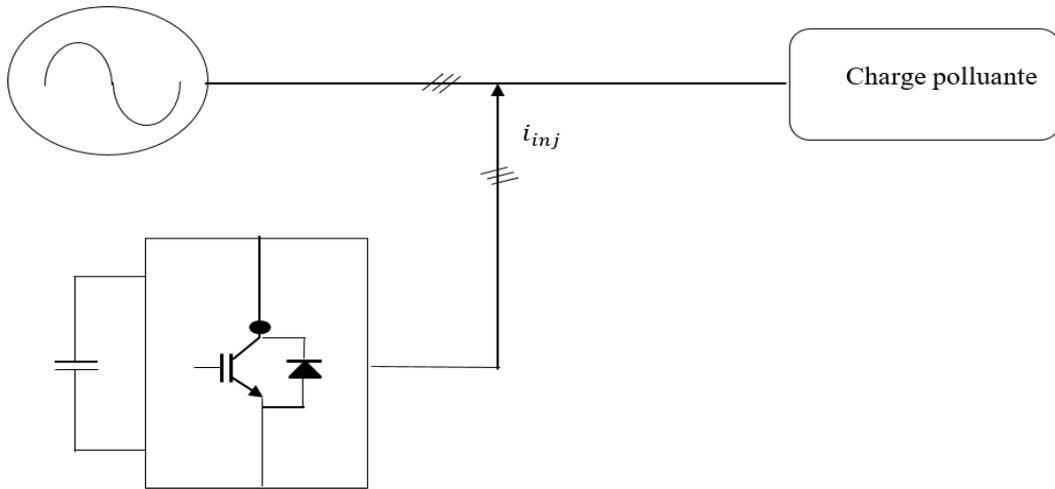


Figure 3-7 Structure du filtre actif série.

### C. Filtre actif hybride (série, parallèle)

C'est une combinaison de filtres actifs parallèle et série utilisée pour compenser les harmoniques de courant et de tension [54].

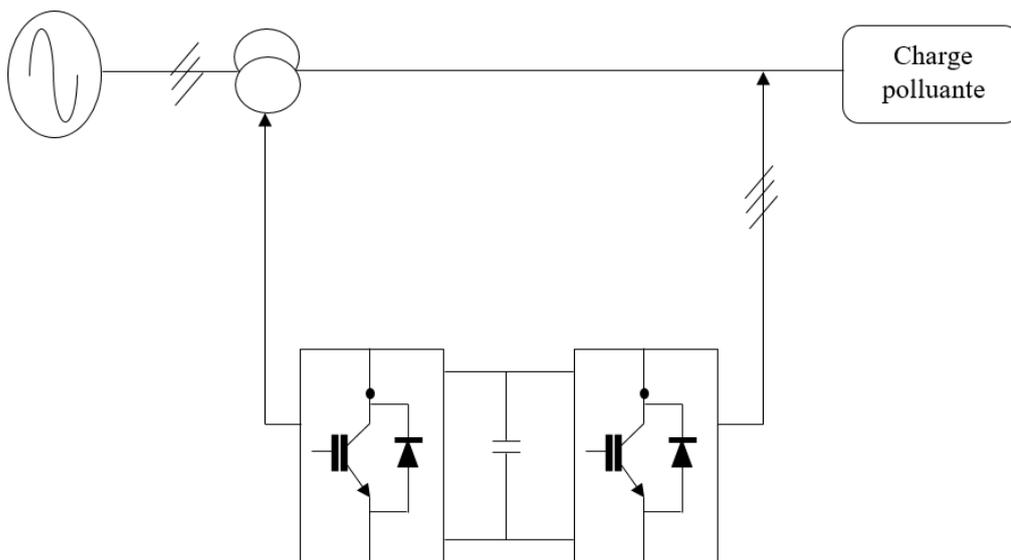


Figure 3-8 Structure du filtre active hybride (série, parallèle).

### 3.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème ; les technologies mises en œuvre, telles que les filtres passifs, sont souvent pénalisantes en termes d'encombrement et de résonance. De plus nous avons s'intéressé dans la suite aux solutions traditionnelle tel que le filtre passif parallèle qui sera l'objet de ce mémoire.

## Chapitre 4 : Résultats et simulation

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous établissons des blocs de simulation de différents scénarios ciblés en utilisant MATLAB-Simulink à savoir la simulation d'un circuit avec une charge linière, un circuit avec moteur à courant continu, une charge comme lampe Led, une charge à lampe Led avec résistance, une charge à lampe Led avec une impédance, une charge contient des thyristors, une charge comme UPS (Uninterruptible Power Supply). En fin de ce chapitre, nous avons installé un filtre en présence de la charge non linéaire pour voir leur influence sur l'élimination des harmoniques dans le réseau électrique simulé.

### 4.2 Filtre passif

Il est constitué d'un circuit LC en série (résonnant) accordé sur une fréquence déterminée. Le filtre résonnant présente une impédance très faible à la fréquence d'accord.

Ce filtre est très sélectif et sert à atténuer fortement les harmoniques de rang déterminé, généralement le 5 et le 7.

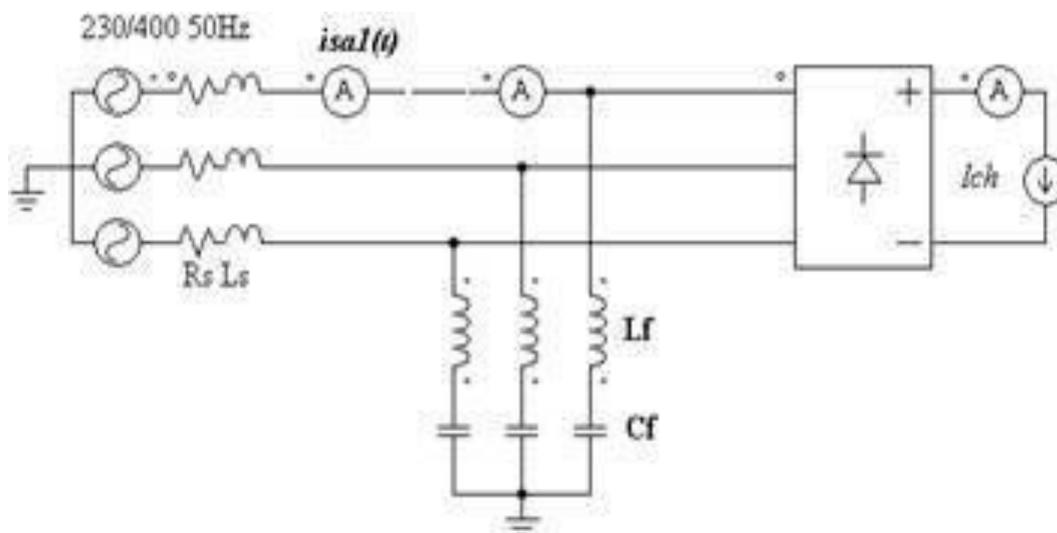


Figure 4-1 Schéma d'un filtre passif.

### 4.3 Simulation des différentes charges

#### 4.3.1 Charge linéaire

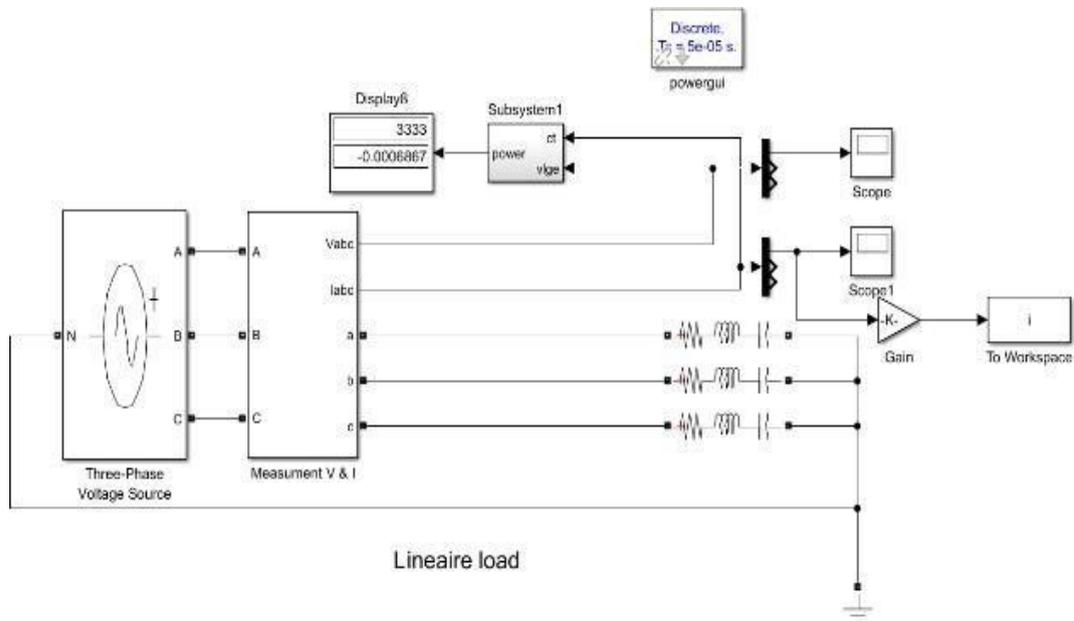


Figure 4.2 Schéma bloc charge linéaire.

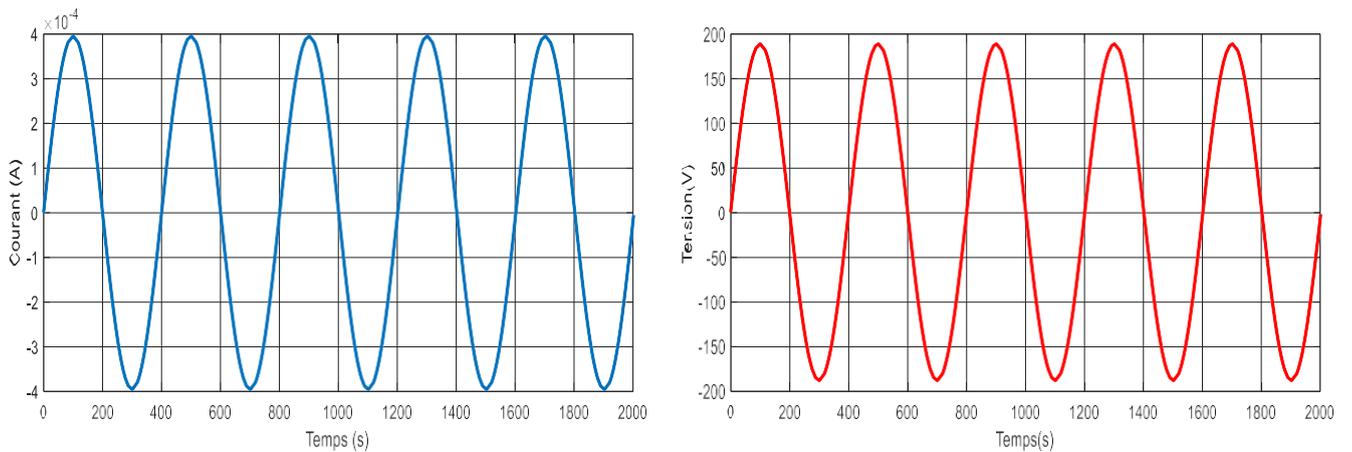


Figure 4-3 Forme de tension et du courant charge linéaire.

### 4.3.2 Charge moteur CC

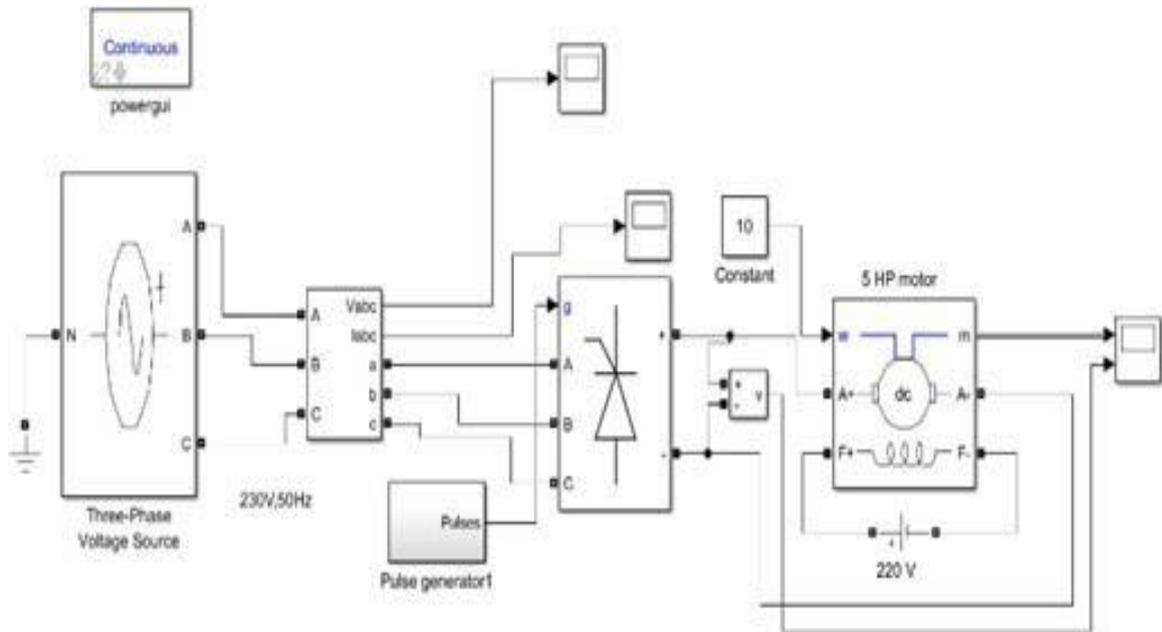


Figure 4-4 Schéma charge DC moteur.

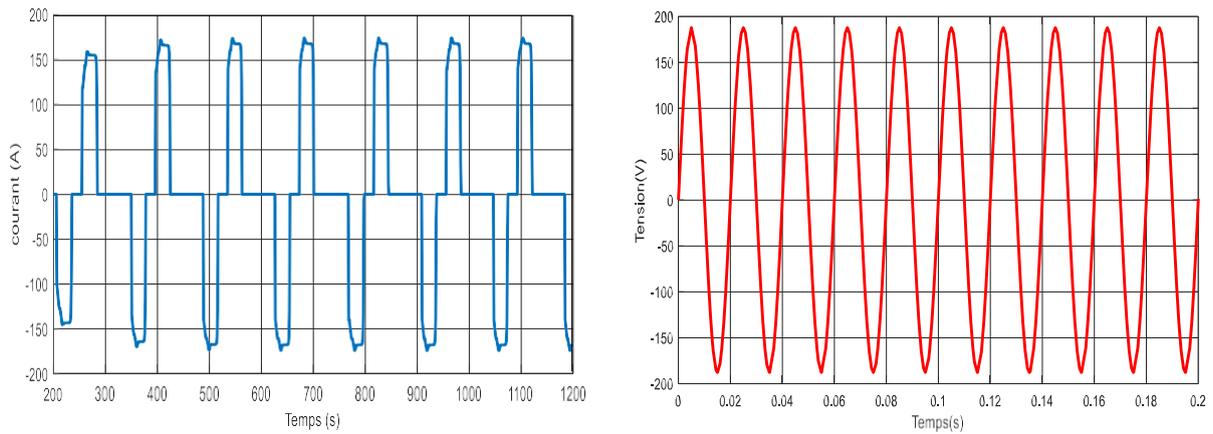


Figure 4-5 Forme de tension et du courant charge DC moteur.

### 4.3.3 Charge Led

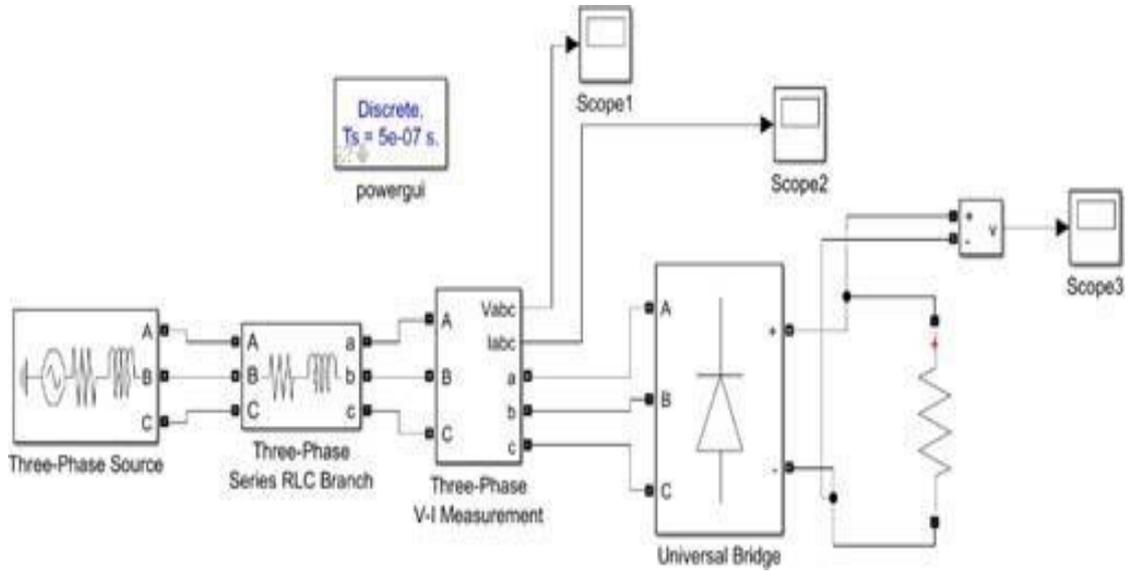


Figure 4-6 Schéma charge Led.

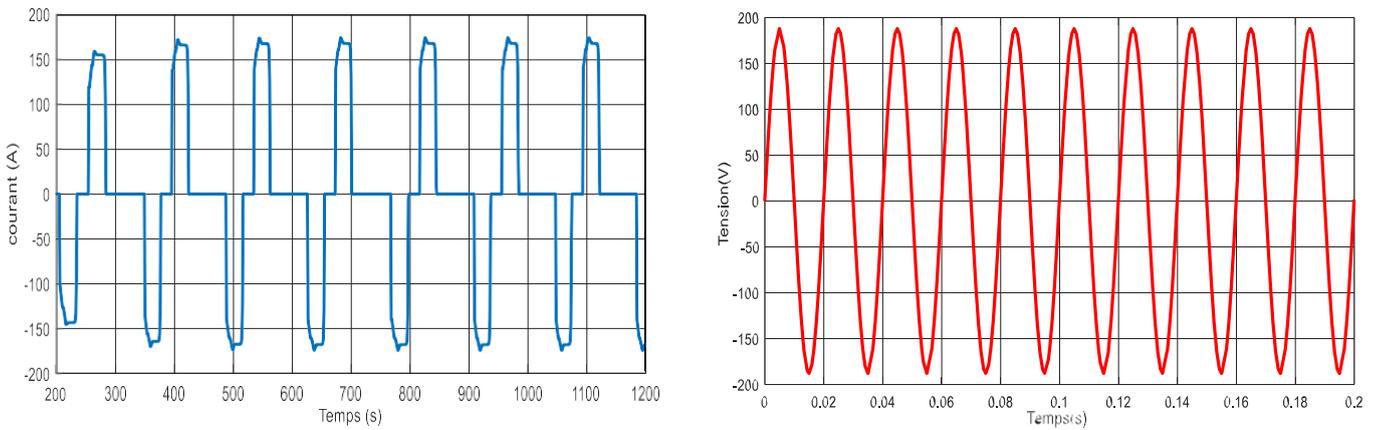
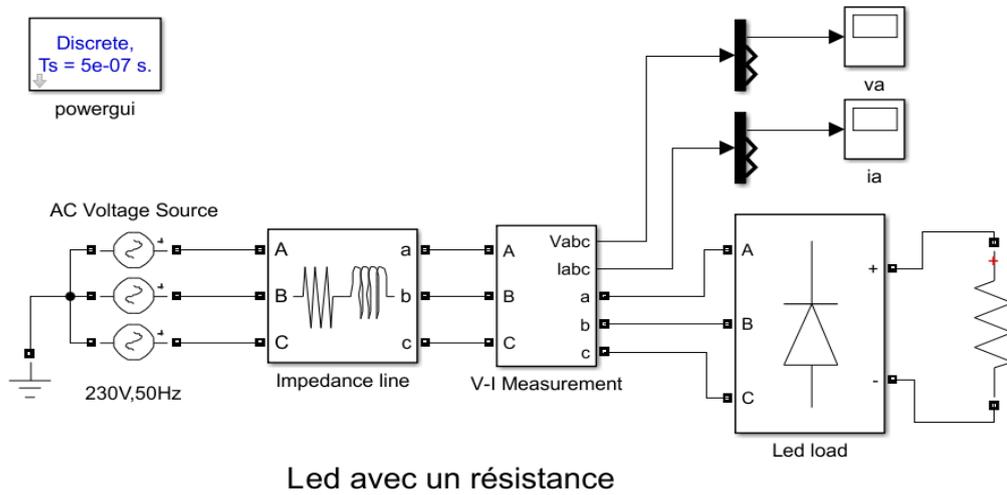


Figure 4-7 Forme de tension et du courant charge Led.

### 4.3.4 Charge Led avec une ligne impédance



Led avec un résistance

Figure 4.8 Schéma charge Led avec ligne impédance.

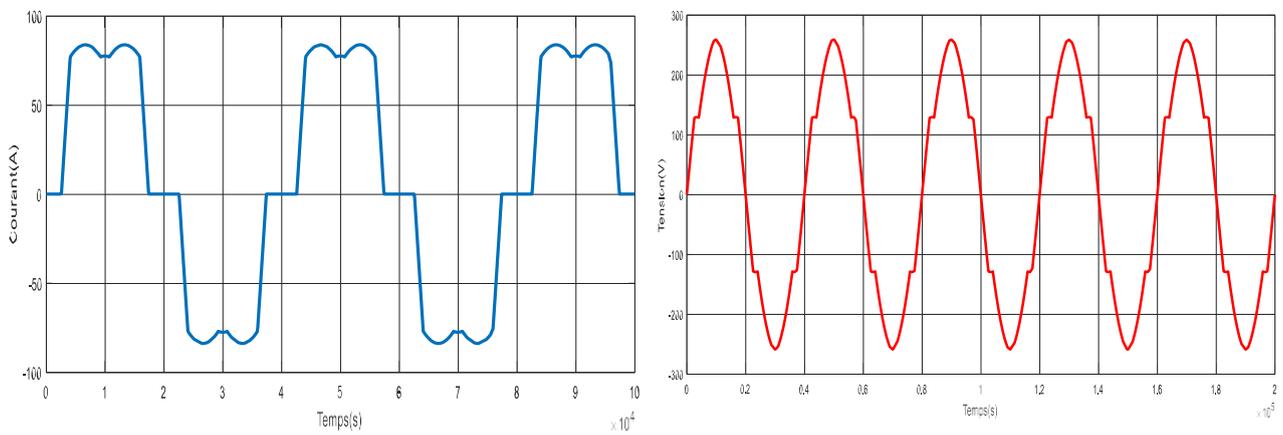


Figure 4.9 Forme de tension et du courant charge Led avec ligne impédance.

### 4.3.5 Thyristor avec une charge résistive

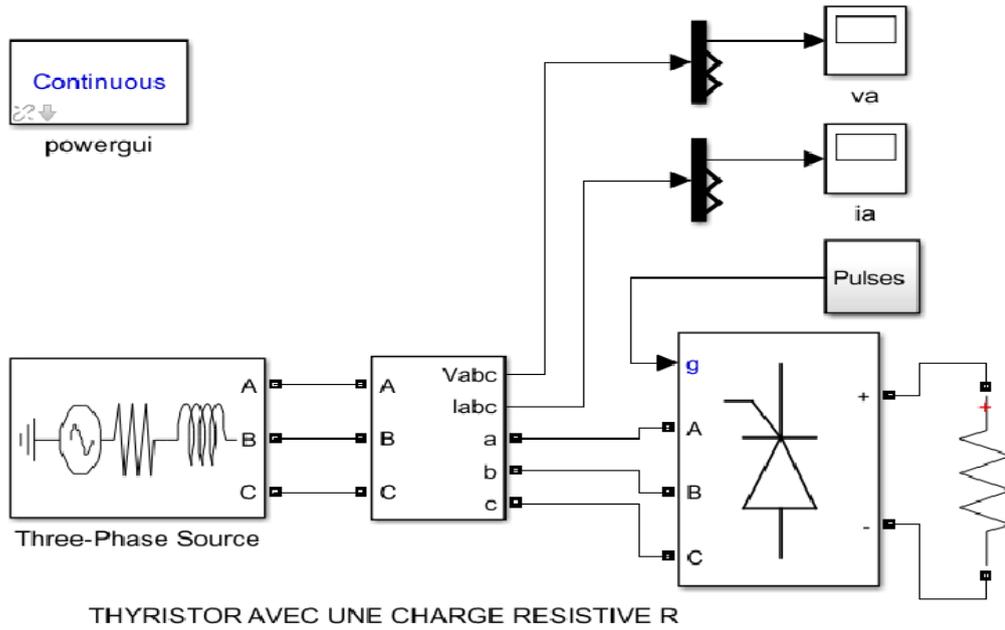


Figure 4.10 Schéma charge thyristor avec une résistive R.

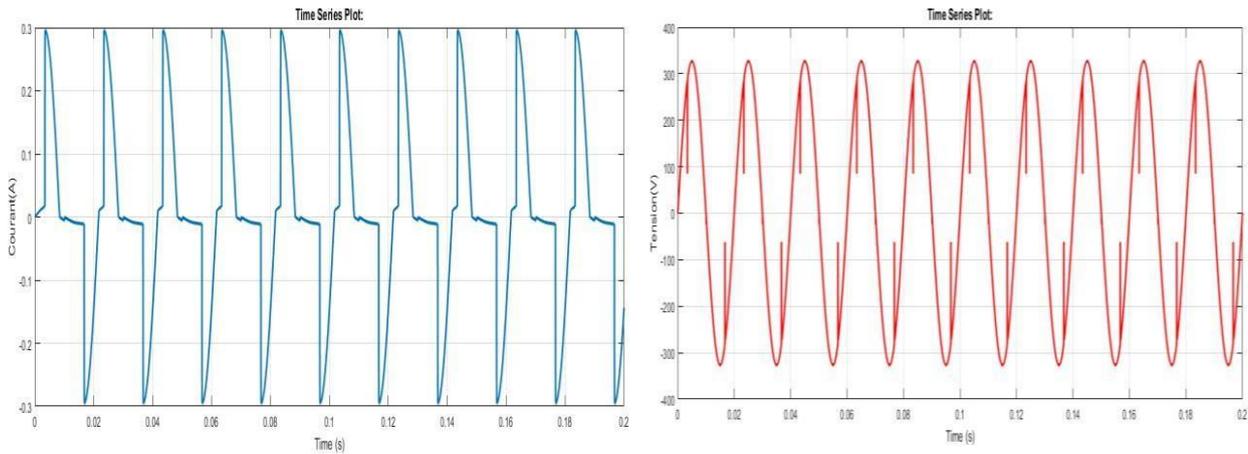


Figure 4.11 Forme de tension et du courant charge thyristor avec une résistive R.

### 4.3.6 Charge UPS

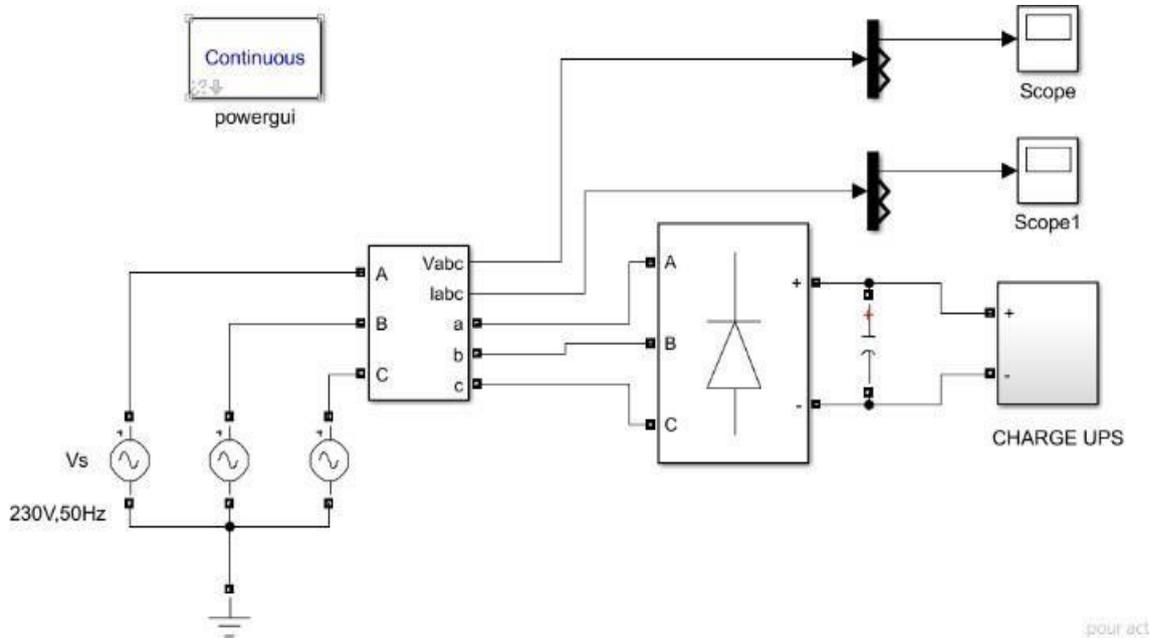


Figure 4.12 Schéma bloc pour charge UPS.

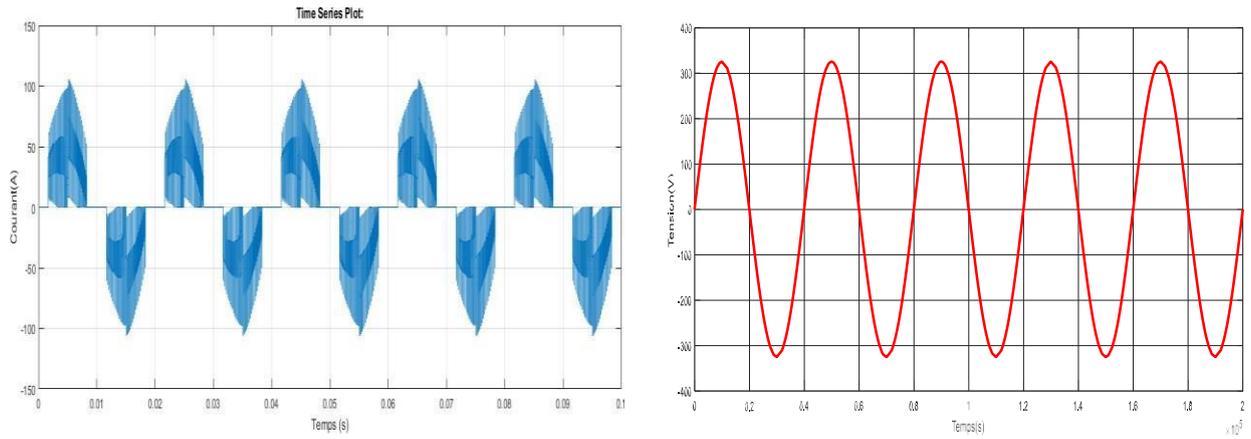


Figure 4.13 Forme de tension et du courant charge UPS.

### 4.3.7 Réseau électrique BTA sans filtre passif

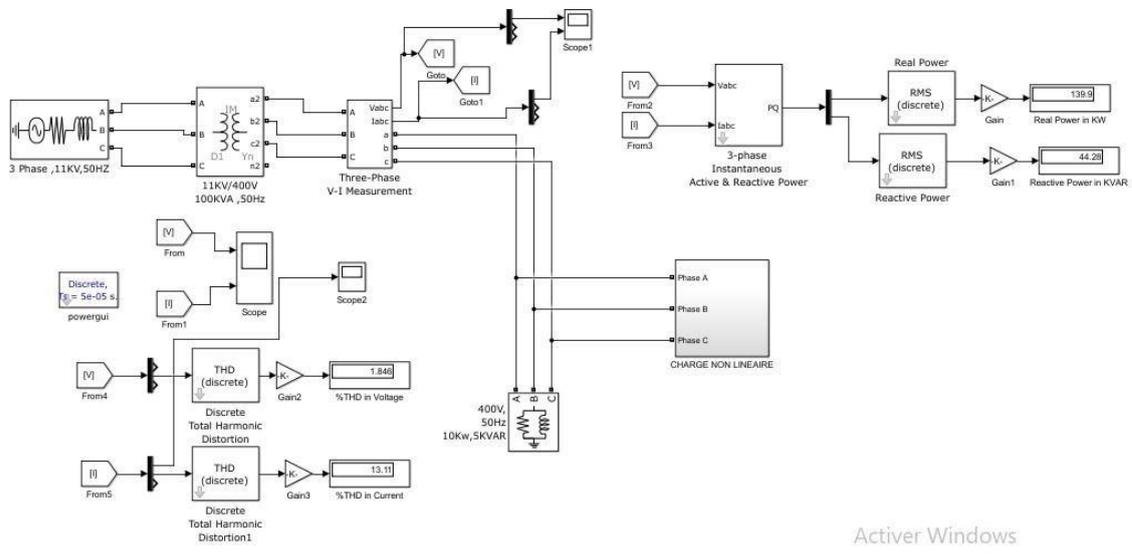


Figure 4.14 Schéma de bloc globale du réseau électrique BTA sans filtre passif.

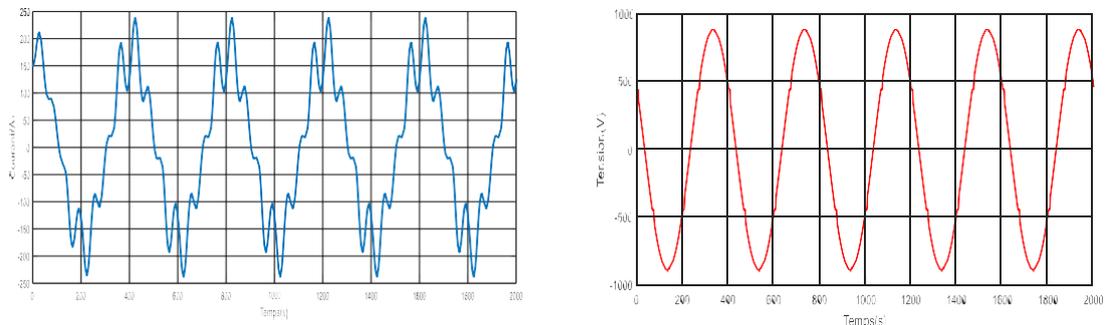


Figure 4.15 Forme de tension et du courant de la charge sans filtre.

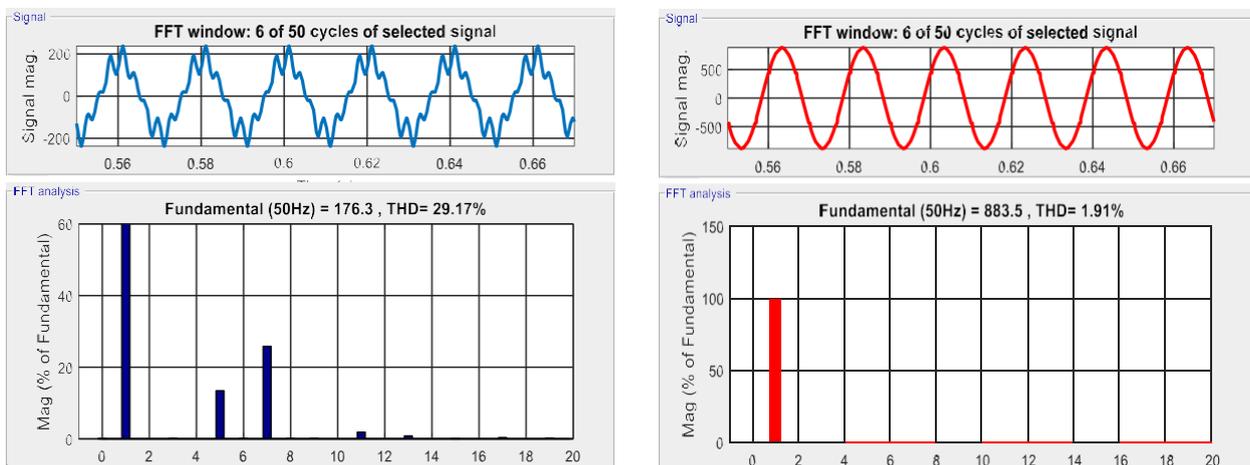


Figure 4.16 Forme du Spectre du courant au réseau électrique avant filtrage.

### 4.3.8 Charge non linéaire avec filtrage h5, h7, h11 et h13

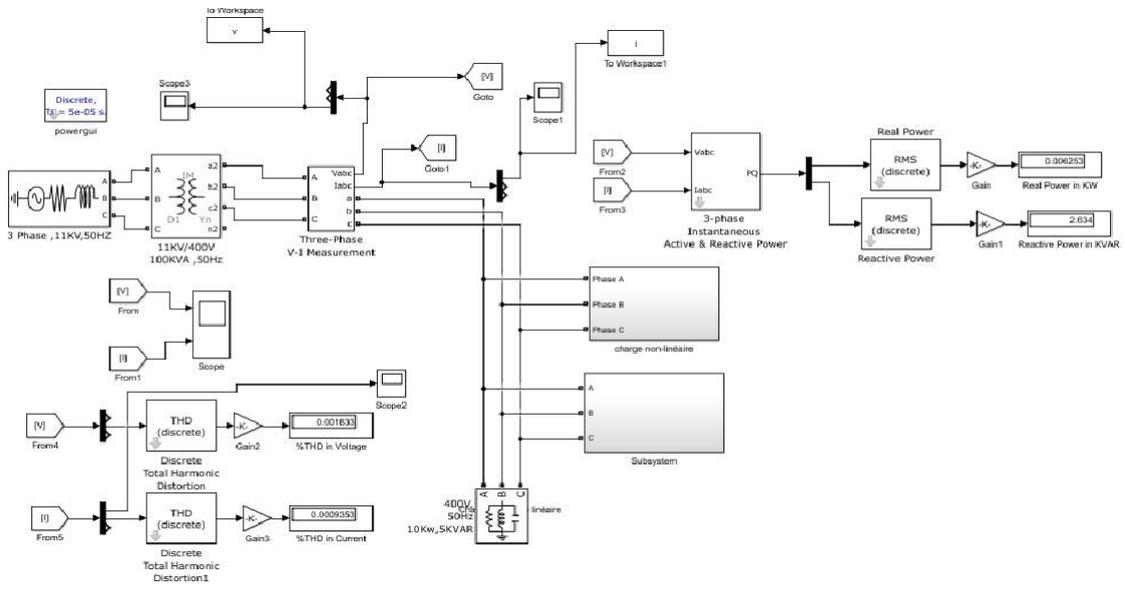


Figure 4.17 Schéma de bloc de la charge non linéaire avec filtrage h5, h7, h11 et h13.

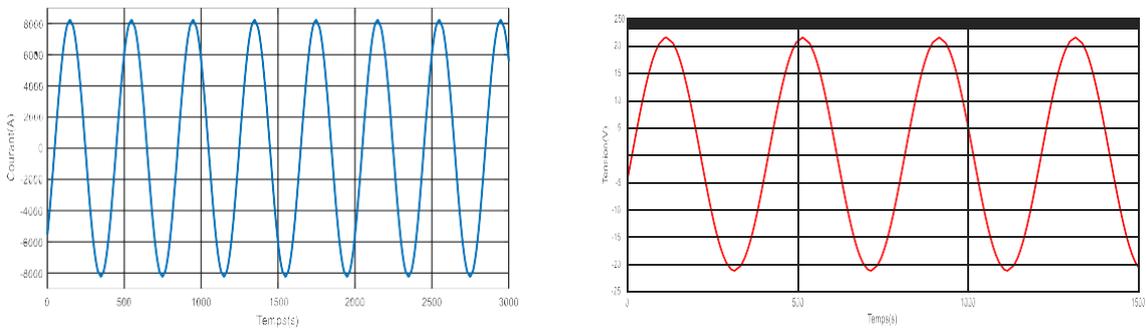


Figure 4.18 Forme de tension et du courant d'une charge non linéaire avec filtrage h5, h7, h11 et h13.

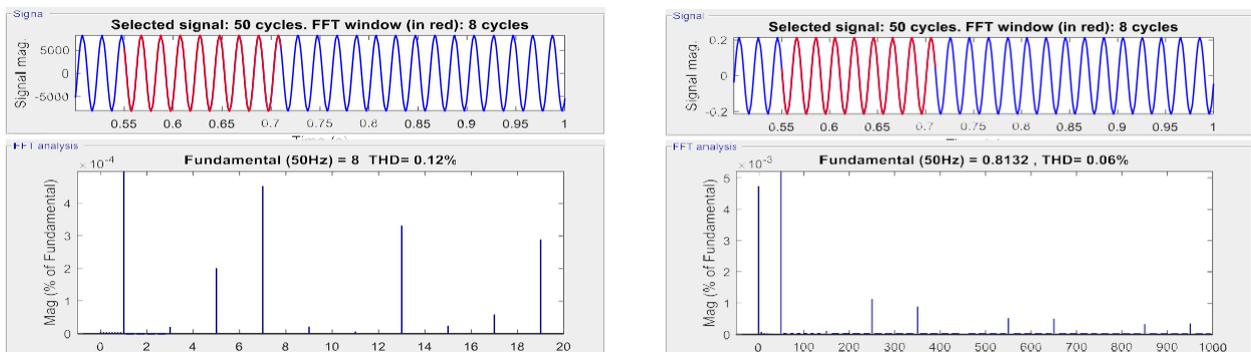


Figure 4.19 Forme du Spectre du courant et tension après filtrage.

## 4.4 Interprétations des résultats

Les figures (4.3), (4.5), (4.7), (4.9), (4.11), (4.13) présentent les résultats de simulation obtenus :

Le résultat de la figure (4,3) représente la réponse pour un cas de charge linéaire tel que nous constatons l'absence des harmoniques ni en tension ni en courant.

Le résultat de la figure (4.5), donne un courbe montre qu'il y lieu une déformation du signal du courant alors que la tension garde une forme sinusoïdale ce qui montre l'existence des harmoniques à cause de la présence d'une charge non linéaire représentée par un moteur à courant continu à travers un circuit de redressement.

La figures (4.7), (4.9) et (4.11) représentent des graphes résultants des charges non-linéaires représentée par des lampes à Led, thyristors et redresseurs provoquant une déformation en courant considérable et une légère déformation pour les tensions.

La figure (4.13) extrait de l'installation de la charge UPS (Uninterruptible power supply) où nous constatons qu'il y a lieu une déformation très importante dans le signale de courant que les autres charges.

La figure (4.16) montre l'influence de la charge globale sur l'allure du courant et de tension. Dans ce graphe nous constatons que les différents types de charge influence négativement sur la forme sinusoïdale du courant représentant un THDi est très élevé (29.17%) et la présence des harmoniques de rang  $h_5$   $h_7$   $h_{11}$   $h_{13}$ .

Pour l'allure de tension, nous constatons que l'influence est négligeable (1.9%).

Pour remédier à ce problème nous avons inséré un bloc d'un filtre passif et nous avons enregistré les résultats suivants :

- La disparition des harmoniques à l'aide de l'insertion du filtre passif.
- Le THDi et THDv sont diminués à des valeurs faibles.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et simulé l'influence de la charge non linéaire sur la forme de l'allure essentiellement du courant selon des différents types de charge et on a ajouté un filtre dit passif pour remédier le problème de présence des harmoniques de rang  $h_5$ ,  $h_7$ ,  $h_9$ ,  $h_{11}$  et  $h_{13}$ . L'utilisation des filtres passifs contribue à résoudre pas mal de problèmes dans le milieu industriel

## Conclusion générale

Plusieurs normes internationales de plus en plus contraignantes sont mise en œuvre dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique fournie aux consommateurs.

Dans le cadre de ce projet, nous avons étudié théoriquement et évalué par le biais des outils de simulation, en l'occurrence Matlab-Simulink, l'efficacité de différentes solutions de filtrage des harmoniques, à savoir les filtres passifs résonant. Les effets néfastes induits par la présence des harmoniques dans le réseau sur les différents équipements électriques ne sont plus à démontrer.

Par l'installation des filtres passifs, deux objectifs sont visés :

- 1) Réduire les tensions et les courants harmoniques dans les réseaux à des niveaux normatifs.
- 2) Fournir tout ou une partie de la puissance réactive consommée. Notre projet présente une méthode de conception d'un filtre minimum ; autrement dit un filtre passif qui supprime adéquatement les harmoniques à un coût minimal.

La formes d'onde soit de courant ou de tension après insertion des filtres passif sont de forme purement sinusoïdale. Pourtant, il est constaté que le filtre passif malgré ses inconvénients a donné des résultats impressionnants.

### **Travaux futurs de recherche**

Nous préconisons pour le développement de ce travail de simulation, la possibilité de gérer et surveiller le réseau électrique par un système asservi en temps réel qui fait appel aux techniques numériques et des techniques d'intelligence artificielle.

# Bibliographies

[1] : MOSBAH Mustafa "Optimisation de fonctionnement des réseaux de distribution en présence des sources renouvelable", Thèse Doctorat, Université Laghouat, 2018.

[2] : SABAA, Ilyas "Filtrage des harmoniques du réseau électrique en présence d'une source photovoltaïque", Mémoire Licence professionnelle, Université de Ghardaïa, 2021.

[3] : HERAIZ Yousra, DELOUM Samira "Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un filtre hybride", Mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf-Msila, 2020.

[4] : BENYAGOUB Rostom, HADJAÏSSA Abdelouahab "Optimisation de l'emplacement et la taille des sources d'énergie renouvelable dans les réseaux électriques", Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2019.

[5] : TRAORE Massitan "Gestion du système photovoltaïque d'une alimentation privée connecte au réseau", Mémoire de Master, Université de Badji Mokhtar-Annaba, 2017.

[6] : MEFTI Soria, GHERIB Saliha "L'utilisation de l'algorithme d'optimisation essaim de particule (OEP) pour résoudre le problème de dispatching économique basé sur l'énergie renouvelable en Algérie, Une étude de cas : site de Naama", Mémoire de Master, Centre universitaire Salhi Ahmed-Naama, 2020.

[7] : DAHADJ Yassine, NOUARI Radhwane "Optimisation des réseaux de distribution basse tension (étude de cas Poste n°571 TIMIMOUNE)", Mémoire de Master, Université Ahmed Draïa- Adrar, 2017/2018.

[8] : SOUTOU Yacine, CHABANE Madjid, GUEZOUÏ Farid "Etude des protections d'un départ moyenne tension Application poste 60kV / 30 kV de Tizi-medén ", Mémoire de Master Professionnel, Université Mouloud Mammeri- Tizi-Ouzou, 2013.

[9] : NAAMA Bakhta "la production décentralisée", Support de Cours Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf- Oran, 2016/2017.

- [10] : BELMAHDI.H, ABDELLI.N "Etude de la protection d'un réseau de distribution moyenne tension Application au poste de transformation et de distribution HT/MT Oued Aïssi /Tizi-Ouzou", Mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou, 2007/2008.
- [11] : TAREB Karim "Réglage des protections des réseaux HTA ", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri -Tizi-Ouzou, 2017.
- [12] : TAIBAOUI Amel, MIHOUB Hasna "La reconfiguration des réseaux électriques de distribution par la méthode de Baran", Mémoire de Master, Université Dr. Yahia Fares- Medea, 2019/2020.
- [13] : HAUTEFEUILLE.P, PORCHEREN.Y "Lignes aériennes ", Techniques d'ingénieur.
- [14] : SONELGAZ, Guide Technique les réseaux torsadés.
- [15] Guide technique SONELGAZ.
- [16] : Sonelgaz, Guide Technique options fondamentales 1992.
- [17] : AOUZELLAG LAHACANI Nariman "Réseaux Electriques", Polycopie de cours UEF 3111 Licence 3<sup>ème</sup>, Université Bejaia, 2022/2023.
- [18] : Mr. ATMANI Lyes, Mr. AICH Nassim "Etude de développement d'un réseau de distribution Basse Tension « Zone urbaine Oussama » ", Mémoire de Fin d'études, Université A. Mira-Bejaia, 2018.
- [19] : NEKRI Houssam, EDDIN KHEYAR Lokman "Etude et Dimensionnement d'un Poste MT 30KV d'une installation Tertiaire", Mémoire de Licence, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2018.
- [20] : BACHIOUA Mebrouk, SAHLI Sabah "Calcul des Protections des Départs HTA au sein de l'entreprise SONELGAZ Bejaïa Application aux Réseaux de la Distribution de la Ville de Bejaïa", Mémoire de Master, Université d'A-Mire-Bejaia, 2016/2017.
- [21] : HADAD Salim "gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission", Thèse de Doctorat en Electromécanique, Université Badji Mokhtar –Annaba, 2010.
- [22] : DENOUN.H "QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE (Q.E.E)", Support Documentaire, Université Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou, 2019/2020.

- [23] : OUDAIFA Nawal, SAHRAOUI Siham "Qualité d'énergie électrique", Mémoire de Master Académique, Université 8 Mai 1945 -Guelma, 2017/2018.
- [24] : KHERAKHERIA Zahra "Qualité de l'énergie électrique en moyenne tension", Mémoire de Master Académique, Université 8 Mai 1945 -Guelma, 2018/2019.
- [25] : KEN. Tarek "La qualité d'énergie (Les harmoniques) ", Mémoire de Licence Electrotechnique, Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene, 2016/2017.
- [26] : BOUMERDAS.Abelqtef "l'étude de la qualité d'énergie à l'aide d'une carte arduino", Mémoire de Mater en Electrotechnique, Université Constantine1, 2013/2014.
- [27] : KACI Louenas "Etude de la qualité d'énergie électrique pour des charges non linéaire", Mémoire de Master en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2012.
- [28] : IGNATOVA Vanya "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique", pour obtenir le grade de Docteur de L'ujf, Université Joseph Fourier, 20 octobre 2006.
- [29] : Dr. BEDOUI Messaouda "Qualité l'énergie électrique " Support de Cours Master 1, Université Ibn Khaldon –Tiaret, 2022/2023.
- [30] : AHMIL Ines, BELDI Asma "Modélisation analytique des champs électromagnétiques en vue d'estimation de l'exposition publique et professionnelle basse fréquence", Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar- Annaba, juin2019.
- [31] : LILIEN Jean-Louis "Qualité de l'électricité dans le marché libéralise", Séminaire, Université de Liège, 8 Décembre 2010.
- [32] : KIRECHE Nora "Comportement électromagnétique de l'alimentation d'une machine a synchrone avec défaut", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
- [33] : ZELLAGUI Mohamed "Qualité d'énergie électrique QEE", Groupe SONELGAZ (IFEG), programme d'intégration des nouveaux cadres, promotion 2, Ain M'Lila, Novembre 2016.
- [34] : HAMOUDI Farid "commande robuste d'un filtre actif shunt a quatre fils "Mémoire Magistère en Electrotechnique, Université El Hadj Lakhder –Batna, 1 Juillet 2008.

- [35] : CHELLI Zoubir "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique", Thèse de Doctorat en Sciences, Université Badji Mokhtar Université-Annaba, 2015.
- [36] : TOUIL El-Bachir, RABHI Mohammad El-Bachir "Amélioration de qualité d'énergie électrique par un filtre actif parallèle à quatre fils", Mémoire de Master Académique, Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued, 2021/2022.
- [37] : NADJI Djamel, CHIKH Nadir "Etude des filtres pour amélioration de la qualité de l'énergie électrique ", Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf- Msila, 2021.
- [38] : DJEBAIRIA Sabra, HOUMARIA Radja "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique", Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945-Guelma, Juillet 2021.
- [39] : KEBBAL Med Racim, BAKIR Karim "Paramètres de la qualité de la tension d'un réseau électrique Etude et Analyse", Project de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique en collaboration avec SONELGAZ / GRTE, Juin 2008.
- [40] : TOGOLA Kadiatou, ABBANE Mahdi "Etude d'un convertisseur alternatif-continu a absorption sinusoïdale utilisant un onduleur a résonance", Mémoire fin d'étude, De Mouloud Mammeri.
- [41] : BEN HOUIT Youcef, BEN HOUIT Mohammed "Amélioration de la qualité d'énergie électrique ", Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2017/2018.
- [42] : GATTAL Boulaares "Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension", Mémoire de Magister, Université de Batna Faculté de Technologie, 30 juin 2012.
- [43] : BOUACIDA Farida, ZEBIRI Manel "Qualité de l'énergie électrique et norme IEEE-519", Mémoire de Master, Université de Larbi Ben M'hidi-Oum El-Bouaghi, 2019.
- [44] : BENDJEFFAL Mohammed, BENABBAS Mourad "Utilisation d'un convertisseur multi-niveau de type PUC dans un Système de filtrage actif", Mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi-Bordj Bou Arreridj, 2021/2022.

- [45] : AISSA Aimene, MOUSSAOUI Moussa "Contribution à l'étude par simulation des effets des harmoniques et de la compensation de l'énergie réactive sur le réseau électrique", Mémoire de Master, Université de Ibn-Khaldoun-Tiaret, 2018/2019.
- [46] : RABAHALLAH.S "Identification et filtrage des courants harmoniques générés par une A.S.I", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri -Tizi Ouzou, 2013.
- [47] : AMMOUR Hichem, TANI Mourad "Filtrage actif : Comparaison entre la méthode des puissances actives et réactives instantanées (PQ) et la méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF)", Mémoire de master, Université de Dr. Yahia Fares- Médéa, 2014/2015.
- [48] : SEGHIR Abderrahman, BEHTITE Mohamed Kabir "Filtrage des harmoniques dans le réseau électrique" Mémoire de fin d'études, Université de Laghouat, 2024.
- [49] : BELHADJ Kheira, BOUZIR Nessrine "Harmoniques Et dépollution du réseau électrique", Mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2021/2022.
- [50] : SAADI.A "Les harmoniques option machines électriques", Cours N2 1ème Année Master, Université de Mohammed Kheider Biskra, 2012.
- [51] : KHADEM Smail, FERHATI Boubaker " Etude des différentes méthodes d'identification des harmoniques", Mémoire fine d'études de Licence, Centre Universitaire D'el-Oued, 2010.
- [52] : GUENDOUD Djedjiga, BELACEL Billal "filtrage actif de puissance", Mémoire de Master Académique, Université de Mouloud Mammeri-Tizi-Ouzou, 2016.
- [53] : OMEIRIAMAR "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant", Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar-Annaba, 2007.
- [54] : MOUSSA Oussama "Etude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif", Mémoire de Magister, Université de Batna 2.
- [55] : GHADBANE Ismail "Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs" Mémoire de Magister, Université Mohamed Kheider – Biskra, 2010/2011.
- [56] : MORSLI M'BARK Miloud "Commande linéaire d'un filtre actif parallèle", Mémoire de Projet de Fine d'étude, Université de Saad Dahlab-Blida, 2015/2016.

[57] : LAHMAR Nassira, YAHIAOUI Ahlem, BELKHEIR Moustafa "Etude des algorithmes de filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques pollués", Mémoire de Master, Centre Universitaire Salhi Ahmed- Naama, 2021.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa  
factuel de la science et la technologie



جامعة غرداية  
كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم: الآلية والكهروميكانيك  
شعبة: طاقات متجددة  
تخصص: طاقات متجددة وبينة

غرداية في: 31/05/2025

## شهادة ترخيص بالتصحيح والايذاع:

انا الاستاذ(ة). مصباح مصطفى  
بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (البياسيس/ماستر/دكتورا) المعنونة ب:  
**Etude et simulation d'un filtre d'harmonique**

من انجاز الطالب (المطالبة):

بوحميذة وسال

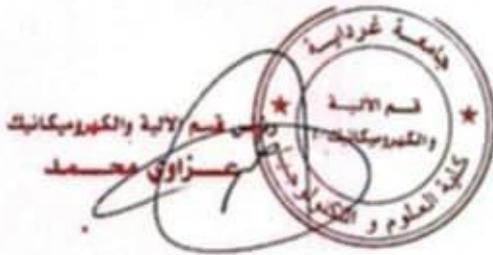
بن كران خديجة

التي نوقشت/قويت بتاريخ: 2025/05/21

اشهد ان الطالب/المطالبة قد قام/قاموا بالتعدلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا  
وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم

امضاء المسؤول عن التصحيح



مصباح مصطفى  
30