الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic OF Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa
كلية العلوم و التكنولوجيا

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Electrotechnique Industrielle

THEME

Surveillance et Diagnostic des Déformations des Grandeurs Electriques dans un Réseau Local

Présenté par le binôme :

- CHERIET Amira
- SASSI Oumaima

Devant le jury :

- CHENIKHER Salah	Prof	**Président**
- MOUSSA Mohamed Amine	MCB	**Encadreur**
- BOUGUERNE Abla	MCA	**Examinateur**

2024/2025

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic OF Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي–تبسة
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa
كلية العلوم و التكنولوجيا

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Electrotechnique Industrielle

THEME

Surveillance et Diagnostic des Déformations des Grandeurs Electriques dans un Réseau Local

Présenté par le binôme :

- CHERIET Amira
- SASSI Oumaima

Devant le jury :

- CHENIKHER Salah	Prof	**Président**
- MOUSSA Mohamed Amine	MCB	**Encadreur**
- BOUGUERNE Abla	MCA	**Examinateur**

2024/2025

Remerciements

Nous remercions Allah de nous avoir donner la force physique et morale pour .accomplir ce travail

Nous tenons à remercier Mr Mohammed Amine Moussa qui nous a suivi et aidé .tout au long de ce travail

Nous sommes aussi reconnaissantes à tous les enseignants qui ont contribué à notre .formation

Notre profonde gratitude va également aux membres de jury qui fera l'honneur .d'évaluer ce travail

Nous désirons exprimer nos remerciements à tous ceux qui par leurs aide et .encouragement, nous ont permis d'achever ce travail

.

.

Dédicaces

En signe de respect et de reconnaissances, je dédie ce travail a :

Mes très chers parents qui ont tout fait pour me voir heureux.

Mon Frères et Mes Sœurs,

A tout ma famille

Mes amis de classe

Je dédie aussi ce travail :

A tous ceux qui me sont chers.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif l'étude et l'analyse des déformations des grandeurs électriques (tension et courant) dans un réseau local, principalement causées par les charges non linéaires. Avec l'utilisation croissante de redresseurs, de moteurs électriques et d'équipements à électronique de puissance, les réseaux sont fortement exposés aux harmoniques, aux déséquilibres de phases, et aux variations de fréquence, ce qui nuit à la stabilité du réseau et à la performance des équipements.

La partie théorique de ce travail présente les différents types de perturbations, leurs origines, leurs effets, ainsi que les principales méthodes d'analyse, telles que la transformée de Fourier, les ondelettes, et les approches intelligentes comme les réseaux de neurones ou la logique floue.

Sur le plan pratique, une simulation d'un réseau électrique incluant une charge non linéaire (redresseur monophasé et moteur à courant continu) a été réalisée sous MATLAB/Simulink. L'analyse du courant a permis de calculer le taux de distorsion harmonique (THD), d'identifier les composantes harmoniques et de générer un signal de référence pour la compensation à l'aide d'un filtre actif.

Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de l'approche proposée dans la détection et l'analyse des déformations, et ouvrent la voie à des solutions concrètes pour l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques locaux.

Abstract

This thesis aims to study and analyze voltage and current distortions in local electrical network, mainly caused by nonlinear loads. With the widespread use of rectifiers, electric motors, and power electronics equipment, modern networks are increasingly affected by harmonics, phase imbalances, and frequency fluctuations, all of which negatively impact system stability and equipment reliability.

The theoretical section introduces the different types of electrical disturbances, their causes and consequences, and presents key analysis techniques such as Fourier transform, wavelet analysis, and intelligent approaches like neural networks and fuzzy logic.

On the practical side, a simulation of an electrical network with a nonlinear load (single-phase controlled rectifier and DC motor) was carried out using MATLAB/Simulink. The current signal was analyzed to compute the Total Harmonic Distortion (THD), identify the dominant harmonics, and generate a reference signal for compensation using an active power filter.

The results confirm the effectiveness of the proposed approach in accurately detecting and analyzing waveform distortions, offering promising solutions to enhance power quality in local electrical systems.

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتحليل ظاهرة تشوه التوتر والتيار في شبكة كهربائية محلية، الناتجة أساسًا عن الأحمال غير الخطية، والتي أصبحت تمثل تحديًا حقيقيًا أمام الحفاظ على جودة الطاقة. فمع الانتشار المتزايد للمقومات، والمحركات الكهربائية، ومعدات الإلكترونيات القوية، باتت الشبكات معرضة بشكل دائم لتشوهات توافقية، وتذبذبات في التردد، وعدم توازن بين الأطوار، مما يؤثر بشكل مباشر على استقرار المنظومة الكهربائية وسلامة الأجهزة المرتبطة بها.

تتناول هذه الدراسة في شقها النظري مفاهيم تشوهات الطاقة، مصادرها، وأثرها على كفاءة الشبكة، مع استعراض لأهم تقنيات التحليل والمراقبة مثل تحويلة فوريه، تحويلة المويجات، والتقنيات الذكية كالشبكات العصبية والمنطق الضبابي.

أما في الجانب التطبيقي، فقد تم تطوير نموذج لمحاكاة شبكة تحتوي على حمل غير خطي متمثل في مقوم أحادي الطور ومحرّك تيار مستمر باستخدام برنامج .MATLAB/Simulink حيث تم تحليل الإشارات الناتجة، حساب معدل التشويه الكلي(THD) ، واستخراج المكونات التوافقية لبناء إشارة مرجعية للتعويض باستخدام مرشح نشط.

أثبتت نتائج المحاكاة فعالية المقاربة المقترحة في الكشف عن التشوهات وتحليلها بدقة، مع تقديم حل عملي لتحسين جودة الطاقة في الشبكات المحلية. وهو ما يجعل هذا العمل مساهمة علمية تطبيقية في مجال مراقبة جودة الطاقة وتشخيص التشوهات الكهربائية.

Table des matières

Remerciements I
Dédicaces II
Résumé III
Abstract IV
ملخص V
Liste des Figures VIII
Liste des Tableaux IX
Introduction Générale 1
Chapitre I : Etude des Concepts Théoriques 3
I.1. Introduction 4
I.2. Étude des concepts théoriques liés aux déformations des grandeurs électriques 4
I.2.1 Creux de tension et coupure brève 4
I.2.2 Surtension 5
I.2.3 Variation de tension 5
I.2.4 Variation de fréquence 6
I.2.5 Déséquilibre 7
I.2.6 Harmoniques 7
I.3 Méthodes existantes de surveillance et de diagnostic des perturbations électriques 9
I.3.1 Analyse des creux de tension, coupures brèves et surtensions 9
I.3.2 Méthodes d'analyse des harmoniques et des déséquilibres 13
I.3.3 Méthode d'analyse des variations de tension et de fréquence 15
I.4 Revue des outils et technologies disponibles pour l'acquisition de données et l'analyse des signaux électriques 18
I.4.1 Techniques de Réseau de Neurones Artificiels 18
I.4.2 Algorithmes génétiques 18
I.4.3 Logique floue 18
I.4.4 Filtre de Kalman 19
I.5 Identification des grandeurs à surveiller (tension, courant, fréquence) 20
I.5.1 La tension 20
I.6 Conclusion 23
Chapitre II : Définition des Spécifications Techniques 24
II.1 Introduction 25
II.2 Application de techniques d'analyse du signal 25
II.2.1 Techniques de Transformée en ondelettes (T.O) 25
II.2.2 Transformée de Fourier 26

II.2.3 Transforme de Fourier Discrète 30
II.2.4 Analyseurs de spectre analogiques 30
II.2.5 Analyseurs numériques 31
II.3 Diagnostic des Sources de Déformations 32
II.3.1 Les charges non linéaires 33
II.3.2 Origines des harmoniques 34
II.3.3 Sources principales des perturbations 34
II.3.4 Surtensions et chocs de foudre 35
II.4 Évaluation de l'impact des anomalies sur les équipements et la stabilité du réseau 35
II.4.1 Effet des harmoniques 35
II.4.2 Effet des creux de tension 37
II.4.3 Effets des surtensions 38
II.4.4 Effets du déséquilibre 39
II.5 Conclusion 39
Chapitre III : Simulation et Résultats 40
III.1 Introduction 41
III.1.1 Contexte 41
III.1.2 Problématique 41
III.1.3 Objectifs de la simulation 41
III.2 Approche proposée 41
III.3 Méthodologie de Simulation 42
III.3.1 Scénarios de simulation 42
III.3.2 MATLAB/Simulink 43
III.4 Résultats de simulation 44
III.4.1 Présentation des courbes 44
III.4.2 Analyse des résultats 46
III.4.3 Compensation harmonique 48
III.4.4 Analyse de l'évolution de la vitesse moteur en régime défaillant 51
III.4.5 Analyse des résultats harmoniques après défaillance de la diode de roue libre 52
III.5 Conclusion 55
Conclusion Générale 57
Références Bibliographiques 60

Liste des Figures

FIGURE I.1 CREUX BREVES ET COUPURES DE TENSION. ---------- 4
FIGURE I.2 EXEMPLE DE SURTENSION. ---------- 5
FIGURE I.3 VARIATION DE TENSION. ---------- 6
FIGURE I.4 MODULATION DE LA FREQUENCE.---------- 6
FIGURE I.5 DESEQUILIBRE. ---------- 7
FIGURE I.6 FONDAMENTAL ET HARMONIQUE. ---------- 8
FIGURE I.7 FONDAMENTAL INTER HARMONIQUE.---------- 8
FIGURE I.8 REPRESENTATION SPECTRALE DES INTERS ET INFRA HARMONIQUES. ---------- 9

FIGURE II.1 EXEMPLES D'ONDELETTE MERE. ----------26
FIGURE II.2 INTRODUCTION DES FREQUENCES NEGATIVES DANS L'EXPRESSION DES SIGNAUX. ----------28
FIGURE II.3 REPRESENTATION FREQUENTIELLE BILATERALE D'UN SIGNAL PERIODIQUE. ----------29
FIGURE II.4 REPRESENTATION FREQUENTIELLE UNILATERALE D'UN SIGNAL PERIODIQUE.----------29
FIGURE II.5 PRINCIPE D'UN APPAREIL DE MESURE NUMERIQUE. ----------31
FIGURE II. 6 FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE. ----------31

FIGURE III.1 SCHEMA DE SIMULATION SOUS MATLAB/SIMULINK D'UN REDRESSEUR COMMANDE ET MOTEUR DC.----------43
FIGURE III.2 TENSION DE CHARGE Vch POUR DIFFERENTS ANGLES D'AMORÇAGE : (A) VUE DE TOUT LE SIGNAL ACQUIS, (B) $\alpha = 45°$, (C) $\alpha = 27°$, (D) $\alpha = 0°$.----------44
FIGURE III.3 COURANT DE SOURCE is POUR DIFFERENTS ANGLES D'AMORÇAGE : (A) VUE DE TOUT LE SIGNAL ACQUIS, (B) A=45°, (C) A=27°, (D) A=0°. ----------45
FIGURE III.4 ÉVOLUTION TEMPORELLE DE LA VITESSE DU MOTEUR DC EN FONCTION DE L'ANGLE D'AMORÇAGE.----------46
FIGURE III.5 SPECTRE HARMONIQUE DU COURANT POUR A=45° (THD=25%). ----------46
FIGURE III.6 SPECTRE HARMONIQUE DU COURANT POUR A=27° (THD=24%). ----------47
FIGURE III.7 SPECTRE HARMONIQUE DU COURANT POUR A=0° (THD=40%).----------47
FIGURE III.8 ÉVOLUTION TEMPORELLE DU THD EN TEMPS REEL. ----------48
FIGURE III.9 COMPARAISON DU COURANT ORIGINAL (MESURE EN ROUGE) ET RECONSTRUIT (CALCULE EN BLEU). ----------48
FIGURE III.10 ZOOM TEMPOREL SUR LES ECARTS ENTRE LE COURANT MESURE ET RECONSTRUIT. -------49
FIGURE III.11 DECOMPOSITION SPECTRALE : FONDAMENTALE (BLEU) VS HARMONIQUES RESIDUELS (ROUGE). ----------50
FIGURE III.12 SPECTRE FREQUENTIEL DU SIGNAL COMPENSE (HARMONIQUES <5%).----------50
FIGURE III.13 VITESSE DU MOTEUR EN REGIME DEFAILLANT (DIODE DE ROUE LIBRE DECONNECTEE). --51
FIGURE III.14 FORMES D'ONDE DU COURANT EN REGIME DEFAILLANT : (A) VUE GLOBALE, (B)-(D) PAR ANGLE. ----------52
FIGURE III.15 SPECTRE HARMONIQUE EN REGIME DEFAILLANT EN BLEU POUR A=45° (THD=6%).------53
FIGURE III.16 SPECTRE HARMONIQUE EN REGIME DEFAILLANT EN BLEU POUR A=27° (THD=18%). ----53
FIGURE III.17 SPECTRE HARMONIQUE EN REGIME DEFAILLANT EN BLEU POUR A=0° (THD=40%).------54
FIGURE III.18 ÉVOLUTION TEMPORELLE DU THD EN TEMPS REEL EN REGIME DEFAILLANT.----------55

Liste des Tableaux

TABLEAU II. 1 : EFFETS DES CREUX DE TENSION SUR QUELQUES EQUIPEMENTS ELECTRIQUES SENSIBLES 38

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans les réseaux électriques modernes, la qualité de l'énergie représente un facteur essentiel, aussi bien pour les fournisseurs que pour les utilisateurs finaux. En effet, la stabilité et la forme idéale des grandeurs électriques -notamment la tension, le courant et la fréquence- conditionnent directement le bon fonctionnement des équipements, la sécurité des installations électriques, ainsi que la durée de vie des dispositifs sensibles.

Cependant, en raison de l'évolution des charges non linéaires, les réseaux deviennent de plus en plus vulnérables à diverses perturbations, connues sous le nom de déformations des grandeurs électriques. Ces déformations peuvent se présenter sous forme de creux de tension, surtensions transitoires, harmoniques, déséquilibres de phase ou encore de variations de fréquence. Elles peuvent affecter de manière significative la performance du système électrique, engendrer des pertes économiques importantes et détériorer la qualité du service.

Dans ce contexte, cette étude se propose d'analyser quelques signaux électriques générés par un redresseur monophasé double alternance à thyristors alimentant un moteur à courant continu. L'originalité de notre approche réside dans le développement d'une méthode innovante de surveillance et de compensation des harmoniques en temps réel, adaptée aux variations dynamiques comme la vitesse du moteur. Nous nous intéressons particulièrement à l'influence de l'angle d'amorçage des thyristors sur la composition spectrale du courant, ainsi qu'aux stratégies de mitigation des perturbations harmoniques.

L'importance de ce travail s'inscrit dans l'impératif industriel de garantir la fiabilité et la durabilité des installations face aux sollicitations harmoniques. Afin de démontrer l'efficacité de notre algorithme, notre étude aborde également l'état fonctionnel de la diode de roue libre, dont la détection précoce de défaut permet d'éviter des dommages plus graves. Par analogie, et en revenant aux capacités de cette approche, on peut dire qu'elle est applicable à d'autres défauts courants.

Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique des différentes formes de déformations des grandeurs électriques, leurs origines, leurs impacts, ainsi que leur classification selon les normes de qualité d'énergie.

Le deuxième chapitre est dédié à l'analyse des méthodes de traitement et de diagnostic permettant d'identifier et de quantifier ces perturbations. Ces méthodes incluent aussi bien des approches classiques (comme l'analyse en valeur efficace, la transformée de Fourier ou les composantes symétriques), que des techniques plus avancées (segmentation, réseaux de neurones, logique floue, etc.).

Enfin, le troisième chapitre présente une étude de simulation à l'aide d'un algorithme de traitement en temps réel. Cette partie a pour objectif de tester et de valider la méthode proposée, tout en illustrant à travers des cas sains et de défaut l'influence réelle des déformations sur un réseau local. À travers une méthodologie rigoureuse combinant modélisation sous MATLAB/Simulink et analyse en temps réel, nous allons démontrer l'efficacité d'un algorithme de traitement du signal capable à la fois de quantifier précisément les harmoniques et de générer les références nécessaires à leur compensation active.

Chapitre I : Etude des Concepts Théoriques

I.1. Introduction

La qualité de l'énergie électrique est un enjeu majeur dans les réseaux modernes, notamment avec l'essor des équipements sensibles et des systèmes automatisés dans les environnements industriels et domestiques. Dans ce contexte, les réseaux électriques locaux sont fréquemment sujets à des perturbations affectant les grandeurs électriques fondamentales telles que la tension, le courant et la fréquence. Ces déformations peuvent se manifester sous forme de creux de tension, de surtensions, d'harmoniques, de déséquilibres ou encore de variations de fréquence.

Ces anomalies, souvent provoquées par des courts-circuits, des charges non linéaires ou des événements transitoires, peuvent altérer le bon fonctionnement des équipements, entraîner des pertes économiques considérables et nuire à la stabilité du réseau.

Ce chapitre s'inscrit dans cette problématique, en proposant une étude sur les types de déformations électriques rencontrées dans les réseaux locaux, ainsi que des techniques avancées permettant leur détection et leur évaluation.

I.2. Étude des concepts théoriques liés aux déformations des grandeurs électriques

I.2.1 Creux de tension et coupure brève

Un creux de tension est défini par une chute brève de la tension de fourniture en un point d'un réseau électrique, à une valeur située entre 10% à 90% de la tension nominale, sur une période variant de 10 ms à plusieurs secondes. La coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Une coupure est dite brève si elle n'excède pas trois minutes [1], [2].

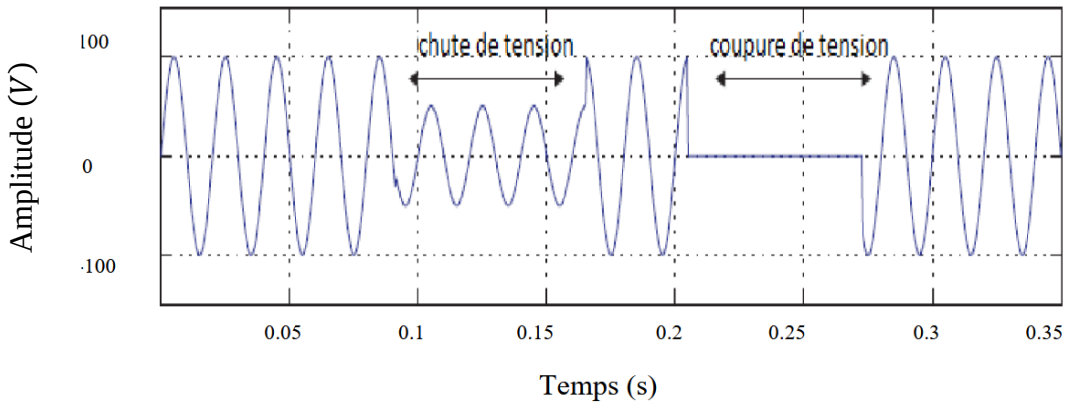


Figure I.1 Creux brèves et coupures de tension.

Les principales causes des creux de tension sont les courts-circuits survenant dans le réseau électrique ou les équipements connectés, ainsi que le démarrage des moteurs à grosse puissance. Cependant, les courts-circuits restent la source principale des creux de tension et des coupures

brèves. Ils induisent des fluctuations soudaines de l'amplitude de la tension. Un court-circuit peut affecter une, deux ou toutes les trois phases et peut causer un système déséquilibré.

Les perturbations électriques les plus nocif sont les creux de tension à cause de leur fréquence et leur sensibilité de nombre d'appareillages dans un réseau industriel. Il faut doit être souligné que les coupures brèves peuvent entrainer des dégâts plus graves [3],[4].

I.2.2 Surtension

Les surtensions transitoires sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles se caractérisent par un dépassement de l'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale, sur une période inférieure à une seconde.

Les surtensions se caractérisent par une augmentation de l'amplitude de la tension variant de $1{,}1\ pu$ à $1{,}8\ pu$. Elles sont généralement plus rares que les creux de tension et sont souvent causées par des courts-circuits dans les systèmes à neutre isolé, qui peuvent provoquer simultanément des creux de tension et des surtensions. Lors d'un court-circuit monophasé se produit dans tel système, les deux phases non affectées par le défaut peuvent atteindre une valeur allant jusqu'à $1{,}73\ pu$, correspondant à la tension composée. Lors d'un court-circuit biphasé, la phase non concernée par le défaut peut présenter une surtension atteignant $1{,}5\ pu$.

Des phénomènes atmosphériques (comme la foudre), des déclenchements de charges conséquentes, des dysfonctionnements de régulateurs de tension, de la Ferro résonance ou des actions sur le réseau peuvent aussi être à l'origine de surtensions. Ces surtensions sont généralement caractérisées par leur courte durée et sont assimilées à des transitoires [5].

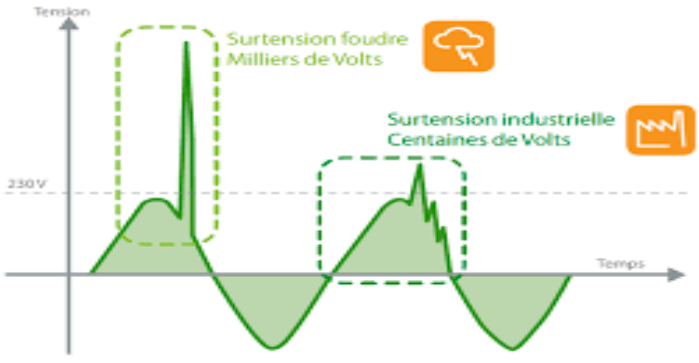


Figure I.2 Exemple de surtension.

I.2.3 Variation de tension

Les fluctuations de tension se rapportent des changements de la valeur efficace ou de la valeur crête d'une amplitude inférieure à 10% de la tension nominale. Ces variations soudaines

se produisent sur des intervalles de temps très courts, de l'ordre de quelques centièmes de seconde. Elles sont spécifiquement attribuées à la propagation de courants d'appel majeurs sur les lignes du réseau. Ces courants trouvent leur source principale dans le fonctionnement d'équipements dont la puissance consommée fluctue rapidement, tels que les fours à arc et les machines de soudage et les moteurs à démarrage fréquents.

Ces variations entraînent des changements d'intensité, perceptibles à travers l'éclairage, qui provoquent une gêne visuelle lors d'une modification de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est connu sous le nom de Flicker [6].

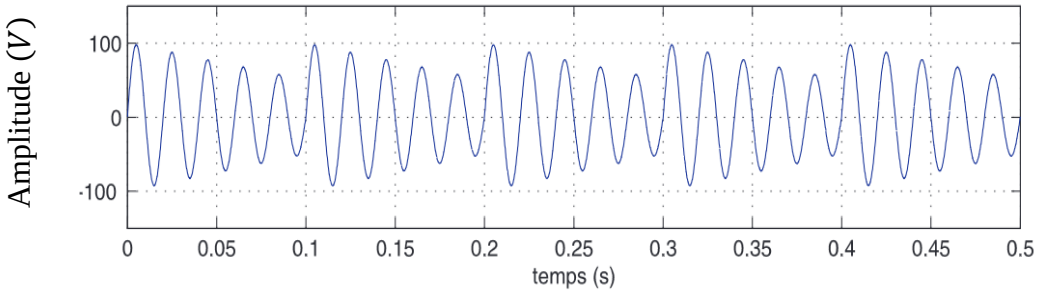


Figure I.3 Variation de tension.

I.2.4 Variation de fréquence

Une fluctuation de la fréquence du réseau peut se produire sur les réseaux des utilisateurs non connectés ou approvisionnés par une source thermique indépendante, au niveau des systèmes de distribution ou de transport. Le changement de fréquence est extrêmement rare et se produit uniquement dans des situations exceptionnelles, telles que certains dysfonctionnements graves sur le réseau. Sous des conditions d'utilisation normales, la fréquence fondamentale doit avoir une valeur moyenne située dans l'intervalle de $\pm 1\%$ [7],[8].

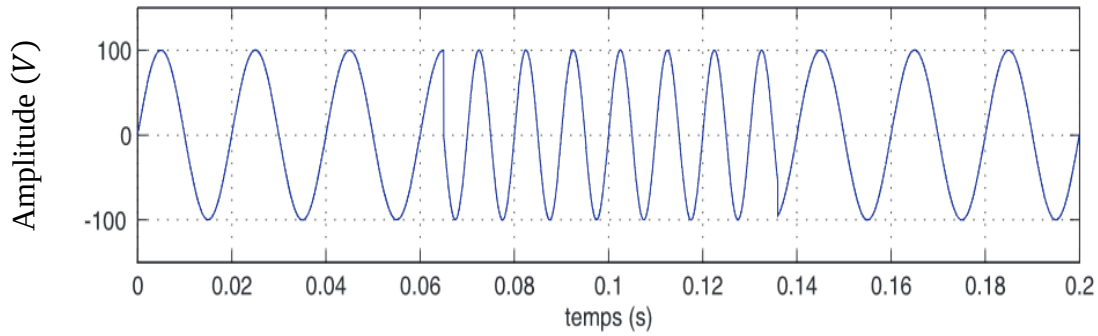


Figure I.4 Modulation de la fréquence.

I.2.5 Déséquilibre

Lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120°$, trois grandeurs identiques et de même fréquence constituent un système triphasé équilibré. Quand les conditions de phase et d'amplitude ne sont pas respectées, on se renvoie à un système triphasé déséquilibré. Les déséquilibres sont souvent causés par des charges monophasées, car dans cette situation, les courants détectés sur les trois phases présentent une amplitude et/ou une phase différente, ce qui entraîne un déséquilibre des trois tensions. L'asymétrie des charges triphasées peut aussi être une cause du déséquilibre des tensions.

On mentionne un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions ne présentent pas la même valeur efficace, et un déséquilibre de phase lorsque l'écart de phase entre les trois phases simultanées ne correspond pas à $120°$.Le degré de déséquilibre dépend à la fois de la puissance et de l'emplacement des charges perturbatrices, ainsi que de la capacité de court-circuit du réseau en amont. Le bouclage des réseaux, qui favorise un niveau élevé de court-circuit, contribue à réduire le niveau de déséquilibre.

Les déséquilibres de tension entraînent des courants inverses, qui produisent des couples de freinage indésirables et une surchauffe dans les moteurs à courant alternatif. Ils sont aussi susceptibles de perturber l'opération des appareils à thyristors commandés en phase [9].

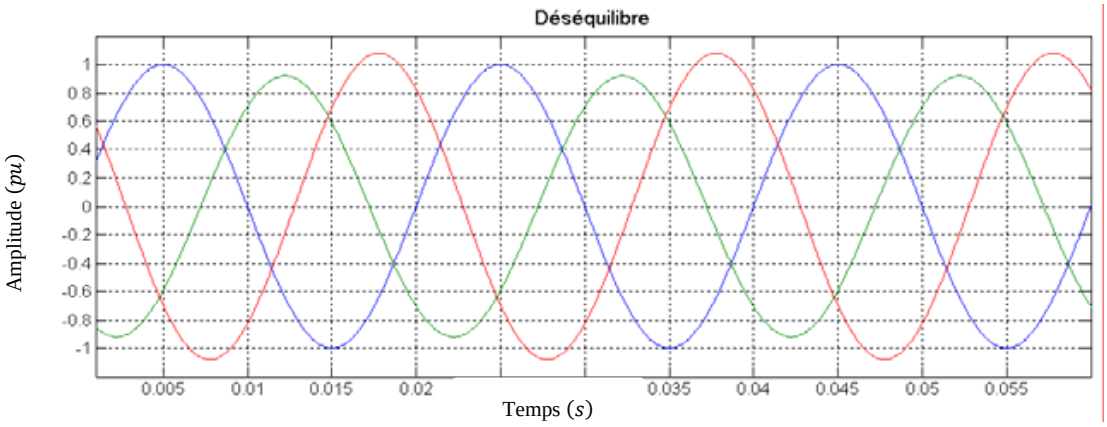


Figure I.5 Déséquilibre.

I.2.6 Harmoniques

Ils sont caractérisés par la superposition de l'onde fondamentale à $50\,Hz$, ayant des fréquences qui représentent des multiples entiers de l'onde fondamentale. Fig.I.6 illustre l'exemple des harmoniques de rang impair superposées à l'onde fondamentale. Les principaux générateurs d'harmoniques comprennent : les charges non linéaires, et les appareils disposant

de pièces qui alternent (tels que les convertisseurs statiques, les fours à arc, les inductances en saturation, les transformateurs, les machines tournantes, etc.).

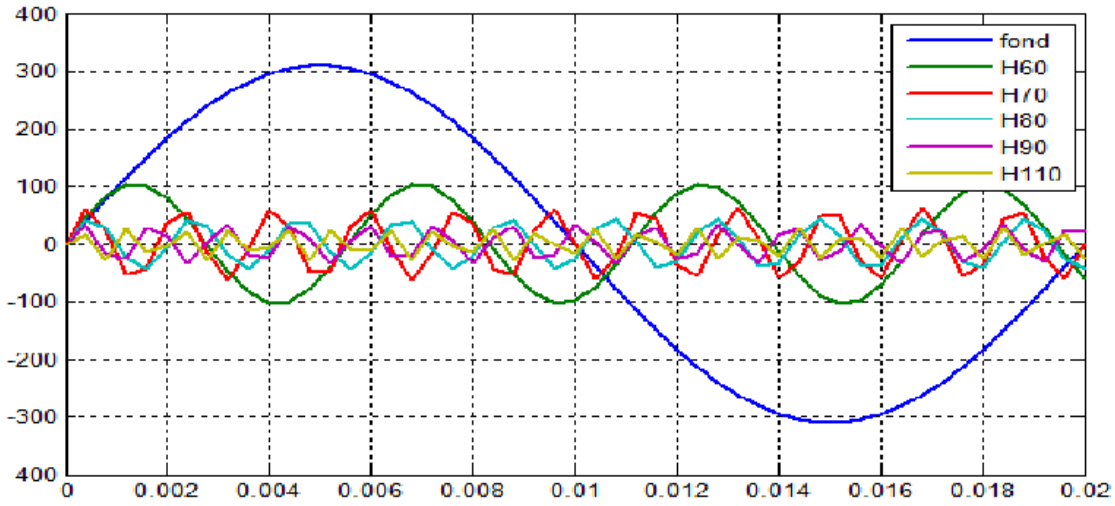


Figure I.6 Fondamental et Harmonique.

- **Inter-harmoniques :**

Les inters harmoniques sont des signaux de fréquence non multiples entiers de la fréquence fondamentale ($130\ Hz$, $170\ Hz$, $220\ Hz$ …) c'est-à-dire situées entre les harmoniques. L'augmentation des inter harmoniques est notable et leurs sources majeures incluent les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse ainsi que divers autres dispositifs de contrôle-commande similaires.

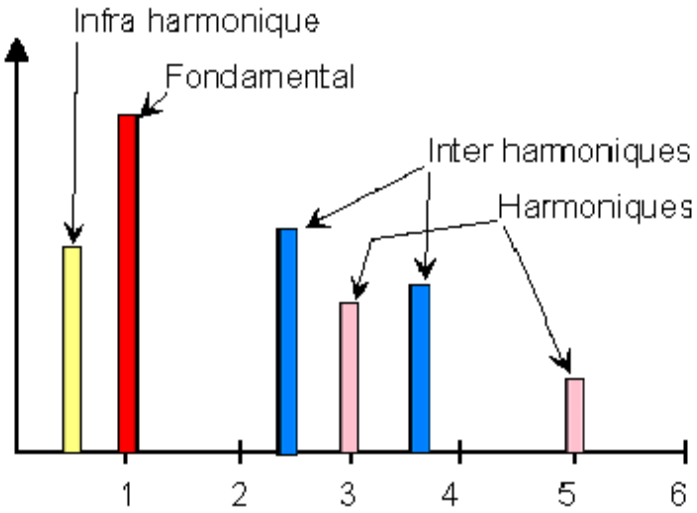


Figure I.7 Fondamental inter harmonique.

- **Infra-harmoniques :**

On nomme infra harmoniques les signaux dont la fréquence est inférieure à celle du fondamental. L'exemple d'analyse spectrale des harmoniques d'un signal périodique perturbé est illustré dans FigI.8 [10],[11].

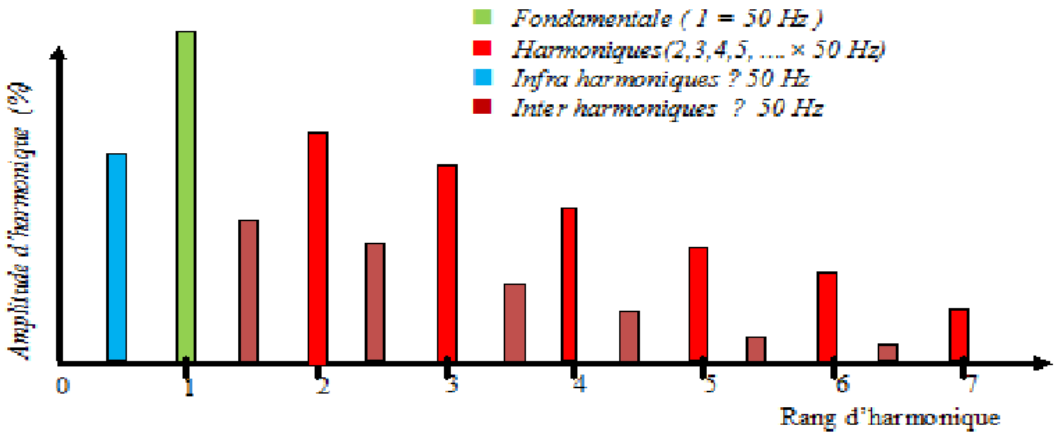


Figure I.8 Représentation spectrale des inters et infra harmoniques.

I.3 Méthodes existantes de surveillance et de diagnostic des perturbations électriques

I.3.1 Analyse des creux de tension, coupures brèves et surtensions

- **Analyse par l'estimation de l'amplitude :**

La majorité des outils de mesure évaluent l'amplitude des perturbations électriques en se basant sur la valeur efficace du signal examiné. Dans cette section, sont également présentées des méthodes alternatives pour mesurer l'amplitude du signal, se basant sur l'évaluation de son enveloppe ou de sa fréquence fondamentale. Nous limitons notre étude aux signaux sinusoïdaux, avec une référence à leur période fondamentale notée T_n dans le reste du document. Donc, toutes ces méthodes tentent d'évaluer la même portée du signal.

- **Valeur efficace :**

Pour estimer en temps réel l'amplitude d'un signal sinusoïdal, la valeur efficace est calculée à chaque échantillon en utilisant une fenêtre glissante. La longueur de cette fenêtre est généralement un multiple entier d'une demi-période. L'utilisation de fenêtres plus courtes ou dont la longueur n'est pas un multiple d'une demi-période peut entraîner des oscillations dans l'amplitude estimée

Pour une fenêtre glissante de longueur KT_0, avec k : un nombre rationnel positif ; la valeur efficace du signal $x(t)$ se détermine de la manière suivante :

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

L'amplitude supposée du signal de nature sinusoïdale est alors proportionnelle à sa valeur efficace estimée :

$$A_{x(t)} = \sqrt{2}\, x_{eff}(t) \qquad \text{(I .2)}$$

La méthode d'estimation de l'amplitude par la valeur efficace est généralement employée dans les outils de mesure en raison de sa simplicité et de sa fiabilité, surtout pour des signaux purement sinusoïdaux. Toutefois, sa performance peut être affectée lorsque des harmoniques ou du bruit sont présents, qui générant des erreurs dans l'amplitude estimée. Il est également à noter qu'elle ne rend pas correctement compte des variations soudaines de l'amplitude, fréquentes des perturbations causées par les courts-circuits.

Si l'estimation de l'amplitude du signal est effectuée sur une fenêtre mobile d'une période, un changement instantané de l'amplitude réelle du signal se manifeste par une transition d'une période vers la valeur efficace estimée. En employant une demi-période comme longueur de fenêtre, les changements soudains de l'amplitude réelle sont mieux captés, cependant, l'amplitude estimée montre des fluctuations significatives [4].

- **Signal analytique :**

Le signal analytique sert à identifier l'amplitude, la phase et la fréquence à un instant donné d'un signal sinusoïdal en fonction du temps. Le signal analytique d'un signal $x(t)$ est défini comme un signal à valeurs complexes dans lequel la partie réelle est $x(t)$, et la partie imaginaire est la transformée de Hilbert de $x(t)$:

$$x_a(t) = x(t) + j \times hilbert(x(t)) \qquad \text{(I .3)}$$

La transformer de Hilbert du signal $x(t)$ égale le même signal déphasé de $\pi/2$, ou un signal en quadrature. Donc, la transformée de Hilbert d'un 'cos' est un 'sin'.

L'analyse du signal sinusoïdal $x(t) = A(t).cos(\omega t + \varphi)$ produit un signal analytique sous forme d'exponentielle complexe ayant la même fréquence, amplitude et phase :

$$x(t) = A(t)e^{j(wt+\varphi)} \quad \text{(I .4)}$$

La valeur absolue d'un signal analytique fournit une estimation de l'amplitude instantanée du signal :

$$A(t) = |x_a(t)| \quad \text{(I .5)}$$

Le signal analytique donner l'avantage de la détectassions instantanément les perturbations au niveau d'amplitude et d'estimer avec une meilleure précision par rapport aux autres techniques d'estimation d'amplitude. L'amplitude estimée par le signal analytique peut présenter un caractère bruité non négligeable.

Cette méthode est efficace en cas de perturbations de très brève durée (inférieure à deux périodes fondamentaux). Effectivement, les autres techniques d'estimation ne détectent pas ces perturbations ou n'estiment pas correctement l'amplitude et la durée en tenant compte des fenêtres glissantes employées.

- **Composante fondamentale :**

On peut aussi estimer l'amplitude d'un signal par la composante fondamentale qui définit par :

$$x_{fond}(t) = \frac{2}{T_0}\left|\int_{t-\frac{T_0}{2}}^{t+\frac{T_0}{2}} x(\tau)e^{-j\frac{2\pi}{T}\tau}\,d\tau\right| \quad \text{(I .6)}$$

Cette méthode définie l'avantage pour estimer l'amplitude du signal correctement et sans oscillations, le même en la présence du perturbations harmoniques. Les changements instantanés dans l'amplitude du signal sont décrits par des transitions d'une période dans l'amplitude du signal spécifiée par le composant fondamentale, de la même manière que la méthode basée sur la valeur efficace [12].

- **Segmentation :**

Pour étudier une perturbation, il est nécessaire de l'identifier et de l'isoler. Ce processus qui consiste à décomposer les signaux collectés en segments stables ou faiblement variables s'appelle ‘’segmentation‘’. Les difficultés liées à la segmentation sont généralement connues dans des secteurs tels que le traitement du signal et le traitement d'image, et sont fréquemment mises en œuvre dans les applications de diagnostic des défauts.

Les techniques de segmentation peuvent être appliquées dans le domaine temporel, dans le domaine fréquentiel ou être basées sur un modèle du signal.

Dans le domaine temporel, les techniques de segmentation emploient les méthodes de la décision statistique comme les tests d'hypothèses séquentiels pour identifier les variations dans les paramètres du signal.

On appliquera les algorithmes de segmentation à l'amplitude du signal capté. Nous choisirons ici pour la composante fondamentale ou la valeur efficace, puisque ces deux méthodes ajoutent que peu de bruit à l'amplitude du signal estimé, diminuant ainsi le risque de détections non-exactes et d'erreurs de segmentation.

En domaine fréquentiel, on applique des algorithmes de segmentation aux formes d'onde captées. L'analyse des variations dans le spectre du signal permet de détecter le début et la fin de la perturbation. Effectivement, les perturbations se définissent par des variations dans l'amplitude et la phase des composants spectrales du signal, et peuvent aussi engendrer de nouveaux éléments spectraux.

Les méthodes de segmentation basées sur des modèles détectent les variations en comparant le signal détecté avec les modèles de signal préétablis par l'utilisateur. Leur principal désavantage est dû fait que leurs performances sont directement liées à la fiabilité du modèle employé [13].

- **Méthode des 6 tensions :**

C'est un processus qui vise à normaliser les tensions composées et à mettre en parallèle leurs amplitudes estimées par la composante symétrique avec celles des trois tensions simples (c'est-à-dire, comparer l'amplitude des trois tensions simples et celle des trois tensions composées normalisées). La phase présentant l'amplitude la plus faible est celle où la baisse de tension est la plus significative. Cette méthode est mise en œuvre à partir de l'algorithme proposé en définissant deux seuils. Le premier permet d'identifier les creux de tension équilibrés et non équilibrés, tandis que le second détermine la présence ou non d'un creux de tension triphasé.

- **Méthode des composantes symétriques :**

Dans La méthode des composantes symétriques en détermine le type de creux de tension avec une étude en le plan complexe des tensions directe et inverse. On suppose que les impédances directe et inverse sont identiques et la tension homopolaire est supposée nulle,

puisque l'objectif de cette méthode est de détermine la propagation et la conséquence des creux de tension sur les charges et n'identifier pas un creux de tension à partir des formes d'ondes captées. Ou, la composante homopolaire s'annule dans la plupart des transformateurs et aux bornes des charges qui sont connectées en triangle ou en étoile n'est pas relié à la terre.

Comme cette technique examine les creux de tension tels qu'ils sont supportés par les charges, elle est développée et applicable uniquement pour les creux de tension de type défaut triphasé, défauts biphasés entre phases et défauts biphasés entre phases [14].

I.3.2 Méthodes d'analyse des harmoniques et des déséquilibres

L'étude des signaux non sinusoïdaux et déséquilibrés se base sur deux principes mathématiques, à savoir les harmoniques et les composantes symétriques. Ces concepts simplifient la décomposition des signaux électriques affectés (non sinusoïdaux et déséquilibrés) en éléments idéaux et déformés.

- **Les harmoniques :**

Joseph Fourier a introduit la notion d'harmonique au début du $XIX^{éme}$ siècle, prouvant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être exprimé comme une série ou somme de sinusoïdes de fréquences distinctes. La composante continue est considérée comme la composante zéro de la série de Fourier, tandis que la première composante est nommée par composante fondamentale. Pour les systèmes connectés au réseau, il s'agit d'un élément à la fréquence nominale du réseau ($50\ Hz$). Les autres éléments de la série sont connus sous le nom d'harmoniques et constituent des multiples de la fréquence fondamentale.

- **Série de Fourier :**

Pour l'analyse des signaux périodiques, les séries de Fourier constituent un mécanisme favorisé, Toute fonction périodique peut être représentée comme une somme de fonctions élémentaires périodiques.

Un signal périodique $x(t)$ avec une période fondamentale T_0 peut, si les conditions de Dirichlet sont intégrées ($x(t)$ est borné, continuellement segmenté et monotone sur des segments), être décomposé en une série convergente qui prend la forme suivante :

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k\, cos(K\omega_0) - b_k sin\,(k\omega_0 t)] \qquad \text{(I .7)}$$

Où $\omega_0 = 2\pi/T_0$: est la pulsation fondamentale du signal.

On définit également la fréquence fondamentale du signal par $f_0 = 1/T_0$.

Il est également possible de représenter ce signal par une série de signaux exponentiels complexes :

$$\mathrm{X(t)} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k = \sum_{k=-\infty}^{\infty} < x >_k . e^{jk\omega_0 t} \qquad \text{(I .8)}$$

Où $x_k =< x >_k . e^{jk\omega_0 t}$ est l'harmonique de rang k, de fréquence $k.f_0$ et d'amplitude complexe.

Et $< x >_k = |x_k| e^{j\angle xk}$ Obtenue par l'équation : (I .9)

$$< x >_k = \frac{1}{T_0} \int_{(T_0)} x(t) e^{-jkwt}\, dt \qquad \text{(I .9)}$$

Pour les signaux à valeurs réelles, les coefficients x_k respectent la propriété suivante : $x_{-k} = \bar{x}_k$ où $\bar{x}_k$ est le complexe conjugué de x_{-k}. Cela démontre que pour ces types de signaux, les harmoniques à fréquence positive ($k > 0$) possèdent même formation à celle des harmoniques à fréquence négative ($k < 0$) et sont suffisantes pour caractériser intégralement le signal analysé. Cette caractéristique n'est plus valide pour les signaux ayant des valeurs complexes [13].

- **Transformée de Fourier :**

Sous certaines conditions, les signaux non périodiques peuvent également être décomposés en une somme d'exponentielles complexes :

$$\mathrm{X(t)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \qquad \text{(I .10)}$$

Où $\mathrm{X}\,(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt$

Aussi les conditions suffisantes pour l'existence de la transformée de Fourier 'conditions de Dirichlet', et elles s'expriment comme suit :

- Le signal est de module intégrable $\left(\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty\right)$.

- $x(t)$ dispose d'un nombre fini de discontinuités sur chaque intervalle fini.

- $x(t)$ possède un nombre fini de maxima et de minima sur tout intervalle fini.

- **Caractérisation :**

Le taux de distorsion harmonique (THD) est le plus employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal périodique :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_{eff}} \tag{I .11}$$

Où V_{eff} est la valeur efficace du signal analysé, et V_{eff} est son harmonique de rang k.

- **Les déséquilibres :**

Le moyen principal pour étudier le déséquilibre est Les composantes de Fortescue ou les composantes symétriques. Le déséquilibre est déterminé par le facteur de déséquilibre :

$$V_u = \left|\frac{V_a + a^2 V_b + a V_c}{V_a + a V_b + a^2 V_c}\right| \times 100\% \tag{I .12}$$

Où V_u est le facteur du déséquilibre entre (phase-neutre), ou (phase-terre).

V_a, V_b, V_c sont les fondamentaux sous la forme complexe, ou les phases des trois grandeurs simples. Ces derniers sont évalués en utilisant la transformée de Fourier discrète sur les trois formes d'onde détectées.

V_u peut également défini comme le rapport entre la composante inverse et la composante directe du système triphasé :

$$V_u = \left|\frac{V_i}{V_d}\right| \times 100\% \tag{I .13}$$

En cas de mesures entre phases, le facteur de déséquilibre prend alors la forme :

$$V_u = \left|\frac{V_{ab} - a V_{bc}}{V_{ab} - a^2 V_{bc}}\right| \times 100\% \tag{I .14}$$

Où V_{ab}, V_{bc} sont les principes fondamentaux présentés sous forme complexe ou décomposée des grandeurs correspondantes [12].

I.3.3 Méthode d'analyse des variations de tension et de fréquence

Les signaux électriques, dans lesquels la fréquence et l'amplitude varient avec le temps, sont caractérisés comme des signaux non stationnaires. Pour étudier ces fluctuations, on peut donc recourir à des outils classiques d'analyse temps-fréquence tels que le spectrogramme ou la transformée de Wigner-Ville. Ces instruments offrent une localisation et une représentation à

la fois dans le domaine temporel et fréquentiel du signal. Ce graphique en deux dimensions présente généralement le temps sur l'axe des abscisses et la fréquence sur l'axe des ordonnées, tandis que la puissance du signal est illustrée par des couleurs ou des nuances de gris.

- **Représentation statistique :**

Les fluctuations des paramètres électriques sont généralement aléatoires et, par conséquent, elles peuvent être traitées et étudiées comme des variables aléatoires. Comme nous le démontrerons, diverses grandeurs mathématiques ont été établies pour examiner et décrire les variables aléatoires [4].

- **Fonction de répartition, densité de probabilité et histogramme :**

La caractérisation complète d'une variable aléatoire X peut être obtenue via sa fonction de distribution F_x, qui est définie comme la probabilité que X soit inférieure ou égale à une valeur réelle x :

$$F_x = Prob(\mathrm{X} \leq x) \qquad \text{(I .15)}$$

Cette fonction de répartition découle directement la définition de la densité de probabilité $P_x$de la variable aléatoire X :

$$P_x(\mathrm{x}) = \mathrm{prob}\ (\mathrm{x} < X < x + dx) = \frac{dF_X(x)}{dx} \qquad \text{(I .16)}$$

Avec :P_x : est à valeurs positives ou nulles sur P.

Vérifie la relation : $\int P_x(x)dx = 1$.

Les deux paramètres mentionnés précédemment que toute l'information disponible sur la variable aléatoire X, et sont en mesure de la caractériser avec précision. Il est donc très important de chercher une estimation simple. Une méthode facile pour évaluer la densité de probabilité P_x d'une variable aléatoire consiste à calculer son histogramme et à le normaliser afin que son intégrale soit '1'. Il découle ainsi directement un estimateur de la fonction de répartition F_x en effectuant des sommes cumulées (ou une intégration numérique) de cet histogramme normalisé.

Il est donc assuré de définir totalement une variable aléatoire grâce à son histogramme, bien qu'il soit indispensable de conserver les données numériques sous format vectoriel.

- **Moments statistiques, espérance, variance et écart type :**

Il est parfois préférable d'utiliser des grandeurs scalaires pour mettre en évidence certaines caractéristiques spécifiques des variables aléatoires : les moments statistiques. La définition du moment d'ordre n d'une variable aléatoire X est donnée par :

$$E(X^n) = \int x^n p_x(x) dx \tag{I .17}$$

On noter que cette intégrale devient une somme discrète dans le cas d'une variable aléatoire discrète.

Les moments les plus utilisés sont ceux d'ordre 1 et 2, surtout en le de cas gaussien où les moments d'ordre supérieur à 2 n'apportent aucune information supplémentaire. La valeur moyenne de la variable aléatoire analysée est caractérisée par son moment d'ordre 1, obtenu en prenant $n = 1$ dans l'équation.

Pour caractériser ses variations ou sa dispersion autour de la valeur moyenne, on utiliser un moment d'ordre 2 particulier la variance. Celle-ci est la valeur moyenne des carrés des écarts à la moyenne, où le moment d'ordre 2 auquel on a enlevé la contribution de la moyenne :

$$Var(x) = E[(X - E(X)] = E(X^2) - E^2(X) \tag{I .18}$$

Pour caractériser les variations de manière homogène à une amplitude, nous introduisons le concept d'écart-type, qui est la racine carrée de la variance :

$$\sigma_X = \sqrt{Var(X)} \tag{I .19}$$

L'estimation des grandeurs précédentes, appelés moyenne et variance empirique, sont donnés par les équations suivantes en le cas de N réalisations $x_i (i = 1, \dots, n)$ d'une variable aléatoire X [9].

Moyenne empirique :

$$\mu_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \tag{I .20}$$

Variance empirique :

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu_X)^2 \tag{I .21}$$

I.4 Revue des outils et technologies disponibles pour l'acquisition de données et l'analyse des signaux électriques

L'utilisation de divers outils et technologies peut significativement optimiser l'acquisition et l'analyse des données de signaux électriques dans les applications en temps réel. Ces avancées contribuent non seulement à l'efficacité, mais permettent aussi une supervision et des diagnostics plus exacts.

I.4.1 Techniques de Réseau de Neurones Artificiels

Le Réseau de Neurones est un outil puissant employé dans divers secteurs, dont la détection des défauts sur les réseaux électriques. Il s'appuie sur des modèles mathématiques inspirés des réseaux biologiques de neurones. La méthode RNA a la capacité de traiter des données complexes et d'apprendre à identifier les schémas et les anomalies. C'est un système adaptatif dont la configuration se modifie en fonction de l'étape d'apprentissage et qui répond aux nouveaux événements de manière optimale sur la base des expériences collectées lors de l'entraînement.

La technique RNA peut être utilisée pour analyser des données de mesure comme la tension, le courant et la fréquence, dans le but d'identifier les irrégularités qui pourraient signaler un problème dans le réseau. Grâce à une formation basée sur un jeu de données incluant des exemples de défauts identifiés et de conditions standards, le RNA a la capacité d'appréhender les motifs distinctifs des déformations électriques et de les identifier avec précision [15].

I.4.2 Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques, basés sur les principes de la sélection naturelle suggérés par Darwin et la génétique évolutive, sont des méthodes d'optimisation stochastiques permettant de rechercher un optimum global. Ils font évoluer une population de gènes en exploitant ces mécanismes. Cependant, comparativement à d'autres techniques avancées dans les domaines électriques, leur utilisation reste relativement limitée [11].

I.4.3 Logique floue

Pour prendre une décision, l'être humain s'appuie sur un processus de réflexion qui fusionne les expériences passées conservées en mémoire et les données externes recueillies dans son environnement. Cette réflexion s'appuie généralement sur un raisonnement empirique où l'analogie et l'intuition occupent une place prépondérante. Nous ne pourrons évaluer certaines quantités que de manière approximative ou floue grâce à nos sens et notre discernement : par exemple, nous percevons la température extérieure comme très haute ou très basse, ou dans un

certain secteur, sans être en mesure d'attribuer précisément une valeur spécifique à cette température.

La logique floue fait référence à l'imprécision lexicale des expressions, ce qui la rend proche de notre mode de pensée.

La théorie de la logique floue est basée sur la théorie des ensembles flous développée par Zadeh en 1965. Ce n'est qu'en 1990 qu'elle a véritablement pris son envol avec l'émergence de produits et de systèmes exploitant cette méthode. Elle trouve son application dans de nombreux usages (destinés au grand public), particulièrement au Japon. La mise en place est désormais simplifiée grâce à la disponibilité de composants spécialisés et d'outils de développement performants.

Les systèmes de logique floue sont particulièrement disposés à résoudre divers problèmes décisionnels, surtout lorsque le modèle analytique est inconnu ou extrêmement complexe (c'est-à-dire non linéaire) [7].

I.4.4 Filtre de Kalman

En 1960, Kalman a proposé le filtre de Kalman en tant qu'alternative au filtre de Wiener. Ce dernier est une technique d'assimilation de données basée sur un modèle d'état linéaire. Son approche vise à rectifier la trajectoire du modèle en fusionnant les observations avec les données fournies par le modèle, dans l'objectif de réduire l'écart entre l'état réel et l'état estimé. Pour ce faire, il fait appel à une méthode d'optimisation qui prend en compte toutes les observations depuis le moment initial jusqu'à maintenant. Le filtre de Kalman est un observateur itératif qui se base sur diverses suppositions, en particulier concernant les bruits. Cela part du principe que les bruits influençant le modèle sont centrés, de type blanc et non corrélés avec les états estimés. Par ailleurs, les bruits de l'état doivent être non corrélés avec bruits de la mesure.

Le filtre produit une réponse à chaque instant qui est exclusivement déterminée par le signal observé à son entrée et sa réponse lors de l'itération précédente. Par conséquent, le filtre de Kalman n'est pas dépendant de l'ensemble des données passées pour fournir une estimation au moment actuel. Cela supprime le besoin de conserver ou de retraiter les données, autorisant l'intégration du filtre de Kalman dans des applications en direct. Il sert à modéliser les systèmes pouvant être décrits par des équations différentielles stochastiques linéaires [15].

I.5 Identification des grandeurs à surveiller (tension, courant, fréquence)

I.5.1 La tension

L'énergie électrique est fournie sous forme d'un ensemble de tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Pour rappel la tension possède quatre caractéristiques principales.

- La fréquence de $50\ Hz$ ou $60\ Hz$, selon le pays.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde devant être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage.

L'amplitude de tension dans un intervalle de l'ordre de 10% valeur nominale ; même si avec une régulation parfaite, il y a plusieurs types de perturbations qui peuvent dégrader la qualité de tension :

-Les coupures brèves et creux de tension.

-Les variations rapides de tension.

-Les surtensions transitoires ou temporaires.

Les problèmes les plus fréquents et les plus difficulté de s'en protéger posent par les deux premières catégories [8],[6],[4].

- **Amplitude :**

L'amplitude de la tension joue un rôle essentiel dans la qualité d'énergie électrique. Généralement, l'amplitude de la tension doit être régulée dans un intervalle de $\pm 10\%$ par rapport à sa valeur nominale.

En situation optimale, les trois tensions possèdent une amplitude identique, qui est une valeur fixe. Néanmoins, plusieurs phénomènes de perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. Selon la variation de l'amplitude, on identifie deux principales catégories de perturbations

- **Les coupures, les creux de tension et surtensions** :

Ces perturbations se définissent par des fluctuations importantes de l'amplitude. Les principales causes de ces problèmes sont les courts-circuits, et ils peuvent provoquer des effets graves sur les matériels électriques.

- **Les variations de tension** :

Ces fluctuations sont définies par des changements dans l'amplitude de la tension qui ne dépassent pas 10% de sa valeur nominale. Ces variations sont généralement liées à des charges variables ou à des changements dans la configuration du réseau [2].

- **Fréquence :**

Dans l'idéal, les trois tensions sont de nature alternative et sinusoïdale, avec une fréquence fixe de 50 ou $60\ Hz$ selon le pays. Les fluctuations de fréquence peuvent résulter des pertes de production significatives, l'isolation d'un groupe sur ses auxiliaires ou son déplacer en réseau séparé, ou encore d'un défaut provoquant une chute de tension, entrainant ainsi une diminution de la charge.

Toutes fois, ces variations restent généralement très faibles (inférieures à 1%) et n'affectent pas le bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques.

Il faut également remarquer que les variations que les variations de fréquence peuvent être bien plus important pour les réseaux autonomes [5].

- **Forme d'onde :**

L'onde des trois tensions qui composent un système triphasé doit idéalement se rapprocher d'une sinusoïde. Si la forme de l'onde subit des perturbations, la tension cesse d'être sinusoïdale et peut généralement être vue comme une onde fondamentale à $50\ Hz$ associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à $50\ Hz$, également appelées harmoniques. Les tensions peuvent aussi inclure des signaux permanents, non périodiques, communément désignés comme bruits [5],[2],[8].

- **Symétrie :**

Dans un système triphasé, la symétrie est caractérisée par l'équivalence des amplitudes de tension et celle de leurs décalages de phase respectifs. On désigne généralement l'asymétrie de ces systèmes par le terme déséquilibre.

La qualité de la tension peut être influencée, soit par des incidents liés aux caractéristiques physiques et aux contraintes liées à l'exploitation du réseau, soit par certains appareils récepteurs. Ces anomalies se révèlent à travers diverses perturbations touchant l'un ou plusieurs des quatre paramètres que nous avons précédemment identifiés. Nous avons donc quatre types distincts de perturbations :

- **Les variations de la fréquence à $50\ Hz$:**

Ces situations sont peu fréquentes et ne se surviennent que dans des conditions exceptionnelles, comme certains problèmes graves du réseau, au moment de la production ou du transport.

- **Les fluctuations de l'amplitude :**

Ce ne sont pas les fluctuations de tension progressives qui sont ajustées par les transformateurs en charge, mais des changements rapides de tension ou des chutes de tension qui se manifestent généralement sous forme de pics soudains. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins fréquents, avec une forme régulière ou non.

- **La modification de forme d'onde de la tension** :

Cette onde n'est donc plus sinusoïdale et peut être considérée comme représentative d'une onde fondamentale de $50\ Hz$, associée soit à des harmoniques de fréquences entières multiples de $50\ Hz$, ou parfois à des ondes de fréquences aléatoires.

- **La dissymétrie du système triphasé :**

Il est également possible de noter un type spécifique de perturbations qui pose des difficultés de classification, car il touche à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les fluctuations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à $10\ ms$.

Pour une analyse précise de la pollution des réseaux électriques basse tension et l'identification des meilleures techniques de dépollution, nous allons identifier deux catégories de perturbations : celles liées au courant et celles concernant la tension.

Ces genres de perturbation ont des conséquences extrêmement nocives sur les appareils électriques. Ces effets peuvent varier de la surchauffe ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction complète de ces appareils [8].

- **Dégradation de la qualité de tension :**

Les perturbations électriques dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

1) Problème dans les installations des clients ou dans les réseaux électriques.

2)Les courts-circuits dans un poste, un câble souterrain, une ligne aérienne.

3) matérielles (vieillissement d'isolants...).

4)Les phénomènes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).

5) humaines (fausses contactes, travaux sur terrain...).

6)Les installations perturbatrices :

- Fours à arc.
- Postes de soudure.
- Les convertisseurs statiques.
- Toutes applications de l'électronique de puissance [6].

I.5.2. Le courant

La qualité du courant est liée à une déviation par rapport à sa forme idéale, et elle se définit de la même façon que les tensions grâce à quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans une situation idéale, les trois courants possèdent une amplitude et une fréquence constantes, déphasés de $2/3\pi$ radians les uns par rapport aux autres, et présentent une forme strictement sinusoïdale.

On n'emploie pas souvent l'expression « qualité du courant », car il dépend étroitement de la qualité de la tension et des caractéristiques des charges [17],[2].

I.6 Conclusion

Ce travail a permis de mettre en évidence les principales déformations affectant les grandeurs électriques dans un réseau local, ainsi que leurs impacts sur la qualité de l'énergie. Grâce à l'analyse des méthodes de détection et de diagnostic, il apparaît essentiel de renforcer la surveillance des réseaux pour anticiper les perturbations, améliorer la fiabilité des installations et garantir un fonctionnement optimal des équipements électriques.

Chapitre II : Définition des Spécifications Techniques

II.1 Introduction

Dans un contexte marqué par l'évolution rapide des systèmes électriques, notamment avec l'intégration croissante des équipements électroniques de puissance et des sources d'énergie renouvelable, la qualité de l'énergie électrique est devenue un enjeu central pour le bon fonctionnement des installations. Les réseaux électriques sont de plus en plus sollicités par des charges non linéaires, génératrices d'harmoniques et de perturbations diverses qui altèrent la forme sinusoïdale des tensions et courants. Ces anomalies, appelées déformations des grandeurs électriques, peuvent avoir des effets immédiats ou à long terme sur les équipements, se traduisant par des dysfonctionnements, des surchauffes, une diminution de la durée de vie des matériels, ou encore une dégradation du facteur de puissance.

Face à ces défis, la surveillance et le diagnostic des anomalies deviennent essentiels pour assurer la stabilité, l'efficacité énergétique et la sécurité des réseaux. Ce travail s'inscrit dans cette perspective en proposant une étude approfondie des méthodes d'analyse du signal — telles que les transformées de Fourier et d'ondelettes — permettant l'identification et l'évaluation des perturbations. Il s'agit également de caractériser les sources de ces anomalies, qu'elles soient permanentes ou transitoires, et de mesurer leur impact sur les équipements électriques.

L'objectif principal est de mettre en place une approche méthodique et fiable de diagnostic afin de mieux comprendre les mécanismes de déformation des grandeurs électriques et de contribuer à la mise en œuvre de stratégies de correction ou de prévention dans un réseau local.

II.2 Application de techniques d'analyse du signal

II.2.1 Techniques de Transformée en ondelettes (T.O)

L'un des instruments les plus puissants employés dans le traitement du signal est la transformée par ondelettes. Elle propose la possibilité d'examiner les signaux à diverses résolutions grâce à la décomposition multi-échelle qu'elle engendre**.**

L'usage de la transformée en ondelettes nécessite l'emploi d'un ensemble de fonctions connues sous le nom « ondelettes », qui sont des oscillations localisées temporellement et ayant une bande passante spécifique en fréquence. Ces ondelettes servent à examiner le signal en le fragmentant en diverses composantes selon différents niveaux, se basant sur l'étude du signal à l'aide de différentes échelles temporelles et

fréquentielles. Jean Morlet, un géophysicien français, est l'auteur de l'introduction du terme « ondelettes ».

Fig.II.9 présente plusieurs exemples d'ondelettes mères. On peut considérer les ondelettes comme une catégorie de fonctions qui simplifient l'identification d'un signal spécifique aussi bien dans le domaine temporel que fréquentiel. Ces ondelettes sont construites à partir d'une ondelette mère, que l'on peut réduire ou déplacer afin de modifier la dimension de la fenêtre.

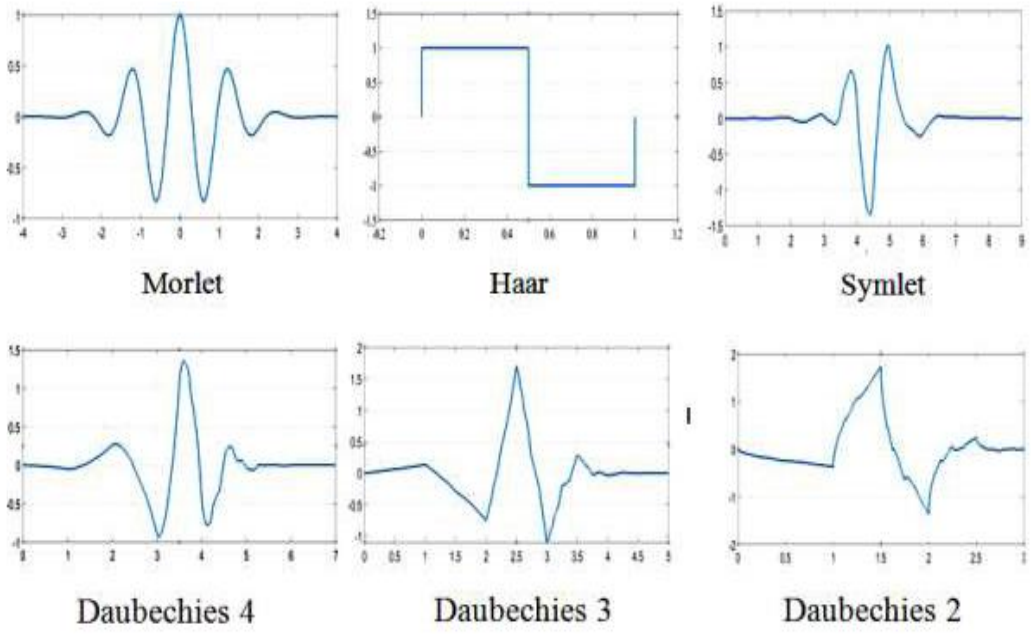


Figure II.1 Exemples d'ondelette mère.

Cela signifie qu'une ondelette déplacée fournit beaucoup plus d'informations temporelles tandis qu'une version étirée de celle-ci analyse les données de fréquence. Les ondelettes s'ajustent automatiquement aux éléments de haute ou de basse fréquence en employant différentes dimensions de fenêtre [15].

II.2.2 Transformée de Fourier

- **Développement en série de Fourier :**

Si $s(t)$ est une fonction périodique de t, avec une période $T_0 = 1/F_0$, elle peut être représentée comme une somme de fonctions sinusoïdales et cosinusoïdales à des fréquences qui sont des multiples de la fréquence fondamentale F_0.

Considérons :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi n F_0 t + b_n \sin 2\pi n F_0 t) \quad \text{(II .1)}$$

Où a_n et $b_n$représentent les coefficients dans la série de Fourier. Ils sont calculés en utilisant les relations suivantes :

$$a_0 = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} s(t)dt = \overline{s(t)} \qquad \text{(II .2)}$$

Avec a_0: la valeur moyenne où la composante continue :

$a_n = \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} s(t)\cos(2\pi n F_0 t)dt$ Pour $n \geq 1$

$b_n = \frac{2}{T_0}\int_0^{T_0} s(t)\sin(2\pi n F_0 t)dt$ Pour $n \geq 1$

En intégrant la notion de représentation complexe, nous sommes en mesure de proposer une formulation plus globale de l'expression de ce développement en série de Fourier :

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s(nF_0)\,.\, e^{j2\pi n F_0 t} \qquad \text{(II .3)}$$

Avec : $s(nF_0) = \frac{1}{2}\,(a_n - j\,.\,b_n) = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} s(t)\,.e^{j2\pi n F_0 t}dt$ pour : $n \geq 1$

Et $s(0) = a_0 = \overline{s(t)}$

L'idée de fréquence négative n'a pas de significatif physique. On peut le considérer comme l'interprétation du sens de rotation de la fréquence angulaire ou pulsation ($\omega 2\pi f$). De ce fait, la fonction réelle $\cos(\omega t)$ ou $\cos(2\pi f t)$ peut être représentée comme l'addition de deux fonctions complexes dans le plan complexe (Fig.II.10) :

$$\cos(\omega t) = \frac{1}{2}\,.\,(e^{j\omega t} + e^{-jwt}) \qquad \text{(II .4)}$$

Ces valeurs négatives de fréquence sont utilisées uniquement pour symétriser la fonction de représentation des fréquences. Pour des signaux réels, nous disposons de $a_{-n} = a_n$ et $b_{-n} = -b_n$

En général, les coefficients du développement $S(nF_0)$ représentent une quantité complexe qui peut être exprimée sous la forme suivante :

$$s(nF_0) = |s(nF_0)|.\, e^{j\varphi n} \qquad \text{(II .5)}$$

Pour : $|s(nF_0)| = \sqrt{{a_n}^2 + {b_n}^2}$ et $\varphi_n = Arctg(-b_n/a_n)$

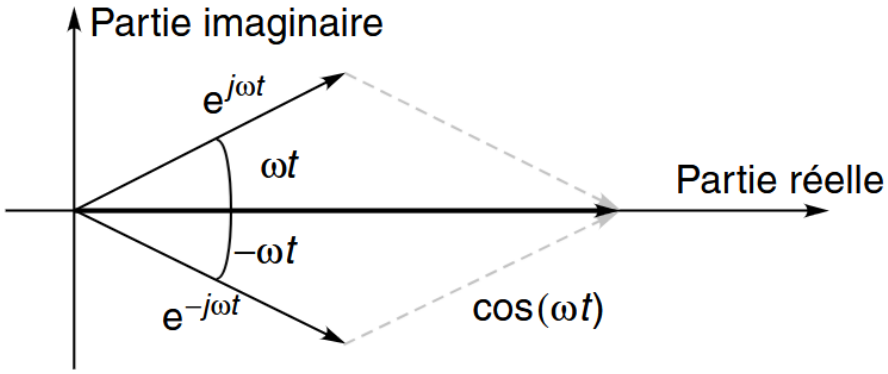


Figure II.2 Introduction des fréquences négatives dans l'expression des signaux.

- **Représentations fréquentielles :**

Les composantes du spectre en fréquence de $s(t)$ sont représentées par les coefficients $s(nF_0)$. En impliquant l'impulsion de Dirac d(x), détaillée en annexes, la représentation fréquentielle du signal se compose de crêtes de Dirac de poids $|s(nF_0)|$ dispersées sur l'ensemble de l'axe des fréquences positives et négatives (voir Fig.II.3). Par convention, chaque ligne est tracée en lui attribuant une hauteur proportionnelle à sa valeur absolue $|s(nF_0)|$. Il convient de préciser que ce spectre $s(f)$ est généralement complexe, constitué d'une composante réelle et d'une composante imaginaire. Il devrait donc être illustré dans un espace tridimensionnel : l'axe des fréquences f, l'axe de la composante imaginaire $Im\{s(f)\}$ et l'axe de la composante réelle $Re\{s(f)\}$.

L'expression du spectre est la suivante :

$$s(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s(nF_0).\delta(f - nF_0) \qquad \text{(II .6)}$$

Avec : $s(nF_0) = \frac{1}{T_0}\int_0^{T_0} s(t).e^{j2\pi nF_0 t}.dt$ pour $n \geq 1$ et $s(0) = \overline{s(t)}$.

La représentation en fréquence $s(f)$ du signal $s(t)$ comprend la composante continue à la fréquence 0, le fondamental à la fréquence F_0 (ou harmonique de pimenter ordre), ainsi que diverses harmoniques aux fréquences $f = n.F_0$. Il faut noter que le spectre d'une fonction périodique, ayant une période, présente une discontinuité et est constitué de bandes dont l'intervalle minimal sur l'axe des fréquences correspond à F_0.

Cette illustration complexe du signal répartit ainsi, dans le domaine des fréquences, les éléments du signal de manière symétrique de chaque côté de l'origine sur l'axe des fréquences : il s'agit de la représentation spectrale bilatérale $s(f)$ (fréquences positives et négatives).

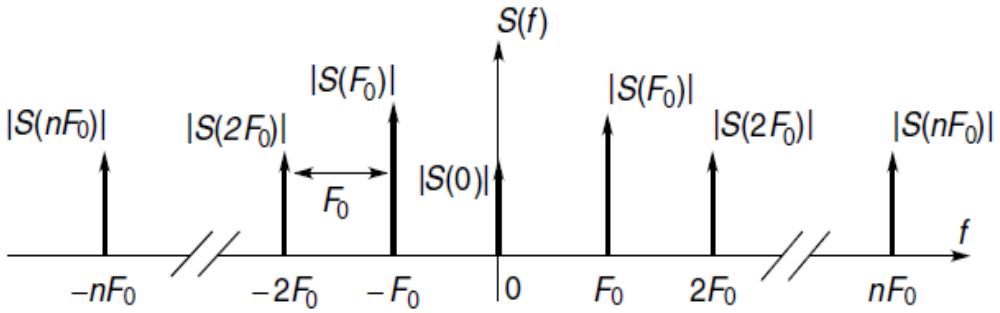


Figure II.3 Représentation fréquentielle bilatérale d'un signal périodique.

Uniquement la représentation unilatérale $s_{reél}(f)$ (spectres comportant uniquement des fréquences positives), dérivée directement des équations 2.1 à 2.4 (série de Fourier), constitue une représentation réelle pouvant être obtenue via des analyseurs de spectres ou des transformateurs de Fourier affichant le module de ce dernier. En se basant sur l'expression initiale 2.1, on peut formuler :

$$\mathrm{S(t)} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \,.\cos(2\pi n F_0 t + \varphi_{n)} \qquad \text{(II .7)}$$

Avec : $c_n = 2\,.\,|s(nF_0)| = 2\,.\sqrt{{a_n}^2 + {b_n}^2}$

Les coefficients c_n illustrent les « amplitudes » des éléments du spectre réel $s_{reél}(f)$ en représentation unilatérale (voir Fig.II.12). Il est très facile de passer d'une représentation à l'autre grâce à la relation suivante :

$$s(f) = k.S_{réel}(f) \qquad \text{(II .8)}$$

Avec :$k = \{2\ si\ f > 0\ ;1\ si\ f = 0\ ;0\ si\ f < 0\}$ [18].

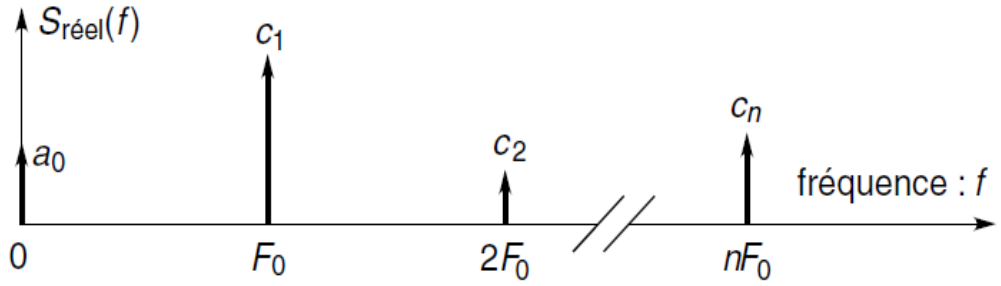


Figure II.4 Représentation fréquentielle unilatérale d'un signal périodique.

- **Analyse spectrale des fonctions non périodiques :**

Un signal analogique $x(t)$ et sa densité spectrale $X(if)$ sont reliés entre eux par les relations :

$$X(if) = \int x(t).e^{-j2\pi ft)}dt \quad \text{(II .9)}$$

$$x(t) = \int x(f).e^{2\pi ft}\,dt \quad \text{(II .10)}$$

Ces transformations discrètes et inverses mettent clairement en lumière la symétrie parfaite qui lie les domaines temporels et fréquentiels, à cette symétrie correspondant la propreté.

II.2.3 Transforme de Fourier Discrète

La version discrète de la transformée de Fourier continue correspond à la transformée de Fourier discrète (TFD). Elle est mise en œuvre lorsqu'il s'agit de déterminer la transformée de Fourier d'une fonction à l'aide d'un calcul numérique [2],[10].

On peut décomposer un signal $x(t)$ en série de Fourier.

$$x(t) = \sum_n x_n \,.\, e^{\left(j2\pi.\frac{1}{T}\right)nt} \quad \text{(II .11)}$$

Avec : $x_n = \frac{1}{T}\int_T \; x(t).e^{-j2\pi t\frac{1}{T}}\,dt$

La transformée de Fourier de $x(t)$ est :

$$X(f) = \int x(t)\; e^{-j2\pi ft}dt \quad \text{(II .11)}$$

Alors : $X_n = \frac{1}{T}\; X[nf]$ donc : $X_n = \frac{1}{T}\; X[n/T]$

On obtient x_n en effectuant l'échantillonnage de $X(f)$ à une fréquence $F = 1/T$.

Ces transformations discrètes et inverses mettent clairement en lumière la symétrie parfaite qui lie les domaines temporels et fréquentiels, à cette symétrie correspondant la propreté [19].

II.2.4 Analyseurs de spectre analogiques

Un voltmètre sélectif, intégrant un filtre passe-bande et un voltmètre à valeur efficace, permet de réaliser une analyse fréquence par fréquence. L'identification des fréquences harmoniques se fait essentiellement de deux manières :

- En utilisant des filtres discrets continus dont la totalité englobe la variété de fréquences prévue (habituellement de $100\ Hz$ à $2000\ Hz$).

- Utilisant un filtre unique à réglage d'accord, dont la fréquence centrale est ajustée à travers la gamme. Cette méthode est restreinte par la durée de balayage, qui

devient significative lorsque l'exigence de résolution est grande. De nos jours, on abandonne ces deux techniques en faveur des systèmes numériques.

II.2.5 Analyseurs numériques

Les performances des analyseurs numériques surpassent largement celles des appareils analogiques antérieurs. Ces appareils sont équipés de microprocesseurs qui effectuent le calcul des harmoniques et exécutent différentes tâches supplémentaires (correction, détections statiques, gestion des mesures, visualisation, communication...).

Ils sont généralement multi-canaux et peuvent générer, à des rythmes soutenus (quasiment temps réel), les décompositions spectrales concurrentes de tensions et de courants en amplitude et en phase.

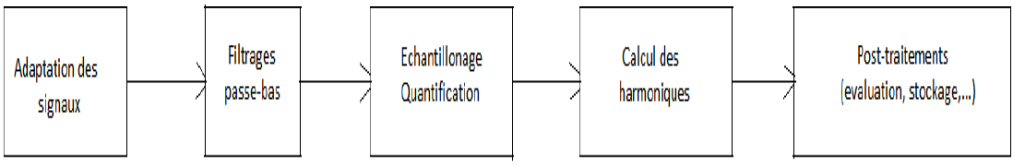


Figure II.5 Principe d'un appareil de mesure numérique.

- **Echantillonnage :**

L'échantillonnage est le processus qui implique d'identifier les valeurs du signal à des moments spécifiques, habituellement à intervalles réguliers. La fréquence d'échantillonnage F_e, égale à l'inverse de T_e, est déterminée par l'intervalle entre les moments d'échantillonnage.

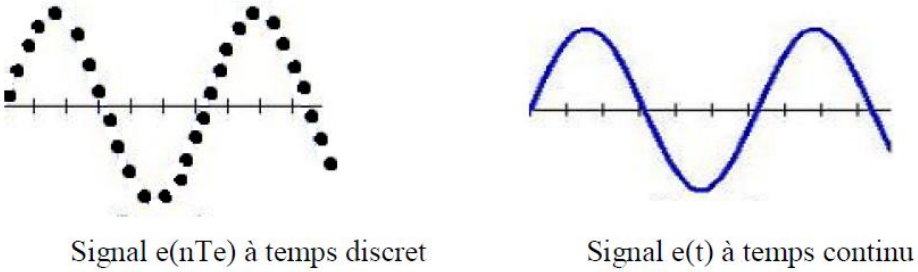


Figure II.6 Fréquence d'échantillonnage.

- **Quantification :**

La quantification se rapporte à l'action de convertir la valeur de chaque échantillon en un nombre entier, où le maximum est déterminé par le nombre de bits du convertisseur (résolution).

Par exemple, un signal codé sur 12 bits sera décrit par une suite de valeurs numériques entières allant de 1 à 4096 (c-à-d 2^12). Les appareils simples utilisent généralement des convertisseurs analogiques-numériques (CAN) dont la plage varie entre 8 et 16 $bits$ pour les instruments les plus précis.

Le pas de quantification se définit comme le quotient de l'amplitude maximale du signal (A_{max}) par le nombre de valeurs possibles (qui est équivalent à 2 puissances nombre de bits). C'est un limiteur supérieur de la précision de l'appareil.

Toute amplitude du signal qui excède A_{max} est tronquée, ce qui entraîne une détérioration de l'information due à un dépassement de capacité.

- **Multiplexage :**

L'échantillonnage séquentiel (multiplexé) ou l'échantillonnage par bloc sont utilisés pour le prélèvement de plusieurs signaux de mesure.

Le multiplexage échantillonné extrait de manière séquentielle une valeur à partir des signaux présents sur chaque voie. Les divers signaux ne sont pas donc échantillonnés au même moment, mais avec un décalage temporel de T_e/n, où T_e indique la période d'échantillonnage et n symbolise le nombre de voies mesurées échantillonnées.

Cette faute, capable d'influer sur les calculs impliquant la phase des signaux (puissance, phase des harmoniques), est permanente et identifiée. Par conséquent, elle peut être rectifiée au niveau du logiciel de calcul en se basant sur une estimation de la fluctuation du signal.

La méthode de l'échantillonnage-blocage se base sur la captation conjointe d'une valeur du signal sur chaque voie (charge de capacités alternées). Par la suite, on effectue un échantillonnage séquentiel de ces valeurs bloquées. Dans ce cas, la numérisation des signaux étant synchrone, aucun décalage de phase n'est introduit [10].

II.3 Diagnostic des Sources de Déformations

- **Identification des causes des perturbations :**

Les perturbations de la qualité de l'alimentation sont principalement causées par divers facteurs, notamment les charges non linéaires, les défaillances du système et les dysfonctionnements de l'équipement. Ces perturbations peuvent entraîner des problèmes opérationnels importants dans les systèmes électriques, nécessitant des stratégies d'identification et d'atténuation efficaces. Les sections suivantes décrivent les principales causes de ces perturbations.

II.3.1 Les charges non linéaires

Les charges non linéaires sont en constante augmentation. On estime qu'au cours des dix prochaines années, plus de 60 % des charges des réseaux électriques seront non linéaires. Par ailleurs, une grande partie de la croissance des charges électroniques concerne le secteur résidentiel et les appareils électroménagers.

Les préoccupations liées aux harmoniques découlent du respect d'une certaine qualité de l'énergie, ce qui soulève des questions connexes telles que les effets sur le fonctionnement des équipements électriques, l'analyse des harmoniques et le contrôle des harmoniques. Un nombre croissant de charges de consommation sont sensibles à une mauvaise qualité de l'énergie, et on estime que les problèmes de qualité de l'énergie coûtent à l'industrie américaine des dizaines de milliards de dollars par an. Bien que l'utilisation croissante d'équipements d'automatisation grand public et d'électronique de puissance entraîne une augmentation de la productivité, ces charges lourdes sont une source de bruit électrique et d'harmoniques et sont moins tolérantes à une mauvaise qualité de l'énergie. Par exemple, les variateurs de vitesse (VGA) sont moins tolérants aux creux et aux pics de tension qu'un moteur à induction ; et une chute de tension de 10 % d'une certaine durée peut précipiter l'arrêt du dispositif de sécurité antiparasitaire. Ces dispositifs génèrent des harmoniques de ligne, et une source contenant des harmoniques affecte leur fonctionnement, entraînant une génération supplémentaire d'harmoniques. Cela implique que les charges non linéaires, source de génération d'harmoniques, sont elles-mêmes relativement moins tolérantes à la mauvaise qualité de l'énergie résultant de l'émission d'harmoniques par ces charges.

Voici quelques exemples de charges non linéaires :

* ASD system.
* Cyclo convertisseurs.
* Fours à arc.
* Laminoirs.
* Alimentations à découpage.
* Ordinateurs, photocopieurs, téléviseurs et appareils électroménagers.
*Modulation par impulsions en rafale.
* Compensateurs statiques de tension (SVC).
* Réacteurs à thyristors (RCT).
* Transmission CCHT, les harmoniques proviennent des convertisseurs.
* Traction électrique, circuits hacheurs.

* Production d'énergie éolienne et solaire.

*Charge de batteries et piles à combustible.

* Schémas de récupération de fréquence de glissement des moteurs à induction.

* Éclairage fluorescent et ballasts électroniques.

*Systèmes de charge de véhicules électriques.

* Chauffage par redresseur commandé au silicium (SCR), chauffage par induction et soudage à l'arc [20].

II.3.2 Origines des harmoniques

L'usage évoluant des appareils électriques équipés de convertisseurs statiques a conduit ces dernières années à une augmentation significative du niveau de pollution harmonique sur le réseau électrique. Ces dispositifs sont qualifiés de charges non linéaires, générant des courants harmoniques dont les fréquences correspondent aux multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences arbitraires. Le passage de ces courants harmoniques à travers les impédances du réseau électrique peut provoquer des tensions harmoniques au point de connexion, entraînant ainsi une pollution pour les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. On observe la présence de charges non linéaires dans divers secteurs industriels :

a) De type secondaire :

- Les convertisseurs d'électronique de puissance tels que redresseurs, onduleur, gradateurs.

- Les fours à induction, variateurs de vitesse.

b) De type tertiaire :

- L'évolution de l'informatique et des systèmes de climatisation.

- Les équipements pour la production, le transport et la distribution.

- L'éclairage dans les espaces de travail.

c) Domestique :

Les équipements domestiques possèdent des éléments électroniques qui favorisent l'augmentation des courants harmoniques, notamment de par leur utilisation fréquente et leur présence sur une longue durée (téléviseurs, électroménagers en abondance) [21].

II.3.3 Sources principales des perturbations

- **Sources permanentes (fréquence fixe) :**

- Emetteurs radio.

- Radars.
- Bruits des moteurs électriques.
- Communications fixes et mobiles.
- Ordinateurs, écrans, imprimantes.
- Redresseurs etc...

- **Sources permanentes à large bande de fréquence :**

- Systèmes électroniques.
- Microprocesseurs.

- **Sources transitoires (large de bande de fréquence) :**

- La foudre.
- Impulsion nucléaire d'origine orageuse (NEMP : Nuclear Electromagnetic Pulse).
- Défauts dans les lignes d'énergie.
- Interruption de courant (disjoncteurs).
- Décharge électrostatique etc…

II.3.4 Surtensions et chocs de foudre

Il s'agit de perturbations impulsionnelles d'amplitude élevée. Dans le cas d'un impact de foudre, leur provenance peut être naturelle, ou industrielle lors de l'interruption des circuits inductifs ou de l'actionnement des dispositifs de connexion en haute tension.

- Dans le cas des surtensions de manœuvre, les conséquences sont peu nombreuses pour le matériel d'électrotechnique, mais elles peuvent entrainer la destruction du matériel électronique si celui-ci n'est pas protégé [22].

II.4 Évaluation de l'impact des anomalies sur les équipements et la stabilité du réseau

II.4.1 Effet des harmoniques

Lorsque les courants harmoniques passent à travers l'impédance interne des générateurs, ils produisent (selon la loi d'Ohm) des tensions harmoniques qui se superposent ou se déduire par rapport aux tensions fondamentales générées par le réseau d'alimentation du fournisseur d'énergie électrique. Par conséquent, la tension résultante n'est plus sinusoïdale et affecte tous les autres récepteurs du réseau, entraînant les effets suivants :

✓ Augmentation des pertes par effet Joule et effet de peau ainsi que les pertes supplémentaires pour les fréquences élevées, [effet instantané].

✓ L'énergie Augmentation de la facturation d'électrique.

✓ Dégradation du facteur de puissance de l'équipement.

✓ Vieillissement prématuré des équipements électriques (exemple : câble de neutre), [effet à long terme].

✓ Dysfonctionnements fréquents.

✓ Élimination de certains équipements. (Condensateurs par exemple).

Cette pollution, néfaste pour le fonctionnement optimal de tous les récepteurs connectés sur ce réseau de distribution électrique ont conduit les producteurs et distributeurs d'énergie électrique à prendre en compte sérieusement ces contraintes en vue de trouver des réponses pour une meilleure qualité de réseau électrique et de lutter (combattre) contre :

* les effets instantanés.

* les effets à terme [2].

1) Effets instantanés des harmoniques : qui concernent les pertes par effet Joule, les déclenchements intempestifs de disjoncteurs (exemple : magnéto thermique) et de relais, ou encore la perturbation des dispositifs de régulation et des équipements informatiques.

- **Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques** :

Lorsqu'il y a des harmoniques, la tension et le courant peuvent inverser leur signe plusieurs fois durant une demi-période. Les appareils qui fonctionnent sur la base de la détection du passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être touchés.

- **Trouble fonctionnel des micro-ordinateurs** :

Ces appareils peuvent subir des chocs qui se manifestent par une dégradation de la qualité de l'image et des mouvements pulsés des moteurs qui font tourner le disque.

- **Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électriques**

Certains instruments de mesure et compteurs d'énergie à induction montrent des dégradations dans leurs mesures et des erreurs de lecture supplémentaires lorsqu'ils sont confrontés aux harmoniques.

- **Vibrations et bruits** :

Les courants harmoniques génèrent aussi des vibrations et des sons électriques, en particulier dans les appareils électromagnétiques.

2) Effets à terme des harmoniques : qui provoquent des surchauffes dans les condensateurs et les conducteurs, entraînent un vieillissement anticipé de l'équipement ou encore des augmentations de température causées par des pertes additionnelles dans les machines et les transformateurs.

- **Echauffement des câbles et des équipements**

Ces effets peuvent être temporaires (allant de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à plusieurs années). Pour ce qui est des câbles qui pourraient être touchés par une surchauffe du neutre et des éléments bobinés (transformateurs, moteurs, etc…).

- **Echauffement des condensateurs**

L'hystérésis présente dans le diélectrique est à l'origine de la perte de chaleur. Par conséquent, les condensateurs peuvent être affectés par des surcharges, qu'elles proviennent d'une tension fondamentale excessive ou de la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent entraîner une déchirure musculaire.

- **Echauffements des pertes supplémentaires**

Les échauffements provoqués par les pertes dans les stators des machines, notamment dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétisants), sont principalement dus aux divergences substantielles de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques créent également des pertes additionnelles dans les transformateurs, via l'effet Joule dans les bobinages, qui sont amplifiés par l'effet de peau ainsi que les pertes dues à l'hystérésis et au courant de Foucault dans les circuits magnétiques [11].

II.4.2 Effet des creux de tension

- **Moteur asynchrone**

Pour les moteurs asynchrones, une chute de tension pose aussi un problème de stabilité, qui se manifeste par un déséquilibre des couples (couple du moteur égal au couple résistant).

  - Ralentissement du moteur.
  - Suspension du fonctionnement du moteur.
  - Déclenchements des protections générales de l’installation.

- **Machines à vitesse variable**
  - Insuffisance de tension (diminution du couple, ralentissement) pour le moteur.

- Panne des circuits de commande qui sont directement alimentés par le réseau.
- Surintensité au retour de la tension.

- **Eclairage :**
  - Vieillissement des lampes à incandescence et des tubes fluorescents.
  - Élimination des lampes à décharge.

Types d'appareils	**Effet néfastes**
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et ré allumage (lampes à arc).
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt de dispositif.
Dispositifs de protection	Ouverture de contacteur
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension.
Moteurs synchrones	Pertes de synchronismes, décrochage et arrêt de moteur.
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continue	*On mode onduleur : destruction des protections *On mode redresseur : ralentissement de la machine
Variateurs de vitesse pour un moteur synchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matérielle au niveau de convertisseur.

Tableau II.1 : Effets des creux de tension sur quelques équipements électriques.

II.4.3 Effets des surtensions

Les effets de surtensions les plus importantes sont :

- Claquage diélectrique, responsable de la défaillance des équipements précis (composant électronique).
- Coupure longue entraînée par la destruction d'équipement.

- Perturbations dans les circuits de contrôle, commande et de communication.
- Arrêt ou démarrage non maîtrisé.

II.4.4 Effets du déséquilibre

Il est plus intéressant de considérer le problème du déséquilibre par type d'équipement.

Le déséquilibre dans une installation triphasée peut provoquer un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés :

- Un dysfonctionnement d'un équipement monophasé alimenté par une tension très faible (ampoule à incandescence fournissant un éclairage de mauvaise qualité).
- Élimination d'un appareil monophasé alimenté par une tension excessive, qui peut être détruit (par exemple, rupture d'un filament de lampe due à une surtension).
- En ce qui concerne les appareils triphasés d'électronique de puissance, tels que les ponts redresseurs, leur fonctionnement en situation de déséquilibre provoque la génération d'harmoniques de multiples de 3.
- Les composants inverses sur les machines tournantes génèrent un champ tournant en direction opposée au sens de rotation normal, ce qui entraîne un couple de freinage indésirable et des pertes additionnelles provoquant la surchauffe de l'appareil.
- En ce qui concerne l'impact de l'asymétrie homopolaire, il est important de mentionner le danger d'une surchauffe du conducteur neutre [23].

II.5 Conclusion

Ce travail a permis de mettre en évidence l'importance de la surveillance et du diagnostic des déformations électriques dans les réseaux locaux. Grâce à l'utilisation d'outils d'analyse du signal comme la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes, il est possible d'identifier avec précision les perturbations et d'en évaluer les effets. Ces résultats contribuent à améliorer la qualité de l'énergie et la fiabilité des installations électriques.

Chapitre III : Simulation et Résultats

III.1 Introduction

III.1.1 Contexte

Dans un réseau électrique local, la surveillance des grandeurs telles que la tension et le courant est essentielle pour garantir la qualité de l'énergie, la stabilité du réseau et la sécurité des équipements. Le système étudié dans ce chapitre est une partie de chaîne photovoltaïque composée de 40 panneaux solaires d'une puissance totale d'environ 15 kW, d'onduleurs monophasés interconnectés délivrant une tension efficace de 230 V, et d'une charge non linéaire combinant un redresseur - source d'harmoniques de courant - et un moteur à courant continu d'une puissance de 5 ch.

III.1.2 Problématique

Les charges non linéaires (comme le redresseur) injectent des courants harmoniques dans le réseau, ce qui dégradent la qualité de la tension (augmentation du THD) et perturbent le fonctionnement du moteur DC et des autres récepteurs.

III.1.3 Objectifs de la simulation

Cette étude vise à :

- Analyser en ligne les déformations du courant dues à la charge non linéaire par la mesurer le taux de distorsion harmonique (THD) et par l'identifier les harmoniques dominants (e.g., 3^{e}, 5^{e}, 7^{e}…).
- Extraire un signal complémentaire pour la compensation par construire un signal représentant uniquement les harmoniques (courant absorbé sans la fondamentale) qui servira de référence pour un filtre actif chargé de compenser les harmoniques et réduire le THD.

III.2 Approche proposée

Pour modéliser un signal de courant riche en harmoniques, on a utilisé la simulation sous MATLAB/Simulink pour créer une charge non linéaire (redresseur + moteur DC). Le redresseur est monophasé à double alternance commandé par des thyristors jouant sur l'angle α de la commande des gâchettes afin de varier la vitesse du moteur DC, provoquant une variation dans le signal du courant et ses harmoniques, ce qui implique une variation du THD. L'objectif est de tester la possibilité de suivre les harmoniques en ligne, de calculer le THD instantané et d'essayer d'extraire le signal harmonique pour la compensation.

Pour cela, on va utiliser un programme de traitement avec une transformée de Fourier discrète modifiée appliquée sur une fenêtre glissante rectangulaire d'un signal de courant en fonction du temps. Ce programme permet d'analyser le signal pour quantifier les différentes harmoniques en ligne par amplitude et phase. L'amplitude sert à calculer le THD et la phase sert à générer le signal d'harmoniques complémentaire (signal de courant sans l'harmonique fondamental).

Cette étude contribue à améliorer la qualité de l'énergie dans les réseaux locaux intégrant du PV et valider des solutions de filtrage actif pour les systèmes avec charges polluantes.

Après avoir exposé les enjeux de la surveillance des harmoniques dans notre réseau local photovoltaïque, la section suivante détaille la méthodologie de simulation adoptée pour analyser ces perturbations et concevoir un signal de compensation.

III.3 Méthodologie de Simulation

III.3.1 Scénarios de simulation

La simulation réalisée sous MATLAB/Simulink vise à analyser le comportement d'un système comprenant un redresseur commandé double alternance alimentant un moteur à courant continu, avec un focus particulier sur la surveillance des harmoniques générées par cette charge non linéaire. Le THD du courant, directement lié à la nature non linéaire du redresseur, est étudié pour différentes vitesses de rotation du moteur. Cette variation dynamique des harmoniques en amplitude et fréquence, induite par les changements de vitesse, nécessite une surveillance en temps réel. Pour ce faire, un algorithme de calcul instantané du THD a été implémenté, permettant d'évaluer en continu la distorsion harmonique et de démontrer l'efficacité du traitement en ligne.

L'approche développée permet non seulement de surveiller les harmoniques, mais aussi de régénérer le signal de courant en soustrayant la composante fondamentale. Le signal résultant, riche en harmoniques, sert de référence précieuse pour la compensation active, contribuant ainsi à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Cette méthode de traitement en temps réel ouvre des perspectives intéressantes pour la mitigation des perturbations harmoniques.

Un volet important de l'étude consiste à comparer les spectres harmoniques du courant dans deux configurations distinctes : le cas sain (avec diode de roue libre

connectée) et le cas défaillant (diode déconnectée). Cette analyse comparative, menée pour différentes vitesses de fonctionnement, permet non seulement de caractériser l'impact de la défaillance sur le spectre harmonique, mais aussi de développer une méthode de détection précoce des défauts. La capacité à identifier ces anomalies en temps réel, avant qu'elles ne se propagent dans l'ensemble de la chaîne électrique, représente un atout majeur pour la maintenance prédictive et la protection du système.

III.3.2 MATLAB/Simulink

Comme le montre Fig.III.1 suivante, on alimente la charge non linéaire par une source de tension sinusoïdale de valeur efficace $230\,V$ et de fréquence $50\,Hz$. Un redresseur commandé à double alternance possède plus la diode de roue libre, quatre thyristors, dont les gâchettes sont connectées à un générateur d'impulsions (bloc en bleu) où l'on a programmé différents angles d'amorçage dans le temps. Après le redresseur se trouve un moteur à courant continu de puissance $5\,ch$.

On applique à ce moteur un couple résistant de $20\,N\cdot m$ (bloc en jaune) et on lance la simulation pour acquérir le signal "S" et "SS" du courant de source i_s et de tension de charge V_{ch} en fonction du temps "t" (blocs en vert).

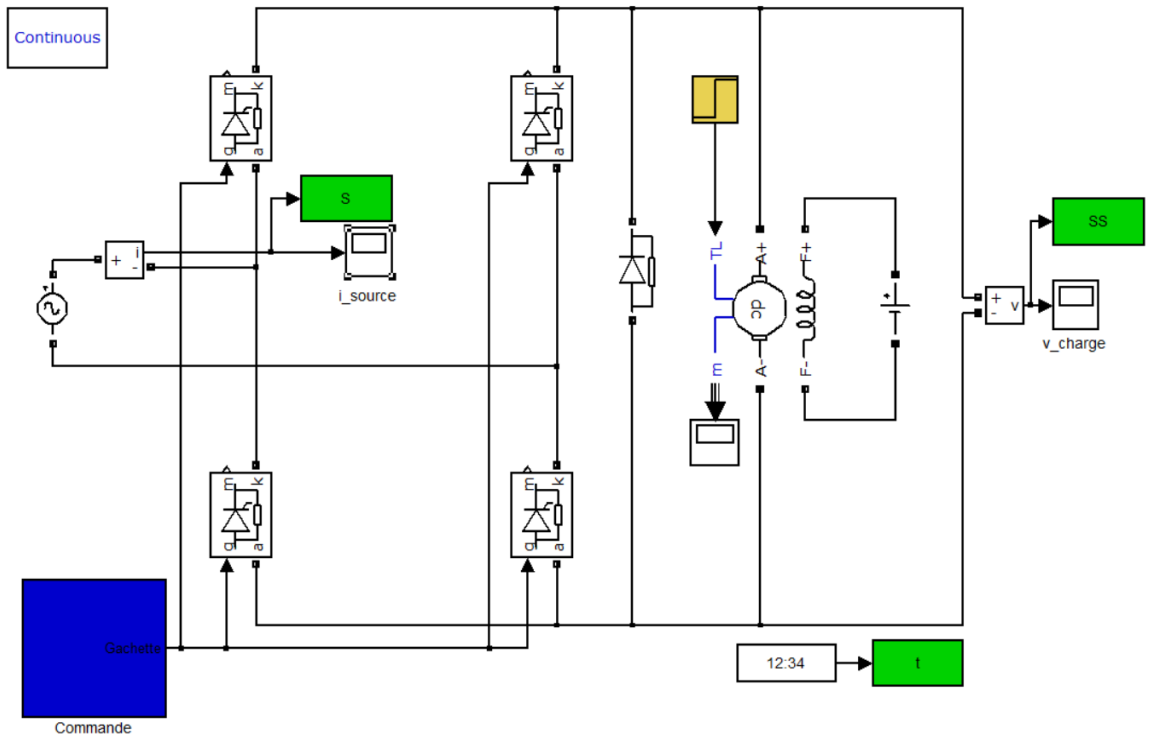


Figure III.1 Schéma de simulation sous MATLAB/Simulink d'un redresseur commandé et moteur DC.

III.4 Résultats de simulation

III.4.1 Présentation des courbes

La simulation de ce modèle a permis d'obtenir les résultats présentés dans les figures suivantes. Fig.III.2 (a) représente l'évolution temporelle de la tension de charge V_{ch} pour différents angles d'amorçage.

Fig.III.2 (b), (c) et (d) illustrent plus précisément la tension de charge pour des angles d'amorçage spécifiques : respectivement 45°, 27° et 0°.

Pour $\alpha = 45°$ (Fig.III.2 b), on observe une forme d'onde typique de redresseur commandé avec un taux de distorsion important.

À $\alpha = 27°$ (Fig.III.2 c), la tension montre des transitions plus douces avec des angles plus atténués.

Le cas $\alpha = 0°$ (Fig.III.2 d) présente un comportement quasi-sinusoïdal, les alternances négatives redressées parfaitement.

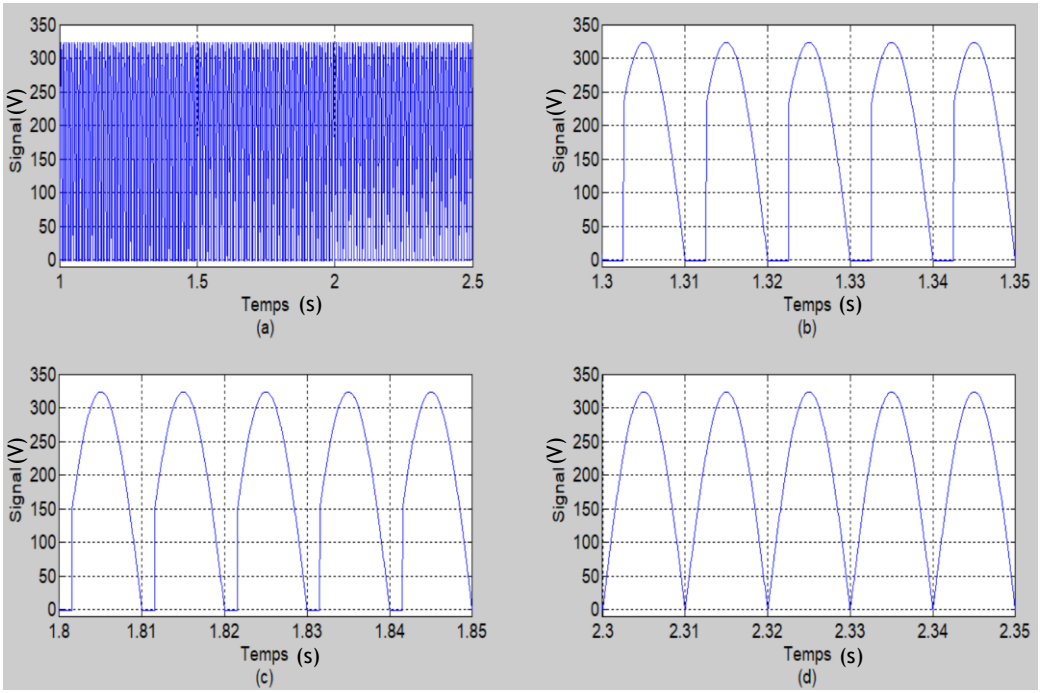


Figure III.2 Tension de charge V_{ch} pour différents angles d'amorçage : (a) Vue de tout le signal acquis, (b) $\alpha = 45°$, (c) $\alpha = 27°$, (d) $\alpha = 0°$.

Fig.III.3 présente les courants correspondants :

- Fig.III.3 (a) montre le courant de source i_s en fonction du temps pour les mêmes angles d'amorçage de la tension de charge V_{ch}.

- Fig.III.3 (b), (c) et (d) du courant correspondent exactement aux cas des Figu.III.2 (b), (c) et (d) de la tension, permettant une analyse comparative directe entre tension et courant pour chaque angle de commande.

- Fig.III.3 met en évidence un courant fortement non-linéaire.

Fig.III.4 présente l'évolution de la vitesse du moteur à courant continu en fonction du temps. On observe clairement l'influence de l'angle d'amorçage α sur le comportement du moteur.

Pour les faibles valeurs de α la vitesse atteint son maximum ($\approx 150\, rad/s$). Lorsque α augmente, la vitesse diminue significativement ($\approx 120\, rad/s$). Cette corrélation inverse entre l'angle d'amorçage et la vitesse s'explique par la réduction de la tension moyenne en sortie du redresseur lorsque α augmente et la diminution conséquente de la force contre-électromotrice du moteur.

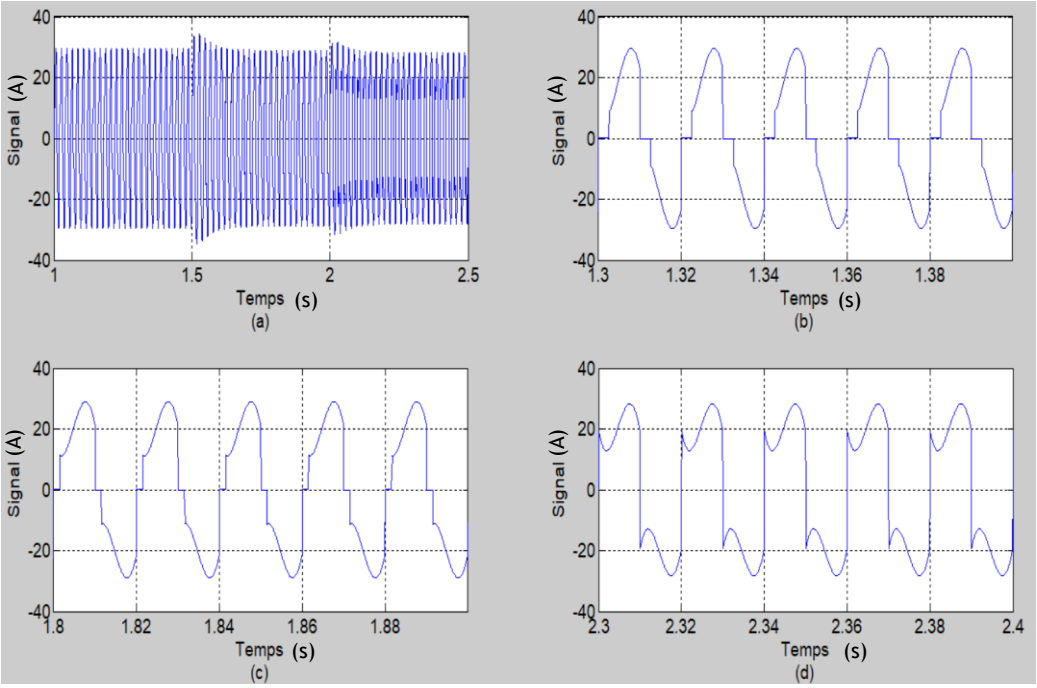


Figure III.3 Courant de source i_s pour différents angles d'amorçage : (a) Vue de tout le signal acquis, (b) α=45°, (c) α=27°, (d) α=0°.

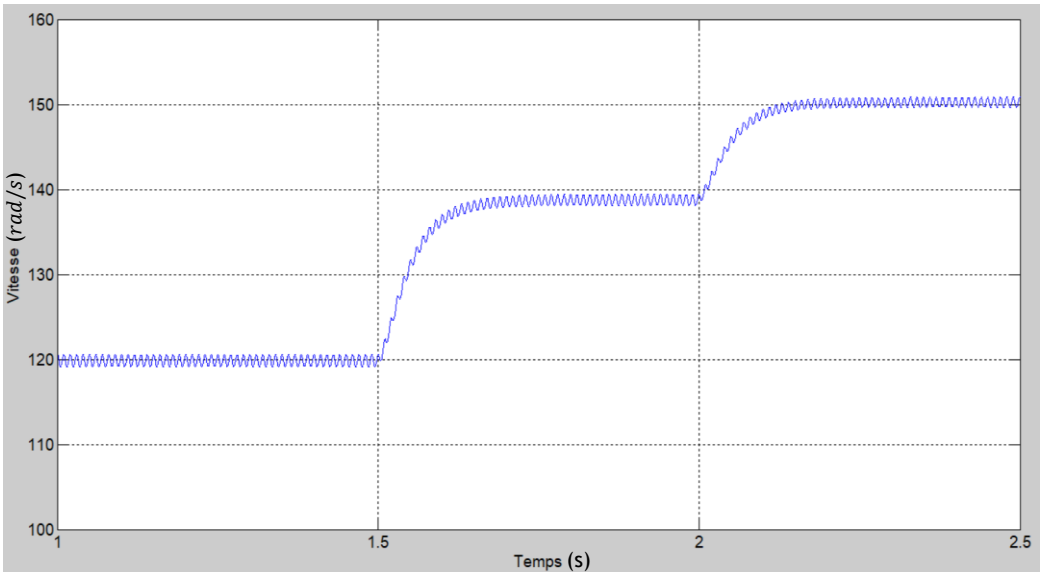


Figure III.4 Évolution temporelle de la vitesse du moteur DC en fonction de l'angle d'amorçage.

III.4.2 Analyse des résultats

Fig.III.5, 6 et 7 présentent le spectre fréquentiel (DFT) du courant de source pour différents angles d'amorçage (α), révélant la composition harmonique de chaque cas.

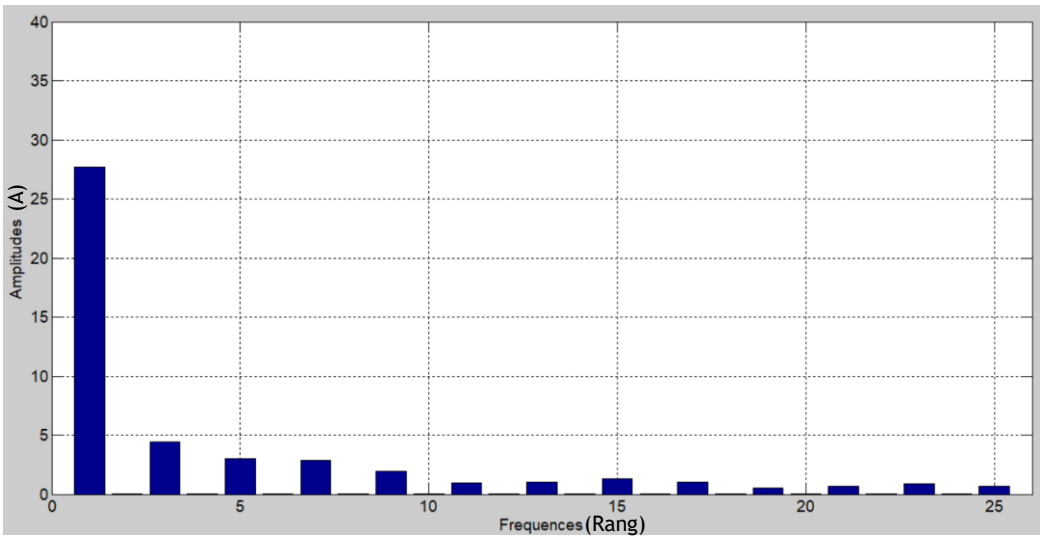


Figure III.5 Spectre harmonique du courant pour α=45° (THD=25%).

Pour Fig.III.5 ($\alpha = 45°, THD = 25\%$), le spectre observé montre une dominance des harmoniques impaires, caractéristique d'un redresseur commandé à angle élevé. On note une amplitude notable pour l'harmonique 3, une présence significative des harmoniques 5 et 7, et une amplitude atténuée mais visible pour l'harmonique 9. Le THD de 25% correspond aux attentes théoriques pour ce type de conversion AC/DC, où une augmentation de l'angle α amplifie la distorsion harmonique.

Fig.III.6 ($\alpha = 27°, THD = 24\%$) montre une modification de la distribution harmonique. On observe un renforcement de l'harmonique 3 par rapport au cas $\alpha = 45°$ et une atténuation marquée de l'harmonique 7. Le THD quasi-identique (24%), malgré une composition différente, suggère une interaction complexe entre l'angle de commande et les paramètres de la charge (moteur DC).

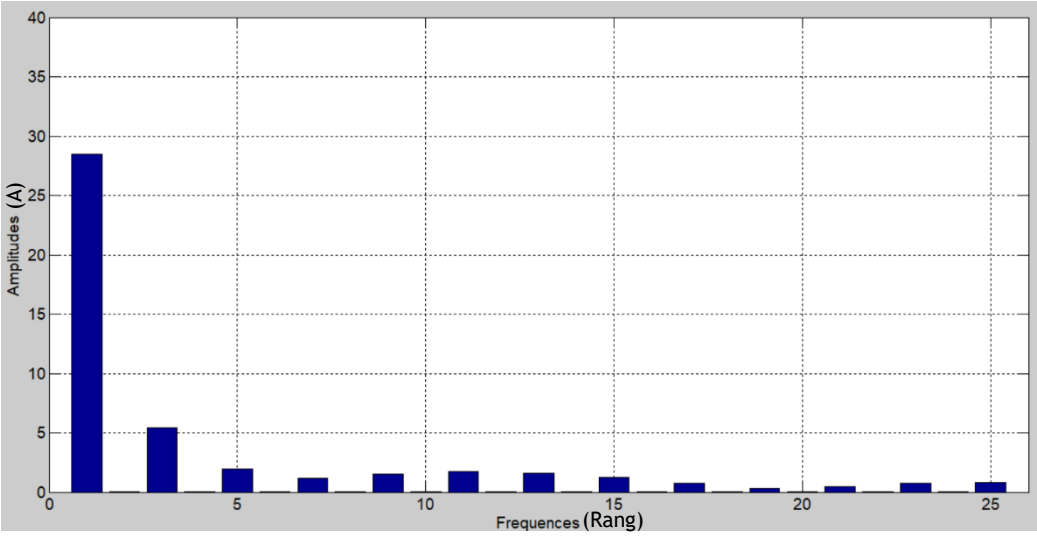


Figure III.6 Spectre harmonique du courant pour α=27° (THD=24%).

Concernant Fig.III.7 ($\alpha = 0°$, $THD = 40\%$), le spectre présente une fondamentale dominante, aussi une augmentation au nombre des harmoniques résiduels et en amplitude. Le THD très élevé (40%) semble compatible avec un spectre apparemment riche en harmoniques.

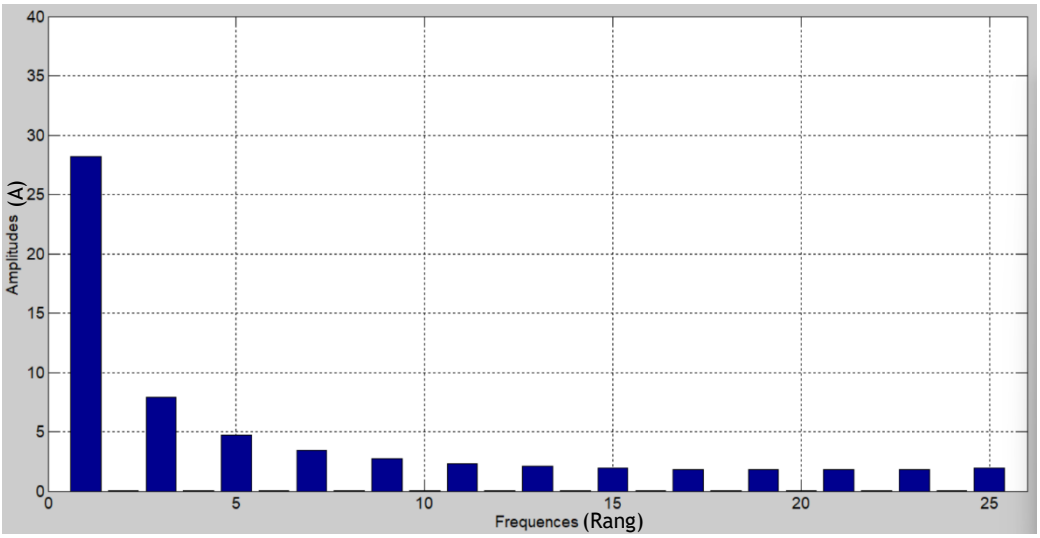


Figure III.7 Spectre harmonique du courant pour α=0° (THD=40%).

Fig.III.8 (évolution temporelle du THD) montre une stabilité temporelle du THD en régime permanent pour chaque angle. Cette stabilité confirme que l'approche de la DFT

modifiée et le fenêtrage en temps réel sont bien établies pour la surveillance des harmoniques, et ne résultent pas d'artefacts ponctuels.

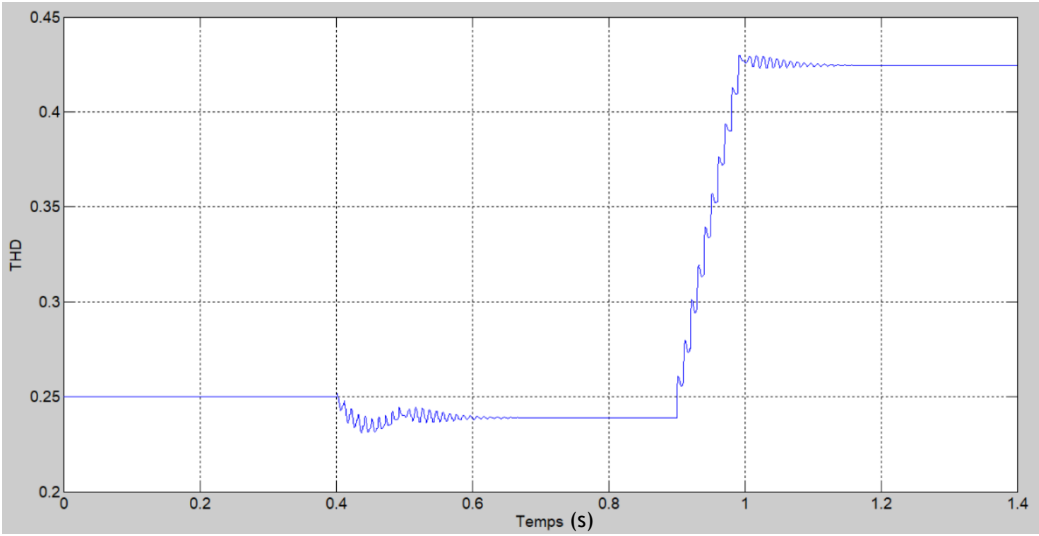


Figure III.8 Évolution temporelle du THD en temps réel.

III.4.3 Compensation harmonique

Fig.III.9 montre le signal de courant original mesuré en rouge et le signal reconstruit en bleu à partir de l'analyse des composantes harmoniques. On observe une très bonne adéquation entre les deux courbes, confirmant la précision de notre méthode d'analyse spectrale. La reconstruction réussie du signal original, avec toutes ses caractéristiques de distorsion, prouve que l'algorithme capture correctement les amplitudes et phases de chaque composante harmonique.

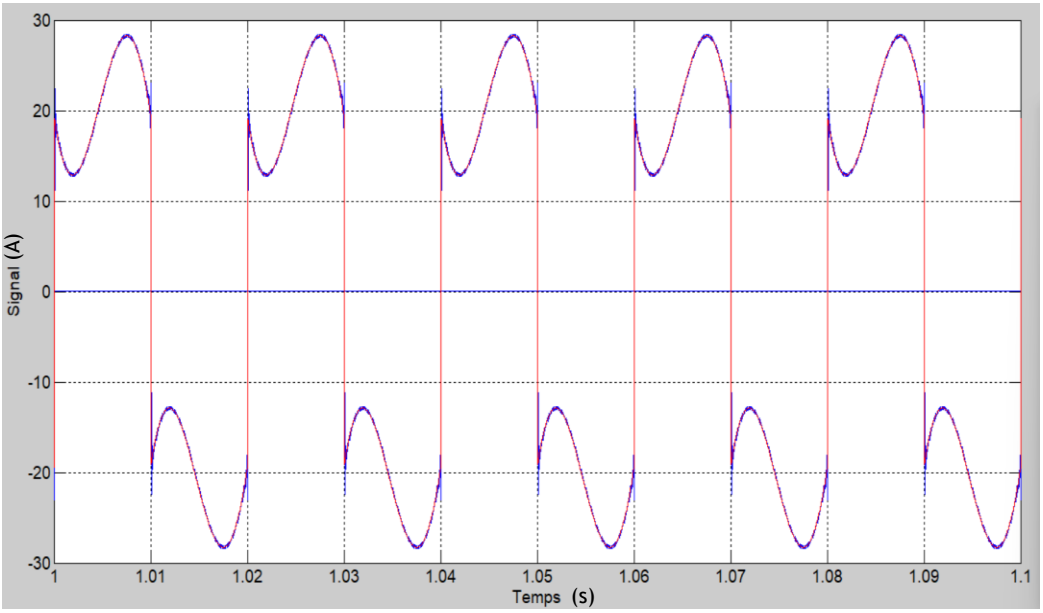


Figure III.9 Comparaison du courant original (mesuré en rouge) et reconstruit (calculé en bleu).

Les légères différences entre les signaux apparaissent principalement lors des transitions rapides et des changements de pente brusques, comme le révèle plus clairement Fig.III.10 qui présente un zoom temporel. Ces écarts mineurs s'expliquent par plusieurs facteurs techniques. La résolution fréquentielle limitée de l'analyse TFD introduit des approximations. Aussi, la reconstruction utilise un nombre fini d'harmoniques, négligeant éventuellement certains termes d'ordre élevé. Plus que, les effets de fenêtrage lors du traitement numérique peuvent légèrement altérer la forme d'onde.

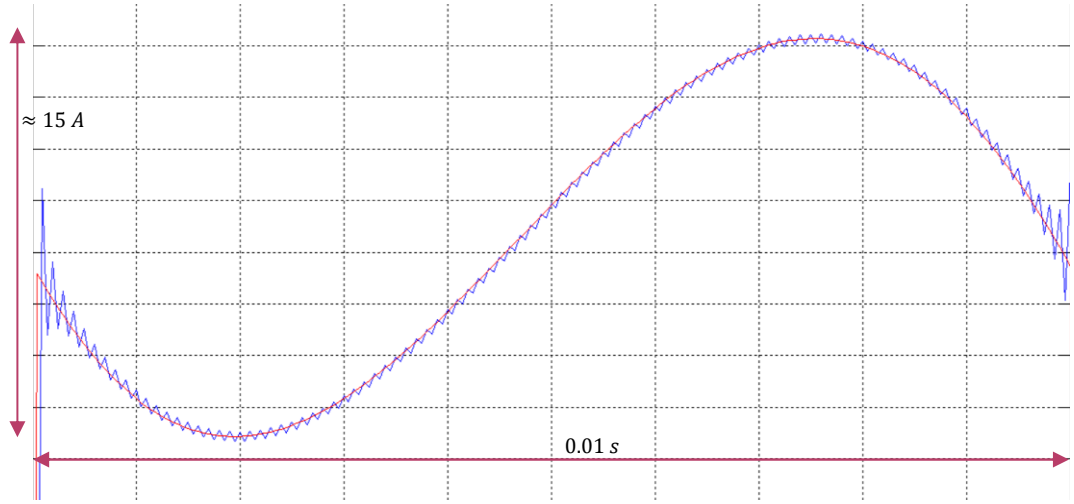


Figure III.10 Zoom temporel sur les écarts entre le courant mesuré et reconstruit.

Cette reconstruction fidèle du signal original représente une étape cruciale dans notre démarche. Elle valide que notre système d'analyse peut identifier avec précision toutes les composantes spectrales pertinentes, quantifier leurs paramètres caractéristiques et restituer une représentation temporelle exacte. Cette vérification préalable est indispensable avant d'envisager toute compensation harmonique, car elle garantit la fiabilité des données utilisées pour générer les signaux de correction. La qualité des résultats obtenus à ce stade permet d'envisager avec confiance les phases suivantes du processus d'amélioration de la qualité de l'énergie.

Fig.III.11 met en évidence la décomposition spectrale réalisée par le système de compensation. Le signal bleu, représentant la fondamentale isolée, montre une parfaite sinusoïde de $50\,Hz$, confirmant la pureté spectrale obtenue. Le signal rouge correspondant aux harmoniques résiduelles présente quant à lui un contenu fréquentiel complexe, principalement concentré autour des fréquences caractéristiques des

harmoniques impaires ($150\,Hz$, $250\,Hz$, etc.). Cette séparation claire entre fondamentale et harmoniques valide la méthode de décomposition utilisée.

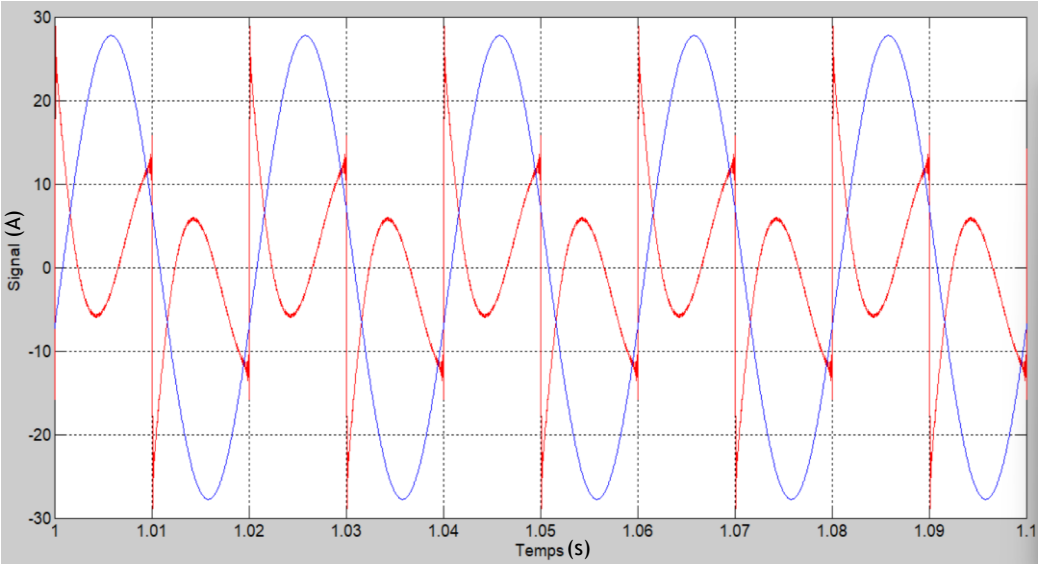


Figure III.11 Décomposition spectrale : fondamentale (bleu) vs harmoniques résiduels (rouge).

Le spectre fréquentiel présenté dans Fig.III.12 complète cette analyse en montrant la distribution énergétique du signal compensé. On observe une concentration spectrale quasi-exclusive à $50\,Hz$, avec des composantes harmoniques résiduelles inférieures à 5% de l'amplitude fondamentale. Ce résultat confirme l'efficacité de l'algorithme qui fait la séparation des harmoniques, avec un taux dépasse 95% pour les rangs les plus gênants.

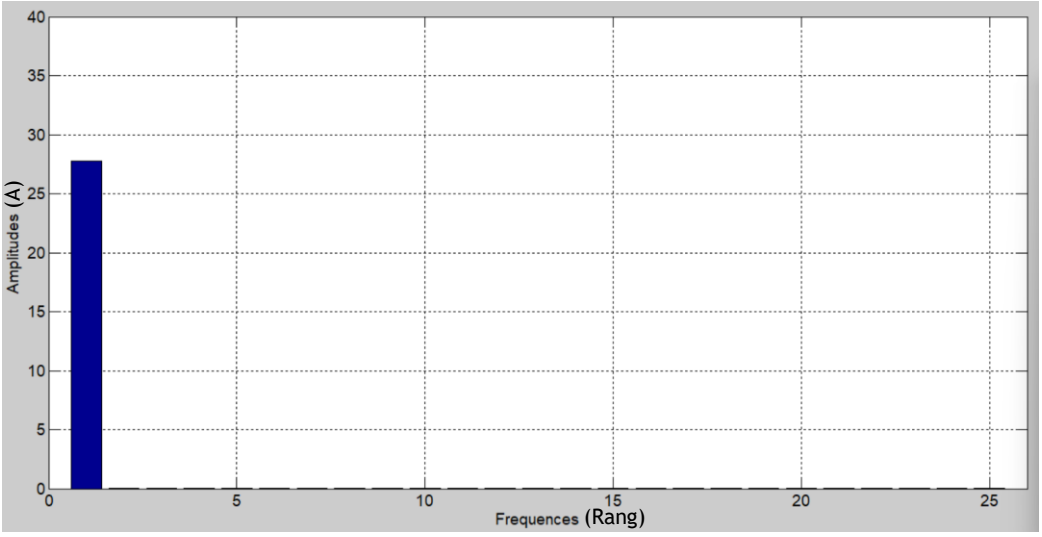


Figure III.12 Spectre fréquentiel du signal compensé (harmoniques <5%).

L'ensemble de ces résultats démontre la faisabilité technique de l'approche de compensation. La régénération précise du signal fondamental couplée à l'extraction efficace des composantes harmoniques ouvre des perspectives intéressantes pour l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques perturbés. Les légères distorsions résiduelles observées sur le signal bleu dans Fig.III.9 suggère toutefois que des optimisations supplémentaires pourraient être envisagées, notamment concernant le traitement des harmoniques d'ordre élevé.

III.4.4 Analyse de l'évolution de la vitesse moteur en régime défaillant

Fig.III.13 illustre l'impact de la déconnexion de la diode de roue libre sur le comportement du moteur à courant continu. Comparée au fonctionnement normal (Fig.III.4), la vitesse présente des caractéristiques notablement altérées.

En régime défaillant, la relation vitesse/angle d'amorçage conserve sa tendance générale mais avec des modifications significatives. Pour les angles très faibles ($\alpha \approx 0°$), la vitesse maximale atteint environ $150\ rad/s$, idem au régime sain. Aux angles élevés ($\alpha \approx 45°$), la vitesse chute à environ $80\ rad/s$, représentant une réduction de 33% par rapport aux $120\ rad/s$ normaux.

L'analyse révèle que l'impact de la défaillance s'accentue avec l'augmentation de l'angle d'amorçage. Le régime à faible angle ($\alpha \approx 0°$) conserve une relative stabilité grâce à la conduction quasi-continue, tandis que le régime à grand angle ($\alpha \approx 45°$) subit une dégradation prononcée de ses performances.

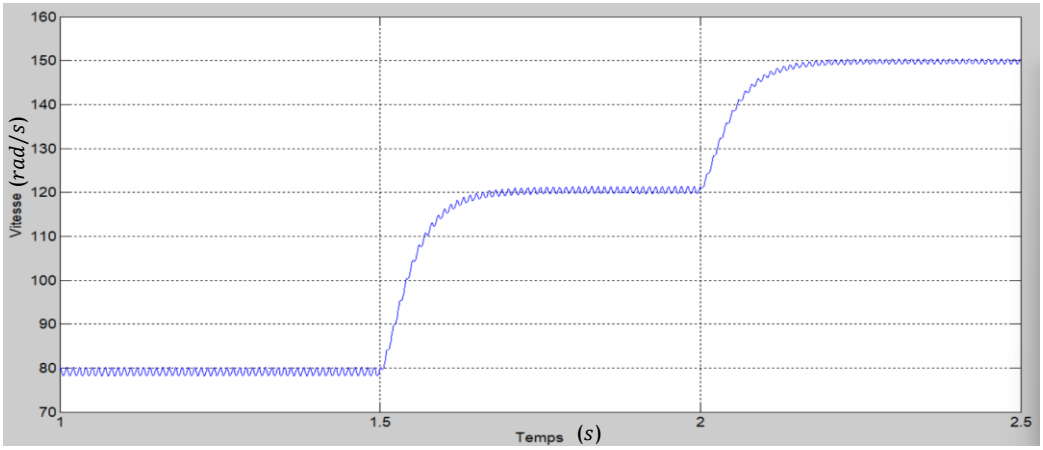


Figure III.13 Vitesse du moteur en régime défaillant (diode de roue libre déconnectée).

III.4.5 Analyse des résultats harmoniques après défaillance de la diode de roue libre

Fig.III.14 présente les formes d'onde du courant de source i_s dans le cas d'un défaut de déconnexion de la diode de roue libre, analysé pour trois angles d'amorçage distincts ($45°$, $27°$ et $0°$). La partie (a) montre une vue d'ensemble des trois régimes de fonctionnement en condition défaillante, révélant une forte non-linéarité du courant avec des distorsions caractéristiques. Les parties (b), (c) et (d) fournissent une analyse détaillée pour chaque angle spécifique : le cas à $45°$ présente un signal sinusoïdal presque net, celui à $27°$ montre un comportement intermédiaire, tandis que le cas à $0°$ illustre une forme d'onde fortement perturbée. L'ensemble de ces courbes met en évidence l'impact significatif de la déconnexion de la diode de roue libre sur la qualité d'onde du courant, avec des perturbations qui varient selon l'angle d'amorçage appliqué.

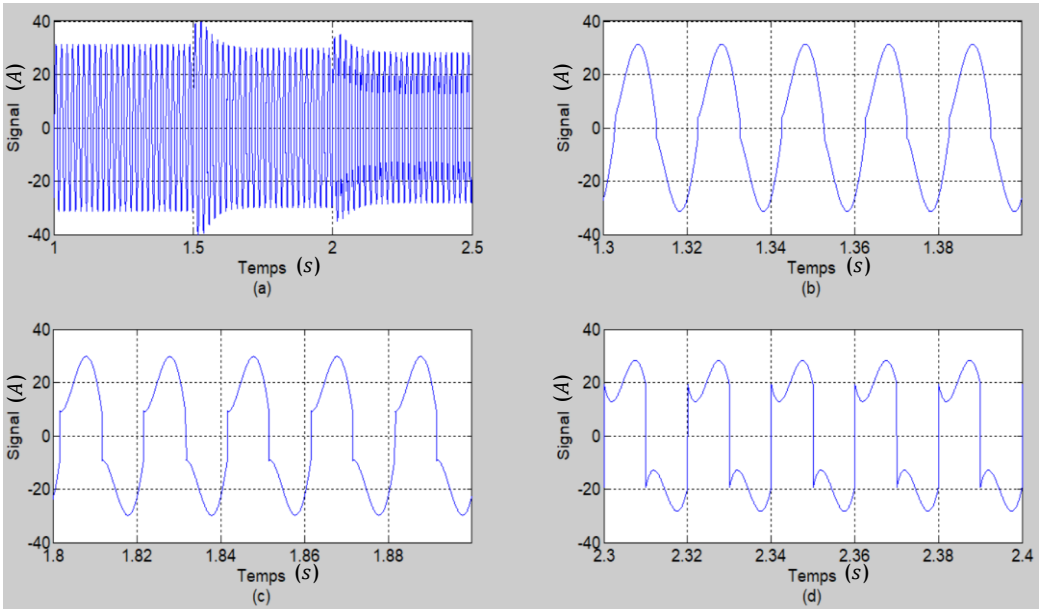


Figure III.14 Formes d'onde du courant en régime défaillant : (a) Vue globale, (b)-(d) Par angle.

Fig.III.15 présente le spectre harmonique du courant pour un angle d'amorçage de $45°$. On observe clairement que l'état défectueux (bar bleue) génère un harmonique fondamental plus élevé que l'état sain (bar rouge), et des amplitudes harmoniques significativement moins élevées que l'état sain, particulièrement pour les harmoniques 3, 5, 7 et 9. Cette atténuation des harmoniques correspond au THD mesuré de 6%, qui reste relativement très faible pour le cas sain. La distorsion atténuée provient principalement de la forme d'onde qui est clairement se voie quasi-sinusoïdale dues à l'absence de diode de roue libre.

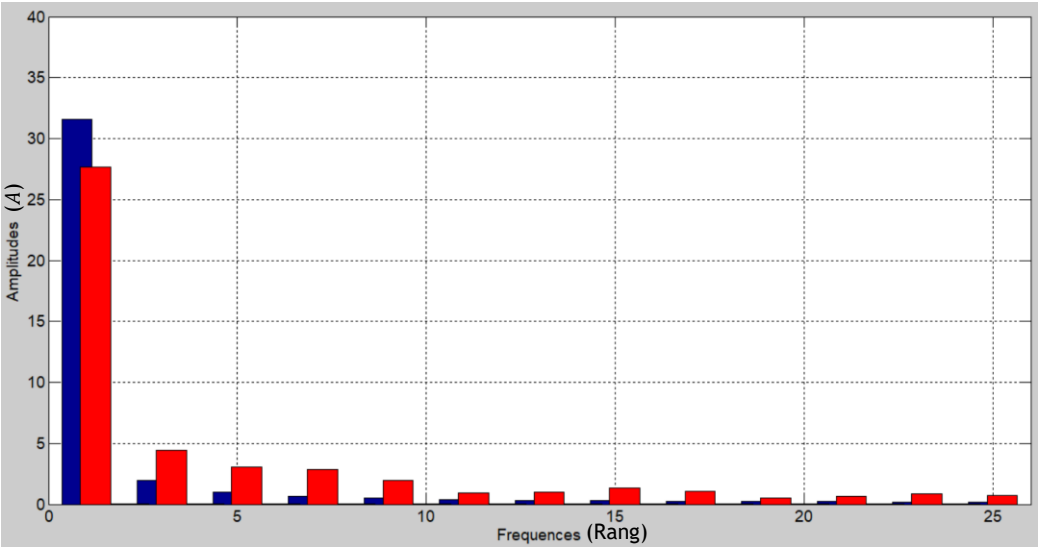


Figure III.15 Spectre harmonique en régime défaillant en bleu pour α=45° (THD=6%).

Pour l'angle de 27° (Fig.III.16), l'impact de la défaillance est moins marqué. Le spectre montre une amplification négligeable de l'harmonique fondamental, 5 et 7 en comparant avec l'état sain, tandis on observe une atténuation légère sur l'harmonique 3 et 9. Le THD est moins élevé (18%) dans ce cas aussi.

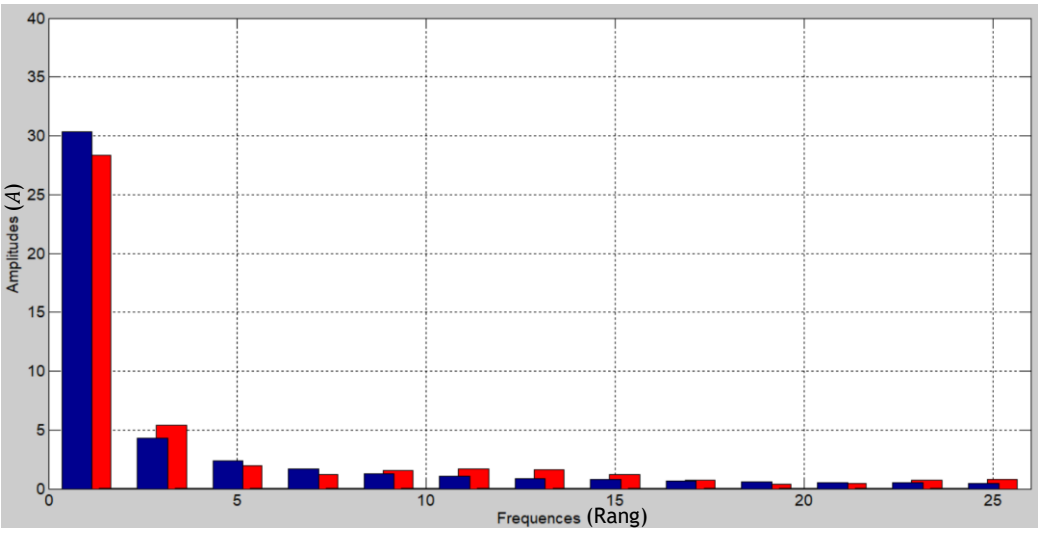


Figure III.16 Spectre harmonique en régime défaillant en bleu pour α=27° (THD=18%).

Fig.III.17, correspondant à l'angle de 0°, révèle la situation la plus critique. Le spectre harmonique présente des amplitudes très importantes sur toutes les fréquences (presque identique au cas sain), cohérentes avec le THD exceptionnellement élevé de 40%. La défaillance ici ne se voie pas par la distorsion globale du signal, affectant de la même façon les harmoniques apparus dans un fonctionnement sain. Ce résultat

démontre que l'absence de diode de roue libre n'affecte pas le THD pour les faibles angles d'amorçage.

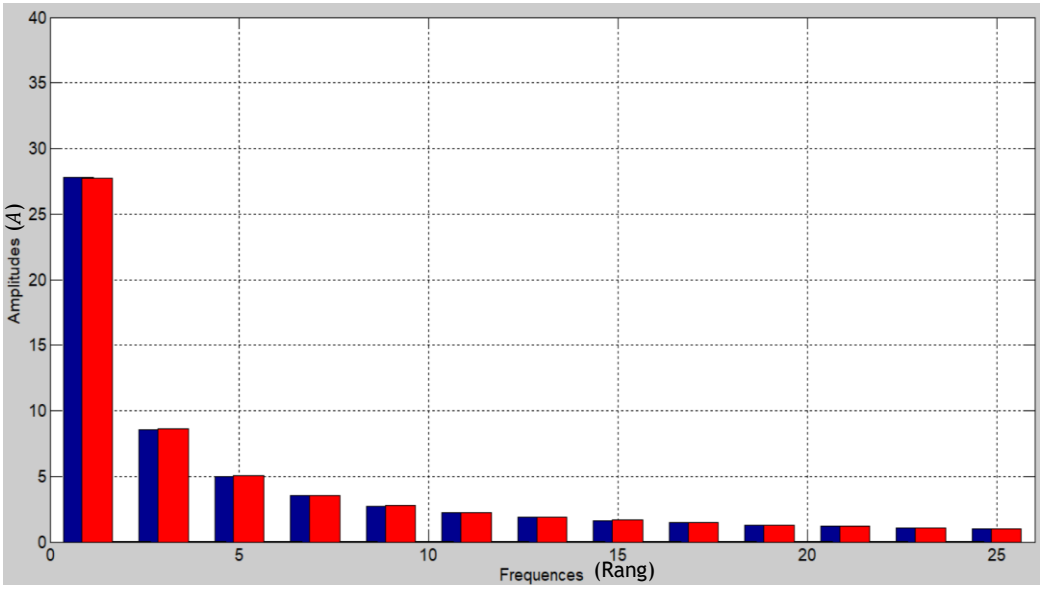


Figure III.17 Spectre harmonique en régime défaillant en bleu pour α=0° (THD=40%).

L'évolution temporelle du THD (Fig.III.18) confirme ces observations. On note une stabilité des valeurs pour chaque angle, avec cependant des fluctuations plus prononcées pour le régime transitoire. Le THD atténué dans le cas défectueux comparant avec le cas sain surtout à l'augmentation de l'angle d'amorçage établit une relation claire entre l'angle d'amorçage et l'impact de la défaillance sur la qualité du courant.

L'analyse spectrale révèle que chaque angle produit une signature harmonique caractéristique en condition de défaut, offrant des possibilités intéressantes pour le diagnostic de ce type de panne. La cohérence entre les mesures de THD et les spectres obtenus valide la fiabilité de ces résultats expérimentaux.

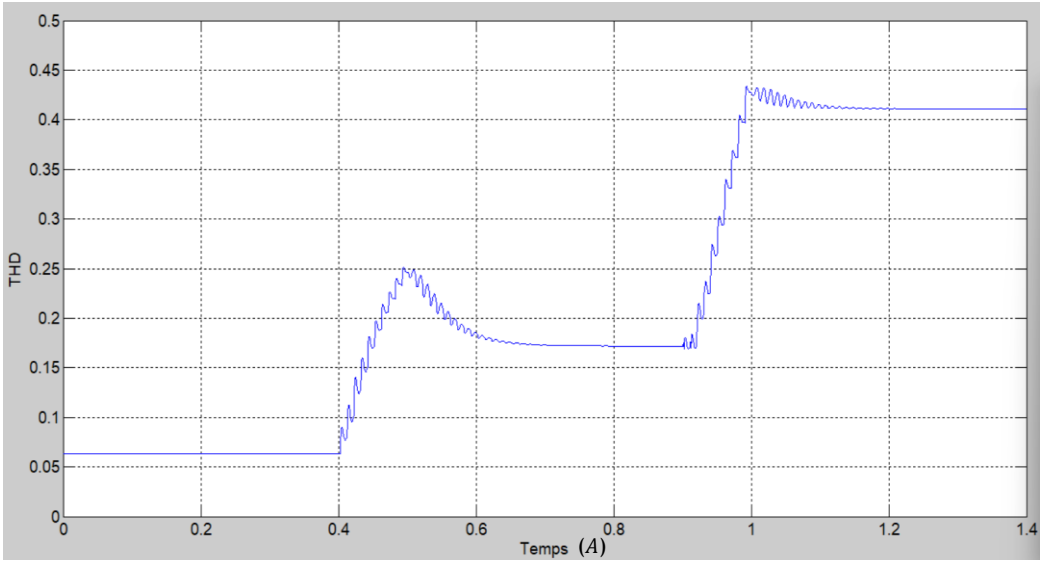


Figure III.18 Évolution temporelle du THD en temps réel en régime défaillant.

III.5 Conclusion

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence déterminante de l'angle d'amorçage sur la qualité de l'énergie dans le système étudié. La méthode de compensation développée a démontré son efficacité pour réduire les harmoniques, tout en révélant certaines limites lors des transitions rapides. L'étude du régime défaillant a permis d'identifier des signatures caractéristiques utiles pour le diagnostic de pannes. Ces travaux ouvrent des perspectives intéressantes pour l'amélioration des performances des systèmes électriques intégrant des charges non linéaires.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Cette étude a permis d'analyser en profondeur les phénomènes harmoniques générés par un redresseur commandé alimentant un moteur à courant continu dans un système photovoltaïque. Les résultats obtenus mettent clairement en évidence l'influence déterminante des paramètres de fonctionnement, en particulier l'angle d'amorçage et la vitesse du moteur, sur la qualité de l'énergie électrique.

La méthode de compensation active développée dans ce travail a démontré son efficacité à réduire significativement les perturbations harmoniques, avec des performances remarquables en régime permanent. L'approche de surveillance en temps réel a permis de caractériser précisément l'évolution dynamique des harmoniques en fonction des variations de vitesse, tout en identifiant certaines limitations lors des régimes transitoires.

L'analyse comparative entre les cas sain et défaillant a révélé des signatures spectrales caractéristiques, ouvrant la voie à des méthodes innovantes de diagnostic précoce des pannes. Ces avancées sont particulièrement pertinentes pour la détection de défauts tels que la déconnexion de la diode de roue libre, avant qu'ils ne se propagent dans l'ensemble du système.

Ces travaux constituent une contribution significative à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les installations électriques avec charges non linéaires. Les perspectives envisageables incluent l'optimisation des algorithmes pour les harmoniques d'ordre élevé, l'intégration dans des systèmes industriels et le développement de stratégies de contrôle adaptatives. La robustesse des méthodes proposées, combinée à leur implémentation en temps réel, offre des solutions prometteuses pour les réseaux électriques modernes confrontés aux défis des perturbations harmoniques.

Références Bibliographiques

[1] Souahi, Bouthaina (2009). *Étude de la stabilité dynamique des réseaux électriques* [Mémoire de fin d'études, Université Echahid Echeikh Larbi Tébessi].

[2] Bedoui, Messaouda (s. d.). *Qualité de l'énergie électrique (QEE)* [Cours, Master 1 Réseaux Électriques].

[3] Omeiri, Amar (2007). *Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant* [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar].

[4] Gattal, B. (2012). *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* [Thèse de doctorat, Université de Batna 2].

[5] Ould Ahmed Med Lemine & Mint Minya, Brahim (2014). *Amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques* [Mémoire de fin d'études, Université Echahid Echeikh Larbi Tébessi].

[6] Mostapha ould Mohamed & Abdellahi ould Mohamed ould yarba (2011). *Les perturbations dans les réseaux électriques* [Mémoire de fin d'études, Université Echahid Echeikh Larbi Tébessi].

[7] Djaffar Ould Abdeslam. (2005). *Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension* [Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace]

[8] Yousfi, Sami (2012). *Identification des harmoniques dans les réseaux électriques* [Mémoire de fin d'études, Université Echahid Echeikh Larbi Tébessi].

[9] Haddad Salim (2010). *Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission* [Mémoire de master, Faculté des Sciences de l'Ingénieur].

[10] Meziani, Samir & Ghiles Larbi Cherif (2015). *Étude expérimentale de la pollution harmonique dans un réseau électrique : cas des lampes fluo-compactes et ordinateurs* [Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri].

[11] Boukadoum, Aziz (2015). *Contribution à l'étude des stratégies d'identification harmonique et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques* [Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar].

[12] Ignatova, V. (2006). *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique : application aux creux de tension et à la pollution harmonique* [Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier].

[13] Mesai, M. N. E. ; Mahdia, A. ; Zouari Ferhat, A. (2022) *Analyse et amélioration de la qualité de l'énergie électrique* [Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar].

[14] Eke, Samuel & Adolphe, Moukengue Imano (2014). *Algorithme de classification exhaustive des creux de tension : association des méthodes des six tensions et des composantes symétriques*. Symposium de Génie Électrique.

[15] Zebiri, Bouzid & Zargoune, Hamza (2023). *Étude et développement d'un suiveur résistant aux défauts d'un réseau d'énergie électrique* [Thèse de doctorat, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi].

[16] Kherakheria, Zahra (2019). *Qualité de l'énergie électrique en moyenne tension* [Mémoire de master, Université 8 Mai 1945].

[17] Akli, T. M., Soufiane, Z., & Toufik, Z. (2011). *Diagnostic d'un réseau électrique industriel en termes de perturbations harmoniques : application à l'ENIEM* [Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri].

[18] Cottet, Francis. (2005). *Traitement du signal*. Dunod.

[19] Meriane, Brahim (2009). *Analyse du signal de parole par les ondelettes : application aux mots isolés* [Thèse de doctorat, Université de Batna 2].

[20] Das, J. C. (2015). *Power system harmonics and passive filter designs*. John Wiley & Sons.

[21] Ouamara, Assia & Oukid, Lilia (2010). *Étude de l'évaluation de la distorsion harmonique dans un réseau industriel*

[22] Fetha, Cherif (2021) *Qualité d'énergie et compatibilité électromagnétique* [Cours, Master 1 Électrotechnique Industrielle].

[23] Kebbal, Med Racim & Bakir, Karim. (2008). *Paramètres de la qualité de la tension d'un réseau électrique : étude et analyse* [Mémoire de fin d'étude, Ecole Nationale Polytechnique].