



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة ألكي محمد أولحاج - البويرة

Université Akli Mohand Oulhadj Bouira

كلية العلوم التطبيقية

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique

Mémoire de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présentée par :

IDDIR MEHDI

LAFDAL ABDENACER

Intitulée :

Contribution à l'analyse et au contrôle de la qualité d'énergie des charges et dispositifs électriques

I.1 Membres du Jury

Mr. BOUZIDA Ahcene	Prof	Président	Université de Bouira
Mr. AMEZIANE Sadek	MAA	Examineur	Université de Bouira
Mr. BENSALD Samir	Prof	Encadreur	Université de Bouira
Mr. HOUASSINE Hamza	Prof	Co-encadreur	Université de Bouira



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Bouira,
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie électrique

Bouira le : 16/06/2025

Autorisation de soutenance d'un mémoire de Master

Je soussigné, l'enseignant : BENSALD SAMIR

Encadreur des étudiants :

- 1- IDDIR MEHDI
- 2- LAFDAL ABDENACER

Spécialité : Electrotechnique Industriel

Les autorise à déposer leur **mémoire** de Master pour le soutenir devant le jury qui sera désigné.

Signature du rapporteur

Résumé

Ce mémoire traite de l'analyse et la surveillance de la qualité de l'énergie électrique, avec un intérêt particulier pour les perturbations créées par les charges non linéaires. Le travail repose sur une double approche : une partie expérimentale, dans laquelle trois systèmes d'acquisition sont comparés, et une partie pratique où un dispositif intelligent est conçu à l'aide de capteurs (ACS712, ZMPT101B), une carte d'acquisition et un système de commutation automatique. Les signaux sont analysés à l'aide de la FFT pour la THD et les puissances. Les résultats montrent l'impact des charges non linéaires sur la qualité d'énergie et valident la capacité du dispositif proposé à détecter et analyser les perturbations efficacement.

MOTS CLES : Qualité d'énergie, puissances, Harmoniques, THD, charges non linéaires, Capteurs, FFT, Arduino UNO, Sensor CASSY, MCC USB-205.

Abstract

This dissertation focuses on the analysis and monitoring of electrical power quality, especially the disturbances generated by non-linear loads. The work combines an experimental study comparing various acquisition systems and the implementation of an intelligent measurement device using current and voltage sensors (ACS712, ZMPT101B), a data acquisition board, and an automatic switching system. Signals are processed using fast Fourier transform (FFT) to calculate the THD Harmonic distortion (THD) and power quantities. The results highlight the significant impact of non-linear loads on power quality and confirm the effectiveness of the proposed system in identifying and analyzing disturbances.

KEY WORDS : Power quality, powers, Harmonics, THD, non-linear loads, Sensors, FFT, Arduino UNO, Sensor Cassy, MCC USB-205

ملخص

يتناول هذا البحث تحليل ومراقبة جودة الطاقة الكهربائية، مع التركيز بشكل خاص على الاضطرابات الناتجة عن الأحمال غير الخطية. يعتمد العمل على منهج مزدوج: جزء تجريبي يتم فيه مقارنة ثلاثة أنظمة اكتساب بيانات، وجزء عملي يتم فيه تصميم جهاز ذكي باستخدام حساسات (ACS712)، و (ZMPT101B)، وبطاقة اكتساب، ونظام تبديل أوتوماتيكي. يتم تحليل الإشارات باستخدام تحويل فورييه السريع (FFT) لحساب التشوه التوافقي الكلي (THD) والقدرات الكهربائية. تظهر النتائج تأثير الأحمال غير الخطية على جودة الطاقة، وتؤكد قدرة الجهاز المقترح على اكتشاف وتحليل الاضطرابات بكفاءة.

الكلمات المفتاحية: جودة الطاقة، القدرات، التوافقيات، التشوه التوافقي الكلي، الأحمال غير الخطية، الحساسات، تحويل فورييه (FFT)، أردوينو UNO، حساس CASSY، MCC USB-205.



Remerciements

Avant tout, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu Tout-Puissant, qui nous accordé la santé, la force, la patience et la sagesse nécessaires pour mener à bien ce travail.

C'est grâce à Sa volonté que nous avons pu surmonter les difficultés et persévérer jusqu'au bout.

Nous remercions particulièrement Monsieur Ben-Saïd, Pour son encadrement rigoureux, ses conseils éclairés et sa disponibilité constante. Sa confiance et son implication ont été essentielles à la réalisation de ce mémoire. Nous lui témoignons toute notre reconnaissance et notre respect.

Nous remercions les plus sincères vont également à Monsieur Houassine, Pour son soutien, ses orientations précieuses et sa bienveillance tout au long de ce travail. Son accompagnement a été d'un grand apport, aussi bien sur le plan académique que personnel.

Nous tenons également à remercier l'ensemble des enseignants de l'Université Mouhand Oulhadj de Bouira, et plus particulièrement ceux du département de Génie Électrique, pour la qualité de leur enseignement, leur dévouement et les connaissances qu'ils nous ont transmises au fil de notre parcours universitaire.



Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont apporté leur aide, de près ou de loin, tout au long de ce travail



Dédicaces

À la mémoire de mon père, qui, de son vivant, n'a cessé de nous encourager à viser haut, et dont les paroles et les valeurs continuent de guider chacun de mes pas. Tu restes à jamais l'homme qui m'a forgé. Ce travail, je te le dédie avec tout mon amour, en espérant qu'il te rende fier, là où tu es.

À ma mère, femme courageuse au cœur immense, qui a tout sacrifié pour nous voir réussir. Tout soutien, ta patience et ton amour inconditionnel m'ont porté jusqu'ici.

À mes deux frères, présents à chaque instant, dans les bons comme dans les moments difficiles, merci pour votre présence et vos encouragements constants.

À ma chère sœur, toujours prête à m'aider, à me conseiller et à me rappeler l'importance de croire en soi.

À vous tous, ma famille, je vous dédie ce mémoire avec une infinie reconnaissance et tout mon amour.



IDDIR Mehdi



Dédicaces

*À l'aube de cette consécration, mes pensées s'envolent vers celle qui a guidé mes premiers pas, dans l'amour infini continue d'éclairer mon chemin, même depuis l'au-delà : **ma chère mère**, qu'Allah lui accord sa miséricorde. Que ce travail soit un humble hommage à sa mémoire Eternelle.*

À mon père, pilier inébranlable et source d'inspiration constante, dont la sagesse, la force tranquille et le soutien indéfectible ont toujours été pour moi un immense réconfort, et un guide précieux dans chacun de mes choix. C'est à lui que je dois la persévérance et la rigueur qui m'ont menée jusqu'ici.

À l'épouse de mon père, pour sa présence bienveillante, sa douceur et la chaleur qu'elle a su apporter à notre foyer

À mes frères et à ma sœur, mes compagnons de vie et mes complices de toujours, pour les merveilleux moments que nous avons partagés, la force que nous nous sommes toujours apportés, et ces liens profonds et indéfectibles qui nous unissent.

Enfin, à toute ma famille et à mes amis, ces âmes précieuses qui ont accompagné mon parcours par leur amour, leurs encouragements et leur amitié inestimable. C'est grâce à vous que j'ai pu accomplir cette réussite.

LAFDAL Abdénacer



SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

**CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LA QUALITÉ D'ÉNERGIE ET LES
CHARGES ÉLECTRIQUES**

I.Introduction.....	5
I.1 Paramètres de base de la qualité d'énergie.....	5
I.2 Normes et standards internationaux (IEEE, IEC)	5
I.3 Les charges électriques et leur impact sur la qualité d'énergie	7
I.3.1 Les charges linéaires	7
I.3.2 Les charges non linéaires	9
I.3.2.1 Puissances.....	10
I.3.3 Perturbations créées par les charges non linéaires	12
I.4 Harmonique et perturbation	12
I.4.1 Harmonique.....	12
I.4.2 Effets des perturbations harmoniques	12
I.4.3 Développement du courant en série de Fourier.....	13
I.4.4 Représentation spectrale.....	15
I.5 Le facteur de crête	15
I.5.1 Calcul de la valeur efficace du courant déformé.....	16
I.6 Le taux individuel d'harmonique du rang n	16
I.7 Le taux de distorsion harmonique (THD)	16
I.7.1 Expression des puissances en fonction des éléments de la décomposition en série de Fourier.....	17
I.7.2 Importance du THD dans l'analyse de la qualité d'énergie	20
I.7.2.1 Méthode de mesure du THD pour l'évolution de la qualité de l'énergie.....	20
I.8 Problèmes courants de qualité de l'énergie.....	21
I.8.1 Variations de tension	21
I.9 Conclusion.....	21

**CHAPITRE II : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE & ANALYSE COMPARATIVE DES
SYSTÈMES D'ACQUISITION**

II.Introduction	23
II.1 Critères de sélection d'une carte d'acquisition	23
II.1.1 Fréquence d'échantillonnage.....	23
II.1.2 Résolution du convertisseur analogique-numérique (ADC)	23
II.1.3 Nombre de points par période	24
II.1.4 Compatibilité avec les capteurs.....	24
II.2 Présentation des capteurs utilisés	24
II.2.1 Capteur de courant ACS712	24
II.2.2 Capteur de tension ZMPT10B :	25
II.3 Générateur de signal :.....	26
II.3.1 Caractéristiques techniques :.....	26
II.4 Présentation des Systèmes d'acquisition :.....	27
II.4.1 Système CASSY-524010 :	27
II.4.1.1 Caractéristiques techniques :.....	27
II.4.2 Carte Arduino UNO :	28
II.4.2.1 Caractéristiques techniques :.....	28
II.5 Comparatif des performances.....	29
II.5.1 Acquisition, traitement et analyse des signaux :	29
II.5.1.1 À 50 Hz :	30
II.5.1.2 À 150Hz :	33
II.5.1.3 À 250Hz :	37
II.5.1.4 À 350Hz :	41
II.5.1.5 Limitation de Arduino :.....	45
II.6 Système d'acquisition embarqué et évoluer (MCC USB-205)	45
II.6.1 Caractéristiques	45
II.7 Analyse du courant à l'aide de la carte MCC USB-205	46

II.7.1	Avec une fréquence de 50 Hz.....	46
II.7.2	Avec une fréquence de 450 Hz.....	48
II.8	Conclusion.....	51

CHAPITRE III : ANALYSE ET CONTRÔLE DE LA QUALITÉ D'ÉNERGIE

III.	Introduction	53
III.1	Présentation du dispositif de mesure	53
III.1.1	Architecture globale	53
III.1.2	Schéma de câblage et implantation matérielle	53
III.2	Algorithme général de traitement des signaux et calcul des grandeurs électriques .	55
III.2.1	Explication détaillée de l'algorithme de sélection automatique des capteurs de courant et de tension	56
III.3	Calcul des grandeurs électriques à partir des signaux échantillonnés.....	59
III.4	Mesures expérimentales et analyse des résultats.....	61
III.4.1	Cas d'une charge résistive (linéaire)	61
III.4.2	Cas d'une charge non linéaire (3 LED).....	64
III.4.3	Cas d'une charge inductive (Moteur à cage d'écureuil) :	68
III.5	Conclusion.....	74
	Conclusion générale	76
	Références bibliographiques	78

Liste des Figure

FIGURE I-1 : SIGNAUX RELATIFS A UNE CHARGE LINEAIRE.	8
FIGURE I-2: DIFFERENCE DE PHASE ENTRE TENSION ET COURANT.	8
FIGURE I-3: DIAGRAMME DE PUISSANCE AVEC UNE CHARGE LINEAIRE.	9
FIGURE I-4: SIGNAUX RELATIFS A UNE CHARGE NON LINEAIRE	10
FIGURE I-5: DIAGRAMME DE PUISSANCE AVEC UNE CHARGE NON LINEAIRE.	11
FIGURE I-6: FONCTION PAIRE PERIODIQUE	14
FIGURE I-7: FONCTION IMPAIRE PERIODIQUE	14
FIGURE I-8: FONCTION PERIODIQUE A SYMETRIE PAIRE	15
FIGURE I-9: REPRESENTATION SPECTRALE D'UN SIGNAL PERIODIQUE.	15
FIGURE II-1 : CAPTEUR DE COURANT ACS712	25
FIGURE II-2 : L'ALLURE DE LA TENSION DE SORTIE DU CAPTEUR ACS712ELC-20A	25
FIGURE II-3: CAPTEUR DE TENSION ZMPT101B	26
FIGURE II-4: ALIMENTATION GW INSTEK ASR-2100, [15]	26
FIGURE II-5: SENSOR CASSY-524 010, [16]	28
FIGURE II-6: CARTE ARDUINO UNO,[17]	28
FIGURE II-7: SCHEMA DE CABLAGE	29
FIGURE II-8: SIGNAL DE COURANT CASSY A 50HZ	30
FIGURE II-9: SIGNAL DE COURANT ARDUINO A 50HZ	31
FIGURE II-10: SUPERPOSITION DES SIGNAUX CASSY ET ARDUINO ALIGNES	32
FIGURE II-11: SPECTRE D'AMPLITUDE DE CASSY ET ARDUINO	32
FIGURE II-12: SIGNAL DE COURANT CASSY A 150HZ	34
FIGURE II-13: SIGNAL DE COURANT ARDUINO A 150HZ	34
FIGURE II-14: SUPERPOSITION DES SIGNAUX CASSY ET ARDUINO ALIGNES	35
FIGURE II-15: SPECTRE D'AMPLITUDE DE CASSY ET ARDUINO	36
FIGURE II-16: SIGNAL DE COURANT CASSY A 250 HZ	37
FIGURE II-17: SIGNAL DE COURANT ARDUINO A 150HZ	38
FIGURE II-18: SUPERPOSITION DES SIGNAUX CASSY ET ARDUINO ALIGNES	39
FIGURE II-19: SPECTRE D'AMPLITUDE DE CASSY ET ARDUINO	40
FIGURE II-20: SIGNAL DE COURANT CASSY A 350HZ	41
FIGURE II-21: SIGNAL DE COURANT ARDUINO A 350HZ	42
FIGURE II-22: SUPERPOSITION DES SIGNAUX CASSY ET ARDUINO ALIGNES	43
FIGURE II-23: SPECTRE D'AMPLITUDE DE CASSY ET ARDUINO	43
FIGURE II-24: MCC USB-205	45
FIGURE II-25: SIGNAL DE COURANT MCC USB-205 A 50HZ	47

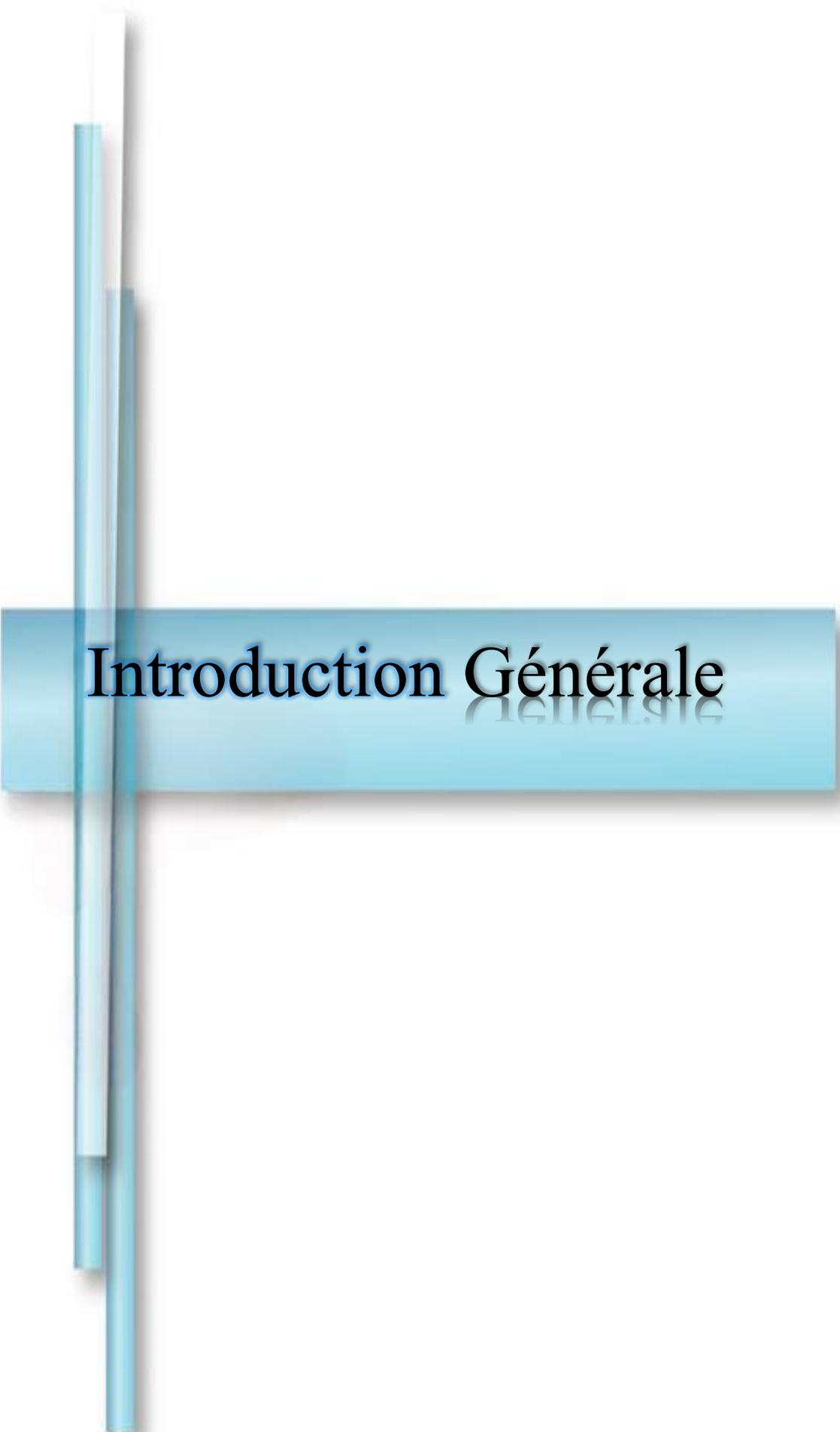
FIGURE II-26: SPECTRE D'AMPLITUDE DE MCC USB-205	47
FIGURE II-27: SIGNAL DE COURANT MCC USB-205 A 450Hz.....	49
FIGURE II-28: SPECTRE D'AMPLITUDE DE MCC USB-205	50
FIGURE III-1: CABLAGE COMPLET DU DISPOSITIF DE MESURE.....	54
FIGURE III-2: ALGORITHME ILLUSTRANT LES ETAPES DE SELECTION AUTOMATIQUE DES CAPTEURS	56
FIGURE III-3: SIGNAL DE COURANT ET DE TENSION (MCC USB-205).....	62
FIGURE III-4: SPECTRE D'AMPLITUDE DE MCC USB-205	63
FIGURE III-5: TRIANGLE DES PUISSANCES POUR UNE CHARGE RESISTIVE.....	64
FIGURE III-6: SIGNAL DE COURANT ET DE TENSION DES 3 LED	65
FIGURE III-7: SPECTRE D'AMPLITUDE DES 3 LED.....	66
FIGURE III-8: TRIANGLE DES PUISSANCES POUR UNE CHARGE NON LINEAIRE (LED).....	67
FIGURE III-9: MESURE DES GRANDEURS ELECTRIQUES D'UNE MACHINE ASYNCHRONE.....	68
FIGURE III-10: SIGNAL DE COURANT ET DE TENSION DE LA PHASE 1	69
FIGURE III-11: SIGNAL DE COURANT ET DE TENSION DE LA PHASE 2	69
FIGURE III-12: SIGNAL DE COURANT ET DE TENSION DE LA PHASE 3	70
FIGURE III-13: SPECTRE D'AMPLITUDE DE LA PHASE 1	70
FIGURE III-14: SPECTRE D'AMPLITUDE DE LA PHASE 2	71
FIGURE III-15: SPECTRE D'AMPLITUDE DE LA PHASE 3	71
FIGURE III-16 : TRIANGLE DES PUISSANCES POUR UNE CHARGE INDUCTIVE (MOTEUR A CAGE D'ECUREUIL).....	74

Liste des Tableaux

TABLEAU I-1: ANALYSE DU FACTEUR DE CRETE POUR DIFFERENTES FORMES D'ONDES DE COURANT.....	16
TABLEAU II-1: COMPARAISON DES AMPLITUDES DES HARMONIQUES ENTRE CASSY ET ARDUINO.	33
TABLEAU II-2: COMPARAISON DES AMPLITUDES DES HARMONIQUES ENTRE CASSY ET ARDUINO.	36
TABLEAU II-3: COMPARAISON DES AMPLITUDES DES HARMONIQUES ENTRE CASSY ET ARDUINO.	40
TABLEAU II-4: COMPARAISON DES AMPLITUDES DES HARMONIQUES ENTRE CASSY ET ARDUINO.	44
TABLEAU II-5: AMPLITUDES DES HARMONIQUES.	48
TABLEAU II-6: AMPLITUDES DES HARMONIQUES.	50
TABLEAU III-1: AFFECTATION DES RELAIS POUR LA SELECTION DES CAPTEURS DE COURANT..	57
TABLEAU III-2: CALCULE DES ERREURS.....	62
TABLEAU III-3: AMPLITUDES DES HARMONIQUES ET LA THD.	63
TABLEAU III-4: CALCULE DES ERREURS.....	65
TABLEAU III-5: AMPLITUDES DES HARMONIQUES ET LA THD.	66
TABLEAU III-6: LES VALEURS DE LA TENSION (RMS) ET DU COURANT (RMS).....	68
TABLEAU III-7: AMPLITUDES DES HARMONIQUES ET LA THD.	71
TABLEAU III-8: AMPLITUDES DES HARMONIQUES ET LA THD.	73

Symboles et abréviations

V	Tension	Volt (V)
I	Courant	Ampère (A)
P	Puissance active	Watt (W)
Q	Puissance réactive	Var
S	Puissance apparente	VA
D	Puissance déformante	VAd
ϕ	Angle de déphasage	Radian / degré
FP	Facteur de puissance	
THD	Taux de distorsion harmonique	Pourcentage (%)
FFT	Transformée de Fourier rapide	
f	Fréquence	Hertz (Hz)
f_n	Fréquence de l'harmonique de rang n	Hertz (Hz)
I_n	Courant de l'harmonique de rang n	Ampère (A)
V_n	Tension de l'harmonique de rang n	Volt (V)
RMS	Valeur efficace	Selon la grandeur (courant/tension)
ADC	Convertisseur analogique-numérique	
LED	Lampe (Diode électroluminescente)	
ACS712	Capteur de courant	
ZMPT101B	Capteur de tension	
IEC	Commission électrotechnique internationale	
IEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	



Introduction Générale

Introduction générale

La qualité de l'énergie électrique est un enjeu majeur, en particulier avec l'évolution des technologies et l'augmentation des charges électroniques sensibles. Une alimentation électrique stable est indispensable au bon fonctionnement des équipements industriels et domestiques.

Dans l'industrie, une mauvaise qualité de l'énergie peut provoquer des dysfonctionnements et des arrêts de production, engendrant des pertes économiques considérables. Cette problématique touche également les réseaux domestiques et commerciaux, où les équipements électroniques modernes sont de plus en plus sensibles aux fluctuations du réseau, [1].

La qualité de l'énergie électrique dépend de plusieurs personnes : ceux qui produisent l'électricité, ceux qui la transportent, ceux qui fabriquent les appareils, et ceux qui les utilisent. Comme chacun peut provoquer ou subir des problèmes différents, cela rend l'étude plus compliquée. Par exemple, un même problème comme une baisse de tension ou une forme d'onde déformée peut être expliqué différemment selon les règles utilisées. Ces règles sont définies par des organismes internationaux comme l'IEEE et l'IEC [2],[3].

Historiquement, la qualité de l'énergie électrique était principalement associée à la continuité du service. Toutefois, avec l'essor des équipements électroniques, les critères d'évaluation sont élargis. Aujourd'hui, elle ne se limite plus à la simple disponibilité du courant, mais prend aussi en compte plusieurs paramètres essentiels, [4], tels que :

- La forme d'onde (sinusoïdale idéale ou déformée),
- La tension (variations, creux et surtensions),
- La fréquence (stabilité du réseau),
- L'absence de perturbations électromagnétiques et harmoniques.

L'augmentation des charges non linéaires, telles que les variateurs de vitesse, les alimentations à découpage et les éclairages LED, a modifié les caractéristiques des signaux de tension et de courant. Ces charges génèrent des harmoniques, qui altèrent la sinusoïde idéale du réseau et peuvent entraîner des échauffements, des dysfonctionnements d'équipements et des pertes énergétiques importantes.

Dans ce contexte, ce mémoire vise à analyser et contrôler (diagnostic) la qualité de l'énergie électrique des charges et dispositifs, en proposant une méthode d'évaluation adaptée.

elle s'intéresse particulièrement aux perturbations affectant la qualité de l'énergie, notamment celles engendrées par les charges non linéaires.

Face à ces défis, il est essentiel d'étudier et de mesurer ces perturbations afin d'assurer une alimentation électrique fiable et conforme aux normes en vigueur.

Quels sont les principaux effets des charges non linéaires sur la qualité de l'énergie ? Comment mesurer et analyser efficacement ces perturbations ?

Pour répondre à ces questions, ce travail s'appuie sur une démarche expérimentale concrète, avec la réalisation d'un système de mesure intelligent capable d'analyser la qualité de l'énergie électrique à l'aide de capteurs et d'une carte d'acquisition. Le dispositif conçu repose notamment sur une carte d'acquisition de données, associée à des capteurs de courant et de tension, et un système de commutation automatique via des relais pour la sélection des voies de mesure.

Les signaux acquis sont ensuite traités par la transformée de Fourier (FFT) afin d'identifier le contenu harmonique, et d'en extraire la THD. L'analyse permet de calculer les différentes puissances électriques (active, réactive, apparente et déformante), ainsi que le facteur de puissance. L'ensemble de ces paramètres constitue une base solide pour évaluer la qualité de l'énergie électrique à différentes charges.

Afin d'atteindre ces objectifs, ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Chapitre I : Généralités sur la qualité d'énergie et les charges électriques

Ce premier chapitre expose le cadre théorique indispensable à la compréhension de la qualité de l'énergie électrique. Il décrit les principaux paramètres (tension, fréquence, forme d'onde) ainsi que les normes et standards internationaux qui définissent les seuils acceptables des perturbations. Il distingue les charges linéaires des charges non linéaires, en expliquant en détail comment ces dernières génèrent des harmoniques et altèrent la qualité du signal électrique. Le concept de taux de distorsion harmonique (THD) est également présenté comme un indicateur essentiel pour quantifier et analyser la qualité de l'énergie.

Chapitre II : Étude expérimentale et analyse comparative des systèmes d'acquisition

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale et à la comparaison de différents systèmes d'acquisition de signaux électriques. Il détaille les critères de sélection et les caractéristiques techniques de trois dispositifs : le système CASSY, la carte Arduino UNO

et la carte MCC USB-205. Les performances de ces systèmes sont évaluées à travers des tests expérimentaux incluant l'acquisition des signaux, leur traitement fréquentiel via la FFT et le calcul du THD. Cette comparaison permet de mettre en évidence les avantages et limites de chaque solution et d'orienter le choix vers le système le plus adapté pour la suite du projet.

Chapitre III : Analyse et contrôle de la qualité d'énergie

Le dernier chapitre décrit la conception et la mise en œuvre du dispositif de mesure intelligent développé pour ce travail. Il présente l'architecture matérielle et logicielle du système, le schéma de câblage et le principe de sélection automatique des voies de mesure par relais. L'algorithme de traitement des signaux permet d'appliquer la FFT pour identifier les harmoniques et calculer la THD ainsi que les différentes puissances électriques.

Enfin, des campagnes de mesures expérimentales sont menées sur plusieurs types de charges (résistive, non linéaire (LED), inductive (moteur asynchrone à cage d'écureuil), illustrant la capacité du dispositif conçu à diagnostiquer, analyser et évaluer efficacement la qualité de l'énergie électrique en conditions réelles.



CHAPITRE I

Généralités sur la qualité d'énergie et les charges électriques

I. Introduction

L'électricité est généralement distribuée sous forme de système triphasé avec une onde sinusoïdale. Ce mode de distribution est essentiel pour garantir une alimentation stable et efficace des équipements électrotechniques. L'idéal serait de conserver une tension parfaitement sinusoïdale, avec une amplitude et une fréquence constante, [1].

Cependant, l'évolution des technologies modernes, notamment l'électronique de puissance et les équipements informatiques, a fortement impacté la qualité de l'énergie électrique. Ces nouveaux dispositifs, souvent qualifiés de charges non linéaires, génèrent des courants déformés qui interagissent avec l'impédance du réseau. Cette interaction modifie la forme d'onde de la tension, provoquant ainsi des harmoniques et d'autres perturbations comme les creux de tension et les surtensions, [5].

La surveillance de la qualité de l'énergie est donc devenue une problématique essentielle pour les réseaux électriques modernes. Ce chapitre présente les principaux paramètres de la qualité de l'énergie, les normes et standards internationaux, ainsi que les différentes catégories de charges électriques et leur impact sur le réseau.

I.1 Paramètres de base de la qualité d'énergie

La qualité de l'énergie est assurée à travers plusieurs paramètres essentiels :

1. **Tension et courant** : Une alimentation stable doit maintenir une tension et un courant constante. Les variations excessives (surtensions ou augmentation de courant, sous-tensions ou abaissement de courant) peuvent endommager les équipements, [6].
2. **Fréquence de l'alimentation** : Tout écart par rapport à la valeur nominale (50 Hz ou 60 Hz selon les régions) peut perturber le bon fonctionnement des appareils sensibles.
3. **Forme d'onde** : Une onde sinusoïdale idéale est nécessaire pour éviter les perturbations électromagnétiques et assurer une transmission efficace de l'énergie.
4. **Harmoniques** : Ces composantes de fréquence multiples de la fondamentale sont générées par les charges non linéaires et confèrent la qualité de l'énergie.,[7].

I.2 Normes et standards internationaux (IEEE, IEC)

La qualité de l'énergie électrique est régulée par plusieurs organismes internationaux. Parmi les plus importants, on trouve :

- **IEEE Std 1159-2019** : Cette norme fournit des lignes directrices pour la mesure, l'analyse et l'évaluation de la qualité de l'énergie dans les systèmes électriques. Elle

couvre des aspects comme les **variations de tension**, les **coupures d'alimentation**, et les **harmoniques**, et définit des méthodes de mesure et des seuils pour chaque type de perturbation. Cette norme insiste sur l'importance de « maintenir une forme d'onde de tension stable et pure pour garantir le bon fonctionnement des équipements électriques sensibles », [8].

- Creux de tension : entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant 0.5 cycle à 1 minute.
 - Surtensions : entre 110 % et 180 % de la tension nominale pendant 0.5 cycle à 1 minute.
 - Harmoniques (THD) : ne dépasse pas 5 % pour garantir un fonctionnement normal des équipements
- **IEC 61000-2-2** : Cette norme définit les critères de qualité de l'énergie dans les réseaux de distribution électrique, en mettant l'accent sur les perturbations comme les surtensions, sous-tensions et les fluctuations de fréquence. Elle recommande des limites spécifiques pour les variations de tension afin de garantir un fonctionnement optimal des appareils, [9].
 - Tension efficace : doit rester dans une plage de $\pm 10\%$ autour de la tension nominale.
 - Fréquence de réseau : doit rester stable entre 49 Hz et 51 Hz.
 - Flicker :
 - Court terme ≤ 1
 - Long terme ≥ 0.8
 - Harmoniques (THD) $\leq 8\%$, mais idéalement $< 5\%$ pour un bon fonctionnement
 - **IEC 61000-4-7** : la norme établit un cadre précis pour la mesure des harmoniques de courant et de tension dans les réseaux basse tension. Elle assure que les résultats soient fiables, voici les éléments essentiels que cette norme précise :
 - **Circuit d'entrée de mesure** : les entrées de tensions et de courant doivent être conçues pour ne pas fausser le signal.

Exemple : un circuit d'entrée de courant doit avoir une faible impédance pour ne pas introduire d'erreurs dans la mesure. De même, un circuit d'entrée de tension doit avoir une haute impédance pour éviter de perturber le réseau.
 - **Précision des mesures** : la norme fixe des marges d'erreur maximales pour les appareils. **Exemple** : si on mesure une composante harmonique de 1 A, la tolérance

peut être de $\pm 5\%$, donc la mesure correcte doit être entre 0.95 A et 1.05 A. ce qui garantit la fiabilité et la cohérence des résultats,[10].

- **IEC 61000-3-2 :**

Spécifique aux équipements électroniques de consommation ≤ 16 A (comme les LED ou les alimentations de PC). Elle impose :

- Les lampes LED : une limitation des harmoniques impairs (3^e, 5^e, 7^e) à 3,5 % du courant fondamental, [11].

- **IEE 519 :**

La norme recommande de mesurer et d'analyser les harmoniques jusqu'au 50^e harmonique. Cette limite assure une évaluation complète de la distorsion, car les harmoniques au-delà du 50^e ordre ont généralement un impact négligeable sur la qualité de l'énergie électrique,[12].

L'application de ces normes permet de garantir un réseau électrique stable et de limiter l'impact des perturbations sur les équipements.

I.3 Les charges électriques et leur impact sur la qualité d'énergie

Les charges électriques connectées jouent un rôle fondamental dans la définition de la qualité de l'énergie. Selon leur nature, elles peuvent soit maintenir une bonne qualité du signal électrique, soit, au contraire, la perturber. Il existe principalement deux grandes catégories de charges : les charges linéaires et non linéaires, chacune ayant un effet différent sur la forme d'onde du courant et de la tension.

I.3.1 Les charges linéaires

Une charge est considérée comme linéaire si le courant qu'elle consomme est proportionnel à la tension appliquée sur elle. Si donc la tension est sinusoïdale, le courant l'est également. Toutes ces charges ne créent donc aucune distorsion harmonique. Parmi les charges linéaires, on compte :

- Les résistances (chauffages, lampes à incandescence).
- Les inductances (bobines, transformateurs, moteurs synchrones), lorsqu'elles sont non saturées ou à noyau d'air, présentent un comportement essentiellement inductif et linéaire.
- Les capacités (condensateurs de correction du facteur de puissance)

Ces éléments sont souvent privilégiés comme neutres ou peu perturbateurs vis-à-vis de la qualité d'énergie.

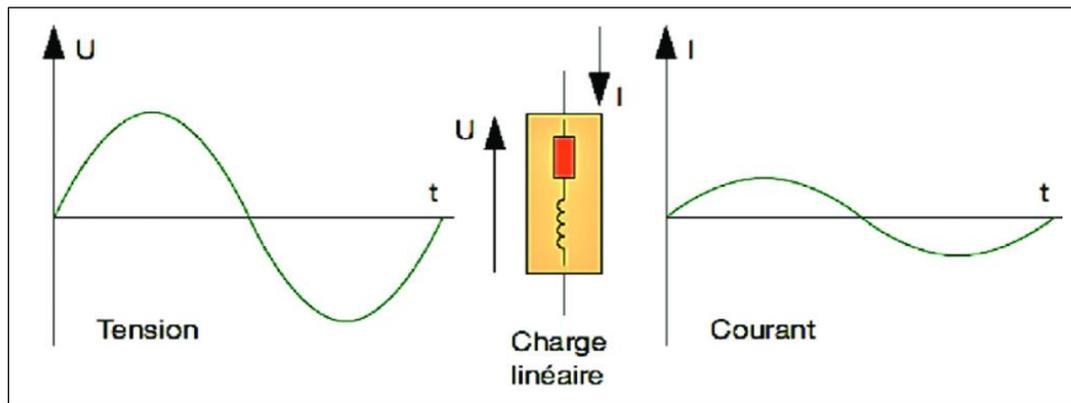


Figure I-1 : Signaux relatifs à une charge linéaire.

La puissance absorbée par une charge linéaire, qui se compose d'éléments résistifs, est simplement le produit de la tension et du courant :

$$P = U \times I$$

Mais en pratique, les circuits contiennent généralement des composants inductifs (les moteurs) ou capacitifs, qui introduisent un décalage temporel entre la tension et le courant. Ce déphasage est illustré par la **Figure I-2** et est représenté par l'angle φ et a une influence directe sur la puissance active réellement consommée.

Ce déséquilibre est traduit par le facteur de puissance (**FP**), qui définit l'efficacité du transfert d'énergie :

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{\text{Puissance active}}{\text{Puissance apparente}}$$

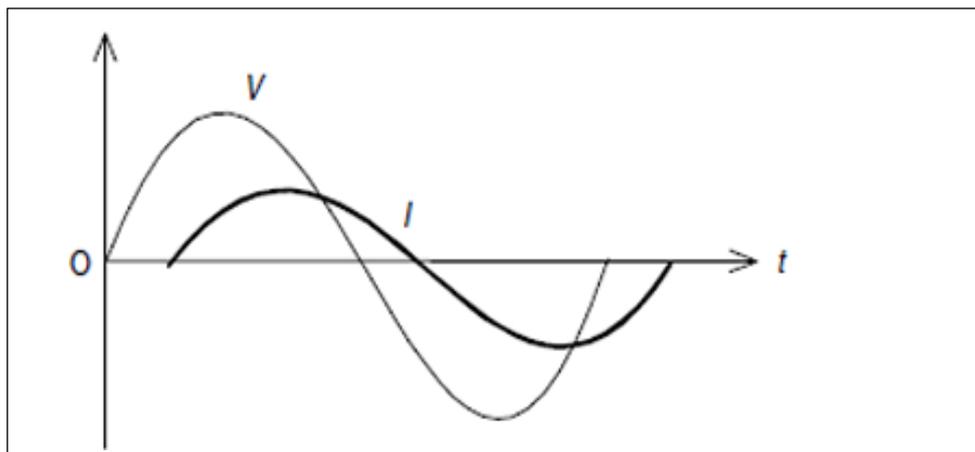


Figure I-2: Différence de phase entre tension et courant.

Le facteur de puissance (**FP**) est défini comme le rapport entre la puissance active (**P**) et la puissance apparente (**S**), et il ne peut jamais dépasser 1 (**FP ≤ 1**) :

- **FP = 1** : Charge purement résistive (pas de déphasage).
- **FP < 1** : Charge inductive ou capacitive (déphasage présent).

La puissance apparente est calculée selon la formule :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{I-2})$$

Où

P : Puissance active et **Q** : Puissance réactive.

La puissance active d'un récepteur linéaire en régime sinusoïdale est exprimée par les deux Formules suivantes :

$$\text{En monophasé : } P = U \times I \times \cos\varphi \quad (\text{I-3})$$

En triphasé **U** représente la tension entre phase (Complexe) et **V** la tension entre phase et neutre (simple), ce qui donne la formule :

$$U = \sqrt{3} \times V$$

$$\text{En triphasé : } P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \text{ ou bien : } P = 3 \times V \times I \times \cos\varphi \quad (\text{I-4})$$

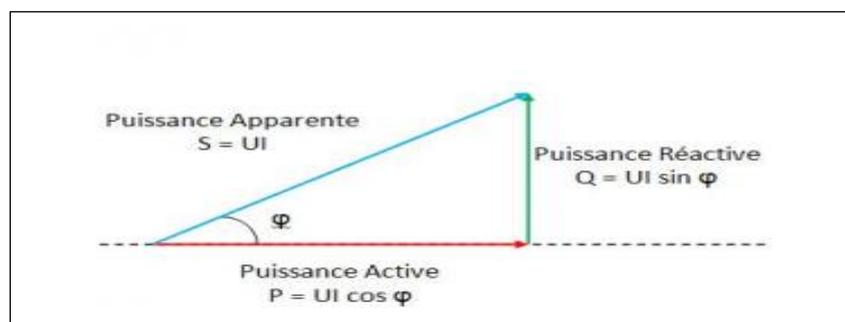


Figure I-3: Diagramme de puissance avec une charge linéaire.

I.3.2 Les charges non linéaires

Les charges non linéaires sont définies par leur comportement non proportionnel entre tension et courant. Lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale, le courant absorbant est d'ondes déformées, générant des harmoniques qui dénaturent la qualité de l'énergie électrique. Il est illustré dans la figure I-4, où il apparaît bien la distorsion du courant par rapport à la tension sinusoïdale. Parmi les exemples de charges non linéaires : (Onduleurs, redresseurs, variateurs de vitesse) ainsi que Les circuits magnétiques saturés, et les lampes à décharge.

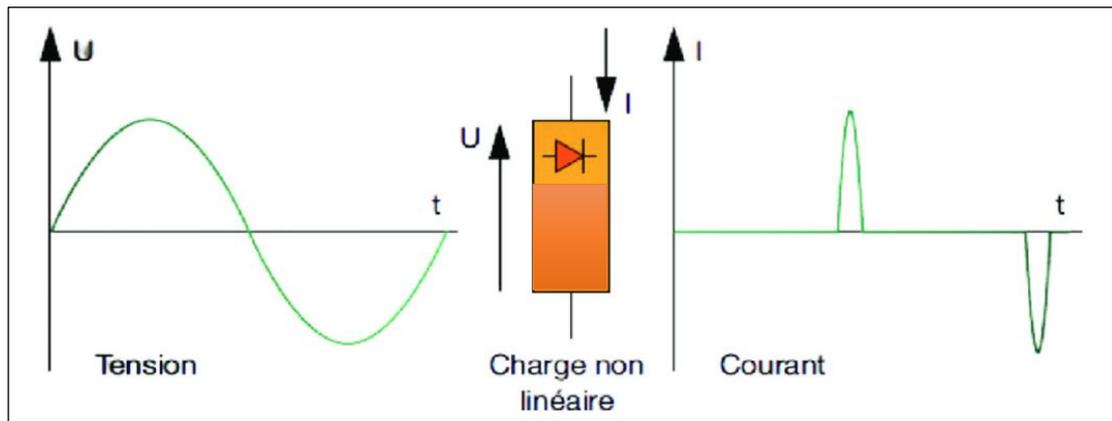


Figure I-4: Signaux relatifs à une charge non linéaire

I.3.2.1 Puissances

- **Puissance active (P)**

La Puissance active, exprimée en watts (W), est la quantité d'énergie réellement convertie en travail utile par une charge sur une période donnée, et elle est calculée comme la moyenne de la puissance instantanée sur un cycle complet.

$$P = \frac{1}{T} \times \int_0^T v(t) \times i(t) dt \quad (I-5)$$

On montre que :

$$p = V_0 I_0 + V_1 I_1 \cos\varphi_1 + V_2 I_2 \cos\varphi_2 + V_3 I_3 \cos\varphi_3 + \dots , [13] \quad (I-6)$$

$V_0 I_0$ Contribution des composantes continues

$V_1 I_1 \cos\varphi_1$ Contribution des fondamentales

$V_2 I_2 \cos\varphi_2$ Contribution des harmoniques de rang 2

$V_3 I_3 \cos\varphi_3$ Contribution des harmoniques de rang 3

- **Puissance réactive (Q)**

La puissance réactive, exprimée en volts-ampère réactifs (VAR), est la composante de la puissance électrique qui circule entre la source et la charge sans être convertie en travail. Elle est associée aux éléments réactifs tels que les inductances et les capacités, qui emmagasinent et restituent périodiquement de l'énergie (ces composants provoquent un décalage de phase entre la tension et le courant, ce qui engendre une circulation d'énergie entre la source et la charge, sans être consommée définitivement).

$$Q = V_1 I_1 \sin\varphi_1 + \sum_{n>2} V_n I_n \sin\varphi_n , [13] \quad (I-7)$$

- **Puissance apparente (S)**

La puissance apparente, exprimée en volts-ampères (VA), qui représente la puissance totale fournie au système :

$$S = V I \quad (\text{I-8})$$

- **Puissance déformante (D)**

Dans les systèmes électriques contenant des **harmoniques**, la relation classique de la puissance Apparente donnée par : $S^2 = P^2 + Q^2$ n'est plus valide. La présence d'harmonique provoque une distorsion des formes d'onde de la tension et du courant, introduisant une nouvelle composante appelée **Puissance déformante**, exprimée en volts-ampères déformants (VAd).

On introduit la notion de **puissance déformante D** telle que :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{I-9})$$

$$\Rightarrow D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (\text{I-10})$$

- **Facteur de puissance (FP)**

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad \text{Et} \quad FP \neq \cos\varphi \quad (\text{I-11})$$

- **Facteur de déformation (FD)**

Le facteur de déformation **FD** représente le lien entre **FP** et $\cos\varphi$

$$FD = \frac{FP}{\cos\varphi} \quad \text{Donc} \quad FP = \cos\varphi \times FD \quad (\text{I-12})$$

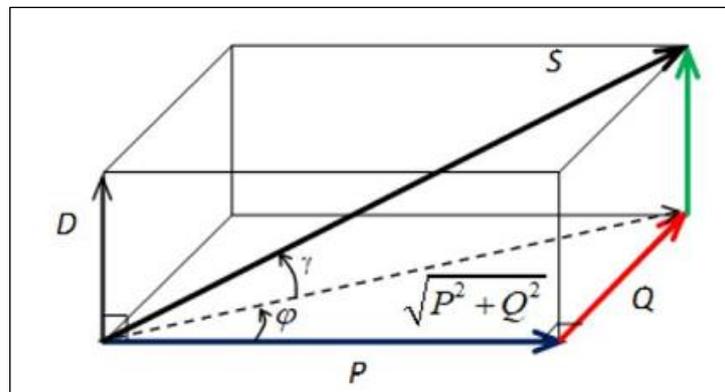


Figure I-5: Diagramme de puissance avec une charge non linéaire.

I.3.3 Perturbations créées par les charges non linéaires

Les charges non linéaires, telles que les redresseurs, LEDs et les équipements électroniques, génèrent des courants non sinusoïdaux même lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale. Cette distorsion crée des harmoniques qui altèrent la qualité de l'énergie électrique.

I.4 Harmonique et perturbation

Les harmoniques électriques, qu'elles concernent la tension ou l'intensité du courant, sont aujourd'hui des paramètres essentiels dont la gestion et le contrôle sont indispensables. Cela permet de prévenir l'apparition de problèmes liés à leur présence sur le réseau électrique. La question qui se pose alors est : Qu'est-ce qu'une harmonique ?

I.4.1 Harmonique

Pour ce faire, remontons au début du XIX^e siècle, lorsque le mathématicien Jean Baptiste Fourier a établi que toute forme d'onde périodique peut être décomposée en une somme de sinusoïdales simples, de fréquences et d'amplitudes différentes, appelées harmoniques.

Dans les systèmes électriques, la fréquence fondamentale est généralement de 50 Hz ou 60 Hz, mais des perturbations peuvent se manifester sous forme de courants ou de tensions de fréquences multiples de cette fréquence fondamentale. Par exemple, dans un réseau de 50 Hz, des harmoniques comme la 5^e (250 Hz) ou la 7^e (350 Hz) peuvent s'ajouter à la sinusoïde de la fréquence fondamentale. Ces harmoniques modifient la forme de l'onde, la rendant non sinusoïdale.

I.4.2 Effets des perturbations harmoniques

Les perturbations harmoniques peuvent entraîner des conséquences immédiates et à long terme sur les installations électriques et les équipements connectés :

1- Effets instantanés

- **Dysfonctionnements** : Perturbation des dispositifs de mesure et de communication.
- **Interférences électromagnétiques (EMI)** : Bruit dans les signaux de contrôle.
- **Instabilité du réseau** : Variations de tension et interruptions temporaires.

2- Effets à terme

- **Surchauffe** : Echauffement des câbles et transformateurs (pertes joule accrues).
- **Dégradation de l'isolation** : Réduction de la durée de vie des équipements.
- **Coûts accrus** : Maintenance et remplacements prématurés.

I.4.3 Développement du courant en série de Fourier

La décomposition en série de Fourier permet de représenter tout signal périodique comme une somme infinie de composantes sinusoïdales de fréquences multiples d'une fréquence fondamentale. Pour un courant électrique déformé par des charges non linéaires, cette méthode est essentielle pour :

- Identifier les harmoniques présentes.
- Quantifier leur amplitude et phase.
- Analyser leur impact sur le réseau électrique.

Le rang de chaque harmonique est défini par le rapport entre sa fréquence et celle de la fondamentale. Cela permet d'analyser l'importance de chaque composante harmonique et de mieux comprendre l'impact de chaque fréquence sur le signal global :

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

Avec :

f_n : fréquence de l'harmonique n

f_1 : fréquence du fondamental

Une fonction périodique $f(t)$ de période T , qui respecte les conditions de Dirichlet, peut être exprimée de manière série de Fourier. Ces conditions stipulent que $f(t)$ doit être continue par morceaux et périodique avec une période T . Dans ce cas, la série de Fourier converge de manière ordinaire et permet de représenter $f(t)$ sous l'une des formes suivantes :

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (\text{I-13})$$

$$\text{Où : } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

- **Calculs des coefficients de fourier :**

Pour tout $n \geq 0$, on a :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t). dt \quad (\text{I-14})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t). \cos(n\omega t). dt \quad (\text{I-15})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t). \sin(n\omega t). dt \quad (\text{I-16})$$

$$- \text{ Amplitude de l'harmonique de rang } n : \quad c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (\text{I-17})$$

$$- \varphi_n \text{ Phase à l'origine des temps telle que : } \quad \text{tang}(\varphi_n) = \frac{b_n}{a_n} \quad (\text{I-18})$$

Remarques importantes :

- Si la fonction f est paire, tous les coefficients b_n sont nuls ($b_n = 0$).

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos(nwt) \cdot dt \tag{I-19}$$

Exemple 

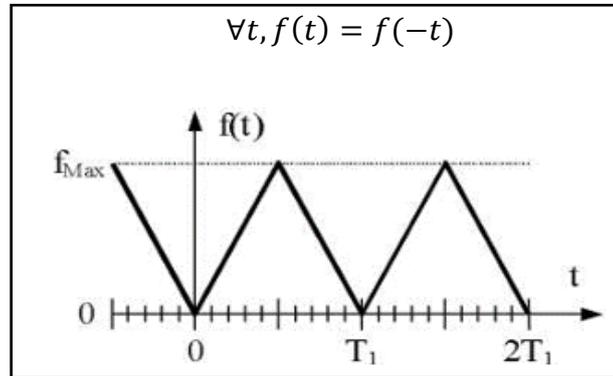


Figure I-6: Fonction paire périodique

- Si la fonction est impaire, tous les coefficients a_n sont nuls, ($a_0 = 0$ et $a_n = 0$ pour $n \neq 0$)

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin(nwt) \cdot dt \tag{I-20}$$

Exemple 

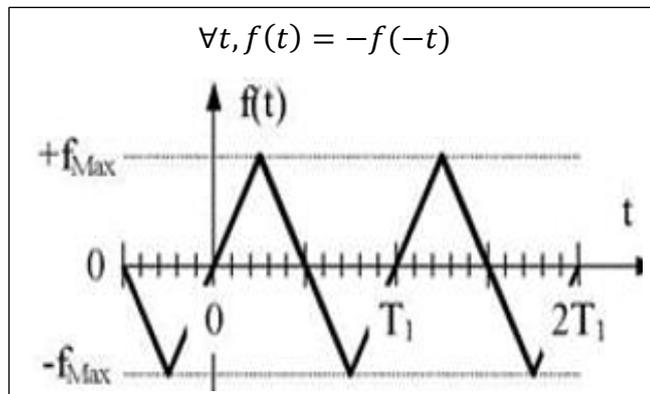


Figure I-7: Fonction impaire périodique

- Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

$$\forall t, f\left(t + \frac{T}{2}\right) = -f(t) \Rightarrow \begin{cases} a_0 = 0 \\ a_{2(p+1)} = 0 \\ b_{2(p+1)} = 0 \end{cases} \text{ et } \begin{cases} a_{2(p+1)} = \frac{4}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos[(2p + 1) \cdot wt] \cdot dt \\ b_{2(p+1)} = \frac{4}{T} \int_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}} f(t) \cdot \sin[(2p + 1) \cdot wt] \cdot dt \end{cases} \quad (p \in \mathbb{N})$$

Graphiquement, en faisant glisser d'une demi-période la partie de la fonction compris entre t_1 et $t_1 + \frac{T}{2}$, on observe une symétrie par rapport à l'axe des temps.

Exemple 

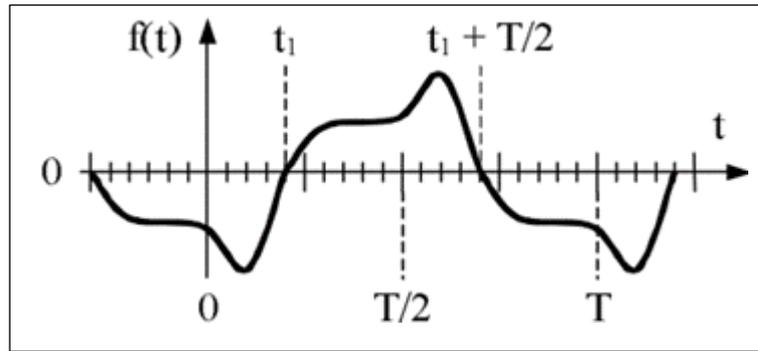


Figure I-8: Fonction périodique à symétrie paire

I.4.4 Représentation spectrale

Les coefficients C_n correspondent aux valeurs maximales des sinusoïdes correspondant aux fréquences multiples de la fréquence fondamentale $f, 2f, 3f, etc.$, dans la décomposition harmonique d'un signal. Ces amplitudes peuvent être interprétées de manière claire, ce qui permet de représenter cette décomposition sous forme de spectre, où l'on affiche les valeurs efficaces des différentes composantes en fonction de leur fréquence. Ainsi, $I_2, I_3, I_4, I_5, \dots$ désignent les valeurs efficaces des courants harmoniques de rangs 2, 3, 4, 5 etc., qui résultent de l'expression du courant $i(t)$ en série de Fourier :

$$i(t) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2) + I_3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3\omega t + \varphi_3) \dots \quad (I-21)$$

Pour chaque courant harmonique de rang n , la valeur efficace est donnée par :

$$I_n = \frac{C_n}{\sqrt{2}}$$

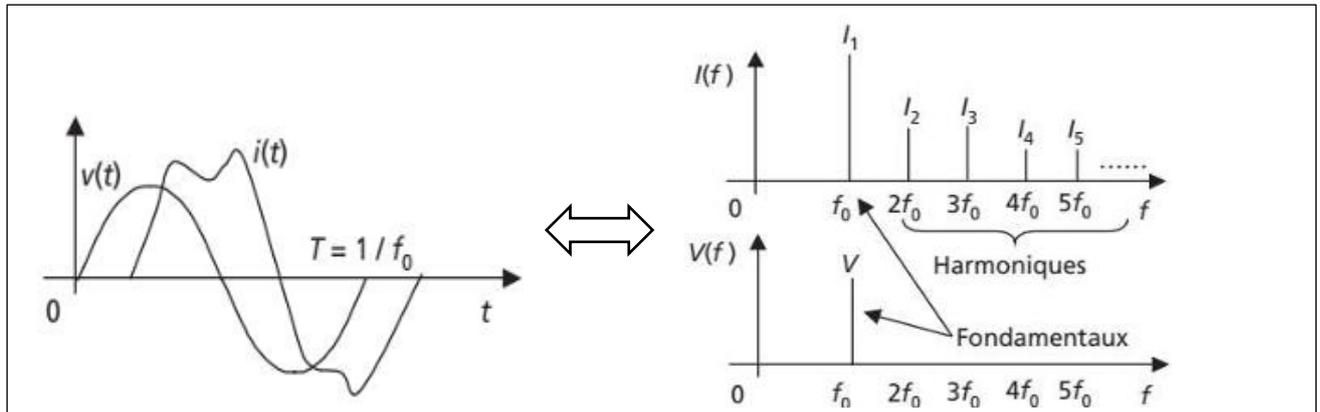
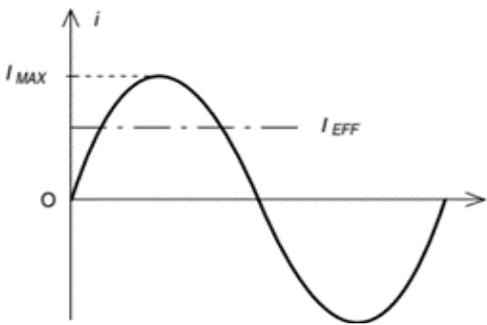
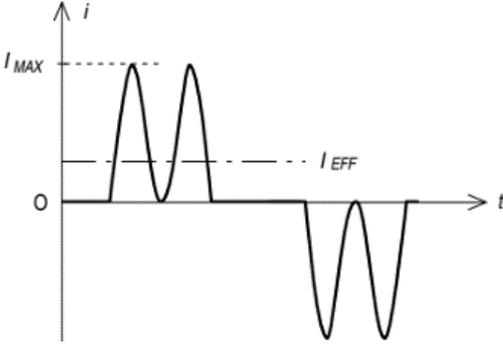


Figure I-9: Représentation spectrale d'un signal périodique.

I.5 Le facteur de crête

Le rapport entre la valeur crête (I_{MAX}) d'une onde sinusoïdale et la valeur efficace de ce même signal.

Tableau I-1: Analyse du Facteur de Crête pour Différentes Formes d'Ondes de Courant

Courant	Forme d'onde	Facteur de crête (fc)
Courant sinusoïdale		$\frac{I_{MAX}}{I_{efficace}} = \sqrt{2} = 1.414$
Courant déformé		$F_c = \frac{\text{valeur}_{\text{crête}}}{\text{valeur}_{\text{efficace}}}$

I.5.1 Calcul de la valeur efficace du courant déformé

Le calcul de la valeur efficace du courant déformé s'obtient donc en effectuant la somme quadratique des courants :

$$I_{R.M.S} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{(I_{\text{Fondamentale}}^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots)} \quad (I-22)$$

I.6 Le taux individuel d'harmonique du rang n

Le taux de distorsion individuel d'harmonique de rang n est le rapport entre la valeur efficace I_n de l'harmonique considérée (n) par rapport à la valeur efficace du fondamentale I_1 :

$$\tau_n = \frac{I_n}{I_1}$$

I.7 Le taux de distorsion harmonique (THD)

Afin d'avoir une représentation globale de la déformation d'un signal, il est essentiel de quantifier la taille des distorsions provoquées par la présence d'harmoniques. Pour cela, on définit le taux de distorsion harmonique totale (THD – *Total Harmonic Distortion*), pesant dans quelle mesure un signal, qu'il soit de tension ou de courant, s'écarte de la forme sinusoïdale pure.

Puisque Les harmoniques sont des fréquences multiples de la fréquence fondamentale et leur présence entraîne une déformation du signal. Donc plus un signal est déformé, plus son THD est élevé.

Le THD est défini comme le rapport entre la valeur efficace de l'ensemble des courants harmoniques et la valeur efficace du courant fondamental I_1 :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (\text{I-23})$$

$$\text{THD} = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{\text{rms}}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (\text{I-24})$$

Ainsi, la valeur efficace du courant total I_{rms} peut être exprimé en fonction du THD :

$$I_{\text{rms}} = I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = I_1 \cdot \sqrt{1 + \text{THD}^2} \quad (\text{I-25})$$

Cette relation met en évidence l'impact des harmoniques sur la valeur efficace du courant, souligne l'importance de leur analyse pour le contrôle et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

I.7.1 Expression des puissances en fonction des éléments de la décomposition en série de Fourier

a) Pour un courant déformé et une tension non déformée (formes sinusoïdales)

➤ La puissance active est donnée :

- **En monophasé** : $P = \langle p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{(T)} i(t) \cdot v(t) \cdot dt = V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ (I-26)

- **En triphasé** : $P = 3 \cdot \langle p(t) \rangle = 3 \cdot \frac{1}{T} \int_{(T)} i(t) \cdot v(t) \cdot dt = 3 \cdot V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$ (I-27)

➤ La puissance réactive est définie aussi à partir du fondamental de courant :

- **En monophasé** : $Q = V \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$ (I-28)

- **En triphasé** : $Q = 3 \cdot V \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$ (I-29)

➤ Pour déterminer la relation générale des puissances, on écrit :

Et Comme cela a été mentionné précédemment : $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

- **En monophasé** : $s^2 = V^2 \times I^2 = (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots) \times (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots)$

$$V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots = V_1^2 \quad \text{Car on a une alimentation sinusoïdale en tension.}$$

$$I^2 = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots = I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = I_1^2 + THD^2 \times I_1^2$$

$$\text{Et comme : } S^2 = V^2 \times I^2 = V^2 \times \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = V^2 \times (I_1^2 + THD^2 \times I_1^2)$$

$$\text{Donc : } S^2 = V^2 \times I_1^2 + V^2 \times I_1^2 \times THD^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

$$\text{Donc : } P^2 + Q^2 = V^2 \times I_1^2 \quad \text{Et} \quad D^2 = V^2 \times I_1^2 \times THD^2$$

On identifie ainsi la relation exprimant la puissance déformante :

$$D = V \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = V \times \sqrt{I^2 - I_1^2} = V \times I_1 \times THD \quad (\text{I-30})$$

- **En triphasé :** $S^2 = 3^2 \times V^2 \times I^2 = 3^2 \times (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots) \times (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots)$

$$V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots = V_1^2 \quad \text{Car on a une alimentation sinusoïdale en tension.}$$

$$I^2 = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots = I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = I_1^2 + THD^2 \times I_1^2$$

$$\text{Et comme : } S^2 = 3^2 \times V^2 \times I^2 = 3^2 \times V^2 \times \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = 3^2 \times V^2 \times (I_1^2 + THD^2 \times I_1^2)$$

$$\text{Donc : } S^2 = 3^2 \times V^2 \times I_1^2 + 3^2 \times V^2 \times I_1^2 \times THD^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

$$\text{Donc : } P^2 + Q^2 = 3^2 \times V^2 \times I_1^2 \quad \text{Et} \quad D^2 = 3^2 \times V^2 \times I_1^2 \times THD^2$$

On identifie ainsi la relation exprimant la puissance déformante :

$$D = 3 \times V \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = 3 \times V \times \sqrt{I^2 - I_1^2} = 3 \times V \times I_1 \times THD \quad (\text{I-31})$$

b) Pour un courant et une tension déformée

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (\text{I-32})$$

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \quad (\text{I-33})$$

avec : I_n est la valeur efficace de l'harmonique n du courant

V_n est la valeur efficace de l'harmonique n de la tension

ϕ_n est la phase de l'harmonique n du courant

θ_n est la phase de l'harmonique n de la tension

ω_0 est la pulsation fondamentale, $\omega_0 = 2\pi f_0$

➤ La puissance active est donnée par :

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \cdot dt \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (\sqrt{2} \cdot V_n) \times (\sqrt{2} \cdot I_n) \times \cos(\theta_n - \phi_n) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos(\theta_n - \phi_n) \end{aligned} \quad (\text{I-34})$$

➤ La puissance réactive est donnée par :

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (\sqrt{2} \cdot V_n) \times (\sqrt{2} \cdot I_n) \times \sin(\theta_n - \phi_n) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \sin(\theta_n - \phi_n) \end{aligned} \quad (\text{I-35})$$

➤ La puissance apparente est donnée par :

$$\begin{aligned} S &= V \cdot I \\ &= \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \cdot I_n^2} \\ &= V_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2} \\ &= S_1 \cdot \sqrt{1 + THD_V^2} \cdot \sqrt{1 + THD_I^2} \end{aligned} \quad (\text{I-36})$$

Avec S_1 est la puissance apparente à la fréquence fondamentale

➤ La puissance déformante est donnée par :

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) \quad (\text{I-37})$$

➤ Le facteur de puissance est donné par :

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THD_V^2} \cdot \sqrt{1+THD_I^2}} = Fp_{disp} \cdot Fp_{dist} \quad (\text{I-38})$$

$$Fp_{disp} = \frac{P}{S_1} \quad (\text{I-39})$$

$$Fp_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_V^2} \cdot \sqrt{1+THD_I^2}} = \frac{V_1}{V} \cdot \frac{I_1}{I} = \frac{S_1}{S} \quad (\text{I-40})$$

Avec :

Fp_{disp} : Déplacement de facteur de puissance **DPF** (Displacement power factor).

Fp_{dist} : Le facteur de puissance de distorsion.

I.7.2 Importance du THD dans l'analyse de la qualité d'énergie

La qualité de l'énergie électrique est un facteur clé pour assurer le bon fonctionnement des équipements et des réseaux électriques. Parmi les paramètres les plus critiques à surveiller figure la distorsion harmonique totale (THD), qui reflète le niveau de contamination harmonique dans un système d'alimentation. Un **THD élevé** peut détériorer la qualité de l'énergie, provoquant des dysfonctionnements, une surconsommation d'énergie et des pannes prématurées des équipements. La **réduction du THD** est essentielle pour améliorer la durée de vie et l'efficacité des appareils électriques.

I.7.2.1 Méthode de mesure du THD pour l'évolution de la qualité de l'énergie

1- Analyse du spectre harmonique

L'analyse du spectre harmonique permet d'identifier les composantes indésirables du signal électrique. Les harmoniques sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale (50 Hz ou 60 Hz), et leur présence excessive peut altérer la qualité de l'énergie.

2- Utilisation d'analyseurs de qualité de l'énergie

Les analyseurs de qualité de puissance (**PQA**) permettent de mesurer directement le **THD** en effectuant :

- Une connexion au réseau électrique pour relever les données.
- Une analyse des signaux pour afficher le **spectre harmonique**.
- Un calcul automatique du **THD** en fonction des valeurs RMS des différentes composantes du signal.

3- Mesure avec un oscilloscope numérique

Un oscilloscope numérique peut capturer les formes d'onde de tension et de courant. En appliquant une **Transformée de Fourier (FFT)**, il est possible d'analyser le contenu harmonique du signal et d'en extraire le **THD**.

4- Calcul du THD avec des logiciels spécialisés

Des outils comme **MATLAB** ou **Python** permettent d'effectuer des analyses avancées des signaux électriques. Grâce aux bibliothèques **NumPy** et **SciPy**, il est possible d'appliquer

Une **Transformée de Fourier Rapide (FFT)** pour identifier les harmoniques et calculer le **THD** avec précision.

I.8 Problèmes courants de qualité de l'énergie

La qualité de l'énergie électrique est déterminée par le degré de conformité de la tension, de la fréquence et de la forme d'onde avec la norme fixée. Tout écart peut entraîner des dysfonctionnements, des intermittences et des usures prématurées du matériel.

I.8.1 Variations de tension

Les variations de tension sont des fluctuations du niveau de tension fournie par le réseau électrique. Elles peuvent être classées en quatre catégories :

- **Creux de tension** : Chute rapide de la tension, typiquement. Pouvant endommager les Composants électroniques.
- **Surtension** : Une augmentation excessive de la tension pouvant endommager les Composants électroniques.
- **Variations à long terme** : Des fluctuations continues qui peuvent être causées par des changements de charge sur le réseau.
- **Flicker** : est une variation rapide et répétitive de la tension qui provoque des fluctuations de luminosité dans les lampes.

Les variations de tension sont souvent causées par des charges fluctuantes (démarrage de moteurs, soudage), des déséquilibres de charge, ou des régulations de réseau inefficaces. Leur impact peut inclure une réduction de l'efficacité des moteurs, des perturbations dans les systèmes informatiques et une usure prématurée des composants. Elles peuvent provoquer un inconfort visuel, une fatigue oculaire, déclencher des crises d'épilepsie chez les personnes photosensibles.

I.9 Conclusion

Ce premier chapitre a établi le cadre théorique de la qualité de l'énergie en définissant les grandeurs électriques de base et les perturbations les plus courantes (distorsions harmoniques, variations de tension, ...etc). Il a également rappelé les normes internationales en ce qui concerne les harmoniques dans le réseau électrique. Ces principes et formulations permettront de valider dans la suite du mémoire les méthodes de mesure et de traitement des perturbations, en particulier le choix des cartes d'acquisition et le calcul de la FFT, du THD et des puissances.

The page features two vertical decorative bars on the left side. The outer bar is light blue and the inner bar is a slightly darker shade of blue. Both bars have a subtle gradient and a soft shadow effect.

CHAPITRE II

Étude expérimentale et analyse comparative des systèmes d'acquisition

II. Introduction

Dans toute étude expérimentale sur la qualité de l'énergie électrique, le choix des dispositifs de mesure est crucial. La fidélité des signaux capturés conditionne directement la validité des analyses spectrales, notamment celles concernant les harmoniques et la THD.

Pour un choix adapté du système d'acquisition nous présentons dans ce chapitre une étude comparative de trois systèmes d'acquisition pour l'enregistrement de signaux de courant. Nous détaillons leurs caractéristiques techniques, leurs performances en acquisition temporelle et fréquentielle, ainsi que leurs limites pratiques. Des essais expérimentaux permettront d'évaluer leur précision à travers des analyses FFT et THD sur des signaux sinusoïdaux à différentes fréquences. Ce chapitre présente également le matériel utilisé dans les mesures expérimentales.

II.1 Critères de sélection d'une carte d'acquisition

Dans le cadre de l'analyse de la qualité de l'énergie, le système d'acquisition joue un rôle fondamental. En effet, les signaux issus de charges non linéaires sont souvent déformés et riches en harmoniques. Pour en restituer fidèlement la forme d'onde, le système d'acquisition doit satisfaire à plusieurs exigences :

II.1.1 Fréquence d'échantillonnage

La fréquence d'échantillonnage représente le nombre d'échantillons mesurés par seconde. Selon le théorème de **Shannon-Nyquist**, cette fréquence doit être au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale du signal à analyser, pour éviter les phénomènes d'aliasing.

$$f_e \geq 2 \times f_{max}$$

Exemple : pour analyser les harmoniques jusqu'à 450 Hz (soit 9^e harmonique d'un réseau 50 Hz), la fréquence d'échantillonnage minimale doit être d'au moins 900 Hz. En pratique, une marge plus importante est recommandée pour améliorer la résolution spectrale.

II.1.2 Résolution du convertisseur analogique-numérique (ADC)

La résolution du système d'acquisition est exprimée en **bits**, et détermine le nombre de niveaux disponibles pour numériser le signal analogique.

- Une résolution de **10 bits** permet de discrétiser le signal en $2^{10} = 1024$ niveaux.
- Une résolution de **16 bits** permet quant à elle $2^{16} = 65536$ niveaux.

Et plus cette résolution est élevée, plus la mesure sera précise, notamment pour détecter les faibles harmoniques noyées dans le signal principal.

II.1.3 Nombre de points par période

Ce paramètre influence directement la précision de la FFT. Plus il y a de points par période du signal fondamental, plus la décomposition fréquentielle sera fine.

Exemple : pour une fréquence de 50 Hz et un échantillonnage à 5000 Hz, le nombre de points par période est :

$$\frac{5000}{50} = 100 \text{ points}$$

Un minimum de 50 à 100 points par période est recommandé pour une analyse harmonique fiable.

II.1.4 Compatibilité avec les capteurs

La carte d'acquisition doit être compatible avec les niveaux de tension délivrés par les capteurs et capable de traiter les fréquences présentes dans les signaux mesurés. Les signaux doivent rester dans la plage admissible de la carte et la fréquence d'échantillonnage doit être suffisante pour éviter toute distorsion ou perte d'information notamment lors de l'analyse des harmoniques.

II.2 Présentation des capteurs utilisés

II.2.1 Capteur de courant ACS712

Le capteur **ACS712**, conçu par Allegro MicroSystems, repose sur l'effet Hall pour mesurer les courants alternatifs (AC) et continus (DC). Il détecte le champ magnétique généré par le courant traversant un conducteur intégré, puis le convertit en une tension de sortie linéaire.

Ce capteur présente plusieurs avantages :

- Isolation galvanique entre la charge et le circuit de mesure.
- Utilisation sécurisée même en présence de tensions élevées.
- Compact et facile à intégrer.

Il est décliné en trois versions :

- $\pm 5\text{A}$ Avec une sensibilité de 185 mV/A.

- $\pm 20A$ Avec une sensibilité de 100 mV/A.
- $\pm 30A$ Avec une sensibilité de 66 mV/A.

Il est utilisé dans des applications telles que le contrôle de moteurs, la gestion de charges, les alimentations à découpage et la protection contre les surdensités, [14].

- **Relation entrée-sortie :**

$$V_{out} = V_{ref} + (Sensibilité \times I_{mesuré})$$

Ou $V_{ref} = 2.5V$ pour une alimentation $V_{cc} = 5V$.

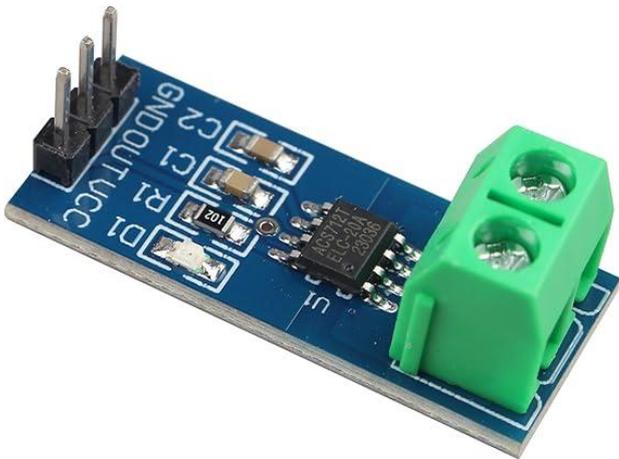


Figure II-1 : Capteur de courant ACS712

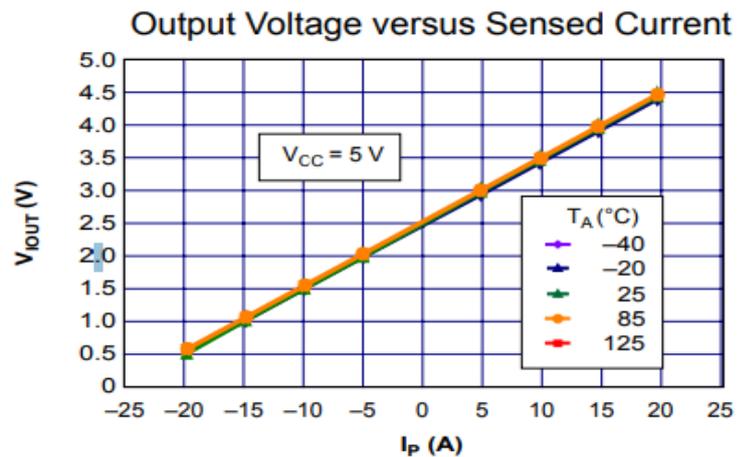


Figure II-2 : L'allure de la tension de sortie du capteur ACS712ELC-20A

II.2.2 Capteur de tension ZMPT10B :

Le capteur ZMPT10B, fabriqué par Qingxian Zeming Langxi Electronic, est un transformateur de tension miniature conçu pour la mesure des tensions alternatives jusqu'à 1000V.

Il repose sur le principe de l'induction électromagnétique : un rapport de transformation 1000 :1000 entre le primaire et le secondaire, fournissant un courant secondaire Nominale de 2mA en sortie, converti en tension via une résistance de charge. Ce dispositif assure une tension galvanique allant jusqu'à 4 KV entre le réseau mesuré et le circuit d'acquisition, garantissant la sécurité des opérateurs lors des mesures sur des systèmes haute tension. Il est couramment employé pour la surveillance des réseaux domestiques et industriels, la protection des équipements contre les surtensions et anomalies de tension, [15].

- **Relation entrée-sortie :**

$$V_{out} = \left(\frac{V_{in}}{R1} \right) \times R2$$

Où :

- R1 : Résistance de limitation de courant (en série avec l'entrée).
- R2 : Résistance d'échantillonnage (en parallèle avec la sortie)

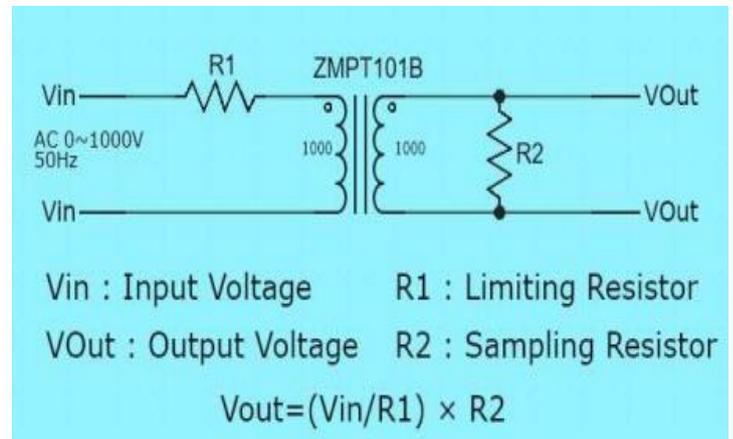
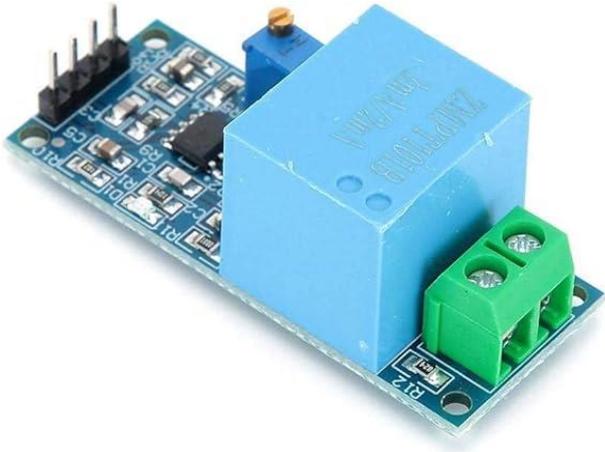


Figure II-3: Capteur de tension ZMPT101B

II.3 Générateur de signal :

Le générateur ASR-2100, développé par GW Instek, est une source d'alimentation programmable AC/DC conçue pour les applications de test avancées, il permet de produire des signaux sinusoïdaux purs, ainsi que des formes d'ondes carrées, triangulaires, ou arbitraires, avec une distorsion harmonique totale inférieure à 0.5%.



Figure II-4: Alimentation GW Instek ASR-2100, [16]

II.3.1 Caractéristiques techniques :

- Puissance de sortie : 1000 VA.
- Tension maximale :

- AC : 350 V RMS
- DC : 500 V
- Fréquence de sortie : jusqu'à 999.9 Hz
- Analyse harmonique intégrée : tension et courant
- Sécurité :
 - Protection contre surintensité
 - Protection contre surcharge
 - Protection thermique
 - Alarme de défaillance de ventilation

II.4 Présentation des Systèmes d'acquisition :

II.4.1 Système CASSY-524010 :

Le système CASSY-524010, développé par LD Didactic, est un système professionnel d'acquisition de données destiné à la mesure de signaux électriques (tension et courant) en temps réel avec haute précision.

II.4.1.1 Caractéristiques techniques :

- 5 entrées analogiques, dont deux utilisables simultanément (A et B).
- 2 entrées tension sur prises de sécurité 4 mm.
 - Plages de mesure : $\pm 0.3 / 1 / 3 / 10 / 30 / 100V$.
 - Résolution : 12bits.
 - Erreur de mesure : $\pm 1\% + 0.5\%$ de la valeur maximale de la plage.
 - Résistance d'entrée : $1M\Omega$.
- 1 entrée courant sur prise 4 mm :
 - Plages de mesure : $\pm 0.1 / 0.3 / 1/3A$.
 - Erreur de mesure : erreur tension +1%.
 - Résistance d'entrée : $< 0.5 \Omega$.
- Fréquence d'échantillonnage : 1000 KHz
- Mémoire d'acquisition :
 - Jusqu'à 32 000 valeurs à haute fréquence (16 000 par entrée).
 - Capacité quasi illimitée à 100 valeurs/s (dépend du pc).



Figure II-5: Sensor CASSY-524 010, [17]

II.4.2 Carte Arduino UNO :

La carte Arduino UNO est une solution d'acquisition open-source, largement utilisée dans les environnements pédagogiques et de prototypage. Elle intègre un microcontrôleur **ATmega328P** avec un convertisseur ADC 10 bits.

II.4.2.1 Caractéristiques techniques :

- Fréquence d'échantillonnage : à au moins 1 kHz.
- Résolution :

Le convertisseur ADC intégré offre une résolution de 10 bits, soit 1024 niveaux de quantification pour une plage d'entrée de 0 à 5 V. cela correspond à un pas de 4,9mV par unité.

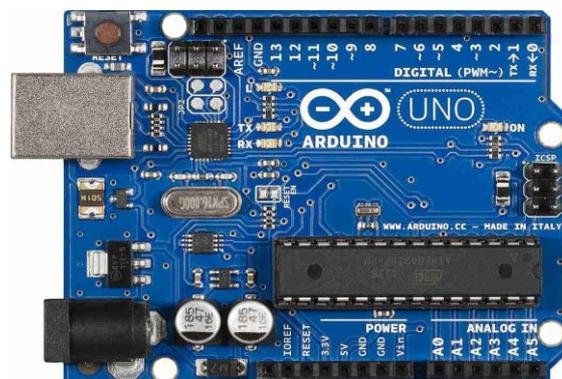


Figure II-6: Carte Arduino UNO,[18]

II.5 Comparatif des performances

Dans cette section, nous allons comparer les performances de deux systèmes d'acquisition : CASSY et Arduino, dans le cadre d'une analyse de signaux sinusoïdaux à différentes fréquences.

- **Schéma et principe de mesure :**

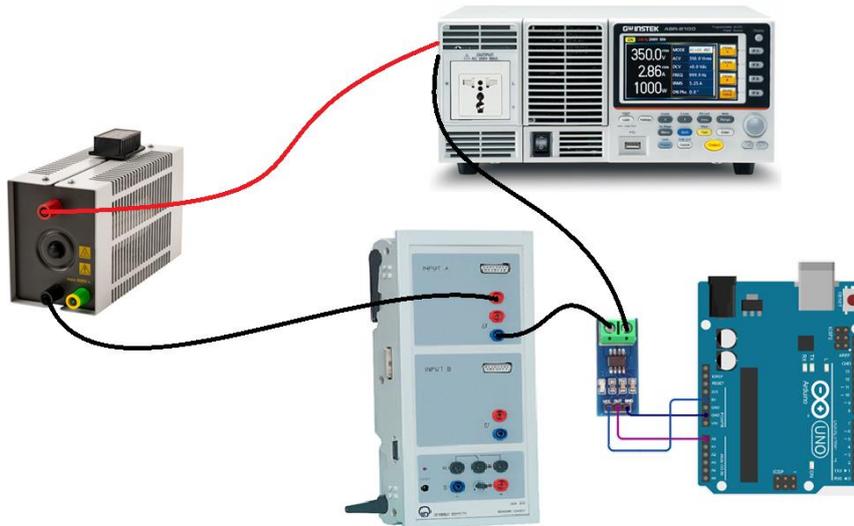


Figure II-7: Schéma de câblage

- **Mesure du courant :**

Le générateur est connecté à une résistance de 50Ω , jouant un rôle de protéger les capteurs contre tout risque de court-circuit. À la sortie de cette résistance, le courant traverse successivement : le capteur de courant du CASSY puis le capteur de courant ACS712 connecté à l'Arduino. Enfin, le circuit est fermé par un retour au générateur.

Afin de préserver l'intégrité des capteurs et de rester dans leurs plages de fonctionnement sûrs, la tension de sortie du générateur a été fixée à 100 V, avec un courant maximal de 3A.

II.5.1 Acquisition, traitement et analyse des signaux :

Dans cette section, nous présentons une comparaison détaillée entre les signaux acquis par deux systèmes d'acquisition : CASSY et Arduino, lors de la mesure d'un courant sinusoïdal à 50Hz, 150Hz, 250Hz, 350Hz. Les signaux bruts ont été traités sous MATLAB afin de réaliser une analyse temporelle et fréquentielle (FFT et THD), dans le but d'évaluer la qualité du signal obtenu par chaque dispositif.

II.5.1.1 À 50 Hz :

La densité d'échantillonnage est l'un des facteurs majeurs influençant la qualité de l'acquisition est la fréquence d'échantillonnage. Le système CASSY bénéficie d'une très haute résolution, avec 1000 points par période, ce qui lui permet de reproduire le signal de manière très précise dans le temps et d'obtenir une représentation fréquentielle fine.

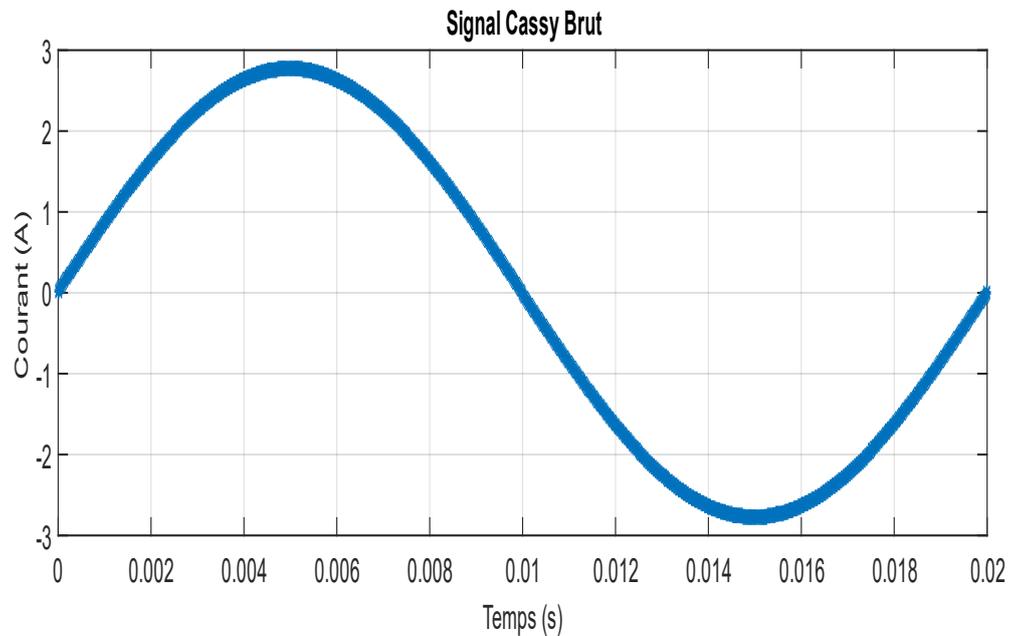


Figure II-8: Signal de courant CASSY à 50Hz

En revanche, le système Arduino, limité par sa fréquence d'échantillonnage, n'enregistre que 32 points par période. Cette résolution relativement faible entraîne une perte de détails dans le signal, notamment au niveau des variations rapides, ce qui peut affecter la fidélité du spectre de fréquence.

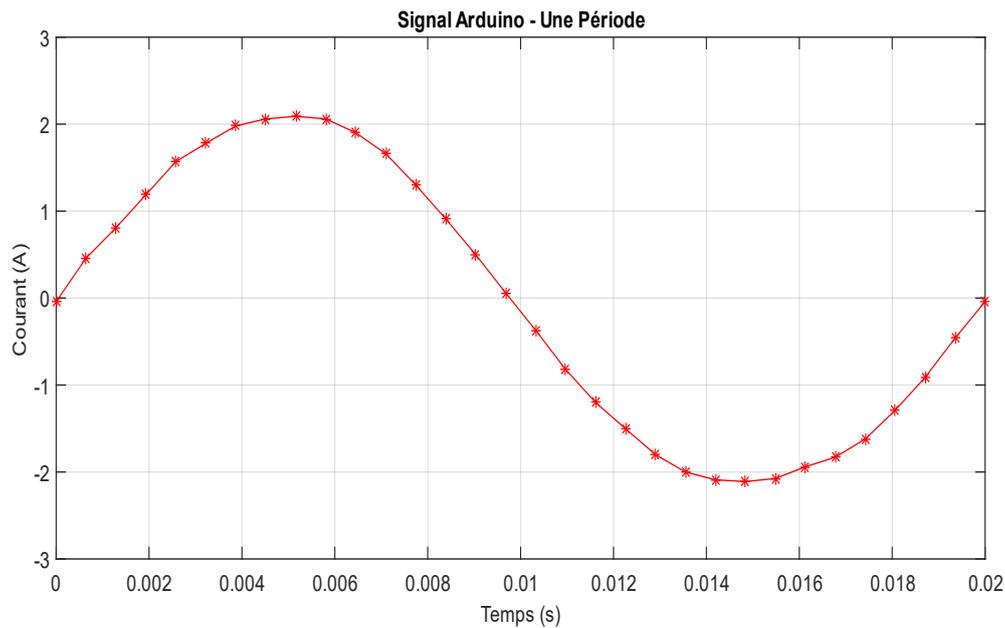


Figure II-9: Signal de courant Arduino à 50Hz

➤ **Alignement des signaux :**

D'après la figure II-10, montre la superposition des signaux de courant mesurés respectivement par le système CASSY et par l'Arduino, à une fréquence de 50 Hz. Après un alignement temporel des deux signaux, on constate que, malgré une différence de résolution, l'Arduino parvient à reproduire correctement la forme globale de l'onde sinusoïdale. Cela indique que l'Arduino peut être utilisé pour une analyse qualitative de base du courant.

Pour évaluer plus précisément la fidélité du signal Arduino par rapport au signal de référence (CASSY), deux indicateurs d'erreur ont été calculés :

- Erreur absolue : 0.025183A
- Erreur relative : 1.2852 %

En complément, les valeurs efficaces des deux signaux ont été déterminées :

- CASSY : 1.9594 A
- Arduino : 1.9846 A

Ces résultats montrent une très bonne cohérence entre les deux systèmes de mesure. L'écart par rapport à la valeur théorique attendue (2A) reste minimale, ce qui valide la qualité des Mesures obtenues.

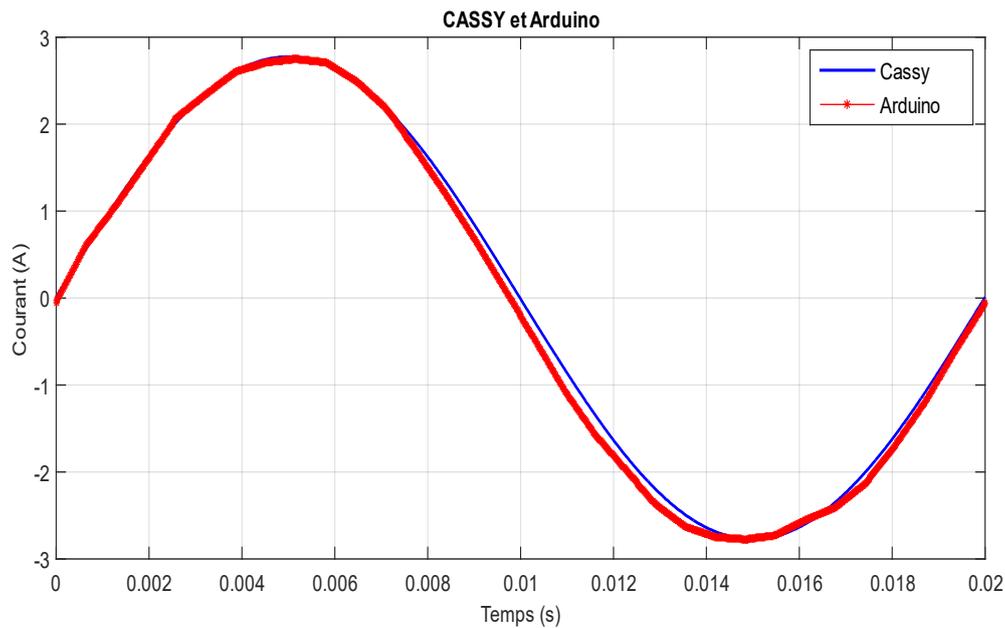


Figure II-10: Superposition des signaux CASSY et Arduino alignés

➤ **Analyse fréquentielle (FFT) :**

L'analyse comparative du spectre d'amplitude entre CASSY et Arduino révèle des différences significatives dans la précision et la fidélité des mesures, particulièrement pour les harmoniques. Cette comparaison met en lumière les performances respectives des deux dispositifs dans le cadre de l'analyse de la qualité d'énergie.

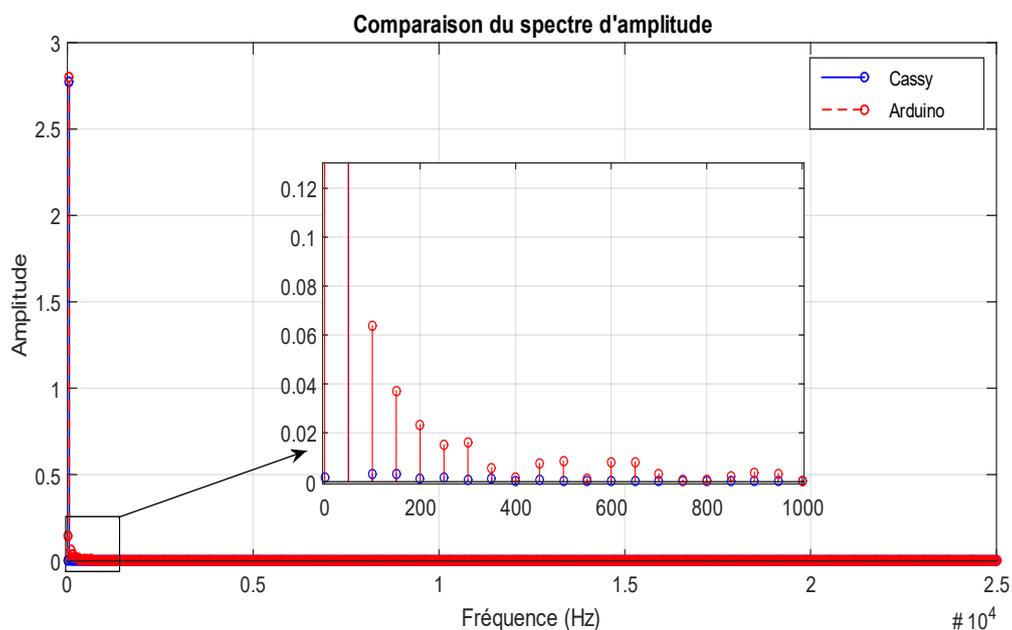


Figure II-11: Spectre d'Amplitude de CASSY et Arduino

D'après la figure II-11, voici un tableau récapitulatif des amplitudes mesurées pour les fréquences allant de 50 Hz à 650 Hz.

Tableau II-1: Comparaison des Amplitudes des harmoniques entre CASSY et Arduino.

Harmonique	Fréquence (Hz)	Amplitude (CASSY)	Amplitude (Arduino)	Ecart
Fondamentale (H1)	50	2.771	2.803	+1.15481776%
H3	150	0.0032	0.037	+1056.25%
H5	250	0.00191	0.015	+685.340314%
H7	350	0.00122	0.0057	+367.213115%
H9	450	0.000692	0.00742	+972.254335%
H11	550	0.000505	0.0113	+2137.62376%
H13	650	0.000204	0.00804	+3841,17647%

Ces résultats révèlent que CASSY fournit des mesures précises et fiables pour toutes les fréquences analysées, tandis qu'Arduino en passant aux harmoniques supérieurs, les erreurs augmentent de manière significative, et l'écart par rapport à CASSY devient de plus en plus prononcé.

➤ Analyse THD :

Le taux de distorsion Harmonique (THD) est un indicateur clé pour évaluer la qualité d'un signal électrique. Il reflète l'écart entre un signal réel et une onde sinusoïdale idéale, en intégrant l'ensemble des harmoniques présentes dans le signal. Pour rappel, le calcul du THD a été détaillé dans le **chapitre I**, où il a été défini comme le rapport entre la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques et celle de la composante fondamentale.

Les résultats entre CASSY et Arduino qui sont obtenus pour la THD sont :

- CASSY mesure un THD de 0.152 %, ce qui est extrêmement faible et conforme aux normes internationales (IEC 61000-4-7). Ce qui indique une excellente qualité du signal capté.
- Arduino affiche un THD de 1.5 %, soit une erreur relative 8.86 % par rapport à CASSY. En revanche, bien que la THD dans le cas de Arduino est supérieur à celle de CASSY mais elle reste comme même acceptable (THD ≤ 5 % pour les réseaux basse tension selon IEE 1159-2019).

II.5.1.2 À 150Hz :

CASSY à 150 Hz, avec 333 points par période, offre une résolution suffisante pour

capturer précisément les variations temporelles du signal et fournir une représentation fréquentielle détaillée. Bien que cette résolution soit inférieure à celle obtenue à 50 Hz (1000 points par période), elle reste adaptée pour analyser des signaux à 150 Hz.

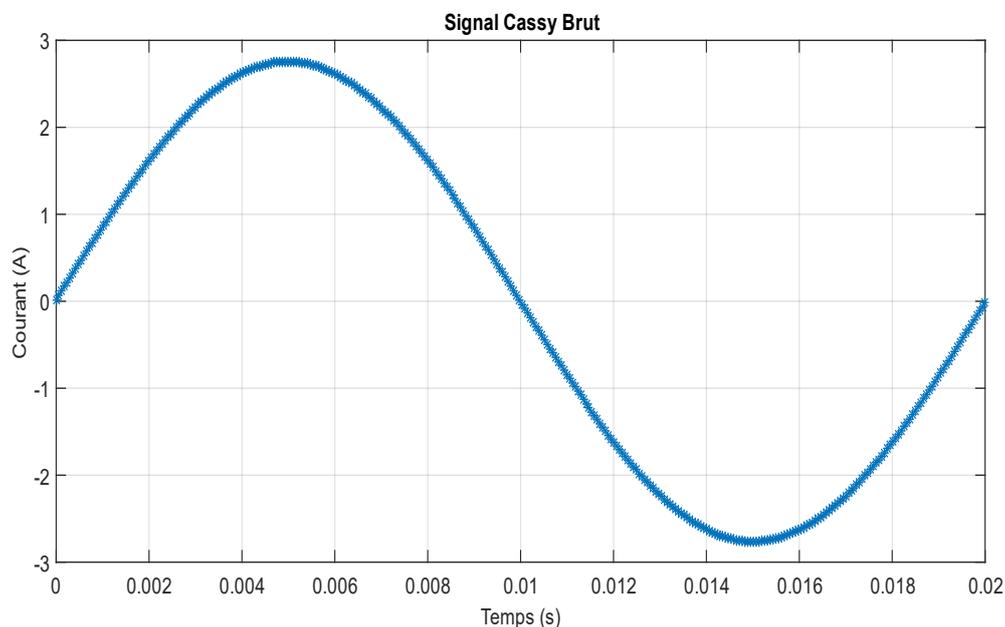


Figure II-12: Signal de courant CASSY à 150Hz

En revanche, Arduino présente une limitation significative : il n'enregistre que 11 points par période. Cette faible densité d'échantillonnage entraîne une perte importante de détails dans le signal, particulièrement pour les composantes hautes fréquences. Cela affecte directement la fidélité de la reconstruction temporelle et fréquentielle du signal.

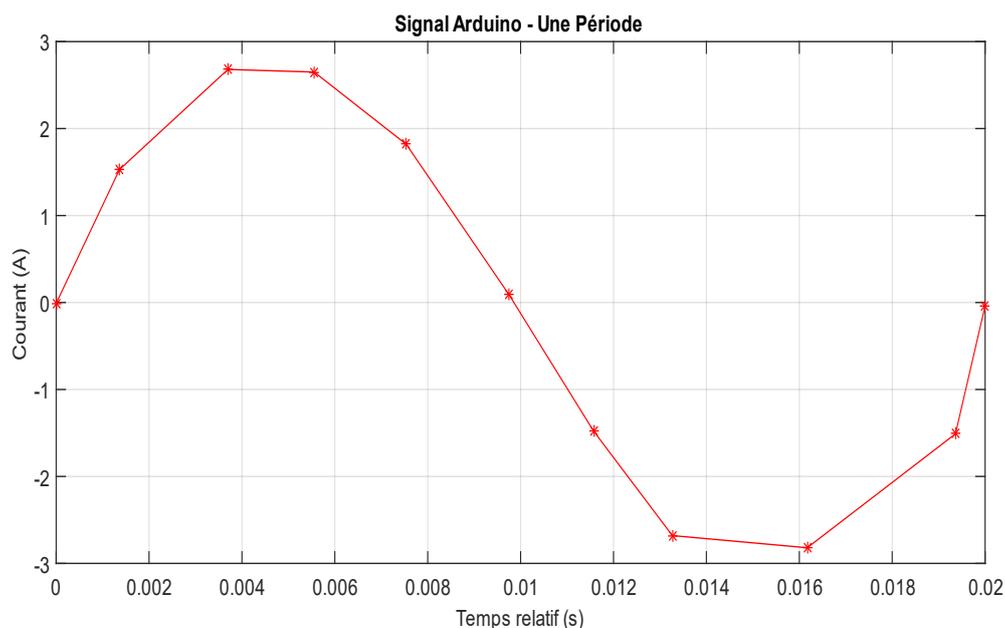


Figure II-13: Signal de courant Arduino à 150Hz

➤ Alignement des signaux :

D'après la figure II-14, L'analyse des signaux de courant mesurés par CASSY et Arduino à une fréquence de 150 Hz met en évidence les limites de performance de l'Arduino à des fréquence plus élevées. Bien que la forme générale de l'onde soit encore reconnaissable, on observe une dégradation de la fidélité du signal capté par Arduino.

Les indicateurs d'erreur calculés entre les deux mesures sont les suivants :

- Erreur absolue : 0.06544 A
- Erreur relative : 3.3612 %

De plus, les valeurs efficaces mesurées sont :

- CASSY : 1.9469 A
- Arduino : 1.8814 A

Ces résultats montrent que, bien qu'Arduino permette encore une estimation raisonnable du courant sinusoïdal à 150 Hz, les erreurs augmentent par rapport à celles observées à 50 Hz. Cela reflète les limitations techniques de Arduino, notamment en ce qui concerne sa résolution temporelle et sa capacité à suivre des variations rapides du signal. Ainsi, pour des fréquences plus élevées, la précision de la mesure diminue légèrement, ce qui doit être pris en compte dans une analyse avancée de la qualité de l'énergie.

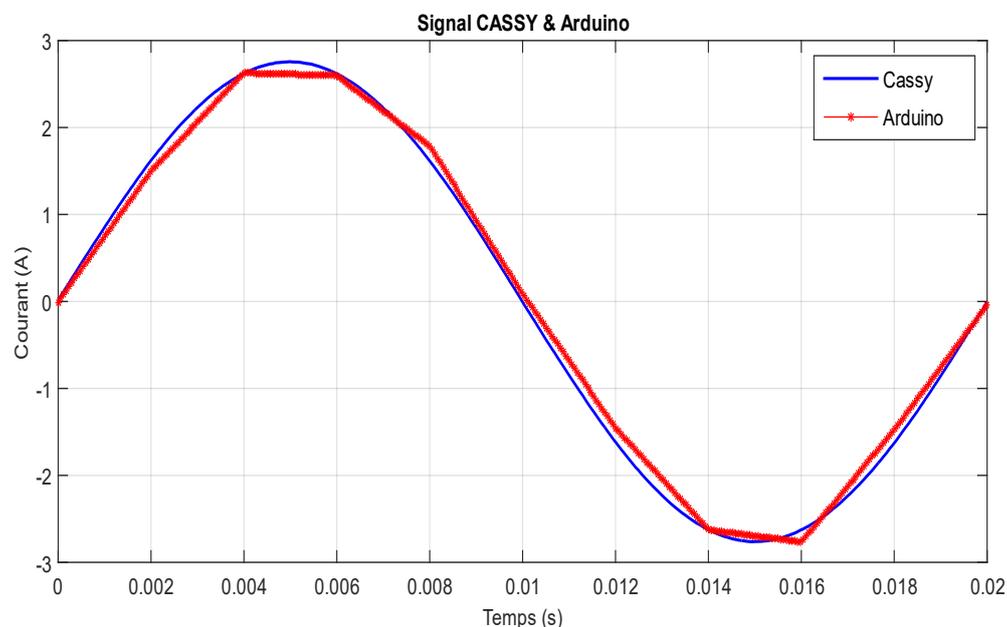


Figure II-14: Superposition des signaux CASSY et Arduino alignés

➤ Analyse fréquentielle (FFT) :

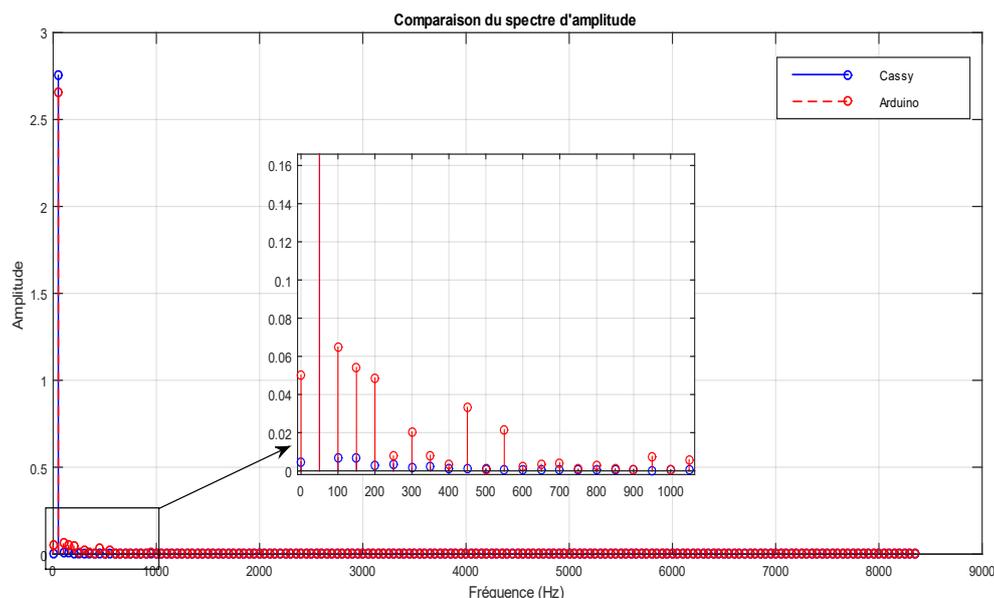


Figure II-15: Spectre d'Amplitude de CASSY et Arduino

D'après la figure II-15, voici un tableau récapitulatif des amplitudes mesurées pour les fréquences allant de 50 Hz à 650 Hz.

Tableau II-2: Comparaison des Amplitudes des harmoniques entre CASSY et Arduino.

Harmonique	Fréquence (Hz)	Amplitude (CASSY)	Amplitude (Arduino)	Ecart
Fondamentale (H1)	50	2.753	2.658	+3.451%
H3	150	0.00697	0.0542	+677.62%
H5	250	0.00359	0.00776	+116.156%
H7	350	0.00203	0.00816	+301.97%
H9	450	0.00104	0.0333	+3101.92%
H11	550	0.000722	0.0216	+2891.69%
H13	650	0.000419	0.00341	+713.84%

Ces résultats montrent que pour une excitation à 150 Hz, les amplitudes mesurées avec CASSY restent relativement faibles pour les harmoniques, traduisant une bonne fidélité du signal.

En revanche, avec l'Arduino, les écarts deviennent très significatifs dès la troisième harmonique (H3), avec des pourcentages d'erreur atteignant plusieurs milliers pourcent pour les harmoniques supérieures. Cela confirme une fois de plus que l'Arduino, bien qu'utile pour une estimation générale, présente une précision limitée dans la détection

des hautes harmoniques, notamment en raison de limitations matérielles (ADC, bruit, échantillonnage).

➤ Analyse THD :

L'analyse comparative du THD entre CASSY et Arduino révèle des performances contrastées à 150 Hz, CASSY mesure un THD de 0.308 % conforme aux normes internationales reflétant une qualité de signal excellente tandis que l'Arduino affiche un THD de 2.6 % avec une erreur relative de 7.44 % par rapport au CASSY bien que cette valeur reste acceptable selon les normes IEEE elle met en évidence les limitations de l'Arduino dans la mesure des harmoniques supérieures à des fréquences élevées comparées à 50 Hz où la THD de l'Arduino était de 1.5% son augmentation à 150 Hz illustre sa difficulté croissante à suivre les signaux rapides confirmant la supériorité du CASSY en termes de précision et de stabilité pour l'analyse des harmoniques à des fréquences plus élevées.

II.5.1.3 À 250Hz :

CASSY à 150 Hz, avec 200 points par période, offre une résolution suffisante pour capturer précisément les variations temporelles du signal et fournir une représentation fréquentielle détaillée. Bien que cette résolution soit inférieure à celle obtenue à 50 Hz (1000 points par période), elle reste adaptée pour analyser des signaux à 250 Hz.

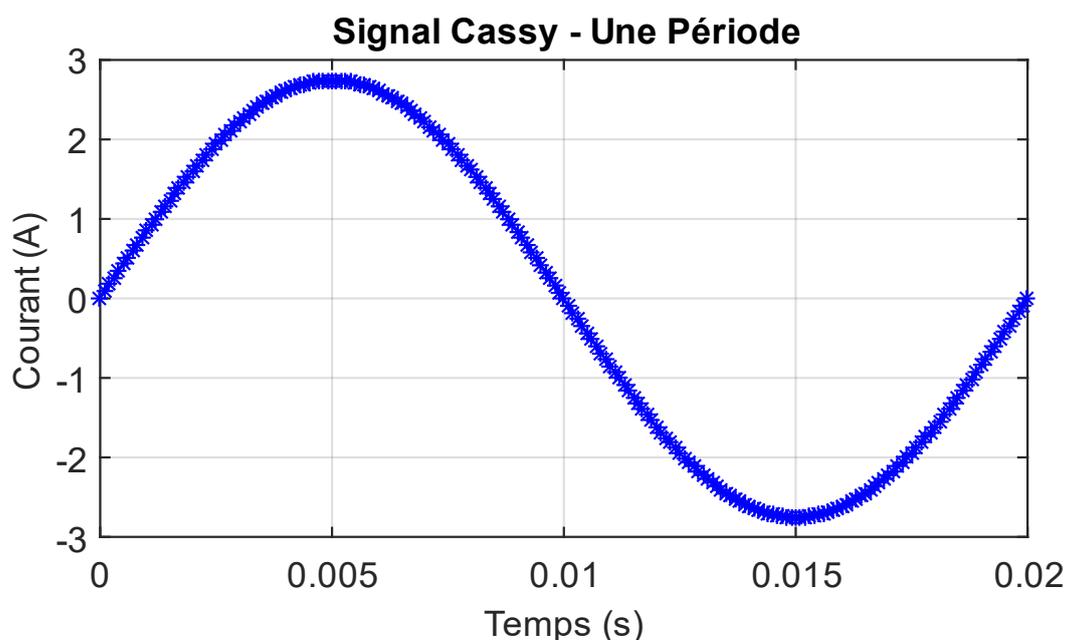


Figure II-16: signal de courant CASSY à 250 Hz

En revanche, Arduino présente une limitation significative : il n'enregistre environ 10

points par période. Cette faible densité d'échantillonnage entraîne une perte importante de détails dans le signal, particulièrement pour les composantes hautes fréquences. Cela affecte directement la fidélité de la reconstruction temporelle et fréquentielle du signal, et en remarque que plus on augmente dans la fréquence ça enjoint la diminution de nombre de points par périodes et aussi la déformation de signal.

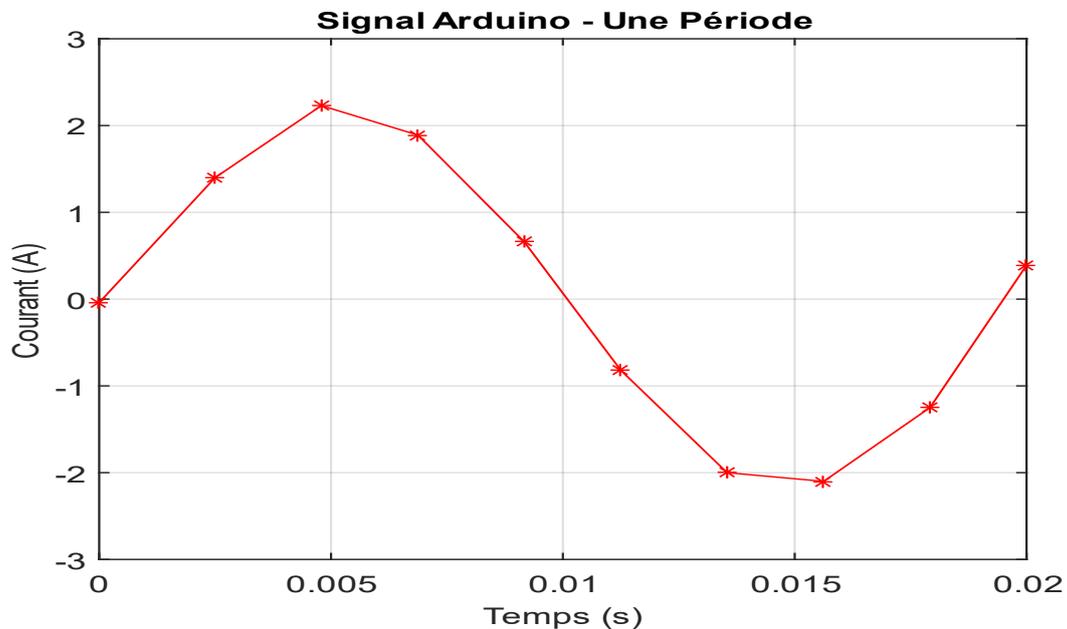


Figure II-17: Signal de courant Arduino à 250Hz

➤ Alignement des signaux :

D'après la figure II-18, à une fréquence de 250 Hz, les limites de l'acquisition par Arduino deviennent nettement plus visibles. Bien que le signal mesuré conserve encore une tendance sinusoïdale générale, les écarts avec le signal de CASSY deviennent plus importants, traduisant une perte notable de précision.

Les indicateurs d'erreur calculés sont :

- Erreur absolue : 0.10499 A
- Erreur relative : 5.4216 %

Les valeurs efficaces obtenues sont :

- CASSY : 1.9366 A
- Arduino : 1.8316 A

Ces résultats révèlent une dégradation significative de la fidélité du signal mesuré par Arduino à cette fréquence. L'erreur relative dépasse les 5%, ce qui reflète clairement les limitations de

la Arduino à suivre les signaux à haute fréquence. Cela peut s'expliquer par une vitesse d'échantillonnage insuffisante, une résolution limitée, et un traitement (ADC) moins performant que celui offert par CASSY. Par conséquent, à 250 Hz, Arduino ne peut plus être considéré comme un outil fiable pour une analyse précise de la qualité de l'énergie, mais uniquement pour des estimations grossières.

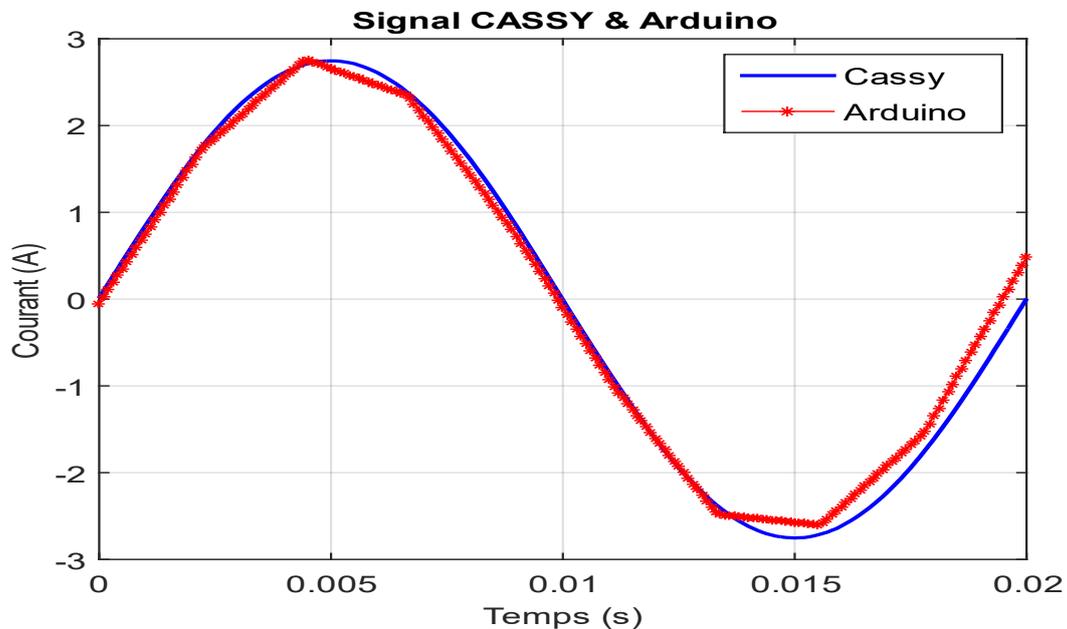


Figure II-18: Superposition des signaux CASSY et Arduino alignés

D'après les indicateurs d'erreur calculés, à 250 Hz, les écarts entre les signaux capturés par Arduino et CASSY sont plus visibles que ceux observés à 50 Hz ou 150 Hz.

➤ Analyse fréquentielle (FFT)

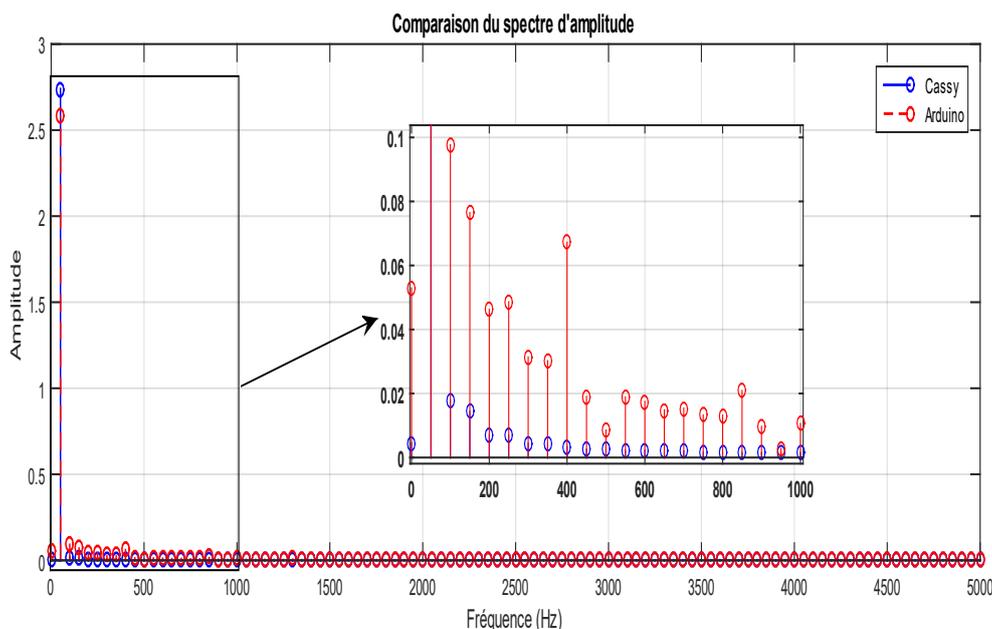


Figure II-19: Spectre d'Amplitude de CASSY et Arduino

D'après la figure II-19, voici un tableau récapitulatif des amplitudes mesurées pour les fréquences allant de 50 Hz à 650 Hz.

Tableau II-3: Comparaison des Amplitudes des harmoniques entre CASSY et Arduino.

Harmonique	Fréquence (Hz)	Amplitude (CASSY)	Amplitude (Arduino)	Ecart
Fondamentale (H1)	50	2.739	2.584	+5.66%
H3	150	0.0143	0.0764	+434.266%
H5	250	0.00686	0.0486	+608.4548%
H7	350	0.00426	0.0302	+608.92%
H9	450	0.0025	0.019	+660.00%
H11	550	0.0021	0.0188	+795.238%
H13	650	0.00189	0.0148	+683.0688%

D'après les résultats obtenus :

Le spectre d'amplitude entre 250 Hz et 50 Hz révèle une dégradation notable des performances de L'Arduino, tandis que CASSY conserve une précision stable. Pour la fondamentale, l'écart entre CASSY et Arduino passe de +1.15481776% (50 Hz) à +5.66 (250 Hz), montrant une grande perte de précision pour Arduino. Cependant, les écarts deviennent beaucoup plus significatifs pour les harmoniques supérieurs. Ces

augmentations drastiques illustrent les limites croissantes de l'Arduino à suivre les signaux à des fréquences élevées.

➤ Analyse THD :

CASSY mesure un THD de 0.64 %, conforme aux normes internationales (IEC 61000-4-7), reflétant une qualité de signal excellente. En revanche, Arduino affiche un THD de 4.17 %, soit une erreur relative de 5.52 % par rapport à CASSY. Bien que cette valeur reste dans la plage acceptable selon les normes IEEE (THD ≤ 5 % pour les réseaux basse tension selon IEEE 1159-2019), elle met en évidence les limitations croissantes de L'Arduino dans la mesure des harmoniques supérieures à des fréquences élevées. Comparé à 50 Hz, où la THD de l'Arduino était de 1.5 %, et à 150 Hz, où elle atteignait 2.6 %, l'augmentation significative à 250 Hz illustre sa difficulté progressive à suivre les signaux rapides.

II.5.1.4 À 350Hz :

CASSY à 150 Hz, avec 143 points par période, offre une résolution suffisante pour capturer précisément les variations temporelles du signal et fournir une représentation fréquentielle détaillée. Bien que cette résolution soit inférieure à celle obtenue à 50 Hz (1000 points par période), elle reste adaptée pour analyser des signaux à 350 Hz.

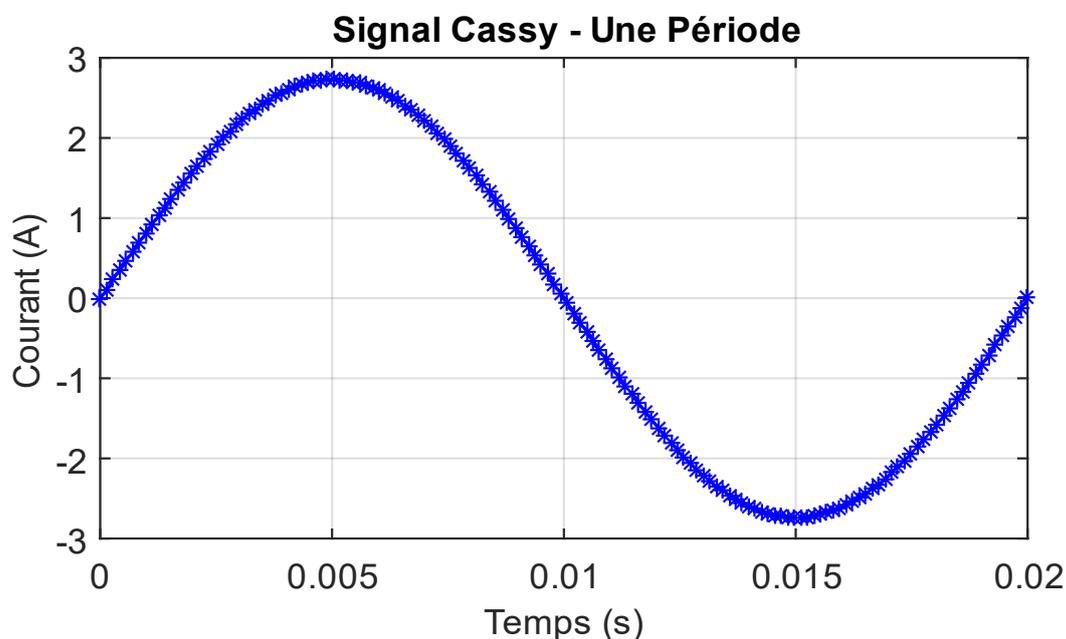


Figure II-20: Signal de courant CASSY à 350Hz

En revanche, l'image de la Figure II-21 montre le signale capturé par Arduino, il n'enregistre que 5 points par période. Entraînant une forme polygonale irrégulière au lieu d'une sinusoïde

fluide. Les distorsions, particulièrement visibles aux maximums et minimums, mettent en évidence l'incapacité d'Arduino à suivre les variations rapides des signaux à haute fréquence.

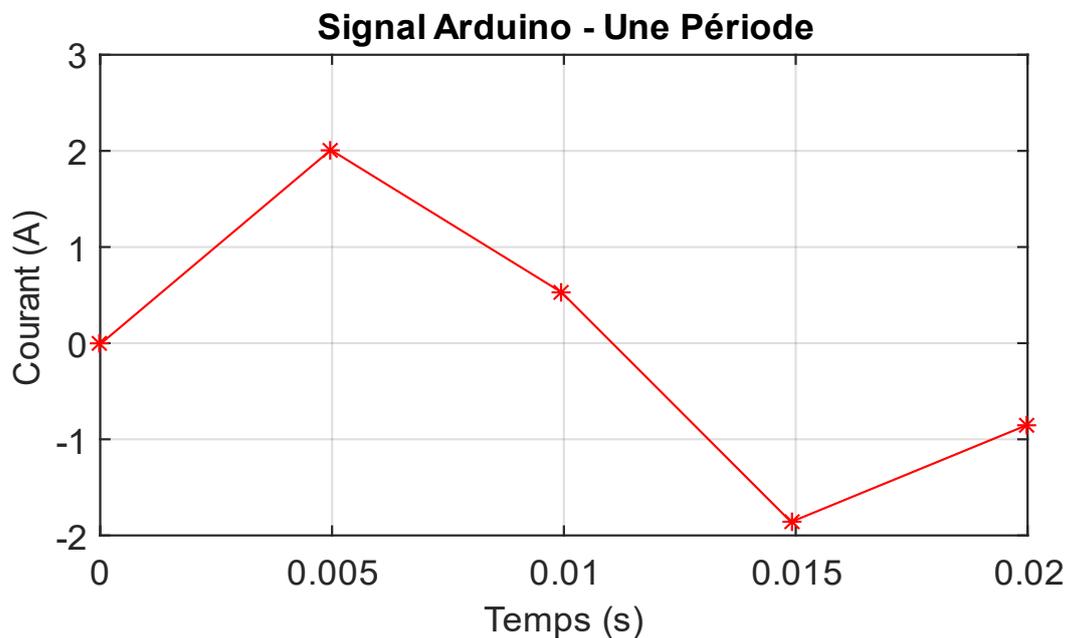


Figure II-21: Signal de courant Arduino à 350Hz

➤ Alignement des signaux :

D'après la figure II-22, A la fréquence de 350 Hz, la dégradation du signal mesuré par l'Arduino devient nettement plus prononcée. Le signal mesuré par Arduino présente une forme visiblement dégradée, plus anguleuse, avec des transitions linéaires qui contrastent avec la forme sinusoïdale lisse du signal CASSY.

Les indicateurs d'erreur obtenus sont :

- Erreur absolue : 0.25211 A
- Erreur relative : 13.1127 %

Les valeurs efficaces mesurées sont :

- CASSY : 1.9226 A
- Arduino : 1.6705 A

A cette fréquence, montre une détérioration importante de la précision du système de mesure basé sur Arduino. La valeur efficace mesurée est bien inférieure à celle obtenue par CASSY, et l'écart relatif dépasse les 13%, ce qui est significatif.

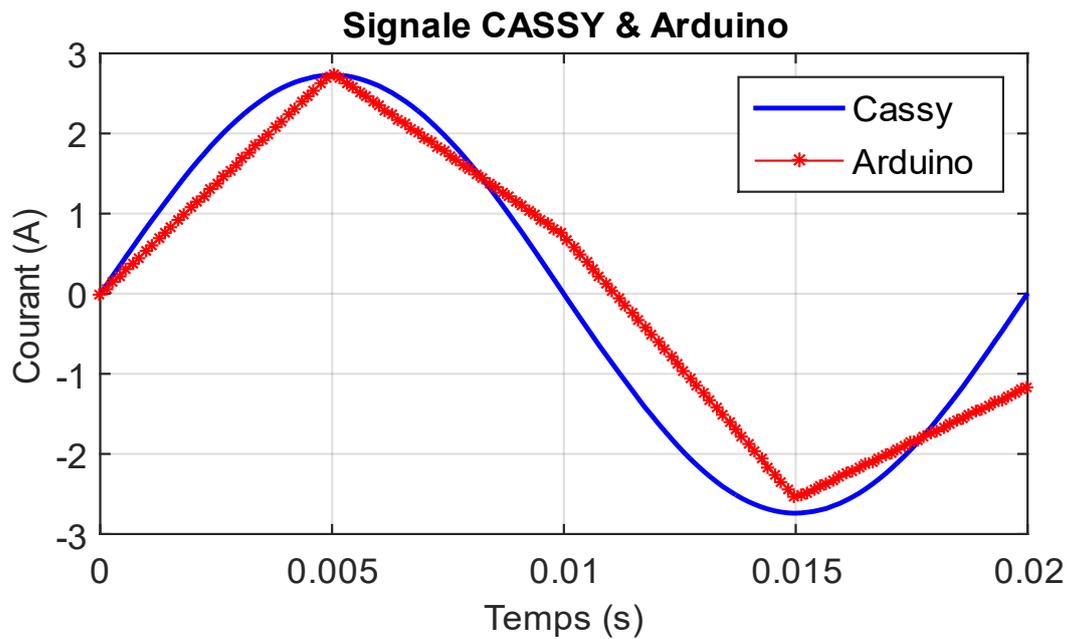


Figure II-22: Superposition des signaux CASSY et Arduino alignés

➤ Analyse fréquentielle (FFT) :

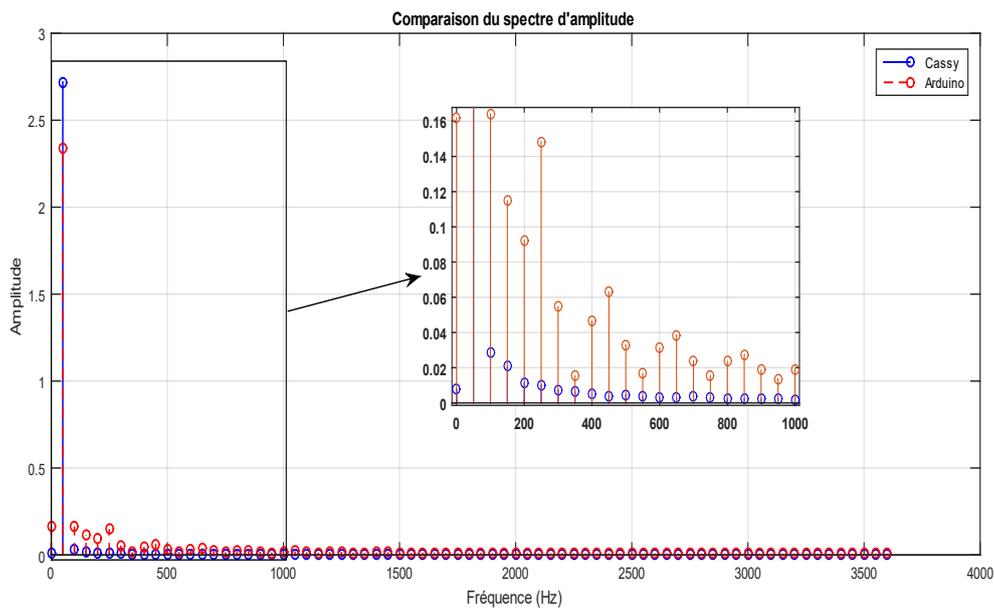


Figure II-23: Spectre d'Amplitude de CASSY et Arduino

D'après la figure II-23, voici un tableau récapitulatif des amplitudes mesurées pour les fréquences allant de 50 Hz à 650 Hz.

Tableau II-4: Comparaison des Amplitudes des harmoniques entre CASSY et Arduino.

Harmonique	Fréquence (Hz)	Amplitude (CASSY)	Amplitude (Arduino)	Ecart
Fondamentale (H1)	50	2.719	2.34	+13.94%
H3	150	0.0209	0.115	+450.24%
H5	250	0.0101	0.148	+1365.3465%
H7	350	0.00628	0.0152	+142.038%
H9	450	0.00402	0.0629	+1464.6766%
H11	550	0.00354	0.0167	+371.7514%
H13	650	0.00281	0.0385	+1270.10676%

D'après les résultats obtenus :

Le spectre d'Amplitude entre 350 Hz et les fréquences précédentes (50 Hz, 150 Hz, 250 Hz) révèle une dégradation notable des performances de l'Arduino, tandis que CASSY conserve une précision presque stable. Pour le fondamentale, l'écart entre CASSY et Arduino passe de 1.15481776 % (50 Hz) et ensuite augmente +3.451 % (150 Hz) et ensuite il augmente à +5.66 % (250 Hz), puis s'élève à +14.27 % (350 Hz), montrant une perte de précision progressive pour Arduino.

Ces augmentations drastiques illustrent les limites croissantes de l'Arduino dans la mesure des signaux rapides ou complexes à des fréquences élevées.

➤ **Analyse THD :**

CASSY mesure un THD de 0.956 %, conforme aux normes internationales (IEC 61000-4-7), reflétant une qualité de signale excellente. En revanche, Arduino affiche un THD de 9.1% soit une erreur relative de 8.51% par rapport à CASSY. Et cette valeur est supérieure à la plage acceptable selon les normes IEE (THD ≤ 5 % pour les réseaux basse tension selon IEEE 1159 -2019), elle met en évidence les limitations croissantes de l'Arduino dans la mesure des harmoniques supérieures à des fréquences élevées. Comparé à 50 Hz, ou la THD de l'Arduino était de 1.5 % (50 Hz) ensuite il augmente à 2.6% (150 Hz), et à 250 Hz, ou il atteignait 4.17 %, l'augmentation significative à 350 Hz illustre sa difficulté progressive à suivre les signaux rapides, cette tendance confirme les limites techniques d'Arduino dans l'analyse des signaux complexes à haute fréquence, contrairement au CASSY qui maintient une performance stable.

II.5.1.5 Limitation de Arduino :

La faible fréquence d'échantillonnage de l'Arduino empêche la capture fidèle des signaux rapides, entraînant des déformations importantes dès 250 Hz. Au-delà de cette fréquence, les erreurs augmentent et le signal n'est plus sinusoïdal, rendant toute analyse ultérieure non fiable. Par conséquent, l'étude s'arrête à 350 Hz, car le signal capturé est déjà fortement déformé.

Par exemple, si l'on essayait à 450 Hz, l'Arduino ne capturerait qu'environ 4 points par période. Cela signifie qu'on ne pourrait même pas reconstituer une période complète, et le signal obtenu ne ressemblerait plus du tout à une sinusoïde. Dès lors, il devient inutile de poursuivre la comparaison avec le système CASSY, qui, lui, enregistre environ 111 points par période et restitue un signal parfaitement sinusoïdal. Comparer deux signaux de formes aussi différentes n'aurait donc aucun sens.

II.6 Système d'acquisition embarqué et évolutif (MCC USB-205)

Pour dépasser les limitations rencontrées avec la carte Arduino, notamment en termes de fréquence d'échantillonnage et de précision, la carte MCC USB-205 est utilisée et comparée au module Sensor-CASSY. Elle permet une acquisition plus fiable des signaux nécessaires à l'analyse de la qualité de l'énergie.



Figure II-24: MCC USB-205, [19]

II.6.1 Caractéristiques

- 8 entrées analogiques, résolution de 12 bits

- Plage d'entrée $\pm 10\text{ V}$, fréquence d'échantillonnage maximal : 500 KS/s
- 2 sorties analogiques, 12 bits, 0-5 V
- 8 entrées/sorties numériques

A une fréquence fondamentale de 50 Hz, cette carte permet d'obtenir jusqu'à :

$$\frac{500\,000}{50} = 10\,000 \text{ points par période}$$

Ce qui garantit une excellente résolution pour l'analyse fréquentielle.

II.7 Analyse du courant à l'aide de la carte MCC USB-205

Dans cette section, nous présentons l'analyse de la qualité du courant mesuré à l'aide de la carte d'acquisition **MCC USB-205**. Cette carte a été utilisée dans les mêmes conditions expérimentales que celles utilisées précédemment avec les cartes CASSY Lab et Arduino, afin de pouvoir effectuer une comparaison fiable.

Pour cette expérience, une tension de 200V a été appliquée à une charge résistive de $50\ \Omega$, ce qui donne un courant de 4 A.

Avant d'effectuer l'analyse fréquentielle, un filtre moyenne mobile a été appliqué au signal brut réduire le bruit aléatoire introduit par le système d'acquisition.

- Ce filtre agit en moyennant les valeurs du signal sur une fenêtre glissante de taille constante.
- Il permet de lisser les irrégularités de haute fréquence non structurées dues aux perturbations de mesure. Mais ce filtre ne supprime pas les harmoniques, car ces dernières sont des composantes périodiques du signal. Il conserve donc toutes les informations spectrales à l'analyse harmonique.

II.7.1 Avec une fréquence de 50 Hz

Grâce à sa haute fréquence d'échantillonnage, la carte MCC USB-205 a permis de collecter 5000 points par période, ce qui garantit une très haute résolution temporelle et une excellente précision fréquentielle pour l'analyse harmonique.

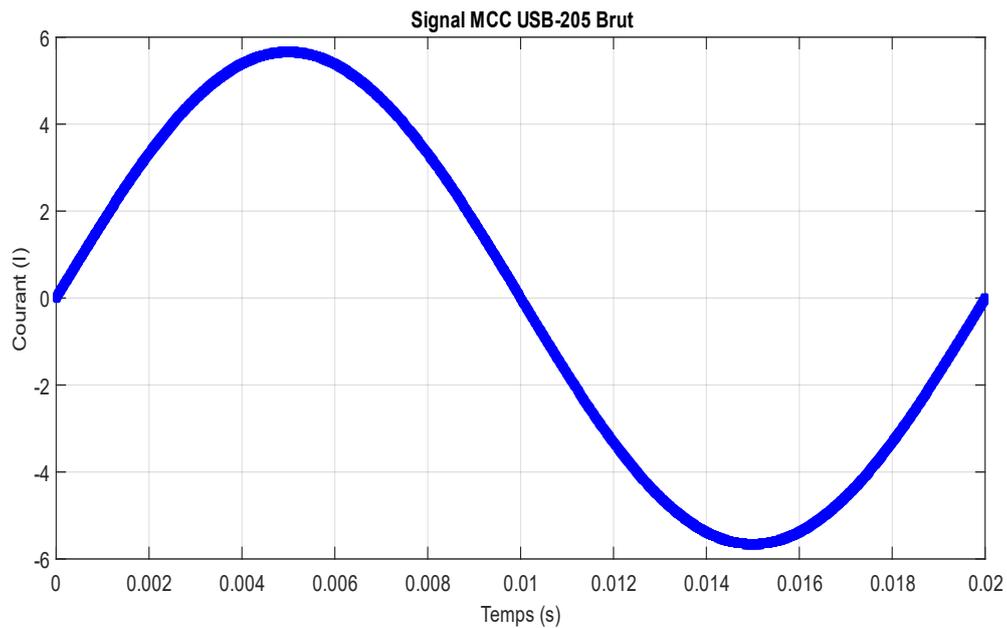


Figure II-25: Signal de courant MCC USB-205 à 50Hz

La valeur efficace mesurée (RMS) est : $I_{RMS} = 3.9654 A$

Comparée à la valeur théorique (4 A), cela donne :

- Erreur absolue : 0.0346 A
- Erreur relative : 0.865 %

➤ **Analyse fréquentielle (FFT) :**

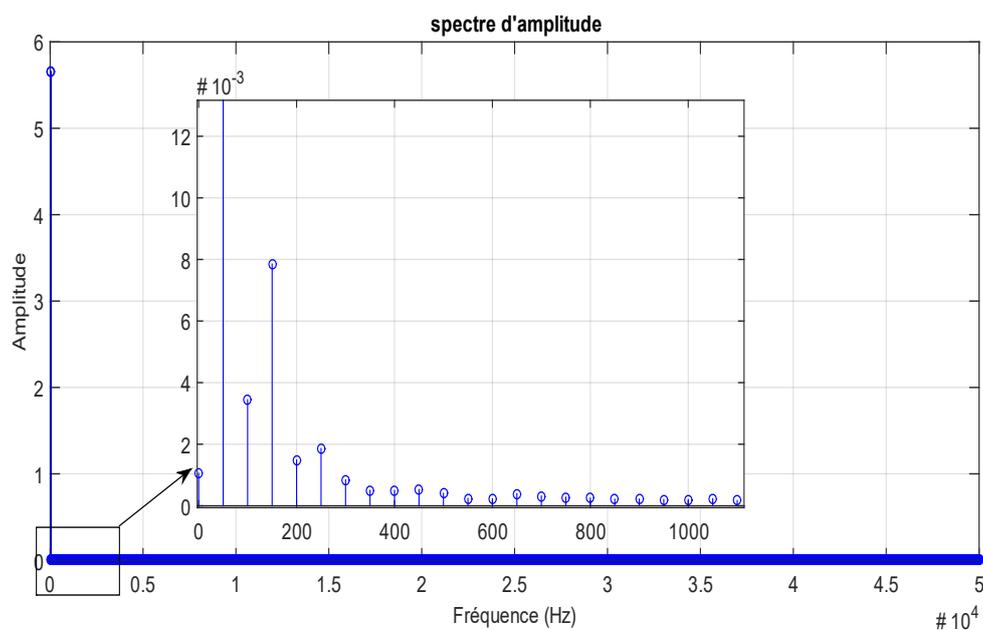


Figure II-26: Spectre d'Amplitude de MCC USB-205

D'après la figure II-26, voici un tableau récapitulatif des amplitudes mesurées pour les

Fréquences allant de 50 Hz à 650 Hz

Tableau II-5: Amplitudes des harmoniques.

Harmonique	Fréquence (Hz)	Amplitude (MCC USB-205)
Fondamentale (H1)	50	5.608
H3	150	0.00825
H5	250	0.00287
H7	350	0.000199
H9	450	0.000463
H11	550	0.000317
H13	650	0.000368

On observe que la composante fondamentale (50 Hz) est dominante, tandis que les harmoniques impaires sont pratiquement négligeables.

➤ Analyse THD :

MCC USB-205 mesure un THD de 0.157 %, ce qui est extrêmement faible et conforme aux normes internationales (IEC 61000-4-7). Ce qui indique une excellente qualité du signal capté.

D'après ces analyses on constate que la carte MCC USB-205 montre que la MCC USB-205 est parfaitement adaptée à l'analyse de la qualité. et pour confirmer cette conclusion nous allons étudier un autre cas à 450 Hz, afin de vérifier si cette carte maintient la même précision et la même performance à des fréquences plus élevées.

II.7.2 Avec une fréquence de 450 Hz

Le signal de courant mesuré présente une forme d'onde lissée et stable, après application d'un filtre moyenne mobile pour atténuer le bruit aléatoire. Ce filtre, comme 50 Hz, permet d'améliorer la lisibilité sans altérer les composantes périodiques (les harmoniques), ce qui garantit l'intégrité spectrale du signal.

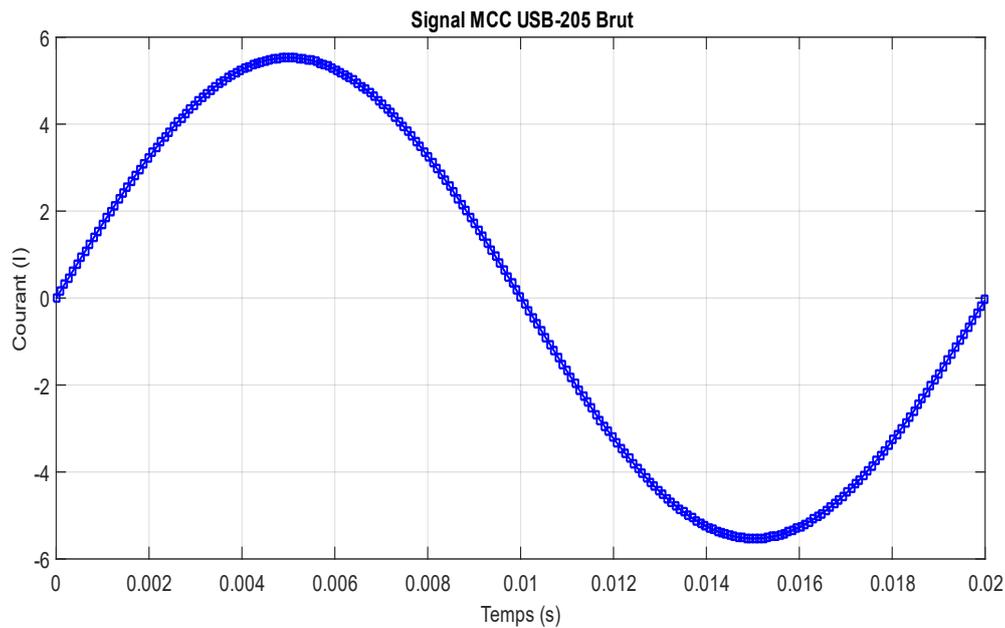


Figure II-27: Signal de courant MCC USB-205 à 450Hz

La valeur efficace mesurée (RMS) est : $I_{RMS} = 3.9033 \text{ A}$

Comparée à la valeur théorique (4 A), cela donne :

- Erreur absolue : 0.0967A
- Erreur relative : 2.4175 %

Bien que la valeur RMS soit légèrement inférieure à la valeur théorique de 4 A, elle reste dans une marge d'erreur très acceptable (moins de 3%), ce qui démontre une bonne cohérence avec les conditions expérimentales.

➤ **Analyse fréquentielle (FFT) :**

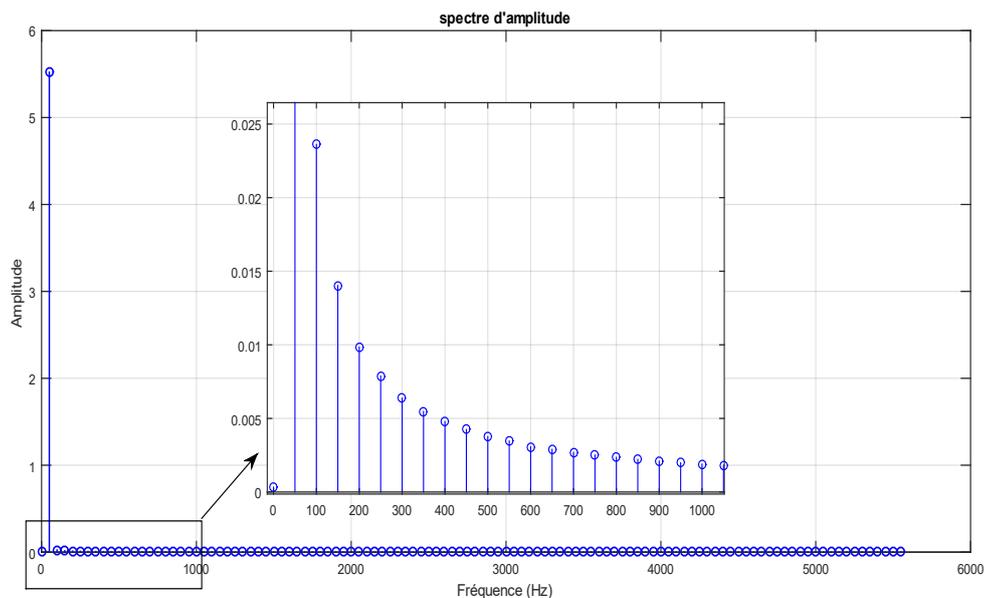


Figure II-28: Spectre d'Amplitude de MCC USB-205

D'après la figure II-28, voici un tableau récapitulatif des amplitudes mesurées pour les fréquences allant de 50 Hz à 650 Hz

Tableau II-6: Amplitudes des harmoniques.

Harmonique	Fréquence (Hz)	Amplitude (MCC USB-205)
Fondamentale (H1)	50	5.52
H3	150	0.014
H5	250	0.00788
H7	350	0.00547
H9	450	0.00425
H11	550	0.00347
H13	650	0.00290

L'analyse du spectre montre une composante fondamentale (H1) très largement dominante, avec une amplitude de 5.52, tandis que les harmoniques impaires restent toutes très faibles, inférieures à 0.015, ce qui reflète la qualité sinusoïdale du courant injecté dans la charge résistive. Et la précision spectrale de la carte MCC USB-205, qui parvient à isoler les composantes fréquentielles avec une excellente résolution.

➤ **Analyse THD :**

La THD mesuré est de 0.351 %, ce qui est très bas et largement conforme aux normes de qualité d'énergie telles que **IEC 61000-4-7**, qui recommande un THD inférieur à 5 % pour

les réseaux basse tension. Cela prouve que la distorsion globale du signal est extrêmement faible, ce qui est essentiel pour qualifier un système de mesure comme étant fiable pour les applications de diagnostic de qualité d'énergie.

II.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de comparer trois systèmes d'acquisition (Arduino UNO, CASSY Lab, MCC USB-205) dans le cadre de l'analyse de la qualité de l'énergie électrique.

L'étude menée a révélé les limites de l'Arduino, notamment en matière de fréquence d'échantillonnage et de résolution, ce qui le rend peu adapté à une analyse fréquentielle précise ou à un calcul fiable du THD. En revanche, les résultats obtenus avec CASSY et MCC USB-205, ont montré que ces deux systèmes sont conformes aux exigences de précision pour l'analyse spectrale des signaux, permettant une détection fiable des harmoniques et un calcul rigoureux des indicateurs de qualité d'énergie.

Forts de ces constatations, le chapitre suivant portera sur la mise en œuvre d'un système de mesure complet, basé sur la carte MCC USB-205, afin de réaliser des analyses fréquentielles par FFT, THD, des différentes puissances (active, réactive, apparente, déformante), ainsi que le facteur de puissance et le facteur de distorsion. Cette étape concrète permettra d'approfondir l'étude de la qualité de l'énergie dans un environnement expérimental.

The left side of the page features three vertical bars of varying heights and shades of light blue, creating a decorative border. The top bar is the tallest, followed by a shorter one, and then another tall one at the bottom.

CHAPITRE III

Analyse et contrôle de la qualité d'énergie

III. Introduction

Ce chapitre est consacré à la réalisation pratique d'un dispositif de mesure de la qualité d'énergie électrique, en s'appuyant sur les concepts théoriques présentés dans les chapitres précédents. L'objectif est de mettre en œuvre une architecture d'acquisition et de traitement permettant d'évaluer, en temps réel, les différents paramètres de la qualité d'énergie, tels que les harmoniques, la THD, les puissances et le facteur de puissance associé. Le système conçu est destiné à fonctionner sur une alimentation triphasée, en utilisant des capteurs de courant et de tension adaptés, des relais de commutation et une carte d'acquisition MCC USB-205.

III.1 Présentation du dispositif de mesure

III.1.1 Architecture globale

Le dispositif repose sur une structure modulaire, permettant l'acquisition synchrone des signaux de courant et de tension pour les trois phases d'une alimentation triphasée. Il est composé de :

- 3 capteurs de courant **ACS712** (5 A, 20 A, 30 A) pour chaque phase.
- 3 capteurs de tension **Zmpt10B**.
- 18 relais pour la commutation automatique des capteurs de courant.
- Une carte d'acquisition MCC USB-205.

III.1.2 Schéma de câblage et implantation matérielle

Y

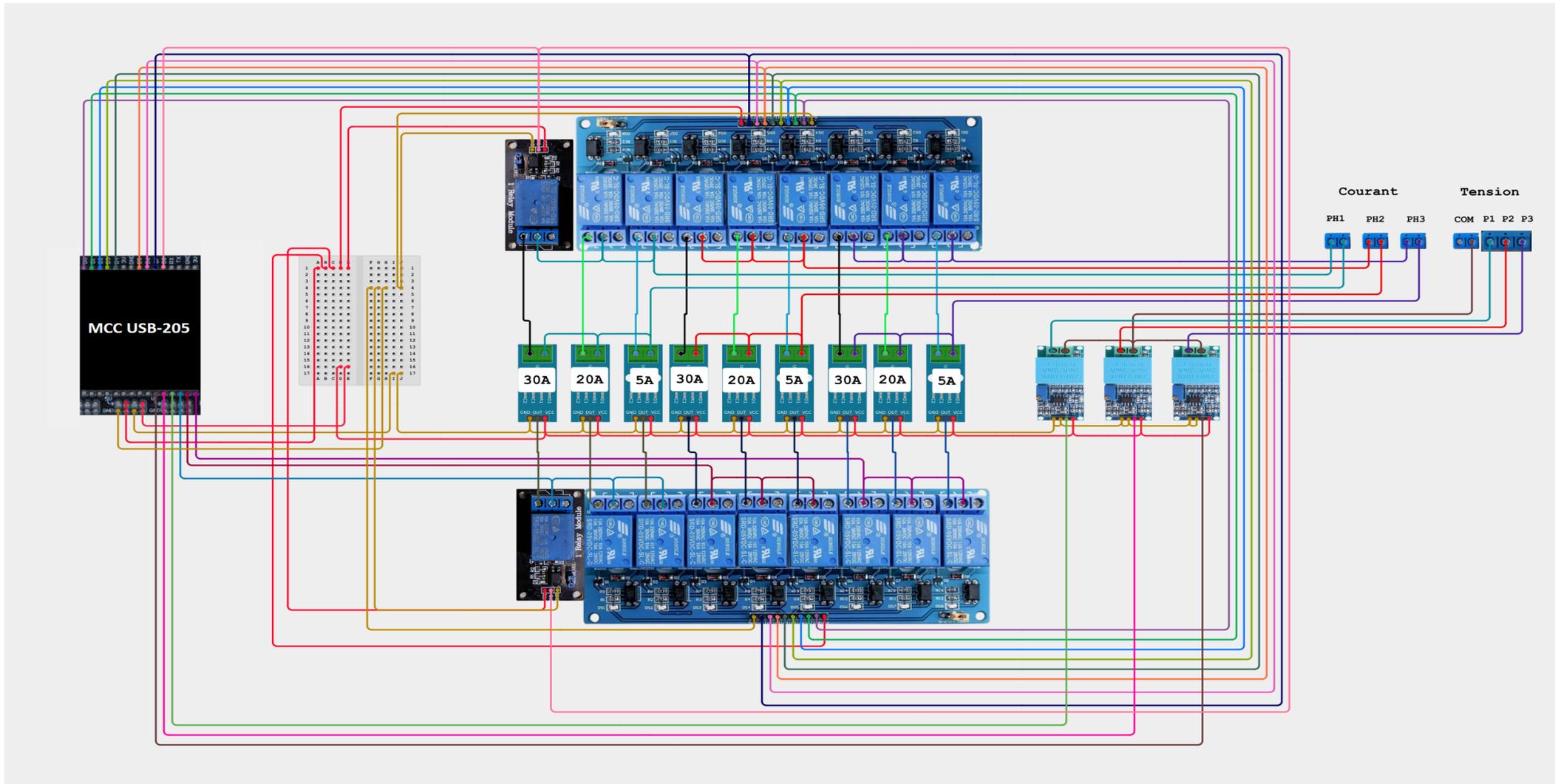


Figure III-1: Câblage complet du dispositif de mesure

La figure III-1 illustre le schéma de câblage complet du dispositif de mesure. Ce schéma représente l'interconnexion entre les différents éléments du système : les capteurs de courant et de tension, les relais de commutation, la carte d'acquisition, fusible (protection).

Au cœur de cette architecture se trouvent deux groupes de relais parfaitement coordonnés.

- Les neuf relais du haut (côté puissance) assurent une commutation automatique entre trois capteurs de courant différents (5 A, 20 A, 30 A) pour chaque phase. Leur rôle est crucial : adapter dynamiquement le calibre de mesure selon l'intensité du courant circulant dans la phase.
- Les neuf relais du bas (côté commande), fonctionnent en synchronisation avec les relais du haut sous le même signal numérique : par exemple, l'activation du relais de puissance 5 A entraîné simultanément l'activation de son relais de commande. Etant donné que la MCC USB-205 ne dispose que de neuf entrées analogiques, il est indispensable de diriger un seul signal par phase vers l'entrée correspondante, sans créer de conflits.

Les capteurs de tension sont directement reliés aux phases via des connexions dédiées, et tous les signaux sont traités par la carte d'acquisition, permettant un lecteur synchrone, continue et fiable.

III.2 Algorithme général de traitement des signaux et calcul des grandeurs électriques

- 3 relais : pour connecter la sortie du capteur au canal d'acquisition correspondant.

La logique de changement de capteur est la même pour les 3 phases.

Tableau III-1: Affectation des relais pour la sélection des capteurs de courant.

Phase	Capteur	Relais d'entrée	Relais de sortie
Phase 1	30 A	DIO0 via le relais 1	CH3 via le relais 10
	20A	DIO1 via le relais 2	CH3 via le relais 11
	5A	DIO2 via le relais 3	CH3 via le relais 12
Phase 2	30A	DIO3 via le relais 4	CH4 via le relais 13
	20A	DIO4 via le relais 5	CH4 via le relais 14
	5A	DIO5 via le relais 6	CH4 via le relais 15
Phase3	30A	DIO6 via le relais 7	CH5 via le relais 16
	20A	DIO7 via le relais 8	CH5 via le relais 17
	5A	DIO8 via le relais 9	CH5 via le relais 18

Seul un relais d'entrée et un relais de sortie sont activés simultanément par phase.

Le fonctionnement de chaque relais repose sur un signal logique :

- DIO = 1 → Bobine du relais alimentée → contacts fermés → capteur sous tension.
- DIO = 0 → Bobine du relais dés alimentée → contacts ouverts → capteur hors tension.

L'organigramme s'applique la même logique de décision aux trois phases mais des relais différents :

❖ **Basculement pour $I \leq 5A$ (sur les 3 phases)**

- Phase 1 : DIO2 = 1 → (relais 3 + relais 12) fermés → Capteur 5A → CH3
- Phase 2 : DIO5 = 1 → (relais 6 + relais 15) fermés → Capteur 5A → CH4
- Phase 3 : DIO8 = 1 → (relais 9 + relais 18) fermés → Capteur 5A → CH5

❖ **Basculement pour $5A < I \leq 20A$ (sur les 3 phases)**

- Phase 1 : DIO1 = 1 → (relais 2 + relais 11) fermés → Capteur 20A → CH3
- Phase 2 : DIO4 = 1 → (relais 5 + relais 14) fermés → Capteur 20A → CH4
- Phase 3 : DIO7 = 1 → (relais 8 + relais 17) fermés → Capteur 20A → CH5

❖ **Basculement pour $I > 20A$ (sur les 3 phases)**

- Phase 1 : DIO0 = 1 → (relais 1 + relais 10) fermés → Capteur 5A → CH3
- Phase 2 : DIO3 = 1 → (relais 4 + relais 13) fermés → Capteur 5A → CH4
- Phase 3 : DIO6 = 1 → (relais 7 + relais 16) fermés → Capteur 5A → CH5

Une fois le basculement effectué vers un capteur donnée, un chronomètre est initialisé. Ce chronomètre introduit une temporisation critique entre deux actions : **prend la valeur I** et **calcul I RMS**.

- Tant que le temps $t \leq 0.1s$, le système attend :
 - La stabilisation électrique des relais activés
 - L'accumulation d'un nombre suffisant d'échantillons
 - Aucune décision n'est prise durant cette phase
- A chaque itération de la boucle, la variable t est mis à jour
- Dès que $t > 0.1s$, les échantillons collectés pendant ce temps, sont utilisés pour calculer la valeur efficace du courant I_{rms} .

Et avant de calculer I_{rms} , chaque échantillon brut (valeur numérique) est converti en tension mesurée à l'aide de la formule :

$$V_{mesurée}(n) = \left(\frac{\text{valeur}_{brute}(n)}{2^{12}-1} \right) \times V_{totale} - V_{max} \quad (III-1)$$

- Puisqu'on commence à 0, la valeur la plus élevée est : $2^{12} - 1 = 4096 - 1 = 4095$
- V_{totale} : est de tension sélectionnée pour le canal d'acquisition (20 V)
- V_{max} : est de tension sélectionnée pour le canal d'acquisition (10 V)

$$I(n) = \frac{V_{mesurée}(n) - V_{offset}}{\text{sensibilité du capteur}} \quad (III-2)$$

- V_{offset} : est la tension de repos de capteur (en général 2.5 V pour l'ACS712)
- sensibilité du capteur : elle dépend du modèle (exemple : 0.100 V/A pour le 20A)

Ensuite, l'offset DC est éliminé en soustrayant la moyenne du signal,

$$I(n) = I(n) - \text{moyenne}(I(n)) \quad (III-3)$$

Puis la valeur efficace du courant est calculée sur l'ensemble des échantillons valides :

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i(k)^2} \quad (III-4)$$

- N : Nombre total d'échantillons
- $I(k)$: les valeurs de courant à chaque instant k .
- Cette valeur est ensuite comparée aux seuils définis afin de déterminer si un nouveau basculement est nécessaire.
- Après cette analyse, le temps est réinitialisé à zéro, et le processus recommence à partir de l'acquisition de nouveaux échantillons

Les capteurs de tension ZMPT101B utilisés dans ce système (un par phase) sont connectés en permanence aux canaux d'acquisition CH0, CH1 et CH2 de la carte MCC USB-205. Ils ne

nécessitent aucune commutation via relais, car leur calibre est identique et adapté à la plage de mesure.

D'abord les signaux analogiques issus des capteurs sont échantillonnés par la carte d'acquisition 12 bits. Chaque valeur brut (0-4095) est convertie en tension selon la relation :

$$V_{mesurée}(n) = \left(\frac{\text{valeur brute}(n)}{2^{12}-1} \right) \times V_{totale} - V_{max} \quad (\text{III-5})$$

- Puisqu'on commence à 0, la valeur la plus élevée est : $2^{12} - 1 = 4096 - 1 = 4095$
- V_{totale} : est de tension sélectionnée pour le canal d'acquisition (20 V)
- V_{max} : est de tension sélectionnée pour le canal d'acquisition (10 V)

La tension mesurée est ensuite convertie en tension réelle appliquée à la charge selon le calibrage du capteur :

$$V(n) = \frac{V_{mesurée}(n) - V_{offset}}{\text{sensibilité du capteur}} \quad (\text{III-6})$$

- V_{offset} : est la tension de repos de capteur (en général 2.5 V pour l'ZMPT101B)
- sensibilité du capteur : 0.00147 V/V : c'est une constante qui transforme le signal proportionnel en tension réelle

Ensuite, l'offset DC est éliminé en soustrayant la moyenne du signal,

$$V(n) = V(n) - \text{moyenne}(I(n)) \quad (\text{III-7})$$

Puis la valeur efficace du courant est calculée sur l'ensemble des échantillons valides :

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v(k)^2} \quad (\text{III-8})$$

- N : Nombre total d'échantillons
- $v(k)$: les valeurs de tension à chaque instant k .

III.3 Calcul des grandeurs électriques à partir des signaux échantillonnés

- La FFT

Une fois que les signaux corrigés $i(n)$ et $v(n)$ (courant et tension sans offset DC) sont obtenus, on applique la transformée de Fourier (FFT) afin d'analyser leur contenu fréquentiel.

- Pour le courant : $I(K) = \text{FFT}(i(n))$ (III-9)

- Pour la tension : $V(K) = \text{FFT}(v(n))$ (III-10)

Où $i(n)$ et $v(n)$ sont les signaux dans le domaine temporel, et $I(k)$, $V(k)$ sont les spectres dans le domaine fréquentiel (c'est-à-dire les amplitudes des composantes sinusoïdales à différentes fréquences).

Les amplitudes des harmoniques s'obtiennent à partir du module du spectre FFT :

$$|I(k)| = \sqrt{\text{Re}(I(k))^2 + \text{Im}(I(k))^2} \quad (\text{III-11})$$

$$|V(k)| = \sqrt{\text{Re}(V(k))^2 + \text{Im}(V(k))^2} \quad (\text{III-12})$$

- $\text{Re}(I(k))$ & $\text{Re}(V(k))$: partie réelle du coefficient
- $\text{Im}(I(k))$ & $\text{Im}(V(k))$: partie imaginaire du coefficient
- La THD

La THD permet d'évaluer le niveau de pollution harmonique dans un signal. Il est calculé à partir des amplitudes des composantes FFT

- Pour le courant :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N |I(k)|^2}}{|I(1)|} \quad (\text{III-13})$$

- Pour la tension :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N |V(k)|^2}}{|V(1)|} \quad (\text{III-14})$$

- $I(k)$ et $V(k)$: correspond à l'amplitude de la fondamentale (50 Hz)
- $K = 2 \text{ \AA } N$: représente les harmoniques
- N : Nombre total d'échantillons
- Calcul de la puissance active totale (P)

$$P = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v(k) \times i(k) \quad (\text{III-15})$$

Cette puissance dépend de l'alignement temporel entre la tension et le courant : si le courant est retard ou en avance, la puissance diminue.

- Puissance active (P_1)

$$P_1 = V_1 \times I_1 \times \cos(\varphi_1) \quad (\text{III-16})$$

- V_1 et I_1 Sont les valeurs efficaces de la tension et du courant à la fondamentale.
- φ_1 Est le déphasage à la fréquence fondamentale, déterminé via l'analyse FFT.
- Calcul de la puissance apparente (S)

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \quad (\text{III-17})$$

Elle est toujours supérieure ou égale à la puissance active.

- Calcul de la puissance réactive (Q)

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 + \sum_{n>2} V_n I_n \sin \varphi_n \quad (\text{III-18})$$

- V_1 et I_1 Sont les valeurs efficaces de la tension et du courant à la fondamentale.
- φ_1 Est le déphasage à la fréquence fondamentale, déterminé via l'analyse FFT.
- V_n et I_n Sont les valeurs efficaces de la tension et du courant à l'harmonique n.
- φ_n Est le déphasage entre la tension et le courant à la fréquence n, déterminé via l'analyse FFT.
- Calcul de la puissance réactive (Q_1) :

$$Q_1 = V_1 \times I_1 \times \sin(\varphi_1) \quad \text{(III-19)}$$

- V_1 et I_1 Sont les valeurs efficaces de la tension et du courant à la fondamentale.
- φ_1 Est le déphasage à la fréquence fondamentale, déterminé via l'analyse FFT.
- Calcul de la puissance déformante (D)

$$D_{total} = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad \text{Ou bien} \quad D_{total} = V_1 \times I_1 \times THD_I \quad \text{(III-20)}$$

- Calcul du THD :

$$THD_I = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_1^2}{I_1^2}} \quad \text{(III-21)}$$

Où : I_1 est la composante fondamentale du courant.

- Facteur de puissance (FP) :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_1 \times I_1 \times \cos \varphi_1}{\sqrt{V_1^2 \times I_1^2 \times \cos^2 \varphi_1 + V_1^2 \times I_1^2 \times \sin^2 \varphi_1 + V_1^2 \times I_1^2 \times THD_I^2}} = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad \text{(III-22)}$$

- Facteur de distorsion (FD) :

$$FD = \frac{FP}{\cos(\varphi_1)} \quad \text{(III-23)}$$

III.4 Mesures expérimentales et analyse des résultats

Dans cette section, nous mettons en œuvre le système de mesure développé afin d'évaluer les performances du dispositif face à différentes charges, L'objectif est de mesurer des grandeurs électriques (tension, courant, puissances), d'analyser le spectre fréquentiel à l'aide de la FFT, de calculer la THD, le facteur de puissance (FP) et le facteur de distorsion (FD), puis d'interpréter les résultats obtenus dans des cas de charges linéaires et non linéaires.

III.4.1 Cas d'une charge résistive (linéaire)

Dans ce premier test expérimental, une charge purement résistive a été connectée entre la phase et le neutre de l'alimentation. Ce type de charge a été choisi car il génère un courant

parfaitement sinusoïdal. L'alimentation utilisée est réglée sur une tension efficace de 200 V, tandis que la charge résistive est de 50 Ω. Ce qui donne un courant efficace qui égale à 4 A. Les mesures effectuées avec MCC USB-205 donnent les valeurs efficaces suivantes :

$$I_{RMS} = 3.9989 \text{ A} \quad \text{et} \quad V_{RMS} = 201.5594 \text{ V}$$

Comparais aux valeurs théoriques cela nous donne :

Tableau III-2: calcule des erreurs.

	Courant	Tension
Erreur absolue	0.0011A	1.5594 V
Erreur relative	0.0275 %	0.7797 %

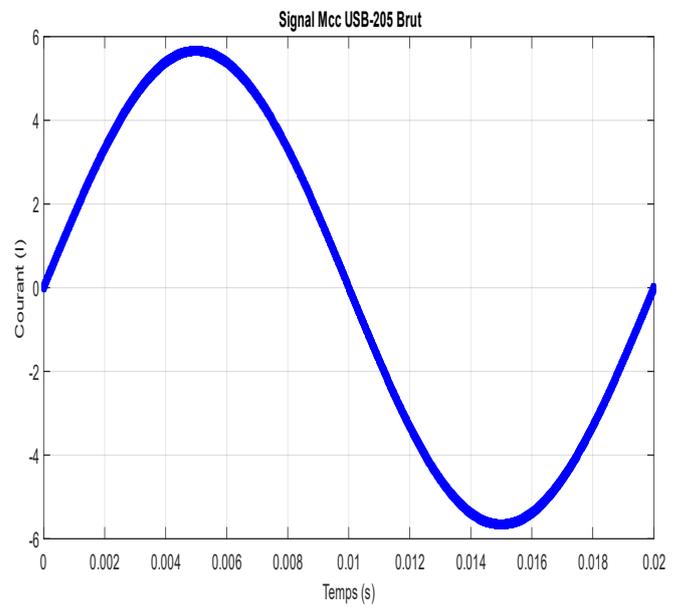
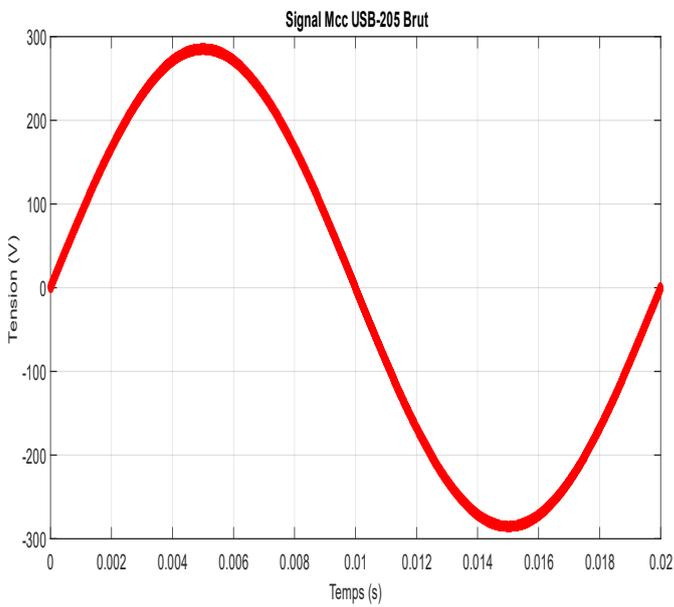


Figure III-3: Signal de courant et de tension (MCC USB-205)

➤ **Analyse fréquentielle :**

L'analyse spectrale réalisée via FFT met en évidence les caractéristiques suivantes pour la tension et le courant mesurés :

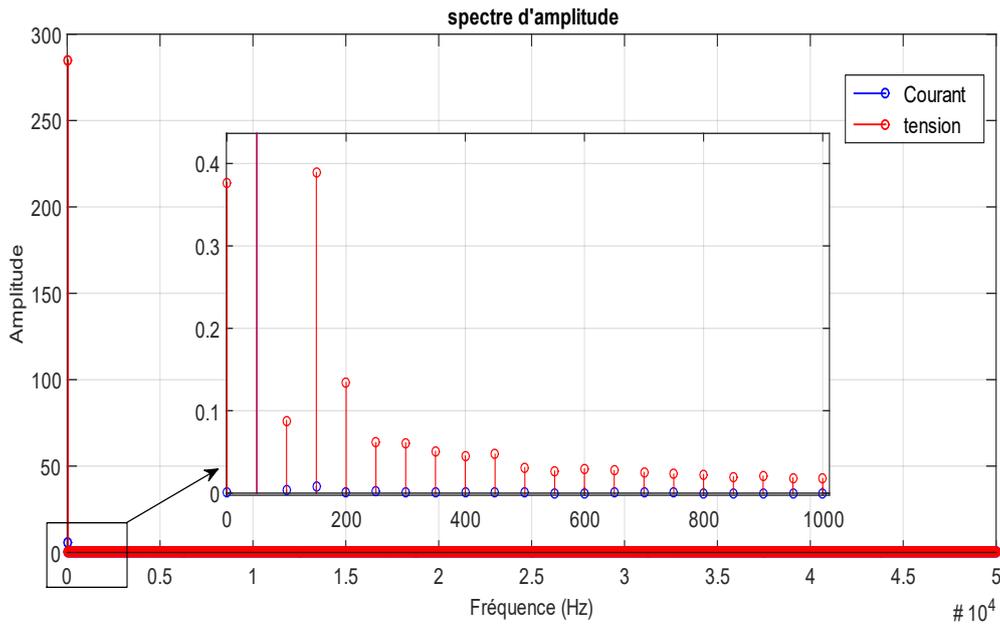


Figure III-4: Spectre d'Amplitude de MCC USB-205

Tableau III-3: Amplitudes des harmoniques et la THD.

Paramètre	Résistance	
	Courant	Tension
Fréquence fondamentale	50 Hz	50 Hz
Amplitude fondamentale	5.655	285
THD (%)	0.157 %	0.0916 %
H3 (150 Hz)	0.00825	0.241
H5 (250 Hz)	0.00287	0.0617
H7 (350 Hz)	0.000199	0.039
H9 (450 Hz)	0.000463	0.0326
H11 (550 Hz)	0.000317	0.0264
H13 (650 Hz)	0.000368	0.0251

Les valeurs très faibles de THD confirment la nature sinusoïdale de la charge résistive

➤ **Calcul et analyse des puissances pour une charge résistive**

Dans Cette section, nous présentons les résultats du calcul des puissances électriques obtenus lors de la mesure sur une charge purement résistive.

- Déphasage tension-courant = 0.0067°
- Tension fondamentale $V_1 = 201.5591 V$
- Courant fondamentale $I_1 = 3.9989 A$

- Puissance apparente $S = 806 \text{ VA}$
- Puissance active $P = 806 \text{ W}$
- Puissance réactive $Q_1 = 0.09435 \text{ VAR}$
- Puissance déformante $D = 1.732 \text{ VAD}$
- Puissance Apparente fondamentale $S_N = 806 \text{ VA}$
- Facteur de puissance (FP) = 1
- Facteur de déformation (FD) = 1

Ces résultats validés par les mesures montrant que le système de mesure développé est fiable pour l'évaluation des grandeurs électriques dans un régime linéaire. Ils confirment également que la charge testée présente un comportement résistif.

Pour illustrer la répartition des différentes composantes de puissance, la **figure III-5** présente le triangle des puissances en trois dimensions.

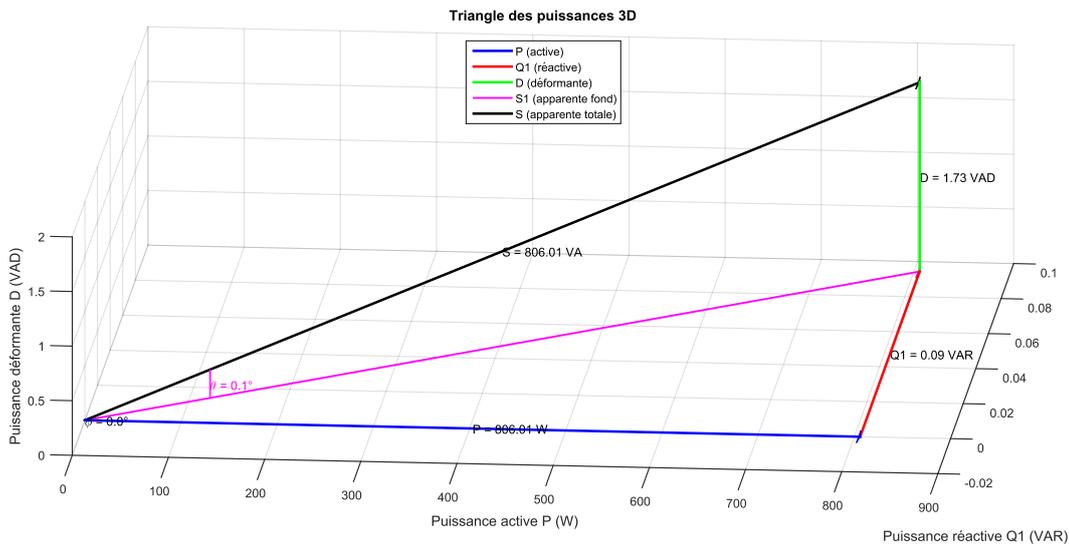


Figure III-5: Triangle des puissances pour une charge Résistive

Sur ce graphique, on observe que la composante active (P) est largement dominante, ce qui confirme l'analyse précédente et la conformité du comportement de la charge à celui d'une résistance pure.

III.4.2 Cas d'une charge non linéaire (3 LED)

Après avoir validé le système de mesure sur une charge purement résistive, notre étude se poursuit avec un cas très représentatif du contexte domestique et industriel actuel : l'analyse de la qualité d'énergie consommée par trois lampes LED connectées en parallèle entre la phase et le neutre. **Mais pourquoi s'intéresser aux lampes LED ?**

Les lampes LED, aujourd'hui largement répandues pour leur efficacité énergétique et leur durée de vie prolongée, sont souvent perçues comme des charges simples et peut problématiques. Pourtant, elles intègrent des circuits électroniques internes complexes qui modifient profondément la forme du courant absorbé.

Contrairement à une charge résistive classique, ces circuits ne consomment pas un courant Sinusoïdal, mais un courant fortement déformé, riche en harmoniques. Ce phénomène rend ces charges non linéaires par nature et en fait une source importante de pollution harmonique dans les réseaux électriques. L'impact de ces harmoniques peut se traduire par des perturbations diverses, telles que l'échauffement des équipements, des perturbations dans les systèmes de mesure, ou une diminution de la qualité globale de l'énergie.

La tension utilisée est 220V et le courant mesurer avec le multimètre est de 0.11A. Les mesures effectuées avec MCC USB-205 donnent les valeurs efficaces suivantes :

$$I_{RMS} = 0.213 A \quad \text{et} \quad V_{RMS} = 219.27 A$$

Comparais aux valeurs théoriques cela nous donne :

Tableau III-4: calcul des erreurs.

	Courant	Tension
Erreur absolue	0.013A	0.73 V
Erreur relative	6.5 %	0.33 %

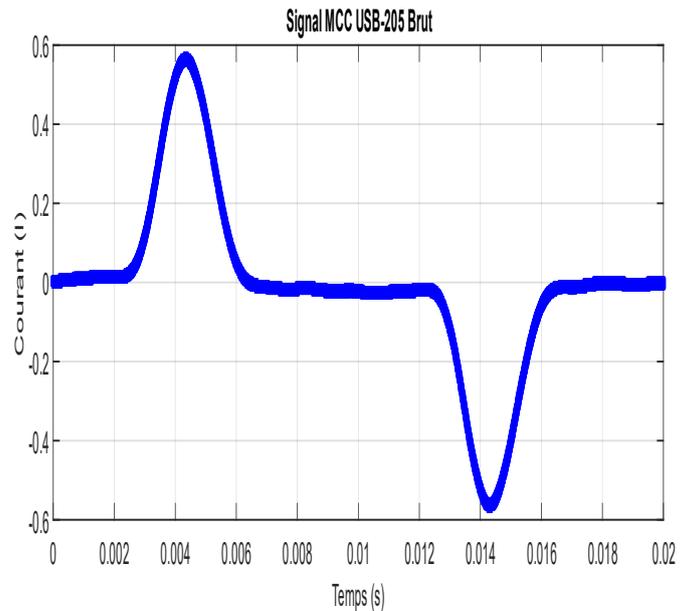
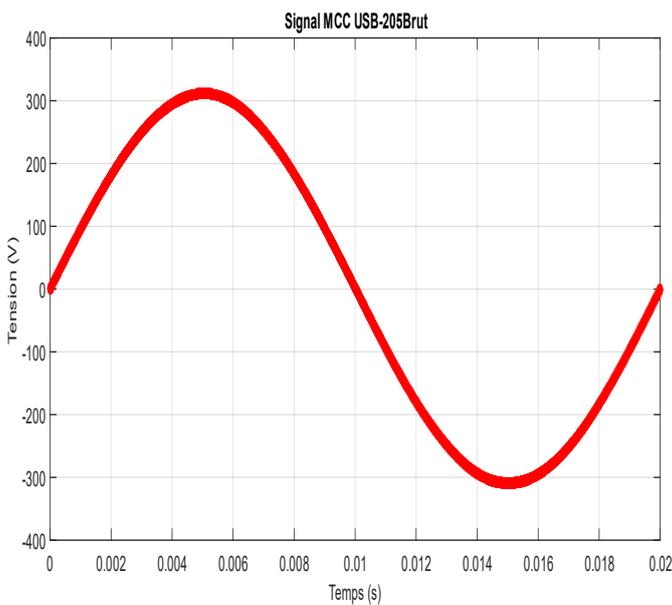


Figure III-6: Signal de courant et de tension des 3 LED

➤ **Analyse fréquentielle :**

L'analyse spectrale réalisée via FFT met en évidence les caractéristiques suivantes pour la tension et le courant mesurés :

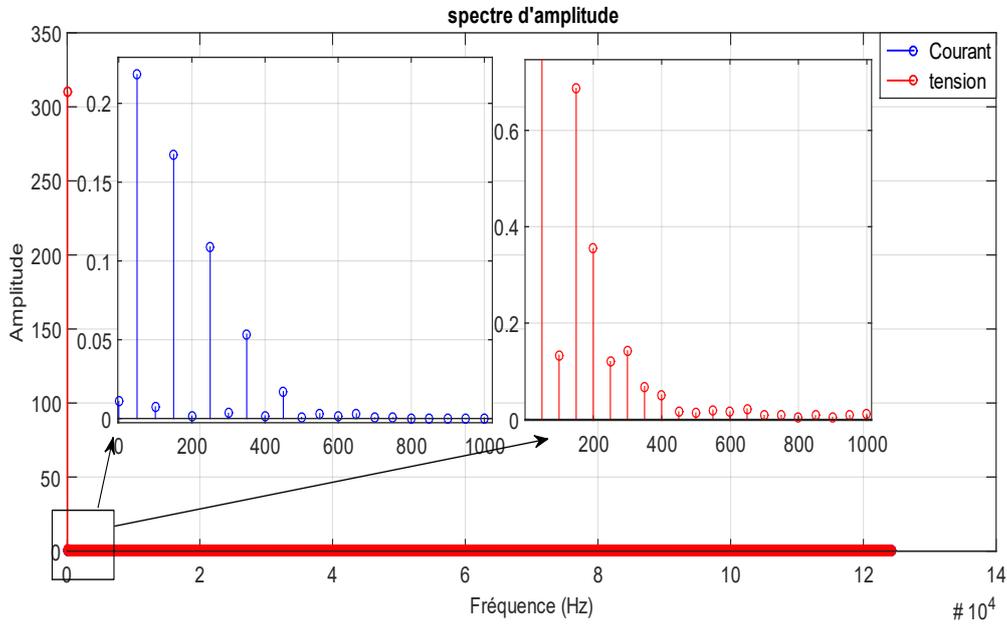


Figure III-7: Spectre d'Amplitude des 3 LED

Tableau III-5: Amplitudes des harmoniques et la THD.

Paramètre	LED	
	Courant	Tension
Fréquence fondamentale	50 Hz	50 Hz
Amplitude fondamentale	0.2182	310.1
THD (%)	95.1 %	0.226%
H3 (150 Hz)	0.167	0.687
H5 (250 Hz)	0.109	0.12
H7 (350 Hz)	0.0535	0.0681
H9 (450 Hz)	0.017	0.0154
H11 (550 Hz)	0.003	0.0191
H13 (650 Hz)	0.00288	0.0216

Les résultats montrent une forte distorsion harmonique dans le courant (THD courant > 95 %), ce qui est caractéristique d'une charge non linéaire.

En revanche, la tension reste très affectée par cette distorsion, grâce à la régulation de l'alimentation ASR-2100, ce qui explique le faible THD de la tension (0.226 %).

➤ Calcul et analyse des puissances pour une charge non linéaire

Voici les résultats issus du calcul des différentes puissances électriques pour cette charge LED :

- Déphasage tension-courant = 14.52°
- Tension fondamentale $V_1 = 219.2477 \text{ V}$
- Courant fondamentale $I_1 = 0.1543 \text{ A}$
- Puissance apparente $S = 46.71 \text{ VA}$
- Puissance active $P = 32.74 \text{ W}$
- Puissance réactive $Q_1 = 8.48 \text{ VAR}$
- Puissance déformante $D = 32.22 \text{ VAD}$
- Puissance Apparente fondamentale $S_N = 33.82 \text{ VA}$
- Facteur de puissance (FP) = 0.7008
- Facteur de puissance fondamental $\cos(\varphi) = 0.9681$
- Facteur de déformation (FD) = 0.7240

Ces résultats confirment le comportement fortement non linéaire de la charge LED : malgré une bonne efficacité énergétique, la forme du courant absorbé présente une forte distorsion harmonique, comme le montre également la THD élevé.

Pour illustrer la répartition des différentes composantes de puissance, la **figure III-8** présente le triangle des puissances en trois dimensions.

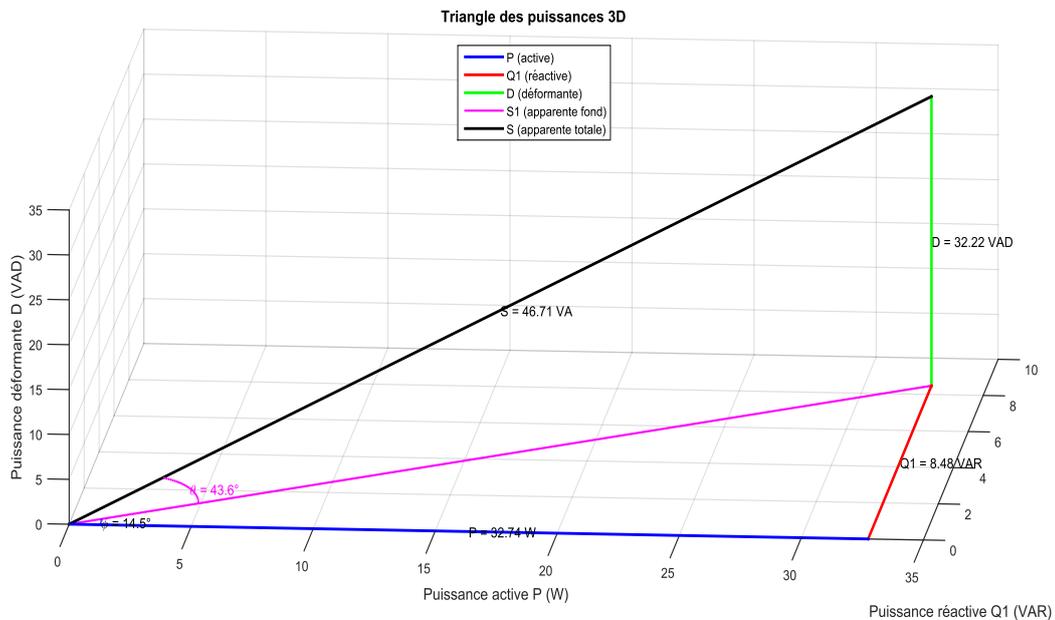


Figure III-8: Triangle des puissances pour une charge non linéaire (LED)

III.4.3 Cas d'une charge inductive (Moteur à cage d'écureuil) :

Après avoir étudié une charge non linéaire fortement déformante (3 LED), nous poursuivons notre analyse expérimentale avec une charge typiquement inductive : un moteur asynchrone à cage d'écureuil. Ce type de charge est omniprésent dans les installations industrielles et présente un comportement très intéressant en termes de qualité d'énergie.

Contrairement aux charges électroniques à découpage (comme les LED), les moteurs asynchrones génèrent principalement des harmoniques impairs dans le courant, tout en maintenant une forme de tension relativement peu affectée par leur fonctionnement. Ces distorsions sont dues aux effets électromagnétiques internes du moteur (variations de flux, saturation magnétique, pertes), et à des phénomènes d'asymétrie dans le bobinage.

A la différence des expériences précédentes (Alimentation via générateur monophasé GW Instek ASR-2100), le moteur à cage d'écureuil a été alimenté directement par un auto-transformateur, raccordé au réseau triphasé.

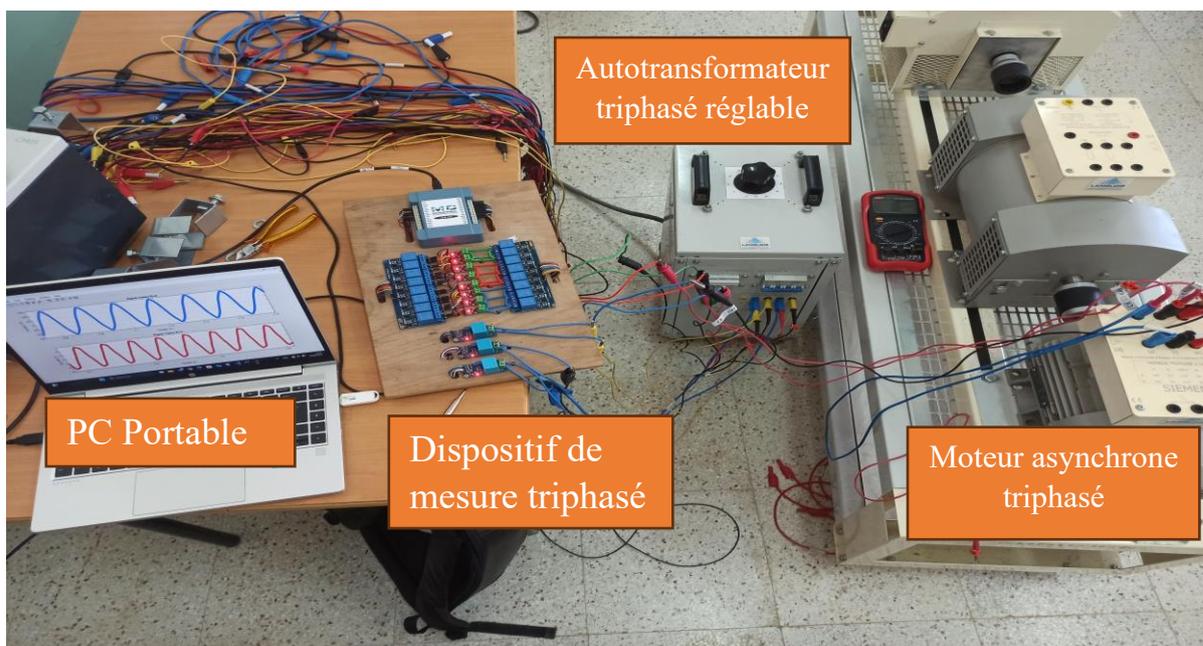


Figure III-9: Mesure des grandeurs électriques d'une machine asynchrone

Tableau III-6: les valeurs de la tension (RMS) et du courant (RMS).

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
V_{rms}	220.8	223.6	221.7
I_{rms}	3.611	3.552	3.596

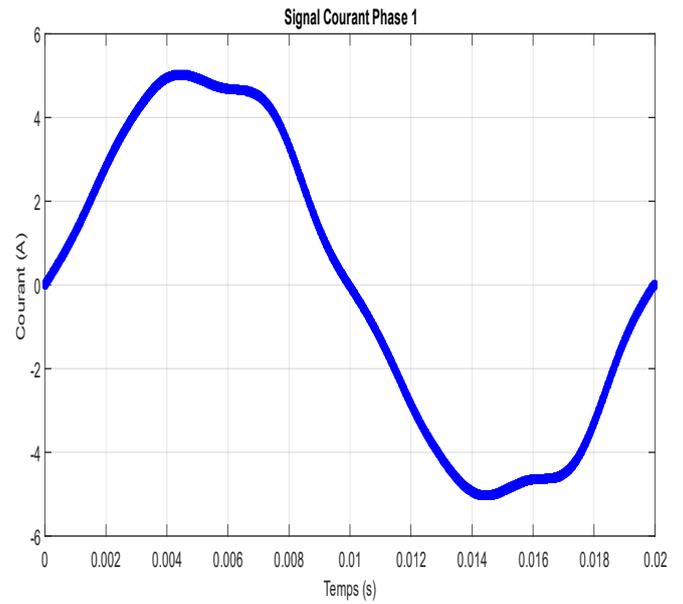
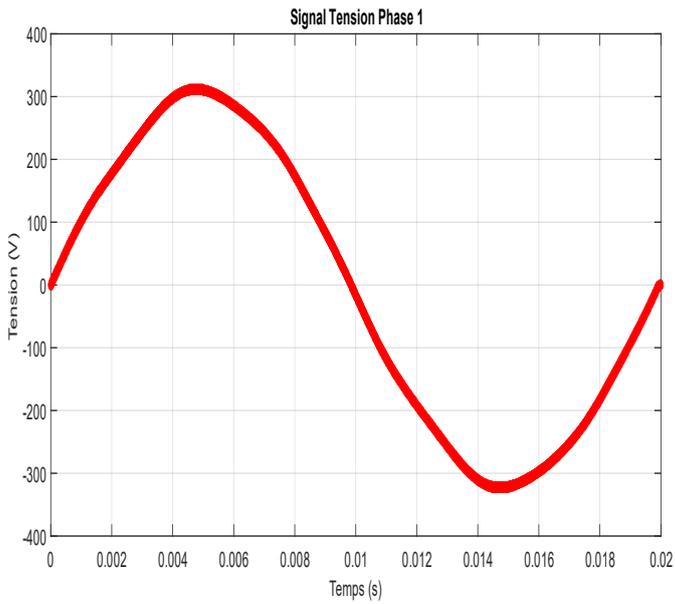


Figure III-10: Signal de courant et de tension de la phase 1

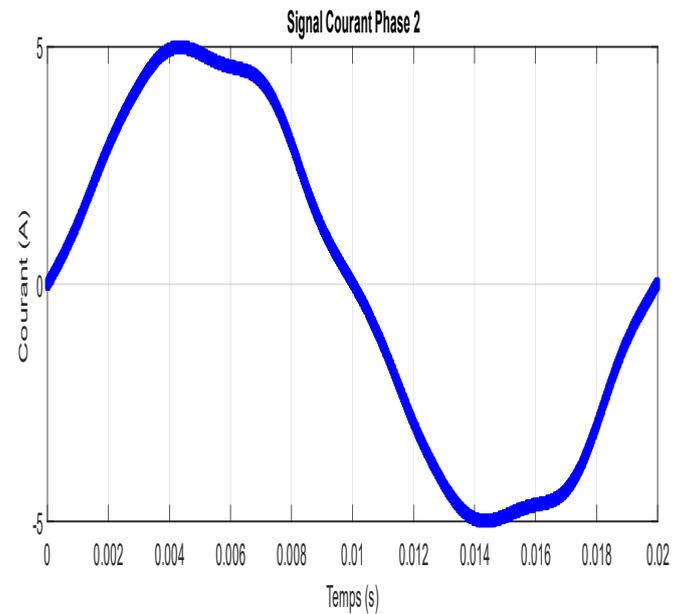
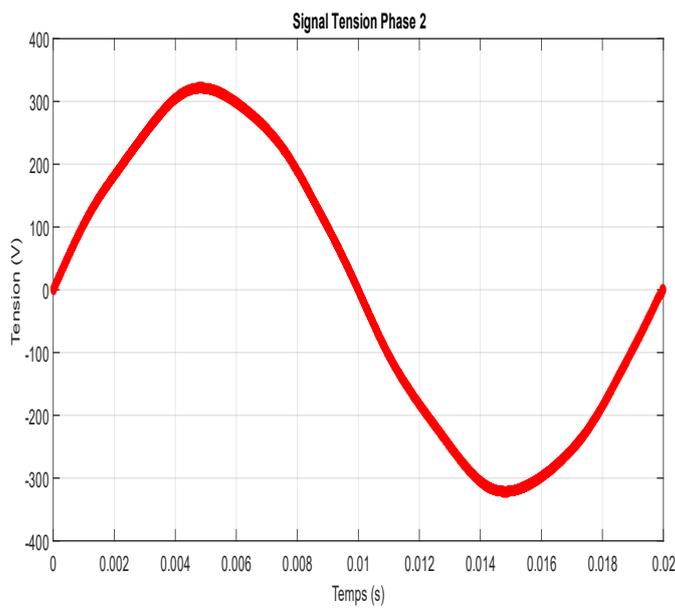


Figure III-11: Signal de courant et de tension de la phase 2

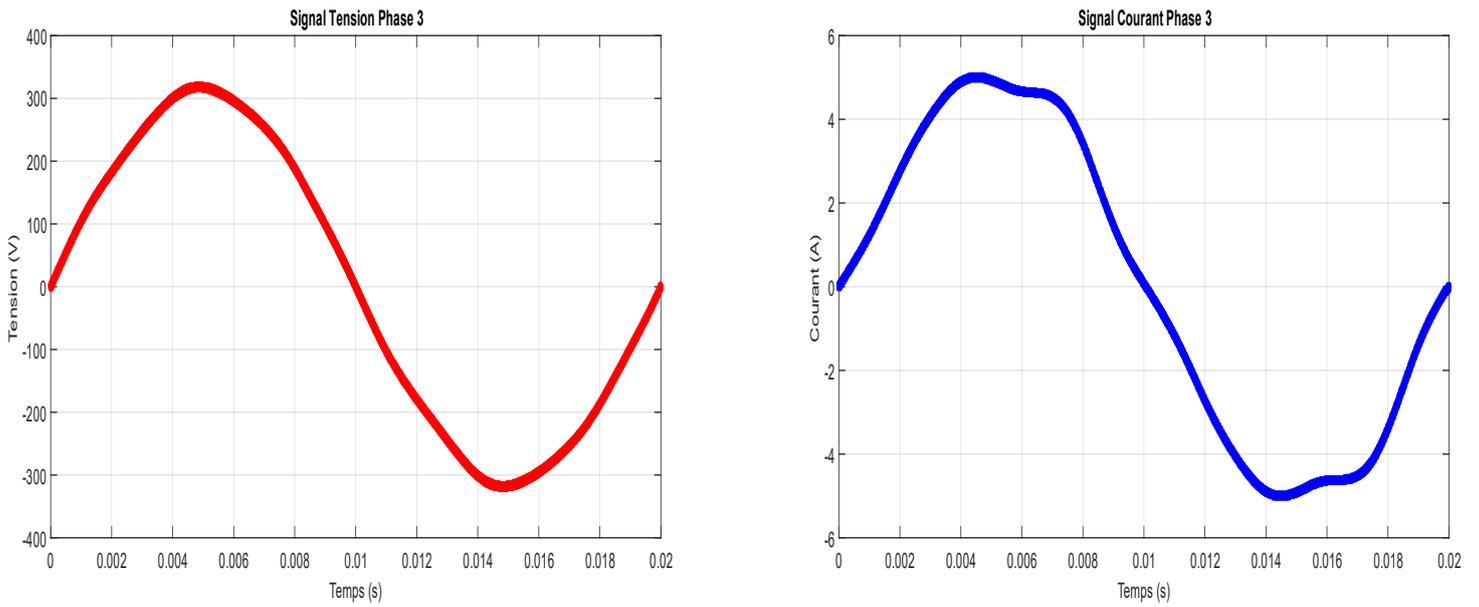


Figure III-12: Signal de courant et de tension de la phase 3

➤ Analyse fréquentielle :

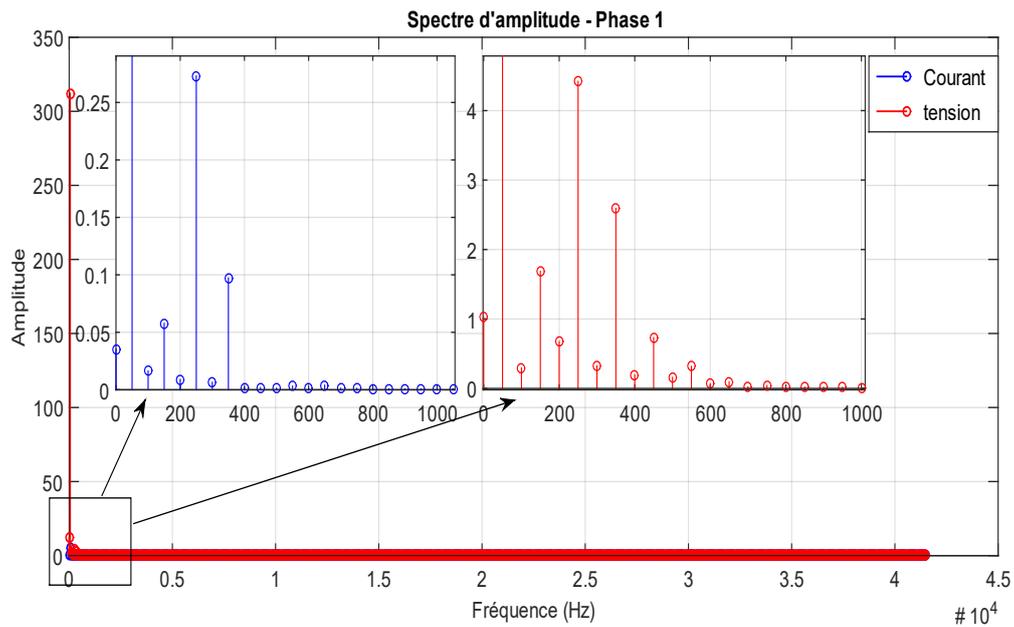


Figure III-13: Spectre d'Amplitude de la phase 1

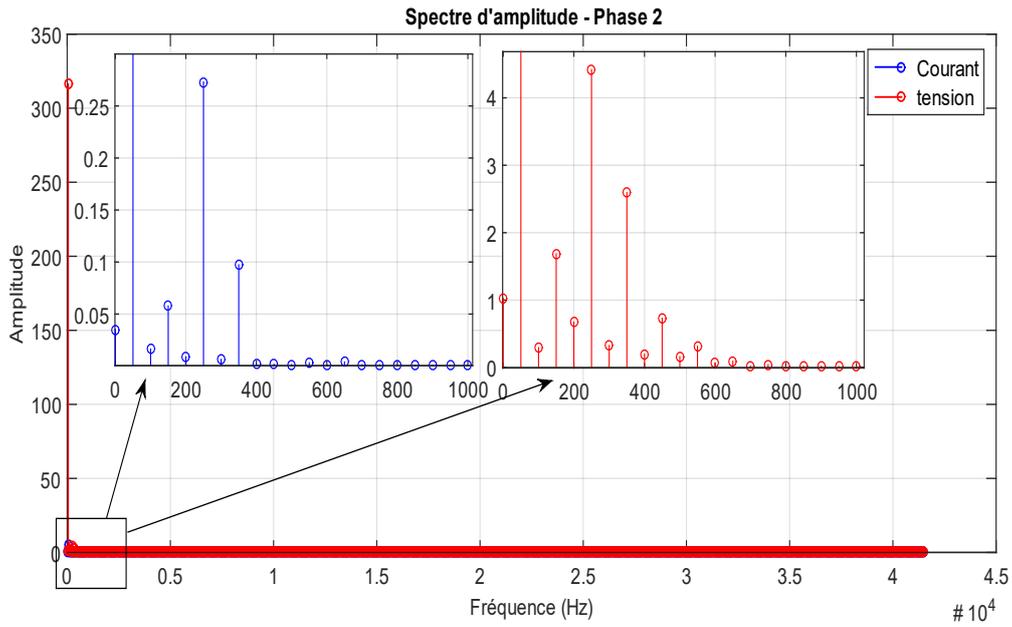


Figure III-14: Spectre d'Amplitude de la phase 2

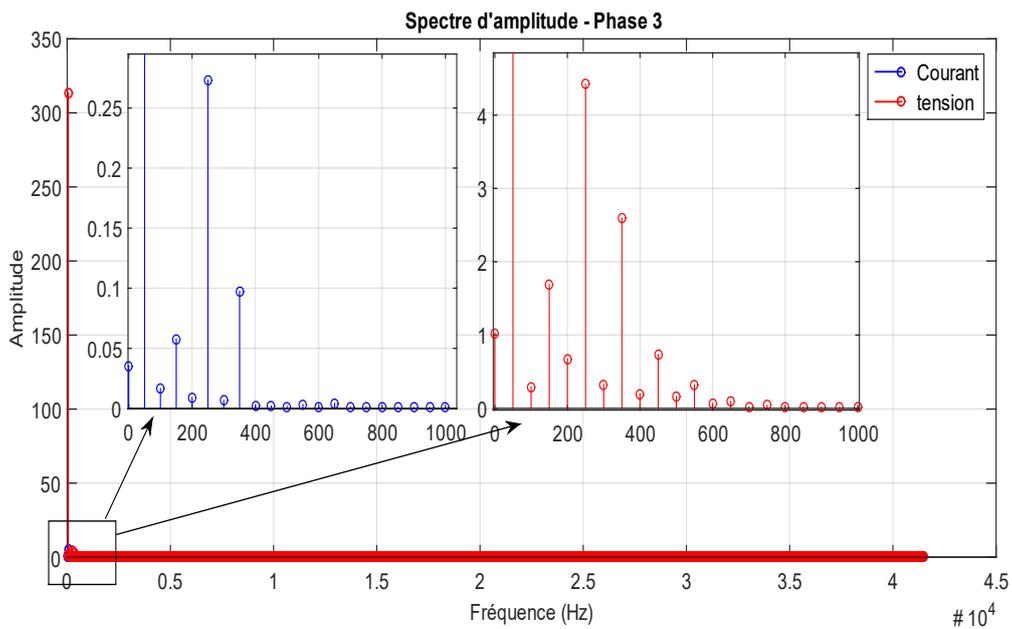


Figure III-15: Spectre d'Amplitude de la phase 3

Tableau III-7: Amplitudes des harmoniques et la THD.

	Moteur à cage d'écureuil					
	Courant			Tension		
Paramètre	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Fréquence fondamentale	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz	50 Hz

Amplitude fondamentale	5.098	5.016	5.076	312	316.2	313.5
THD (%)	5.82 %	5.32 %	5.82 %	1.77 %	1.76 %	1.74 %
H3 (150 Hz)	0.058	0.0565	0.0577	2.15	2.05	1.69
H5 (250 Hz)	0.273	0.244	0.273	4.3	4.35	4.42
H7 (350 Hz)	0.102	0.0909	0.0973	2.62	2.69	2.59
H9 (450 Hz)	0.00133	0.00175	0.0018	0.545	0.676	0.731
H11 (550 Hz)	0.00291	0.00524	0.00312	0.0827	0.177	0.317
H13 (650 Hz)	0.00334	0.00297	0.00392	0.207	0.179	0.0929

L'analyse fréquentielle du moteur à cage d'écureuil met en évidence une distorsion harmonique présente à la fois dans le courant absorbé et dans la tension d'alimentation. On observe que le taux de distorsion harmonique (THD) du courant est globalement plus élevé que celui de la tension.

Cette observation peut apparaître contre-intuitive si l'on considère uniquement la amplitudes absolues des composantes harmoniques. En effet, les valeurs des harmoniques de tension sont élevées que celles du courant. Toutefois, la THD ne dépend pas des valeurs absolues mais du rapport entre l'amplitude des harmoniques et celle de la fondamentale. Ainsi, bien que les amplitudes harmoniques de courant soient faibles en valeur absolue, elles représentent une portion significative de la composante fondamentale, ce qui explique le THD plus élevé.

D'une part, le moteur génère naturellement des harmoniques de courant, principalement de rang impair (H3, H5, H7), en raison de phénomènes internes tels que la saturation magnétique, et la forme non sinusoidale du flux magnétique dans l'entrefer.

D'autre part, il convient de rappeler que l'alimentation utilisée dans cette expérience est le réseaux triphasé, et non le générateur monophasé (GW Instek ASR-2100) utilisé pour les autres charges. Le réseau réel est pollué par des charges non linéaires présentes dans l'installation (LED, onduleurs,.. etc), ce qui explique la présence d'harmoniques déjà existantes dans la tension mesurée. Les harmoniques observées dans la tension ne sont donc pas uniquement imputables au moteur, mais résultent également de cette pollution préexistante du réseau.

➤ Calcul et analyse des puissances pour (moteur à cage d'écureuil)

Tableau III-8: Calcul et analyse des puissances pour chaque phase.

Paramètre	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Tension efficace (V)	220.8	223.6	221.7
Courant efficace (A)	3.611	3.552	3.596
Déphasage (°)	2.655°	0.1245°	2.046°
Puissance apparente (VA)	460.3	458.5	460.3
Puissance active (W)	458.8	457.7	459.1
Puissance réactive (VAR)	21.27	1	16.4
Puissance déformante (VAD)	30.42	27.58	28.63
Facteur de puissance	0.9	0.9	0.9

Système triphasé :

- Puissance active totale (P) : 1376 W.
- Puissance réactive totale (Q) : 38.67 VAR.
- Puissance déformante totale (D) : 86.64 VAD.
- Puissance apparente totale (S) : 1379 VA.
- Facteur de puissance total (FP) : 0.9.
- THD moyen courant : 5.66 %.
- THD moyen tension : 1.76 %.

Ces résultats confirment le comportement faiblement non linéaire du moteur à cage d'écureuil. La puissance active absorbée est très proche de la puissance apparente, ce qui se traduit par un facteur de puissance global élevé.

Bien que le courant présente une distorsion harmonique (5.66 %), celle-ci reste modérée et typique du fonctionnement normal d'une machine asynchrone alimentée en triphasé.

Quant à la tension, sa distorsion harmonique reste faible (1.76 %), ce qui reflète principalement les perturbations présentes sur le réseau électrique, et non un effet direct du moteur.

Pour visualiser la contribution des différentes composantes de puissance, la figure III-16 présente le triangle des puissances triphasé. En trois dimensions.

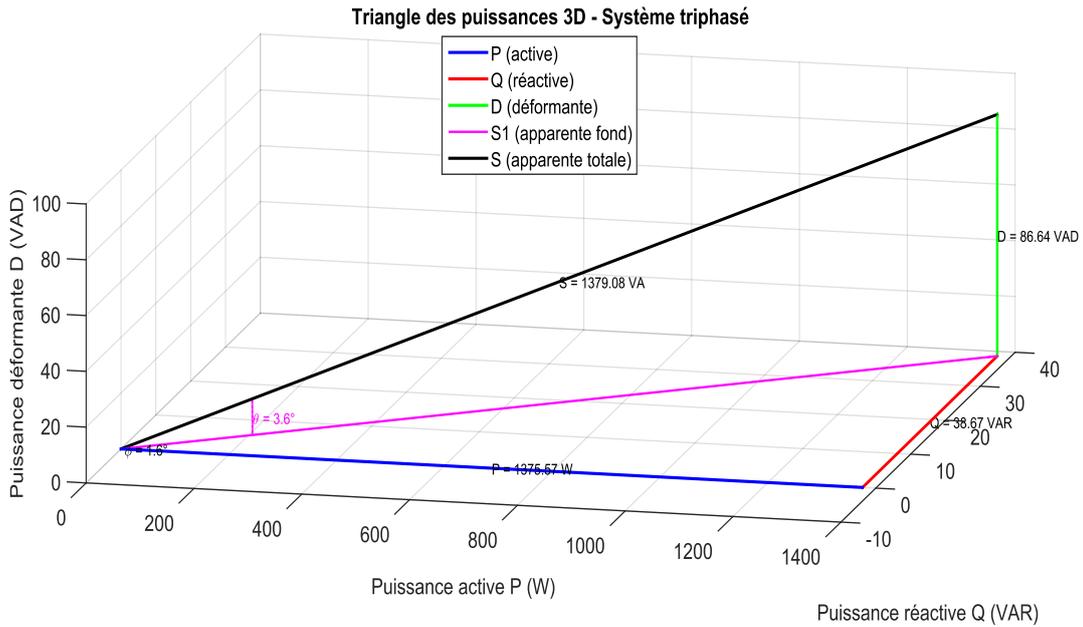
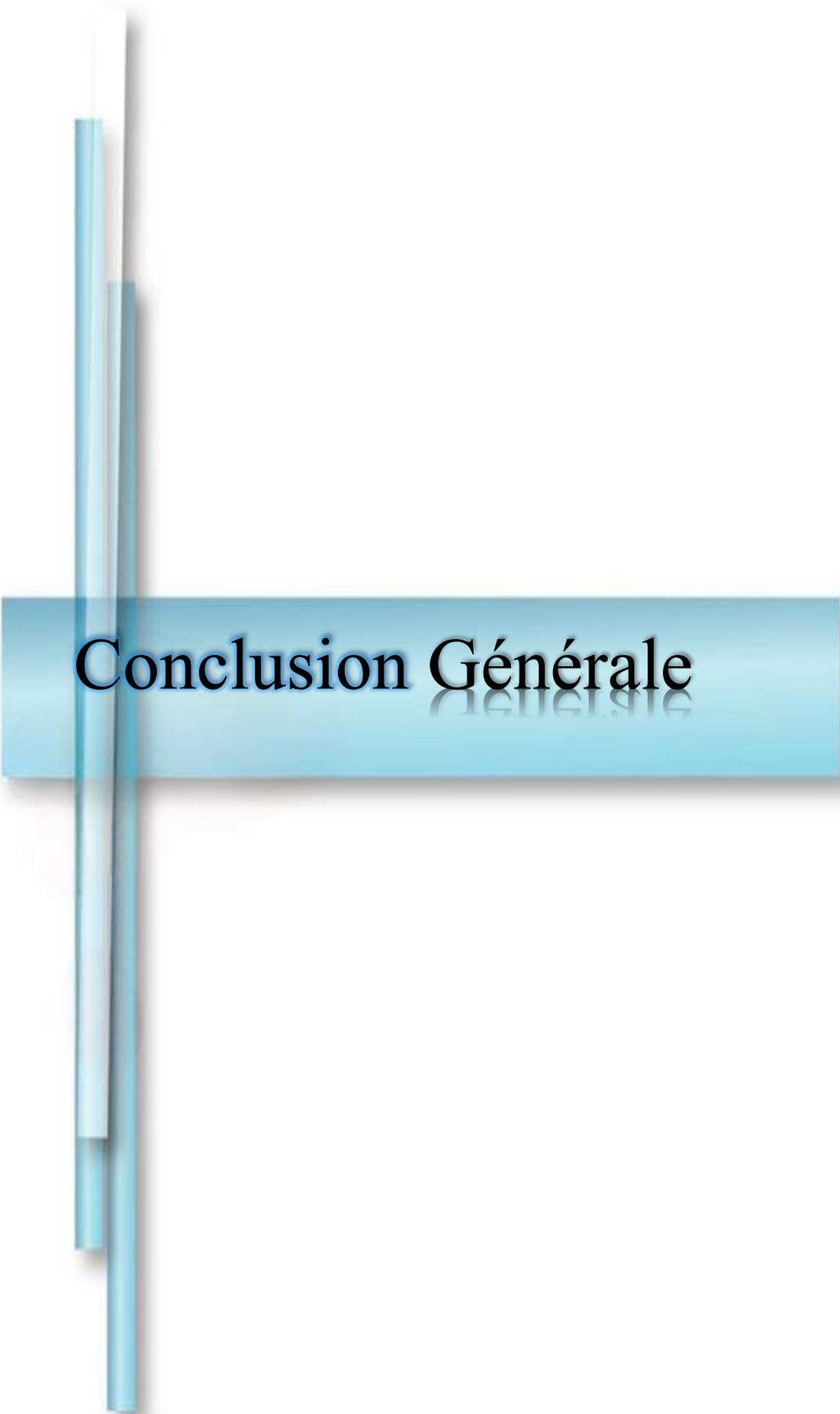


Figure III-16 : Triangle des puissances pour une charge inductive (Moteur à cage d'écureuil)

III.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de valider expérimentalement l'efficacité du dispositif de mesure développé. Grâce à son architecture intelligente et aux traitements réalisés, il a été possible d'analyser avec précision l'impact des différentes charges sur la qualité de l'énergie. Les résultats obtenus confirment la fiabilité du système pour une application concrète et pédagogique.



Conclusion Générale

Conclusion générale

La qualité d'énergie électrique représente aujourd'hui un enjeu majeur, tant pour les installations industrielles que pour les réseaux domestiques. Avec l'évolution constante des technologies et l'intégration croissante de charge non linéaires dans nos systèmes électrique, la surveillance et l'amélioration de cette qualité deviennent des préoccupations centrales pour les ingénieurs. Ce mémoire a permis d'explorer cette problématique complexe en s'appuyant à la fois sur une base théorique solide et sur une approche expérimentale rigoureuse, aboutissant au développement d'un système de mesure innovant et performant.

Dans un premier temps, les fondements de la qualité d'énergie ont été exposés, avec une attention particulière portée aux charges linéaire et non linéaire et les normes (IEEE, IEC) qui régissent ce domaine. Cette étude théorique a permis de mettre en lumière la complexité des perturbations harmoniques qu'elles génèrent et leur impact sur la stabilité des réseaux électrique. L'analyse approfondie sur les harmoniques, et les problèmes courants de la qualité d'énergie, ce qui a fourni une base solide pour comprendre les mécanismes de dégradation de la qualité d'énergie.

L'importance du facteur de puissance, du taux de distorsion harmonique total (THD), ainsi que des différentes composantes de puissance (active, réactive, apparente et déformante) a été mise en évidence dans le cadre de l'évaluation rigoureuse des signaux électriques, cette approche théorique a également permis d'établir les critères de performance nécessaires pour concevoir un système de mesure efficace, en définissant les seuils de précision requis et les fréquences d'échantillonnage optimales.

La deuxième partie du mémoire s'est concentrée sur une étude comparative de différents systèmes d'acquisition. L'Arduino UNO, bien simple et accessible, s'est révélé insuffisant pour des analyses fréquentielles précises, notamment en raison de ses limitations intrinsèques :

- Résolution de conversion analogique-numérique de seulement 10 bits
- Fréquence d'échantillonnage limitée

Ces contraintes techniques se sont traduites par une incapacité à détecter les harmoniques de rang élevé et par des erreurs de mesure non négligeables sur le calcul du THD.

En revanche, les systèmes CASSY Lab et MCC USB-205 ont démontré une excellente fiabilité avec des capacités d'échantillonnage élevées et une précision permettant une détection fidèle des harmoniques et un calcul rigoureux du THD. Le système Sensor Cassy s'est

particulièrement distingué par sa facilité d'utilisation et son interface intuitive, tandis que MCC USB-205 a montré des performances supérieures en termes de rapport qualité-prix et de flexibilité de programmation.

Enfin, la dernière partie du travail a été consacrée à la conception, la réalisation d'un dispositif de mesure triphasé complet et autonome. Représente la contribution pratique majeure de ce mémoire. Construit autour de la carte MCC USB-205, de capteurs de courant ACS712, de capteurs de tension ZMPPT101B et d'un ensemble de 18 relais permettant la commutation automatique des voies, ce système a été conçu pour répondre aux exigences les plus strictes en matière de précision et de fiabilité.

L'architecture développée permet la sélection automatique des voies de mesure selon la configuration du réseau et assure une acquisition synchrone des signaux de tension et de courant. L'interface utilisateur développée en python et Matlab offre une visualisation en temps réel des formes d'onde, des spectres harmoniques, et des grandeurs calculées, facilitant ainsi l'analyse et l'interprétation des résultats.

Les traitements numériques implémentés, basés sur calcul de la FFT et la THD, ont permis d'évaluer avec une précision remarquable les performances de diverses charges testées : résistive pures, LED, moteur asynchrone.

Ce travail démontre qu'il est possible de développer un système de mesure fiable, économique et performant, parfaitement adapté aussi bien aux environnements pédagogiques qu'aux applications industrielles de terrain. Cette recherche contribue ainsi à l'avancement des connaissances dans le domaine de la qualité d'énergie électrique, tout en proposant une solution pratique et économique pour la surveillance et l'analyse des réseaux électriques, répondant aux défis actuels et futurs de l'ingénierie électrique moderne.

Références bibliographiques

- [1] Chapman, D. (2002). " Notions de qualité de l'énergie ". Copper Development Association, Royaume-Uni, 1-4
- [2] P. ESPEL, " Analyse de la qualité de l'énergie électrique, mesure de Flicker ", Revue Française de métrologie n°20, Laboratoire national de métrologie et d'essai (LNE), France, 2009
- [3] P. FERRACI, " la qualité de l'énergie électrique " , Cahier Technique de Schneider Electric CT 199, édition octobre 2001, PP, 3 - 16.
- [4] M. KEBBAL & K. BAKIR, " Paramètre de la qualité de la tension d'un réseau électrique, étude et analyse ", Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, ENP Alger, juin 2008, PP, 55 - 104.
- [5] E. FELICE & P. REVILLA, " qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique ", Dunod, Paris, 2009, PP, 11 - 66.
- [6] Tenenbaum, B., Greacen, C., Siyambalapitiya, T., & Knuckles, J. (2014). *From the Bottom Up: How Small Power Producers and Mini-Grids Can Deliver Electrification and Renewable Energy in Africa*. World Bank Publications.
- [7] Lasnier, F. (1990). *Manuel d'ingénierie photovoltaïque* . CRC Press.
- [8] Ferrolho, C., Barata, F., & Gamboa, P. (2022). Power quality and modeling analysis of a university campus electrical distribution system. *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, 13, 1–6. <https://doi.org/10.1109/icecet55527.2022.9872840>.
- [9] Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2004). *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons.
- [10] Dalali, M., & Jalilian, A. (2015). Indices for measurement of harmonic distortion in power systems according to IEC 61000-4-7 standard. *IET Generation Transmission & Distribution*, 9(14), 1903–1912. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0366>.
- [11] Phannil, N., Jettanasen, C., & Ngaopitakkul, A. (2018). Harmonics and Reduction of Energy Consumption in Lighting Systems by Using LED Lamps. *Energies*, 11(11), 3169. <https://doi.org/10.3390/en11113169>.
- [12] Herwegh, D. (2024b, juillet 29). *Surpasser la recommandation IEEE 519 sur les harmoniques pour une performance inégalée - SmartD Technologies*. SmartD

- Technologies Inc. <https://smartd.tech/fr/vos-avantages/surpasse-la-recommandation-ieee-519-sur-les-harmoniques-pour-une-performance-inegalee/>
- [13] SITELEC, *Puissances et harmoniques* [en ligne]. Disponible sur : https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/puissances_harmoniques.pdf
- [14] microcontrollerslab, « Acs712 current sensor interfacing with Arduino for ac and dc current measurement », 12/11/2017.
- [15] Qingxian Zeming Langxi Electronic Devices Co., Ltd., « 2 mA/2 mA Voltage Transformer ZMPT101B-SP2CIFICATION », 2018.
- [16] eleshop.fr, « GW Instek ASR-2100 – Alimentation AC/DC universelle », Disponible sur : <https://eleshop.fr/gw-instek-asr-2100-universel.html>.
- [17] LD Didactic GmbH, *CASSY Lab 2 – Universal Measurement System*, Fiche technique du module 524010, consulté le 21 avril 2025, disponible sur : <https://www.ld-didactic.de>
- [18] Smith, W. A. (2019). *Arduino uno hardware manual : A Reference and User Guide for the Arduino Uno Hardware and Firmware*.
- [19] Amazon.fr. (s. d.). <https://www.amazon.fr/USB-205-USB-DAQ-Input-500KS/dp/B09Q8TN97K>