

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA
Faculté des sciences appliquées**



Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Réalisé par :

BECH NESRINE

Et

MOHAMMED CHERIF MAHDI

Thème

**Étude du comportement d'un transformateur monophasé
alimenté par une source non sinusoïdale**

Soutenu le : 23/06/2026

Devant le Jury composé de :

Mme. Madi Saida	M.C.A	Univ. Bouira	Présidente
Mr. Bensaid Samir	PROF	Univ. Bouira	ENCADREUR
Mr. Houassine Hamza	PROF	Univ. Bouira	Co-ENCADREUR
Mme. SMAIL Houria	M.C.A	Univ. Bouira	Examinatrice

Année Universitaire :2025-2026



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Bouira, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie électrique



Bouira le : 14/06/2026

Autorisation de soutenance d'un mémoire de Master

Je soussigné(e), l'enseignant (e) : HOUASSINE Hamza

Co-Encadreur des étudiants (es) :

- 1- BECH NESRINE
- 2- MOHAMMED CHERIF MAHDI

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Les autorise à soutenir leur **mémoire** de Master.

Signature du rapporteur

Dédicace 1

J'ai l'honneur et le grand plaisir de dédier ce travail

À moi-même

À la persévérance dont j'ai fait preuve, à la discipline que j'ai su maintenir et aux efforts que je n'ai jamais cessé de fournir. Aux moments de doute durant lesquels j'ai choisi de continuer, ainsi qu'aux épreuves que j'ai su transformer en force et en maturité. Ce travail reflète mon engagement, mon évolution personnelle et la confiance que j'ai progressivement construite en moi. Je me le dédie avec gratitude, fierté et respect

À ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurais te remercier comme il se doit. Ton affection me protège, ta bienveillance me guide, et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour surmonter les différents obstacles.

À mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'estime et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne saurait égaler les efforts que vous avez fournis, jour et nuit, pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le fruit des sacrifices que vous avez consentis tout au long de ces années pour ma formation et mon épanouissement.

À mes sœurs et à mon frère

Je vous adresse ce travail avec beaucoup d'amour. Merci pour votre soutien, vos encouragements et votre présence précieuse tout au long de ce chemin. Votre affection m'a

Toujours donné la force d'aller jusqu'au bout.

À mon binôme

Je te remercie sincèrement pour ta collaboration, ton sérieux et ton engagement tout au long de ce travail. Cette expérience partagée a été enrichissante. Je te dédie ce travail avec estime et reconnaissance.

Dédicace 2

À la mémoire de mon cher père

Ce travail je te le dédie avec tout mon amour. Tu es parti trop tôt, mais tu as toujours été mon guide et ma plus grande source de motivation. J'espère que, de là où tu es, tu es fier de ce que j'ai accompli. Puisse Allah t'accorder Sa sainte miséricorde et t'accueillir dans Son vaste Paradis.

À ma chère mère

Aucun mot ne saurait exprimer ma gratitude pour ton amour inconditionnel, ta patience et tes prières quotidiennes. Tu as sacrifié tant de choses et tu as tout fait pour me voir réussir. Ce mémoire est le fruit de tes efforts et de ton soutien indéfectible. Que ce travail soit le reflet de ta grandeur.

À mon grand frère

Mon repère, mon bras droit. Je te remercie pour ton soutien de chaque instant, tes encouragements et ta présence rassurante tout au long de ce parcours. Je te remercie pour tes précieux conseils et ton affection qui m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout de mes projets, ce succès est aussi le tien.

À mes grandes sœurs

Pour votre amour inconditionnel, votre patience et votre soutien indéfectible tout au long de mon parcours universitaire. Je vous remercie d'être toujours présentes et d'être les meilleures alliées que l'on puisse espérer, ce succès est aussi le vôtre.

À ma chère binôme

Ma partenaire de mémoire, Je tiens à t'exprimer ma profonde gratitude pour ta collaboration et efforts mises au cours de ces derniers mois. Travailler à tes côtés a été une expérience enrichissante. Je te remercie pour ton sérieux, ta rigueur et ton soutien mutuel face aux moments de doute. Ce mémoire est le fruit d'un véritable travail d'équipe

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier Dieu, le Tout-Puissant, de nous avoir donné le courage, la volonté et la force nécessaires pour mener ce travail à bien

Ce travail a été réalisé au sein du faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Bouira

Nous avons l'honneur et le plaisir d'exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur le Professeur Houassine Hamza, ainsi qu'à

Monsieur le Professeur Bensaid Samir.

Nous les remercions pour la qualité exceptionnelle de leur encadrement, ainsi que pour leur patience, leur rigueur et leur disponibilité tout au long de la réalisation de

ce projet.

Nous tenons également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants du département de génie électrique qui ont contribué à notre parcours universitaire.

Résumé

Ce mémoire présente une étude expérimentale du comportement d'un transformateur monophasé alimenté par une source non sinusoïdale. L'objectif est d'analyser l'influence des harmoniques sur les performances du transformateur en présence de charges linéaires et non linéaires. Les essais réalisés permettent d'évaluer l'évolution des tensions, des courants, du rendement, des pertes et de la chute de tension. Les résultats montrent que les formes d'ondes non sinusoïdales affectent le fonctionnement du transformateur en augmentant les pertes et en réduisant le rendement, particulièrement avec les charges non linéaires. Cette étude met ainsi en évidence l'impact des harmoniques sur les performances des transformateurs monophasés et l'importance de leur prise en compte dans les réseaux électriques modernes.

Mots-clés : Transformateur monophasé, source non sinusoïdale, harmoniques, charge linéaire, charge non linéaire, rendement, pertes, chute de tension.

Abstract

This dissertation presents an experimental study of the behavior of a single-phase transformer supplied by a non-sinusoidal source. The main objective is to analyze the influence of harmonics on transformer performance under linear and non-linear load conditions. The experimental tests evaluate the variations of voltage, current, efficiency, losses, and voltage drop.

The obtained results show that non-sinusoidal waveforms affect transformer operation by increasing losses and reducing efficiency, especially when supplying non-linear loads. This study highlights the impact of harmonics on the performance of single-phase transformers and emphasizes the importance of considering these effects in modern electrical power systems.

Keywords: Single-phase transformer, non-sinusoidal source, harmonics, linear load, non-linear load, efficiency, losses, voltage drop

ملخص

يقدم هذا العمل دراسة تجريبية لسلوك محول أحادي الطور مُغذّى بمصدر غير جيبي. يهدف البحث إلى تحليل تأثير التوافقيات على أداء المحول عند تشغيله مع أحمال خطية وغير خطية. وقد أُجريت مجموعة من التجارب لدراسة تغيرات الجهد والتيار والمردود والخسائر وهبوط الجهد. أظهرت النتائج أن الموجات غير الجيبية تؤثر على أداء المحول من خلال زيادة الخسائر وتقليل المردود، خاصة عند تغذية الأحمال غير الخطية. وتبرز هذه الدراسة أهمية أخذ تأثير التوافقيات بعين الاعتبار عند دراسة وتشغيل المحولات أحادية الطور في شبكات الطاقة الكهربائية الحديثة.

الكلمات المفتاحية: محول أحادي الطور، مصدر غير جيبي، التوافقيات، حمل خطي، حمل غير خطي، المردود، الخسائر، هبوط الجهد

Table des matières

Dédicace 1.....	I
Dédicace 2.....	II
Remerciements.....	III
Résumé	IV
Table des matières	V
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
Listes des Acronymes et Symboles	XIII
Introduction Générale.....	1
<i>CHAPITRE I : Étude théorique du transformateur monophasé</i>	
Introduction	2
I.1 Généralités sur les transformateurs	2
I.1.2 Rôle dans les réseaux électriques.....	3
I.1.3 Domaines d'application.....	3
• Transport	3
• Industrie	4
• Electronique de puissance	4
I.2 Transformateur monophasé.....	4
I.2.1 Paramètres nominaux.....	5
• La tension	5
• Le courant	6
• La puissance apparente nominale.....	6
• Le rendement	6
I.3 Principe de fonctionnement	7

• Loi de Faraday.....	7
• Loi de Lenz.....	7
• Relation tension-flux	7
I.4 Modélisation électrique du transformateur	8
I.4.1 Schéma équivalent exact	Erreur ! Signet non défini.
I.4.2 Schéma équivalent simplifié.....	10
I.4.3 Paramètres du modèle (R, X, X _m , R _{fe})	11
I.5 Pertes et rendement du transformateur	11
I.5.1 Pertes du transformateur	12
a) Les pertes par effet joule.....	12
b) Les pertes fer.....	12
• Les pertes par courant de Foucault	12
• Les pertes par hystérésis.....	13
• Autres pertes	14
I.5.2 Rendement du transformateur	15
1.6 Fonctionnement sous-alimentation sinusoïdale	15
1.7 Relation entre le transformateur et les sources non sinusoïdales	16
I.7.1 Définition d'une alimentation non sinusoïdale.....	16
I.7.2 Origine des tensions non sinusoïdales	16
I.7.3 Effets sur le transformateur.....	17
1. Saturation du noyau.....	17
2. Augmentation des pertes fer.....	17
3. Augmentation des pertes cuivre.....	17
4. Échauffement	17
5. Bruit et vibrations	17
6. Effets supplémentaires	17
Conclusion.....	18

CHAPITRE II : Qualité de l'énergie électrique et phénomènes harmonique.....	
Introduction	18
II.1 Formes d'ondes non sinusoïdales en électrotechnique.....	18
II.2 Notions d'analyse harmonique.....	19
II.2.1 Série de Fourier	19
II.2.2 Harmoniques	20
II.2.3 Le taux de distorsion harmonique THD	21
• Total Demand Distortion (TDD)	22
• Facteur de puissance	22
II.3 Sources des harmoniques	23
II.3.2 Charges non linéaires.....	24
II.3.3 Équipements d'électronique de puissance	24
II.3.4 Charges non linéaires domestiques et industrielles.....	26
a) Charges domestiques.....	27
b) Charges industrielles.....	27
II.4 Phénomènes liés à la dégradation de la qualité de l'énergie électrique	27
➤ Flicker.....	27
➤ Creux de tension (sag).....	28
➤ Surtensions (swell).....	28
➤ Déséquilibre	28
➤ Bruit électromagnétique / compatibilité électromagnétique (CEM)	28
➤ Coupures brèves	29
II.5 Normes et recommandations internationales	29
II.5.1 IEEE 519	29
II.5.2 Normes IEC 61000 – compatibilité électromagnétique et harmoniques	30
II.5.3 Lien entre les normes et la qualité de l'énergie électrique	31
II.6 Impact des sources non sinusoïdales sur les systèmes électriques	31

❖ Impact sur les réseaux électriques	31
❖ Impact sur les machines électriques	32
❖ Impact sur les équipements électroniques.....	32
❖ Impact sur les dispositifs de protection	32
Conclusion.....	33
Chapitre III : Partie pratique et étude expérimentale du transformateur	
Introduction	34
III.1 Bancs d'essai	34
III.1.1 Eléments du banc d'essai	35
• III.1.1.1 Générateur de signaux linéaires et non linéaire.....	36
• III.1.1.2 Transformateur Harvest HBK2-100	36
• III.1.1.3 Sonde de tension Langlois ISOL 720.....	37
• III.1.1.4 Module d'acquisition des signaux SENSOR-CASSY.....	39
III.2. Étude du comportement du transformateur à vide.....	40
III.3 Étude du comportement du transformateur en charge	41
III.3.1 Sous-alimentation sinusoïdale	41
1- Alimentation sinusoïdale et charge linéaire	41
➤ Tensions et courants au primaire et au secondaire : cas sinusoïdal linéaire.....	42
a. Caractéristiques de fonctionnement du transformateur	43
2- Alimentation sinusoïdale et charge non-linéaire	46
➤ Les Tensions et courants au primaire et au secondaire : cas sinusoïdal non linéaire	46
b. Caractéristiques de fonctionnement du transformateur	48
III.3.2 Sous-alimentation non sinusoïdale	52
1. Alimentation non-sinusoïdale et charge linéaire	54
➤ Les Tensions et courants au primaire et au secondaire : cas non sinusoïdal linéaire	56

c.	Caractéristiques de fonctionnement du transformateur	57
2.	Alimentation non-sinusoidale et charge non linéaire.....	61
➤	Les Tensions et courants au primaire et au secondaire : cas non sinusoïdal non linéaire	63
d.	Caractéristiques de fonctionnement du transformateur	64
III.4	Impact de la déformation de la tension d'alimentation et de la charge sur le comportement du transformateur	68
III.4.1	Impact de la déformation de la tension (à vide et en charge)	69
III.4.2	Impact de la nature de la charge (linéaire et non linéaire)	69
III.4.3	Impact combiné tension déformée + charge non linéaire	69
Conclusion.....		69
Conclusion générale		71
Bibliographie.....		71

Liste des figures

La figure I.1 illustre le rôle des transformateurs dans le réseau de transport de l'énergie électrique, depuis la production jusqu'à la distribution aux consommateurs.....	3
Figure I.1 Schéma des transformateurs dans un réseau de transport électrique [5].....	3
Figure I.3 Différent types de noyaux de transformateurs [4].....	5
Figure I.5 Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel [7].....	9
Figure I.6 Schéma équivalent du transformateur [8].....	10
Figure I.7 Courbe d'hystérésis dans un transformateur [9].....	14
Figure II.1 Formes d'ondes non sinusoïdales courantes [14]	18
Figure II.2 Onde sans contenu harmonique [15]	20
Figure II.3 Onde de tension avec contenu harmonique [15]	21
Figure II.4 Montage redresseur monophasé simple alternance commandé (Débit sur charge résistive) [20]	24
Figure II.5 Schéma du gradateur monophasé (Charge résistive) [20]	25
Figure II.6 Montage PD3 toutes diodes [19]	26
Figure III.1 Banc d'essai avec charge linéaire.....	35
Figure III.2 Banc d'essai avec charge non linéaire	35
Figure III.3 le Générateur GW Instek ASR-2100 [29]	36
Figure III.7 Évolution de la puissance absorbée à vide P_{10} en fonction du taux de distorsion harmonique de la tension (THDv)	41
Figure III.8 Formes d'onde du courant primaire et tension secondaire du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge linéaire à 25 % de la charge nominale	42
Figure III.9 Formes d'onde du courant primaire et tension secondaire du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge linéaire à 50 % de la charge nominale	43
Figure III.10 Formes d'onde du courant primaire et tension secondaire du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge linéaire à 100 % de la charge nominale	43
Figure III.14 Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge non linéaire à 25 % de la charge nominale	47

Figure III.20 Évolution des pertes du transformateur en fonction du taux de distorsion harmonique du courant (THDi).....	52
---	-----------

Liste des tableaux

Tableau I.1 Paramètres du modèle équivalent du transformateur et leur signification ...	11
Tableau II.1 limites IEEE pour la distorsion harmonique de la tension.....	30
Tableau III.1 Résultats des P10 et THDv des tensions non sinusoïdales.....	40
Tableau III.2 Résultats du cas source sinusoïdale et charge linéaire.....	42
Tableau III.3 Résultats du cas source sinusoïdale et charge non linéaire	46
Tableau III.4 Résultats du signal ARB13 pour le cas source non sinusoïdale et charge linéaire	55
Tableau III.5 Résultats du signal ARB15 pour le cas source non sinusoïdale et charge linéaire	55
Tableau III.6 Résultats du signal STAIR1 pour le cas source non sinusoïdale et charge linéaire	55
Tableau III.7 Résultats du signal STAIR3 pour le cas source non sinusoïdale et charge linéaire	55
Tableau III.8 Résultats du signal ARB13 pour le cas source non sinusoïdale et charge non linéaire.....	62
Tableau III.9 Résultats du signal ARB15 pour le cas source non sinusoïdale et charge non linéaire.....	62
Tableau III.10 Résultats du signal STAIR1 pour le cas source non sinusoïdale et charge non linéaire.....	62
Tableau III.11 Résultats du signal STAIR3 pour le cas source non sinusoïdale et charge non linéaire.....	63

Listes des Acronymes et Symboles

- **Acronymes**

AC	Alternative current
CEI	Commission Électrotechnique Internationale
CEM	Compatibilité électromagnétique
DC	Direct current
FP	Facteur de puissance
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	Organisation internationale de normalisation
LED	Light emitting diode
SAG	Creux de tension
SWELL	Surtension
TDD	Total demand distortion
THD	Total harmonic distortion

- **Symboles**

A	Section du noyau magnétique	m ²
A_n	Amplitude	
B_{max}	Induction magnétique maximale	T
E	Tension induite	V
E	Force électromotrice	V
FP_{distro}	Le facteur de puissance de distorsion	
P_{absorbé}	Puissance absorbée	W
P_{utile}	Puissance utile	W
R_c	Résistance des pertes fer (noyau)	Ω

Listes des Acronymes et Symboles

R_{fe}	Résistance représentant les pertes fer	Ω
S_n	Puissance apparente nominale	VA
U_n	Tension nominale	V
U_1	Tension primaire	V
U_{1m}	Tension maximale	V
U_2	Tension secondaire	V
X_m	Réactance magnétisante	Ω
a_0	Composante continue du signal	
a_n, b_n	Coefficient des harmoniques	
i_1	Courant primaire	A
i_2	Courant secondaire	A
i_n	Courant nominal	A
I_L	Le courant maximal de demande au point de couplage commun	A
m	Rapport de transformation	
n_1	Nombre de spires primaires	
n_2	Nombre de spires secondaire	
Φ_{f_1}	Flux de fuite primaire	Wb
Φ_{f_2}	Flux de fuite secondaire	Wb
Φ_c	Flux commun	Wb
Φ_m	Flux mutuel	Wb
φ_n	Angle de de phase	
ω	Vitesse angulaire	Rad/s
η	Rendement	

Introduction générale

Introduction Générale

Le transformateur monophasé constitue un élément fondamental dans les systèmes électriques, en particulier pour l'adaptation des niveaux de tension, le transfert de puissance et l'isolation galvanique entre les circuits. Son étude reste essentielle pour comprendre le fonctionnement des réseaux électriques et des installations industrielles, notamment dans les conditions de fonctionnement réelles où les grandeurs électriques ne sont pas toujours parfaitement sinusoïdales [1].

Dans les réseaux électriques modernes, la qualité de l'énergie électrique est devenue un enjeu important, car elle traduit l'état de la tension et du courant fournis aux équipements. Parmi les perturbations les plus courantes figurent les phénomènes harmoniques, qui se manifestent par la présence de composantes déformant les signaux électriques et influençant leur comportement global [2].

L'étude du comportement d'un transformateur monophasé dans ces conditions présente donc un intérêt particulier. En effet, selon la nature de l'alimentation, sinusoïdale ou non sinusoïdale, et selon la nature de la charge, linéaire ou non linéaire, les performances du transformateur peuvent varier. L'analyse de ces différentes configurations permet d'observer le comportement du transformateur dans des situations proches de la réalité, et d'évaluer ses performances à travers des mesures expérimentales [1].

Ce mémoire a pour objectif d'étudier le comportement d'un transformateur monophasé soumis à différentes conditions d'alimentation et de charge, afin d'analyser ses performances à travers des grandeurs telles que le rendement, les chute de tension et les pertes de puissance ΔP . Cette étude est complétée par une présentation des notions générales liées à la qualité de l'énergie électrique et aux phénomènes harmoniques, qui constituent le cadre théorique du travail [3].

Le mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le transformateur monophasé. Le deuxième chapitre traite de la qualité de l'énergie électrique et des phénomènes harmoniques. Enfin, le troisième chapitre présente l'étude expérimentale réalisée sur un transformateur monophasé sollicité par de différents signaux d'alimentation et alimentant différentes charges, ainsi que l'analyse des résultats obtenus en termes de performances du transformateur testé.

***CHAPITRE I : Étude
théorique du transformateur
monophasé***

I.1 Introduction

Le transformateur monophasé est un élément essentiel des systèmes électriques, permettant l'adaptation des niveaux de tension. Son étude en régime sinusoïdal constitue une étape fondamentale pour comprendre son fonctionnement, sa modélisation et ses performances. Ce chapitre présente les bases théoriques nécessaires à l'analyse du transformateur monophasé

I.2 Généralités sur les transformateurs

Le transformateur constitue un dispositif statique de conversion de l'énergie électrique qui sert à adapter les niveaux des grandeurs électriques alternatives. Son rendement énergétique est particulièrement élevé, notamment dans les applications de forte puissance où il peut atteindre 99 %.

Il permet de transformer les tensions et les courants sinusoïdaux en d'autres grandeurs sinusoïdales en gardant la même fréquence, mais présentant des amplitudes différentes. La tension peut être soit élevée, soit abaissée grâce au phénomène d'induction électromagnétique, résultant de l'interaction entre les circuits électriques et le champ magnétique produit [4].

Sur le plan structurel, le transformateur se compose de deux parties fondamentales : un circuit magnétique et un circuit électrique. Le circuit magnétique, généralement réalisé en matériau ferromagnétique, a pour rôle de guider et de concentrer le flux magnétique afin d'optimiser le couplage entre les enroulements. Le circuit électrique, quant à lui, est constitué de conducteurs (le plus souvent en cuivre) formant des bobines appelées 'enroulements primaire' et 'secondaire'. Le courant circulant dans l'enroulement primaire génère un flux magnétique variable qui induit une tension dans l'enroulement secondaire. L'étude du fonctionnement d'un transformateur revient donc à analyser le comportement de bobines électriquement distinctes mais magnétiquement couplées.

En électrotechnique, le transformateur occupe une place essentielle, notamment dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. En effet, afin de réduire les pertes par effet Joule dans les lignes de transmission, l'énergie électrique est acheminée sous des niveaux de haute tension (généralement supérieurs à 2 kV). À l'approche des zones de consommation, cette tension est progressivement abaissée par des transformateurs abaisseurs adaptés, permettant une alimentation sécurisée et compatible avec les équipements des utilisateurs [4].

I.2.2 Rôle dans les réseaux électriques

Les transformateurs jouent un rôle de transfert d'énergie électrique entre différents réseaux tout en adaptant les niveaux de tension et de courant selon les besoins. Ils permettent notamment d'élever la tension à la sortie des centrales électriques afin de transporter l'énergie sur de longues distances avec des pertes minimales par effet Joule, puis de l'abaisser à l'arrivée pour la rendre compatible avec les équipements des consommateurs et les exigences des réseaux de distribution [4].

La figure I.1 illustre le rôle des transformateurs dans le réseau de transport de l'énergie électrique, depuis la production jusqu'à la distribution aux consommateurs.

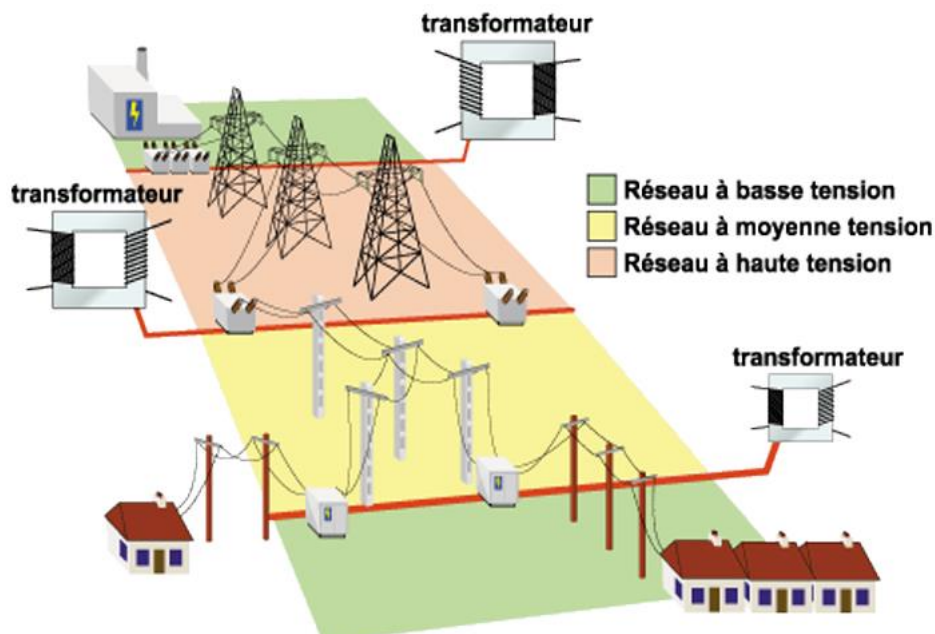


Figure II.1 Schéma des transformateurs dans un réseau de transport électrique [5].

I.2.3 Domaines d'application

- **Transport** Postes haute tension
 Réseaux urbains et ruraux
 Centrales électriques

La figure I.2 présente un exemple de transformateur de puissance utilisé dans les réseaux électriques pour adapter les niveaux de tension



Figure I.2 Transformateur de puissance [6].

Exemple transformateur de puissance dans les centrales électriques.

- **Industrie** Alimentation de moteurs industriels

Fours électriques

Variateurs de vitesse

Les transformateurs industriels permettent d'adapter la tension aux besoins des machines.

- **Electronique de puissance** Alimentations à découpage
Chargeurs
Onduleurs
Convertisseurs AC/DC

On les retrouve dans : Ordinateurs, Téléviseurs, Systèmes solaires

I.3 Transformateur monophasé

Un transformateur monophasé se compose de deux bobinages électriques placés sur un circuit magnétique généralement réalisé à partir de tôles de fer feuilletées. Cette structure permet de limiter les pertes liées aux courants de Foucault. Les deux enroulements sont isolés électriquement, garantissant ainsi une séparation galvanique totale entre les circuits. Le bobinage relié à la source d'alimentation est appelé primaire, tandis que celui connecté à la charge est désigné comme secondaire.

Le passage de l'énergie du primaire vers le secondaire s'effectue par couplage magnétique, à travers le noyau ferromagnétique. Ce dernier joue un rôle essentiel en guidant et en concentrant le flux magnétique afin d'optimiser le transfert d'énergie. Lorsqu'un courant traverse chaque enroulement, il génère un champ magnétique dont le sens est défini par la règle de la main droite. Les flux associés aux courants primaire et secondaire s'opposent généralement, traduisant un comportement de type soustractif selon les configurations.

Sur le plan de la conception, deux grandes architectures de noyaux peuvent être distinguées : le type cuirassé et le type à colonnes. Le noyau cuirassé se caractérise par une structure à trois branches, avec les enroulements disposés autour de la branche centrale. En revanche, le noyau à colonnes comporte deux branches principales sur lesquelles sont répartis les bobinages. Le choix de la configuration du noyau a une influence directe sur les performances magnétiques, les pertes énergétiques ainsi que sur les dimensions globales du transformateur [4].

Le noyau magnétique constitue l'élément principal assurant le passage du flux magnétique entre les enroulements. La figure I.3 présente les principales configurations de noyaux utilisées dans les transformateurs.

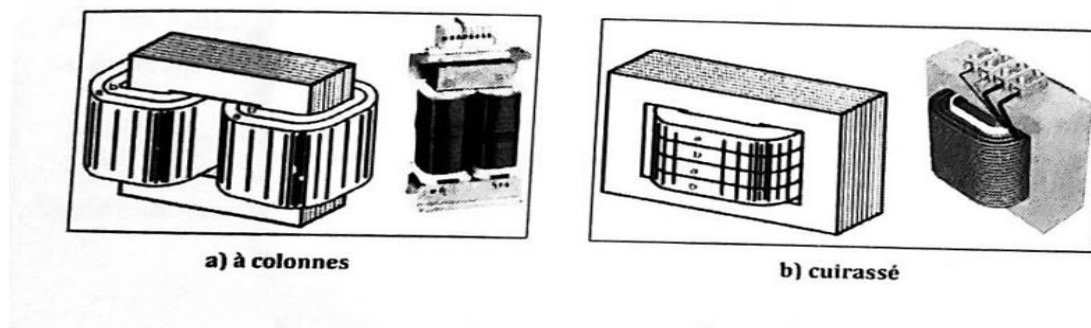


Figure I.3 Différent types de noyaux de transformateurs [4].

I.3.1 Paramètres nominaux

Les paramètres nominaux sont les grandeurs indiquées sur la plaque signalétique du transformateur.

- **La tension**

Les deux tensions primaire U_1 et secondaire U_2 représentent les tensions appliquées au primaire et délivrée au secondaire du transformateur. Elles sont liées au rapport de transformation et s'expriment par les deux équations suivantes :

$$U_1 = R_1 i_1 + n_1 \frac{d\Phi_c}{dt} + \frac{d\Phi_{f1}}{dt} \quad (I.1)$$

$$U_2 = -R_2 i_2 + n_2 \frac{d\Phi_c}{dt} + \frac{d\Phi_{f2}}{dt} \quad (I.2)$$

La figure I.4 représente les flux magnétiques présents dans un transformateur, en distinguant le flux principal et les flux de fuite.

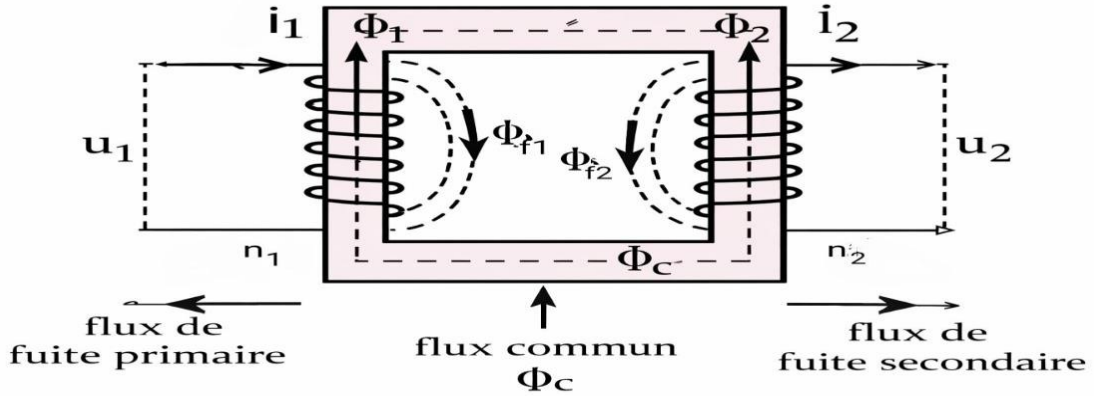


Figure I.4 Modèle de transformateur basé sur le flux commun et les flux de fuites [4].

- **Le courant**

Les courants primaire I_1 et secondaire I_2 correspondent aux courants circulant dans les enroulements du transformateur. À partir de la puissance apparente nominale, ils peuvent être déterminés par l'équation (I.3).

$$I_1 = \frac{S_n}{U_1} \quad \text{et} \quad I_2 = \frac{S_n}{U_2} \quad (I.3)$$

- **La puissance apparente nominale**

La puissance apparente nominale S_n caractérise la capacité du transformateur à transmettre l'énergie électrique. Elle est définie par l'équation (I.4).

$$S_n = U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2 \quad (I.4)$$

- **Le rendement**

Le rendement η représente le rapport entre la puissance utile délivrée au secondaire et la puissance absorbée au primaire. Il permet d'évaluer les performances énergétiques du transformateur et s'exprime par l'équation (I.5).

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{absorbé}} \quad (I.5)$$

Les pertes proviennent de : Pertes fer (hystérésis + Foucault) ; Pertes cuivre (effet Joule) [4].

I.4 Principe de fonctionnement

- **Loi de Faraday**

Toute variation du flux magnétique traversant une spire induit une force électromotrice à ses bornes. Réciproquement, l'application d'une force électromotrice variable aux bornes d'une spire provoque une variation du flux magnétique qui la traverse. Cette relation constitue le principe de l'induction électromagnétique et s'exprime par :

$$E = - N \frac{d\Phi}{dt} \quad (I.6)$$

Avec : E est la tension induite, N est le nombre de spires, et Φ est le flux magnétique. Le signe (−) traduit la loi de Lenz [7].

- **Loi de Lenz**

La f.é.m. induite résultant d'une variation de flux possède un sens tel qu'elle engendre un courant dont le champ magnétique s'oppose à la variation initiale du flux. Autrement dit, la f.é.m. induite agit toujours de manière à contrer le phénomène qui l'a produite [7].

- **Relation tension-flux**

Lorsqu'une tension alternative est appliquée au primaire d'un transformateur, elle produit un flux magnétique variable dans le noyau. Selon la loi de Faraday-Lenz, la variation de ce flux engendre des forces électromotrices induites dans les enroulements primaire et secondaire. La valeur de la force électromotrice induite dépend du nombre de spires et de la vitesse de variation du flux magnétique.

Si le primaire est alimenté par une tension sinusoïdale :

$$U_1(t) = U_{1m} \sin(\omega t) \quad (I.7)$$

Alors, dans les conditions idéales, le flux magnétique dans le noyau est également sinusoïdal :

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin(\omega t) \quad (I.8)$$

En appliquant la loi de Faraday-Lenz, la force électromotrice induite dans un enroulement comportant N spires est donnée par :

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{I.9})$$

En remplaçant $\Phi(t)$ par son expression, on obtient :

$$E = -N\omega \Phi_m \cos(\omega t) \quad (\text{I.10})$$

$$\text{Où : } \omega = 2\pi f \quad (\text{I.11})$$

Où : f représente la fréquence de la tension d'alimentation.

La valeur maximale de la force électromotrice est donc :

$$E = -2\pi f N \Phi_m \cos(\omega t) \quad (\text{I.12})$$

Pour une tension sinusoïdale, la valeur efficace de la f.é.m. induite est :

$$U = \frac{E}{\sqrt{2}} \quad (\text{I.13})$$

$$U = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N \Phi_m \cos(\omega t) \quad (\text{I.14})$$

$$U = 4.44 f N \Phi_m \quad (\text{I.15})$$

Ainsi, la valeur efficace de la tension induite est proportionnelle à la fréquence, au nombre de spires et à l'amplitude maximale du flux magnétique.

Pour un transformateur idéal, le rapport des tensions est égal au rapport du nombre de spires :

$$\frac{E_{\text{primaire}}}{E_{\text{secondaire}}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (\text{I.16})$$

Où, 'm' représente le rapport de transformation [7].

I.5 Modélisation électrique du transformateur

La représentation électrique d'un transformateur repose sur un modèle équivalent qui prend en compte les différents phénomènes physiques intervenant dans son fonctionnement. Le circuit magnétique est traduit par des éléments représentant le comportement du flux, tandis que les enroulements sont modélisés par des paramètres électriques tels que les résistances, les inductances propres et mutuelles, ainsi que les capacités parasites.

Ce modèle global permet de reproduire de manière fidèle le comportement réel d'un transformateur monophasé. L'ensemble de ces éléments peut ainsi être synthétisé sous la forme d'un schéma électrique équivalent

La figure I.5 présente Le schéma équivalent exact qui permet de modéliser le comportement réel du transformateur en tenant compte des différents paramètres électriques et magnétiques. Les résistances représentent les pertes par effet Joule dans les enroulements, les réactances de fuite traduisent le flux de fuite, tandis que la branche de magnétisation modélise les pertes fer et le courant nécessaire à l'établissement du flux dans le noyau. La figure suivante présente ce modèle équivalent

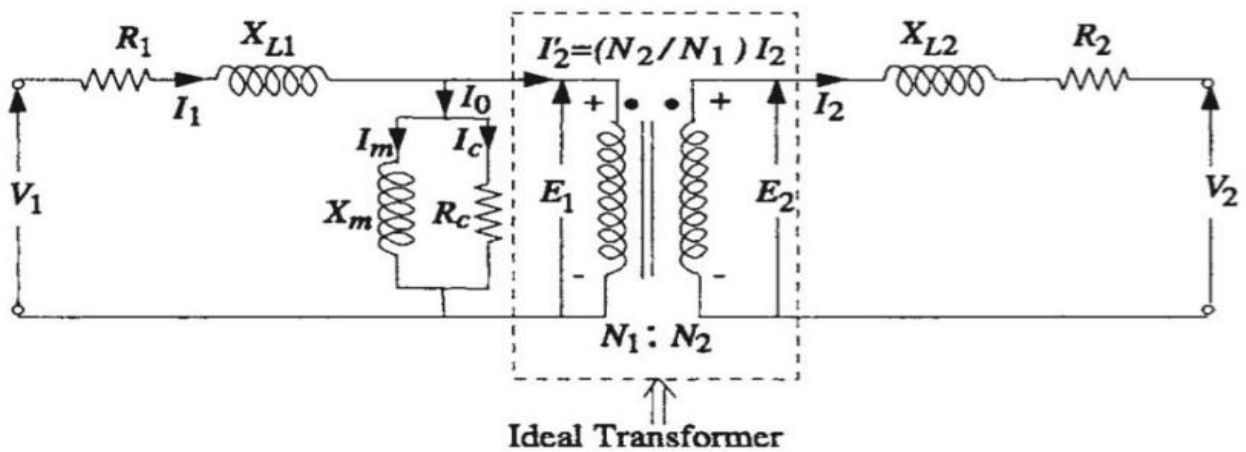


Figure I.5 Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel [7].

Avec : V_1 et V_2 : tensions primaire et secondaire ; i_1 et i_2 : courants primaire et secondaire ; i_0 : courant à vide ; E_1 et E_2 : tensions à vide idéales primaire et secondaire

N_1 et N_2 : nombre de spires **des enroulements primaire et secondaire**; R_1 et R_2 : résistance des enroulements primaire et secondaire ; X_{L1} et X_{L2} : inductance de fuites des enroulements primaire et secondaire ; R_c : pertes fer ; X_m : réactance magnétisante

Les éléments V_1 , V_2 , N_1 et N_2 fixent les tensions nominales et le rapport de transformation à vide. Les éléments R_1 et R_2 sont les résistances électriques des enroulements, et les pertes Joule seront principalement dues au passage des courants i_1 et i_2 de charge dans ces résistances. Les réactances X_{L1} et X_{L2} correspondent aux flux de fuites de chacun des enroulements. L'impédance équivalente $(X_{L1} + (\frac{N_2}{N_1})^2 \times X_{L2})$ ramené au primaire par exemple) représente le flux de fuites de l'ensemble des deux enroulements. Elle induit une chute de

tension, fonction de la charge, représentative de l'impédance de court-circuit du transformateur. Elle est fortement influencée par la configuration géométrique des enroulements entre eux. Le transformateur est alimenté sous une tension V_1 variable, délivrant une tension V_2 et traversé par les courants i_1 au primaire et i_2 au secondaire [7].

I.5.2 Schéma équivalent simplifié

La figure suivante illustre le schéma équivalent simplifié du transformateur, utilisé pour faciliter son analyse électrique.

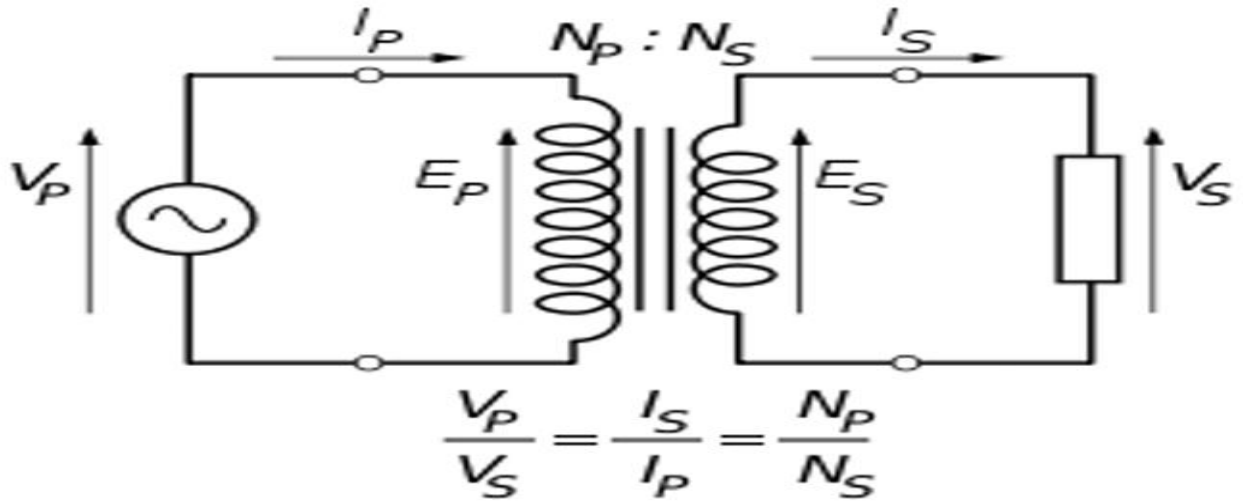


Figure II.6 Schéma équivalent du transformateur [8].

Un circuit équivalent constitue une représentation électrique permettant de modéliser le comportement d'un dispositif à l'aide d'éléments de circuit tels que les résistances et les réactances. Cette représentation facilite l'analyse du fonctionnement du dispositif et permet d'étudier ses performances dans différentes conditions. Ainsi, l'établissement d'un modèle équivalent approprié est indispensable pour comprendre le comportement d'un équipement électrique et pour effectuer des études ou des améliorations éventuelles [8].

Dans le cas du schéma équivalent simplifié, les paramètres électriques du transformateur sont représentés par des grandeurs équivalentes ramenées à un même côté, généralement le primaire. Les relations permettant de déterminer les paramètres du modèle équivalent sont données par les équations suivantes :

$$E = 4.44 \times f \times N \times B_{max} \times A \quad (I.17)$$

$$R_c = \frac{v_1}{I_c} \quad (I.18)$$

$$X_m = \frac{v_1}{I_m} \quad (\text{I.19})$$

$$P_c = I_c \times 2 \times R_c = \frac{[V_1] \times 2}{R_c} \quad (\text{I.20})$$

I.5.3 Paramètres du modèle (R , X , X_m , R_{fe})

Le modèle équivalent du transformateur comporte plusieurs paramètres électriques qui permettent de représenter les différents phénomènes physiques apparaissant dans le transformateur réel. Les principaux paramètres du modèle ainsi que leur signification sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau I.1 Paramètres du modèle équivalent du transformateur et leur signification

Paramètre	Signification
R_1	Résistance de l'enroulement primaire
R_2	Résistance de l'enroulement secondaire
X_1	Réactance de fuite primaire
X_2	Réactance de fuite secondaire
X_m	Réactance de magnétisation
R_{fe}	Résistance représentant les pertes fer

Ces paramètres jouent un rôle essentiel dans l'analyse et la modélisation du comportement électrique du transformateur

I.6 Pertes et rendement du transformateur

Lors de son fonctionnement, un transformateur ne peut pas convertir toute la puissance absorbée au primaire en puissance utile au secondaire. Une partie de cette puissance est dissipée sous forme de pertes dans les enroulements et dans le circuit magnétique. L'étude de ces pertes est essentielle pour évaluer les performances énergétiques du transformateur et déterminer son rendement.

I.6.1 Pertes du transformateur

Le transformateur, comme toute machine électrique, présente des pertes de puissance lors de son fonctionnement. Ces pertes sont principalement dues à l'effet Joule dans les enroulements ainsi qu'aux phénomènes d'hystérésis et de courants de Foucault dans le noyau.

Elles se manifestent sous forme de chaleur, provoquant une élévation de température et une diminution du rendement du transformateur [9].

a) Les pertes par effet joule

Les pertes dues à l'effet Joule dans les enroulements, appelées pertes cuivre, dépendent de la résistance des conducteurs ainsi que du courant qui les traverse. Elles varient proportionnellement au carré de l'intensité du courant comme donné par l'équation (I.21).

$$P_j = \sum R_i I_i^2 \quad (\text{I.21})$$

Ou, R_i est la résistance des enroulements, I_i est l'intensité de courant qui les traverse.

b) Les pertes fer

Les pertes fer (P_{fer}) apparaissent au niveau du noyau magnétique du transformateur. Elles résultent de la combinaison des pertes par hystérésis (P_h) et des pertes dues aux courants de Foucault (P_{cf}), comme donné par l'équation (I.22).

$$P_{fer} = P_h + P_{cf} \quad (\text{I.22})$$

- Les pertes par courant de Foucault

Dans le circuit magnétique, la présence d'une induction sinusoïdale entraîne l'apparition de courants induits appelés courants de Foucault. Ces courants circulent dans des plans perpendiculaires aux lignes de flux magnétique et tendent à former des boucles autour de celles-ci.

Ils engendrent des pertes par effet Joule dans le noyau, se traduisant par un dégagement de chaleur. Ces pertes peuvent être exprimées par l'équation suivante [10] :

$$P_{cf} = k_e * f^2 * B_m^2 \quad (\text{I.23})$$

B_m est l'induction maximale dans le circuit magnétique, f est la fréquence et k_e est une constante de proportionnalité dépend du volume et de la résistivité de matériau du noyau, l'épaisseur des tôles et les unités utilisées

- **Les pertes par hystérésis**

La surface du cycle d'hystérésis, exprimée en joule/m³., représente l'énergie dissipée dans le matériau magnétique. Cette perte est liée aux frottements des moments magnétiques lors des cycles d'aimantation

Ainsi, la puissance des pertes par hystérésis peut être exprimée par l'équation (I.23) [11].

$$P_h = K_h * f * B_m^n \quad (\text{I.23})$$

K_h est une constante de proportionnalité dépend du volume et de la qualité du matériau de base et les unités utilisées, n est l'exposant varie entre 1,5 et 2,5 en fonction de matériel ferromagnétique pour un B_m donné.

Les pertes fer sont données par l'expression suivante [9] :

$$P_i = S * N * F \quad (\text{I.24})$$

S est la surface de la courbe d'hystérésis, N est le nombre de spire de l'enroulement. La surface comprend les pertes par hystérésis ainsi que les pertes dues au courant de Foucault.

Le matériau magnétique du noyau présente un phénomène d'hystérésis lors des cycles d'aimantation et de désaimantation. La figure suivante montre cette courbe, responsable d'une partie des pertes fer du transformateur.

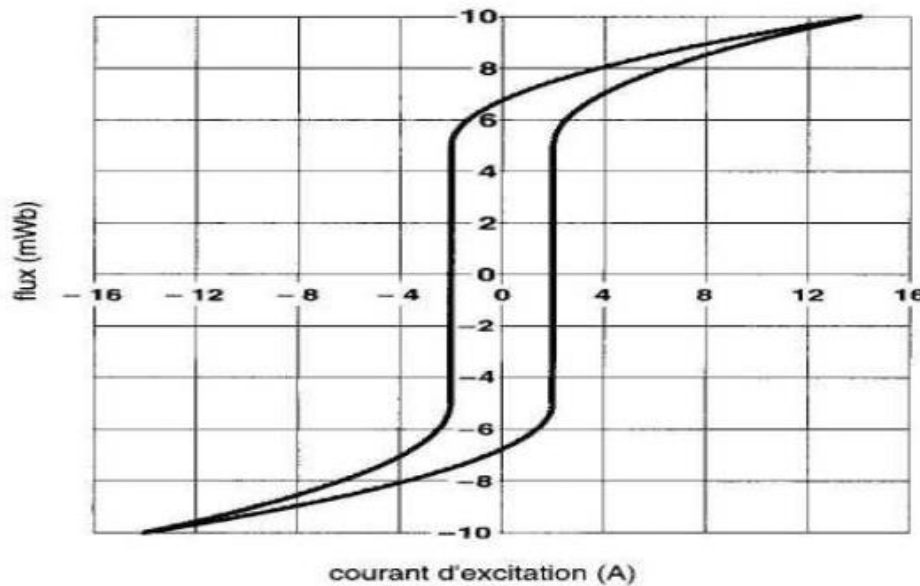


Figure I.7 Courbe d'hystérésis dans un transformateur [9]

- **Autres pertes**

- Il s'agit de pertes provoquées par les courants de Foucault qui apparaissent dans les enroulements ainsi que dans les éléments métalliques situés à proximité [10].

En plus des pertes principales, c'est-à-dire les pertes cuivre et les pertes fer, le transformateur présente également des pertes supplémentaires. Celles-ci sont principalement dues aux courants de Foucault induits dans les parties métalliques conductrices situées à proximité des enroulements et du circuit magnétique. Elles peuvent également inclure les pertes liées aux flux de fuite et aux phénomènes de dissipation dans certains éléments conducteurs du transformateur. [9]

$$P_{ch} = P_j + P_s \quad \longrightarrow \quad P_s = P_{ch} - P_j \quad (I.25)$$

P_{ch} est les pertes due à la charge, P_s est les pertes supplémentaires.

- Les pertes diélectriques sont généralement faibles et peuvent être négligées devant les autres types de pertes. Elles sont liées aux courants de déplacement présents dans les matériaux isolants et peuvent être déterminées à l'aide de l'expression suivante :

$$P_{di} = V^2 \omega C \tan \delta \quad (\text{I.26})$$

Le facteur de dissipation $\tan \delta \{10^{-4} \text{ } 10^{-2}\}$, est fourni par le fabricant du diélectrique employé [12]

1.6.2 Rendement du transformateur

Le rendement d'un transformateur est défini comme le rapport entre la puissance utile délivrée au secondaire et la puissance absorbée au primaire. Il permet d'évaluer les performances du transformateur en fonctionnement.

Mathématiquement, le rendement s'exprime par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} \times 100 \quad (\text{I.27})$$

En tenant compte des pertes, cette expression peut également s'écrire comme suit :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{utile}} + \Sigma \text{ Pertes}} \times 100 \quad (\text{I.28})$$

Le rendement dépend essentiellement des pertes présentes dans le transformateur, notamment les pertes cuivre et les pertes fer. Ainsi, plus ces pertes sont faibles, plus le rendement du transformateur est élevé

1.7 Fonctionnement sous-alimentation sinusoïdale

Lorsque le transformateur est alimenté par une tension sinusoïdale, il opère dans son état de fonctionnement de référence. La tension appliquée au primaire engendre un flux magnétique sinusoïdal dans le noyau, ce qui conduit à l'apparition d'une tension de même nature au secondaire.

Dans ces conditions, le rapport entre les tensions aux bornes du primaire et du secondaire est directement lié au rapport de transformation. Néanmoins, en réalité, le courant de

magnétisation n'est pas parfaitement sinusoïdal en raison de la non-linéarité des propriétés du matériau magnétique.

Ce mode de fonctionnement sert ainsi de point de comparaison pour analyser le comportement du transformateur lorsqu'il est soumis à une alimentation non sinusoïdale.

1.8 Relation entre le transformateur et les sources non sinusoïdales

Les transformateurs sont initialement conçus pour fonctionner dans des conditions idéales, alimentés par des tensions sinusoïdales. Toutefois, l'évolution des réseaux électriques modernes, marquée par une forte présence de dispositifs électroniques, a entraîné une augmentation significative des charges non linéaires. Ces dernières génèrent des harmoniques qui perturbent le fonctionnement normal des transformateurs en les faisant opérer dans un régime non linéaire [13].

Dans ce contexte, la présence de tensions non sinusoïdales devient un enjeu majeur, car elle est directement liée aux caractéristiques non linéaires de certaines charges. Cette situation engendre

Plusieurs conséquences indésirables, notamment une augmentation des pertes, un échauffement excessif et une diminution de la durée de vie des transformateurs.

1.8.1 Définition d'une alimentation non sinusoïdale

Une alimentation non sinusoïdale se distingue par une forme d'onde déformée par rapport à une sinusoïde idéale. Cette déformation est principalement due à la présence de composantes harmoniques, qui viennent s'ajouter à la fréquence fondamentale.

Ainsi, les tensions et les courants dans ce type d'alimentation ne sont plus parfaitement périodiques et réguliers, ce qui entraîne une altération de la qualité de l'énergie électrique fournie.

1.8.2 Origine des tensions non sinusoïdales

Les principales sources de tensions non sinusoïdales sont les charges dites non linéaires. Parmi celles-ci, on retrouve notamment les variateurs de vitesse, les redresseurs, les systèmes d'éclairage modernes ainsi que divers équipements électroniques.

Ces dispositifs, basés sur l'électronique de puissance, consomment des courants déformés et injectent des harmoniques dans le réseau électrique. Par conséquent, ils modifient la forme des tensions et des courants, contribuant à la dégradation de la qualité de l'énergie

I.8.3 Effets sur le transformateur

1. Saturation du noyau

La présence d'harmoniques peut perturber le comportement magnétique du transformateur en modifiant la relation entre le flux magnétique et le champ magnétique. Cela peut conduire le noyau à fonctionner dans une zone non linéaire, favorisant ainsi le phénomène de saturation.

2. Augmentation des pertes fer

Les composantes harmoniques entraînent une élévation des pertes dans le circuit magnétique, notamment les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Cette augmentation est liée à la variation rapide du flux magnétique induite par les harmoniques.

3. Augmentation des pertes cuivre

Les courants harmoniques circulant dans les enroulements provoquent une augmentation des pertes par effet Joule. Étant donné que ces pertes sont proportionnelles au carré du courant, même une faible distorsion peut engendrer une hausse significative des pertes

4. Échauffement

L'ensemble des pertes supplémentaires générées dans le transformateur se traduit par une élévation de sa température de fonctionnement. Cet échauffement excessif peut accélérer le vieillissement des matériaux isolants et compromettre la fiabilité de l'équipement.

5. Bruit et vibrations

Les harmoniques sont également à l'origine de contraintes mécaniques au niveau du noyau et des enroulements. Ces contraintes se manifestent par des vibrations et une augmentation du bruit, pouvant à long terme entraîner des dégradations mécaniques.

6. Effets supplémentaires

Outre les phénomènes précédents, les alimentations non sinusoïdales peuvent provoquer une distorsion de la tension de sortie du transformateur, affectant ainsi les équipements

connectés. Elles entraînent également une baisse du rendement global et participent à la réduction de la durée de vie du transformateur en raison des contraintes thermiques et électriques accrues.

En résumé, les sources non sinusoïdales introduisent des perturbations importantes dans le fonctionnement des transformateurs. Les harmoniques qu'elles génèrent sont à l'origine de pertes supplémentaires, d'échauffements, de phénomènes de saturation et de contraintes mécaniques, ce qui impacte directement les performances et la durabilité des transformateurs [13].

I.9 Conclusion

Ce chapitre est une revue générale sur transformateur monophasé, en particulier son fonctionnement et ses pertes en régime sinusoïdal. Ces bases théoriques permettent de comprendre son comportement dans des conditions idéales. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude des signaux non sinusoïdaux et de leurs effets sur le transformateur.

CHAPITRE II : Qualité de l'énergie électrique et phénomènes harmonique

II.1 Introduction

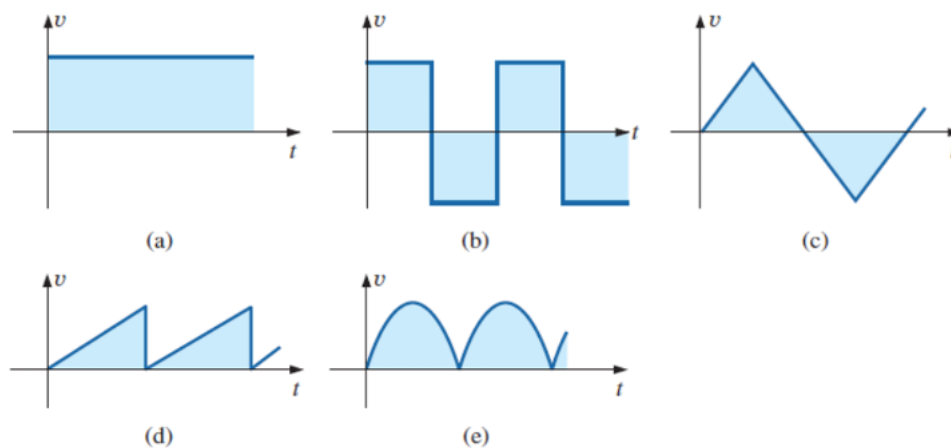
La qualité de l'énergie électrique est devenue un aspect fondamental du bon fonctionnement des réseaux contemporains. L'évolution des usages et la multiplication des charges non linéaires ont rendu les perturbations électriques plus fréquentes et plus importantes à prendre en compte. Ce chapitre introduit donc les notions générales liées à la qualité de l'énergie électrique et aux phénomènes harmoniques, afin de montrer leur rôle, leur influence et leur importance dans les systèmes électriques

II.2 Formes d'ondes non sinusoïdales en électrotechnique

Toute forme d'onde qui s'écarte de la représentation sinusoïdale idéale est qualifiée de non sinusoïdale. Ce type de signal peut prendre différentes formes selon la nature de la source ou du système. Parmi les formes les plus courantes, on distingue [14] :

- Le courant continu
- L'onde carrée
- L'onde triangulaire
- Signal en rampe périodique
- Ainsi que les signaux redressés

Les signaux électriques ne sont pas toujours parfaitement sinusoïdaux et peuvent présenter différentes formes selon leur origine. La figure suivante illustre les principales formes d'ondes non sinusoïdales rencontrées en électrotechnique



(a) courant continu ; (b) onde carrée ; (c) onde triangulaire ; (d) signal en rampe périodique ; (e) onde redressée

Figure II.1 Formes d'ondes non sinusoïdales courantes [14]

II.3 Notions d'analyse harmonique

II.3.1 Série de Fourier

L'étude des harmoniques repose sur l'analyse des signaux périodiques afin d'identifier les différentes composantes fréquentielles qui les constituent. Pour cela, on utilise la série de Fourier, qui permet de représenter un signal dans le domaine fréquentiel à partir de sa forme temporelle.

Le principe fondamental de cette méthode est que tout signal périodique non sinusoïdal peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de différentes fréquences. Cette décomposition est possible sous certaines conditions, notamment si la fonction est définie sur une période, présente un nombre limité de discontinuités et ne comporte pas un nombre infini d'extrema.

Ainsi, un signal périodique peut être exprimé comme la superposition d'une composante continue et d'un ensemble d'harmoniques, chacune caractérisée par une fréquence multiple de la fréquence fondamentale [15].

Mathématiquement, la série de Fourier d'un signal $x(t)$ de période T s'écrit sous la forme :

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right) \quad (\text{II.1})$$

a_0 : correspond à la composante continue du signal

a_n et b_n sont les coefficients associés aux différentes harmoniques

n : représente l'ordre de l'harmonique

T : désigne la période du signal.

Cette représentation est particulièrement importante en électrotechnique, car elle permet d'identifier et d'analyser les composantes harmoniques présentes dans les tensions et les courants, ainsi que d'évaluer leurs effets sur le fonctionnement et les performances des systèmes électriques

Pour chaque harmonique n , on peut exprimer son **vecteur complexe** sous la forme :

$$A_n e^{i\varphi_n} = a_n + i b_n \quad (\text{II.2})$$

Où : **A_n est l'amplitude et φ_n l'angle de phase, calculés par l'équation (II.3).**

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad ; \quad \varphi_n = \tanh^{-1} \left(\frac{b_n}{a_n} \right) \quad (\text{II.3})$$

II.3.2 Harmoniques

Dans un réseau électrique, un signal idéal doit conserver une forme sinusoïdale stable. Lorsqu'il subit des déformations, il peut être décomposé en une composante principale, appelée fréquence fondamentale, et en plusieurs composantes supplémentaires dont les fréquences sont des multiples entiers de cette fréquence. Ces composantes supplémentaires sont appelées **harmoniques**.

L'apparition des harmoniques traduit donc la présence d'un signal périodique non sinusoïdal. Elles modifient la forme d'onde et peuvent influencer certaines caractéristiques du signal, notamment sa valeur maximale et sa valeur efficace. Dans les installations électriques, cette déformation peut perturber le fonctionnement normal des récepteurs et dégrader la qualité de l'énergie fournie.

L'étude des harmoniques est essentielle pour analyser la pollution électrique d'un réseau. Elle permet de mieux comprendre l'origine des perturbations et d'évaluer leur effet sur les équipements connectés [15].

Une onde sinusoïdale représente le signal idéal utilisé comme référence dans les réseaux électriques. La figure suivante montre une onde ne contenant aucune composante harmonique.

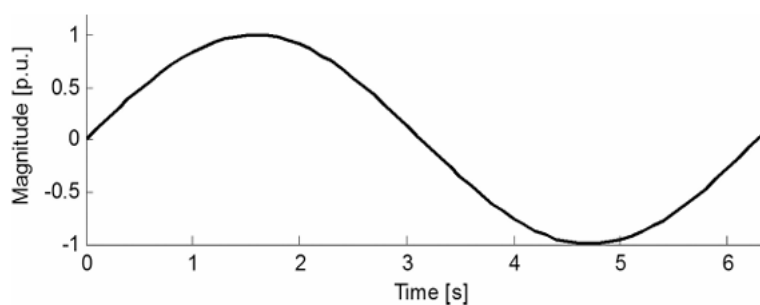


Figure II.2 Onde sans contenu harmonique [15]

La présence d'harmoniques modifie la forme de l'onde électrique et provoque une distorsion du signal. La figure II.3 illustre cette déformation par rapport à une sinusoïde idéale.

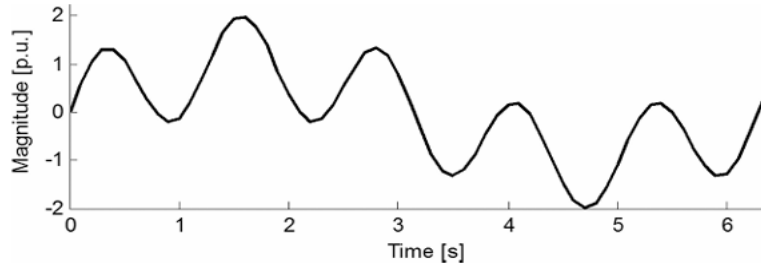


Figure II.3 Onde de tension avec contenu harmonique [15]

II.2.3 Le taux de distorsion harmonique THD

Le THD est l'indice harmonique le plus couramment utilisé, et il est calculé à l'aide de l'équation (4) pour la tension et de l'équation (5) pour le courant.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \quad (II.4)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (II.5)$$

Le taux de distorsion harmonique total (THD) est défini comme le rapport entre la valeur efficace des composantes harmoniques et celle de la composante fondamentale. Il est généralement exprimé en pourcentage.

Cet indicateur permet d'évaluer l'écart entre une onde périodique non sinusoïdale et une onde sinusoïdale idéale. Pour une onde parfaitement sinusoïdale, ne contenant que la fréquence fondamentale, le THD est nul.

Par ailleurs, la distorsion d'un harmonique individuel d'ordre h peut être exprimée par le rapport entre son amplitude et celle de la fondamentale, soit V_h/V_1 pour la tension et I_h/I_1 pour le courant [16].

Le facteur de THD est lié à la valeur efficace globale du signal et peut être déterminé à l'aide de l'équation (II.6).

$$RMS = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} = V_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \quad (II.6)$$

Les variations du taux de distorsion harmonique (THD) au cours du temps suivent généralement une évolution caractéristique, reflétant le comportement des charges non linéaires dans le système.

Cet indicateur est le plus souvent utilisé pour caractériser la distorsion harmonique de la tension

- **Total Demand Distortion (TDD)**

Le taux de distorsion de la demande (**TDD** pour **Total Demand Distortion**) est défini comme le rapport entre la valeur efficace des composantes harmoniques du courant et le courant maximal de demande au point de couplage commun, il est représenté par l'équation (II.7).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (II.7)$$

Dans ce contexte, I_L représente le courant maximal de demande au point de couplage commun, obtenu à partir de la valeur moyenne du courant de demande maximale observée au cours des douze derniers mois. Le niveau de distorsion du courant peut être évalué à l'aide du THD, mais cet indicateur peut parfois prêter à confusion. En effet, un courant de faible amplitude peut présenter un THD élevé sans pour autant constituer une perturbation importante pour le réseau. Par exemple, de nombreux variateurs de vitesse affichent un THD élevé au niveau du courant d'entrée lorsqu'ils fonctionnent à très faible charge. Dans ce cas, la distorsion relative est importante, mais la valeur absolue des courants harmoniques reste faible, ce qui limite leur impact réel sur le système. Pour mieux apprécier cette situation, on peut rapporter la distorsion harmonique non pas au fondamental du courant instantané, mais au fondamental du courant maximal de demande. C'est précisément ce que prend en compte le TDD, particulièrement utilisé dans l'application de la norme IEEE 519-1992 [16].

- **Facteur de puissance**

Le facteur de puissance, noté (**FP**), correspond au rapport entre la puissance utile, c'est-à-dire la puissance active, et la puissance apparente fournie par le réseau :

$$FP = \frac{P}{S} \quad (II.8)$$

Dans le cas d'un régime sinusoïdal, un seul déphasage existe entre la tension et le courant, puisque seule la composante fondamentale est présente. Le facteur de puissance s'écrit alors (**FP=cos φ**), ou φ est l'angle de déphasage entre la tension et le courant ; on parle dans ce cas de facteur de puissance de déplacement.

En régime non sinusoïdal, cette relation n'est plus suffisante, car le facteur de puissance ne peut pas être réduit au seul cosinus du déphasage entre la tension et le courant. Le facteur de

puissance qui prend en compte l'ensemble des puissances actives, y compris celles associées aux composantes fondamentales et harmoniques, est appelé facteur de puissance total ou facteur de puissance réel. Lorsque la tension et le courant contiennent des harmoniques, leurs valeurs efficaces peuvent être exprimées à partir de leurs composantes harmoniques respectives.

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \quad (\text{II.9})$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \quad (\text{II.10})$$

En remplaçant les valeurs de V_{rms} et I_{rms} , le facteur de puissance total du système, dans des conditions non sinusoïdales, peut être exprimé par la relation suivante : [16]

$$FP_{total} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (THD_V/100)^2} \sqrt{1 + (THD_I/100)^2}} \quad (\text{II.11})$$

Dans la plupart des cas, la distorsion harmonique totale de la tension, notée THD_V , est inférieure à 10%. Par conséquent, l'équation (II.12) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$FP_{total} = \frac{P_1}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} = \cos(\theta_1 - \delta_1) FP_{distro} \quad (\text{II.12})$$

$\cos(\theta_1 - \delta_1)$: le facteur de puissance de déplacement.

FP_{distro} : Le facteur de puissance de distorsion [16].

II.4 Sources des harmoniques

Le développement rapide des équipements d'électronique de puissance, dans les secteurs industriel et domestique, a fortement influencé le comportement des réseaux électriques. Bien qu'ils présentent des avantages importants, notamment en termes de rendement et de souplesse d'utilisation, ces dispositifs constituent des charges non linéaires. Ils provoquent ainsi l'apparition de courants déformés, à l'origine de perturbations harmoniques dans le réseau. Ces harmoniques peuvent dégrader la qualité de l'énergie électrique et nuire au bon fonctionnement des appareils. Il est donc nécessaire d'étudier et de caractériser ces phénomènes afin de mieux comprendre leur impact sur le réseau [17].

II.4.2 Charges non linéaires

Une charge est dite non linéaire lorsque la relation entre la tension appliquée et le courant absorbé n'est pas proportionnelle. Ainsi, même lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale, elle génère un courant déformé, donc non sinusoïdal. Dans la suite de cette étude, l'analyse sera limitée aux charges non linéaires triphasées, caractérisées par des courants périodiques ayant la même période que la tension d'alimentation.

Ce type de charges comprend **par exemple** : les redresseurs, les gradateurs, les circuits magnétiques saturés ainsi que certains systèmes d'éclairage [18].

Les charges non linéaires absorbent des courants déformés, donc non sinusoïdaux. Elles constituent l'une des principales sources de courants harmoniques dans les réseaux électriques [19].

II.4.3 Équipements d'électronique de puissance

Les dispositifs d'électronique de puissance représentent une source majeure d'harmoniques dans les réseaux électriques ; peuvent être classées comme suit :

➤ **Redressement simple alternance commandé (charge résistive)**

Les redresseurs font partie des principales charges non linéaires générant des harmoniques dans les réseaux électriques. La figure suivante présente le schéma d'un redresseur monophasé simple alternance.

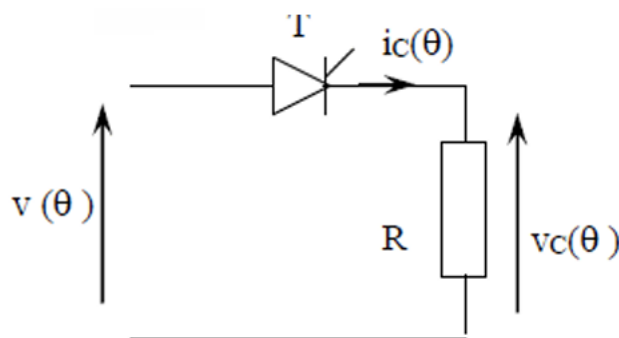


Figure II.4 Montage redresseur monophasé simple alternance commandé (Débit sur charge résistive) [20]

➤ **Gradateur monophasé**

Le gradateur permet de contrôler la puissance délivrée à une charge en modifiant l'angle d'amorçage des composants électroniques. La figure suivante montre son schéma de fonctionnement.

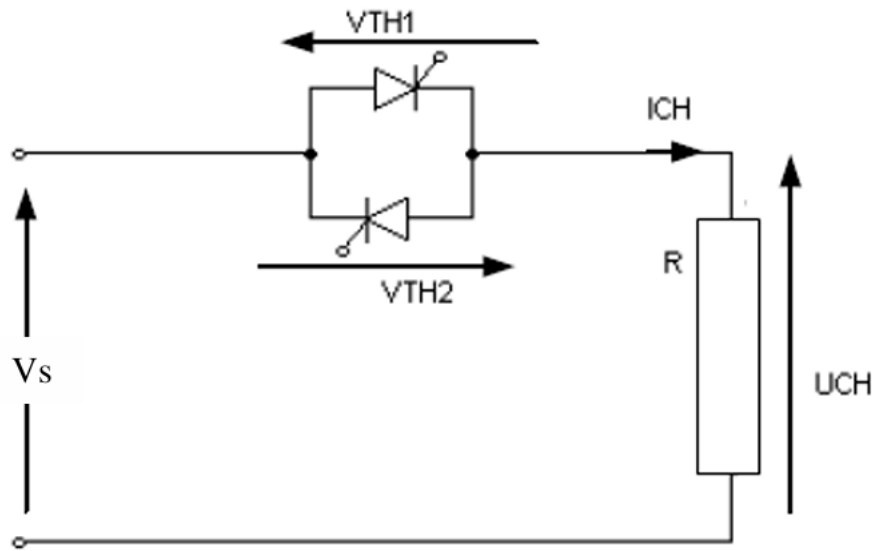


Figure II.5 Schéma du gradateur monophasé (Charge résistive) [20]

➤ **Le redresseur triphasé à thyristors**

Le redresseur triphasé à thyristors, également appelé pont de Graetz, est l'un des circuits d'électronique de puissance les plus utilisés dans l'industrie. Il représente environ 55 % de la puissance totale des équipements électroniques de puissance. Dans les applications à vitesse variable, ces redresseurs constituent la principale source d'harmoniques dans le secteur industrie

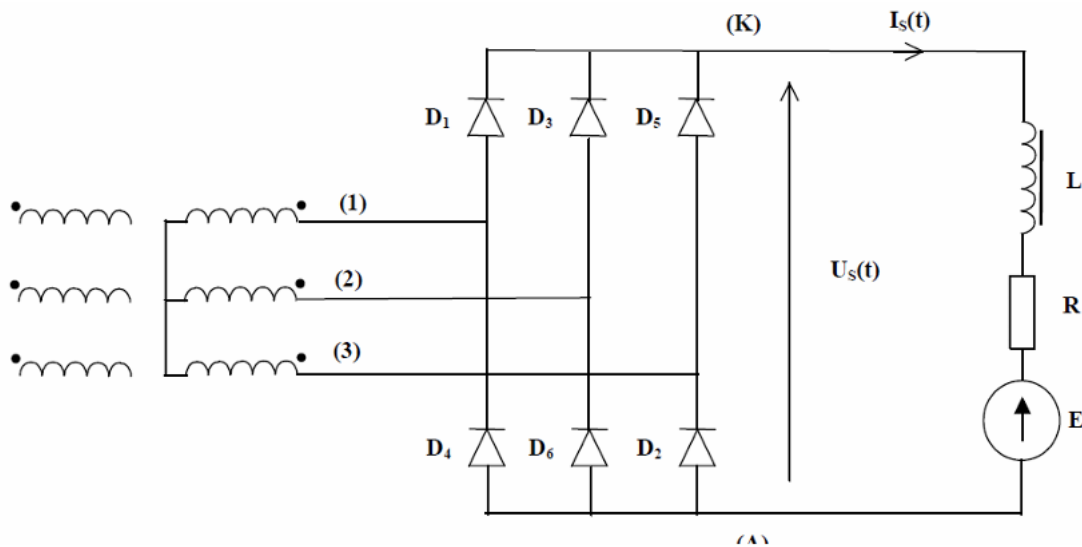


Figure III.6 Montage PD3 toutes diodes [19]

➤ Onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique qui transforme une tension continue en tension alternative. La figure suivante présente le schéma d'un onduleur en demi- pont.

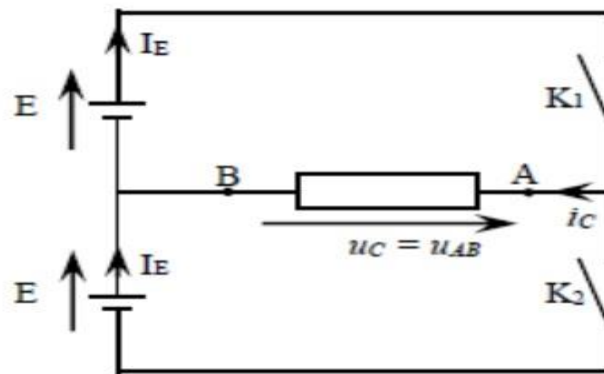


Figure II.7 Montage d'un onduleur en demi- pont à deux interrupteurs [20]

II.4.4 Charges non linéaires domestiques et industrielles

Les charges non linéaires sont présentes dans les secteurs domestique, tertiaire et industriel. Elles absorbent un courant déformé et constituent des sources d'harmoniques dans le réseau électrique. [18]

a) Charges domestiques

- Les lampes fluorescentes
- Les lampes LED
- Les ordinateurs
- Les téléviseurs
- Les imprimantes
- Les alimentations à découpage

b) Charges industrielles

- Les moteurs
- Les variateurs de vitesse
- Les redresseurs
- Les démarreurs progressifs
- Les fours à arc
- Les machines de soudage à l'arc.

Ces charges non linéaires absorbent un courant déformé, ce qui provoque l'apparition d'harmoniques et influence la qualité de l'énergie électrique.

II.5 Phénomènes liés à la dégradation de la qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique décrit la capacité de la tension et du courant à rester proches de leurs valeurs nominales en termes d'amplitude, de fréquence, de forme d'onde et de symétrie, tout en minimisant les perturbations qui peuvent nuire aux équipements et aux installations.

Si l'un ou plusieurs de ces quatre paramètres sont affectés, la qualité de l'énergie électrique est dégradée ce qui donne naissance à plusieurs phénomènes tels que les harmoniques, le flicker, les creux et surtensions de tension, le déséquilibre ainsi que le bruit électromagnétique lié à la compatibilité électromagnétique (CEM).

- **Flicker**

Le flicker est une variation lente et répétée de la tension, perceptible surtout par des fluctuations de l'éclairage, par exemple un clignotement des lampes fluorescentes ou des LED. Il est généralement causé par des charges dont la demande de puissance varie rapidement et de manière intermittente, comme les soudeuses, certains moteurs à démarrage brutal ou les appareils à puissance fluctuante [21].

➤ **Creux de tension (sag)**

Un creux de tension, souvent appelé « sag », correspond à une baisse temporaire de la tension efficace, typiquement à une valeur inférieure à 90% de la tension nominale, pendant une durée allant de quelques cycles à plusieurs secondes. Les creux sont fréquemment dus à des courts-circuits, à des démarrages de gros moteurs ou à des manœuvres sur le réseau, et peuvent provoquer des arrêts intempestifs de certains équipements sensibles [22].

➤ **Surtensions (swell)**

À l'inverse du creux, une surtension, ou « swell », est une hausse temporaire de la tension efficace au-dessus des 110% de la valeur nominale, également sur quelques cycles à quelques secondes.

Elle peut être liée à la répartition incorrecte de la charge, à la désactivation brutale de certains récepteurs ou à des manœuvres sur la ligne, et risque de surcharger certains composants ou protections [21].

➤ **Déséquilibre**

Un déséquilibre dans un système triphasé apparaît lorsque les tensions des trois phases ne présentent pas les mêmes amplitudes et/ou lorsque leur décalage angulaire diffère des 120° théoriques entre chaque phase [23].

➤ **Bruit électromagnétique / compatibilité électromagnétique (CEM)**

Le bruit électromagnétique englobe les perturbations de haute fréquence qui se propagent dans les câbles, les équipements électroniques et les capteurs, et proviennent notamment des convertisseurs statiques, des onduleurs et des interruptions de courant. Pour limiter cet effet, la norme IEC 61000-3-2 impose des limites sur les courants harmoniques injectés par les équipements, afin de garantir une compatibilité électromagnétique correcte entre les différents appareils connectés au réseau [24].

➤ Coupures brèves

Les coupures brèves correspondent à une disparition soudaine de la tension, dont la valeur chute en dessous de 1 % de la tension nominale. Leur durée est comprise entre une seconde et trois minutes [23].

II.6 Normes et recommandations internationales

Selon l'ISO (Organisation internationale de normalisation), une norme est un document qui définit des spécifications techniques ou des critères précis, destinés à être appliqués comme références afin d'assurer la conformité des produits, procédés et services à leur usage.

Dans le domaine de la qualité de l'énergie, les normes ont principalement deux rôles : fixer les caractéristiques nominales de l'alimentation (tension, fréquence et leurs tolérances) et définir les différentes perturbations pouvant affecter le réseau, ainsi que leurs niveaux admissibles.

Globalement, ces normes décrivent avec précision les paramètres de base de la fourniture électrique, mais les limites liées aux perturbations restent parfois moins bien définies, d'autant plus que les organismes de normalisation peuvent avoir des approches différentes de la notion de qualité.

Les principales normes relatives à la qualité de l'énergie ont été élaborées par deux organismes majeurs : l'IEEE et la Commission Électrotechnique Internationale (IEC). Elles correspondent respectivement à la norme IEEE 519 à la série IEC 61000.

De manière générale, ces normes permettent d'identifier les principales sources d'harmoniques, d'en analyser les effets sur les réseaux électriques, de définir des méthodes de mesure et d'analyse, et de proposer des recommandations afin de limiter leur présence dans les systèmes électriques [25].

II.6.1 IEEE 519

La norme IEEE Std 519-2014 (reconnue aussi dans IEEE 519-2022) fixe des limites de tension harmonique et de courant harmonique pour protéger les réseaux et les utilisateurs. Elle distingue deux types de limites

- Limites de tension harmonique : exprimées en pourcentage de THD par rapport à la tension de base ($\text{THD} \leq 5\%$ pour la plupart des niveaux de tension BT et MT).

- Limites de courant harmonique (TDD) : liées à la puissance du système et au niveau de tension.

Tableau II.1 limites IEEE pour la distorsion harmonique de la tension [25].

Tension au point de raccordement (V)	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	Limite THD tension (ordre de grandeur)
$V_n \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ KV}$	1.5	2.5%
$V_n > 161 \text{ KV}$	1.0	1.5%

Ces valeurs sont des limites de référence souvent utilisées dans les études de qualité de l'énergie, en lien avec la norme IEEE 519.

II.6.2 Normes IEC 61000 – compatibilité électromagnétique et harmoniques

La famille de normes **IEC 61000** traite de la compatibilité électromagnétique (CEM), c'est-à-dire la capacité des équipements à fonctionner correctement dans un environnement perturbé, sans polluer excessivement les autres appareils. Elle encadre notamment les émissions de perturbations (dont les harmoniques) et la résistance des récepteurs (immunité) aux variations de tension. Dans le cadre des harmoniques, deux parties sont particulièrement pertinentes pour notre étude :

La norme IEC 61000-3-2 fixe les limites de courant harmonique pour les appareils dont le courant de phase est inférieur ou égal à 16 A, raccordés aux réseaux de basse tension. Elle s'applique à des équipements tels que les alimentations électroniques, variateurs, lampes et autres charges non linéaires de faible puissance, qui sont des sources importantes de pollution harmonique.

En limitant ces courants harmoniques, cette norme contribue à préserver la qualité de la tension et à réduire la distorsion dans les réseaux où les transformateurs peuvent être alimentés par des sources non sinusoïdales [25].

La partie IEC 61000-3-12 étend ces exigences aux équipements plus puissants, dont le courant de phase **est supérieur à 16A et inférieur ou égal à 75 A**. Elle concerne les charges industrielles

lourdes (grands variateurs, fours, etc.), souvent connectées via des transformateurs de distribution MT/BT, et impose des limites d'émission harmonique afin de limiter leurs effets sur le réseau et sur les équipements [26].

On peut également citer la norme **IEC 61000-3-6**, qui encadre les émissions de courants harmoniques des équipements raccordés aux réseaux moyenne et haute tension. Elle définit également les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles. Cette norme fixe notamment une limite du taux de distorsion harmonique total (THD) à 6,5 % [25].

II.6.3 Lien entre les normes et la qualité de l'énergie électrique

IEEE 519 et **IEC 61000** sont donc deux approches complémentaires pour encadrer les effets des sources non sinusoïdales et des charges non linéaires. **IEEE 519** se concentre surtout sur les

limites acceptables dans le réseau (THD, TDD), tandis que la famille **IEC 61000** s'occupe de la compatibilité des équipements vis-à-vis des perturbations [27].

L'existence de ces limites réglementaires montre que la présence de tensions et courants déformés doit être maîtrisée, afin de limiter les pertes supplémentaires, l'échauffement des équipements et les risques de dysfonctionnement, en particulier pour les transformateurs et les machines électriques.

II.7 Impact des sources non sinusoïdales sur les systèmes électriques

L'apparition de tensions et de courants non sinusoïdaux, principalement dus aux charges non linéaires (variateurs, redresseurs, onduleurs, alimentations électroniques... etc) a un impact global sur les réseaux électriques, les machines et les équipements connectés. Ces perturbations se traduisent par des pertes supplémentaires, des surchauffes, des dysfonctionnements et une réduction de la durée de vie des composants, ce qui dégrade la qualité de l'énergie électrique [28].

❖ Impact sur les réseaux électriques

Les harmoniques augmentent les pertes Joule dans les câbles et les lignes, ce qui réduit l'efficacité du transport de l'énergie et provoque une diminution de la tension aux récepteurs.

De plus, la présence de courants harmoniques peut entraîner des chutes de tension localisées, des surtensions réactives et une surcharge des condensateurs de compensation, parfois à l'origine de résonances dangereuses dans certains régimes de fonctionnement.

Ces phénomènes influencent la stabilité et la fiabilité du réseau, en particulier dans les installations industrielles où les puissances installées sont élevées [28].

❖ Impact sur les machines électriques

Les machines électriques, notamment les moteurs asynchrones, subissent une augmentation des pertes dues aux courants harmoniques, principalement

- **Pertes fer (hystérésis et courants de Foucault)** dans le fer rotor-stator, qui augmentent avec la fréquence des harmoniques.
- **Pertes cuivre supplémentaires** dans les enroulements, provenant des courants harmoniques circulant dans les phases.

Ces pertes supplémentaires se traduisent par un échauffement plus important de la machine, une réduction du rendement et, à terme, une durée de vie raccourcie des isolants et des roulements.

Dans certains cas, des courants harmoniques déséquilibrés peuvent aussi provoquer des couples pulsés, entraînant des vibrations mécaniques et du bruit [28].

❖ Impact sur les équipements électroniques

Les équipements électroniques sensibles (automates, capteurs, appareils de mesure, alimentations à découpage, etc.) peuvent être perturbés par les variations rapides de tension et par les composantes harmoniques présentes dans le réseau. Ces perturbations peuvent provoquer :

- Des fausses mesures ou des erreurs de contrôle
- Des réinitialisations intempestives
- Voir des défaillances répétées lorsque les niveaux de distorsion dépassent les capacités de tolérance de l'appareil

Certains équipements fonctionnant avec des circuits de filtrage ou de découpage peuvent également être affectés par les résonances ou par l'augmentation des courants de crête, ce qui augmente les contraintes sur les composants électroniques [28].

❖ Impact sur les dispositifs de protection

Les dispositifs de protection (disjoncteurs, relais, fusibles, etc.) peuvent être trompés par la présence de courants déformés, en particulier si les harmoniques sont importantes.

Par exemple

- Certains dispositifs de détection de courant peuvent interpréter les courants harmoniques comme une surcharge, conduisant à des déclenchements intempestifs
- Les condensateurs utilisés pour la compensation de puissance réactive peuvent voir leurs courants augmenter considérablement à cause des harmoniques, risquant alors une surchauffe ou une mise en résonance avec le réseau

Ces effets réduisent la sécurité et la disponibilité des installations, ce qui rend indispensable une bonne gestion de la distorsion harmonique [28].

L'ensemble de ces effets montre que les sources non sinusoïdales dégradent significativement la qualité de l'énergie électrique, non seulement en termes de forme d'onde, mais aussi de continuité, de stabilité et de fiabilité des équipements. Des études et guides techniques soulignent d'ailleurs que la réduction de la distorsion harmonique conduit à une meilleure performance globale du réseau, une réduction des pertes, et une longévité accrue des machines et des transformateurs. C'est dans ce contexte que les perturbations harmoniques affectent fortement les transformateurs, justifiant la nécessité d'une étude dédiée à leur comportement lorsque ceux-ci sont alimentés par des sources non sinusoïdales, comme ce sera abordé ultérieurement.

II.8 Conclusion

La qualité de l'énergie électrique est fortement influencée par la présence de perturbations harmoniques dans les réseaux modernes. L'étude de ces phénomènes, ainsi que des normes et recommandations internationales qui les encadrent, permet de mieux comprendre leurs effets sur les équipements et sur la fiabilité des installations. Le chapitre suivant présentera la partie pratique de ce travail, afin d'illustrer l'application des notions étudiées et d'analyser les résultats obtenus.

Chapitre III : Partie pratique et étude expérimentale du transformateur

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale du transformateur à travers une série d'essais réalisés dans différentes conditions d'alimentation et de charge. L'objectif est d'analyser le comportement du transformateur sous source sinusoïdale puis sous source non sinusoïdale, en tenant compte des essais à vide et en charge, avec des charges linéaires et non linéaires. Cette étude permet de mettre en évidence l'influence de la forme d'onde d'alimentation et de la nature de la charge sur les performances du transformateur.

III.2 Bancs d'essai

Dans le cadre de ce travail, le banc d'essai a été élaboré afin d'étudier le comportement du transformateur dans différentes configurations expérimentales. Cette étude vise à comparer l'influence de la nature de la source et de la charge sur les grandeurs électriques mesurées, ainsi que sur l'allure des signaux obtenus. Quatre cas de fonctionnement ont été considérés

- Source sinusoïdale avec charge linéaire
- Source sinusoïdale avec charge non linéaire
- Source non sinusoïdale avec charge linéaire
- Source non sinusoïdale avec charge non linéaire

Les sources non sinusoïdales sont sollicitées par des types de tensions suivants :

- Une tension déformée de **THD 20% (ARB13)**
- Une tension déformée de **THD 26% (ARB15)**
- Une tension carrée de **THD 41% (STAIR1)**
- Une tension escalier de **THD 17% (STAIR3)**

Les figures suivantes présentent les deux configurations d'alimentation utilisées dans cette étude. Elles permettent d'illustrer visuellement les conditions expérimentales avant de passer à la description du système d'acquisition des signaux

Le banc d'essai a été conçu afin de réaliser les différentes mesures expérimentales dans des conditions contrôlées. La figure III.1 et III.2 présente l'ensemble des équipements utilisés pour étudier le comportement du transformateur monophasé.

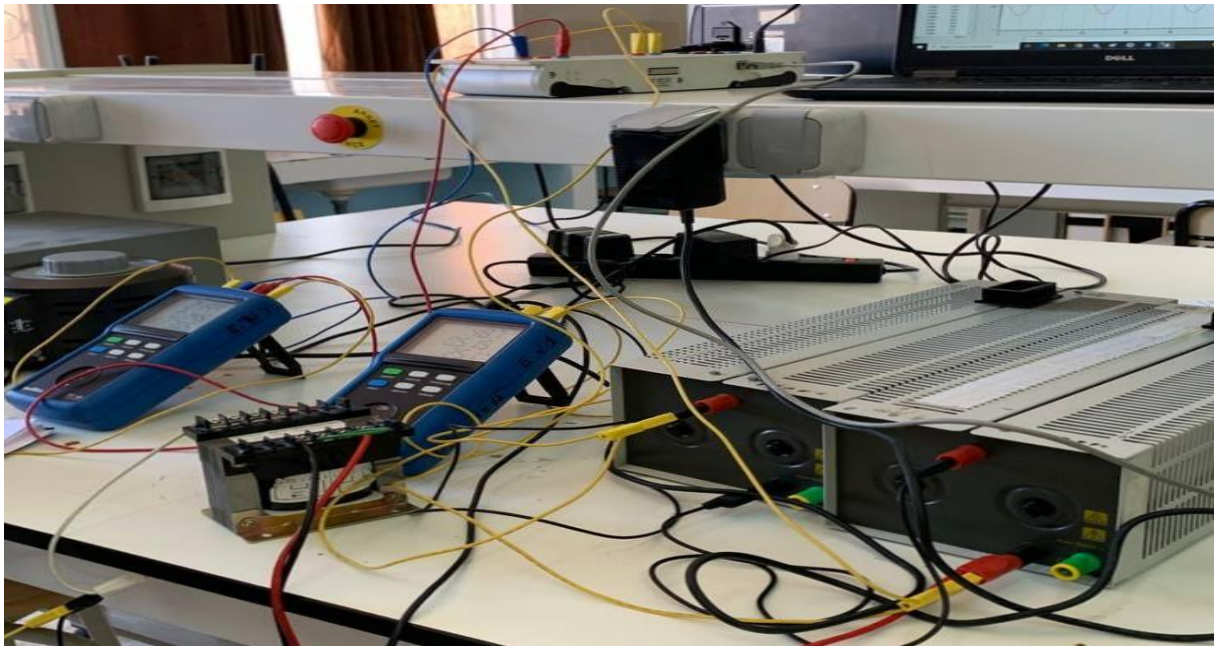


Figure III.1 Banc d'essai avec charge linéaire

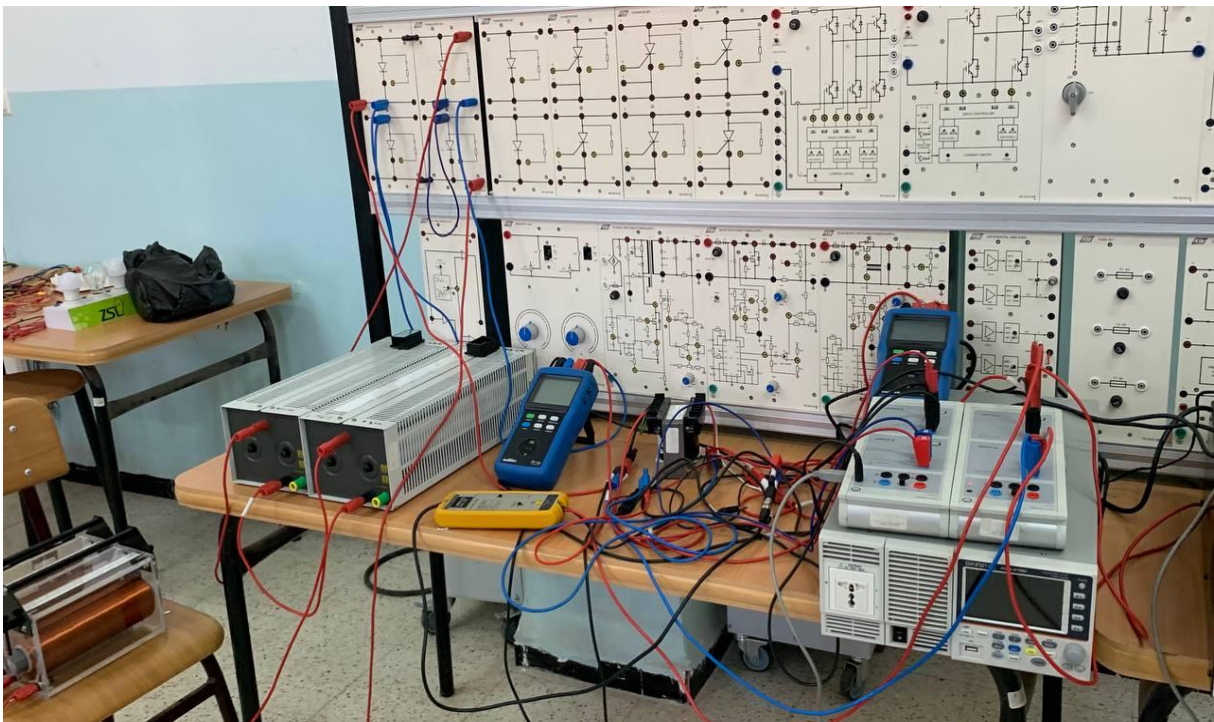


Figure III.2 Banc d'essai avec charge non linéaire

III.2.1 Eléments du banc d'essai

Le banc d'essai utilisé dans cette étude est composé de plusieurs équipements permettant de générer, mesurer et analyser les signaux électriques dans différentes conditions de charge et d'alimentation.

III.2.1.1 Générateur de signaux linéaires et non linéaire

Dans le cadre de cette expérimentation, nous avons utilisé un générateur de tension alternative programmable de marque GW Instek, modèle ASR-2100 (voir la figure III.3). Cet appareil permet de générer des signaux aussi bien sinusoïdaux que non sinusoïdaux avec des harmoniques programmables, ce qui en fait un outil parfaitement adapté à l'étude du comportement du transformateur sous différentes formes d'alimentation.



Figure III.3 le Générateur GW Instek ASR-2100 [29]

- Les caractéristiques techniques d'un générateur GW Instek ASR-2100 sont comme suit [29] :
 - Marque : GW Instek
 - Modèle : ASR-2100
 - Puissance maximale : 1000 VA
 - Tension de sortie : 0 – 350 V (RMS)
 - Fréquence : 15 Hz – 1000 Hz
 - Forme d'onde : Sinusoïdale et non sinusoïdale
 - THD : < 0.5% (mode sinusoïdal)
 - Interface : USB, GPIB

III.2.1.2 Transformateur Harvest HBK2-100

Le transformateur utilisé dans notre banc d'essai est un transformateur monophasé de commande de marque Harvest Electric, modèle HBK2-100 (voir la figure III.4). Il constitue l'élément principal de notre étude, puisque c'est son comportement sous différentes formes d'alimentation que nous cherchons à analyser

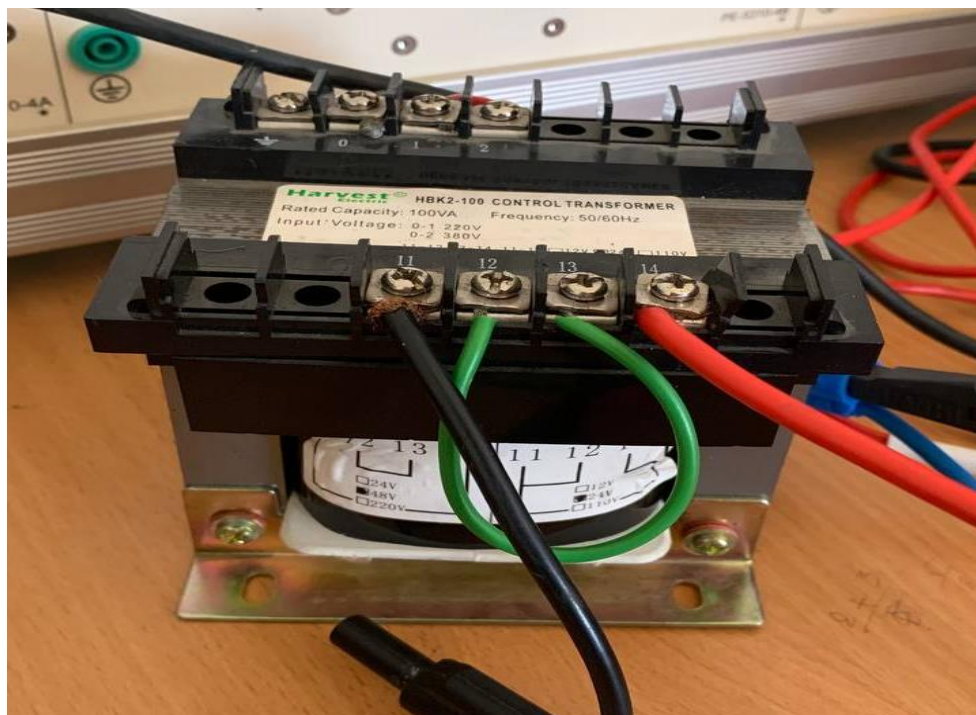


Figure III.4 Transformateur Harvest HBK2-100 [30]

- **Les caractéristiques techniques d'un transformateur Harvest HBK2-100 sont comme suit [30] :**
 - Marque : Harvest Electric
 - Modèle : HBK2-100
 - Puissance nominale : 100 VA
 - Fréquence : 50/60 Hz
 - Tension d'entrée primaire
 - 0-1 : 220 V
 - 0-2 : 380 V
 - Tension de sortie secondaire
 - 11-12 : 12 V
 - 13-14 : 24 V
 - 11-14 : 110 V
 - 12-14 : 24 V
- **III.2.1.3 Sonde de tension Langlois ISOL 720**

La mesure de tension est assurée par une sonde différentielle de marque Langlois, modèle ISOL 720 (voir la figure III.5). Cette sonde permet de mesurer des tensions élevées

de manière isolée et sécurisée, avec deux rapports d'atténuation sélectionnables selon la plage de tension à mesurer.



Figure III.5 Sonde de tension Langlois ISOL 720 [31]

- **Les caractéristiques techniques de la sonde de tension Langlois ISOL 720 sont comme suit [31] :**
 - Marque : Langlois
 - Modèle : ISOL 720
 - Type : Sonde différentielle de tension
 - Tension maximale : 1000 Vrms — CAT III
 - Tension de sortie $\pm 7V$ dans $1M\Omega$
 - Plage de mesure
 - $\pm 1400V$ pour un rapport d'atténuation 1/200
 - $\pm 140V$ pour un rapport d'atténuation 1/20
 - Mode commun : $\pm 1400V$
 - Type de signal : DC + Peak AC
 - Rapport d'atténuation
 - 1/200
 - 1/20

III.1.1.4 Module d'acquisition des signaux SENSOR-CASSY

L'acquisition des signaux est réalisée à l'aide du système SENSOR-CASSY de marque Leybold Didactic (voir la figure III.6). Cet appareil est une interface d'acquisition de données qui permet de mesurer simultanément les tensions et les courants au primaire et au secondaire du transformateur, via ses deux entrées INPUT A et INPUT B. Il est associé au logiciel CASSY Lab qui permet l'affichage, l'enregistrement et l'exportation des signaux mesurés



Figure III.6 SENSOR-CASSY [32]

- **Les caractéristiques techniques d'un SENSOR-CASSY sont comme suit [32] :**
 - Marque : Leybold Didactic
 - Modèle : SENSOR-CASSY
 - Référence : 524 010
 - Type : Interface d'acquisition de données
 - Nombre d'entrées : 2 (INPUT A et INPUT B)
 - Logiciel associé : CASSY Lab
 - Export des données : fichier .txt ou .csv
 - Mesures possibles :
 - Tension (U)
 - Courant (I)

III.3. Étude du comportement du transformateur à vide

Le régime à vide a été effectué sur le transformateur sous les différentes alimentations, trois cas de tension d'alimentation ont été étudiés :

1. **Sinusoïdal linéaire** : tension sinusoïdale, $\text{THD}_v \approx 0$ (cas de référence)
2. **Sinusoïdal non linéaire** : tension sinusoïdale avec légère distorsion, THD_v faible
3. **Non sinusoïdal non linéaire** : tension déformée, THD_v élevé

Pour chaque cas, la puissance à vide P_{10} a été mesurée. Le **THD de la tension** a été calculé pour les cas non linéaires.

- **Cas sinusoïdal linéaire** :

Pour le cas sinusoïdal linéaire, considéré comme référence avec $\text{THD}_v \approx 0.47\%$, la puissance à vide mesurée est $P_{10} = 4.5 \text{ W}$. Cette valeur constitue la base de comparaison pour les cas avec distorsion harmonique.

- **Cas sinusoïdal non linéaire** :

Pour le cas sinusoïdal non linéaire, le THD de la tension est de $\text{THD}_v = 1.4\%$, La puissance à vide mesurée est $P_{10} = 4.6 \text{ W}$, supérieure au cas sinusoïdal linéaire.

- **Cas non sinusoïdal non linéaire**

Pour le cas non sinusoïdal non linéaire, les **THD** et les P_{10} des tensions montrées au tableau sont plus élevés que le cas sinusoïdal non linéaire. Elles sont les plus élevées des trois cas.

Le tableau III.1

Tableau III.1 Résultats des P_{10} et THD_v des tensions non sinusoïdales

	ARB13	ARB15	STAIR1	STAIR3
P_{10}	4.858	4.964	5.114	4.921
THD_v	16.83	23.55	41.53	17.69

La puissance à vide constitue un indicateur des pertes fer du transformateur et permet d'évaluer l'influence de la qualité de la tension d'alimentation. La figure III.7 représente l'évolution de P_{10} en fonction du taux de distorsion harmonique de la tension (THD_v).

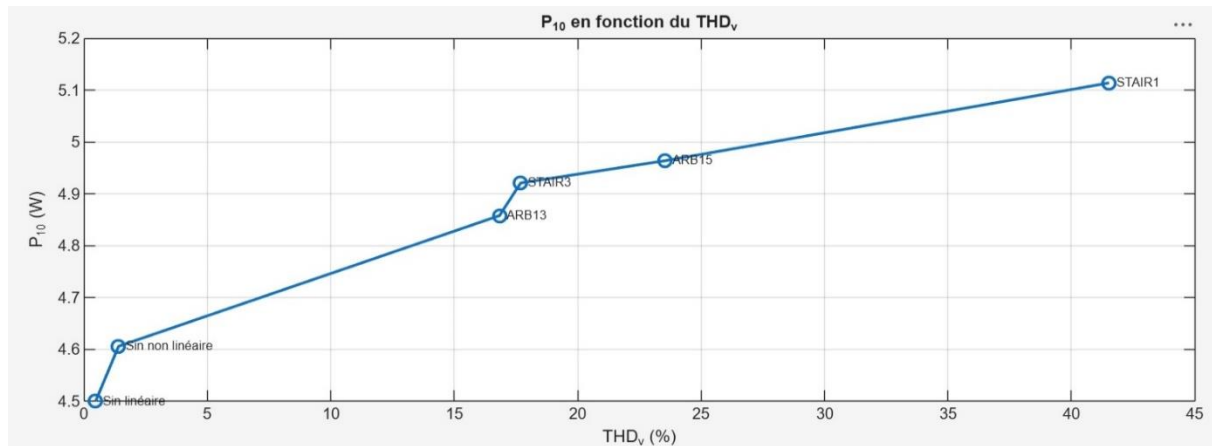


Figure III.7 Évolution de la puissance absorbée à vide P_{10} en fonction du taux de distorsion harmonique de la tension (THD_v)

Le graphe de P_{10} en fonction du THD montre que la puissance à vide est influencée par la déformation harmonique du signal d'alimentation. En effet, P'_{10} peut être écrite comme la somme de la puissance active de référence P_{10} et des pertes supplémentaires ΔP , soit $P'_{10} = P_{10} + \Delta P$. Lorsque le THD augmente, la proportion d'harmoniques dans le signal devient plus importante, ce qui entraîne une augmentation des pertes dans le transformateur, notamment les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault qui sont proportionnelles à la fréquence et carré de la fréquence respectivement. Ainsi, les cas les plus distordus présentent généralement une puissance à vide plus élevée ou plus perturbée que les cas moins harmoniques. On peut donc conclure que la qualité de la forme d'onde d'alimentation a une influence directe sur le comportement à vide du transformateur et par conséquent sur son rendement.

III.4 Étude du comportement du transformateur en charge

III.4.1 Sous-alimentation sinusoïdale

Cette partie est consacrée à l'étude du comportement en charge du transformateur sous-alimentation sinusoïdale. Elle a pour objectif d'analyser l'influence de la charge sur les principales grandeurs électriques du transformateur, afin de mieux comprendre son fonctionnement dans des conditions normales d'exploitation. L'analyse est réalisée pour deux types de charges, à savoir les charges linéaires et les charges non linéaires.

1- Alimentation sinusoïdale et charge linéaire

Le premier cas étudié correspond à une alimentation sinusoïdale avec une charge linéaire. Il s'agit du cas idéal de fonctionnement d'un transformateur, où la source délivre un signal purement sinusoïdal de fréquence 50 Hz et où la charge connectée au secondaire est de nature

linéaire. Dans ces conditions, le transformateur est censé fonctionner dans ses conditions nominales, sans distorsion harmonique.

Le tableau III.2

Tableau III.2 Résultats du cas source sinusoïdale et charge linéaire

Point de charge	V_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	V_2 (V)	I_2 (A)	P_2 (W)
25%	220	0.140	30.5	48.8	0.510	25.1
50%	220	0.236	51.0	47.4	0.924	43.8
75%	220	0.351	76.8	46.4	1.430	65.5
100%	220	0.452	98.9	44.5	1.875	82.6

➤ Tensions et courants au primaire et au secondaire : cas sinusoïdal linéaire

Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale et d'une charge linéaire, l'analyse des formes d'onde permet d'observer le comportement du transformateur dans des conditions de fonctionnement de référence. La figure suivante présente les signaux I_1 et U_2 enregistrés à 25 % de charge.

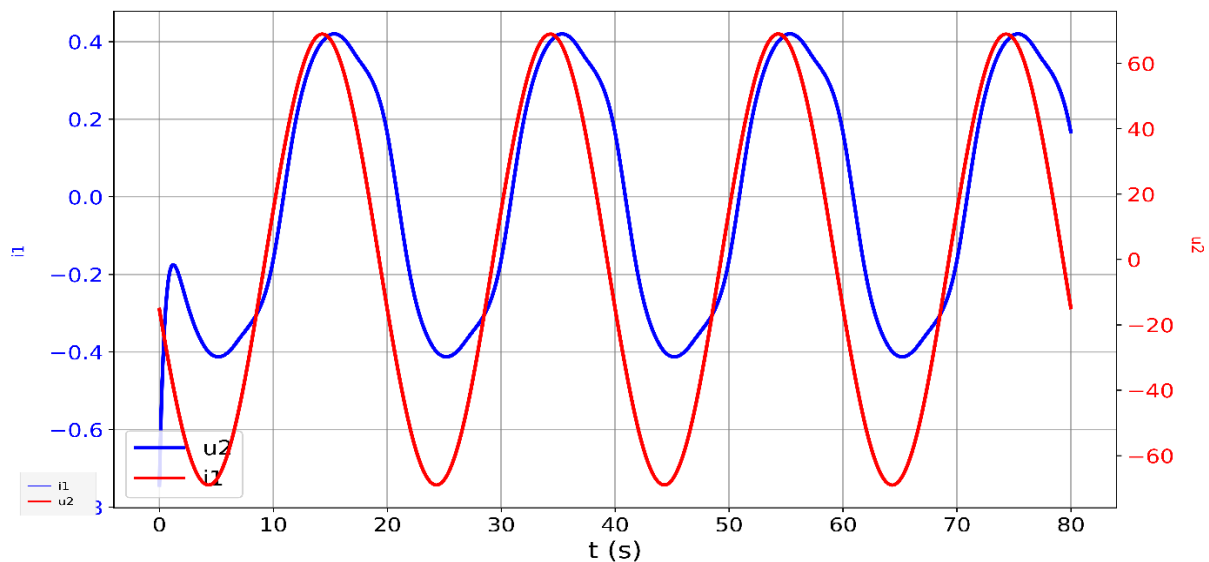


Figure III.8 Formes d'onde du courant primaire et tension secondaire du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge linéaire à 25 % de la charge nominale

Pour une alimentation sinusoïdale et une charge linéaire, l'augmentation du taux de charge modifie les grandeurs électriques mesurées au primaire et au secondaire. La figure suivante présente les formes d'onde de I_1 et U_2 à 50 % de charge.

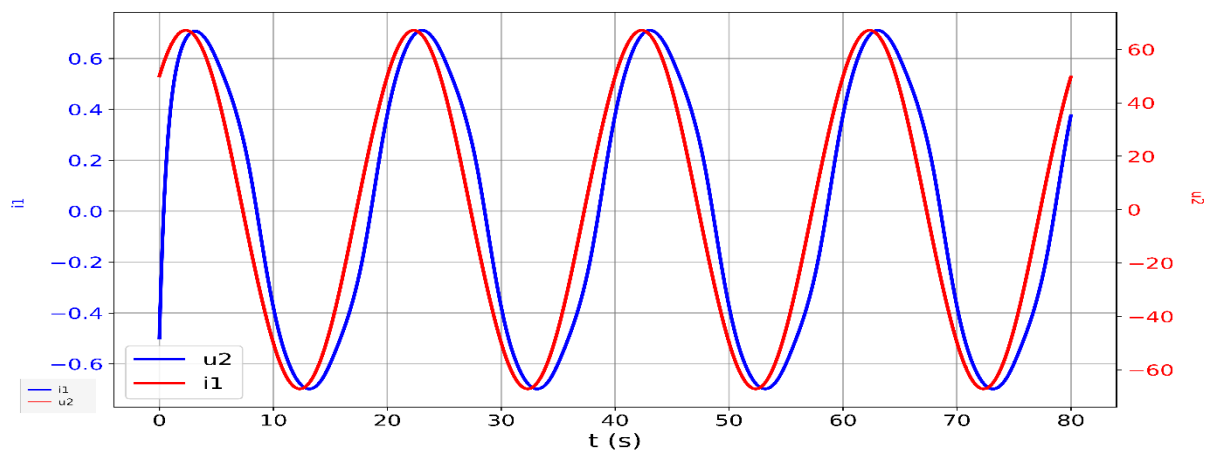


Figure III.9 Formes d'onde du courant primaire et tension secondaire du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge linéaire à **50 % de la charge nominale**

À pleine charge, le transformateur fonctionne dans ses conditions nominales avec une alimentation sinusoïdale et une charge linéaire. La figure suivante présente les formes d'onde des tensions et des courants enregistrées à 100 % de charge.

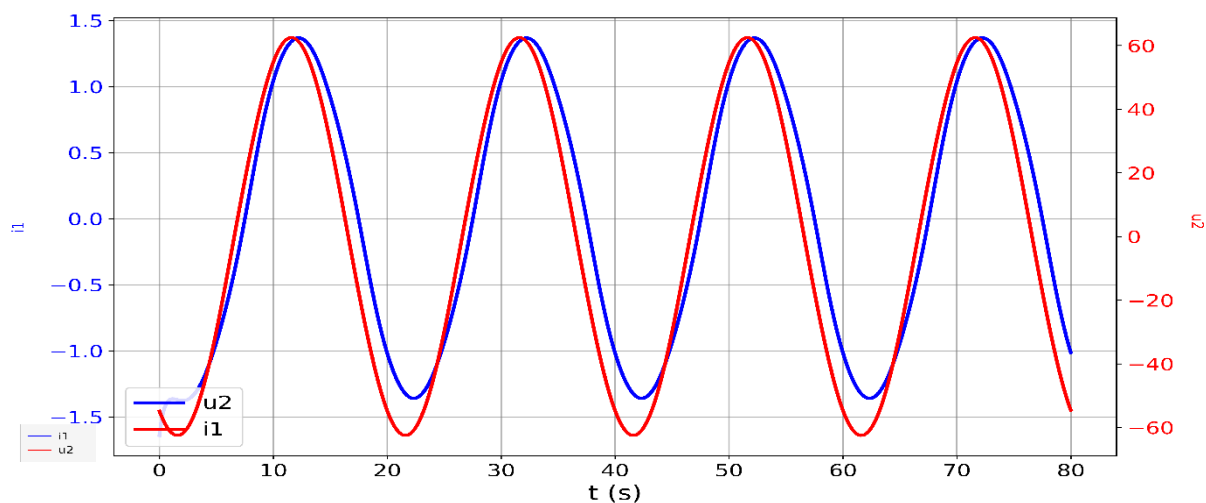


Figure III.10 Formes d'onde du courant primaire et tension secondaire du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge linéaire à **100 % de la charge nominale**

a. Caractéristiques de fonctionnement du transformateur

Les courbes suivantes illustrent le rendement η , les chutes de tension secondaire ΔV ainsi que les pertes de puissance ΔP du transformateur pour les différentes charges étudiées

Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale et d'une charge linéaire, l'étude du rendement permet d'évaluer les performances énergétiques du transformateur en fonction du taux de charge. Cette analyse permet d'identifier la zone de fonctionnement où le transformateur est le plus efficace. La figure suivante présente l'évolution du rendement en fonction du taux de charge.

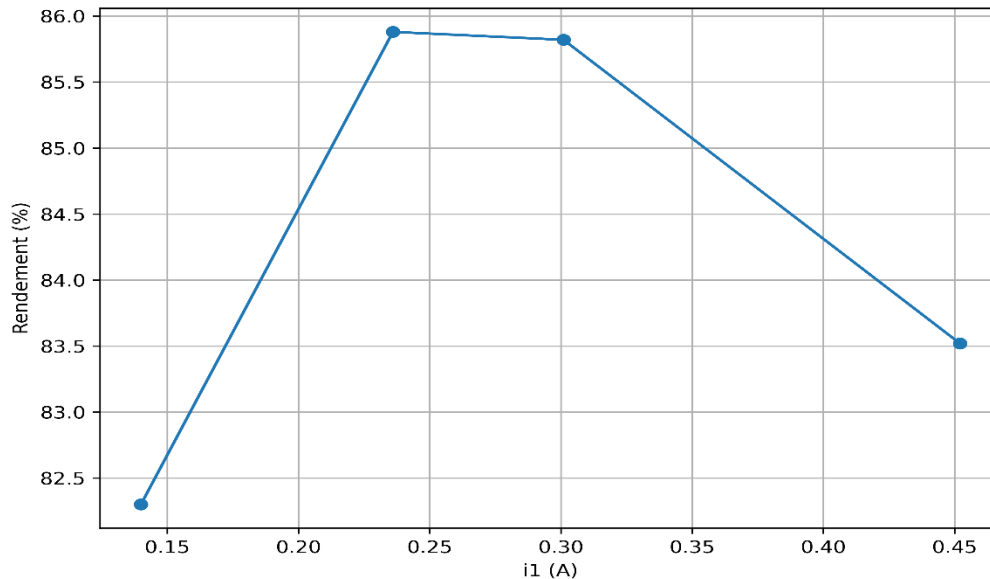


Figure III.11 Évolution du rendement du transformateur en fonction du courant de charge

La courbe du rendement présente une allure caractéristique en cloche. À faible charge (25 %), le rendement démarre à environ 82,2 %, puis augmente rapidement pour atteindre son maximum d'environ 85,9 % à 50 % de charge ($I_1 \approx 0,24$ A). Il se maintient à un niveau élevé de 85,8 % à 75 % de charge ($I_1 \approx 0,30$ A), avant de décroître progressivement pour atteindre 83,5 % à pleine charge ($I_1 \approx 0,45$ A).

Ce comportement est typique des transformateurs : à faible charge, les pertes fer constantes dominant et pèsent lourd par rapport à la puissance transmise, ce qui explique le faible rendement initial. Au voisinage du maximum, les pertes fer et les pertes Joule s'équilibrent, donnant le meilleur rendement. À forte charge, les pertes Joule croissantes avec le carré du courant prennent le dessus et dégradent progressivement le rendement.

Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale et d'une charge linéaire, l'étude de la chute de tension permet d'évaluer la capacité du transformateur à maintenir une tension de sortie stable lorsque la charge augmente. La figure suivante présente l'évolution de la chute de tension ΔV en fonction du taux de charge.

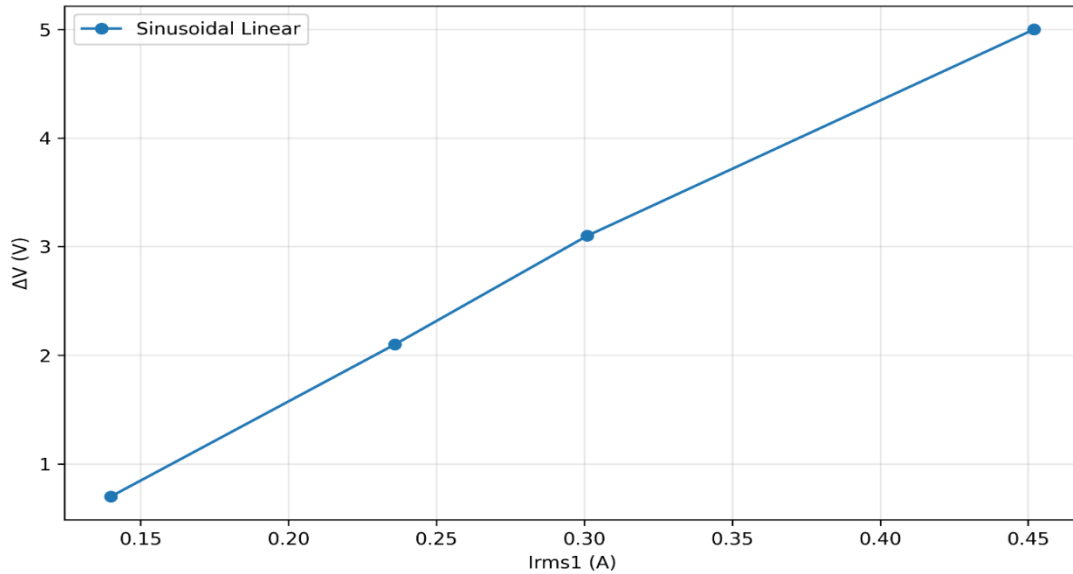


Figure III.12 Évolution de la chute de tension en fonction du courant de charge

La chute de tension ΔV augmente régulièrement avec le courant primaire I_1 . Elle passe de 0,7 V à faible charge, pour $I_1 \approx 0,14$ A, à 5,0 V à pleine charge, pour $I_1 \approx 0,45$ A, avec des valeurs intermédiaires de 2,1 V à 50% et 3,1 V à 75% de charge. Cette évolution montre un comportement cohérent pour un transformateur alimentant une charge résistive. Dans ce cas, la variation de ΔV s'explique surtout par les chutes de tension dans les enroulements, alors que l'effet des réactances de fuite reste moins marqué

Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale et d'une charge linéaire, l'analyse des pertes permet d'évaluer l'influence de la charge sur les performances du transformateur. La figure suivante présente l'évolution des pertes totales ΔP en fonction du taux de charge.

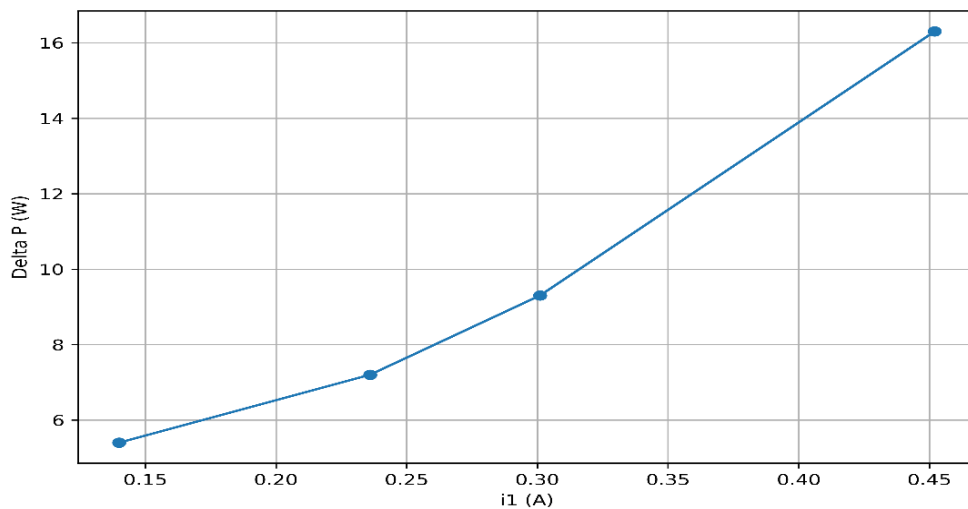


Figure III.13 Évolution des pertes totales du transformateur en fonction du courant de charge

La courbe des pertes totales ΔP en fonction du courant primaire I_1 présente une allure croissante et légèrement convexe. Les pertes augmentent progressivement de 5,4 W à faible charge (25%, $I_1 \approx 0,14$ A) jusqu'à 16,3 W à pleine charge (100%, $I_1 \approx 0,45$ A), avec des valeurs intermédiaires de 7,2 W à 50% et 9,3 W à 75% de charge. Cette évolution s'explique par la composition des pertes totales du transformateur : les pertes fer, pratiquement constantes, constituent une base non nulle même à faible charge, tandis que les pertes par effet Joule, qui augmentent avec le carré du courant, deviennent de plus en plus importantes lorsque la charge augmente. La forme régulière de cette courbe montre un comportement conforme aux attentes pour un transformateur monophasé en fonctionnement normal

Les résultats obtenus sont cohérents avec le comportement attendu d'un transformateur monophasé. La tension secondaire diminue progressivement avec l'augmentation de la charge, tandis que les pertes augmentent sous l'effet du courant. Le rendement présente un maximum à charge intermédiaire, ce qui est conforme au principe d'équilibre entre pertes fer et pertes Joule

2- Alimentation sinusoïdale et charge non-linéaire

Le deuxième cas étudié correspond à une alimentation sinusoïdale avec une charge non linéaire. Il s'agit d'un cas permettant d'analyser le comportement du transformateur dans des conditions de fonctionnement déformées, où la charge engendre un courant non sinusoïdal et introduit des effets harmoniques dans le système.

Tableau III.3 Résultats du cas source sinusoïdale et charge non linéaire

Point de charge	V_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	V_2 (V)	I_2 (A)	P_2 (W)
25%	220	0.120	22.3	49.2	0.378	17.4
50%	220	0.257	50.9	47.2	1.009	43.5
75%	220	0.378	75.9	45.5	1.541	64
100%	220	0.457	92.4	45.1	1.901	77.1

➤ Les Tensions et courants au primaire et au secondaire : cas sinusoïdal non linéaire

Dans le cas d'une alimentation sinusoïdale et d'une charge non linéaire (redresseur), l'observation des formes d'onde permet d'analyser l'influence des courants déformés sur le fonctionnement du transformateur. La figure III.14 présente les signaux U_1 , I_1 , U_2 et I_2 enregistrés à 25 % de charge.

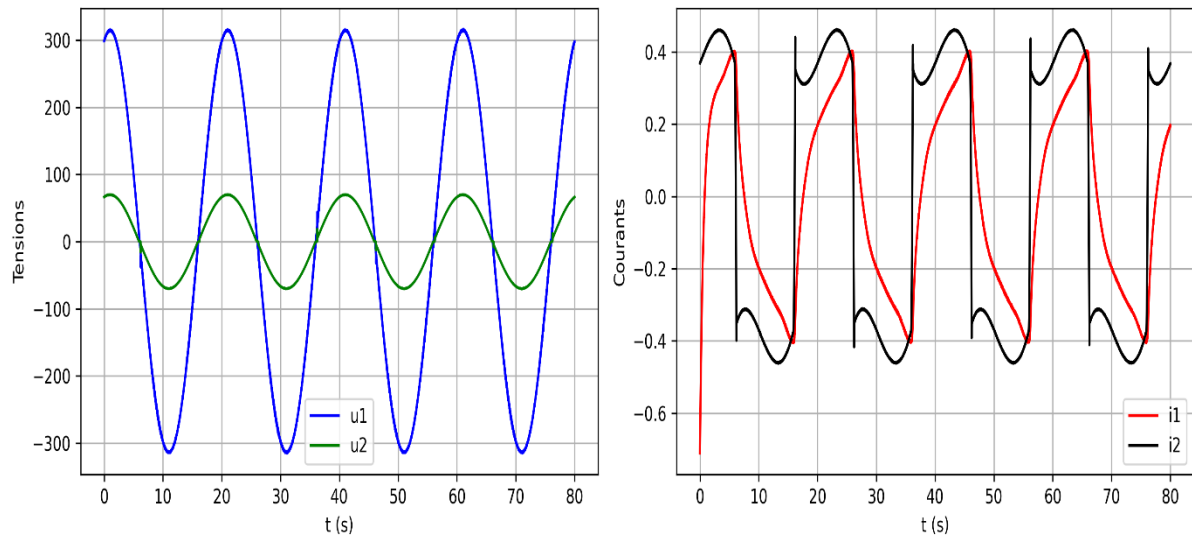


Figure III.IV Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge non linéaire à **25 % de la charge nominale**

L'augmentation du taux de charge modifie les formes d'onde des tensions et des courants dans le transformateur. La figure III.15 présente les signaux U_1 , I_1 , U_2 et I_2 obtenus à 50 % de charge.

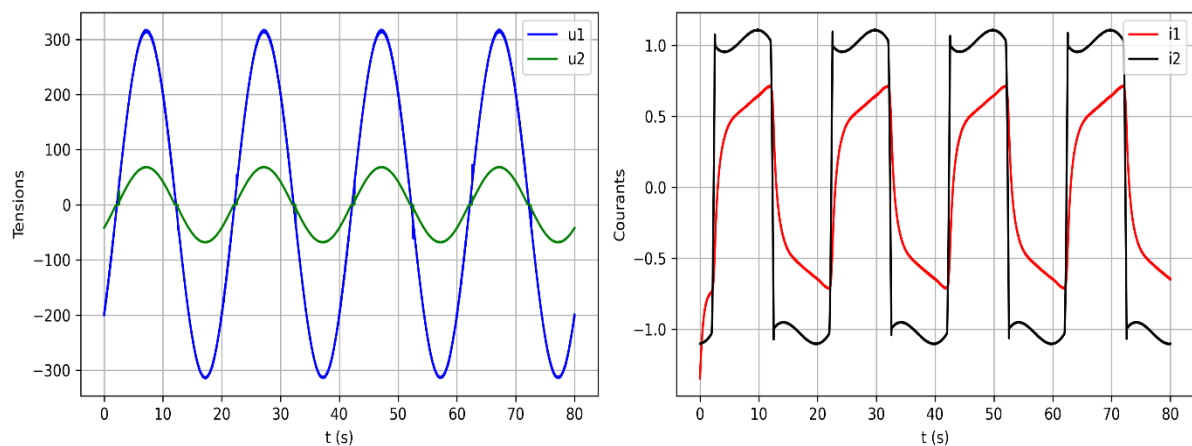


Figure III.15 Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge non linéaire à **50 % de la charge nominale**

À pleine charge, les effets de la charge non linéaire deviennent plus prononcés sur les grandeurs électriques mesurées. La figure suivante présente les signaux U_1 , I_1 , U_2 et I_2 enregistrés à 100 % de charge.

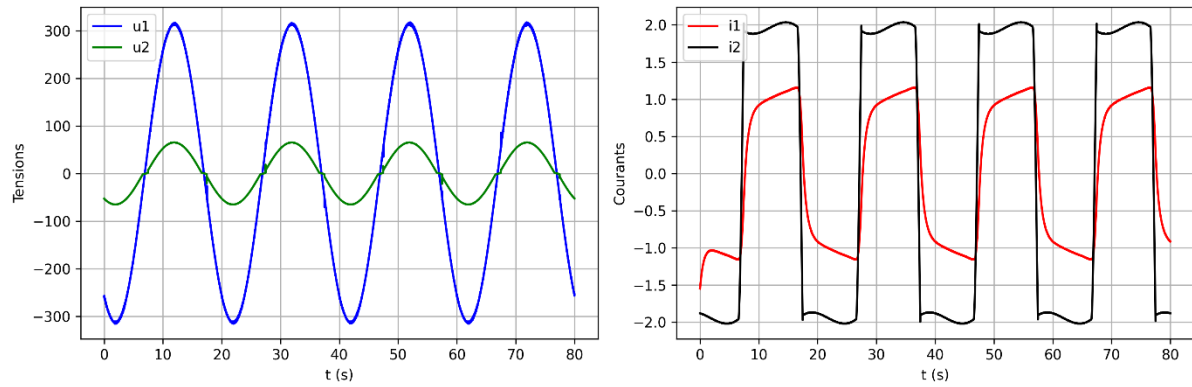


Figure III.16 Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge non linéaire à **100 % de la charge nominale**

b. Caractéristiques de fonctionnement du transformateur

Les courbes ci-dessous illustrent la comparaison des performances du transformateur dans les différents cas étudiés, notamment le rendement η , la chute de tension secondaire ΔV et les pertes de puissance ΔP .

La comparaison des courbes de rendement permet d'évaluer l'influence du type de charge sur les performances énergétiques du transformateur sous une alimentation sinusoïdale. La figure suivante illustre l'évolution du rendement pour une charge linéaire et une charge non linéaire.

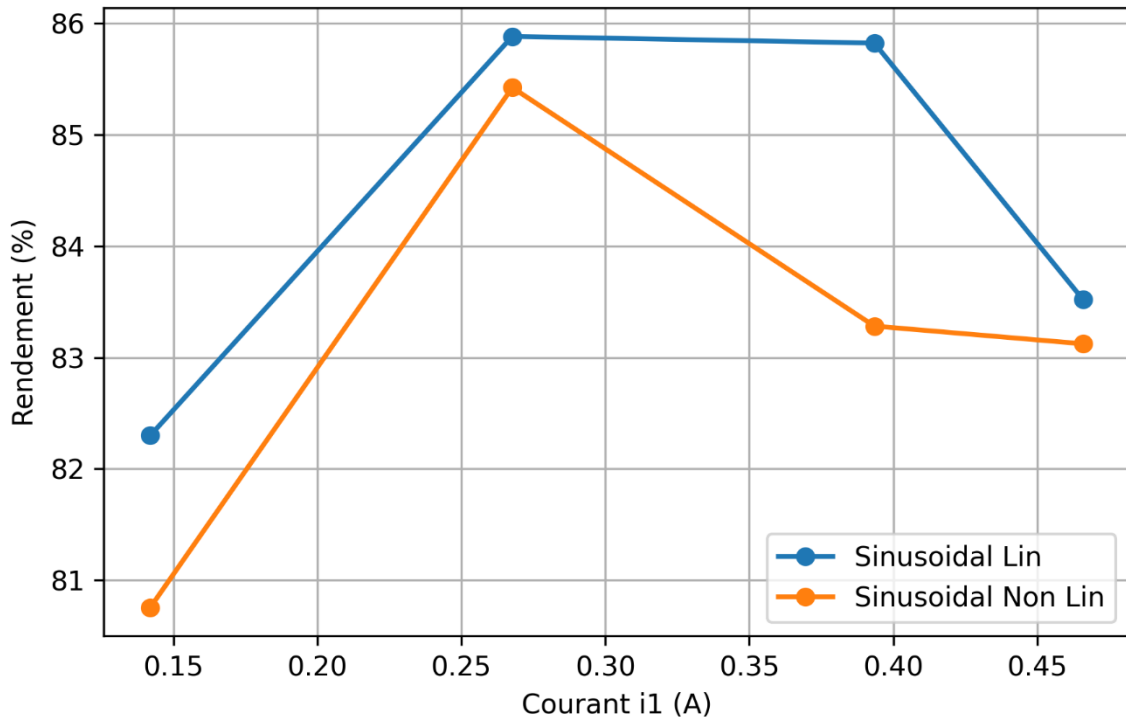


Figure III.17 Évolution du rendement du transformateur en fonction du courant de charge

Les courbes de $\eta = f(I)$ présentent une allure en cloche, caractéristique du rendement des transformateurs. Cette évolution traduit l'existence d'un point de fonctionnement optimal, pour lequel l'équilibre entre les pertes constantes et les pertes variables permet d'obtenir le meilleur rendement. À faible charge, le rendement reste limité, car les pertes fixes représentent une part importante de la puissance transmise. Lorsque le courant augmente, le rendement s'améliore progressivement jusqu'à atteindre un maximum, puis il diminue lorsque les pertes variables deviennent plus importantes.

En charge linéaire, le transformateur conserve globalement de meilleures performances sur l'ensemble de la plage étudiée. À l'inverse, en charge non linéaire, le rendement est plus faible, ce qui montre l'effet défavorable de la forme du courant sur le fonctionnement du transformateur. Cette baisse s'explique principalement par la présence de courants harmoniques, qui augmentent les pertes dans les enroulements et dans l'ensemble du système magnétique, sans contribuer à la puissance active utile.

On remarque également que l'écart entre les deux cas est plus sensible aux faibles charges, puis tend à se réduire lorsque le courant augmente. Cela indique que l'influence relative des perturbations devient moins marquée lorsque le transformateur fonctionne à charge plus élevée, même si le cas non linéaire reste toujours moins performant que le cas linéaire.

Ainsi, l'analyse du rendement met clairement en évidence l'impact de la nature de la charge sur les performances du transformateur, la charge linéaire offrant un fonctionnement globalement plus favorable.

La chute de tension constitue un indicateur de la qualité de régulation du transformateur. La figure suivante compare l'évolution de ΔV obtenue avec une charge linéaire et une charge non linéaire sous une alimentation sinusoïdale.

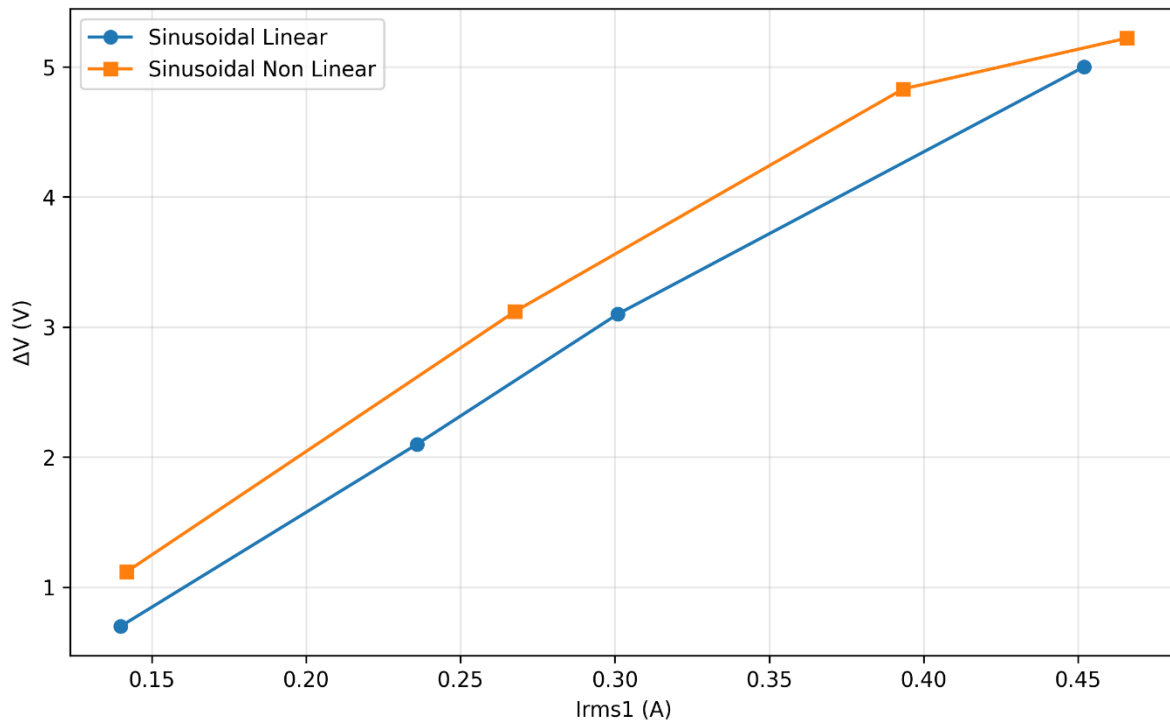


Figure III.18 Évolution de la chute de tension en fonction du courant de charge

La courbe comparative de la chute de tension ΔV en fonction du courant primaire I_1 montre une évolution croissante et quasi linéaire dans les deux cas étudiés. On observe toutefois que la charge non linéaire, associée au redresseur et à l'inductance de lissage, présente des valeurs de ΔV plus élevées que la charge linéaire sur la majeure partie de la plage analysée. Ce comportement peut s'expliquer par la forme du courant absorbé dans le cas non linéaire, qui n'est plus parfaitement sinusoïdale et devient plus impulsionnel. Cette particularité entraîne une augmentation de la valeur efficace du courant circulant dans les enroulements, ce qui accentue les chutes de tension au niveau des impédances internes du transformateur. Ainsi, la régulation de tension apparaît moins favorable dans le cas de la charge non linéaire, ce qui met en évidence l'influence du type de charge sur le comportement du transformateur.

Les pertes totales permettent d'apprécier l'effet de la charge sur le fonctionnement du transformateur. La figure suivante compare l'évolution de ΔP pour les deux types de charge alimentés par une source sinusoïdale.

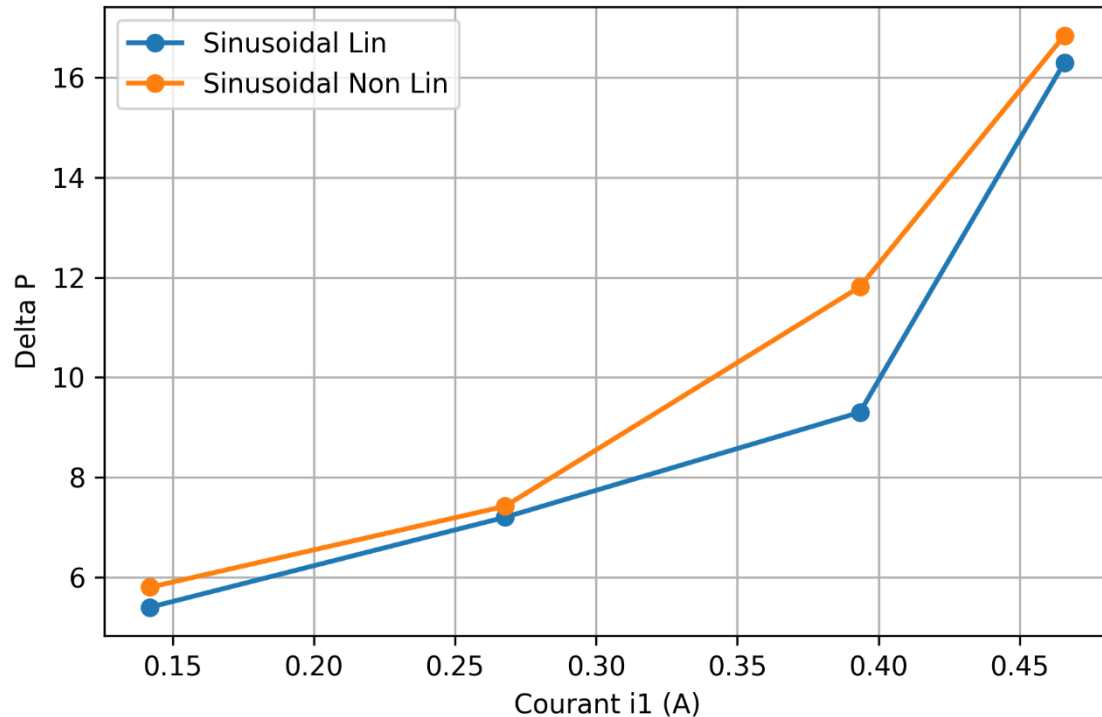


Figure III.19 Évolution des pertes totales du transformateur en fonction du courant de charge

Les courbes comparatives des pertes $\Delta P = f(I)$, obtenues sous source sinusoïdale, montrent une évolution croissante et non linéaire avec le courant primaire I . À faible charge, les deux courbes sont presque confondues, ce qui traduit la domination des pertes fer, pratiquement constantes, et le faible impact de la nature de la charge dans cette zone de fonctionnement.

À partir de charges intermédiaires, un écart progressif apparaît entre les deux cas, puis s'accroît à l'approche de la pleine charge. Les pertes dans le cas de la charge non linéaire deviennent alors systématiquement supérieures à celles observées avec la charge linéaire, en particulier pour les valeurs élevées du courant.

Cette différence s'explique par la présence d'harmoniques de courant générées par le redresseur à diodes avec inductance de lissage. Ces harmoniques augmentent la valeur efficace du courant dans les enroulements sans contribuer à la puissance utile, ce qui entraîne une augmentation des pertes par effet Joule et une dégradation des performances du transformateur par rapport au cas de référence à charge linéaire.

L'étude des pertes en fonction du taux de distorsion harmonique du courant (THDi) permet d'évaluer l'influence des harmoniques sur le fonctionnement du transformateur. La figure suivante présente l'évolution des pertes ΔP en fonction du THDi.

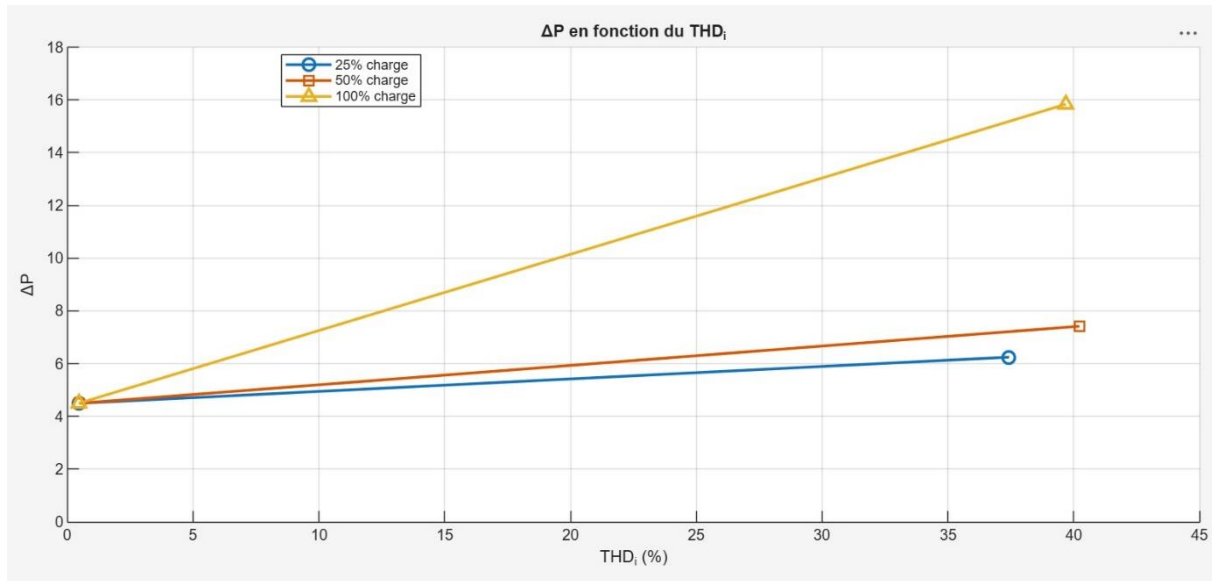


Figure V.20 Évolution des pertes du transformateur en fonction du taux de distorsion harmonique du courant (THDi)

Les courbes de ΔP en fonction du THDi montrent une augmentation des pertes avec l'accroissement de la distorsion harmonique du courant. Cette évolution, observée pour les trois niveaux de charge étudiés, met en évidence l'influence défavorable des harmoniques sur les performances du transformateur. À faible THDi, les pertes restent limitées, tandis qu'elles augmentent plus nettement lorsque la distorsion s'accroît, en particulier à forte charge. Cette hausse s'explique par l'augmentation du courant efficace dans les enroulements et par l'apparition de pertes fer supplémentaires dans le circuit magnétique.

L'ajout d'une charge non linéaire a montré que le transformateur ne se comporte plus exactement comme dans le cas de référence. On observe une baisse du rendement, surtout à faible charge, ainsi qu'une augmentation de la chute de tension. Cela s'explique par la présence d'harmoniques produites par le redresseur. Néanmoins, l'inductance de lissage joue un rôle important, car elle réduit partiellement ces perturbations et améliore la continuité du courant.

III.4.2 Sous-alimentation non sinusoïdale

Afin d'étudier le comportement en charge du transformateur sous-alimentation non sinusoïdale, les allures et les THD de ces tensions sont illustrés dans les figures suivantes.

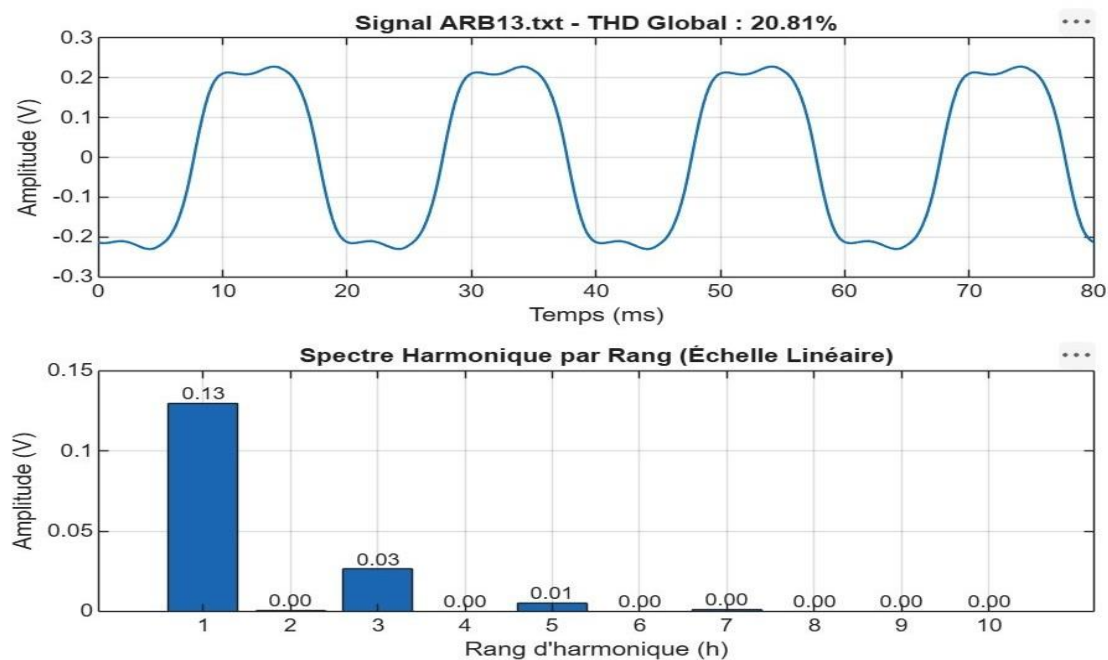


Figure III.21 THD du signal ARB13

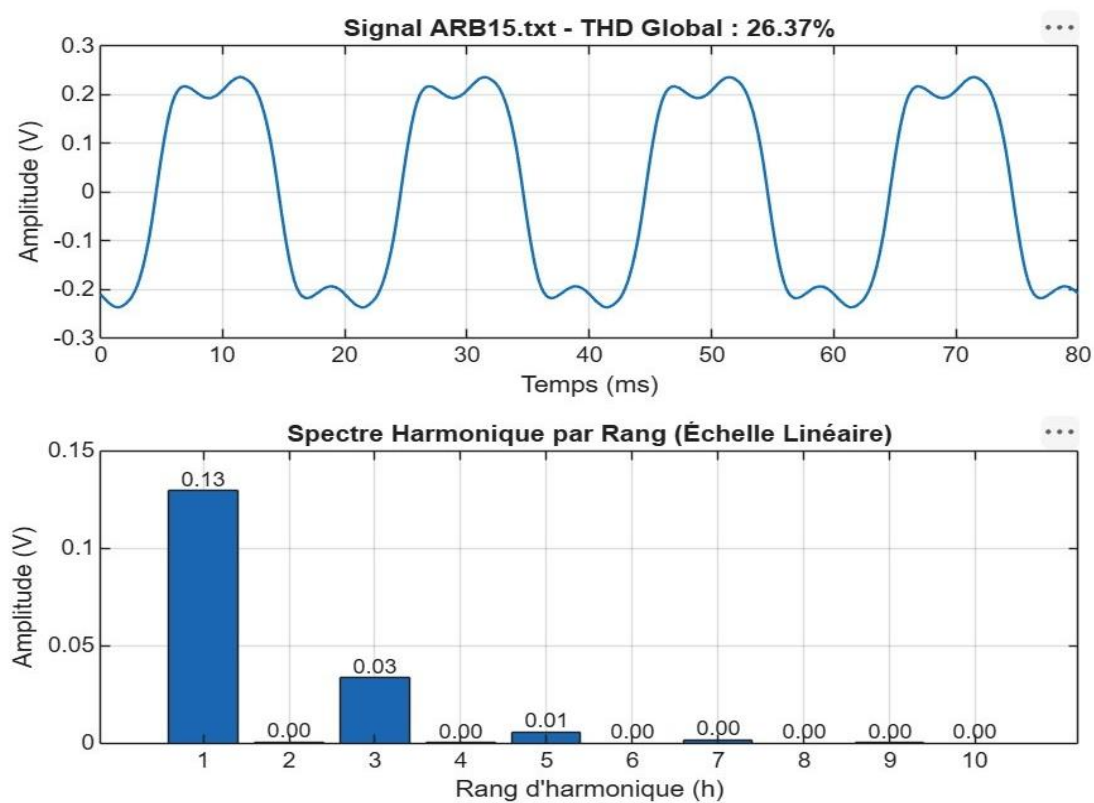


Figure III.22 THD du signal ARB15

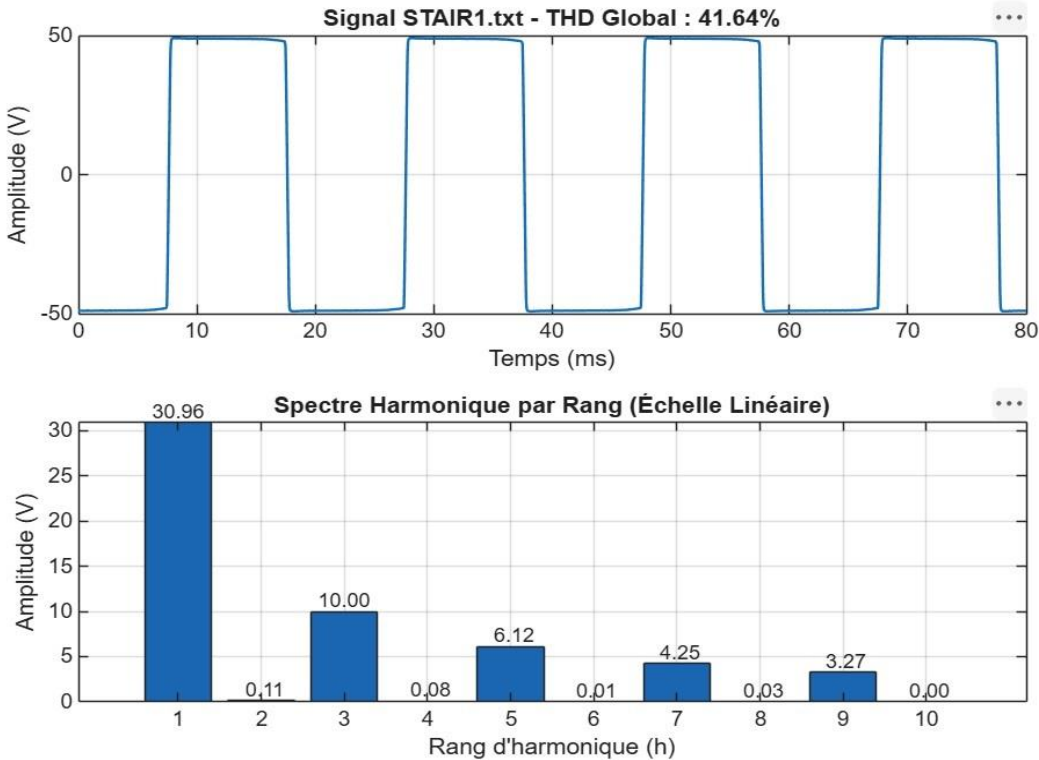


Figure III.23 THD du signal STAIR1

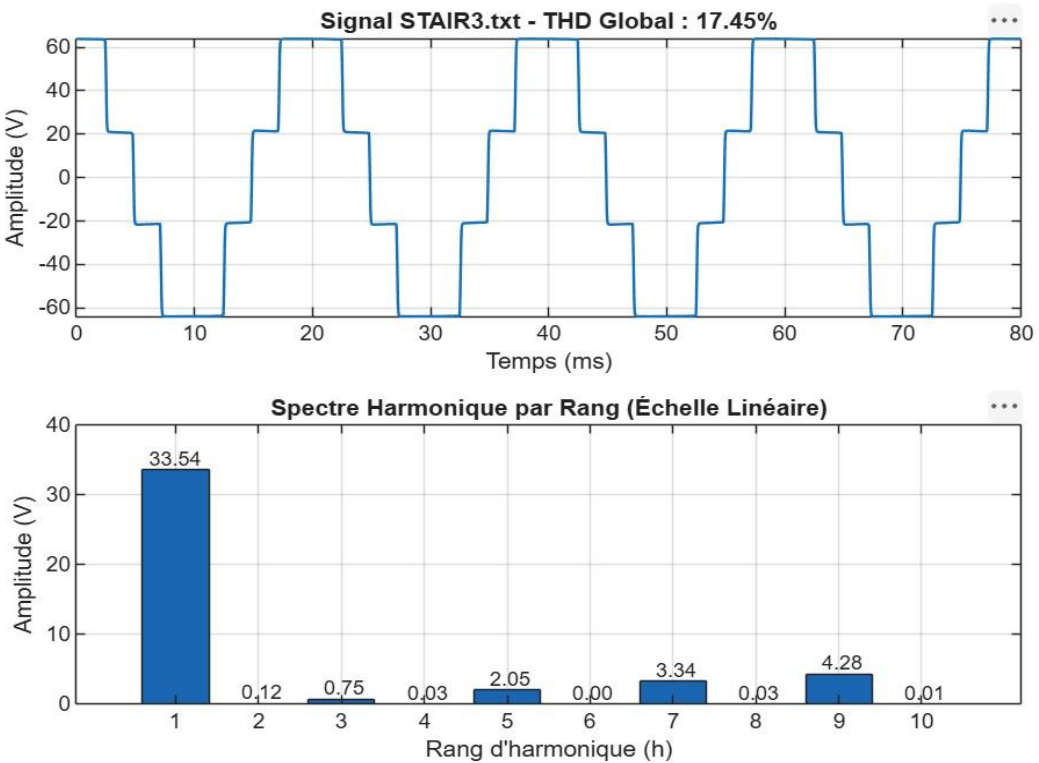


Figure III.24 THD du signal STAIR3

1. Alimentation non-sinusoïdale et charge linéaire

❖ Le tableau III.4

Tableau III.4 Résultats du signal ARB13 pour le cas source non sinusoïdale et charge linéaire

Point de charge	V ₁ (V)	I ₁ (A)	P ₁ (W)	V ₂ (V)	I ₂ (A)	P ₂ (W)
25%	220	0.139	28.8	48.9	0.479	23.4
50%	220	0.238	51.4	47.6	0.929	44.2
75%	220	0.330	71.9	46.4	1.336	64.9
100%	220	0.450	98.2	44.8	1.868	83.7

❖ Le tableau III.5

Tableau III.5 Résultats du signal ARB15 pour le cas source non sinusoïdale et charge linéaire

Point de charge	V ₁ (V)	I ₁ (A)	P ₁ (W)	V ₂ (V)	I ₂ (A)	P ₂ (W)
25%	220	0.139	28.8	48.9	0.478	23.4
50%	220	0.232	50	47.6	0.899	42.8
75%	220	0.349	75.9	46.1	1.416	65.3
100%	220	0.454	99.1	44.7	1.884	84.1

❖ Le tableau III.6

Tableau III.6 Résultats du signal STAIR1 pour le cas source non sinusoïdale et charge linéaire

Point de charge	V ₁ (V)	I ₁ (A)	P ₁ (W)	V ₂ (V)	I ₂ (A)	P ₂ (W)
25%	220	0.136	28.1	48.2	0.470	22.6
50%	220	0.235	50.1	46.8	0.912	42.7
75%	220	0.365	78.3	45.1	1.485	66.9
100%	220	0.452	97.2	43.9	1.875	82.3

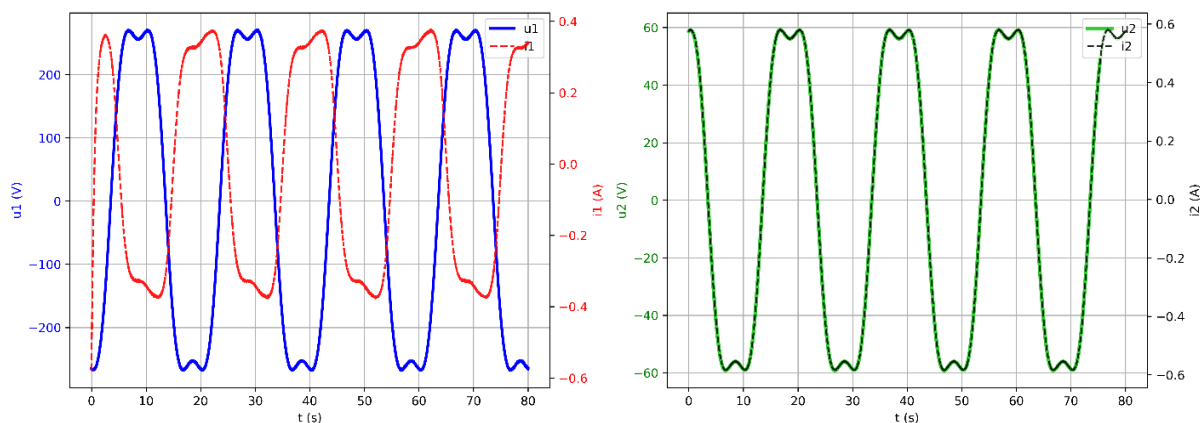
❖ Le tableau III.7

Tableau III.7 Résultats du signal STAIR3 pour le cas source non sinusoïdale et charge linéaire

Point de charge	V_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	V_2 (V)	I_2 (A)	P_2 (W)
25%	220	0.135	28.3	48.6	0.476	23.1
50%	220	0.233	50.3	47.2	0.920	43.5
75%	220	0.356	77.3	45.6	1.466	66.8
100%	220	0.451	98.9	44.2	1.876	83

➤ **Les Tensions et courants au primaire et au secondaire : cas non sinusoïdal linéaire**

Dans ce troisième cas, le transformateur est alimenté par une source non sinusoïdale et une charge linéaire. L'observation des formes d'onde permet d'analyser l'influence de la distorsion de la tension d'alimentation sur les grandeurs électriques mesurées. La figure suivante présente les signaux U_1 , I_1 , U_2 et I_2 à 25 % de charge

**Figure III.25** Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source non sinusoïdale avec une charge linéaire à **25 % de la charge nominale**

L'évolution des grandeurs électriques avec l'augmentation de la charge permet d'apprécier le comportement du transformateur dans cette configuration. Les signaux mesurés à 50 % de charge sont présentés dans la figure suivante.

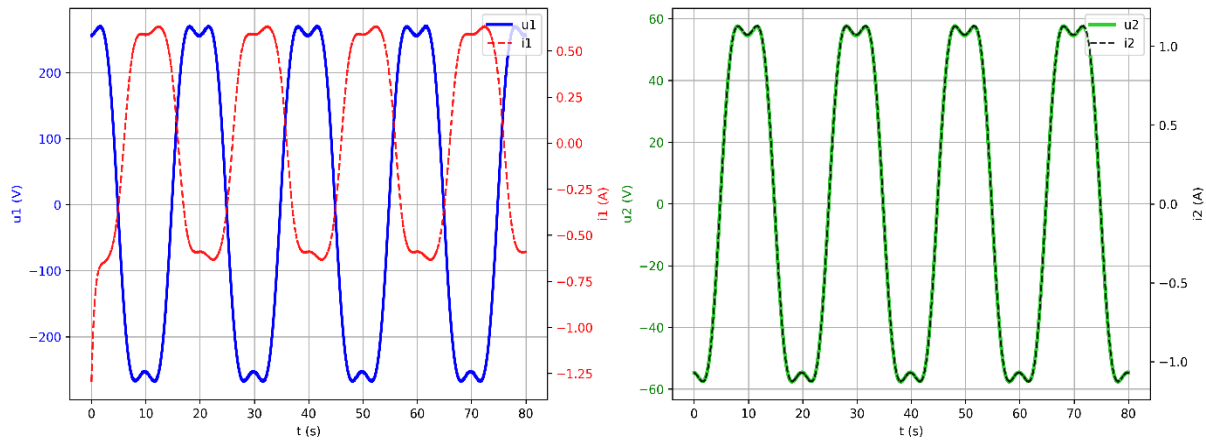


Figure III.26 Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source non sinusoïdale avec une charge linéaire à **50 % de la charge nominale**

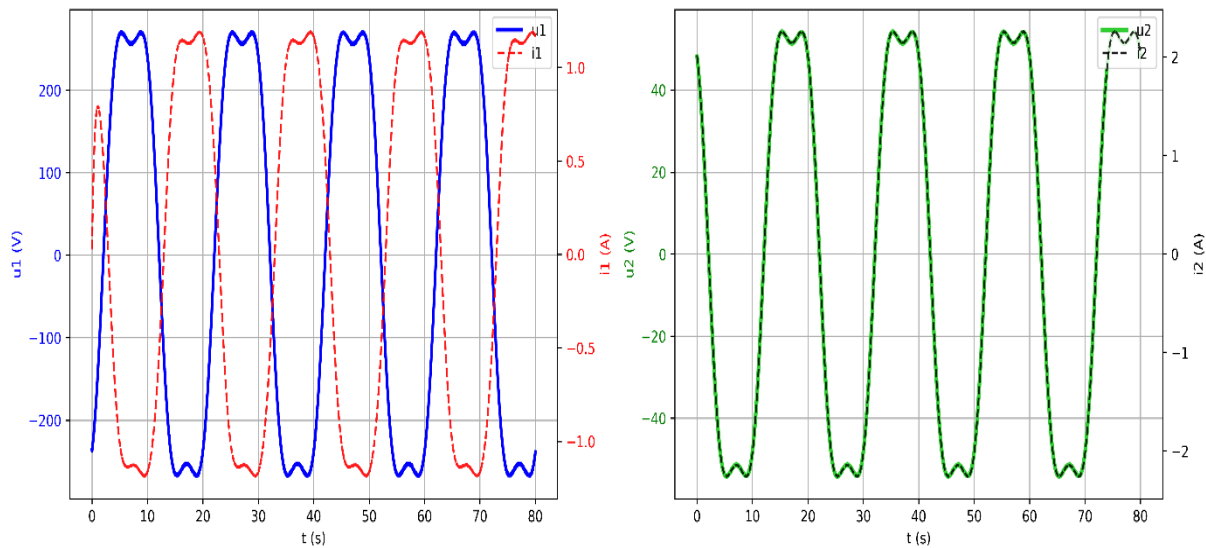


Figure III.27 Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source sinusoïdale avec une charge non linéaire à **100 % de la charge nominale**

c. Caractéristiques de fonctionnement du transformateur

Afin d'évaluer l'influence d'une alimentation non sinusoïdale sur les performances du transformateur, les résultats obtenus sont comparés à ceux du cas de référence, la charge restant linéaire. Les comparaisons portent successivement sur le rendement η , la chute de tension ΔV et les pertes de puissance ΔP .

La figure III.28 compare l'évolution du rendement pour les deux configurations étudiées.

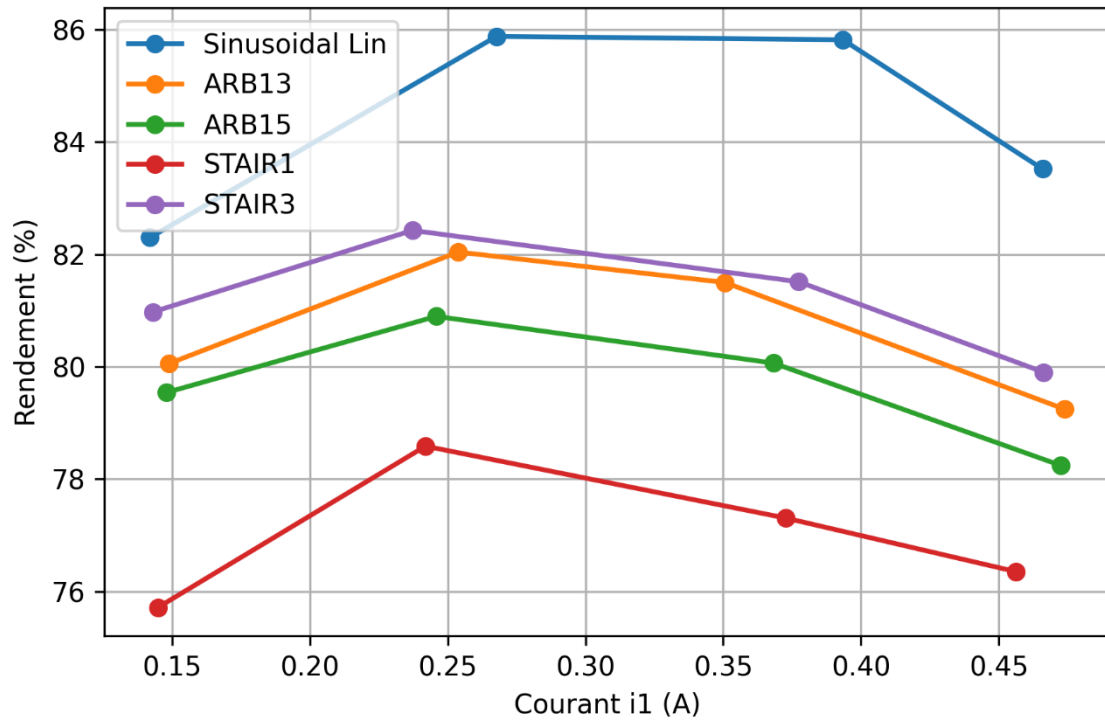


Figure III.28 Évolution du rendement du transformateur en fonction du courant de charge

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence de la forme d'onde d'alimentation sur le rendement du transformateur. Le cas sinusoïdal linéaire constitue la référence et présente globalement les meilleures performances, avec un rendement maximal observé dans la zone de charge intermédiaire. Les différentes configurations non sinusoïdales montrent des écarts plus ou moins importants par rapport à cette référence, traduisant une légère dégradation du rendement dans certains cas.

Cette variation s'explique par la modification des conditions de fonctionnement internes du transformateur sous l'effet de la distorsion de la tension d'alimentation. La présence d'harmoniques entraîne une augmentation des pertes supplémentaires dans les enroulements et dans le circuit magnétique, sans contribuer à la puissance active utile. Par conséquent, même si l'influence reste limitée dans les conditions étudiées, elle confirme que la qualité de l'alimentation exerce un impact direct sur l'efficacité énergétique du transformateur.

En conclusion, l'alimentation sinusoïdale linéaire demeure la configuration la plus favorable, tandis que les formes d'onde non sinusoïdales induisent une diminution du rendement en raison de l'augmentation des pertes associées à la distorsion harmonique.

La figure suivante compare l'évolution de la chute de tension ΔV pour les deux configurations.

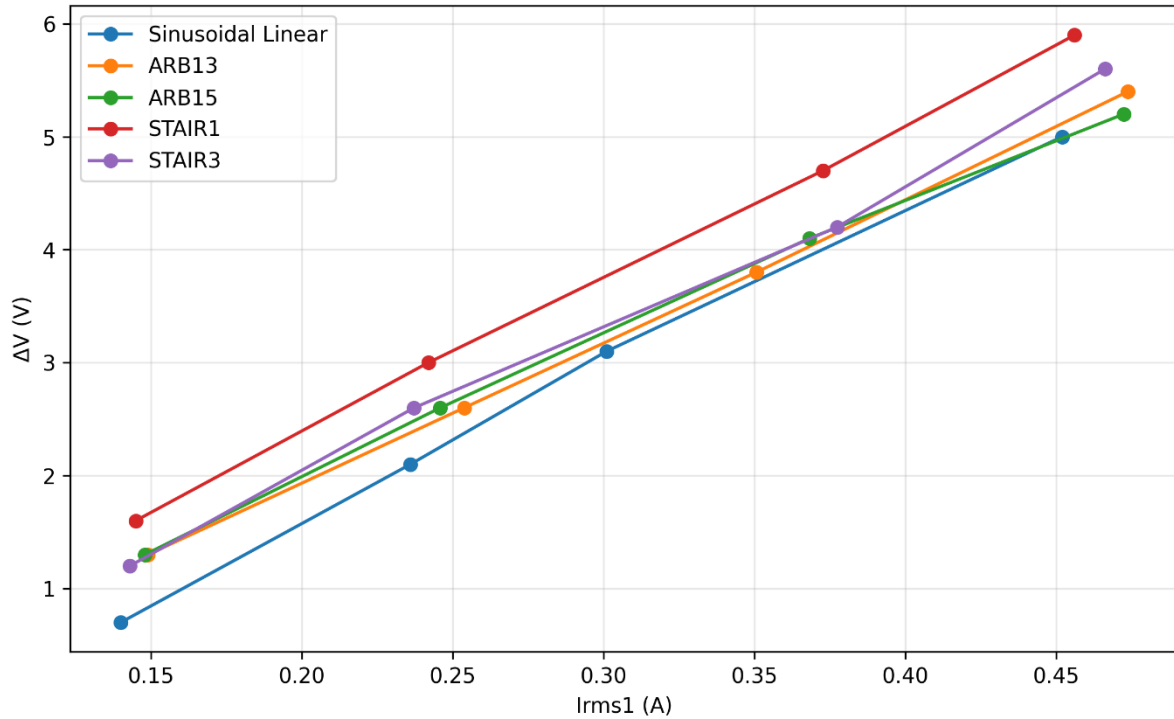


Figure III.29 Évolution de la chute de tension en fonction du courant de charge

Les courbes de ΔV en fonction du courant primaire I_1 présentent une évolution croissante et quasi linéaire sur l'ensemble de la plage étudiée. Le cas sinusoïdal à charge linéaire, retenu comme référence, affiche les plus faibles chutes de tension. Cette configuration traduit un fonctionnement plus favorable du transformateur, dans lequel la tension secondaire est mieux régulée lorsque l'alimentation conserve une forme sinusoïdale pure.

À l'inverse, les configurations non sinusoïdales conduisent à des chutes de tension systématiquement plus élevées que celles observées dans le cas de référence. Parmi elles, la configuration STAIR1 se distingue par les valeurs les plus importantes, tandis que les cas ARB13, ARB15 et STAIR3 présentent des comportements relativement proches. Cette différence montre que la forme d'onde d'alimentation influence directement la régulation de tension du transformateur.

L'augmentation des chutes de tension dans les cas non sinusoïdaux s'explique principalement par la présence de composantes harmoniques. Celles-ci déforment le courant circulant dans les enroulements et augmentent les chutes de tension résistives et inductives. Elles contribuent ainsi à une dégradation du comportement électrique du transformateur, en particulier au niveau de la régulation de tension.

En résumé, le cas sinusoïdal linéaire constitue la condition la plus favorable du point de vue de la chute de tension, tandis que les formes d'onde non sinusoïdales entraînent une augmentation progressive de ΔV et une dégradation des performances du transformateur.

La figure III.30 compare l'évolution des pertes totales ΔP pour les deux configurations.

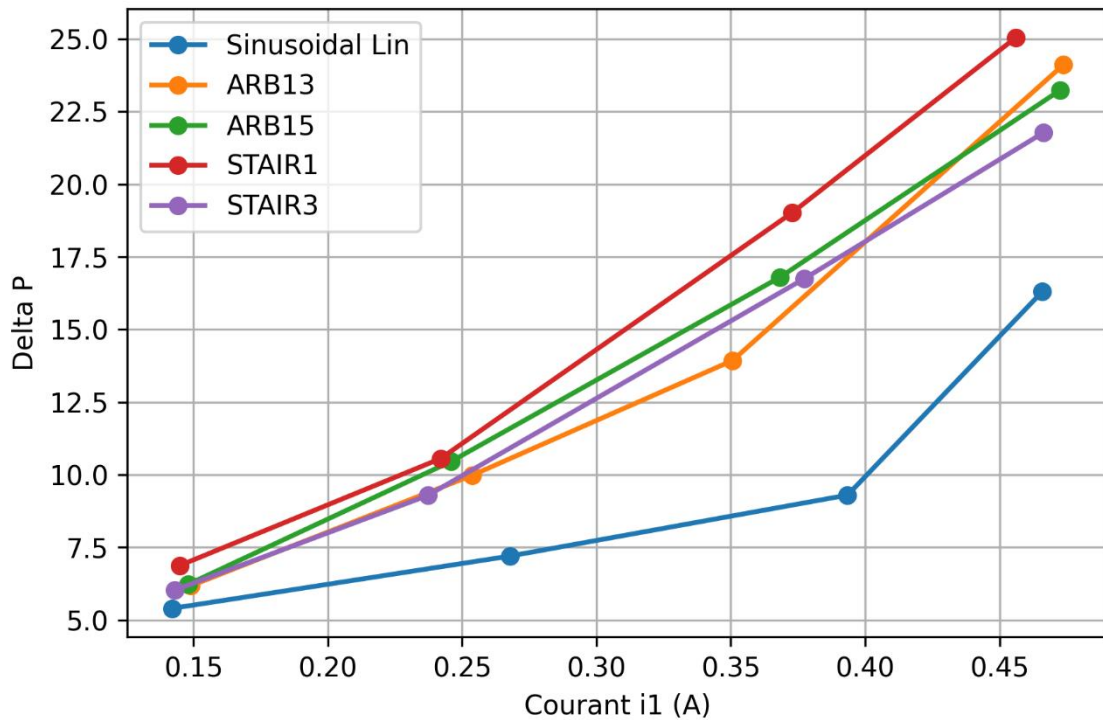


Figure III.30 Évolution des pertes totales du transformateur en fonction du courant de charge

Les pertes totales augmentent avec le courant primaire pour l'ensemble des cas étudiés. Le cas sinusoïdal à charge linéaire, retenu comme référence, présente les pertes les plus faibles sur toute la plage de fonctionnement. En revanche, les configurations non sinusoïdales, notamment ARB13, ARB15, STAIR1 et STAIR3, conduisent à des pertes plus élevées, avec une valeur maximale observée pour STAIR3. Cette différence s'explique par la présence de composantes harmoniques, qui augmentent les courants efficaces dans les enroulements et, par conséquent, les pertes par effet Joule.

La figure suivante illustre l'évolution des pertes ΔP en fonction du THDi sous une alimentation non sinusoïdale.

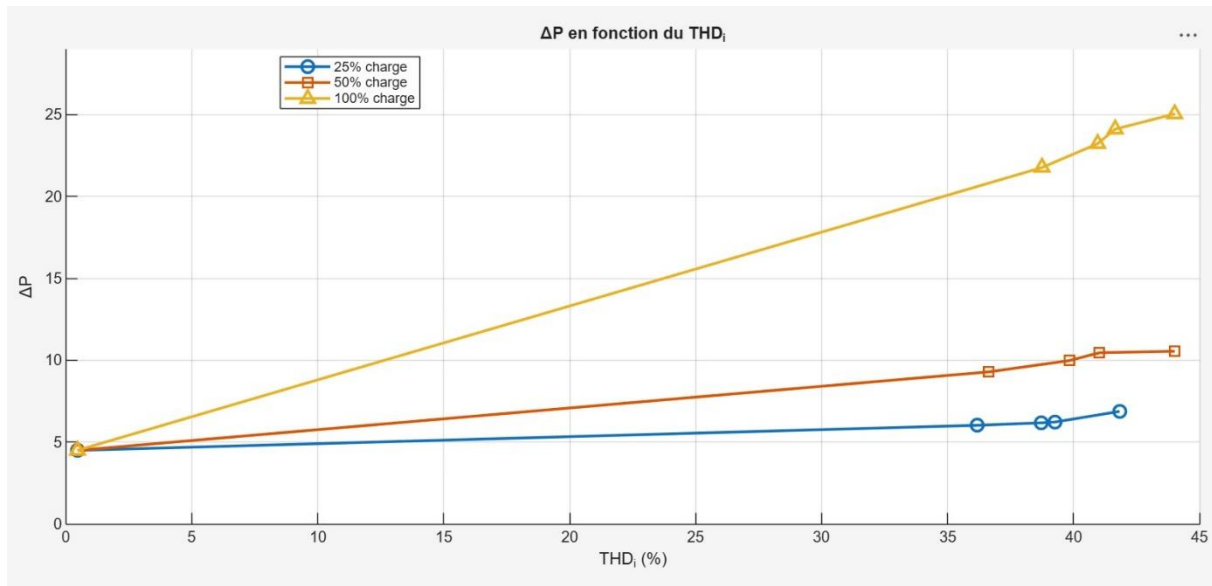


Figure III.31 Évolution des pertes du transformateur en fonction du taux de distorsion harmonique du courant (THDi)

Les courbes de ΔP en fonction du THDi montrent une augmentation des pertes avec la distorsion harmonique du courant, pour les trois niveaux de charge étudiés. Les écarts entre les différentes formes d'onde deviennent plus marqués lorsque le THDi augmente, en particulier à pleine charge. Cette évolution s'explique par la hausse du courant efficace dans les enroulements et par l'apparition de pertes fer supplémentaires.

Ainsi, les résultats confirment que les formes d'onde non sinusoïdales dégradent les performances énergétiques du transformateur, et que la qualité de l'alimentation constitue un paramètre déterminant des pertes internes

L'étude du cas d'une source non sinusoïdale montre ainsi que le transformateur ne fonctionne plus dans des conditions aussi favorables que dans le cas de référence. Même en présence d'une charge linéaire, les pertes deviennent plus importantes, la chute de tension augmente et le rendement diminue légèrement. La configuration STAIR1 se distingue par les perturbations les plus marquées, ce qui confirme que la forme d'onde d'alimentation influence directement les performances globales du transformateur.

2. Alimentation non-sinusoïdale et charge non linéaire

Ce dernier cas étudie l'influence combinée de plusieurs tensions non sinusoïdales, notamment ARB13, ARB15, Stair1 et Stair3, appliquées à une charge non linéaire composée d'un redresseur et d'une inductance. Cette configuration permet d'analyser le comportement du transformateur dans des conditions de fonctionnement fortement déformées, où la source et la charge contribuent toutes deux à l'apparition d'harmoniques

❖ Le tableau III.8

Tableau III.8 Résultats du signal ARB13 pour le cas source non sinusoïdale et charge non linéaire

Point de charge	V ₁ (V)	I ₁ (A)	P ₁ (W)	V ₂ (V)	I ₂ (A)	P ₂ (W)
25%	220	0.125	24	49.1	0.402	18.8
50%	220	0.240	49.1	47.6	0.929	41.8
75%	220	0.391	81.1	45.7	1.593	68.8
100%	220	0.454	94.8	44.9	1.877	79.9

❖ Le tableau III.9

Tableau III.9 Résultats du signal ARB15 pour le cas source non sinusoïdale et charge non linéaire

Point de charge	V ₁ (V)	I ₁ (A)	P ₁ (W)	V ₂ (V)	I ₂ (A)	P ₂ (W)
25%	220	0.126	24.2	49.2	0.402	19
50%	220	0.230	47.1	47.8	1.881	40.1
75%	220	0.375	78.2	46	1.525	66.8
100%	220	0.453	95	45	1.878	80.2

❖ Le tableau III.10

Tableau III.10 Résultats du signal STAIR1 pour le cas source non sinusoïdale et charge non linéaire

Point de charge	V ₁ (V)	I ₁ (A)	P ₁ (W)	V ₂ (V)	I ₂ (A)	P ₂ (W)
25%	220	0.125	25.6	48.3	0.419	20.2
50%	220	0.240	50.9	46.7	0.932	43.5
75%	220	0.373	79.9	44.9	1.520	68.1
100%	220	0.458	98.1	43.7	1.896	82.8

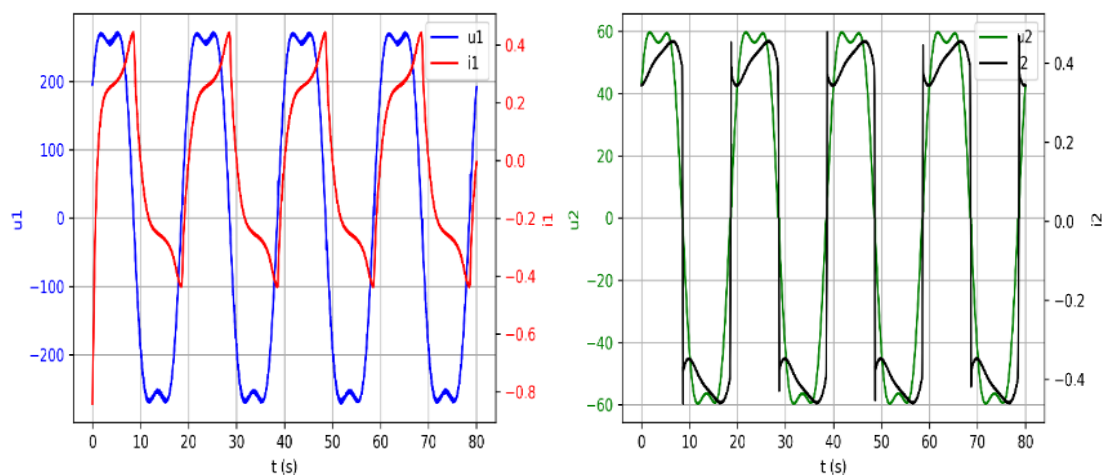
❖ Le tableau III.11

Tableau III.11 Résultats du signal STAIR3 pour le cas source non sinusoïdale et charge non linéaire

Point de charge	V_1 (V)	I_1 (A)	P_1 (W)	V_2 (V)	I_2 (A)	P_2 (W)
25%	220	0.117	21.9	48.9	0.385	17.1
50%	220	0.255	50	47.2	1.007	42.6
75%	220	0.400	78.9	45.5	1.650	66.5
100%	220	0.457	91.4	44.5	1.930	76.1

➤ Les Tensions et courants au primaire et au secondaire : cas non sinusoïdal non linéaire

Dans cette dernière configuration, le transformateur est soumis simultanément à une alimentation non sinusoïdale et à une charge non linéaire. La figure suivante illustre les formes d'onde des tensions et des courants enregistrées à 25 % de charge.

**Figure III.32** Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source non sinusoïdale avec une charge non linéaire à **25 % de la charge nominale**

L'augmentation du taux de charge permet d'observer l'évolution des grandeurs électriques sous l'effet combiné de la distorsion de la tension et de la non-linéarité de la charge. Les formes d'onde obtenues à 50 % de charge sont présentées dans la figure suivante.

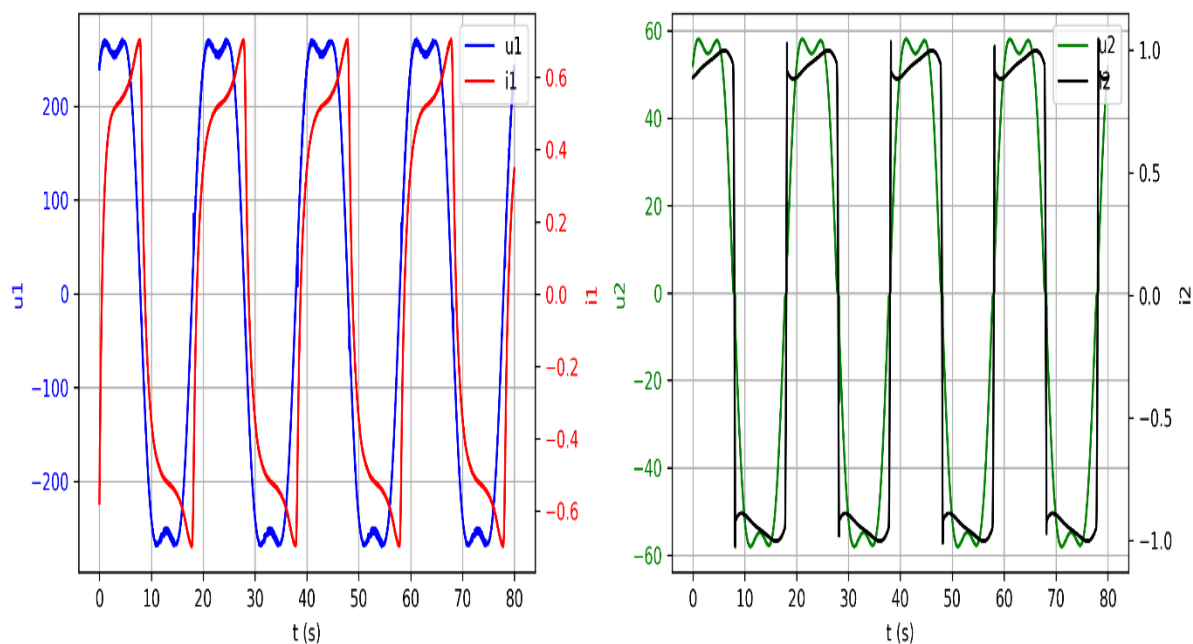


Figure III.33 Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source non sinusoïdale avec une charge non linéaire à **50 % de la charge nominale**

À pleine charge, les effets conjugués de la source non sinusoïdale et de la charge non linéaire deviennent plus marqués. La figure suivante présente les formes d'onde des tensions et des courants dans ces conditions de fonctionnement.

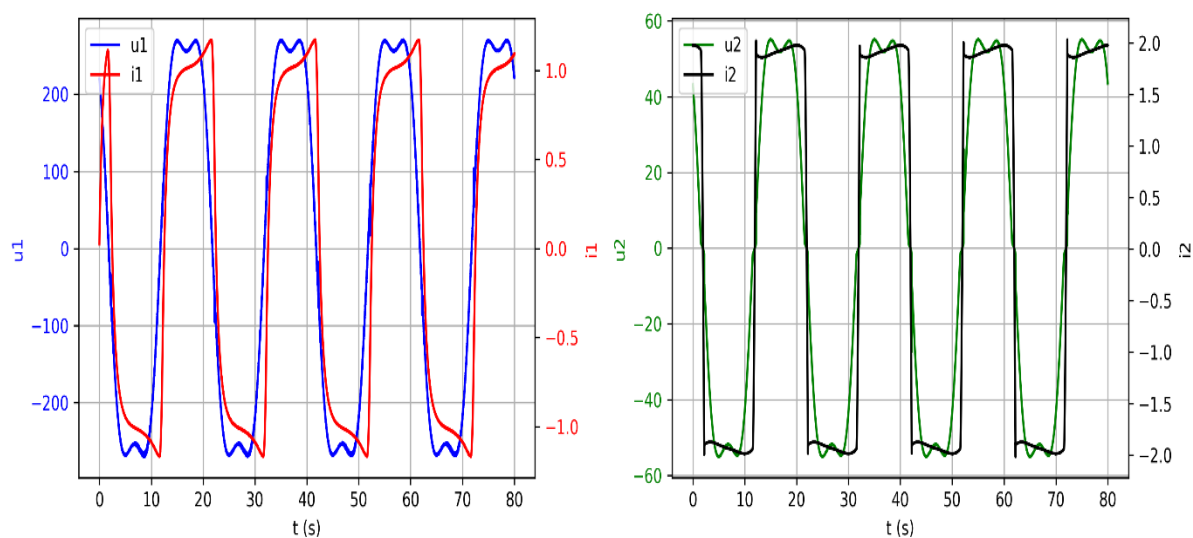


Figure III.34 Formes d'onde des différentes tensions et courants du transformateur alimenté par une source non sinusoïdale avec une charge non linéaire à **100 % de la charge nominale**

d. Caractéristiques de fonctionnement du transformateur

Les figures suivantes présentent l'évolution des performances du transformateur dans ce dernier cas étudié, à travers le rendement η , la chute de tension secondaire ΔV et les pertes de puissance ΔP

Le rendement constitue un critère essentiel pour apprécier l'influence simultanée d'une alimentation non sinusoïdale et d'une charge non linéaire sur les performances du transformateur. La figure suivante compare les résultats obtenus avec ceux du cas de référence.

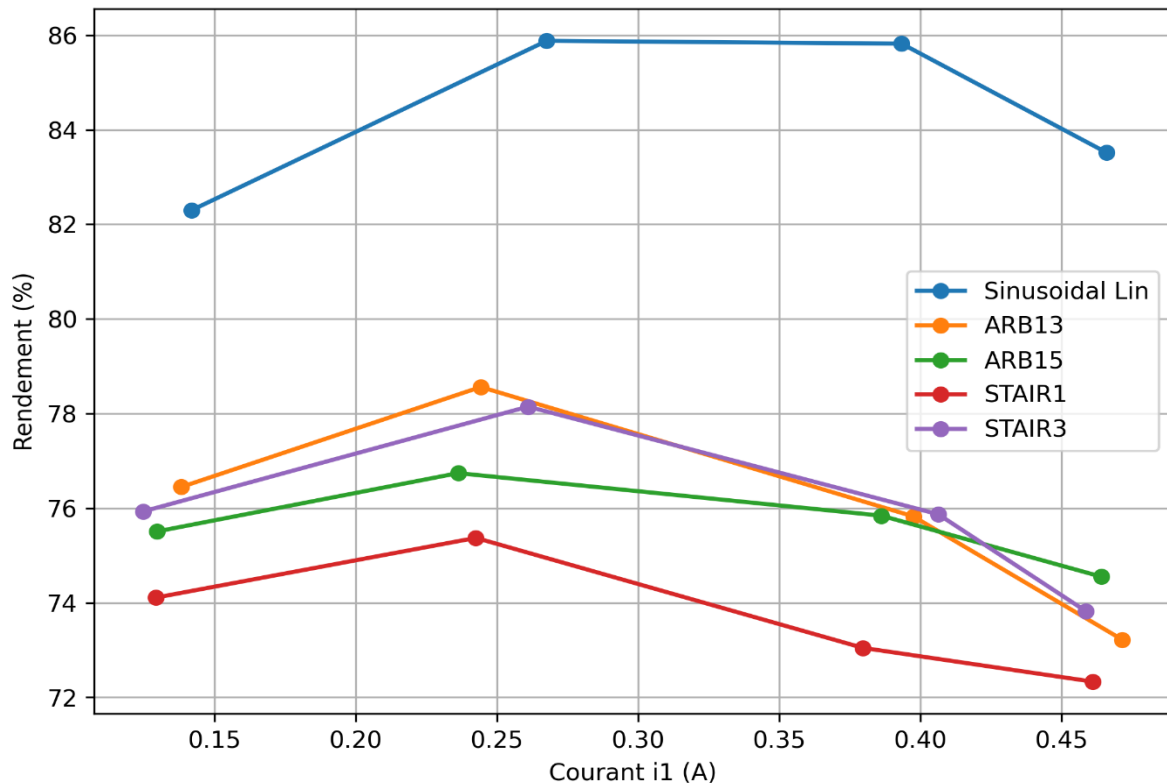


Figure III.35 Évolution du rendement du transformateur en fonction du courant de charge

Les pertes totales augmentent avec le courant primaire pour l'ensemble des cas étudiés. Le cas sinusoïdal à charge linéaire, retenu comme référence, présente les pertes les plus faibles sur toute la plage de fonctionnement. En revanche, les configurations non sinusoïdales, notamment ARB13, ARB15, STAIR1 et STAIR3, conduisent à des pertes plus élevées, avec une valeur maximale observée pour STAIR3. Cette différence s'explique par la présence de composantes harmoniques, qui augmentent les courants efficaces dans les enroulements et, par conséquent, les pertes par effet Joule.

L'étude du cas d'une source non sinusoïdale montre ainsi que le transformateur ne fonctionne plus dans des conditions aussi favorables que dans le cas de référence. Même en présence d'une charge linéaire, les pertes deviennent plus importantes, la chute de tension

augmente et le rendement diminue légèrement. La configuration STAIR1 se distingue par les perturbations les plus marquées, ce qui confirme que la forme d'onde d'alimentation influence directement les performances globales du transformateur.

La régulation de tension est analysée afin de mettre en évidence l'effet des conditions d'alimentation et de la nature de la charge. La figure suivante compare la chute de tension mesurée dans les deux configurations.

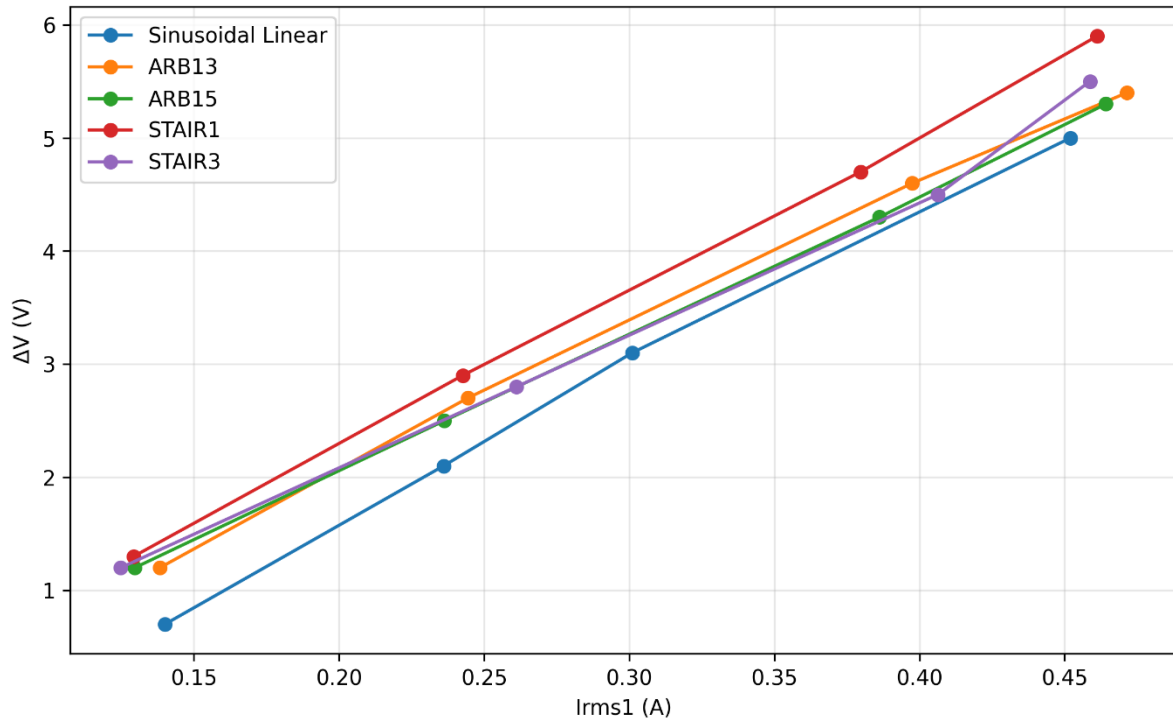


Figure III.36 Évolution de la chute de tension en fonction du courant de charge

Les courbes de ΔV présentent une évolution globalement croissante en fonction du courant primaire. Le cas de référence, correspondant à l'alimentation sinusoïdale avec charge linéaire, affiche les plus faibles chutes de tension sur l'ensemble de la plage étudiée. À faible charge, les écarts avec les autres configurations restent modérés, puis ils tendent à se réduire progressivement lorsque le courant augmente, pour devenir moins marqués à pleine charge.

Parmi les cas étudiés, la configuration STAIR1 demeure la plus défavorable, alors que les configurations ARB13, ARB15 et STAIR3 présentent des comportements relativement proches du cas de référence à partir de 50% de charge. Ce résultat montre que la forme d'onde d'alimentation, associée à la nature de la charge, influence directement la chute de tension interne du transformateur et donc sa régulation de tension.

Les pertes totales traduisent le comportement énergétique du transformateur sous différentes conditions de fonctionnement. La figure suivante met en évidence les écarts observés entre cette configuration et le cas de référence.

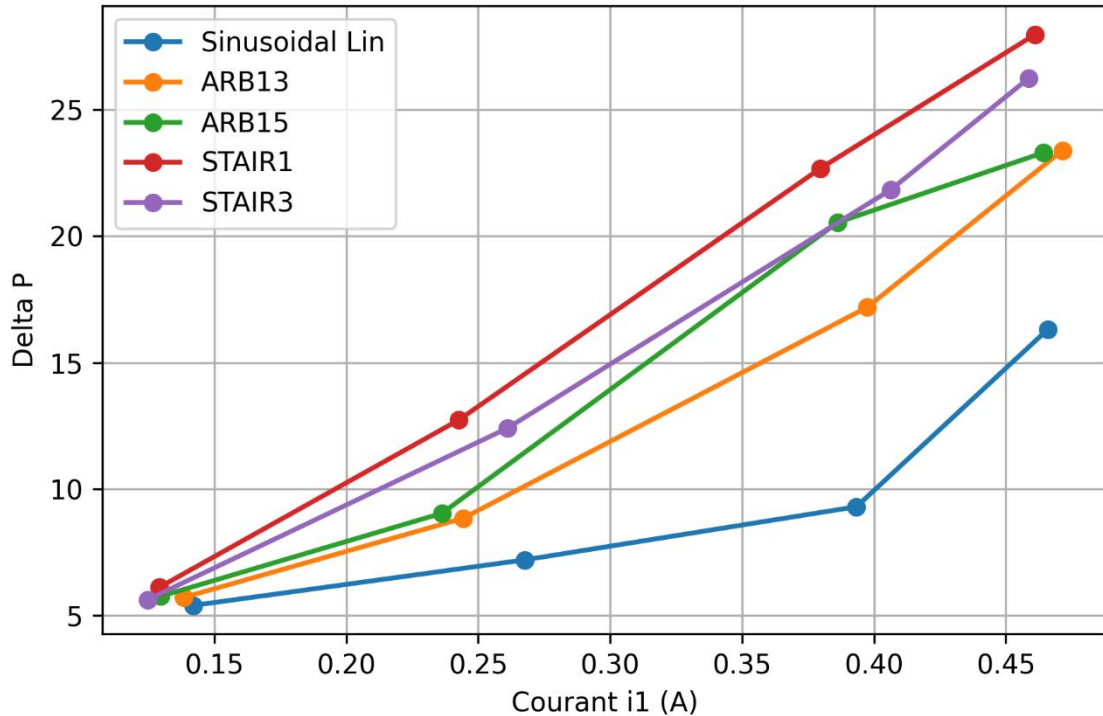


Figure III.37 Évolution des pertes totales du transformateur en fonction du courant de charge

Les courbes de pertes de puissance ΔP augmentent avec le courant primaire I_1 pour l'ensemble des configurations étudiées. Le cas sinusoïdal linéaire présente globalement les pertes les plus faibles et constitue la référence de comparaison. À faible charge, les écarts entre les différentes configurations restent limités, mais ils deviennent plus marqués lorsque le courant augmente, en particulier pour les cas non sinusoïdaux et non linéaires. Cette évolution s'explique par la présence simultanée d'harmoniques et d'effets non linéaires, qui augmentent la valeur efficace du courant et intensifient les pertes internes du transformateur. Aux fortes charges, ces pertes deviennent nettement supérieures à celles du cas de référence, ce qui confirme l'influence défavorable des formes d'onde déformées sur les performances énergétiques du transformateur.

Les pertes du transformateur sont étudiées en fonction du THDi afin d'évaluer l'effet des courants harmoniques. La figure III.38 présente l'évolution de ΔP dans cette configuration.

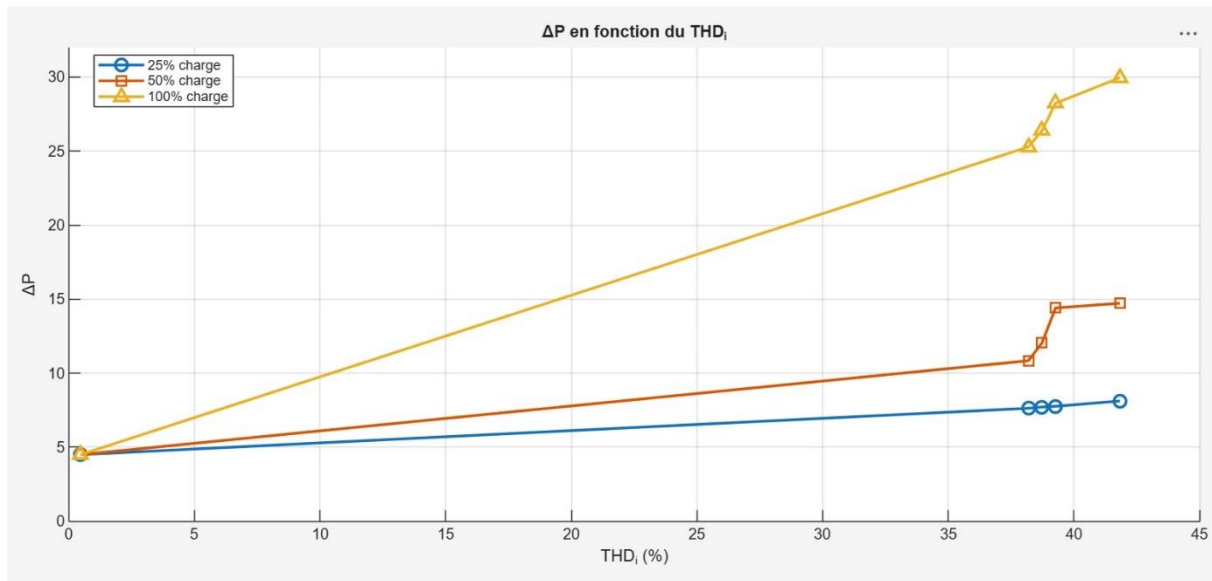


Figure III.38 Évolution des pertes du transformateur en fonction du taux de distorsion harmonique du courant (THDi)

Les courbes de ΔP en fonction du THDi montrent une augmentation des pertes avec la distorsion harmonique du courant, pour les trois niveaux de charge étudiés. Cette évolution est plus marquée que dans les configurations linéaires, en raison de la combinaison de la non-sinusoïdalité et de la non-linéarité, qui génère des composantes harmoniques supplémentaires.

Aux faibles valeurs de THDi, les pertes demeurent modérées. En revanche, elles croissent plus rapidement lorsque la distorsion augmente, en particulier à forte charge. Cette hausse s'explique par l'augmentation du courant efficace dans les enroulements, qui intensifie les pertes Joule, ainsi que par l'apparition de pertes fer supplémentaires dans le circuit magnétique.

Ainsi, les résultats confirment que les courants fortement déformés dégradent les performances énergétiques du transformateur en augmentant les pertes cuivre et les pertes fer

Le cas non sinusoïdal non linéaire met en évidence une dégradation globale des performances du transformateur. L'augmentation du courant primaire et du THD entraîne une hausse des pertes, une augmentation de la chute de tension et une diminution du rendement. Ces résultats montrent l'influence défavorable de la distorsion harmonique et de la non-linéarité de la charge sur le fonctionnement du transformateur

III.5 Impact de la déformation de la tension d'alimentation et de la charge sur le comportement du transformateur

.....

III.5.1 Impact de la déformation de la tension (à vide et en charge)

À vide

- La puissance P_{10} augmente avec le THD de la tension d'alimentation.
- Les pertes fer (hystérésis + courants de Foucault) sont sensibles à la distorsion harmonique.

En charge

- Les pertes ΔP augmentent avec le THD.
- Le rendement η diminue avec le THD.
- La chute de tension ΔV augmente avec le THD.

III.5.2 Impact de la nature de la charge (linéaire et non linéaire)

- À THD_v égaux, la charge **non linéaire** génère des pertes ΔP plus élevées que la charge linéaire.
- Le rendement est plus faible avec la charge non linéaire.
- Le THD_i est plus élevé avec la charge non linéaire.

III.5.3 Impact combiné tension déformée + charge non linéaire

- Le cas **non sinusoïdal non linéaire** (THD_v élevé + charge non linéaire) présente :
 - Les pertes ΔP les plus élevées
 - Le rendement le plus faible
- La combinaison tension déformée + charge non linéaire sollicite le transformateur de manière maximale.
- Cela peut entraîner un échauffement accru et une réduction de la durée de vie.

III.6 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté une étude comparative des performances du transformateur dans différents cas de fonctionnement, en tenant compte de la nature de l'alimentation et de la charge. Les résultats ont mis en évidence l'influence notable des formes d'onde non sinusoïdales et des charges non linéaires sur le rendement, les pertes et la chute de tension. L'analyse des différents cas a permis de montrer que la qualité de l'alimentation

électrique joue un rôle déterminant dans le comportement du transformateur. Ainsi, ce dernier chapitre a confirmé l'importance des harmoniques et des conditions de charge sur les performances globales de la machine

Conclusion générale

À travers ce travail, nous avons pu mieux comprendre le fonctionnement réel d'un transformateur monophasé et constater que ses performances ne dépendent pas seulement de sa conception théorique, mais aussi des conditions dans lesquelles il est utilisé. Les différents essais réalisés nous ont permis de voir concrètement l'influence de l'alimentation et de la charge sur son comportement, ce qui rend l'étude beaucoup plus parlante qu'une simple approche purement théorique.

Ce projet nous a également montré que le transformateur, malgré son apparente simplicité, reste un appareil essentiel dans les installations électriques. Il assure un rôle fondamental dans le transport et l'adaptation de l'énergie électrique, et son étude permet de mieux saisir les phénomènes qui interviennent à l'intérieur de son fonctionnement. En observant ses réactions dans différentes situations, nous avons pu relier les notions vues en cours aux résultats obtenus lors des manipulations.

L'un des points les plus intéressants de ce travail a été de constater que les performances du transformateur changent selon le régime d'essai. Les variations de tension, de courant, de pertes et de rendement montrent clairement que l'appareil ne réagit pas de la même manière à vide et en charge. Cette différence met en évidence l'importance des mesures expérimentales pour obtenir une vision plus précise et plus réaliste de son comportement [33] [34].

Nous avons aussi remarqué que la qualité de l'alimentation électrique joue un rôle important dans le fonctionnement de l'appareil. Lorsque le signal d'entrée n'est pas parfaitement sinusoïdal ou qu'il est perturbé par des harmoniques, cela peut avoir un impact sur les résultats et sur les performances globales du transformateur. Cette observation nous rappelle que, dans la pratique, les conditions de fonctionnement ne sont jamais totalement idéales [33] [34].

Enfin, ce travail nous a permis de mieux apprécier l'intérêt de l'étude expérimentale dans le domaine de l'électrotechnique. Il ne s'agit pas seulement de connaître la théorie, mais aussi de savoir interpréter ce qui se passe réellement sur le terrain. À travers ce mémoire, nous avons donc pu enrichir nos connaissances, développer notre compréhension du transformateur monophasé et mieux relier les aspects théoriques aux réalités de son utilisation.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] [En ligne]. Available: <https://www.circe-technologies.com/transformateur-monophas-definition.html>. [Accès le 29 Mai 2026].
- [2] [En ligne]. Available: <https://circutor.com/fr/articles-fr/harmoniques-origine-effets-et-solutions>. [Accès le 29 Mai 2026].
- [3] [En ligne]. Available: <https://www.fluke.com/fr-fr/apprendre/blog/qualite-du-reseau-electrique/harmoniques-dans-les-systemes-d'alimentation-electrique>. [Accès le 29 Mai 2026].
- [4] S. BENSAID et H. HOUASSINE, ELECTROTECHNIQUE FONDAMENTALE 2 : Cours et exercices corrigés, Alger: Edition Pages Bleues Internationales, 2021.
- [5] B.Bayala, Machines électriques, edition revue, 2010.
- [6] C. 60076-1, «Transformateurs de puissance - Partie 1 : Généralités,» 2011.
- [7] J. SANCHEZ, «Aide au diagnostic de défaut des transformateurs de puissance,» Université de Grenoble Alpes, 2011.
- [8] R. N. Bracewell, The Fourier Transform and its Application, Third edition, Tata McGraw Hill Publishers.
- [9] T. WILDI et G. SYBILLE, Electrotechnique, 4e edition, 2005.
- [10] H. KUMAR et S. SHURMA, «How to minimise iron losses in transformer,» *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology*, pp. 36-42, March 2012.
- [11] M. SOHAIL, «Effects of harmonic on iron losses,» University of technology, Gotenburg, Sweden, 2017.
- [12] A. LEFEVRE, «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs,» Ecole polytechnique de Nantes, 2006.

Bibliographie

- [13] O. AL-YOZBAKY et R. OTHMAN, «The Influence of Non-Sinusoidal Power Supply on Single-Phase Transformer Performance,» *Journal of Electrical Systems (JESA)*, vol. 57, n° 14.
- [14] D. o. E. E. Al-Mustansiriyah University, «Periodic Non-Sinusoidal Signals,» p. 73, 2025.
- [15] E. e. a. Hernández Mayoral, *Fourier Analysis for Harmonic Signals in Electrical Power Systems*, 3 éd.....
- [16] IJIRSET, «IJIRSET,» *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 8, n° 14, Avril 2019.
- [17] A. Friekh, «Filtrage Actif des harmoniques dans un réseau de transport de l'énergie électrique, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
- [18] L. Moller, «Problèmes techniques posés par le raccordement convertisseur de grande Puissance, revue EDF, numéro 2,» 1985.
- [19] T. Deflandre et P. Maurs, *Les harmoniques sur les réseaux électriques*, France: EYROLLES, 1998.
- [20] L. Merabet, «Support de cours d'électronique de puissance,» Université Badji Mokhtar Annaba, Département d'électrotechnique.
- [21] «Qualité de l'énergie – clignotements, creux, sursauts, harmoniques... », ...
- [22] I. S. Formation, «Perturbations BF : la qualité de la tension se mesure».....
- [23] K. Tarek, «LA QUALITÉ D'ÉNERGIE (Les harmoniques) », mémoire de licence,» USTHB, 2017.
- [24] IEC, «EN 61000-3-2,» page de présentation de la norme IEC.
- [25] M. Bedoui, «Cours de Qualité de l'énergie électrique,» Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 2022.
- [26] IEC, «IEC 61000-3-12:2011 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage

Bibliographie

systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase,» International Electrotechnical Commission (IEC), 2011.

- [27] D. Guendoud et B. Belacel, «Filtrage active de puissance, mémoire de master,» Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [28] IEEE, «The effects of the harmonic components upon transformer active power losses, IEEE Transactions on Power Delivery,» vol. 12, n° 11, pp. 1-6, 1997.
- [29] eleShop.fr, «GW Instek ASR-2100 – Alimentation AC/DC universelle,» Langlois, "Sondes différentielles", [En ligne]. Available: <https://eleshop.fr/gw-instek-asr-2100-universel.html>. [Accès le 26 Mai 2026].
- [30] Himel, «Transformateur HBK2-100 - Fiche technique,» [En ligne]. Available: <https://www.himel.com>. [Accès le 26 Mai 2026].
- [31] L. France, «Sondes différentielles,» [En ligne]. Available: <https://langlois-france.com/fr/sondes-et-sondes-differentielles/239-sondes-differentielles.html>. [Accès le 26 Mai 2026].
- [32] L. D. GmbH, «CASSY Lab 2 – Universal Measurement System - Fiche technique module 524010,» [En ligne]. Available: <https://www.ld-didactic.de> . [Accès le 25 Mai 2026].
- [33] e. l. IUT, «Chapitre 6 : Le transformateur monophasé,» [En ligne]. Available: https://public.iutenligne.net/electricite/piou/magnelecpro/MagnElecPro/Chap06_transfomono.pdf. [Accès le 30 Mai 2026].
- [34] C. Arnoux, «Harmoniques,» [En ligne]. Available: https://www.chauvinarnoux.com/sites/default/files/documents/appli_f_harmoniques_ed1.pdf. [Accès le 30 Mai 2026].