

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République démocratique et populaire d'Algérie

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Amar Telidji-LAGHOUAT



Faculté de technologie

كلية التكنولوجيا

Projet de fin de cycle

Pour obtenir un diplôme de master

Filière : Électrotechnique

ميدان : الهندسة الكهربائية

Spécialité : Électrotechnique industrielle

تخصص : الهندسة الكهربائية الصناعية

Sujet :

Analyse harmonique de réseaux électriques : étude de cas

Ce modeste rapport a été présenté par :

DELASSI YUCEF

دلاسي يوسف

BOULAHIA AHMED

بولحية احمد

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

Nom et Prénom	Qualité
DJEKIDEL RABEH	Président
BESSEDIK SID AHMED	Examineur
DJILALI MAHI	Encadreur

2024/2023

REMERCIEMENTS

Nous remercions Allah, qui nous a donné la force, le courage et la bonne volonté de faire.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon stage et qui m'ont aidée lors de la rédaction de ce mémoire.

J'adresse également mes salutations aux membres du jury, aux professeurs **DJEKIDEL RABEH** et le professeur **BESSEDIK SID AHMED**.

Je voudrais dans un premier temps remercier, mon professeur de mémoire **DJILLALI MAHI**, Professeur à l'université de Amar Telidji-Laghout pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur, et mes frères pour leurs encouragements.

DÉDICACES

Je dédie ce travail,

Aux parents ma maman et mon père qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes frères, et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime

موجز:

تجذب الأحمال السكنية والتجارية والصناعية غير الخطية المتصلة بشبكة توزيع الطاقة الكهربائية تيارات غير سنوية. تتسبب هذه التيارات، التي تعبر الوصلات (الخطوط، المحولات) في ظهور جهد غير جيبي في الشبكة؛ مما يسبب بدوره تيارات غير جيبية، غالباً ما تسبب إزعاجاً لبقية الأحمال المتصلة. في الواقع، تعمل توافقيات التيار والجهد على تغيير تشغيل المعدات الكهربائية وتقليل أداء الشبكة. وبالتالي تصبح جودة الموجة شرطاً يجب احترامه من قبل كل من موزع الكهرباء والمستهلك. من الضروري الحد من انتشار التوافقيات الحالية وتقليل تشوهات جهد الشبكة.

والهدف من هذا العمل هو تقييم التواء بين التيار والجهد الناتج عن الأحمال غير الخطية واقتراح طرق لمواجهة انتشارها وبالتالي تحقيق تقليل توافقيات الجهد.

تتعلق الدراسة بالتحليل التوافقي لشبكة التوزيع. استخدمنا برنامج (ETAP 19.5(Power System Harmonic Analysis) لنمذجة ومحاكاة شبكة الطاقة.

تم استخدام طريقة وضع مكثفات التحويل ذات الحجم المناسب في المواقع الاستراتيجية في الشبكة كتقنية تحسين. لقد أدى إلى تحسين عامل الطاقة، وتقليل الخسائر وانخفاض الجهد.

الكلمات الرئيسية: الشحنة غير الخطية، التوافقيات، المرشح، شبكة الطاقة، جودة الطاقة، النقر

Résumé :

Les charges non linéaires résidentielles, commerciales et industrielles raccordées au réseau de distribution d'énergie électrique tirent des courants non sinusoïdaux. Ces courants, en traversant les liaisons (lignes, transformateurs) provoquent l'apparition de tensions non sinusoïdales dans le réseau ; provoquant à leur tour des courants non sinusoïdaux, bien souvent au désagrément du reste des charges connectées. En effet, les harmoniques de courant et de tension altèrent le fonctionnement de l'appareillage électrique et réduisent les performances du réseau. La qualité de l'onde devient ainsi une exigence à respecter tant par le distributeur d'électricité que par le consommateur. Il est nécessaire de limiter la propagation des harmoniques de courant et de réduire les déformations des tensions du réseau.

L'objectif de ce travail est d'évaluer les harmoniques de courant et de tension causés par des charges non linéaires et de proposer des méthodes pour contrer leur propagation et réaliser ainsi la réduction des harmoniques de tension.

L'étude concerne l'analyse harmonique d'un réseau de distribution. Nous avons utilisé le logiciel ETAP 19.5(Power System Harmonic Analysis), pour modéliser et simuler le réseau électrique.

La méthode de placement, à des endroits stratégiques du réseau, des condensateurs shunt, de taille appropriée, a été utilisée comme technique d'optimisation. Elle a permis d'améliorer le facteur de puissance, de réduire les pertes et les chutes de tension.

Mots clés : charge non linéaires, harmoniques, filtre, réseau électrique, qualité d'énergie, ETAP

Abstrat:

Non-linear residential, commercial and industrial loads connected to the electrical power distribution network draw non-sinusoidal currents. These currents, crossing the connections (lines, transformers) cause the appearance of non-sinusoidal voltages in the network; causing in turn non sinusoidal currents, often to the inconvenience of the rest of the connected loads. Indeed, current and voltage harmonics alter the operation of the electrical equipment and reduce the performance of the network. The quality of the wave thus becomes a requirement to be respected by both the electricity distributor and the consumer. It is necessary to limit the propagation of current harmonics and to reduce the deformations of network voltages.

The objective of this work is to evaluate current and voltage harmonics caused by nonlinear loads and to propose methods to counter their propagation and thus achieve the reduction of voltage harmonics.

The study concerns the harmonic analysis of a distribution network. We used ETAP 19.5 (Power System Harmonic Analysis) software to model and simulate the power grid.

The method of placing shunt capacitors of appropriate size at strategic locations in the network was used as an optimization technique. It has improved the power factor, reducing losses and voltage drops.

Keywords: non-linear charge, harmonics, filter, power grid, power quality, ETAP

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements	II
Table des matières	V
List des figures	VIII
List des tableaux	X
Introduction générale :	I
Chapitre I : Notions sur la qualité de l'énergie électrique	
Introduction :	3
1. La qualité de l'énergie électrique :	3
2. Classification des perturbations du réseau électrique :	4
2.1 Niveau de tension :	4
2.2 Tensions déséquilibrées :	4
2.3 Creux de tension:	5
2.4 Bosse ou surtension:	5
2.5 Interruption de tension:	6
2.6 Fluctuation de la tension:	6
2.7 Interférences électriques:	6
2.8 Absence de mise à la terre :	6
2.9 Harmoniques :	6
2.10 Transitoires :	7
3. Facteurs influençant la qualité de l'énergie électrique (QEE)	8
3.1 La continuité de l'alimentation électrique :	8
3.2 Qualité de la forme d'onde de tension :	9
3.3 La qualité de service :	12
Conclusion :	13
Chapitre II : Dégradation de la QEE : Analyse des harmoniques.	
Introduction :	15
1 : Définition :	15

2 : Les sources de courant et de tension harmoniques :	15
3 : Notion de Charges :	16
3.1 : Charges linéaires :	16
3.2 : Charges non-linéaires :	17
4 : Décomposition d'un signal périodique :	18
5 : Les puissances active, réactive, apparente et déformante :	20
6 : Les perturbations provoquées par les harmoniques en courant et en tension :	23
6.1 : Les effets instantanés :	23
6.2 : Effets à termes :	24
7 : Norme CEI (Commission Electrotechnique Internationale) relative à la lutte contre les harmoniques des courants et des tensions :	25
7.1 : Limites acceptables, recommandations, Normes :	25
7.2 : Limites normalisées :	26
Conclusion :	29
Chapitre III : Les techniques de réduction des harmoniques	
Introduction :	31
1 : Compensation des perturbations dans un réseau électrique de distribution :	31
1.2 : Méthodes modernes contre les harmoniques :	39
Conclusion :	44
Chapitre IV : Analyse harmonique dans un réseau électrique par le Logiciel d'analyse d'harmonique – Etap : Etude de cas	
Introduction :	46
1.2 : Module Analyse Harmonique :	48
1.3 : Barre D'outils :	52
1.4 : Éditeur de cas d'étude d'analyse harmonique :	53
1.5 : Ecoulement De Puissance Harmonique :	58
1.6 : Balayage de fréquence harmonique :	59
2 : Application1 :	60
2.1 : Analyse de l'écoulement de puissance :	64
2.2 : Analyse harmonique :	67
3 : Application 2 :	79
3.1 : Analyse de l'écoulement de puissance :	81

3.2 : Analyse Ecoulement de Puissance harmonique :	82
3.3 : Élimination cette courant harmoniques à l'aide d'un filtre :	86
Conclusions :	88
Conclusion générale :	89
bibliographie	90

List des figures

Figure 1.1 Interruption/sous tension/Sur tension _____	4
Figure 1.2 disequilibria de tension _____	5
Figure 1.3 creux de tension _____	5
Figure 1.4 Gonflement de la tension _____	5
Figure 1.5 Distorsion harmonique dans l'onde sinusoïdale _____	7
Figure 1.6 Transitoires par rapport au temps _____	7
Figure 2.1 Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires _____	16
Figure 2.2 les Charges linéaires _____	17
Figure 2.3 les Charges non-linéaires _____	17
Figure 3.1 courants harmoniques de rang 3 dans un transformateur triangle - étoile _____	32
Figure 3.2 courants harmoniques de rang 3 dans un transformateur à secondaire zigzag. _____	33
Figure 3.3 Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé _____	33
Figure 3.4 Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires _____	34
Figure 3.5 Raccordement d'un filter passif _____	34
Figure 3.6 Schéma de principe d'un filtre passif _____	35
Figure 3.7 Raccordement d'une inductance anti-harmonique _____	36
Figure 3.8 Installation de filtre résonant. _____	37
Figure 3.9 Filtres amortis passe-haut _____	38
Figure 3.10 Schéma de principe du filtrage actif parallèle. _____	40
Figure 3.11 Schéma de principe du filtrage actif série. _____	41
Figure 3.12 Filtre actif série et filtre passif parallèle. _____	42
Figure 3.13 Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle. _____	42
Figure 3.14 Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle _____	43
Figure 4.1 Barres d'outils du mode ETAP pour diverses analyses du système électrique. _____	51
Figure 4.2 Barre d'outils de l'étude harmonique dans ETAP _____	52
Figure 4.3 Barre d'outils de l'éditeur de cas d'étude. _____	54
Figure 4.4 Page d'informations de l'éditeur de cas d'étude. _____	54
Figure 4.5 Page de tracé de l'éditeur de cas d'étude _____	55
Figure 4.6 Page Modèle de l'éditeur de cas d'étude. _____	56
Figure 4.7 Page d'alerte de l'éditeur de cas d'étude _____	57
Figure 4.8 Option d'affichage du module d'analyse harmonique. _____	58
Figure 4.9 La station de distribution de Port Harcourt 132/33/11 KV _____	60
Figure 4.10 informations sur le transformateur T2 45MVA (Z et X/R) _____	61
Figure 4.11 informations sur le transformateur T3 15MVA (Z et X/R) _____	62
Figure 4.12 Page harmonique d'une charge. _____	63
Figure 4.13 Simulation de la sous-station Avant amélioration _____	65
Figure 4.14 Simulation de la sous-station après amélioration _____	66
Figure 4.15 analyses de l'écoulement de puissance harmonique avants le filtrage _____	68
Figure 4.16 les formes d'onde de tension _____	69
Figure 4.17 le spectre harmonique de la tension _____	69
Figure 4.18 analyses du balayage de fréquence harmonique _____	70
Figure 4.19 Angle d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique _____	71

Figure 4 20 Module d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique _____	72
Figure 4 21 Dimensionnement d'un filtre harmonique "Size Filter". _____	73
Figure 4 22 Page de paramètres de l'éditeur d'harmoniques _____	73
Figure 4 23 analyses de l'écoulement de puissance harmonique après le filtre 5 _____	74
Figure 4 24 analyses de l'écoulement de puissance harmonique après le filtre 5 et 7 _____	75
Figure 4 25 les formes d'onde de tension après le filtrage _____	76
Figure 4 26 le spectre harmonique de la tension après le filtrage _____	76
Figure 4 27 analyses du balayage de fréquence harmonique _____	77
Figure 4 28 Module d'impédance après injection des filtres _____	77
Figure 4 29 Angle d'impédance après injection des filtres _____	78
Figure 4 30 La station de distribution de BOU CHAKEUR 220/60/30 KV _____	79
Figure 4 31 les source des harmoniques (12 pulse2, fluorecent, arc furnace) _____	80
Figure 4 32 Analyse de l'écoulement de puissance _____	82
Figure 4 33 Analyse Ecoulement de Puissance harmonique _____	83
Figure 4 34 les formes d'onde de tension _____	83
Figure 4 35 le spectre harmonique de la tension _____	84
Figure 4 36 les formes d'onde de courant Avant le filtrage _____	85
Figure 4 37 le spectre harmonique du courant Avant le filtrage _____	85
Figure 4 38 la valeur de l'harmonique 5 ^{eme} du courant Avant le filtrage _____	86
Figure 4 39 analyses de l'écoulement de puissance harmonique 5 ^{eme} après le filtrage _____	87
Figure 4 40 le spectre harmonique du courant après le filtrage _____	87
Figure 4 41 les formes d'onde de courant après le filtrage _____	88

List des tableaux

table 1.1 Current distortion limit for harmonics. _____	29
table 1.2 Voltage distortion limit for harmonics. _____	29
Table 4.1 Données De La Sous-Station 132/33 KV De Port Harcourt _____	64
Table 4.2 Résultats de la simulation avant et après l'amélioration de la sous-station _____	66
Table 4.3 les valeurs de THD avant le filtre _____	68
Table 4.4 Fenêtre d'alarme du balayage de fréquence harmonique _____	70
Table 4.5 la comparaison diminution significative des valeurs THD _____	75
Table 4.6 Fenêtre d'alarme du balayage de fréquence harmonique après injection les filtre _____	78
Table 4.7 Données De La Sous-Station 220/60/30 KV De BOU CHAKER _____	81
Table 4.8 les valeurs de IHD du 5 ^{eme} ordre _____	84
Table 4.9 comparaison de 5eme harmonique avant et après le filtrage _____	88

Introduction générale :

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

Le réseau est l'élément essentiel qui a pour tâche de réaliser à chaque instant l'équilibre entre la production d'énergie électrique et la consommation nécessaire à l'ensemble des clients connectés au système. Une *qualité élevée de la fourniture d'énergie électrique est* considérée comme une évidence.

Une bonne qualité de l'électricité se caractérise par le fait que la tension secteur qui arrive effectivement chez le consommateur correspond à la tension secteur promise par la compagnie d'électricité. Différents facteurs ont une influence sur la qualité de l'électricité :

- Les générateurs d'électricité et la structure du réseau de distribution de la compagnie d'électricité
- Transmission de la tension du réseau
- Influences du consommateur

Une mauvaise qualité de l'énergie électrique entraîne :

- Un risque plus élevé de panne d'équipement ;
- Des coûts de maintenance plus élevés ;
- Une réduction de la durée de vie des équipements ;
- Une plus grande consommation d'énergie ;
- la caducité des garanties;

Depuis quelques années, il y a une forte augmentation des charges non linéaires connectées au réseau électrique : ordinateurs, télécopieurs, lampes à décharge, fours à arc, chargeurs de batterie, onduleurs, alimentations électroniques...

La pollution des réseaux électriques par les courants harmoniques est une conséquence inévitable de la prolifération depuis quelques années des charges non linéaires

Les conséquences sur le système d'alimentation électrique deviennent préoccupantes du fait d'une utilisation croissante de ces équipements, mais aussi de l'application de l'électronique à presque toutes les charges électriques. En effet, une charge non linéaire appelle du réseau un courant important, déformé, décomposables en harmoniques. Les courants harmoniques ont des effets

négatifs sur la quasi-totalité des composantes du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et/ou mécaniques.

L'analyse harmonique devient un sujet important pour les opérateurs des systèmes électriques qui doivent utiliser des outils de calcul spécifiques pour exécuter l'écoulement de puissance harmonique en raison de la complexité des réseaux électriques de grande taille. Elle vise à identifier les problèmes harmoniques, minimiser les déclenchements gênants, concevoir et tester les filtres et identifier les violations potentielles des limites de distorsion.

Différents types de logiciels réseaux électriques peuvent être utilisés pour effectuer une analyse harmonique sur le réseau électrique.

L'objectif principal de ce projet est d'effectuer une analyse harmonique en utilisant deux méthodes : « l'écoulement de puissance harmonique et le balayage de la fréquence harmonique » sur des postes de distribution (BOU CHAKEUR et Port Harcourt) en utilisant le logiciel ETAP19.2

ETAP est un logiciel très convivial où les outils clés nécessaires à une analyse harmonique efficace sont faciles à utiliser.

Ce travail de mémoire est étalé sur quatre chapitres permettant de faire l'évaluation des harmoniques ainsi que leur compensation. Les chapitre 1 et 2 portent sur la qualité de l'énergie électrique ainsi que les facteurs qui la dégradent ; il y est exposé la théorie sur les harmoniques selon les travaux antérieurs Dans le chapitre 3, il est présenté les différentes méthodes courantes pour contrer la propagation des harmoniques. Le quatrième chapitre intitulé : analyse et simulation sur logiciel ETAP, traite de la simulation de deux postes électriques à l'aide du programme ETAP et de l'extraction des résultats des calculs. Le but étant le traitement, l'analyse et l'amélioration de la qualité de l'énergie.

Chapitre I :

*Notions sur la qualité
de l'énergie électrique*

Introduction :

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites tertiaires ou industriels, et les constructeurs d'équipements, essentiellement pour les raisons suivantes : L'un des principaux problèmes rencontrés par l'énergie électrique est la mauvaise qualité de la puissance,

Une mauvaise qualité d'alimentation peut avoir un impact sérieux sur les performances des équipements du réseau électrique, conduisant à une variété de résultats négatifs. Ces conséquences affectent non seulement l'efficacité opérationnelle de l'équipement mais posent également des problèmes économiques importants.

Un des principaux facteurs qui influencent la qualité de l'énergie est le niveau de distorsion harmonique totale, ce qui réduit la durée de vie des équipements électriques. En effet, la distorsion harmonique produit davantage de courant, ce qui entraîne une augmentation de la température d'opération, du voltage de décharge et des pertes électriques dans les câbles et les transformateurs, ainsi qu'une diminution de chaque facteur de puissance et de stabilité du système électrique.

1. La qualité de l'énergie électrique :[15]

Dans un contexte où l'économie d'énergie est le mot d'ordre, la qualité de l'énergie est un enjeu qui implique tous les maillons du réseau de distribution d'électricité.

L'une des propriétés particulières de l'électricité est que certaines de ses caractéristiques dépendent à la fois du producteur / distributeur d'électricité, des fabricants d'équipements et du client.

La qualité de l'énergie désigne plus concrètement la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci dépend de trois facteurs que sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service.

Au sens large, le Power Qualité est un ensemble de limite qui permet au système électrique de fonctionner sans provoquer de pertes de performances ou de dégâts matériels. Ce terme est utilisé pour décrire l'énergie qui alimente les charges et la capacité de la charge de fonctionner normalement avec cette énergie. À défaut d'une alimentation électrique adéquate, un appareil électrique peut avoir des dysfonctionnements, des dégâts ou/et peut ne pas fonctionner du tout. L'électricité peut être de mauvaise qualité selon différents critères et selon différentes raisons.

2. Classification des perturbations du réseau électrique :

De nombreux types de perturbations électriques peuvent entraîner des problèmes de qualité de l'énergie. La majorité des perturbations dépendent soit de la fréquence, soit de l'amplitude, soit des deux. Les événements peuvent être classés en types courts, moyens ou longs en fonction de la durée pendant laquelle les perturbations ont persisté. Les principales catégories de perturbations qui entraînent une baisse de la qualité de l'énergie dans un système électrique sont les suivantes [2] :

2.1 Niveau de tension :

Une certaine plage de tension est utilisée par de nombreux équipements électroniques. Les variations de tension peuvent entraîner des dysfonctionnements de l'équipement et des problèmes de qualité de l'alimentation. Par exemple, les basses tensions peuvent endommager l'équipement et nuire à son efficacité, tandis qu'une tension excessive peut entraîner une surchauffe et même une défaillance de l'équipement. [1]

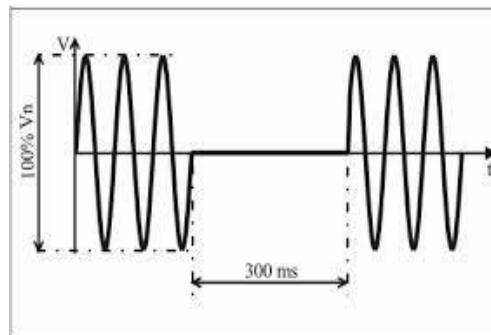


Figure 1.1 Interruption/sous tension/Sur tension

2.2 Tensions déséquilibrées :

Une forme d'onde asymétrique est produite lorsque les trois phases d'un système d'alimentation triphasé ont des amplitudes variables. Il s'agit d'un problème de qualité de l'alimentation électrique à tension déséquilibrée. Les défauts phase-terre, les charges déséquilibrées et les mauvaises connexions peuvent tous contribuer à cette asymétrie. [1]

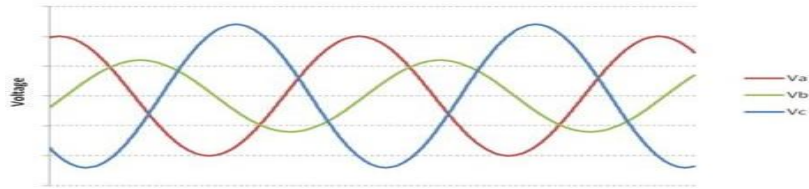


Figure 1.2 disequilibria de tension [2]

2.3 Creux de tension:

Une brève chute de tension qui se produit pendant quelques cycles à quelques secondes en dessous du niveau standard est connue sous le nom d'affaissement ou de creux de tension. Elle est provoquée par un pic de charge brutal, une baisse de la tension du réseau ou un dysfonctionnement du système. [1]

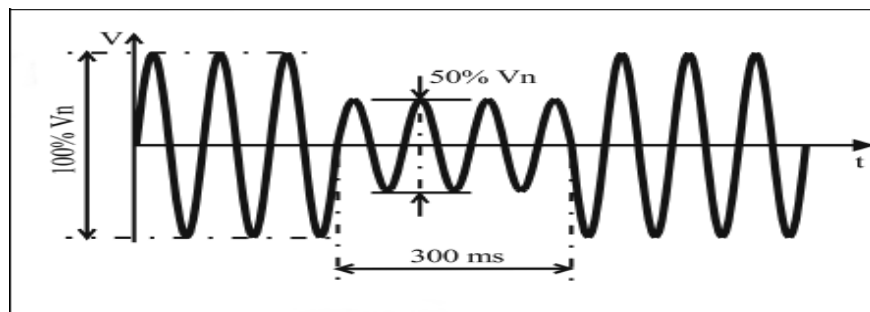


Figure 1.3 creux de tension [2]

2.4 Bosse ou surtension:

Une brève augmentation de la tension au-dessus du niveau standard qui dure de quelques cycles à quelques secondes est connue sous le nom de gonflement de tension. Elle est provoquée par des variations brusques de charge ou par la résolution d'un dysfonctionnement du système. [1]

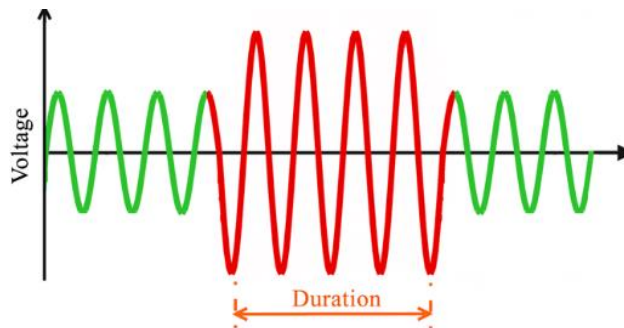


Figure 1.4 Gonflement de la tension

2.5 Interruption de tension:

Une brève période de perte totale de tension est connue sous le nom d'interruption de tension. Elle peut durer de quelques millisecondes à plusieurs minutes et être provoquée par la foudre ou des défaillances du système de distribution. L'équipement peut s'arrêter ou se réinitialiser à la suite de cette perturbation, ce qui peut entraîner des dommages ou une perte de données. [1]

2.6 Fluctuation de la tension:

Un scintillement est une variation de tension brève ou persistante avec des changements brusques de magnitude. Il est provoqué par des changements brusques de charge, par exemple lorsque de gros moteurs sont démarrés, ou par des équipements spécifiques du système d'alimentation, tels que de gros entraînements, des fours à arc ou des machines à souder. Les résidents peuvent remarquer et trouver cela gênant lorsque les lumières scintillent en raison des variations de tension. La fréquence et la profondeur des événements de scintillement sont quantifiées, et ils ont le potentiel d'affecter la fonctionnalité et la durée de vie des appareils électroniques. [1]

2.7 Interférences électriques:

Lorsque des bruits externes, comme ceux des lignes électriques, d'autres systèmes électriques ou même des transmissions radio, interfèrent avec un signal électrique, il en résulte des interférences. La détérioration du signal provoquée par le bruit électrique peut empêcher l'équipement de fonctionner comme prévu. [1]

2.8 Absence de mise à la terre :

On dit qu'un circuit électrique est mis à la terre lorsqu'il est connecté à la terre. Cela réduit les interférences et le bruit, favorise la stabilité et protège contre les chocs d'accumulation électrostatique. Les équipements électriques sensibles peuvent mal fonctionner ou subir des dommages s'ils ne sont pas correctement mis à la terre. [1]

2.9 Harmoniques :

Des impulsions électriques à haute fréquence, connues sous le nom d'harmoniques, altèrent l'énergie que les services publics fournissent aux ménages et aux entreprises. Les harmoniques produites par les appareils électroniques avec des charges non linéaires peuvent endommager les équipements électriques et interférer avec le fonctionnement des équipements de distribution. [1]

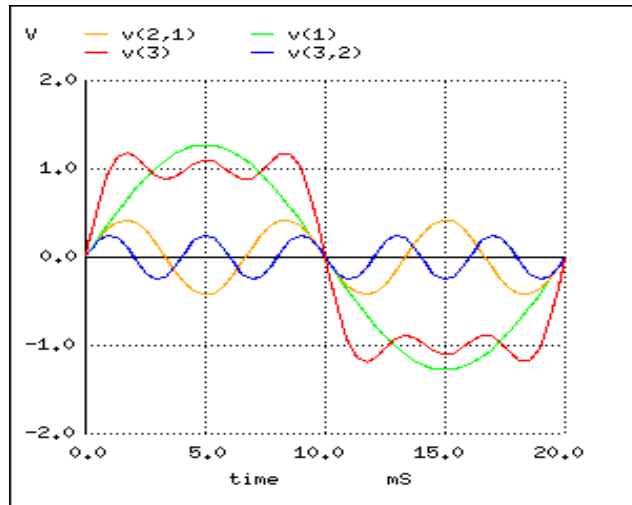


Figure 1.5 Distorsion harmonique dans l'onde sinusoïdale

2.10 Transitoires :

Les transitoires sont des variations brusques et fugaces de tension ou de courant qui se produisent sur une courte période de temps. Ils peuvent être provoqués par des éléments tels que la foudre, les activités de commutation ou les dysfonctionnements du système électrique. La durée des transitoires peut varier de quelques microsecondes à plusieurs millisecondes, et ils peuvent affecter considérablement la fiabilité et l'efficacité des systèmes électriques et des machines. Pour réduire l'impact des transitoires sur les systèmes et équipements électriques, des mesures de sécurité telles que des dispositifs de protection contre les surtensions et des supresseurs de surtension transitoire peuvent être utilisées. [1]

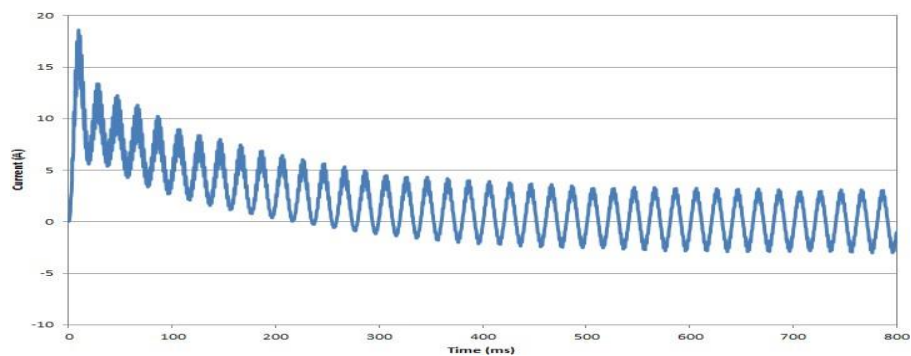


Figure 1.6 Transitoires par rapport au temps

3. Facteurs influençant la qualité de l'énergie électrique (QEE)

Afin de bien comprendre les causes de la dégradation de la QEE, nous allons rappeler les trois grands critères : la continuité de l'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service.

3.1 La continuité de l'alimentation électrique :

L'alimentation sans interruption est un aspect important de la qualité de l'énergie qui garantit une fourniture ininterrompue d'énergie électrique aux utilisateurs.

Cela revêt une importance particulière pour les habitations, les entreprises et les infrastructures critiques, car les pannes de courant peuvent avoir des conséquences néfastes sur la production, la sécurité et la vie quotidienne.

3.1.1 Définition et importance de la continuité électrique :

La continuité électrique est définie comme la capacité d'un système électrique à fournir une alimentation stable et ininterrompue en énergie électrique aux points de distribution coordonnés.

Elle est généralement mesurée par le nombre et la durée des coupures de courant sur une certaine période.

Un système électrique fiable et efficace doit assurer une continuité de puissance élevée pour un certain nombre de raisons :

- **Protection des équipements** : Les interruptions d'alimentation électrique peuvent endommager les équipements électriques sensibles, tels que les ordinateurs, les serveurs et les machines industrielles.
- **Maintien de la production** : Les entreprises dépendent d'une alimentation électrique ininterrompue pour assurer la production et éviter les pertes économiques importantes associées aux arrêts.
- **Sécurité des personnes** : Dans certains cas, les pannes de courant peuvent mettre en danger la sécurité humaine, en particulier dans les hôpitaux, les centres d'urgence et les infrastructures critiques.

- **Commodités de la vie** : L'absence d'électricité affecte le confort de vie d'un individu, perturbant l'éclairage, le chauffage, la climatisation et l'utilisation des appareils électroménagers.

3.1.2 Causes des pannes de courant :

De nombreux facteurs différents peuvent provoquer des pannes de courant, notamment :
Problèmes sur le réseau électrique : Courts-circuits, surcharges, composants cassés, etc.

- **Intempéries** : Foudre, blizzard, vent fort, etc.
- **Erreur humaine** : Erreur de fonctionnement, maintenance inadéquate, etc.
- **Attaque malveillante** : Sabotage intentionnel du réseau électrique.
- **Événements géopolitiques** : Conflits, instabilité politique, etc.

3.1.3 Mesures pour améliorer la continuité électrique :

Il existe actuellement plusieurs solutions pour améliorer la continuité électrique : Renforcer le réseau électrique : Augmenter la capacité de transport et d'installation Mesures de protection intelligentes, remplacement des anciens équipements.

Mettre en place un système de secours : Générateur de secours, onduleur et système d'alimentation sans coupure (UPS) pour assurer une alimentation électrique continue en cas de panne du réseau.

Gestion de la demande : Mise en œuvre de programmes efficaces

3.2 Qualité de la forme d'onde de tension :

Qualité de la forme d'onde de tension La qualité de la forme d'onde de tension est un aspect important de la qualité de l'énergie électrique qui se concentre sur la forme, l'amplitude et la fréquence de la tension délivrée aux équipements électriques.

Les ondes de tension de haute qualité sont sinusoïdales, stables et conformes aux normes établies pour le réseau électrique.

3.2.1 Importance de la qualité de la forme d'onde de tension :

- **Bon fonctionnement de l'appareil :** Les appareils électriques sont conçus pour fonctionner avec une tension sinusoïdale et stable.
Les perturbations des formes d'onde de tension peuvent entraîner des dysfonctionnements, une réduction des performances, des dommages aux composants électroniques et une durée de vie réduite de l'équipement.
- **Sécurité personnelle :** Les surtensions et autres perturbations peuvent créer un risque de choc électrique et d'incendie.
- **Efficacité énergétique :** Les ondes de tension déformées peuvent entraîner des pertes d'énergie supplémentaires dans les systèmes électriques.

3.2.2 Paramètres clés de la qualité de la forme d'onde de tension :

- **Onde forme :** Une onde sinusoïdale doit constituer la forme d'onde de tension.
Autrement dit, sa forme doit ressembler à une courbe en S provoquée par une charge de distorsion non linéaire (ordinateur, fréquence).
Convertisseurs peuvent déformer l'onde sinusoïdale et affecter le fonctionnement des appareils sensibles.
- **Amplitude :** La tension doit maintenir une valeur stable dans une plage définie autour de la valeur nominale (220 V monophasé en Algérie).
Les fluctuations de tension telles que les creux et les surtensions peuvent provoquer un dysfonctionnement ou des dommages à l'équipement.
- **Fréquence :** La fréquence du réseau électrique algérien doit être stable à 50 Hz.
Les fluctuations de fréquence dues à un déséquilibre entre la production et la consommation d'énergie peuvent perturber le fonctionnement des moteurs électriques, des horloges et autres appareils sensibles à la fréquence.

3.2.3 Causes de dégradation de la qualité de la forme d'onde de tension :

- **Charges non linéaires** : Prolifération d'appareils électroniques tels que des ordinateurs, des convertisseurs de fréquence, des éclairages LED, etc. Les courants harmoniques sont injectés dans le réseau.
- **Interruption du réseau** : Court-circuit, surcharge, mauvaise isolation. Cela peut provoquer des fluctuations soudaines de tension.
- **Intégration des énergies renouvelables** : Les sources d'énergie intermittentes telles que l'énergie éolienne et solaire peuvent provoquer des fluctuations de tension si elles ne sont pas correctement intégrées au réseau.
- **Infrastructure électrique vieillissante** : Les transformateurs, câbles et disjoncteurs vieillissants peuvent devenir moins efficaces et conduire à une mauvaise qualité de l'énergie.

3.2.4 Mesures pour améliorer la qualité de la forme d'onde de tension :

- **Filtre de puissance** : Atténue les harmoniques et les interférences haute fréquence causées par les charges non linéaires.
- **Régulateur de tension** : Lisse les creux et les surtensions pour stabiliser la tension et protéger les appareils sensibles.
- **Onduleurs et systèmes d'alimentation sans interruption (UPS)** : Fournissez une alimentation propre et stable aux appareils critiques et isolez-les des pannes du réseau électrique.
- **Améliorations du réseau électrique** : Renforcer les infrastructures, remplacer les équipements vieillissants et intégrer des technologies intelligentes pour améliorer la gestion de la tension et de la fréquence.
- **Adoption de normes et réglementations** : Définit les limites acceptables pour les variations de tension et de fréquence et exige que les administrateurs réseau se conforment à ces normes.

- **Entretien préventif** : Inspection et entretien périodiques des systèmes électriques.
Identifiez les problèmes potentiels et résolvez-les avant qu'ils ne deviennent destructeurs.

3.3 La qualité de service :

La qualité de service (QdS) en électricité, dans le contexte de l'électricité, va au-delà de la simple alimentation électrique et inclut la performance globale du système électrique.

L'objectif est d'assurer une alimentation électrique fiable, sûre et efficace qui répond aux besoins des utilisateurs.

Définition et aspects importants de la QdS électrique : La QdS électrique comprend plusieurs aspects importants :

- **Fiabilité** : Fiabilité continue pour l'utilisateur et capacité du système électrique à fournir une alimentation ininterrompue. Cela inclut la minimisation des pannes de courant, des pannes et des fluctuations de tension.
- **Disponibilité** : Pourcentage de temps pendant lequel un système électrique est opérationnel et prêt à fournir de l'énergie aux utilisateurs.
Cela inclut une maintenance appropriée et une gestion proactive des risques.
- **Sécurité** : Protégez les personnes et les biens contre les risques de choc électrique, d'incendie et d'autres dangers liés à l'électricité.
Cela inclut le respect des normes de sécurité, l'utilisation d'équipements fiables et la mise en œuvre de mesures de protection appropriées.
- **Efficacité énergétique** : Capacité d'un système électrique à minimiser les pertes d'énergie entre la production et la consommation.
Cela inclut la sensibilisation des utilisateurs à l'utilisation efficace de la technologie, à l'optimisation du réseau et aux pratiques d'économie d'énergie.
- **Respect de l'environnement** : Minimiser l'impact environnemental de la production et de la distribution d'électricité.
Cela inclut l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la promotion de pratiques durables.
- **Satisfaction du client** : Qualité de l'expérience utilisateur du système électrique.

Cela inclut une communication transparente, une réponse rapide aux plaintes et la prise en compte des besoins des clients.

Conclusion :

La qualité de l'énergie électrique (QEE) est un enjeu crucial pour le bon fonctionnement de nos sociétés modernes, touchant tous les aspects de la vie quotidienne, du secteur industriel aux infrastructures critiques. En garantissant une alimentation électrique fiable, sûre et efficace, nous pouvons stimuler la croissance économique, protéger l'environnement et améliorer la qualité de vie des citoyens.

Les trois piliers fondamentaux de la QEE - continuité de l'alimentation, qualité de la forme d'onde et qualité de service - doivent être considérés de manière holistique pour garantir un système électrique performant. Des investissements dans les infrastructures, des pratiques de gestion rigoureuses, une adoption croissante des technologies intelligentes et une sensibilisation accrue des utilisateurs sont des éléments clés pour atteindre cet objectif.

Chapitre II

Dégradation de la QEE

: Analyse des
harmoniques.

Introduction :

En raison de l'utilisation de plus en plus répandue et continue d'appareils électroniques, tels que les variateurs de vitesse, les charges non linéaires, etc., la qualité de la tension et du courant du système a été gravement affectée. Ces éléments sont des multiples de la fréquence fondamentale et sont appelés harmoniques. C'est donc de ces harmoniques que nous allons parler dans ce chapitre.

1 : Définition :

Une charge non linéaire génère un courant déformé dans le réseau électrique, ce qui entraîne une modification de l'aspect de la tension sinusoïdale. Des courants harmoniques sont créés par les charges non linéaires qui se déplacent de la charge vers l'alimentation en suivant le chemin de la moindre impédance. La fréquence des courants harmoniques est un multiple de la fréquence fondamentale (celle de l'alimentation électrique). Les formes d'onde non sinusoïdales liées aux charges non linéaires sont causées par la superposition des courants harmoniques sur le courant fondamental.[4]

2 : Les sources de courant et de tension harmoniques :[5]

Les harmoniques en courant sont généralement générées par des charges appelées non linéaires. Effectivement, les charges les plus fréquemment rencontrées sont les démarreurs ou variateurs liés aux moteurs ou machines en marche, qui sont constitués de composants électroniques de force. L'équipement comprend également des ordinateurs, des serveurs et d'autres appareils électroniques, des éclairages avec ou sans ballasts électroniques, des postes à souder et des alimentations sans interruption (ASI), plus couramment appelées onduleurs.

Ces charges non linéaires génèrent des courants harmoniques qui sont ensuite « renvoyés » sur le réseau d'alimentation ou de distribution public. La déformation de la tension sinusoïdale est due à l'influence de ces courants harmoniques sur l'impédance même de ces réseaux de distribution (généralement de type inductive). Dans ce qui suit la forme de courant absorbé par quelques charges non linéaires

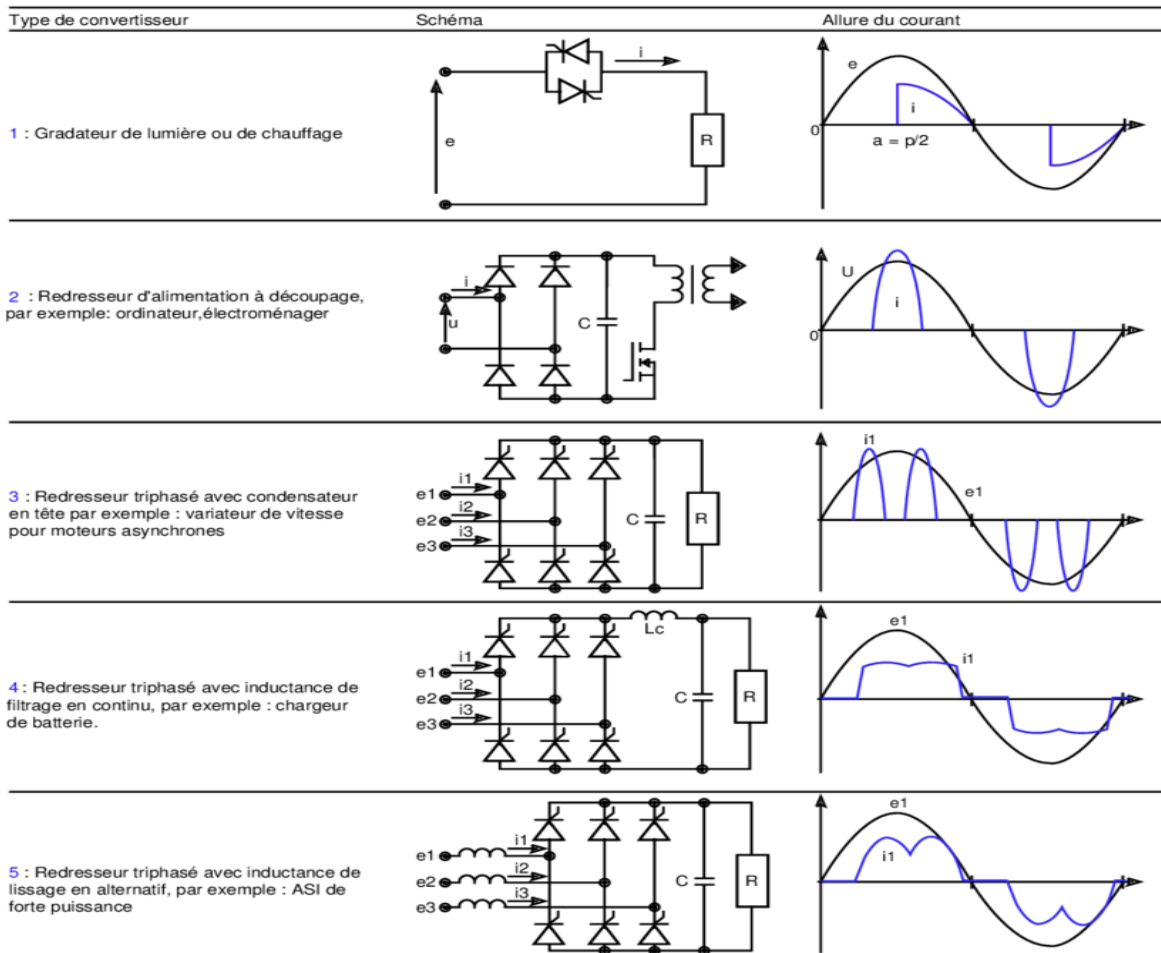


Figure 2.1 Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires

3 : Notion de Charges : [16]

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- Les récepteurs linéaires ou charges linéaires.
- Les récepteurs non-linéaires ou charges non-linéaires

3.1 : Charges linéaires :

L'interaction entre la tension et le courant traversant les charges linéaires est proportionnelle et directe. Cela implique que lorsque la tension augmente, le courant augmente également, et inversement. La loi d'Ohm exprime cette relation : $I = V / R$, avec I étant le courant (en ampères), V étant la tension (en volts) et R étant la résistance.

➤ **Illustrations de charges linéaires :**

- Les résistances sont l'illustration la plus simple de la charge linéaire.
- Les lampes à incandescence : Leur filament résistif est en synchronisation avec la tension et le courant.
- Moteurs à induction : Lorsqu'ils sont en marche, ils agissent comme des charges linéaires.

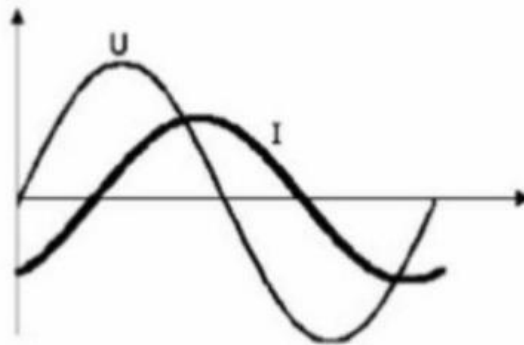


Figure 2.2 les Charges linéaires

3.2 : Charges non-linéaires :

Dans le domaine de l'électricité, les charges non linéaires se distinguent de leurs homologues linéaires. Elles sont caractérisées par une relation non proportionnelle entre le courant appliqué à travers eux et le courant qui s'écoule. Les charges non linéaires présentent un comportement plus complexe, ce qui entraîne des distorsions dans la forme du courant.

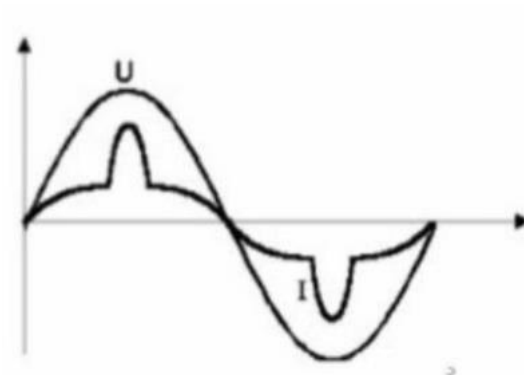


Figure 2.3 les Charges non-linéaires

➤ **Types de charges non-linéaires : [16]**

-Le premier groupe (Charges monophasées) :

Exemple : Lampe basse consommation dite à économie d'énergie ; Tubes fluorescent Equipements Médicaux ; Téléviseurs ; équipements informatiques ; Onduleurs...etc.

-Le deuxième groupe (Charges triphasées) :

Exemple :

- Redresseur (convertisseur alternatif –continu).
- Hacheur (Convertisseur continu -continu est un dispositif de l'électronique de puissance).
- Soudeuses.
- Four à arc utilisé dans la métallurgie.
- Chargeur de Batterie.

4 : Décomposition d'un signal périodique :

L'analyse de signaux utilise la décomposition d'un signal périodique pour le représenter comme une somme de fonctions sinusoïdales. D'après le théorème de Fourier, on peut décomposer tout signal périodique en une série infinie de sinus et de cosinus. Grâce à cette décomposition, il est possible d'identifier les différentes composantes harmoniques du signal. L'amplitude des fréquences présentes dans le signal est déterminée par les coefficients de Fourier, qui constituent son spectre.

➤ **La décomposition en série de Fourier :**

L'analyse et la compréhension des signaux périodiques sont indispensables à la décomposition en série de Fourier, que ce soit en électronique, en physique ou dans d'autres domaines où des phénomènes périodiques sont observés. Elle propose une approche efficace pour analyser et gérer ces signaux de façon mathématique et concrète.

La tension $v(t)$ est un signal périodique de la période T , avec une fréquence $f=1/T$ et une pulsation $\omega=2\pi f$. La décomposition de ce signal est la suivante :

$$V(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (\alpha \cos(\omega ht) + \beta \sin(\omega ht))$$

Avec :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$

Et pour $h \geq 1$:

$$\alpha_h = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(\omega h t) dt$$

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

➤ **Valeur efficace des harmoniques**

Il s'agit de la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques (à partir du rang 2).

Valeur efficace des courants harmoniques :

$$I_{hm} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots}$$

On a :

$$I^2 = \langle i \rangle^2 + I_1^2 + I_{hm}^2$$

Valeur efficace des tensions harmoniques :

$$V_{hm} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots}$$

On a :

$$V^2 = \langle v \rangle^2 + V_1^2 + V_{hm}^2$$

➤ **La valeur efficace d'un signal :**

Par définition, la valeur efficace d'un courant périodique $i(t)$ est :

$$I = \sqrt{\langle i^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$$

On montre que :

$$I = \sqrt{\langle i \rangle^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\langle i \rangle^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots}$$

Avec : I_n la valeur efficace de l'harmonique de rang n (en ampères)

Par définition, la valeur efficace d'une tension périodique $v(t)$ est :

$$V = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T v(t)^2 dt}$$

On montre que :

$$V = \sqrt{\langle v \rangle^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{\langle v \rangle^2 + V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots}$$

Avec : V_n la valeur efficace de l'harmonique de rang n (en volts)

5 : Les puissances active, réactive, apparente et déformante :

➤ Puissance apparente S (en VA) de la charge :

La puissance apparente de la charge est par définition :

$$S = V \cdot I$$

➤ Puissance active P (en watts) consommée par la charge :

Par définition, c'est la moyenne dans le temps de la puissance instantanée consommée par la charge. C'est aussi la moyenne sur une période ($T = 1/f$) de la puissance instantanée :

$$P = \langle p \rangle = \langle v * i \rangle = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T v(t) i(t) dt$$

On montre que :

$$P = \langle v \rangle \langle i \rangle + \sum_{n=1}^T V_n I_n \cos \varphi_n$$

$= \langle v \rangle \langle i \rangle$ (contribution des composantes continues)

+ $V_1 I_1 \cos \varphi_1$ (*contribution des fondamentaux*)

+ $V_2 I_2 \cos \varphi_2$ (*contribution des harmoniques de rang 2*)

+ $V_3 I_3 \cos \varphi_3$ (*contribution des harmoniques de rang 3*)

➤ **Puissance réactive Q (en vars) consommée par la charge :**

Par définition :

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \varphi_n$$

$Q = V_1 I_1 \cos \varphi_1$ (*contribution des fondamentaux*)

+ $V_2 I_2 \cos \varphi_2$ (*contribution des harmoniques de rang 2*)

+ $V_3 I_3 \cos \varphi_3$ (*contribution des harmoniques de rang 3*)

➤ **Facteur de puissance PF (Power Factor) de la charge :**

$$PF = \frac{p}{s}$$

Remarque : $|PF| \leq 1$

➤ **Facteur de déplacement DPF (Déplacement Power Factor) :**

Par définition :

$$DPF = \cos \varphi_1$$

φ_1 désigne le déphasage entre le fondamental de la tension et le fondamental du courant.

➤ **Puissance déformante :**

Par définition :

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}$$

Où

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

L'unité de la puissance déformante D est le VAD.

➤ **Le taux global de distorsion harmonique :**

Le taux global de distorsion harmonique (THD, Total Harmonic Distortion) est une mesure de la distorsion d'un signal causée par les harmoniques. Il est défini comme le rapport de la somme des puissances de toutes les composantes harmoniques à la puissance de la composante fondamentale.

La formule pour calculer le THD est la suivante :

-Pour la tension :

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H V_h^2}}{V_1}$$

V_h : est la tension de l'harmonique h.

V_1 : est la tension du signal fondamental.

H : est le nombre total d'harmoniques considérées.

-Pour le courant :

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^H I_h^2} / I_1$$

I_h : est le courant de l'harmonique h.

I_1 : est le courant du signal fondamental.

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

6 : Les perturbations provoquées par les harmoniques en courant et en tension :[6]

Comme nous l'avons vu précédemment, les courants harmoniques se superposent au fondamental du courant de ligne. Les effets qu'ils produisent se conjuguent et apparaissent différemment selon les récepteurs.

On peut considérer deux types d'effets mesurables :

- Instantanés
- Effets à terme dû essentiellement aux échauffements

6.1 : Les effets instantanés :

Comme nous l'avons vu, les courants harmoniques produits par les charges non linéaires ont des fréquences multiples de 50 Hz dans les étages pairs et impairs. En fait, ces ondes de « distorsion » peuvent interférer avec le fonctionnement normal des systèmes contenant des composants électroniques en raison de la distorsion de tension. Par exemple, le déplacement du passage par zéro de la tension peut affecter les conditions de commutation d'un thyristor.

- Les compteurs d'énergie à induction présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques. La proportion d'harmoniques d'ordre 5 dans le courant est de 5%, soit environ 0,3% (source Schneider).

- Les récepteurs de télécommandes centrales à fréquence polyphonique utilisés par les sociétés de distribution d'énergie peuvent être perturbés par des tensions harmoniques proches des fréquences utilisées par le système de détection.

En raison de la force électrodynamique proportionnelle au courant présent à ce moment, les courants harmoniques génèrent des vibrations et du bruit acoustique, notamment dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inducteurs).

Les couples mécaniques pulsés dus aux champs magnétiques tournants harmoniques provoquent des vibrations dans les machines tournantes.

Des interférences se produisent également lorsque des lignes « à faible courant » longent des lignes de distribution avec des courants et des tensions déformés.

Des paramètres tels que : la longueur du trajet parallèle, la distance entre les deux circuits et la fréquence des harmoniques doivent être pris en compte.

6.2 : Effets à termes :

Outre les effets mentionnés ci-dessus, les « effets à long terme » sont principalement dus à l'échauffement du matériau.

➤ **Echauffement des condensateurs :**

Chauffage du condensateur L'impédance d'un condensateur est inversement proportionnelle à la fréquence. Par conséquent, les courants harmoniques de fréquence supérieure à 50 Hz affectent le condensateur en créant des points d'échauffement (effets thermiques). Cette surchauffe peut entraîner une défaillance du condensateur.

➤ **Échauffement des machines tournantes et des transformateurs :**

Des pertes supplémentaires se produisent dans la machine et le stator (pertes de cuivre et de fer). Ils surviennent principalement dans le circuit rotorique (cage, amortisseur, circuit magnétique). Par conséquent, ces effets peuvent créer des différences de vitesse significatives entre le champ magnétique induit par les harmoniques tournantes et le rotor.

Les effets cutanés (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), l'hystérésis et les courants de Foucault (dans les circuits magnétiques) provoquent des pertes supplémentaires dans les transformateurs.

➤ **Echauffement des câbles :**

Chauffage des câbles Les effets thermiques au niveau du câble où circulent les courants harmoniques sont accrus, entraînant une augmentation de la température.

Les autres sources de perte comprennent :

- Augmentation de la valeur efficace du courant lorsque la même puissance active est consommée.
- Augmentation de la résistance apparente du noyau avec la fréquence.

Un phénomène provoqué par l'effet peau.

- Augmentation de la perte diélectrique de l'isolant en fonction de la fréquence lorsque le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable.
- Phénomène de proximité, câble de masse double face, blindage, etc.

Généralement, tous les appareils (tableaux de distribution) sont exposés à des tensions ou sont traversés par des courants harmoniques. Celles-ci représentent des pertes importantes et peuvent nécessiter une dégradation. Par exemple, une cellule alimentée par un condensateur est conçue pour un courant égal à 1,3 fois le courant de compensation réactif. Cependant, ce surdimensionnement ne prend pas en compte l'augmentation du dégagement de chaleur dû à l'effet peau du conducteur.

Le pourcentage de courant ou de tension harmonique est enregistré avec un analyseur de spectre. Indique l'amplitude, ou la plage, de chaque composant. Il est également important de choisir un capteur (courant ou tension) avec une bande passante suffisante pour la bande de fréquence mesurée.[6]

7 : Norme CEI (Commission Electrotechnique Internationale) relative à la lutte contre les harmoniques des courants et des tensions :

Les courants harmoniques sont générés par un dispositif ou un ensemble de dispositifs appelés « charges non linéaires ». Ces appareils, ou appareils au sein d'une même installation, sont de plus en plus connectés au même réseau. Pour éviter l'apparition de distorsions de tension dans ces réseaux de distribution, il a été jugé essentiel de limiter l'apparition de courants harmoniques par rapport à l'alimentation secteur. Afin de pouvoir mesurer l'influence des harmoniques de courant et de tension sur les autres appareils connectés au réseau électrique, il était nécessaire de pouvoir définir différents seuils liés à la puissance dite de court-circuit au point de connexion (collectivement (appelé point de croisement ou PCC).

7.1 : Limites acceptables, recommandations, Normes :

➤ Valeurs remarquables

Nous avons repris ci-après les valeurs admissibles communiquées par le Groupe Schneider [5] :

- Machines tournantes synchrones : distorsion en courant statorique admissible = 1,3%
- Machines asynchrones : distorsion en courant statorique admissible = 1,5 à 3,5%

- Câbles : distorsion admissible en tension entre l'âme et l'écran = 10%
- Condensateurs de puissance : distorsion en courant = 83%, ce qui se traduit par une surcharge de 30% et une surcharge en tension de seulement 10%
- Électronique sensible : distorsion en tension admissible de l'ordre de 5%

7.2 : Limites normalisées :

Comme déjà mentionné, ce sont les normes de la série CEI 61000 qui spécifient les limites pour les harmoniques. Ces références sont incluses dans la liste des normes de compatibilité électromagnétique. [5]

➤ Norme CEI 61000-3-2 :[5]

Elle définit les limites d'émission de courants harmoniques des appareils consommant moins de 16 A par phase. En effet, cette norme fixe des limites aux émissions de courants harmoniques pour les appareils individuels connectés aux réseaux publics. Les appareils ou matériaux sont définis par classe (A à D). Les exigences et limitations définies dans cette section s'appliquent aux appareils destinés au raccordement aux réseaux 230/400 V et 240/415 V AC - 50/60 Hz. Des limites s'appliquent aux courants harmoniques définis ou mesurés en régime permanent et en conditions transitoires. Enfin, ces limites sont définies par des normes en fonction de la classe d'appareil (par exemple pour la classe A :

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang n	Courant maxi (A)	Rang n	Courant maxi (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	8<n<40	0,23
11	0,33		
13	0,21		
15<n<39	0,15*15/n		

➤ Norme CEI 61000-3-4 :

Définit les limites d'émission de courants harmoniques par les appareils consommant plus de 16 A et moins de 75 A par phase. La norme divise la procédure de connexion de l'appareil en trois

phases. Le respect des limites d'harmoniques individuelles à l'étape 1 permet la connexion de l'appareil à n'importe quel point du réseau d'alimentation électrique.

L'étape 2 spécifie les taux de courant harmonique individuels, le facteur de distorsion harmonique total THD et le facteur de distorsion haute fréquence pondéré correspondant PWHD. Les valeurs limites sont classées en fonction du taux de court-circuit et sont indiquées dans le tableau. L'étape de connexion 3 repose sur un accord entre l'utilisateur et la société de distribution. Ce contrat est conclu sur la base de l'exécution contractuellement active du système du consommateur. L'étape 3 s'applique toujours si le courant nominal est supérieur à 75 A.

Impairs non multiples de 3				Impairs multiples de 3				Pairs			
Rang	Taux THD-F			Rang	Taux THD-F			Rang	Taux		
	BT	HTA	HTB		BT	HTA	HTB		BT	HTA	HTB
5	3	4,6	2	3	2,5	3,8	2	2	0,7	1,3	1,5
7	2,5	3,8	2	9	0,7	1,1	1	4	0,4	0,7	1
11	1,7	2,7	1,5	15	0,2	0,2	0,3	6	0,2	0,3	0,5
13	1,5	2,3	1,5	21	0,1	0,2	0,2	8	0,2	0,3	0,2
17	1	1,5	1	>21	0,1	0,2	0,2	10	0,2	0,3	0,2
19	0,8	1,2	1					12	0,1	0,2	0,2
23	0,8	1,2	0,7					>12	0,1	0,2	0,2
25	0,8	1,2	0,7								
>25	0,2+6/n	0,15+10/n	0,1+2,5/n								
Taux globaux : 4% en BT 6% en HTA <3% en HTB											

➤ **Norme CEI 61000-2-2 :**

Définit le niveau de compatibilité des tensions harmoniques dans les réseaux publics de distribution basse tension.

Les phénomènes de perturbation comprennent également les harmoniques, les interharmoniques, les fluctuations de tension, les creux de tension et les déséquilibres de tension transitoires.

Cette norme définit essentiellement des critères de conception pour les fabricants d'appareils.

De plus, le niveau d'immunité minimum pour cet appareil est indiqué.

La norme CEI 61000-2-2 répond aux limites fixées par la norme EN 50160 concernant la qualité de la tension que les entreprises de distribution d'énergie doivent fournir aux appareils terminaux de leurs réseaux clients.

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Non multiples de 3		Multiples de 3		Rang	Seuil (%)
Rang	Maxi (%)	Rang	Maxi (%)		
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15 et 21	0,5	6 à 24	0,5
13	3	Les taux maxi sont exprimés en % de la tension fondamentale. Le taux global THD ne doit pas dépasser 8%.			
17	2				
19, 23 et 25	1,5				

➤ **Norme CEI 61000-2-4 :**

Définit le niveau de compatibilité des tensions harmoniques dans les réseaux d'installations industrielles et non publiques.

Elle couvre à la fois les réseaux basse tension et les alimentations moyenne tension dans la gamme moyenne tension.

A noter également l'existence de la norme EN 50160, qui traite des caractéristiques des tensions fournies par le réseau électrique public.[6]

Rang	Classe 1 (récepteurs sensibles)	Classe 2 (récepteurs standards)	Classe 3 (récepteurs peu sensibles)
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1,5
5	3	6	8
6	0,5	0,5	1
7	3	5	7
8	0,5	0,5	1
9	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,5	1
11	3	3,5	5
12	0,2	0,2	1
13	3	3	4,5
THD total	5%	8%	10%

➤ **Norme IEEE 519 pour les harmoniques de courant :**

Isc/I _L	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<25	TDD (%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	5
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	8
50-100	10	4.5	4.0	1.5	12

I_{sc}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 25$	TDD (%)
100-1000	12	5.5	5.0	2.0	15
>1000	15	7.0	6.0	2.5	20

Table 1.1 Limite de distorsion du courant pour les harmoniques.

➤ **Norme IEEE pour les harmoniques de tension :**

Bus Voltage	Individual V_h (%)	THDV (%)
$V < 69$ kV	3.0	5.0
$69 \leq V < 161$ kV	1.5	2.5
$V \geq 161$ kV	1.0	1.5

Table 1.2 Limite de distorsion de tension pour les harmoniques.

Conclusion :

En conclusion, le maintien d'une qualité d'énergie élevée est d'une importance primordiale pour des performances et une longévité optimale des équipements. Une alimentation de haute qualité garantit une consommation d'énergie efficace, réduit les coûts opérationnels et prolonge la durée de vie des équipements. On minimise également le risque de dysfonctionnements et d'échauffement excessif des câbles, des moteurs et des transformateurs, problèmes souvent associés à une mauvaise qualité d'alimentation électrique.

Une surveillance régulière est indispensable pour identifier et résoudre rapidement les problèmes de qualité de l'énergie. La mise en œuvre de stratégies efficaces pour gérer ces problèmes peut atténuer considérablement leurs impacts négatifs. Il peut s'agir notamment d'investir dans des solutions innovantes pouvant jouer un rôle crucial dans le maintien d'une qualité d'énergie élevée et, en retour, atteindre une qualité optimale des performances et longévité des équipements des réseaux électriques.

Chapitre III

Les techniques de réduction des harmoniques

Introduction :

La propagation des harmoniques dans le réseau électrique nous cause de gros dégâts et dysfonctionnements, ce qui entraîne la destruction des équipements, des transformateurs, etc. Par conséquent, les harmoniques doivent être éliminées à travers des filtres. Dans ce chapitre, nous vous montrerons les méthodes pour éliminer les harmoniques. Ce que sont les filtres, leur principe de fonctionnement et leurs types.

1 : Compensation des perturbations dans un réseau électrique de distribution :

Ils existent deux solutions afin de compenser toutes les perturbations, en courant et en tension :

- Solutions classiques (anciennes méthodes) ;
- Solutions modernes (méthodes récentes à base d'électronique de puissance).

1.1 : Méthodes traditionnelles pour combattre les harmoniques :

Les harmoniques sont des altérations du courant électrique susceptibles d'avoir des conséquences néfastes sur les infrastructures électriques et les yeux. Les méthodes traditionnelles de lutte contre les harmoniques comprennent :

1.1.1 : Rééquilibrage des courants du réseau électrique :[7]

Une étape essentielle pour diminuer les déséquilibres de courant dans un réseau électrique basse tension est d'équilibrer la répartition des charges sur les trois phases. Effectivement, l'inégale connexion de charges monophasées et biphasées sur les différentes phases peut engendrer des déséquilibres considérables, ce qui peut entraîner une série de problèmes préjudiciables au réseau.

1.1.2 : Compensation de la puissance réactive :[7]

Les moteurs asynchrones et plus récemment les dispositifs à base d'électronique de puissance sont les principaux consommateurs de puissance réactive. L'objectif des techniques de compensation est d'accroître la puissance. La meilleure solution traditionnelle est de disposer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. Cette méthode présente un inconvénient : la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et ne s'ajuste pas à l'évolution du besoin.

1.1.3 : Ajout d'une inductance de lissage du courant :[8]

On utilise souvent l'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants pour réduire les harmoniques de rangs élevés, car leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ainsi, ces inductances permettent de diminuer la distorsion de la tension au point de raccordement, mais entraînent également une charge supplémentaire.

1.1.4 : Utilisation d'une série d'inductance (selfs) :

La méthode employée pour les entraînements à vitesse variable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés implique l'introduction d'une inductance série en amont d'une charge non linéaire au préalable. Cependant, la self a une efficacité restreinte. Il est nécessaire d'installer une charge non linéaire. On divise approximativement la distorsion en courant par deux.

1.1.5 : Couplage spécial de transformateurs :[9]

- **Transformateur triangle étoile:**

Considérons un transformateur triangle – étoile, alimentant des charges non linéaires, identiques, connectées entre phases et neutre (figure 3.1). Chacune de ces charges génère un courant harmonique de rang 3. Rappelons que ces courants (I_3), harmoniques de rang 3, sont égaux. Les courants harmoniques de rang 3 dans les enroulements primaires du transformateur sont donc également identiques entre eux, et notés I'_3 . En chaque nœud du triangle du primaire, les courants harmoniques de rang 3 se compensent, et le courant dans la ligne ne contient donc pas d'harmonique de rang 3. Les courants harmoniques de rang 3 ne sont donc pas transmis au réseau. Par contre, ces courants circulent dans les enroulements primaires du transformateur et provoquent donc un échauffement supplémentaire. Par ailleurs, la circulation de ces courants est responsable d'une distorsion de la tension au primaire, en raison des impédances des enroulements du transformateur.

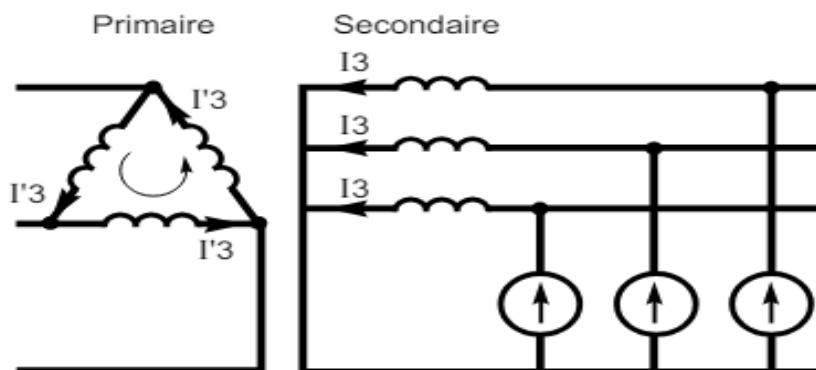


Figure 3.1 courants harmoniques de rang 3 dans un transformateur triangle - étoile

- **Transformateur à secondaire zigzag :**

Considérons un transformateur à secondaire zigzag, alimentant des charges non linéaires, identiques, connectées entre phases et neutre (figure 3.2). Chacune de ces charges génère un

courant harmonique de rang 3 (représenté I_3 dans le schéma). Rappelons que ces courants harmoniques de rang 3 sont égaux.

On voit aisément sur cette figure que les ampères-tours sur une même colonne a secondaire s'annulent. Il en résulte qu'aucun courant harmonique de rang 3 ne circule au primaire.

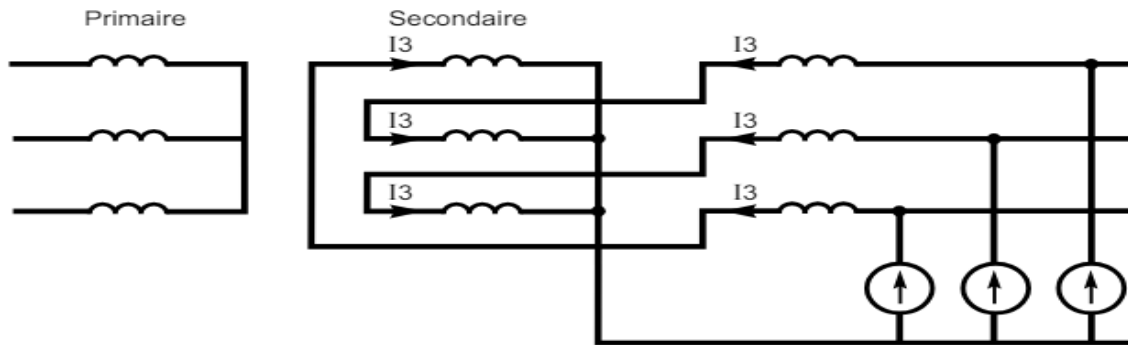


Figure 3.2 courants harmoniques de rang 3 dans un transformateur à secondaire zigzag.

1.1.6 : Transformer les charges linéaires et non linéaires de manière distincte :

On peut obtenir une atténuation harmonique ciblée en utilisant des transformateurs distincts pour les charges linéaires (traditionnelles) et non linéaires. En général, les charges linéaires produisent de faibles harmoniques, tandis que les charges non linéaires, comme les appareils électroniques, sont des sources majeures de distorsion harmonique. Pour chaque groupe de charge, des transformateurs distincts offrent la possibilité d'appliquer des stratégies de filtrage ou de compensation harmonique spécifiques.

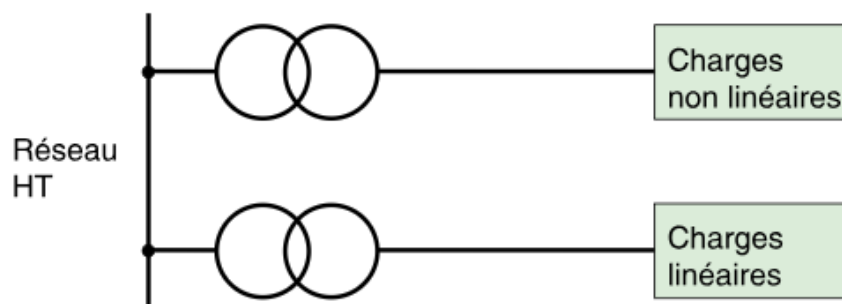


Figure 3.3 Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé

1.1.7 : Mise en place préalable des charges polluantes :

Les charges polluantes sont placées plus près de la source d'alimentation ou "en amont" du

réseau, ce qui réduit la longueur du câble auquel elles sont reliées. L'impédance du câble diminue, ce qui diminue la baisse de tension et la production de chaleur due aux courants harmoniques générés par les émissions de polluants.

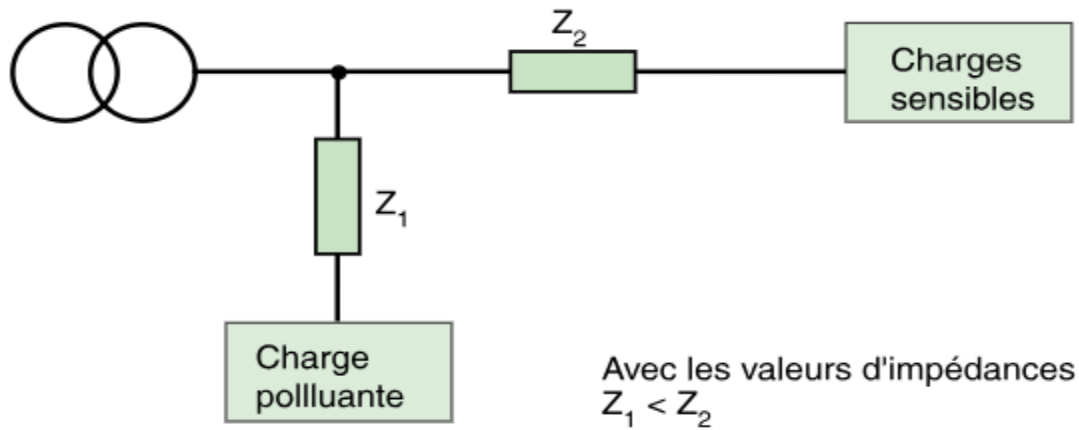


Figure 3.4 Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires

1.1.8 : Filtrage passif

1.1.8.1 : Principe de fonctionnement : [10]

Le filtrage passif consiste à ajuster l'impédance du réseau localement pour faire dévier les courants harmoniques et, par conséquent, éliminer les tensions harmoniques qui en découlent. Les filtres comprennent des éléments capacitifs et inductifs qui sont placés de manière à créer une résonance série à une fréquence spécifique. Pour élaborer ce genre de filtre, il est essentiel d'avoir une compréhension approfondie des caractéristiques et du comportement du réseau sous l'influence des harmoniques. En général, une telle exigence de conception est remplie grâce à l'utilisation d'un logiciel de simulation. Les différents types de filtre passif sont sélectionnés en fonction de la recherche d'une atténuation harmonique.

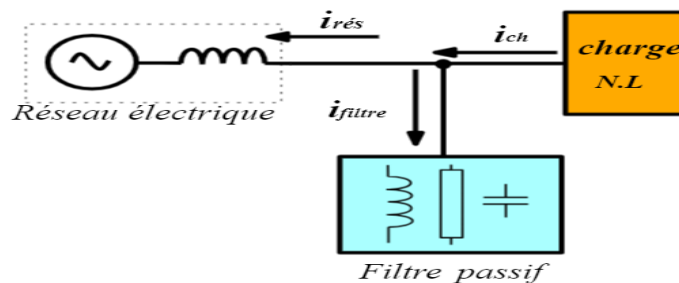


Figure 3.5 Raccordement d'un filter passif

1.1.8.2 : Classification des filtres passifs :[10]

Il est concevable de classer les filtres passifs selon leur emplacement sur le réseau, leur mode d'association, leur degré d'amortissement de même que leur fréquence de résonance.

Il est possible de classer les filtres passifs en deux catégories, à savoir les filtres parallèles et les filtres séries.

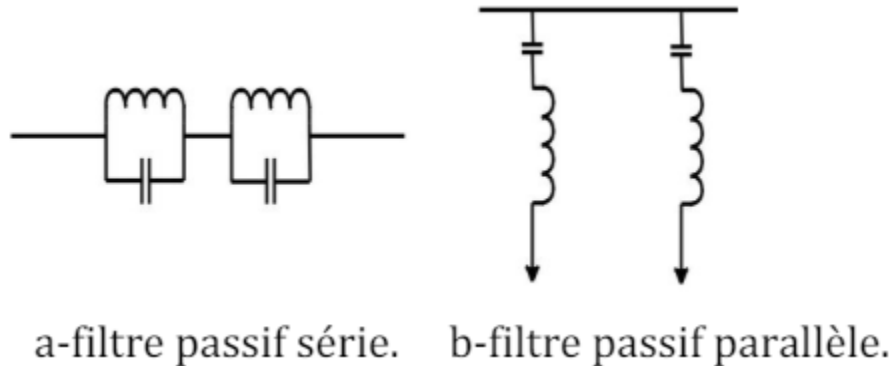


Figure 3.6 Schéma de principe d'un filtre passif

- **Filtre passif série:**

Pour réduire les harmoniques produites par les charges non linéaires, il est possible d'incorporer un filtre passif série (voir figure 3.6.a) dans l'alimentation à la ligne d'entrée. Ce filtre offre une impédance élevée pour permettre la circulation des harmoniques de la source vers la charge non linéaire. La série de filtres passifs est connectée à une fréquence spécifique, ce qui lui confère une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. D'après les caractéristiques physiques de L et C sélectionnées, il y a souvent une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée.

- **Filtre parallèle passif :**

On utilise uniquement le filtre parallèle du côté alternatif pour deux raisons :

-Il ne transporte que le courant harmonique et a une connexion avec la terre.

-Lorsqu'il est utilisé à la fréquence fondamentale, il présente l'avantage de générer une puissance réactive.

Afin d'obtenir une efficacité similaire au filtre série, le filtre parallèle est nettement plus abordable.

Le filtrage parallèle est principalement employé pour les charges qui génèrent des courants

harmoniques, tandis que le filtrage série est utilisé pour les charges qui génèrent des tensions harmoniques.

1.1.8.3 : Différents types des filtres passifs parallèles :[10]

- **Anti-harmonique inductance :**

Il est possible d'installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée dans cette première solution.

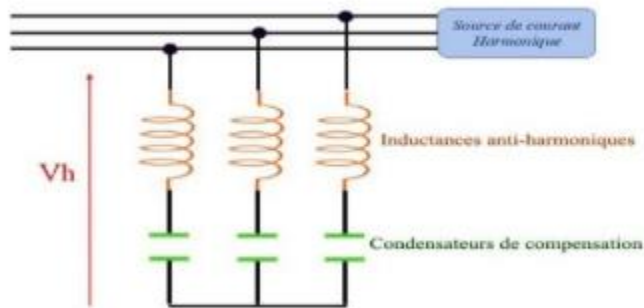


Figure 3.7 Raccordement d'une inductance anti-harmonique

L'objectif principal de ce genre de filtre est de préserver les batteries de condensateurs d'une surintensité causée par les harmoniques. De plus, cela entraîne une diminution des tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Souvent, cela aide à diminuer les valeurs d'impédance harmonique du réseau, étant donné que le point d'injection se trouve à proximité de la fréquence d'accord, ce qui entraîne une diminution des tensions harmoniques sur le réseau.

- **Filtre résonant passif :**

Le fonctionnement des filtres résonants consiste à avoir une impédance très faible lorsqu'un courant harmonique d'un rang spécifique traverse leur filtre. Un filtre passif résonant est un circuit RLC en série qui est associé à la fréquence d'une harmonique plus ou moins basse. Il est fréquent d'installer plusieurs filtres résonants en parallèle, en fonction des différents rangs harmoniques à filtrer.

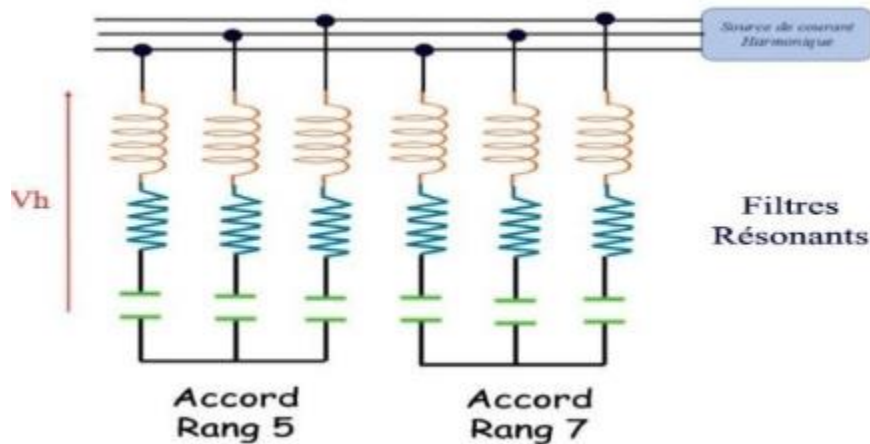


Figure 3.8 Installation de filtre résonant.

L'impédance du filtre passif résonant est donnée par l'expression suivante :

$$Z = R + j(LC\omega^2 - 1/C\omega)$$

La fréquence d'accord peut être définie par :

$$Fr = \frac{1}{2\pi * \sqrt{LC}}$$

Et le facteur de qualité est donnée par :

$$Fq = 2\pi * Fr * \frac{L}{R}$$

A la fréquence de résonance l'impédance du filtre est réduite à R.

Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance ou de la capacité ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble.

Pour un tel filtre le facteur de qualité est compris entre 30 et 100.

- **Filtre amorti passif :**

Les filtres amortis sont employés afin de filtrer en même temps des harmoniques du rang supérieur, et non une harmonique d'un rang spécifique. Il est conseillé lorsque les exigences ne sont pas trop élevées. On peut également le nommer un filtre passe haut.

Le filtre passif amorti est un dispositif RLC qui consiste à connecter une capacité à un ensemble composé de la résistance d'amortissement et d'une inductance.

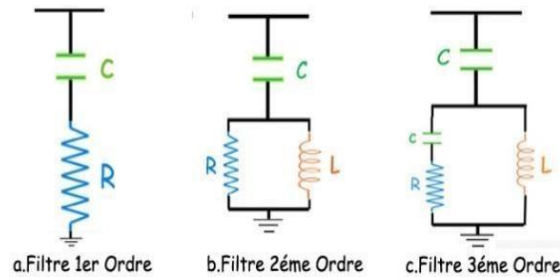


Figure 3.9 Filtres amortis passe-haut

Comme pour le filtre passif résonant, on détermine la fréquence d'accord en utilisant la formule. En revanche, son critère de qualité est représenté par :

$$Fq = \frac{R}{L} * \frac{1}{2\pi * Fr}$$

L'amortisseur est moins sensible aux fluctuations de ses composants qu'un résonant. Il est essentiel de filtrer les rangs harmoniques inférieurs à f_r lorsqu'on utilise des filtres amortis. En outre, lors de la sélection des filtres, il est fréquent d'utiliser plusieurs filtres résonants pour les rangs harmoniques inférieurs ainsi qu'un filtre amorti, tous montés en parallèle avec la charge polluante.

- Le premier ordre de filtre n'est pas souvent employé, car il nécessite une capacité importante et présente des pertes excessives à la fréquence fondamentale.
- La qualité de filtrage du filtre de deuxième ordre est supérieure, mais il présente des pertes plus importantes à la fréquence fondamentale par rapport aux filtres de troisième ordre.
- Le filtre de troisième ordre présente une dégradation significative des pertes à la fréquence fondamentale par rapport à celui du deuxième ordre.

1.1.8.4 : Les bénéfices et les désavantages des filtres passifs :[10]

Le filtrage passif s'est déjà largement avéré efficace dans le domaine industriel en raison de son prix abordable, de son efficacité et de sa capacité à s'adapter à des réseaux de grande puissance.

Cependant, il comporte les désavantages suivants :

- Lorsque deux filtres passifs sont placés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, cela entraîne la circulation de courants harmoniques très importants entre eux, ce qui entraîne rapidement leur destruction. La fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre, ce qui rend ce cas facile à rencontrer.

Il est impératif d'éviter toute connexion entre des filtres harmoniques de même rang sur un réseau.

- L'utilisation simultanée d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs entraîne une contrainte qui peut entraîner la destruction de ces machines.
- Si plusieurs rangs harmoniques doivent être filtrés, il faut appliquer autant de filtres accordés sur les rangs consécutifs. Il est possible de résoudre ce problème en utilisant un filtre à large bande qui réduit plusieurs rangs harmoniques,
- Ce qui entraîne une diminution du facteur d'atténuation. Il est essentiel de mener une étude approfondie et précise avant d'installer des filtres passifs sur un réseau. De plus, la connaissance de tous les paramètres du réseau, indispensables à l'étude, n'est pas toujours réalisable lorsqu'il est de grande taille.
- Finalement, l'utilisation de filtres passifs pour stopper la résonance dans les systèmes de puissance peut entraîner des résonances supplémentaires indésirables qui pourraient entraîner la destruction de ces filtres. La solution pour améliorer efficacement le fonctionnement du réseau est l'amortissement utilisant la commande et l'électronique de puissance.

1.2 : Méthodes modernes contre les harmoniques :

Étant donné l'augmentation des effets négatifs des courants harmoniques avec l'impédance cumulative des câbles et des sources, il est évident que la solution consiste à restreindre l'impédance totale pour diminuer la distorsion de la tension et l'échauffement. Étant donné que le THDU repose essentiellement sur le composant inductif et donc sur la longueur des câbles, il est évident que cette solution n'est pas très performante et ne permet que de réduire l'échauffement. Afin d'éviter cet inconvénient, la solution la plus couramment utilisée est le filtrage des harmoniques.

1.2.1 : Les filtres actifs :

Le filtrage actif a pour objectif de produire des courants ou des tensions afin de compenser les harmoniques qui perturbent le bon fonctionnement des équipements et des installations électriques. Le filtrage actif permet donc de diminuer les courants (tensions) harmoniques en injectant des courants (tensions) harmoniques d'amplitudes identiques dans la source perturbatrice, mais en opposition de phase grâce à un pont onduleur. Le courant harmonique de la charge non linéaire est mesuré afin de déterminer le courant (tension) à injecter pour le compenser.

Les interrupteurs sont électriquement réversibles. Les composants semiconducteurs qui les composent sont commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ils ont la possibilité d'être des MOSFET, des IGBT ou des GTO. Les MOSFET sont utilisés pour les puissances faibles et peuvent commuter à des fréquences très élevées, tandis que les IGBT sont utilisés pour les puissances élevées et les fréquences de commutation élevées. Les GTO sont utilisés pour les puissances très élevées, mais leur fréquence de commutation est limitée par rapport à la fréquence de commutation autorisée.

1.2.1.1 : Classification des filtres actifs :[11]

Il y a une grande diversité de types de filtres actifs dans la littérature. Selon le nombre de phases (Monophasés ou Triphasés), la technologie de l'onduleur (avec ou sans neutre raccordé) et la topologie (onduleur de tension ou de courant), ils sont classés de diverses façons.

- **Filtre actif parallèle (FAP) :[11]**

Selon la figure (3.10), le filtre actif, qui est connecté en parallèle au réseau, est généralement utilisé comme un générateur de courant. Les courants perturbateurs injectés dans le réseau sont similaires à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec eux.

Ainsi, le courant du côté du réseau est sinusoïdal. L'objectif principal du filtre actif parallèle (FAP) est de bloquer la circulation des courants perturbateurs, générés par des charges polluantes, à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

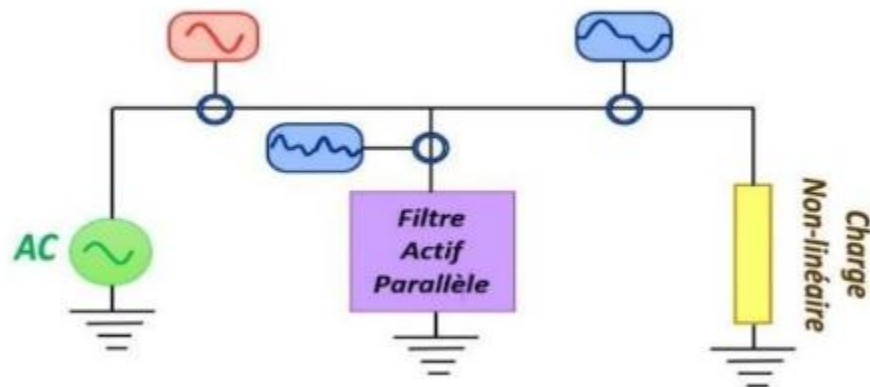


Figure 3.10 Schéma de principe du filtrage actif parallèle.

- **Filtre actif série :[11]**

Le filtre actif série protège la charge contre les éventuelles tensions perturbées provenant de la source, tout en empêchant la circulation des courants pollués à travers l'impédance du réseau, ce

qui garantit une tension sinusoïdale continue pour la charge à protéger. Il joue le rôle d'une source de tension contrôlable entre le réseau et la charge à protéger (figure 3.11).

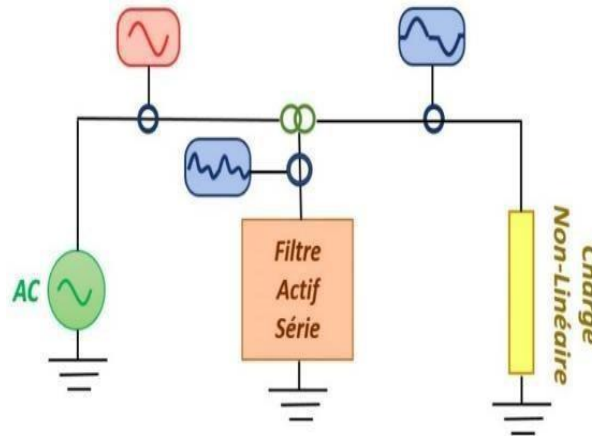


Figure 3.11 Schéma de principe du filtrage actif série.

1.2.2 : La structure hybride du filtrage :

La combinaison de filtre passif et de filtre actif est appelée filtre hybride. Les harmoniques de rangs élevés sont éliminées par les filtres passifs, tandis que les autres rangs d'harmonique sont traités par le filtre actif. Différents types d'association de filtres actifs et passifs sont alors identifiés, les plus étudiés étant [11] :

La combinaison de filtres passifs "parallèles" avec un filtre actif "série".

Le filtre actif « série » est relié en série à des filtres passifs « parallèles ».

Le filtre actif « parallèle » est associé à un filtre passif « parallèle ».

1.2.2.1 : Ensemble de filtres actifs en série et passifs parallèles :[11]

En utilisant cette combinaison, le filtre actif série assure la protection du réseau contre la circulation des courants harmoniques et contraint ces derniers à passer par les filtres passifs qui sont assignés à leurs fréquences (voir figure 3.12).

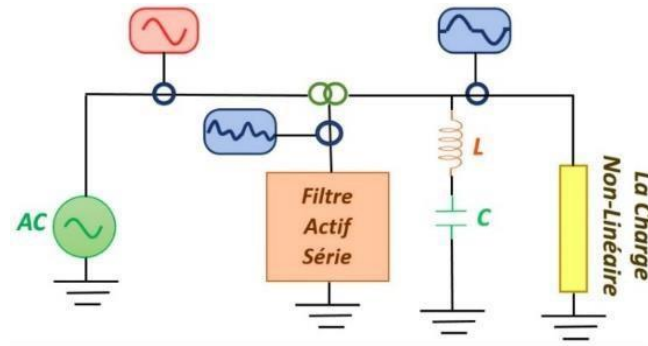


Figure 3.12 Filtre actif série et filtre passif parallèle.

1.2.2.2 : Combinaison entre filtre actif série et filtre passif parallèle, en série : [11]

Dans cette configuration (figure 3.13), les deux filtres sont en série, ce qui a pour avantage de réduire le dimensionnement du filtre actif série en raison de la faible circulation de courant.

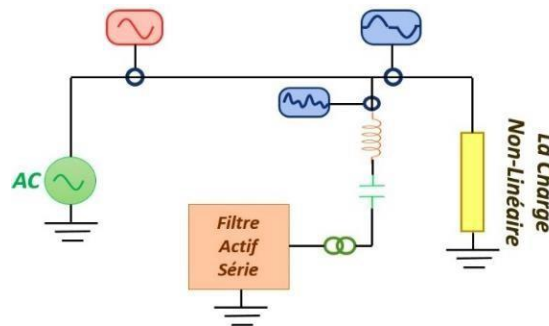


Figure 3 13 Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

1.2.2.3 : Combinaison entre un filtre parallèle actif et un filtre passif parallèle : [11]

Il s'agit d'un filtre actif parallèle associé à un ou plusieurs filtres passifs accordés (voir figur3.14). Il est possible de supposer rapidement que ce dernier est plus efficace pour éliminer plusieurs fréquences harmoniques, y compris celles du filtre actif parallèle en combinaison, mais aussi pour la compensation en énergie et la régulation de la tension de la liaison continue.

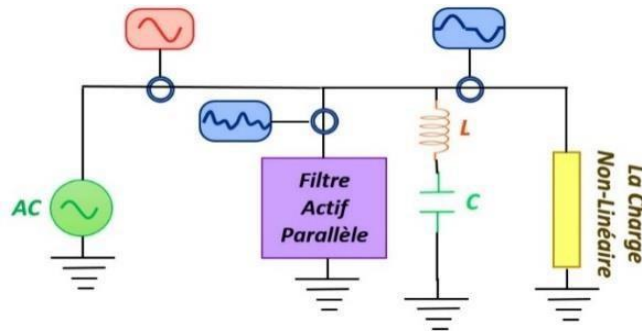


Figure 3.14 Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle

1.2.3 : Avantages et inconvénients des filtres actifs :

➤ Les Avantages :

Le filtre actif présente de multiples bénéfices

-Il s'ajuste automatiquement en fonction des changements dans les charges et le réseau

-Il est capable de compenser différents rangs harmoniques (dans la mesure de sa capacité de bande passante)

-Il restreint son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun danger de destruction.

-Le filtre passif ne présente plus le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau.

-Les condensateurs de compensation peuvent être protégés grâce à un compensateur actif qui élimine les courants harmoniques engendrés par une charge. De la même manière, un dispositif actif de compensation de tension de type série peut préserver les condensateurs ou les filtres passifs contre une distorsion de tension provenant du réseau amont.

➤ Les inconvénients :

-Cette méthode de filtrage reste extrêmement onéreuse.

-Ce genre de filtre utilise des éléments électroniques extrêmement sensibles qui ne conviennent pas à l'environnement industriel.

-La suppression des harmoniques nécessite une grande quantité d'énergie, ce qui entraîne une quasi-absorption de l'économie réalisée par les composants du filtre.

-Demande des étapes équilibrées afin d'améliorer le rendement.

1.2.4 : Comparaisons entre le filtre passif et le filtre actif :[17]

Caractéristiques	Filtre passif	Filtre actif
Adaptation à l'évolution de la charge et du réseau	Non	Oui, se fait automatique.
Limite de compensation de rang harmonique	-Le filtre résonant ne compense qu'un rang harmonique à la fois. -Le filtre amorti compense dans la limite de sa bande passante.	Compense dans la limite de sa bande passante qui est déterminée par la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs de son onduleur.
Risque de résonance entre le filtre et le réseau	Oui	Non
Compensation de puissance réactive	Oui	Oui, mais à coût plus élevé que pour le filtre passif.
Possibilité de surcharge lorsque le courant harmonique dépasse le dimensionnement du filtre	Oui	Non
Compensation dans les réseaux haute puissance	Oui	Oui, mais à coût très élevé

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons expliqué les solutions et les méthodes d'élimination des harmoniques, y compris les solutions traditionnelles et modernes, et nous avons donné un aperçu des filtres et des meilleurs filtres pour l'élimination des harmoniques.

Chapitre IV

Analyse harmonique

dans un réseau

électrique par le

Logiciel d'analyse

d'harmonique – Etap :

Etude de cas

Introduction :

Le traitement des harmoniques pour les installations est essentiel tant pour les installations existantes que pour les nouvelles. Le traitement des harmoniques nous permet d'améliorer la qualité de l'énergie à l'aide du logiciel ETAP. Nous allons étudier les harmoniques dans deux installations et améliorer leur qualité de l'énergie, ce qui fera l'objet de ce chapitre.

1 : Généralité sur logiciel ETAP :[12]

ETAP offre une gamme complète de logiciels entièrement intégrés dans le domaine du génie électrique. Son aspect modulaire permet d'être personnalisé pour répondre aux besoins de toute entreprise, que ce soit pour des systèmes de petite taille ou de grande envergure. Afin de réaliser une analyse cohérente, le logiciel ETAP est sélectionné pour le projet. Ce logiciel pratique facilite la modélisation des sources harmoniques. D'autres types d'analyses peuvent également être réalisés par ETAP, comme mentionné ci-dessous. ETAP est effectivement un logiciel complètement intégré pour analyser les systèmes d'alimentation électrique AC (courant alternatif) et DC (courant continu). De nombreuses entreprises et services publics d'électricité dans le monde entier l'emploient pour concevoir, analyser, entretenir et exploiter les systèmes d'alimentation électrique.

Un élément essentiel d'ETAP est sa base de données centralisée. Cette base de données centralisée contient toutes les analyses réalisées à l'aide du logiciel. Cela assure une documentation précise de toutes les études effectuées, des résultats obtenus et des informations du système électrique. Il est possible de faciliter l'accès à ces données en utilisant Microsoft Accès, ce qui facilite l'extrait des informations requises pour des analyses ultérieures ou des rapports. Le module "ETAP Real-Time" est également proposé par ETAP, qui est une série de logiciels qui permet de surveiller en permanence, de simuler et d'optimiser les systèmes électriques, les processus de fabrication et de gestion en temps réel.

Avec ETAP Real-Time, les utilisateurs ont la possibilité de suivre en temps réel les performances du système électrique, de créer des scénarios pour évaluer les conséquences des changements ou des événements à venir, et d'optimiser les opérations afin d'optimiser l'efficacité, diminuer les pertes et accroître les profits. Pour récapituler, ETAP est un logiciel performant et polyvalent employé dans le secteur de l'énergie électrique afin de concevoir, analyser et gérer les systèmes d'alimentation électrique.

Grâce à son système centralisé de base de données et à son module Real-Time, cet outil est parfait pour les ingénieurs qui se concentrent sur les réseaux électriques. ETAP Star propose une approche innovante pour gérer la coordination des appareils, la sélectivité de la protection et les tests dans des régimes permanents et dynamiques. Elle utilise des modèles intelligents unifilaires, des bibliothèques de dispositifs étendues et une base de données tridimensionnelle intégrée.

Un élément essentiel de cette approche est le système ETAP Automatic Relay Testing and Transient Simulator (ARTTS). Il regroupe en un seul ensemble trois appareils de test de haute précision. Les relais de protection, comme les relais de distance, ainsi que les compteurs d'énergie et les transducteurs, peuvent être testés avec ARTTS. L'emploi d'ARTTS permet d'effectuer des tests précis, de simuler des conditions transitoires et de régler les relais. Pour réaliser ces tests et simulations, les outils de système d'alimentation ARTTS font appel à des technologies matérielles et logicielles de pointe. Ils offrent la possibilité de confronter la réelle réponse des relais testés avec les informations fournies par le fabricant. Cette comparaison permet de mesurer les résultats des relais et de repérer d'éventuels problèmes de coordination ou de sélection, et à assurer le bon déroulement du système de sécurité. Pour résumer, l'utilisation de schémas unifilaires intelligents, de bibliothèques de dispositifs étendues et d'une base de données tridimensionnelle intégrée est essentielle pour assurer la coordination des appareils, la protection de la sélectivité et les tests. De son côté, le système ARTTS offre des caractéristiques avancées pour tester, simuler et calibrer les relais de protection, les compteurs d'énergie et les transducteurs. Les ingénieurs ont la possibilité de concevoir et d'analyser de manière efficace la protection du sol dans les systèmes électriques grâce au module Ground Grid Systems dans ETAP. Il fait appel à une technologie La technologie 3D avancée s'intègre aux schémas unifilaires, offrant ainsi aux ingénieurs la possibilité de visualiser les systèmes de mise à la terre et d'utiliser de manière transparente les résultats des analyses de court-circuit. L'analyse des circuits de puissance et de contrôle est également incluse dans un programme d'analyse électrique unique, avec ETAP. Les dispositifs de contrôle tels que les solénoïdes, les relais, les contacts contrôlés, les contacts multi-séquences et les actionneurs peuvent être simulés à l'aide du diagramme du système de contrôle (CSD), y compris les conditions d'appel. Les tensions d'activation et de désactivation, les pertes et les flux de courant peuvent être mesurés à tout moment

par le CSD, ainsi que les alertes globales marginales et critiques. On peut utiliser une grande bibliothèque d'équipements pour modéliser et effectuer une simulation rapide de l'action des relais liés aux verrouillages de contrôle après des délais précis. Une interface utilisateur graphique conviviale est proposée par ETAP, ce qui est apprécié par de nombreux ingénieurs électriciens. Les schémas électriques unifilaires peuvent être superposés avec les cartes géographiques liées aux systèmes de production, de transmission et de distribution d'électricité grâce au module ETAP GIS Map. Cela assure la synchronisation des données pertinentes sur les équipements électriques issues des systèmes d'information géographique (SIG) dans ETAP, tout en préservant leur lien. En outre, il est possible d'intégrer les systèmes de panneaux avec les schémas unifilaires, ce qui représente une autre caractéristique distinctive d'ETAP.

La modélisation des appareils électriques utilisés dans les systèmes électriques réels est également très flexible grâce à ETAP. La modélisation de la plupart des appareils dans ETAP est facile, ce qui simplifie l'analyse et la simulation précises des systèmes électriques.

1.2 : Module Analyse Harmonique :[12]

Il s'agit d'un module d'analyse harmonique qui permet d'évaluer les effets des harmoniques dans un réseau électrique. Les harmoniques constituent un ensemble de composantes sinusoïdales additionnelles dans le courant ou la tension d'un système électrique, en plus de la fréquence principale. En général, ces harmoniques proviennent de charges non linéaires comme les convertisseurs de puissance, les variateurs de vitesse, les onduleurs, et ainsi de suite. Il est crucial de réaliser une analyse harmonique car les harmoniques peuvent engendrer divers problèmes tels que des pertes d'énergie, des surcharges des équipements, des distorsions du courant et de la tension, des interférences électromagnétiques, et bien d'autres encore. Grâce aux modules d'analyse harmonique, les ingénieurs peuvent simuler et analyser ces effets afin de prendre des mesures adéquates pour les réduire.

ETAP propose une large gamme de modes d'étude permettant d'effectuer différents types d'analyse de systèmes électriques. Ces modes comprennent :[13]

Load Flow Analysis (Analyse du flux de charge) : ce mode d'étude simule le flux d'énergie électrique au sein d'un système, en prenant en compte des facteurs tels que la tension, le courant et le flux de puissance

Short-Circuit Analysis (Analyse des courts-circuits) : ce mode calcule les fonctions de défaut conformément à la série C37 des normes ANSI/IEEE, en fournissant des informations détaillées sur les courants de court-circuit et les fonctions de défaut

Arc Flash Analysis (Analyse des arcs électriques) : ce mode d'étude évalue le potentiel d'arcs électriques dans un système, en prenant en compte des facteurs tels que les courants de défaut, la tension et la distance par rapport au défaut

Motor Acceleration Analysis (Analyse de l'accélération du moteur) : ce mode simule l'accélération des moteurs dans un système, en prenant en compte des facteurs tels que les caractéristiques du moteur et l'impédance du système

Harmonic Analysis (Analyse harmonique) : ce mode d'étude analyse le contenu harmonique d'un système, en identifiant les problèmes potentiels liés à la distorsion harmonique

Transient Stability Analysis (de la stabilité transitoire) : ce mode simule le comportement transitoire d'un système après un défaut ou une autre perturbation, en évaluant la stabilité du système

Star – Protective Device Coordination (Coordination des dispositifs de protection en étoile) : ce mode d'étude coordonne les dispositifs de protection d'un système, en s'assurant qu'ils fonctionnent correctement et en toute sécurité

DC Load Flow Analysis (Analyse du flux de charge DC) : ce mode simule le flux de courant continu dans un système, en tenant compte de facteurs tels que la tension, le courant et le flux de puissance

DC Short-Circuit Analysis (Analyse des courts-circuits DC) : ce mode d'étude calcule les fonctions de défaut pour les systèmes à courant continu, en fournissant des informations détaillées sur les courants de court-circuit et les fonctions de défaut

Battery Sizing and Discharge Calculations (Calculs de dimensionnement et de décharge des batteries) : ce mode d'étude évalue les performances des batteries dans un système, en tenant compte de facteurs tels que la capacité, les taux de décharge et les exigences du système

Unbalanced Load Flow Analysis (Analyse du flux de charge déséquilibré) : ce mode simule le flux d'énergie électrique dans des systèmes déséquilibrés, en tenant compte de facteurs tels que la tension, le courant et le flux d'énergie

Time Domain Load Flow Analysis (Analyse du flux de charge dans le domaine temporel) : ce mode d'étude simule le flux d'énergie électrique dans un système au fil du temps, en tenant compte de facteurs tels que la tension, le courant et le flux d'énergie

Unbalanced Short-Circuit Analysis (Analyse de court-circuit déséquilibré) : ce mode d'étude calcule les fonctions de défaut pour les systèmes déséquilibrés, en fournissant des informations détaillées sur les courants de court-circuit et les fonctions de défaut

Voltage Stability Analysis (Analyse de la stabilité de la tension) : ce mode d'étude évalue la stabilité d'un système dans diverses conditions de fonctionnement, en tenant compte de facteurs tels que la tension, le courant et le flux d'énergie

Optimal Power Flow Analysis (Analyse du flux d'énergie optimal) : ce mode d'étude optimise le fonctionnement d'un système pour obtenir le flux d'énergie le plus efficace, en tenant compte de facteurs tels que la tension, le courant et le flux d'énergie

Reliability Assessment (Évaluation de la fiabilité) : Ce mode d'étude évalue la fiabilité d'un système, en tenant compte de facteurs tels que les taux de défaillance des composants et la configuration du système

Optimal Capacitor Placement (Placement optimal des condensateurs) : Ce mode d'étude optimise le placement des condensateurs dans un système pour obtenir le flux de puissance le plus efficace, en tenant compte de facteurs tels que la tension, le courant et le flux de puissance

Switching Optimization (Optimisation de la commutation) : Ce mode d'étude optimise le fonctionnement des dispositifs de commutation dans un système, en tenant compte de facteurs tels que la tension, le courant et le flux de puissance

FMSR Analysis (Analyse FMSR) : Ce mode d'étude évalue les performances des systèmes de surveillance des défauts et de commutation, en tenant compte de facteurs tels que la détection des défauts et les temps de commutation

Switching Sequence Management (Gestion de la séquence de commutation) : Ce mode d'étude gère la séquence des opérations de commutation dans un système, garantissant que les dispositifs fonctionnent correctement et en toute sécurité

Contingency Analysis (Analyse des contingences) : Ce mode d'étude évalue les performances d'un système dans divers scénarios d'urgence, en tenant compte de facteurs tels que les courants de défaut et la configuration du système

Rail Traction Power (Puissance de traction ferroviaire) : ce mode d'étude simule le fonctionnement des systèmes de traction ferroviaire, en prenant en compte des facteurs tels que la tension, le courant et le flux de puissance

UnderGround Raceway Systems (Systèmes de canalisations souterraines) : ce mode d'étude simule le fonctionnement des systèmes de canalisations souterraines, en prenant en compte des facteurs tels que la tension, le courant et le flux de puissance



Figure 4.1 Barres d'outils du mode ETAP pour diverses analyses du système électrique.

1.3 : Barre D'outils : [8]

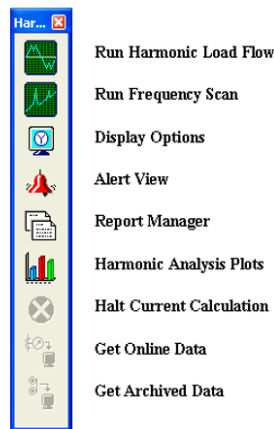


Figure 4.2 Barre d'outils de l'étude harmonique dans ETAP

➤ **Exécuter l'écoulement de puissance :**

Lorsque vous êtes en mode étude d'analyse harmonique, sélectionnez un cas d'étude dans la barre d'outils qui s'affiche. Pour réaliser une étude de flux de charge harmonique, veuillez cliquer sur le bouton Exécuter le flux de charge harmonique. Si le nom du fichier de sortie est défini sur Invite dans la zone de liste Rapport de sortie, une boîte de dialogue vous permettra de définir le nom du rapport de sortie. Une fois que le calcul sera terminé, les résultats de l'analyse du flux de charge harmonique seront présentés sur le diagramme unifilaire et seront visibles dans le texte du rapport de sortie ainsi que dans les formats de tracé.

➤ **Exécuter un balayage de fréquence :**

Une fois que vous avez choisi un cas d'étude dans la barre d'outils de cas d'étude, vous pouvez cliquer sur le bouton Exécuter - Analyse de fréquence afin de mener une étude d'analyse de fréquence harmonique. Si l'invite est définie dans la zone de liste Rapport de sortie, une boîte de dialogue vous demandera le nom du fichier de sortie. Les résultats de l'étude de flux de charge harmonique sont présentés sur le diagramme unifilaire et peuvent être consultés dans le texte du rapport de sortie et dans les formats de tracé une fois que le calcul est terminé.

➤ **Options d'affichage :**

Cliquez sur le bouton Options d'affichage pour personnaliser les options d'affichage des annotations du diagramme unifilaire dans le mode Etude d'analyse harmonique. Voir Options d'affichage pour plus d'informations.

➤ **Vue d'alerte :**

Ce bouton permet à l'utilisateur d'accéder à la vue des alertes une fois qu'il a réalisé une analyse de l'écoulement de puissance harmonique ou un balayage de fréquence harmonique. Cette vue affiche tous les équipements présentant des violations critiques et marginales en fonction des paramètres du cas d'étude (norme IEEE519 dans ETAP).

➤ **Gestionnaire de rapports :**

Cliquez sur le bouton Report Manager pour sélectionner un format et afficher le rapport de sortie de l'analyse harmonique. Les rapports d'analyse harmonique sont fournis sous deux formats : fichiers texte ASCII et Crystal Reports.

➤ **Graphiques d'analyse harmonique :**

Cliquez sur le bouton Tracés d'analyse harmonique pour sélectionner et tracer les courbes du fichier de tracé de sortie sélectionné. Le nom du fichier de tracé est le même que celui du fichier texte de sortie affiché dans la zone de liste Rapport de sortie. Les fichiers de tracé pour le flux de charge harmonique ont pour extension. hfp.

1.4 : Éditeur de cas d'étude d'analyse harmonique :[14]

Les variables de contrôle de solution, les conditions de chargement du système, les options de rapport, la modélisation de source harmonique et la sélection du tracé des composants sont incluses dans l'éditeur de cas d'étude d'analyse harmonique. Pour chaque type d'étude, Power Station vous offre la possibilité de créer et d'enregistrer un nombre illimité de cas d'étude. Comme dans tous les autres domaines d'étude, il est aisé de passer de cas d'étude d'analyse harmonique à cas d'étude d'analyse harmonique. Cette option a été développée dans le but de structurer vos efforts d'étude et de vous permettre de gagner du temps.

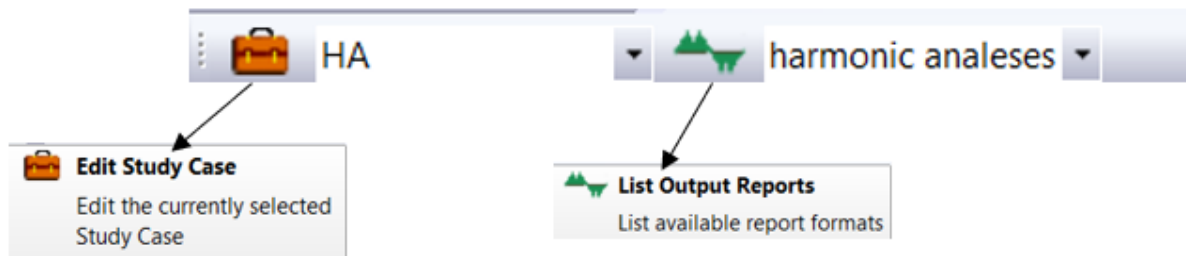


Figure 4.3 Barre d'outils de l'éditeur de cas d'étude.

Pour générer un cas d'étude d'analyse harmonique, rendez-vous dans l'éditeur de projet, sélectionnez le sous-dossier Analyse harmonique dans le dossier Cas d'étude, puis cliquez sur le bouton droit pour créer un nouveau cas d'étude. Ainsi, le programme générera un nouveau cas d'étude, qui est une copie du cas d'étude initial, et l'insérera dans le sous-dossier Analyse harmonique.

Page Info :

Vous avez la possibilité de définir les paramètres généraux de la solution, les conditions de chargement, les options de rapport et les données du cas d'étude sur cette page.

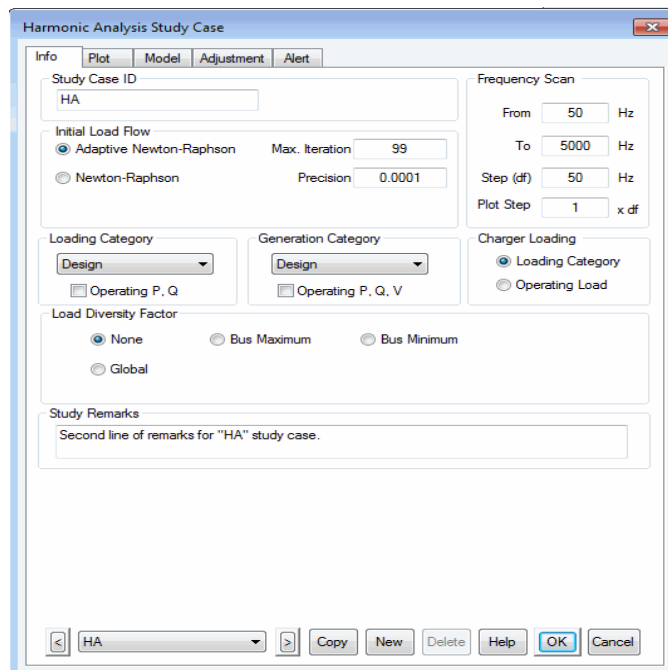


Figure 4.4 Page d'informations de l'éditeur de cas d'étude.

Page plot :

Choisissez les éléments que vous désirez présenter sur le diagramme d'une ligne et au format Tracé. On utilise les sélections pour le flux de charge harmonique et les examens d'acquisition à fréquence harmonique.

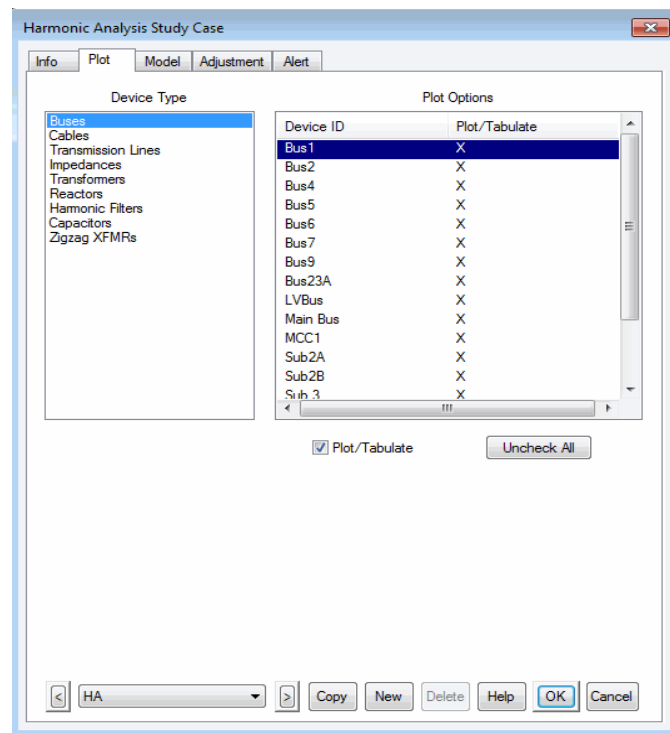


Figure 4.5 Page de tracé de l'éditeur de cas d'étude

Page Model :

Cette page vous offre la possibilité de sélectionner les techniques de modélisation adaptées à divers types de composants.

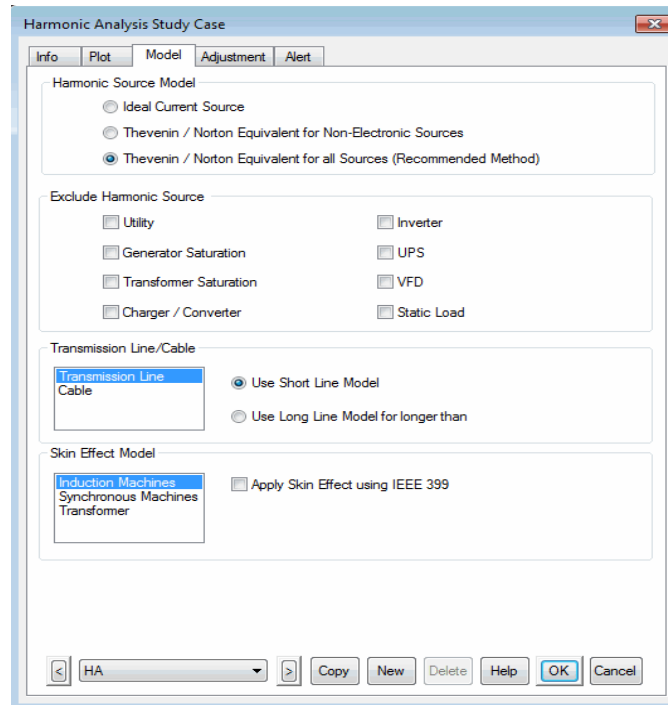


Figure 4.6 Page Modèle de l'éditeur de cas d'étude.

Page d'alerte :[12]

Cette page offre la possibilité de choisir la distorsion harmonique totale (VTHD) ou la distorsion harmonique individuelle (VIHD) de manière individuelle ou globale. Dans tous les cas, lorsque le VIHD et le VTHD dépassent leur limite, une fenêtre d'alerte apparaîtra lors de l'exécution d'une étude de transmission harmonique de charge. La définition de ces niveaux de VIHD et VTHD est basée sur la norme IEEE519-1992. En cas de surcharge des composants, des alertes critiques ou marginales seront émises pour le transformateur, le condensateur, le câble et le filtre. En activant l'option de résonance parallèle, on peut étudier le réseau électrique pour toute condition de résonance harmonique. Une possibilité d'affichage automatique permet de vérifier les alertes automatiquement.

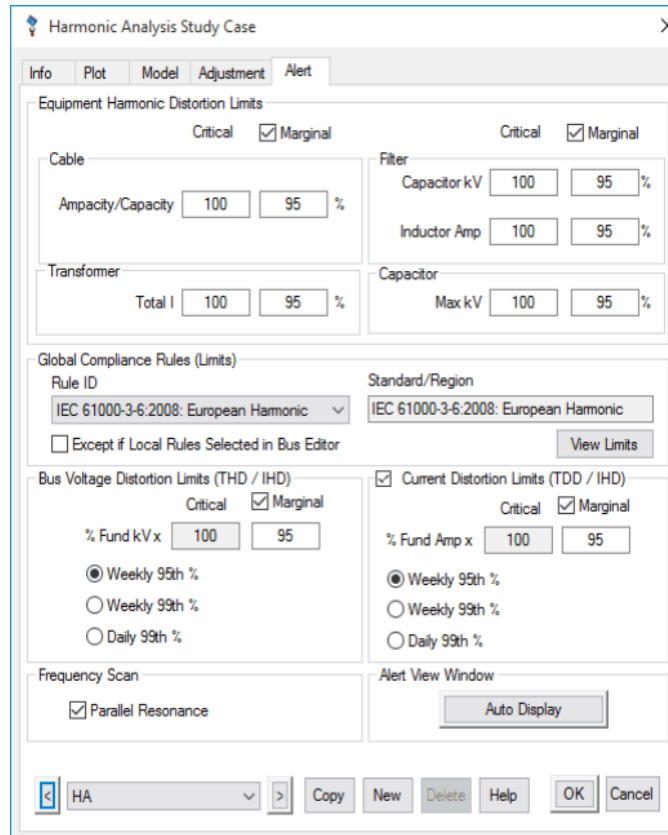


Figure 4.7 Page d'alerte de l'éditeur de cas d'étude

Option d'affichage de l'analyse harmonique :[14]

Une page de résultats et trois pages pour les annotations d'informations AC, AC-DC et Couleurs constituent les options d'affichage de l'analyse harmonique.

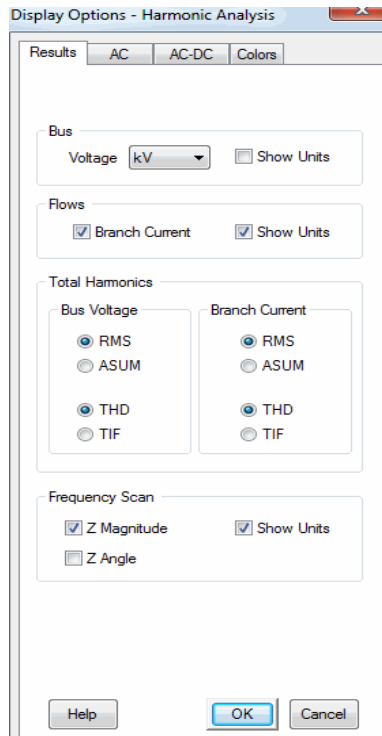


Figure 4.8 Option d'affichage du module d'analyse harmonique.

1.5 : Ecoulement De Puissance Harmonique :[8]

L'utilisateur a la possibilité de simuler les sources de courant et de tension harmonique dans le module d'analyse harmonique d'ETAP. Dans le cadre de l'analyse de l'écoulement harmonique, il est nécessaire de commencer par calculer l'écoulement de puissance à la fréquence fondamentale. Les résultats de l'écoulement de puissance fondamental concernent les nœuds de tension et les branches de courant fondamentaux qui sont ensuite utilisés pour calculer les différents indices harmoniques.

À partir du calcul de l'écoulement de puissance harmonique, les composantes harmoniques des tensions des nœuds et des courants des branches sont trouvées, puis tous les indices harmoniques sont calculés en conséquence. On compare les THD et IHD calculés pour la tension de nœud à leurs limites définies par l'utilisateur dans l'éditeur de nœud. Si des violations sont détectées, elles seront affichées dans la vue d'alerte de l'analyse de l'écoulement de puissance harmonique et des drapeaux seront placés dans le rapport texte à côté du nœud associé dans la section harmonique information.

Parmi les caractéristiques principales de l'étude utilisant le logiciel ETAP sur l'écoulement de puissance harmonique, on cite à titre d'exemple, calcul complet l'écoulement de puissance, ordre harmonique jusqu'à 250ème, modèle de source de pression harmonique, modèle de source de courant harmonique, bibliothèque de sources harmoniques extensible standard l'utilisateur, source d'harmoniques définie soit standard le Phantom, soit standard les paramètres du dispositif, calcul de jumpers records harmoniques sur la base des normes IEEE, distorsions harmoniques totales (THD) pour les pressures des nœuds et les courants des branches et tracés graphiques des formes d'onde et Phantom de pression et de courant pour perception et impression .

1.6 : Balayage de fréquence harmonique :[14]

Les harmoniques posent un problème particulier, celui de la résonance dans le réseau électrique. En raison de l'existence de composants inductifs et capacitifs dans le système, à certaines fréquences, des conditions de résonance peuvent se produire sur certains bus. Si la résonance se produit sur un bus où un courant harmonique est injecté dans le système, une surtension et une surintensité seront observées.

L'analyse Frequency Scan est le meilleur outil pour étudier le problème de résonance du système. Il calcule et trace les amplitudes et les angles de phase de l'impédance du point de commande du bus sur une plage de fréquences spécifiée par l'utilisateur ; ainsi, toute condition de résonance parallèle et sa fréquence de déclenchement peuvent être clairement identifiées. L'étude de balayage des fréquences harmoniques permet également aux utilisateurs de régler les paramètres de leur filtre harmonique et de tester les résultats finaux.

La plage de fréquences pour le balayage est définie par l'utilisateur ; elle commence à la fréquence fondamentale et peut aller aussi haut que l'utilisateur le souhaite.

Les résultats de l'étude de balayage de fréquence sont présentés dans un rapport textuel qui comprend les données d'entrée du système, les résultats du flux de charge fondamental et un tableau énumérant les impédances des points de conduite des bus. Les mêmes informations tabulées sont également fournies sur le schéma unifilaire, ainsi que sous forme de tracé.

2 : Application1 :

La station de distribution de Port Harcourt 132/33/11 KV a été modélisée sous forme de schéma unifilaire pour effectuer une analyse harmonique. La figure (4.9) montre le schéma unifilaire de ce réseau à l'aide du programme ETAP. Les charges ont été connectées à plusieurs les jeux de barres (2, 3, 4, 6, 7) comme source d'harmoniques pour créer une distorsion harmonique dans ce réseau. Le fonctionnement de cette source d'harmoniques sur le réseau sera étudié à l'aide d'analyses harmoniques, et des techniques d'atténuation seront utilisées pour éliminer toute source d'harmoniques.

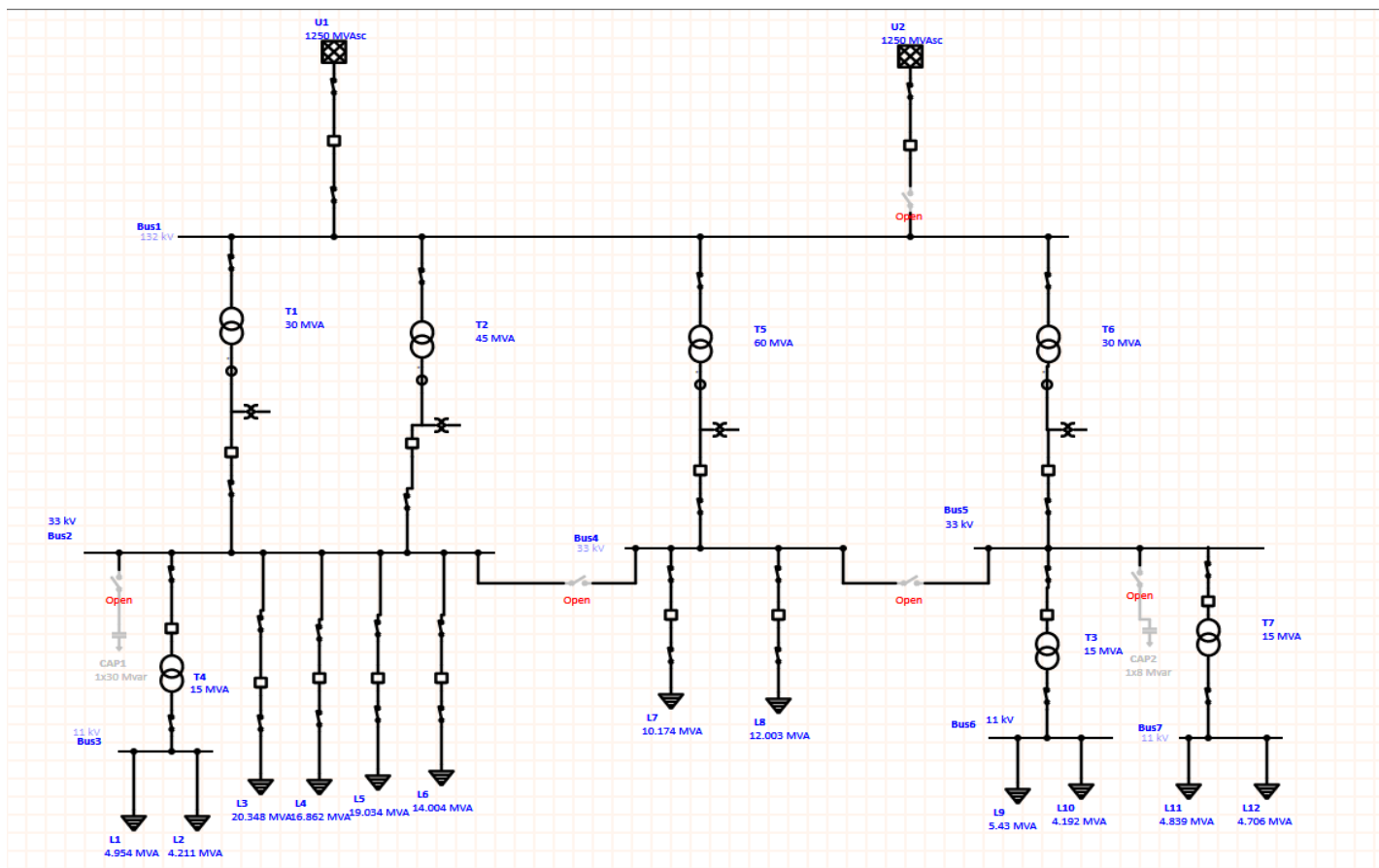


Figure 4.9 La station de distribution de Port Harcourt 132/33/11 KV

Les composants de ce réseau sont présentés dans le tableau (4.1). Le réseau électrique a été connecté au le jeu de barre 1 avec une tension de 132 kV, puis les transformateurs (T1;T2;T5;T6) ont été connectés au le jeu de barre 1 pour réduire la tension de 132 kV à 33 kV. Les transformateurs T1 et T2 relient le jeu de barre 1 au le jeu de barre 2. A la sortie des transformateurs

il y a un transformateur de courant et un transformateur de potentiel. Le transformateur T5 relie le jeu de barre 1 au le jeu de barre 4. A la sortie du transformateur il y a un transformateur de courant et un transformateur de potentiel. Le transformateur T6 relie le jeu de barre 1 au le jeu de barre 5 et à la sortie du transformateur il y a un transformateur de courant et un transformateur de potentiel, et les informations sur le transformateur (Z et X/R) sont affichées dans les figures (4.10) suivantes.

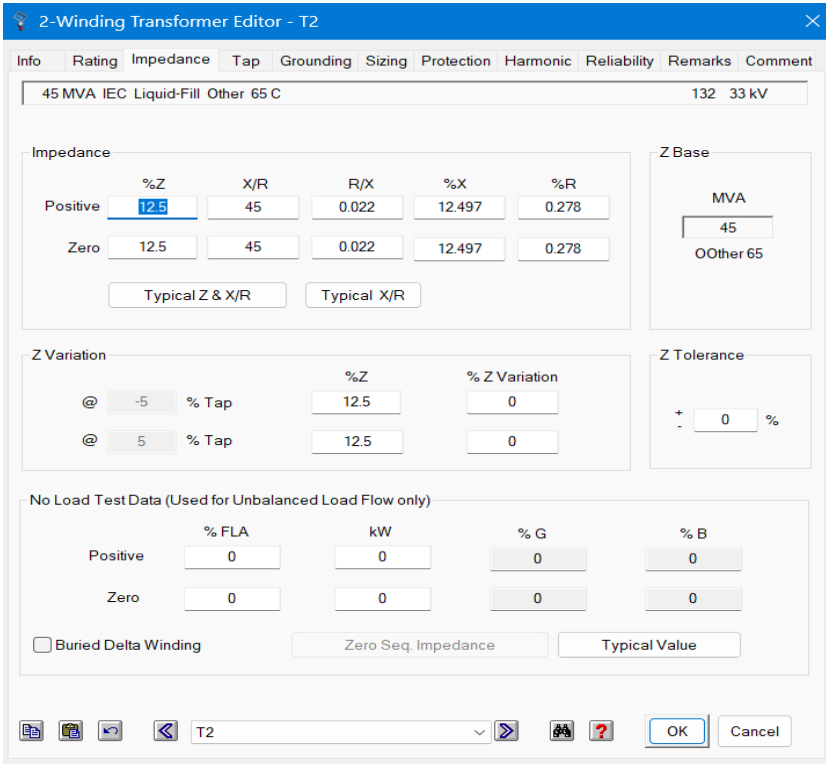


Figure 4.10 informations sur le transformateur T2 45MVA (Z et X/R)

La tension est réduite de 33 à 11 KV grâce à des transformateurs (T4, T3, T7) T3 relie le jeu de barre 2 et le jeu de barre 3. Le transformateur T3 relie le jeu de barre 5 et le jeu de barre 6. Le transformateur T7 relie le jeu de barre 5 et le jeu de barre 7.

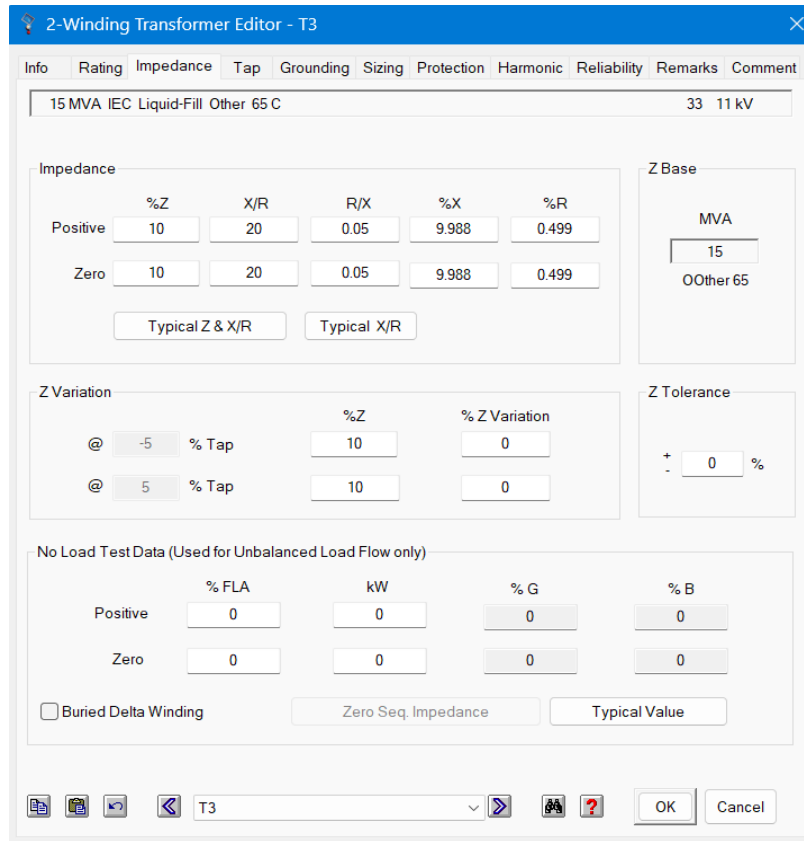


Figure 4.11 informations sur le transformateur T3 15MVA (Z et X/R)

Dans cette station, nous avons plusieurs charges non linéaires réparties sur plusieurs jeu de barres (2, 3, 4, 6, 7) 6 départs 33kV et 6 départs 11kV alimentant des postes d'injection dans la zone. Les deux charges (L1,L2) sont reliées au le jeu de barre 3, et les charges (L3,L4,L5,L6) sont reliées au le jeu de barre 2 et les deux charges (L7,L8) sont reliées au le jeu de barre 4, les deux charges (L9,L10) sont reliées au le jeu de barre 6, et les deux charges (L11,L12) sont reliées à le jeu de barre 7. Le type de source d'harmonique (source de courant) a été modélisé en cliquant sur la page harmonique de l'éditeur de charge. Le modèle de source d'harmonique (fluorecent) a été sélectionné dans la bibliothèque d'harmonique et toutes les charges ont la même source d'harmoniques. La page d'harmonique de la charge est montrée dans la figure (4.12). Les informations sur tous les composants sont indiquées dans le tableau (4.1) :

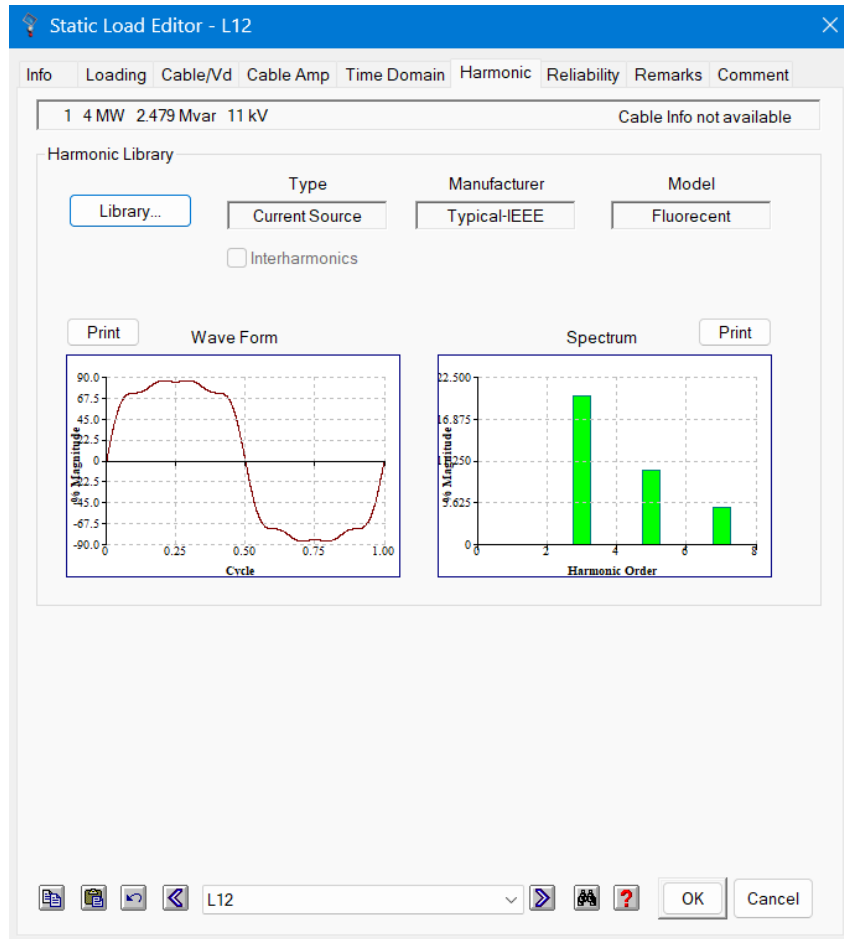


Figure 4.12 Page harmonique d'une charge.

Composant	Type	Notation
Transformateur	T1	30MVA (132/33KV)
	T2	45MVA (132/33KV)
	T5	60MVA (132/33KV)
	T6	30MVA (132/33KV)
	T3	15MVA (33/11KV)
	T4	15MVA (33/11KV)
	T7	15MVA (33/11KV)
Disjuncture	CB 1,2	145KV/1600A
	CB 3,15	34KV/1250A
Transformateur de courant	CT 1,4	P1200 A / S5A

Transformateur de potentiel	PT 1,4	33KV/415V
Sectionneurs	SW 1,8	132KV/1600A
	SW 9,27	33KV/1250A
	SW 28,30	11KV/800A
Les charge	L1	260A
	L2	221A
	L3	356A
	L4	295A
	L5	333A
	L6	245A
	L7	178A
	L8	210A
	L9	285A
	L10	220A
	L11	254A
	L12	247A

Table 4.1 Données De La Sous-Station 132/33 KV De Port Harcourt

2.1 : Analyse de l'écoulement de puissance :

Lorsque nous avons effectué une analyse du flux de charge, nous avons constaté que les transformateurs (T1,T2) avaient une surcharge, que les jeu de barres (2, 3, 6, 7) avaient une chute de tension et que les jeu de barres (4,5) avaient une chute en tension, mais cela est acceptable car ils sont dans les limites reconnues(Un taux de 0 % à 2,5 % est acceptable **en noir** , un taux de 2,5 % à 5 % est autorisé **en rose** et un taux supérieur à 5 % est inacceptable **en rouge**.), comme le montre le figure (4.13)

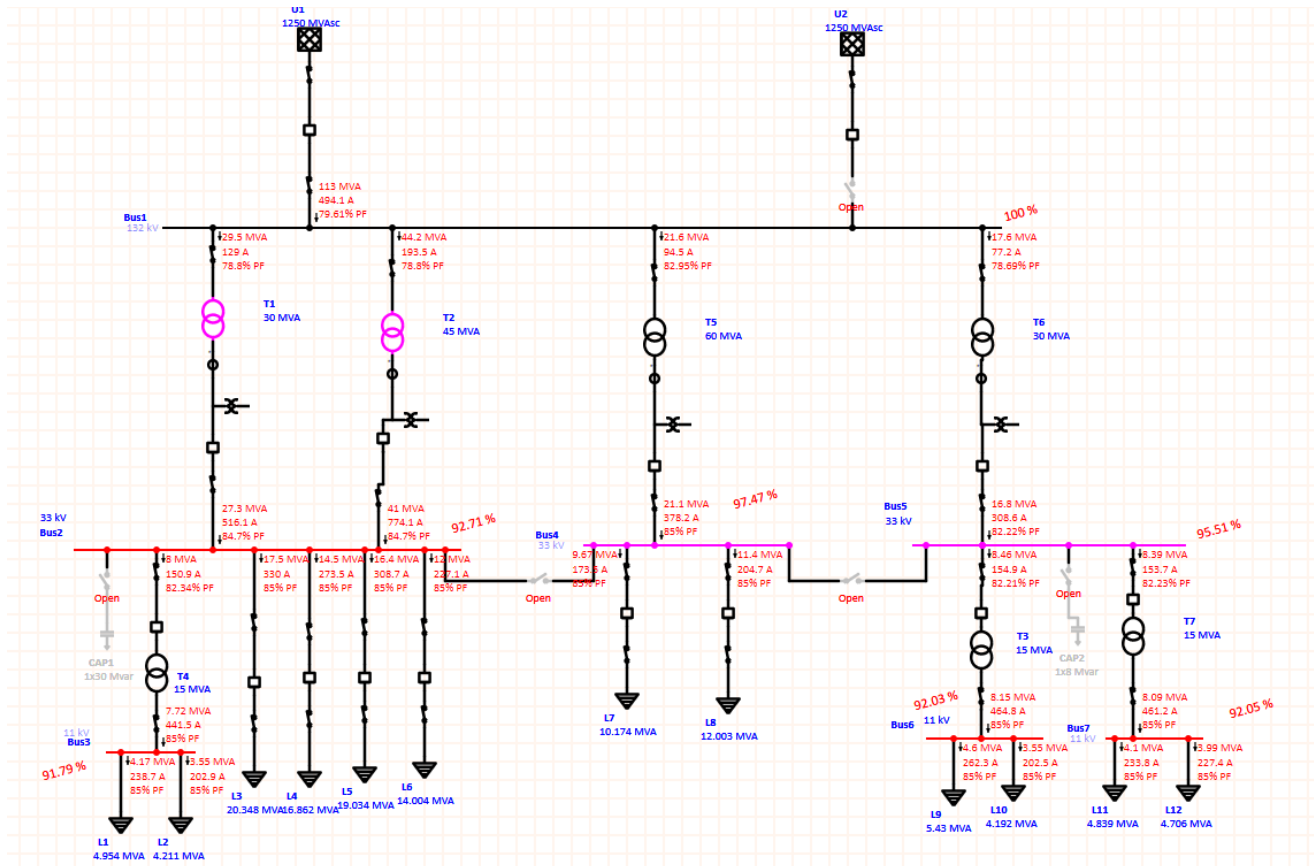


Figure 4.13 Simulation de la sous-station Avant amélioration

Nous devons donc résoudre ce problème (la chute de tension). Nous avons augmenté de 2 % la tension entre le réseau et le bus 1. et nous l'avons connecté. Deux condensateurs (cap1, cap2) au le jeu de barre (1,5) voir la figure (4.13). Nous avons calculé la capacité des deux condensateurs avec la relation suivante.

$$Cap = Pactive * (tan\phi_1 - tan\phi_2)$$

$\Phi_1 = \cos^{-1}$ facteur de puissance initial

$\Phi_2 = \cos^{-1}$ facteur de puissance requis

Pactive = Puissance active /puissance active de la charge en mégawatts

Exp :

$$Cap_1 = 68 * (\tan(\cos^{-1} 0.847) - (\cos^{-1} 0.99)) = 30 \text{ MVAR}$$

La valeur (0,847) représente le facteur de puissance existant et la valeur (0,99) représente le facteur de puissance que nous voulons obtenir.

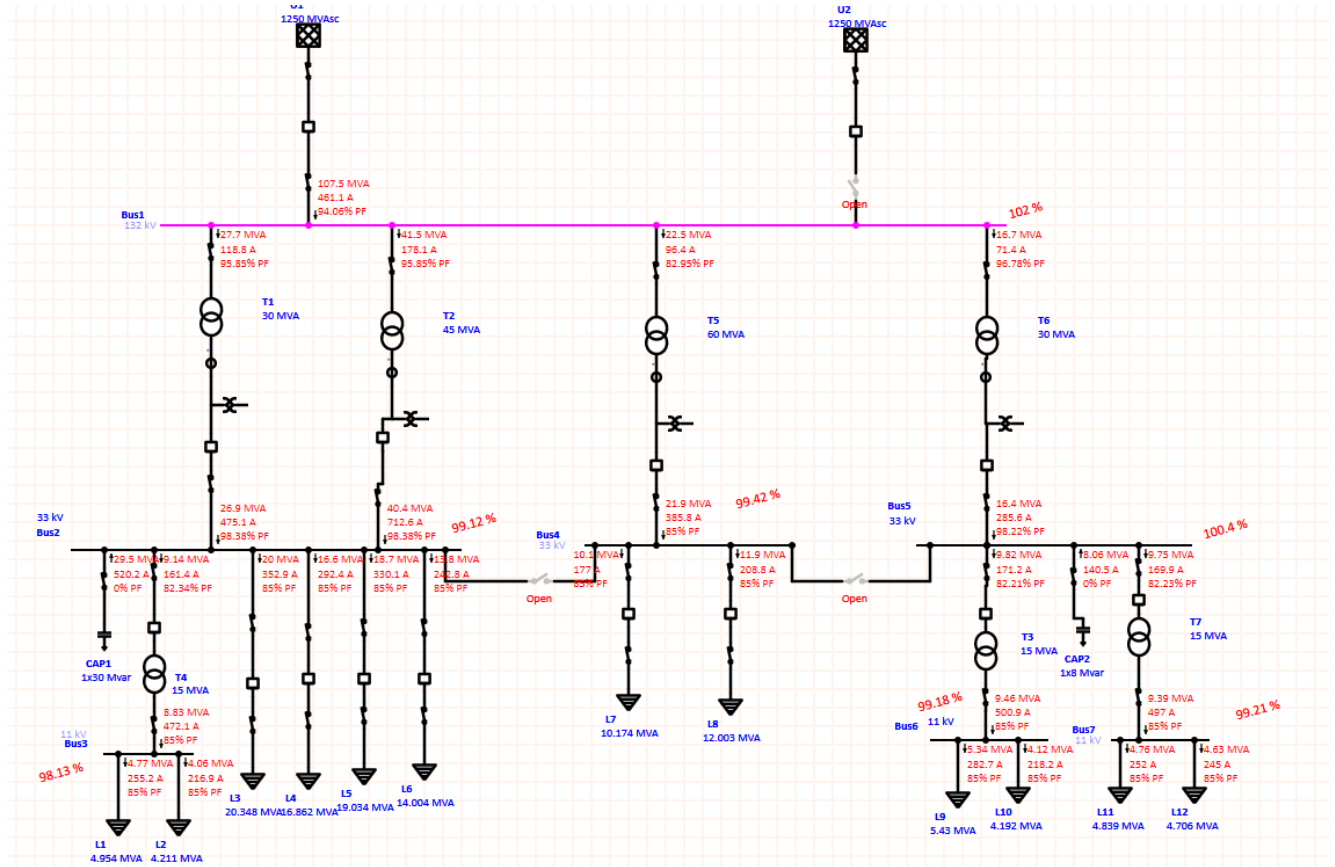


Figure 4.14 Simulation de la sous-station après amélioration

Bus	Nominal KV		Tension %		P.A MW		P.R Mvar		P.A MVA		PF %	
	AV	AP	AV	AP	AV	AP	AV	AP	AV	AP	AV	AP
BUS 2	33 KV		92.71	99.12	58	66.2	36.3	12.07	68.3	67	84.7	98.38
BUS 3	11 KV		91.79	98.13	6.56	7.5	4.07	4.65	7.72	8.83	85	85
BUS 4	33 KV		97.47	99.42	17.9	18.6	11.1	11.5	21.1	21.9	85	85
BUS 5	33 KV		95.28	100.4	14.4	16	10	3.08	17.6	16.3	82.08	98.19
BUS 6	11 KV		93.92	98.93	7.21	8	4.47	4.96	8.49	9.42	85	85
BUS 7	11 KV		93.95	98.96	7.16	7.95	4.44	4.92	8.42	9.35	83	85

Table 4.2 Résultats de la simulation avant et après l'amélioration de la sous-station

2.2 : Analyse harmonique :[8]

Le module d'analyse harmonique d'ETAP fournit un excellent outil pour modéliser précisément divers composants du système électrique afin d'intégrer leurs qualités en présence de sources harmoniques. Il est entièrement conforme aux normes IEEE 519, ANSI/IEEE 399, IEEE 141, IEEE 519-2014, IEC 61000-3-14 et IEC 61000 3-6. La source des problèmes d'harmoniques peut être détectée et les schémas d'atténuation peuvent être testés et finalement vérifiés en utilisant deux méthodes analytiques, à savoir la méthode de l'écoulement de puissance harmonique et la méthode de balayage de fréquence harmonique.

2.2.1 : Ecoulement de Puissance harmonique : [8]

Pour vérifier la distorsion harmonique ou l'effet de la source harmonique sur le réseau électrique, il faut effectuer l'écoulement de puissance harmonique. Dans ce réseau, la charge non linéaire qui peut être modélisée comme une source de courant si elles injectent des courants harmoniques dans le réseau. Les résultats sont directement présentés sur le tableau (4.3) et les diagrammes ci-dessous.

En effectuant l'étude l'écoulement de puissance harmonique, on peut voir qu'il y a quelques fréquences harmoniques avec une plus grande magnitude dépassant la limite THD et IHD (IEEE519).

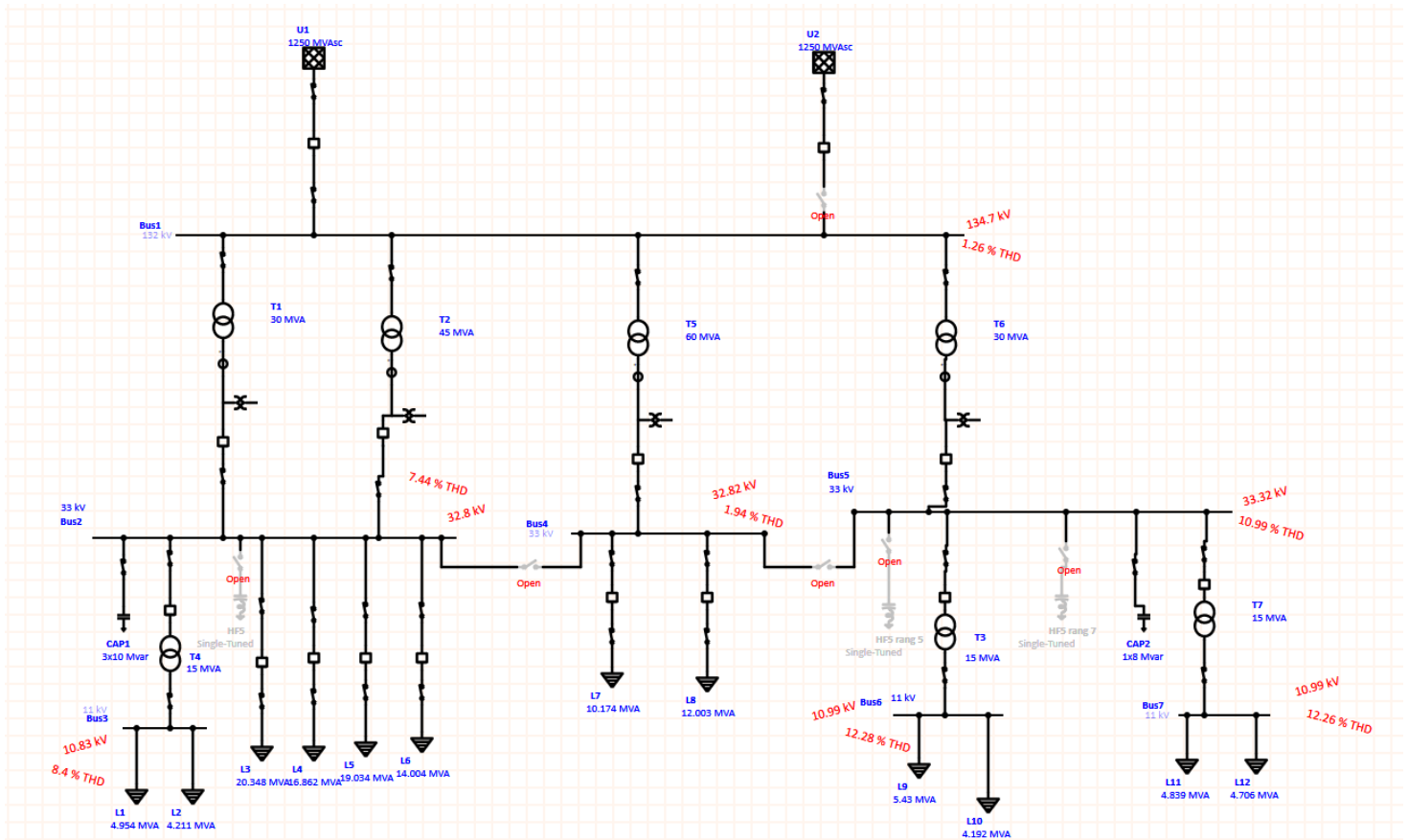


Figure 4.15 analyses de l'écoulement de puissance harmonique avants le filtrage

La figure (4.16) représente les formes d'onde de tension des bus barres (2,3,5,6,7), et la figure (4.17) représente le spectre harmonique de la tension. Après avoir analysé le flux de puissance harmonique, nous avons remarqué que les valeurs THD sont très élevées dans les bus barres. Le tableau (4.3) présente les valeurs THD dans ces bus.

Bus	Bus 2	Bus 3	Bus 5	Bus 6	Bus 7
THD%	7.44%	8.4%	10.99%	12.28%	12.26%

Table 4.3 les valeurs de THD avant le filtre

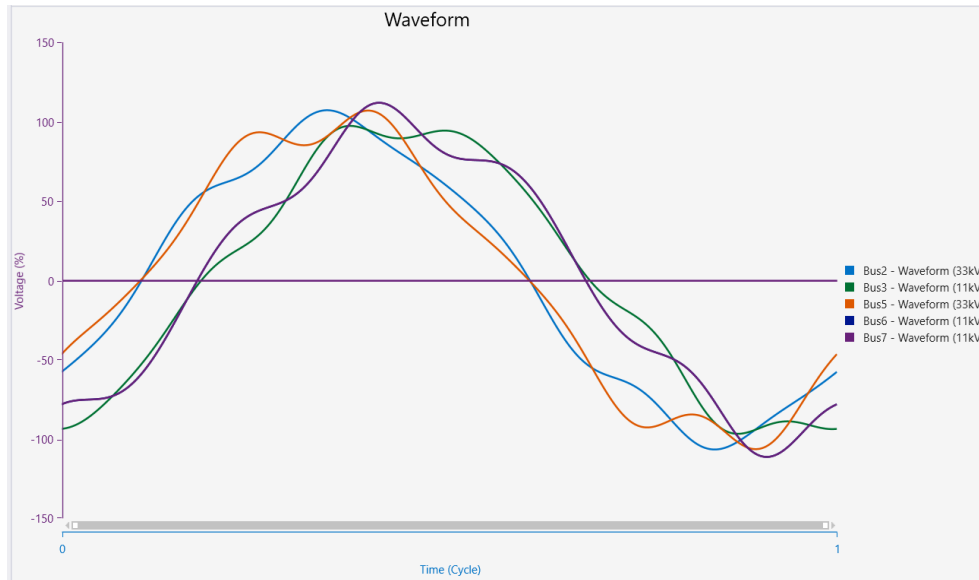


Figure 4.16 les formes d'onde de tension

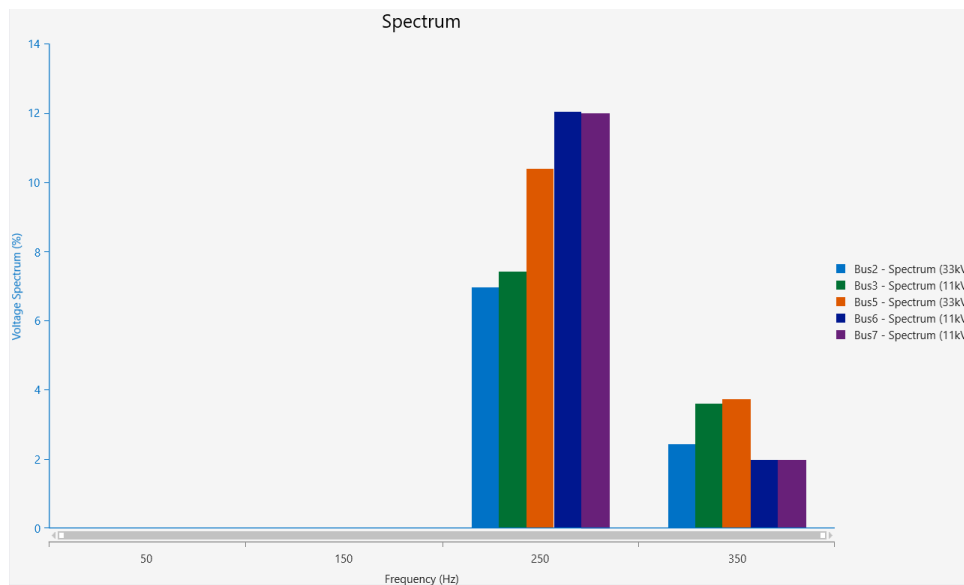


Figure 4.17 le spectre harmonique de la tension

2.2.2: Balayage de fréquence harmonique :

Lors de l'étude par balayage de fréquence, l'angle d'impédance peut être vu sur le diagramme unifilaire du réseau électrique. Ici, la fréquence choisie pour le réseau électrique est de 50 Hz voir figure (4.18).

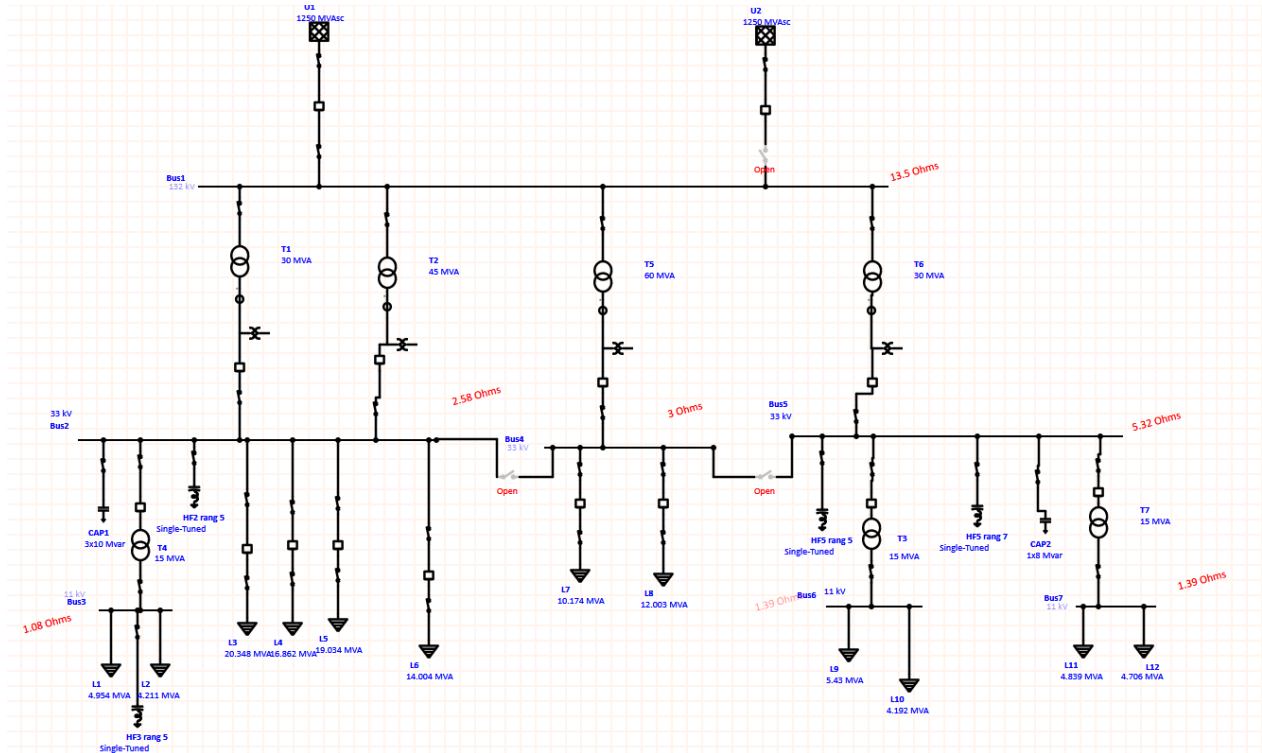


Figure 4 18 analyses du balayage de fréquence harmonique

Depuis la fenêtre d'avertissement, nous constatons qu'une résonance parallèle se produit à la cinquième (5) harmonique correspondant à la fréquence 250 Hz.

Bus	Z mag (ohm)	Harmonique	Fréquence (Hz)
Bus2	14.28	4	200
Bus 3	3.12	3	150
Bus 5	64.47	6	300
Bus 6	7.47	5	250
Bus 7	7.48	5	250

Table 4 4 Fenêtre d'alarme du balayage de fréquence harmonique

2.2.2.1 : La résonance parallèle : est le moment où les réactances capacitive et inductive d'un réseau électrique deviennent égales. Elle se produit généralement en présence de condensateurs. Le balayage de la fréquence harmonique permet de déterminer ce point de résonance parallèle. Le résultat de cette résonance harmonique est qu'elle génère des courants et des tensions qui circulent à la fréquence de résonance et causent des problèmes de qualité de l'énergie.

Cette fréquence de résonance harmonique ne pose un problème que s'il existe une source d'harmoniques à cette fréquence où l'impédance est identique. Dans notre page d'avertissement sur le flux d'énergie harmonique, nous pouvons voir qu'il existe une source harmonique qui dépasse la

limite du 5^{ème} ordre, mais qu'il n'y a pas de résonance parallèle à ces fréquences et que, par conséquent, cette résonance parallèle ne posera pas de problème pour ce réseau électrique. Si la résonance parallèle pose un problème, celui-ci peut être résolu en réglant le filtre sur cet ordre harmonique spécifique.

La figure (4.19) représente la courbe d'angle d'impédance et La figure (4.20) représentent le module d'impédance, obtenues à partir du balayage de la fréquence harmonique.

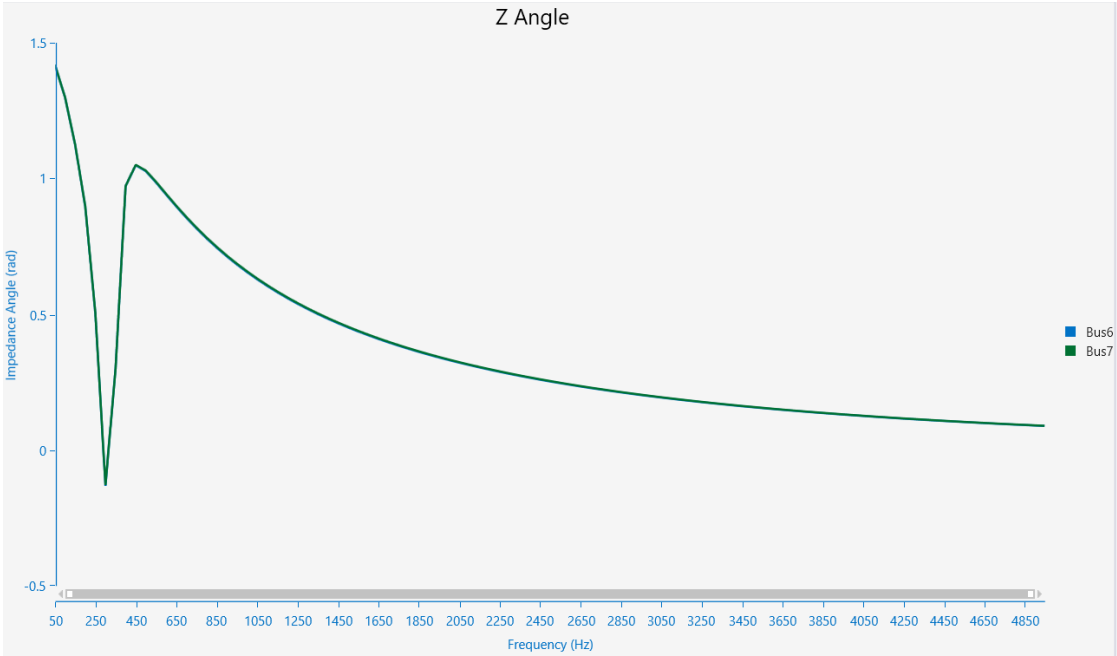


Figure 4 19 Angle d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique

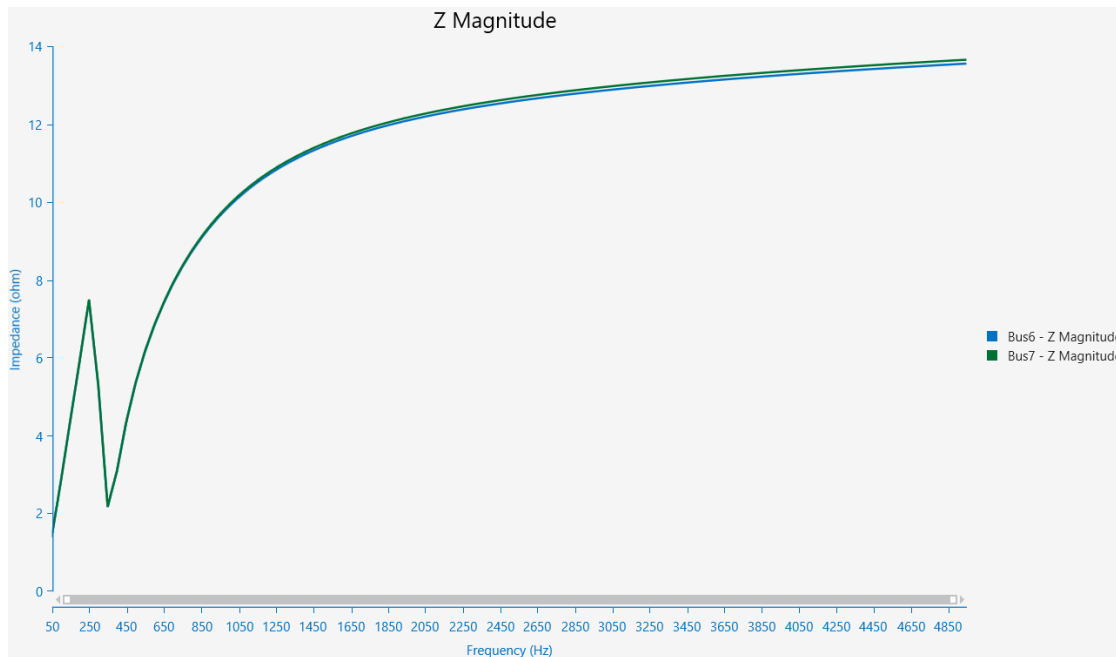


Figure 4 20 Module d'impédance après le balayage de la fréquence harmonique

2.2.3 : Élimination des harmoniques à l'aide d'un filtre :

Comme le montre l'analyse du flux de puissance harmonique, les harmoniques de 5e et 7e ordre contribuent à la distorsion harmonique dans chaque bande conductrice. Ainsi, si ces deux harmoniques peuvent être supprimées, la plupart des distorsions harmoniques de ce réseau peuvent être réduites. Dans ce cas, des filtres individuels seront conçus pour ces deux harmoniques afin d'éliminer la distorsion harmonique.

Pour concevoir le filtre, l'utilisateur doit cliquer sur la page des paramètres de l'éditeur de filtre harmonique, puis cliquer sur l'onglet « Size Filtre ». En fonction des besoins, l'utilisateur doit saisir des données pour déterminer la taille de filtre optimale. Parmi ces informations, vous devez saisir la valeur harmonique dont vous souhaitez vous débarrasser, saisir la valeur du courant, et saisir les deux valeurs du facteur de puissance actuel que vous souhaitez obtenir et la valeur puissance apparent (en MVA). Pour obtenir ces informations, vous devez cliquer sur « Curent Flow Analysais ». Après avoir entré les informations, cliquez sur « Size filtre » pour spécifier la taille du filtre en fonction des sélections et des données saisies, puis cliquez sur « Substitute ». Dimensionnement du filtre harmonique correspondent aux figures (4.21 et 4.22) :

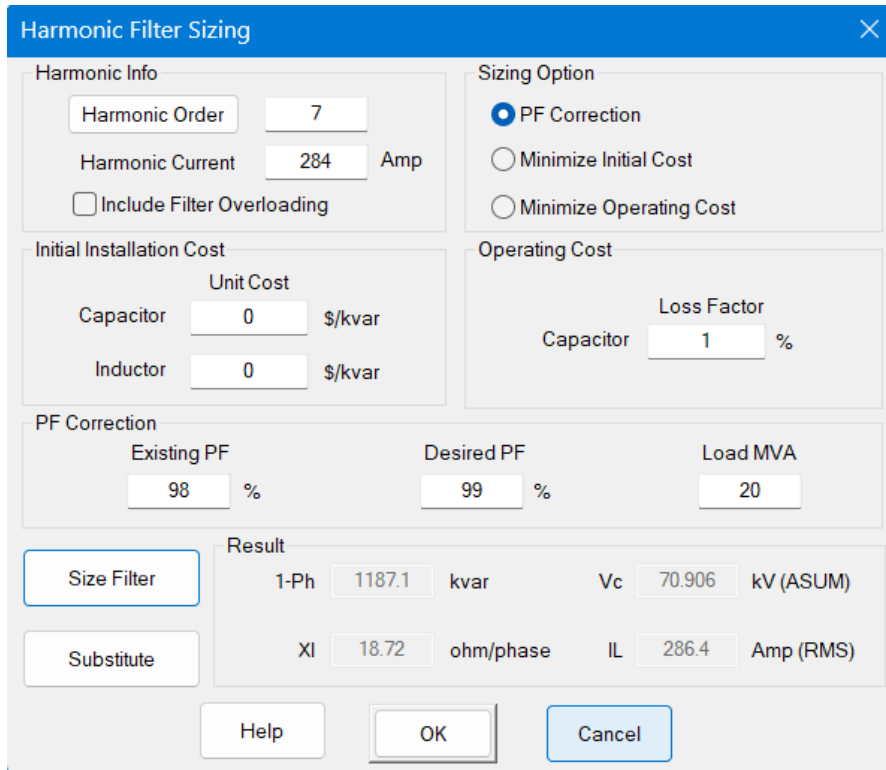


Figure 4 21 Dimensionnement d'un filtre harmonique "Size Filter".

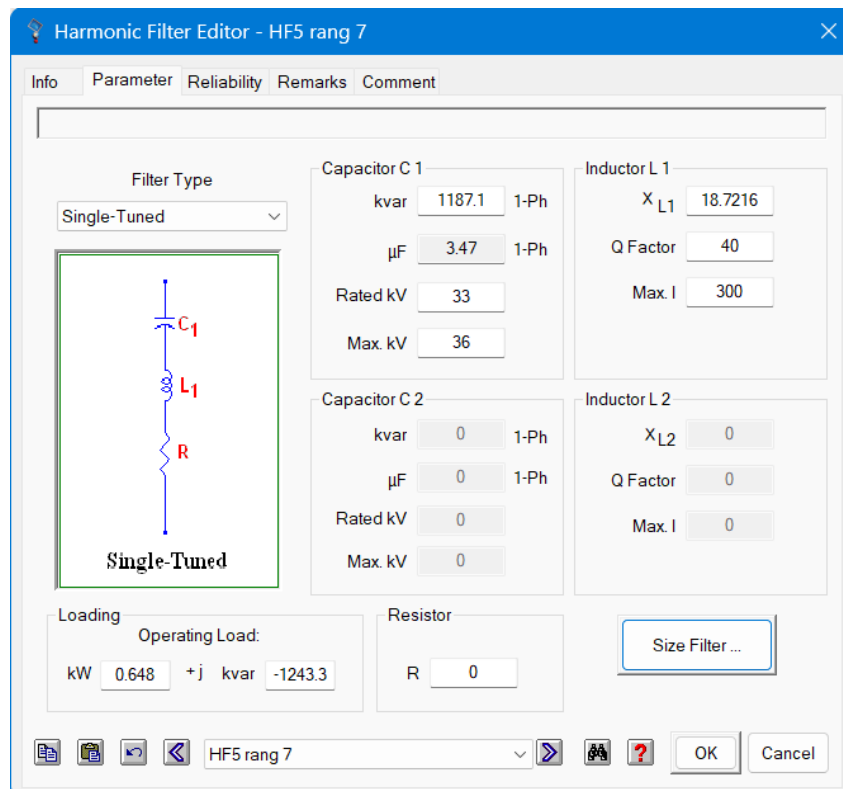


Figure 4 22 Page de paramètres de l'éditeur d'harmoniques

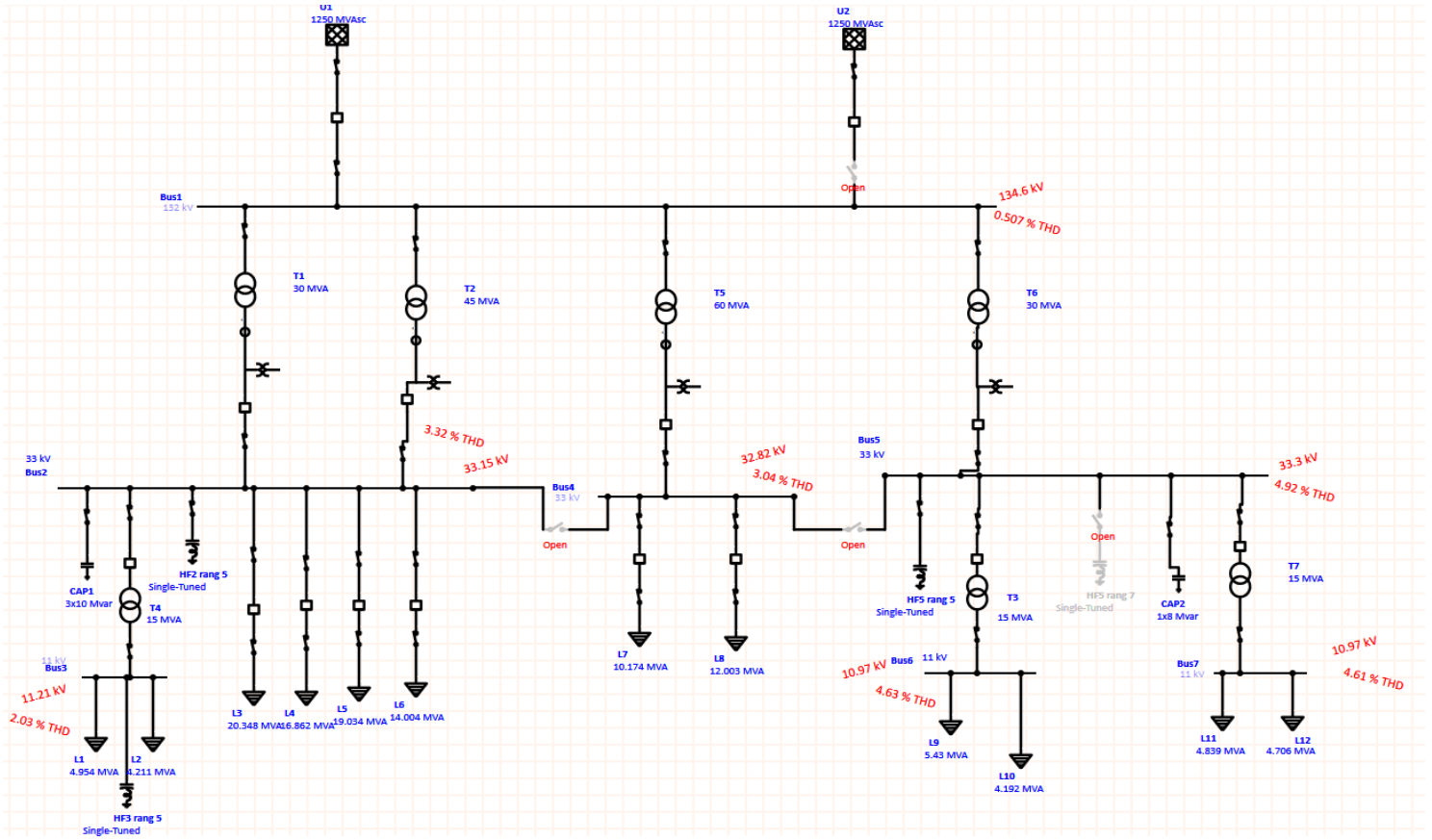


Figure 4 23 analyses de l'écoulement de puissance harmonique après le filtre 5

Lorsque nous insérons des filtres (HF2, HF3, HF5) sur les bus barres (2 ,3 ,5) pour éliminer l'harmonique n°5, nous constatons une diminution significative de la valeur THD. La figure montre ces valeurs (4.23).

Mais nous remarquons des valeurs THD élevées sur les bus barres (5 ,6 ,7) pour éliminer l'harmonique n°7, nous avons donc inséré un autre filtre pour éliminer l'harmonique n°7 sur le bus barre (5). La figure montre les valeurs et le tableau montre la comparaison diminution significative des valeurs THD. La figure (4.24) et le tableau (4.5) montrent cette valeur.

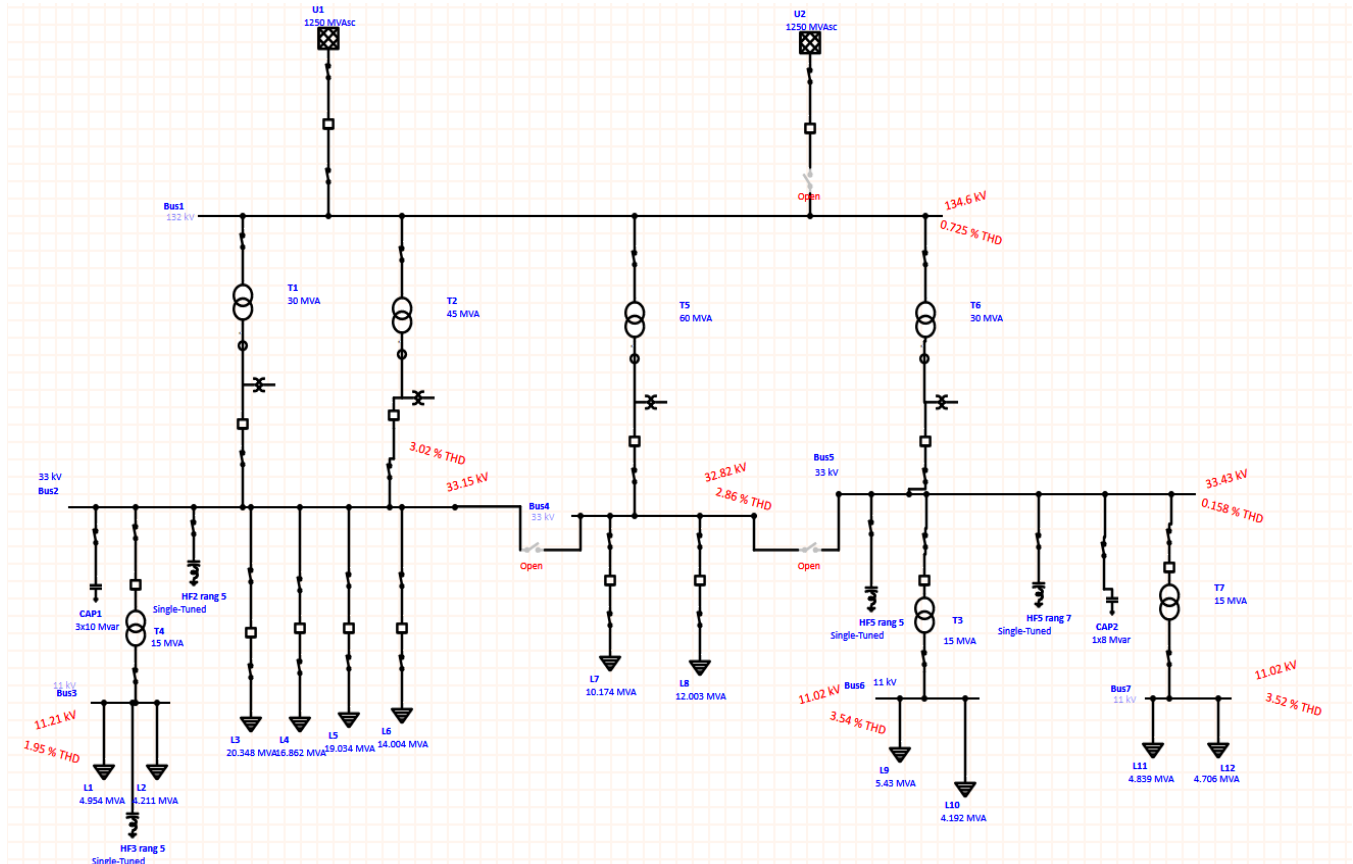


Figure 4 24 analyses de l'écoulement de puissance harmonique après le filtre 5 et 7

Bus	BUS 2	BUS 3	BUS 5	BUS 6	BUS 7
Filtre 5	3.32%	2.03%	4.92%	4.63%	4.61%
Filtre 7	3.02%	1.95%	0.15%	3.54%	3.52%

Table 4 5 la comparaison diminution significative des valeurs THD

La figure (4.25) représente les formes d'onde de tension des bus barres (2,3,5,6,7), et la figure (4.26) représente le spectre harmonique de la tension des bus barres (2,3,5,6,7), Apres le filtrage.

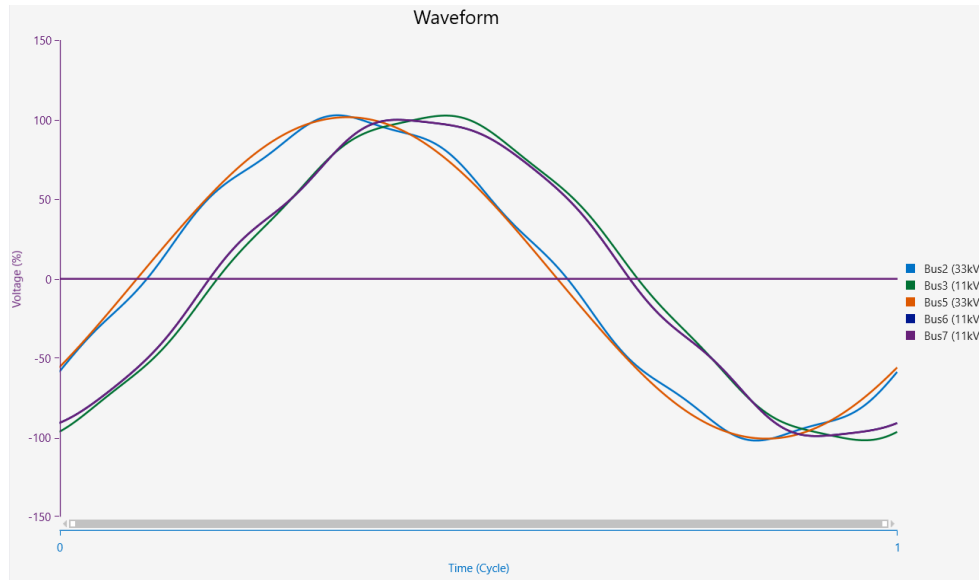


Figure 4 25 les formes d'onde de tension après le filtrage

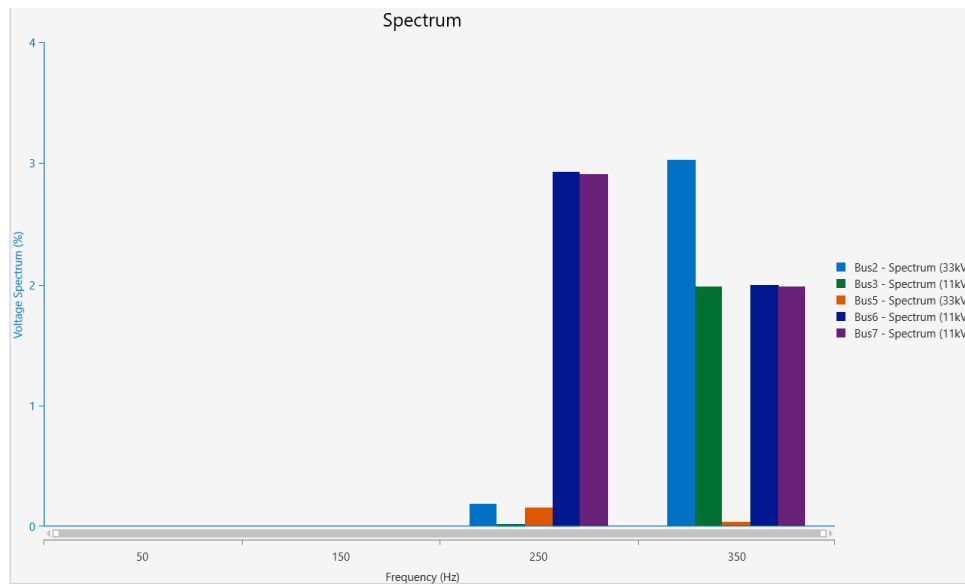


Figure 4 26 le spectre harmonique de la tension après le filtrage

Le résultat du balayage de fréquence après injection les filtres est présenté sur le schéma unifilaire de la figure (4.27).

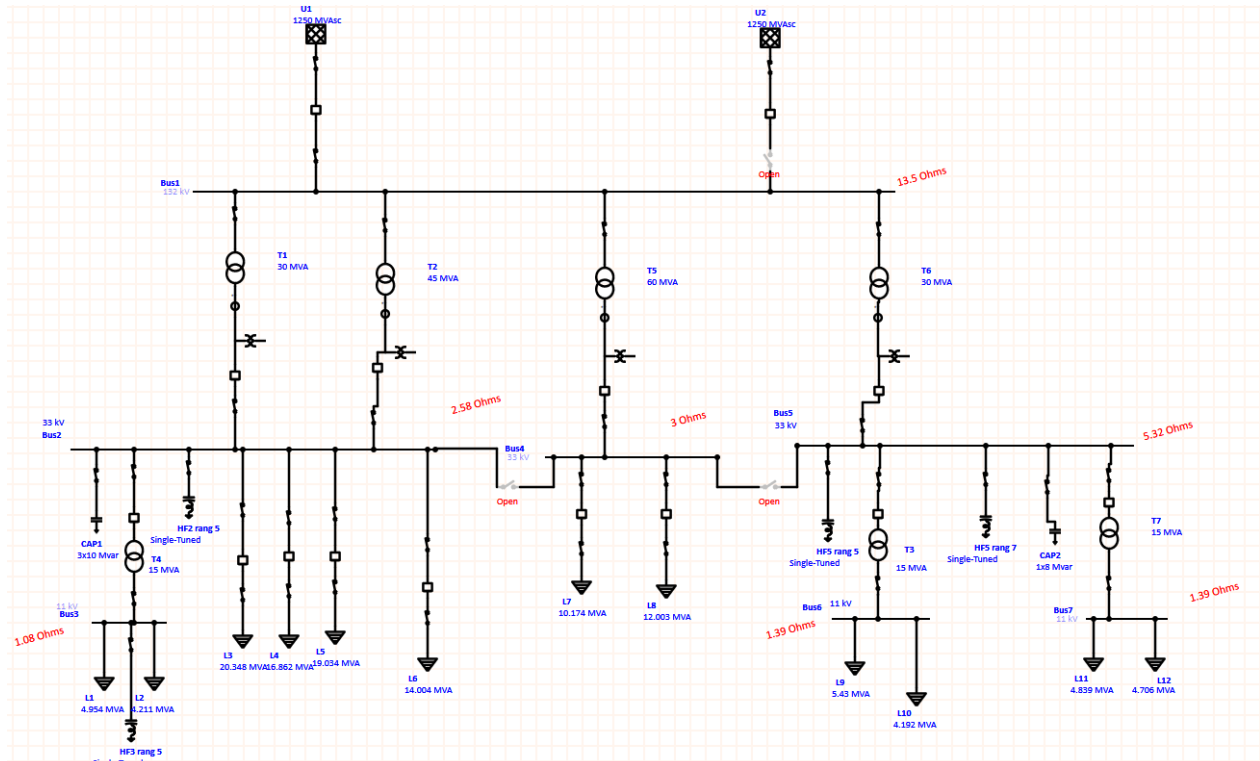


Figure 4 27 analyses du balayage de fréquence harmonique

Les figures (4.28 et 4.29) représentent respectivement l'angle et le module d'impédance après injection des filtres en appliquant le balayage de fréquence.

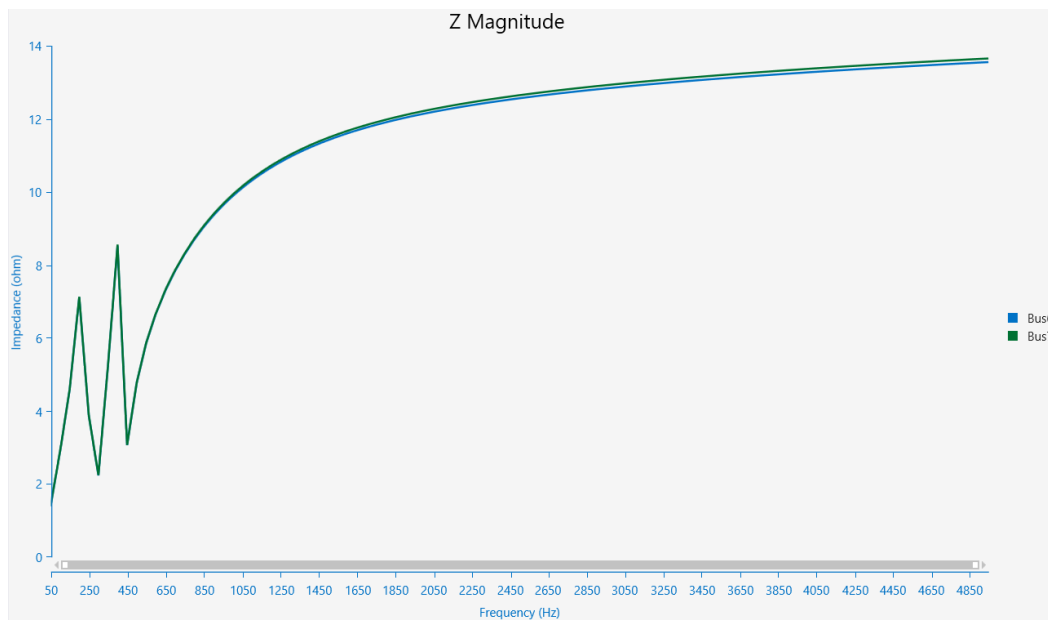


Figure 4 28 Module d'impédance après injection des filtres

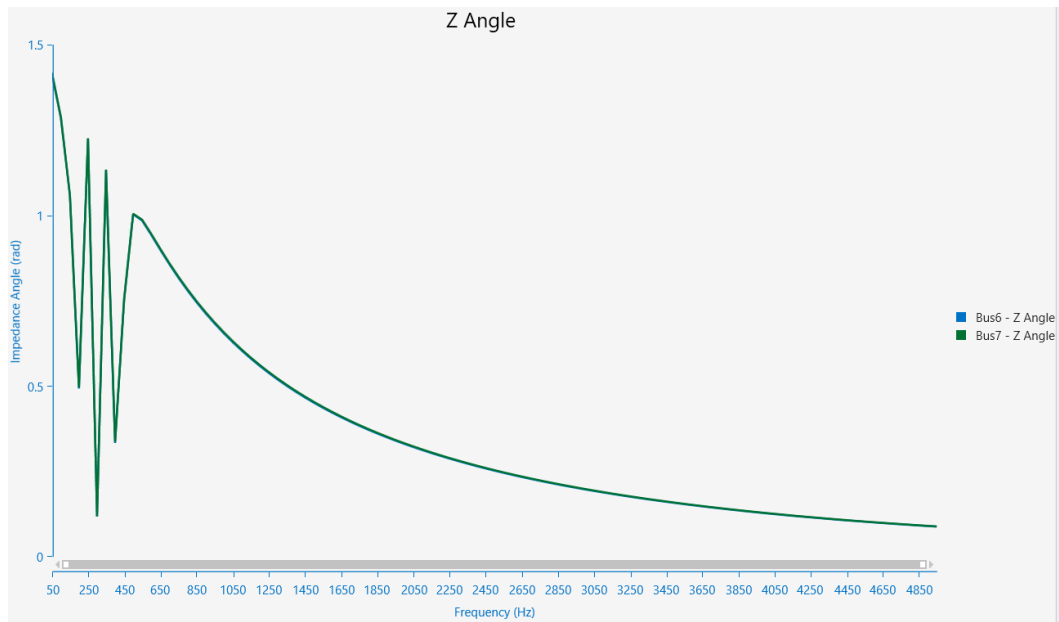


Figure 4 29 Angle d'impédance après injection des filtres

En balayant les fréquences harmoniques, nous pouvons voir sur le tableau (4.6) qu'il existe quatre fréquences de résonance dues à la présence du filtre harmonique. Les fréquences de résonance se produisent aux rangs harmoniques 3, 4, 6 et 8. Ces ordres ne correspondent pas à des fréquences qui comportent des harmoniques

Bus	Z mag (ohm)	Harmonique	Fréquence (Hz)
Bus 2	12.71	3	150
	14.77	6	300
Bus 3	4.15	4	200
Bus 5	53.55	4	200
	42.65	6	300
	68.07	8	400
Bus 6	7.11	4	200
	8.52	8	400
Bus 7	7.12	4	200
	8.55	8	400

Table 4 6 Fenêtre d'alarme du balayage de fréquence harmonique après injection les filtre

3 : Application 2 :

La station de distribution de BOU CHAKEUR 220/60/30 KV a été modélisée sous forme de schéma unifilaire pour effectuer une analyse harmonique. La figure (4.30) montre le schéma unifilaire de ce réseau à l'aide du programme ETAP.

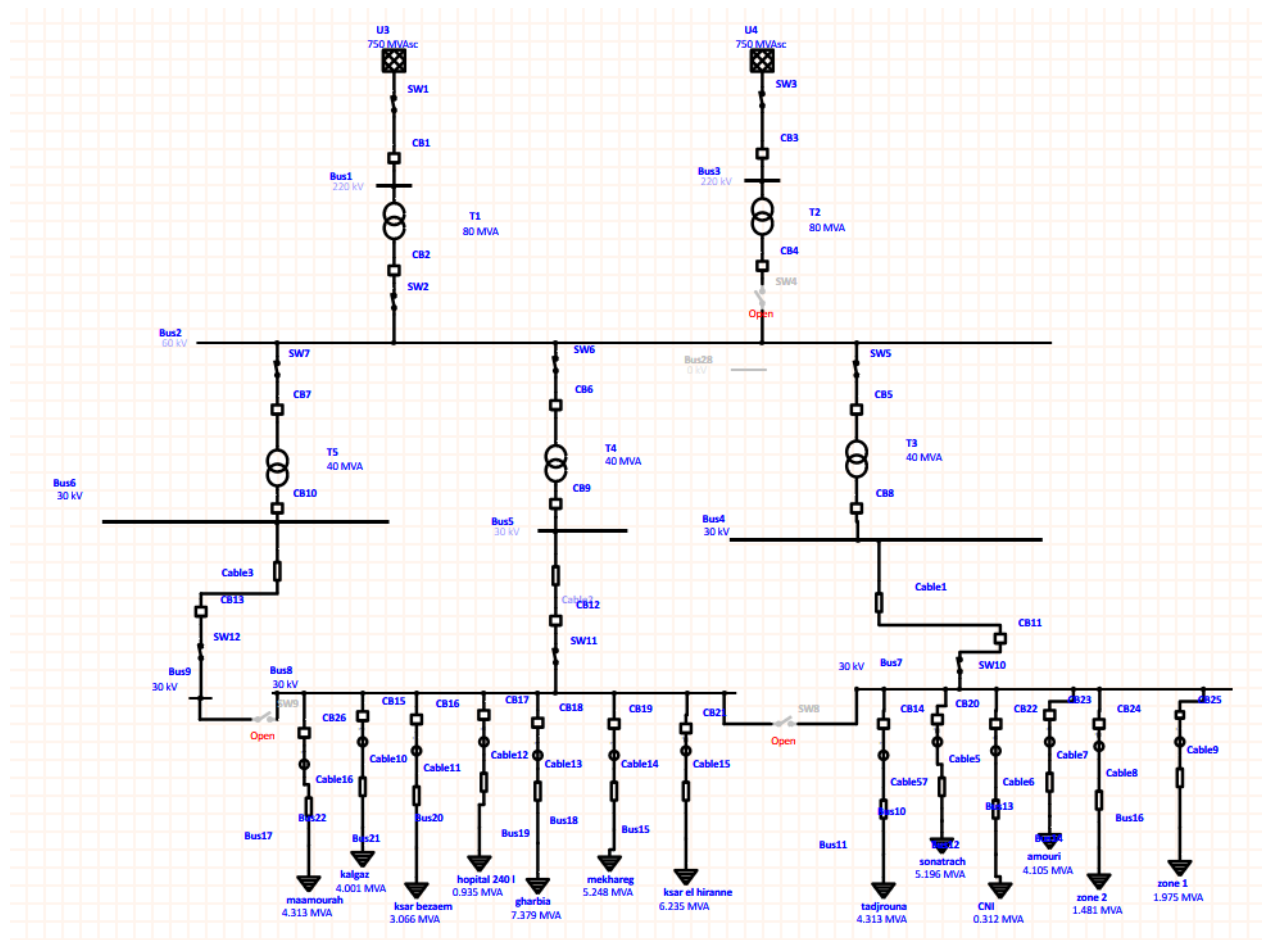


Figure 4 30 La station de distribution de BOU CHAKEUR 220/60/30 KV

Cette station alimente en électricité 13 charges, et ces charges sont sources d'harmoniques, provoquant des distorsions harmoniques dans ce réseau. Cette source d'harmoniques sur le réseau sera étudiée à l'aide d'analyses d'harmoniques et des techniques d'atténuation seront utilisées pour supprimer toute source d'harmoniques. Le tableau (4.7) montre les composants de ce réseau. Dans cette station il y a 4 transformateurs et plusieurs câbles. Le transformateurs(T1) relie le réseau électrique et le jeu de barres 2 et les deux transformateurs (T3,T4) Ils relient respectivement le jeu

de barres 2 et les jeu de barres (4,5), et le transformateur (T5) est en secours. Le câble 1 relie le jeu de barres 4 et le jeu de barres 7. Le câble 2 relie le jeu de barres 5 et le jeu de barres 8. Les informations pour cette station sont indiquées dans le tableau (4.7) :

Dans cette station toutes les charges sont connectées au 30 KV Il y a 6 charges connectées aux le jeu de barres (7) et 7 Charges connectées au le jeu de barres (8) le type de source d'harmonique (source de courant) a été modélisé en cliquant sur la page harmonique de l'éditeur de charge, Plusieurs sources harmoniques ont été sélectionnées dans la bibliothèque harmonique du programme, dont (12 pulse2, fluorecent, arc furnace) réparties sur les charges voire la figure (4.31)

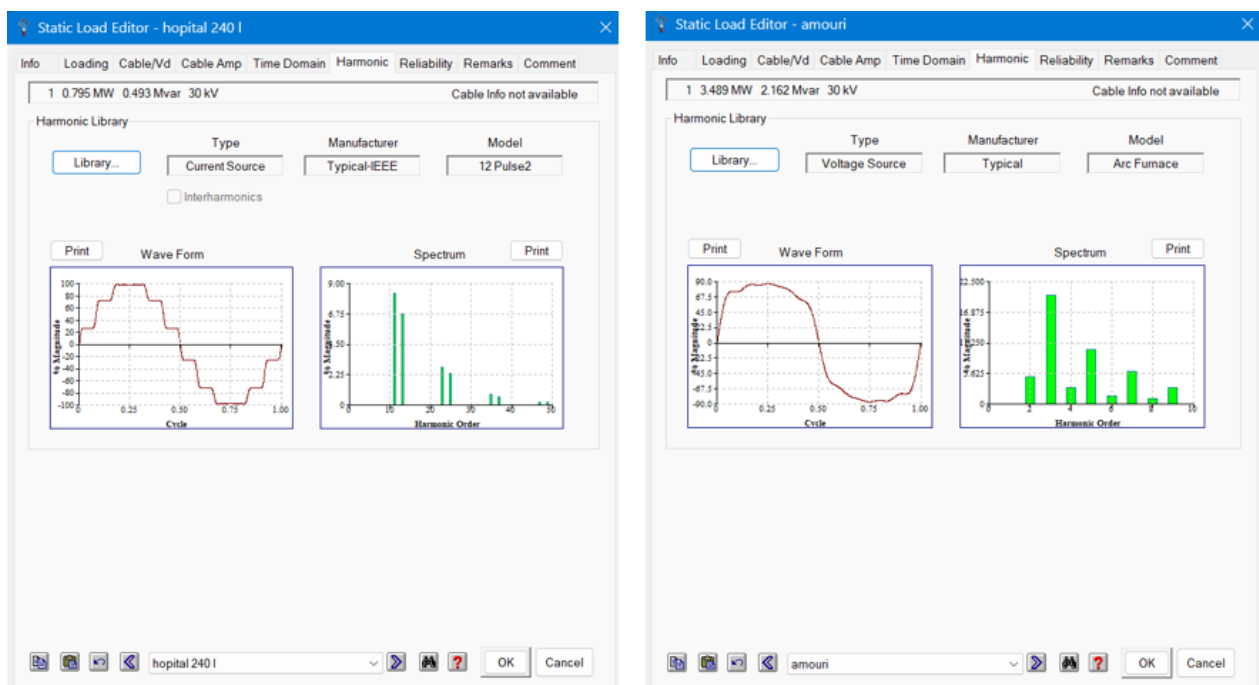


Figure 4 31 les source des harmoniques (12 pulse2, fluorecent, arc furnace)

Composant	Type	Notation
Transformateur	T1	80MVA (220/60KV)
	T3	40MVA (60/30KV)
	T4	40MVA (60/30KV)
	T5	40MVA (60/30KV)
Disjuncture	CB1,2	245KV/2000A
	CB3,7	65KV/1600A
	CB8,26	34KV/1250A
Transformateur de courant	CT1,13	300A/1A
Les charge	MAAMOURAH	83A

	KALGAZ	77A
	KSAR BEZAEM	59A
	HOPITAL 240 L	18A
	GHARBIA	142A
	MEKHAREG	101A
	KSAR EL HIRANNE	120A
	TADJROUNA	83A
	SONATRACH	100A
	CNI	6A
	AMOURI	79A
	ZONE 2	28.5A
	ZONE 1	38A

Table 4 7 Données De La Sous-Station 220/60/30 KV De BOU CHAKER

3.1 : Analyse de l'écoulement de puissance :

Lorsque nous avons effectué une analyse du flux de charge, nous avons constaté que la station fonctionnait correctement et bien.

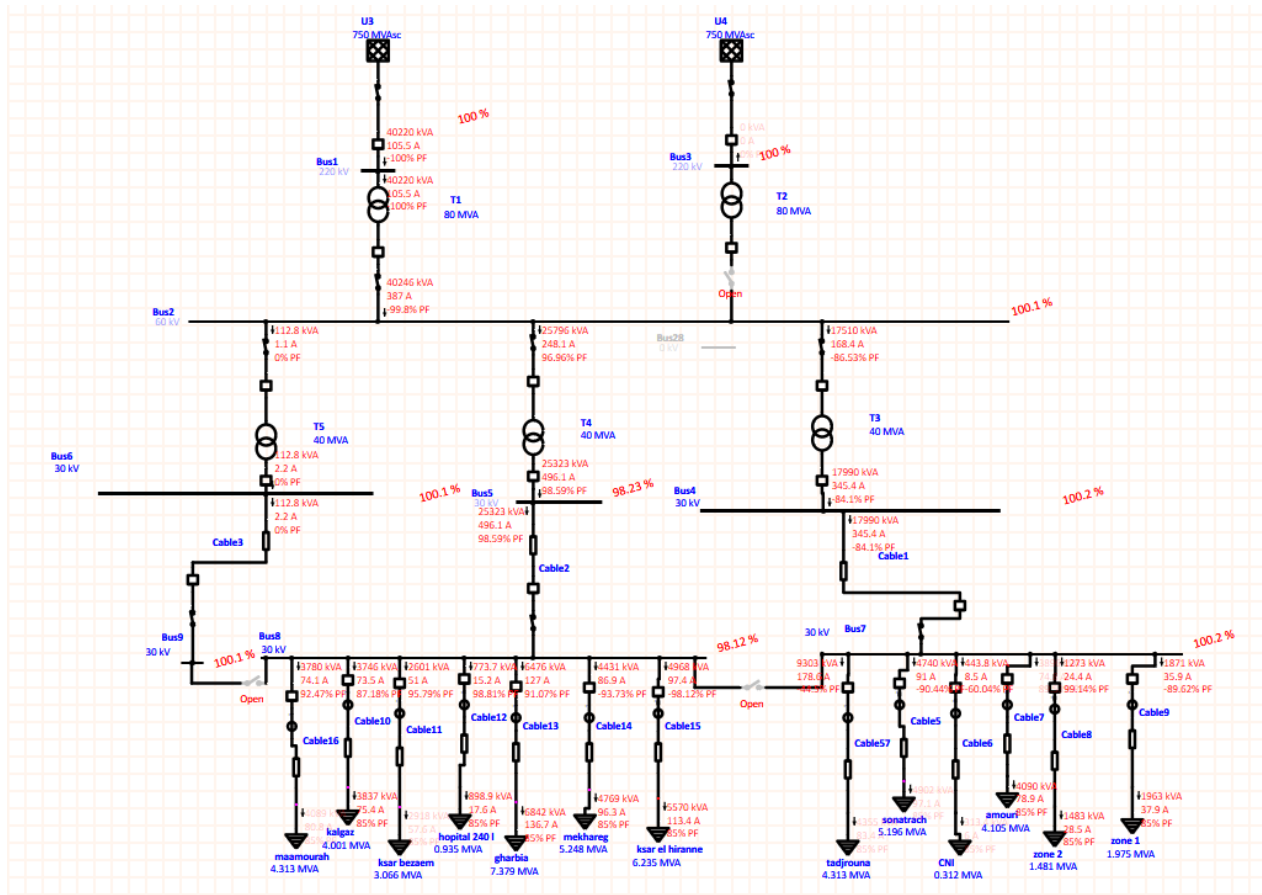


Figure 4 32 Analyse de l'écoulement de puissance

3.2 : Analyse Ecoulement de Puissance harmonique :

La figure (4.34) représente les formes d'onde de tension des bus barres (4,5,7,8), et la figure (4.35) représente le spectre harmonique de la tension. Après avoir analysé le flux de puissance harmonique, Nous avons remarqué que les valeurs de THD étaient acceptables et ne dépassaient pas les limites recommandées (IEC 61000-3-6 :2008 : Européen Harmonique).

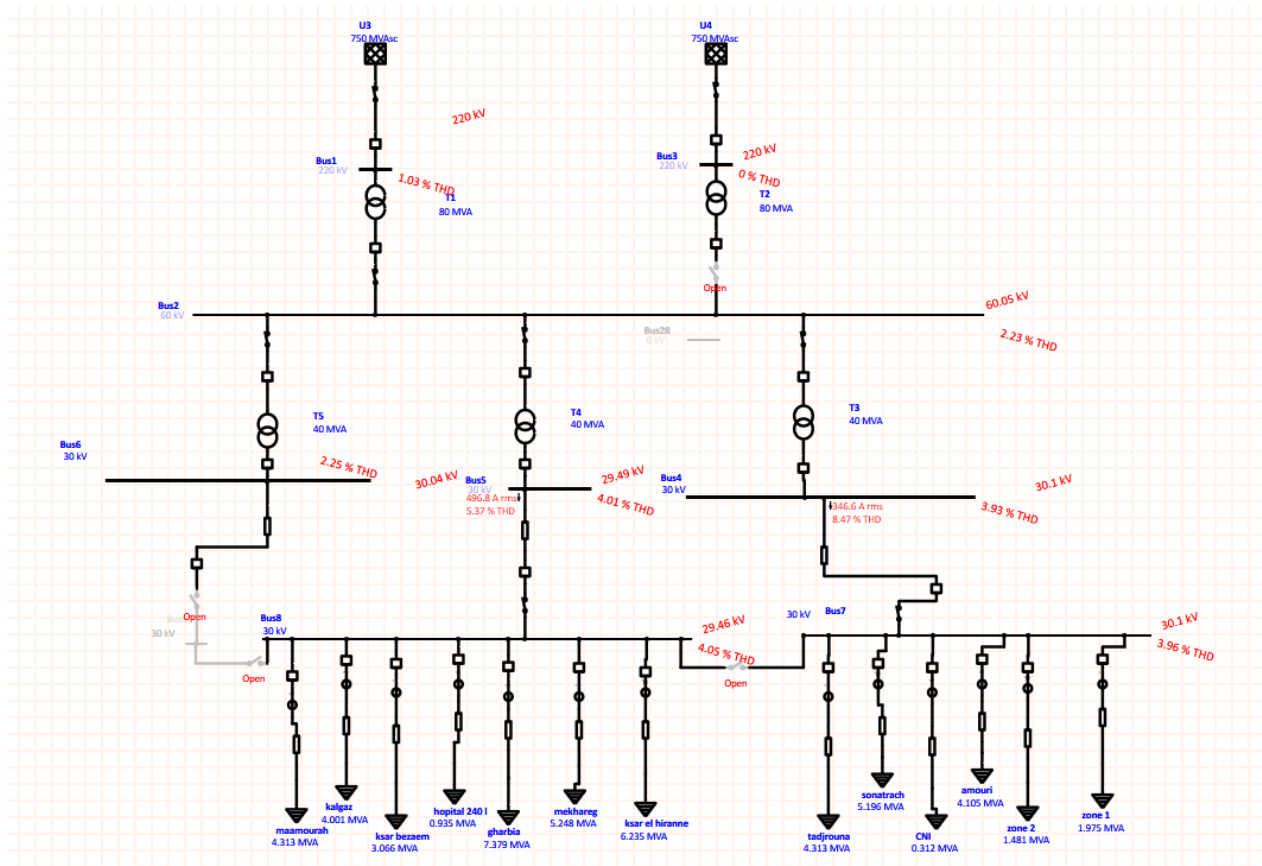


Figure 4 33 Analyse Ecoulement de Puissance harmonique

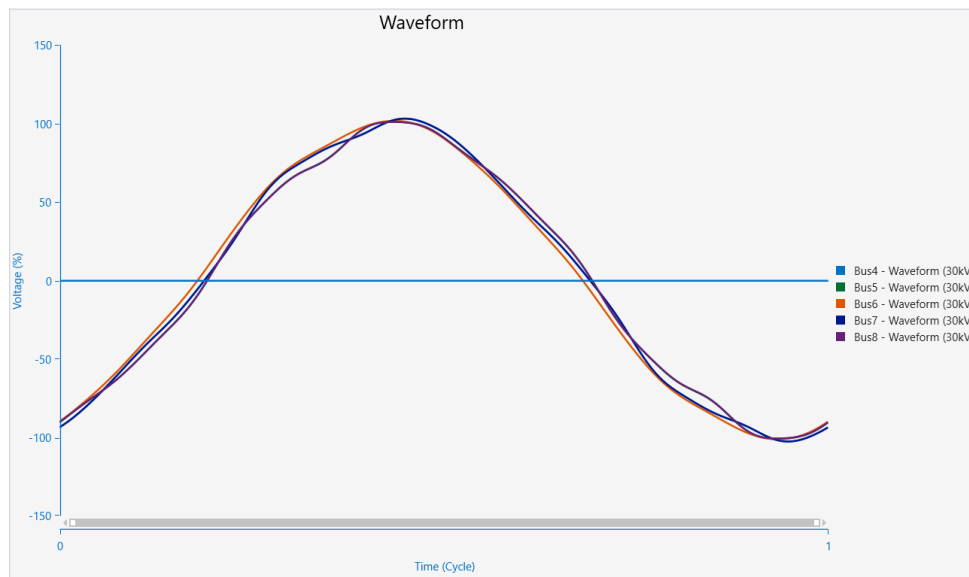


Figure 4 34 les formes d'onde de tension

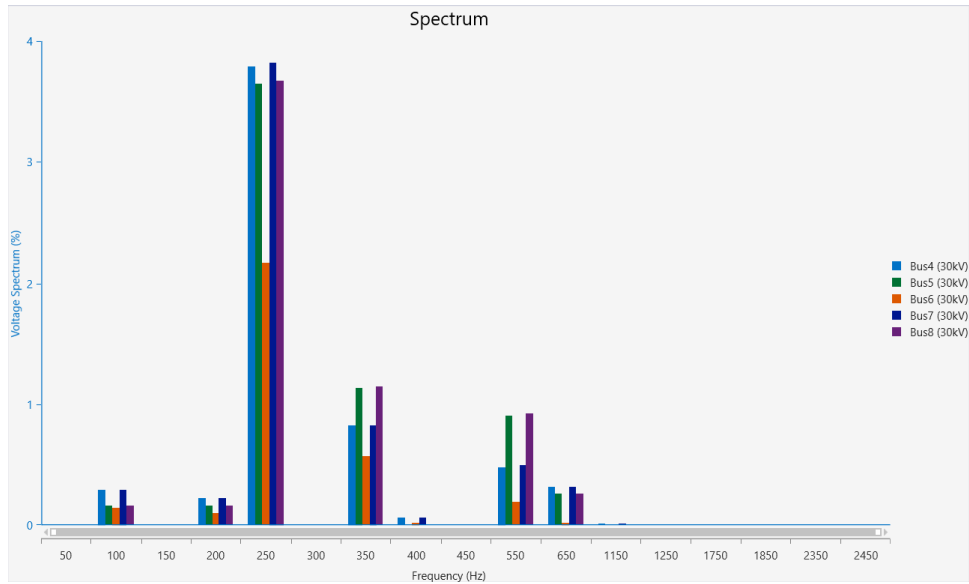


Figure 4 35 le spectre harmonique de la tension

Cependant, nous constatons que la cinquième courante harmonique est très élevée, au bus barres (4,5) dépassant les limites. Il faut donc utiliser un filtre pour éliminer cette harmonique. Le tableau (4.8) représente ces valeurs et La figure (4.36) représente les formes d'onde de courant et la figure (4.37) représente le spectre harmonique du courant avant le filtrage.

BUS	ORDRE	IHD
Bus 4	5	8.147%
Bus 5	5	5.149%

Table 4 8 les valeurs de IHD du 5^{ème} ordre

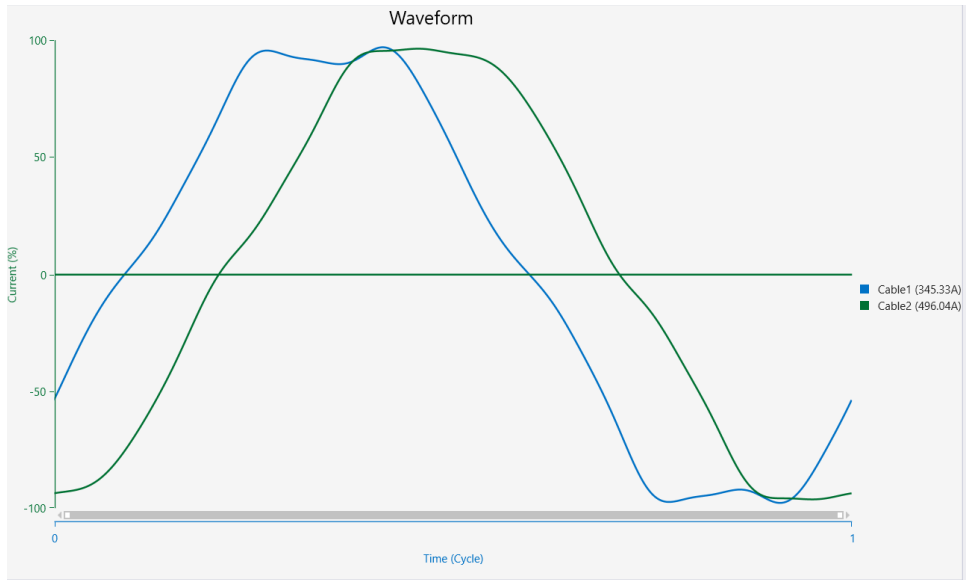


Figure 4 36 les formes d'onde de courant Avant le filtrage

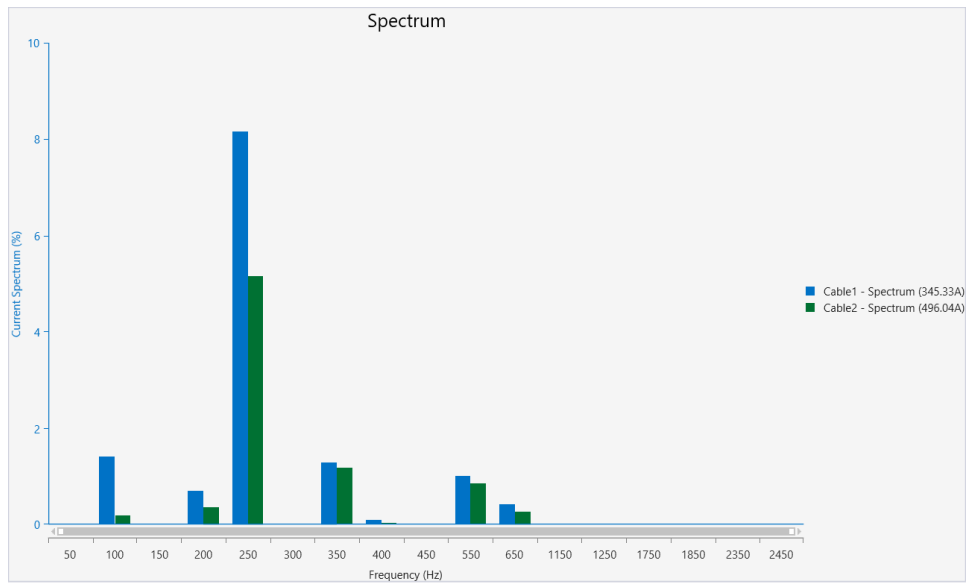


Figure 4 37 le spectre harmonique du courant Avant le filtrage

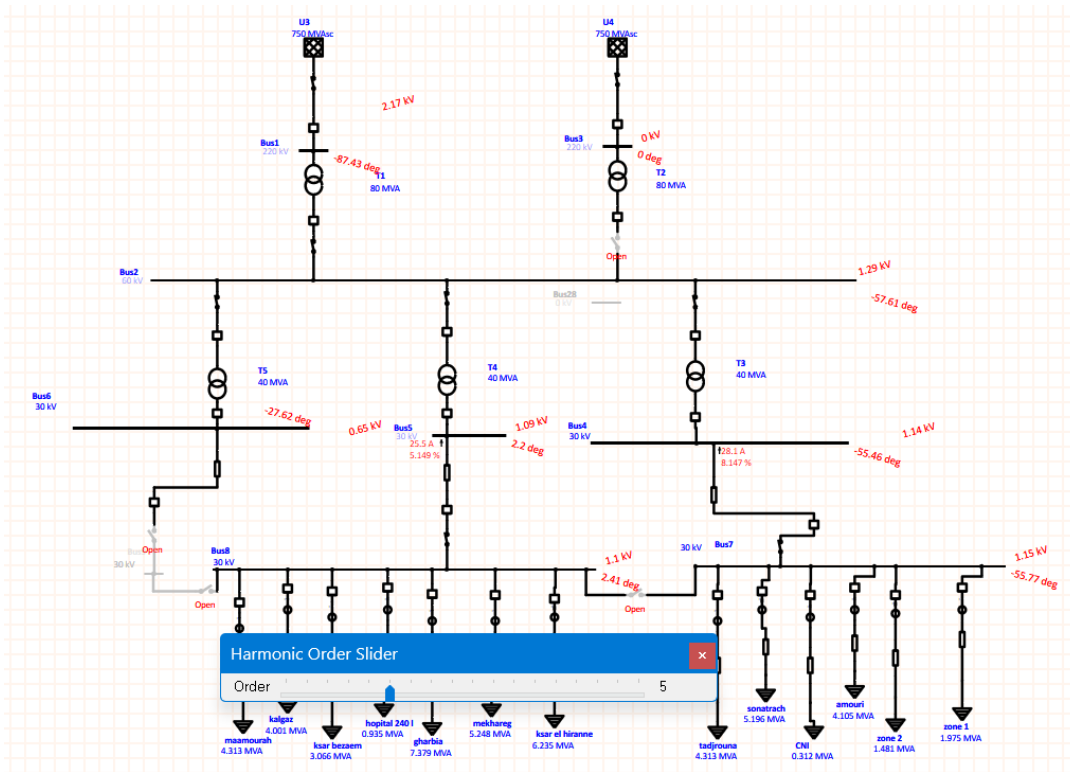


Figure 4 38 la valeur de l'harmonique 5^{eme} du courant Avant le filtrage

3.3 : Élimination cette courant harmoniques à l'aide d'un filtre :

La méthode d'utilisation du filtre est expliquée au paragraphe (2.2.3). Après avoir utilisé le filtre, j'ai remarqué une diminution de la valeur du courant cinquième harmonique et elle est devenue dans les limites reconnues (IEEE519) avec une diminution de la valeur du THD voir le tableau (4.9).

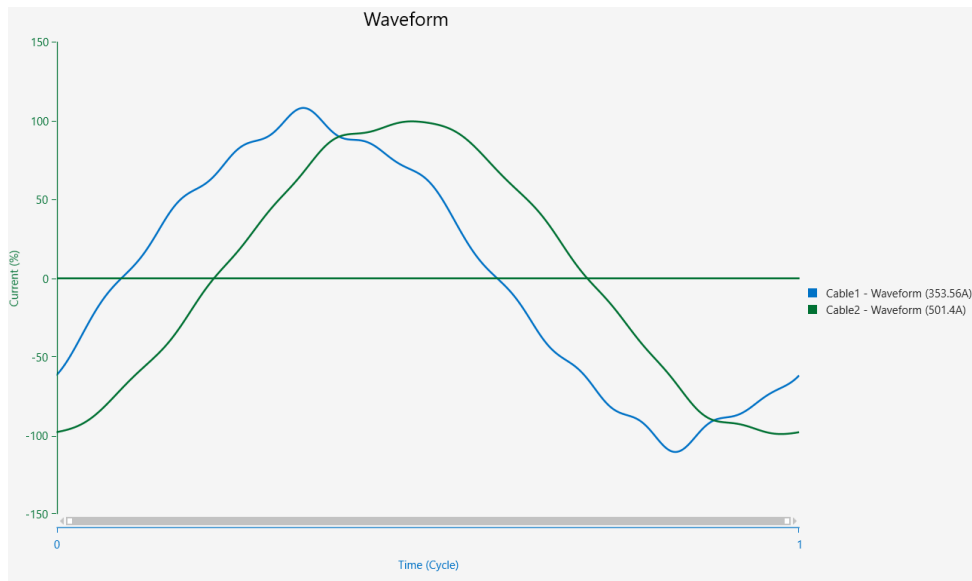


Figure 4 41 les formes d'onde de courant après le filtrage

BUS	ORDRE	IHD		THD	
		AV	AP	AV	AP
Bus 4	5	8.147%	3.485%	3.93%	1.6%
Bus 5	5	5.149%	1.47%	4.01%	3.51%

Table 4 9 comparaison de 5eme harmonique avant et après le filtrage

Conclusions :

L'objectif principal de ce chapitre est d'analyser les harmoniques. Nous avons simulé deux sous-stations à l'aide du programme ETAP. Les harmoniques ont été générées à partir des sources et des types d'harmoniques présents dans le programme. Une étude de flux de charge et une analyse des harmoniques et le Balayage de fréquence harmonique ont été réalisées pour savoir comment les deux sous-stations se comportent en cas de perturbations. Nous avons utilisé des batteries de condensateurs et des filtres pour améliorer et éliminer les harmoniques.

Conclusion générale :

La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité.

En effets les fournisseurs et les consommateurs sont très souvent tenus ; par des conventions ; au respect d'une certaine réglementation qui leur impose les restrictions au service d'une certaine qualité de l'énergie électrique. Entre autres des maximas en matière des taux d'harmoniques de courant injecté dans le réseau.

Il existe aujourd'hui toute une panoplie de matériels et de solutions pour l'atténuation des harmoniques ; tous présentent cependant des inconvénients.

Ces solutions nous permettent d'améliorer la qualité de l'énergie. Différents types de logiciels réseaux électriques peuvent être utilisés pour effectuer une analyse harmonique sur le réseau électrique.

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à la qualité de l'énergie électrique en présentant les facteurs qui peuvent l'affecter, les outils normalisés d'évaluation des perturbations ainsi que leur analyse.

Nous avons essayé de connaitre l'origine de l'intérêt qui lui est porté, les différents phénomènes qui l'influençaient et les normes qui la régissaient.

Nous avons utilisé le logiciel ETAP 19.5(Power System Harmonic Analysis), pour modéliser et simuler le réseau électrique 132/33/11 kV et le réseau de Bouchakeur afin d'effectuer des analyses harmoniques.

La méthode de placement, à des endroits stratégiques du réseau, des condensateurs shunt, de taille appropriée, a été utilisée comme technique d'optimisation. Elle a permis d'améliorer le facteur de puissance, de réduire les pertes et les chutes de tension.

Grace à cette étude nous avons pu juger la place qu'occupe la qualité de l'énergie au sein des industries et acquérir des connaissances à travers l'usage du logiciel ETAP qui offre une solution unique avec des vues intelligentes et une base de données pour créer, configurer, personnaliser et gérer la représentation virtuelle de notre système électrique.

En définitive, les objectifs de ce mémoire étaient de comprendre les perturbations électromagnétiques, particulièrement les harmoniques et de les analyser.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Shenzhen Clou, [What is power quality and why is it important?], Apr 18, 2023
- [2] Abdellatif Fawaz Yadak, [Modeling the Effect of Total Harmonic Distortion on Power Quality of Supply], Mémoire de Master, An-Najah National University,2015
- [4] DOSSIER Puissance, Energie et Perturbations « Harmoniques » - ed 1 – Service Communication 05/2008 Chauvin Arnoux,
- [5] Les harmoniques : à l’origine des perturbations sur le réseau électrique, Le blog MaterielElectrique.com
- [7] kouzou abdellah , «Compensation Active Des Perturbations Dans Un Reseau Basse Tension», Mémoire de Master, Université M’Hamed Bougara,
- [8] Djäirene Abdelkader et Kouidri Aboubakeur Essidek, [Analyse des Harmoniques dans un Réseau Electrique en Utilisant le Logiciel ETAP], Mémoire de Master, Université Amar Thelidji-Laghouat, 2021
- [9] Cahier technique n° 202 Les singularités de l’harmonique 3, J. Schonek, site Schneider Electric.Code
- [10] Himeur abdanneur, [Analyse des harmoniques des appareils électriques sur le réseau électrique], Mémoire de Master, Université de Jijel ,2019
- [11] S.Beaulieu, « Etude et mise au point d’un filtre actif d’harmonique en vue d’améliorer la qualité de l’alimentation électrique», thèse doctorat, Université du Québec, 2007.
- [12] AMMAD DJAMILA et GUEBBOUH HAMZA, [L’Analyse des harmoniques dans les réseaux électriques à l’aide d’ETAP], Mémoire de Master, UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2022/2023
- [13] ETAP 14.0.0, Demo, Getting Started 2015, Operation Technology, Inc.
- [14] PowerStation 4.0 User Guide, chapitre 21 Harmonic Analysis, December 2001
- [15] Philippe FERRACCI, cahier technique Schneider, La qualité de l’énergie électrique, CT 199(e) édition octobre 2001

[16] KEN***** TAREK, LA QUALITE D'ENERGIE (Les harmoniques), Université Houari Boumediene, 2016

[17] Abdallah Omar et Ouenda Latifa, Étude des harmoniques et techniques De Commandes du filtre actif, Université Ahmed Draïa Adrar, 2018