

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Intitulé

Impact de la qualité d'énergie sur le fonctionnement des installations électriques-Application aux installations électriques de l'agence spatiale algérienne ASAL

Présenté par

BOUDRAA Mohand Amokrane et MERAZKA Soulef

Soutenu publiquement le 11 juillet 2021

Membres du Jury

Président :	A. Mekhaldi, professeur à l'ENP.
Promoteur :	A. Boubakeur, professeur à l'ENP.
Co-promoteur :	F. Kadri, directeur général d'Elkindi Engineering.
Examineur :	K. Boughrara, professeur à l'ENP.
Invité :	T. Boudiba, Expert chez Schneider Electric Algérie,

ENP 2021

10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'
Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Intitulé

Impact de la qualité d'énergie sur le fonctionnement des installations électriques-Application aux installations électriques de l'agence spatiale algérienne ASAL

Présenté par

BOUDRAA Mohand Amokrane et MERAZKA Soulef

Soutenu publiquement le 11 juillet 2021

Membres du Jury

Président :	A. Mekhaldi, professeur à l'ENP.
Promoteur :	A. Boubakeur, professeur à l'ENP.
Co-promoteur :	F. Kadri, directeur général d'Elkindi Engineering.
Examineur :	K. Boughrara, professeur à l'ENP.
Invité :	T. Boudiba, Expert chez Schneider Electric Algérie,

ENP 2021

10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

ملخص :

تمتص الشحنات غير الخطية التيارات غير الجيبية وتستهلك عادة الطاقة التفاعلية. وتسبب هاتان الظاهرتان عددا من الاضطرابات تتراوح بين تعطل المعدات وتدهور بعض أو كل المعدات المتصلة بالشبكة بفضل تطور إلكترونيات الطاقة وخاصة إلى التقدم الأخير المحرز في مجال أشباه الموصلات الكهربائية ، التي يمكن التحكم فيها عند الفتح والإغلاق ، والتي تعمل بترددات عالية جدا ، تم تصميم أجهزة تصفية حديثة من التوافقيات ذاتية التكيف ، تسمى التصفية النشطة العمل الذي نقدمه يتعلق بقضية التركيبات الكهربائية لوكالة الفضاء الجزائرية. تم تدقيق هذه التركيبات لأول مرة حيث لوحظ معدل توافقي مرتفع ، لذلك أوصي بتركيب التصفيات النشطة. قمنا أولاً بتحديد حجم هذه التصفيات ، ثم بعد تركيبها ، أجرينا تدقيقاً للطاقة مع الكندي الهندسية حتى نتأكد من التأثير الإيجابي لهذه التصفيات.

الكلمات المفتاحية: الشحنات غير الخطية ، الاضطرابات الكهرومغناطيسية ، الطاقة التفاعلية ، التوافقيات ، التصفيات النشطة ، تدقيق الطاقة.

Abstract :

Non-linear loads absorb non-sinusoidal currents and generally consume reactive power. These two phenomena generate a certain number of disturbances ranging from equipment malfunction to the deterioration of part or all of the equipment connected to the network.

Due to the evolution of power electronics and especially to the recent progress made in the field of power semiconductors, controllable on and off, operating at very high frequencies, modern self-adapting harmonic filtering devices, called active filtering, could be designed.

The work we present concerns the case of the electrical installations of the Algerian space agency. These installations were audited for the first time where a high harmonic rate was observed, so it was recommended to install active filters as a solution. We begin with the dimensioning of active anti harmonics filters, then, after their installation, we carried out an energy audit with El Kindi Engineering to confirm the positive impact of those filters.

Keywords: non-linear loads, electromagnetic disturbances, reactive power, harmonics, active filters, energy audit.

Résumé :

Les charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment généralement de la puissance réactive. Ceci engendre des harmoniques, qui entraînent des effets néfastes allant du dysfonctionnement des équipements jusqu'à la détérioration d'une partie ou de la totalité des équipements connectés sur le réseau.

l'évolution de l'électronique de puissance et les progrès récents réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance, ont permis la conception des dispositifs de filtrage actif. Ce type de filtres permet de détecter et de compenser les harmoniques en temps réel.

Le travail que nous présentons concerne le cas des installations électriques de l'agence spatiale algérienne. Ces installations ont été auditées une première fois où un taux d'harmonique élevé a été constaté, il lui a donc été recommandé d'installer des filtres actifs comme solution. Nous avons d'abord dimensionné ces filtres, puis, nous avons réalisé après leur installation un audit énergétique avec El Kindi Engineering pour pouvoir confirmer l'impact positif de ces filtres.

Mots clés: charge non linéaires, perturbations électromagnétiques, énergie réactive, harmoniques, filtres actifs, audit énergétique.

Remerciements

Avant tout nous voudrions remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir aidé et donné la volonté de mener à terme ce présent travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement Monsieur **A. BOUBAKEUR**, Professeur à l'École Nationale Polytechnique, pour avoir encadré et dirigé ce travail, pour ses conseils et sa disponibilité, pour son suivi et son orientation ainsi que pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée durant toute notre période de préparation de notre travail.

Nous adressons aussi nos remerciements à Monsieur **F. KADRI**, directeur général d'Elkindi Engineering, pour l'appui technique et pour sa disponibilité durant la préparation de notre projet de fin d'études ainsi que pour tout le savoir qu'il nous a transmis durant ce projet.

Nos vifs remerciements s'adressent à Monsieur **A. MEKHALDI**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour l'honneur qu'il nous a fait de présider le Jury de soutenance.

Nous tenons également à remercier Monsieur **K. BOUGHRARA**, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nous adressons nos remerciements également à Monsieur **T. BOUDIBA**, Expert chez Schneider Electric Algérie, d'avoir accepté notre invitation pour être parmi les membres du jury.

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électrotechnique, pour leur encadrement tout au long de notre formation.

Des remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement et la finalisation de notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma famille, mes amis et en particulier à mes parents,

Mohand Amokrane.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur confiance et leur soutien. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A ma famille, mes amies et toutes les personnes qui me sont chères.

Soulef.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale	14
1 Travaux sur la qualité de l'énergie	16
1.1 Introduction.....	16
1.2 Etat des lieux de la maîtrise de l'énergie électrique dans le monde.....	16
1.2.1 Production de l'énergie électrique	16
1.2.2 Consommation de l'énergie électrique.....	17
1.2.3 Le besoin de la maîtrise de l'énergie électrique.....	18
1.2.4 Amélioration de la qualité de l'énergie électrique	18
1.3 Importance de la qualité d'énergie dans l'industrie	19
1.3.1 Consommation de l'énergie dans le secteur industriel.....	19
1.3.2 Les effets de la dégradation de la qualité de l'énergie électrique dans l'industrie	19
1.4 Perturbations électromagnétiques	19
1.5 Organismes qui traitent la maîtrise de l'énergie électrique	20
1.5.1 CEI	20
1.5.2 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)	20
1.6 Normes régissant la qualité de l'énergie électrique	21
1.6.1 IEEE 519.....	21
1.6.2 IEEE 1159.....	21
1.6.3 EN50160.....	21
1.7 Les institutions nationales qui régissent la maîtrise de l'énergie	22
1.7.1 Agence nationale pour la production et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE).....	22
1.7.2 Le commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (CEREFÉ).....	22
1.8 Conclusion	22
2 Perturbations électromagnétiques	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Approche normative	25
2.2.1 EN 50160.....	25
2.2.2 Domaine d'application	26

2.2.3	Objet de la norme	26
2.3	Classification des perturbations électromagnétiques	26
2.3.1	Classification selon les paramètres caractérisant la tension	26
2.3.2	Classification des perturbations électromagnétiques selon leur durée	27
2.4	Creux des tensions.....	28
2.4.1	Définitions	28
2.4.2	Causes des creux de tension.....	29
2.4.3	Effets et conséquences des creux de tension	30
2.4.4	La protection contre les creux de tension	31
2.5	Déséquilibre de la tension et du courant.....	31
2.5.1	Causes du déséquilibre de tension et de courant.....	32
2.5.2	Effets des déséquilibres de tension.....	32
2.5.3	Solutions	32
2.6	Définition des Surtensions et leurs origines	33
2.6.1	Origines des surtensions	34
2.6.2	Effets.....	34
2.6.3	Solutions	35
2.7	Fluctuations et flicker	35
2.7.1	Classification.....	36
2.7.2	Origine	37
2.7.3	Solutions	38
2.8	Variations de la fréquence d'alimentation.....	38
2.9	Conclusion	39
3	Les harmoniques et l'énergie réactive	41
3.1	Introduction.....	41
3.2	Définitions	41
3.3	Propagation des harmoniques	41
3.4	Origine des harmoniques	41
3.4.1	Harmoniques de tension	42
3.4.2	Harmoniques de courant.....	44
3.5	Indices caractérisant les harmoniques	45
3.5.1	Rang de l'harmonique	45
3.5.2	Expression de la grandeur déformée	45
3.5.3	Valeur efficace d'une grandeur déformée	46
3.5.4	Facteur de crête.....	46

3.5.5	Le taux de distorsion harmonique (THD).....	46
3.5.6	Distorsion totale de la demande (TDD).....	46
3.5.7	Facteur de Puissance	47
3.6	Les effets des harmoniques.....	47
3.7	La Réglementation sur la Pollution Harmonique.....	48
3.7.1	La norme IEEE 519.....	49
3.7.2	La norme EN50160	49
3.8	Compensation des harmoniques.....	51
3.8.1	Le filtrage passif.....	52
3.8.2	Le filtrage actif.....	53
3.9	Compensation de la puissance réactive	56
3.9.1	Energie réactive.....	56
3.9.2	Intérêt de la compensation de l'énergie réactive.....	56
3.9.3	Méthode de compensation de l'énergie réactive.....	57
3.9.4	Calcul de la puissance de compensation des condensateurs.....	57
3.10	Conclusion	58
4	Audit énergétique	60
4.1	Introduction.....	60
4.2	Objectifs de L'audit énergétique.....	60
4.3	Audit énergétique en Algérie	60
4.4	Modalités d'agrément des auditeurs	62
4.5	Généralités sur l'audit énergétique.....	62
4.6	Règles à respecter dans la conduite de l'audit	63
4.7	Les étapes de L'audit.....	64
4.7.1	Analyse préalable	64
4.7.2	Collecte des données	64
4.7.3	Analyse des données existantes et rapport préliminaire.....	64
4.7.4	Campagne de mesures complémentaires	64
4.7.5	Analyse détaillée	64
4.7.6	Bilan énergétique global.....	65
4.7.7	Plan d'actions énergétique	65
4.7.8	Rapport d'audit	66
4.8	Les compagnes de mesures.....	67
4.8.1	Liste des Mesures de contrôle énergétique.....	67
4.8.2	Types de mesures	68

4.9	Instrumentation	68
4.9.1	Analyseur de réseau électrique	69
4.9.2	Logiciel Power Monitoring Expert	70
4.9.3	Fonctions.....	71
4.10	Conclusion	72
5	Application pratique : audit énergétique des installations électriques de l'ASAL	74
5.1	Introduction.....	74
5.2	Présentation de L'ASAL.....	74
5.2.1	Missions et attributions.....	74
5.2.2	Entités opérationnelles.....	74
5.2.3	Distribution de l'énergie au niveau de l'ASAL	75
5.2.4	Description de l'installation audité.....	77
5.3	Description du problème.....	78
5.4	Déroulement du premier audit et recommandations	78
5.4.1	Les paramètres de TGBT1-6.....	78
5.4.2	Analyse des caractéristiques électriques selon la norme EN 50160	80
5.4.3	Analyse des harmoniques du courant selon l'IEEE 519-2014	84
5.5	Dimensionnement du filtre actif.....	89
5.6	Deuxième audit (audit de vérification).....	92
5.6.1	Les paramètres de TGBT1-6 après l'installation du filtre.....	92
5.6.2	Les harmoniques de tension.....	93
5.6.3	Analyse harmonique du courant selon la norme IEEE 519-2014 après l'installation filtre	94
5.7	Comparaison entre les résultats des deux audits	99
5.7.1	Les spectres harmoniques	99
5.7.2	La forme d'onde des courants.....	102
5.8	Conclusion	103
	Conclusion générale	104
	Références bibliographiques	106

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles [1].....	30
Tableau 3.1 Influence de l'impédance de source [20].....	42
Tableau 3.2 Effet des harmoniques sur les matériels [23].....	48
Tableau 3.3 Limites (en %) de distorsion de courant pour les systèmes de distribution générale (120V à 69 kV) [17]	49
Tableau 3.4 Limites de distorsion de tension [17]	49
Tableau 3.5 Limites de distorsion de tension (U_h %) dans le cas de basse tension [9]	50
Tableau 3.6 Limites de distorsion de tension (U_h %) dans le cas de la moyenne tension [9].	50
Tableau 3.7 Limites de distorsion de tension (U_h %) dans le cas de la haute tension [9]	51
Tableau 4.1 Mesure de contrôle énergétique [35].....	67
Tableau 5.1 Les mesures de la fréquence pendant une semaine au niveau de TGBT1-6	80
Tableau 5.2 Les mesures de la tension d'alimentation pendant la semaine au niveau de TGBT1-6.....	81
Tableau 5.3 Les harmoniques de la tension V1	82
Tableau 5.4 Les harmoniques de la tension V2	82
Tableau 5.5 Les harmoniques de la tension V3	83
Tableau 5.6 Les exigences de réussite et d'échec de la norme EN50160.....	83
Tableau 5.7 Limites de distorsion du courant pour les systèmes de 120 V à 69 kV.....	84
Tableau 5.8 Harmoniques impaires du courant I1	84
Tableau 5.9 Harmoniques paires du courant I1	85
Tableau 5.10 Les harmoniques impaires du courant I2.....	86
Tableau 5.11 Les harmoniques paires du courant I2.....	86
Tableau 5.12 Les harmoniques impaires de courant I3.....	87
Tableau 5.13 Les harmoniques paires de courant I3.....	88
Tableau 5.14 Les harmoniques de tension V1	93
Tableau 5.15 Les harmoniques de tension V2	94
Tableau 5.16 Les harmoniques de tension V3	94
Tableau 5.17 Les harmoniques impaires du courant I1.....	94
Tableau 5.18 Les harmoniques paires du courant I1	95
Tableau 5.19 Les harmoniques impaires du courant I2.....	96
Tableau 5.20 Les harmoniques paires du courant I2.....	97
Tableau 5.21 Les harmoniques impaires du courant I3.....	98
Tableau 5.22 Les harmoniques paires du courant I3.....	98

Liste des figures

Figure 1.1 Répartition de la production d'électricité dans le monde entre 1990 et 2017 [2] ..	17
Figure 1.2 Poids énergétique de chaque secteur industriel en 2011 (source CEREN ,2013) [7]	19
Figure 2.1 Formes d'ondes de différentes perturbations électromagnétiques [11]	27
Figure 2.2 Caractérisation d'un creux de tension [13]	29
Figure 2.3 Comparaison entre un creux et une coupure brève de tension [14].....	29
Figure 2.4 Amplitude d'un creux de tension provoqué par	30
Figure 2.5 Déséquilibre du courant clair - La phase rouge a une valeur efficace différente de celle des 2 autres phases [15].....	32
Figure 2.6 Exemple de surtension temporaire [11]	33
Figure 2.7 Forme d'onde de surtension permanente [18].....	34
Figure 2.8 Forme d'onde des fluctuations de la tension [19].....	36
Figure 2.9 Perturbations affectant la valeur efficace de la tension [19]	36
Figure 2.10 Fluctuations de tension [19]	37
Figure 2.11 Forme d'onde de la variation de fréquence [15].....	38
Figure 3.1 Impédances dans un système électrique [21]	43
Figure 3.2 Formes d'onde pour les charges linéaires et non linéaires [22]	44
Figure 3.3 Filtre passif résonnant [24].....	52
Figure 3.4 Filtre passif amorti [24].....	53
Figure 3.5 Filtre actif parallèle [16].....	54
Figure 3.6 Filtre actif série [28].....	55
Figure 3.7 Combinaison des filtres actifs série et parallèle (UPQC) [29]	55
Figure 3.8 Filtre actif série et filtre passif parallèle [29]	56
Figure 3.9 Diagramme de Fresnel de la puissance de compensation [30].....	58
Figure 4.1 Répartition de la consommation énergétique nationale par secteur 2017 en kTEP (mille Tonne d'Equivalent Pétrole) [Bilan énergétique national 2018, ministère de l'énergie]	61
Figure 4.2 Instruments portables de base, nécessaires pour effectuer un audit énergétique [35]	69
Figure 4.3 Analyseur de réseau [35].....	70
Figure 4.4 Interface de logiciel Power Monitoring Expert [37].....	71
Figure 4.5 Architecture du logiciel PME [37]	72
Figure 5.1 Les cellules MT au niveau de l'ASAL	75
Figure 5.2 Schéma unifilaire d'un poste de livraison HTA/BT à comptage HTA.....	75
Figure 5.3 TGBT de l'ASAL	76
Figure 5.4 Gaine à barre.....	77
Figure 5.5 La variation de la puissance active et réactive au niveau de TGBT1-6.....	79
Figure 5.6 La variation de facteur de puissance au niveau de TGBT1-6	80
Figure 5.7 La variation de la fréquence pendant la semaine au niveau de TGBT1-6	81
Figure 5.8 La variation de la tension pendant la semaine au niveau de TGBT1-6.....	82
Figure 5.9 La variation des harmoniques de courant I1 en fonction du temps (rang 11-16)...	86

Figure 5.10	La variation des harmoniques du courant I2 en fonction du temps (rang 11-16).	87
Figure 5.11	La variation des harmoniques du courant I3 en fonction du temps (rang 11-16).	89
Figure 0.1	L'architecture pour la résolution du problème des harmoniques.....	93
Figure 5.13	Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle	90
Figure 5.14	Filtre actif d'harmoniques - 120 A 380..480 V CA -Boîtier IP31 installé pour TGBT 1-6.....	92
Figure 5.15	La consommation de la puissance active et réactive de TGBT1-6 en fonction du temps.....	92
Figure 5.16	La variation du facteur de puissance de TGBT1-6 en fonction du temps.....	93
Figure 5.17	La variation des harmoniques de courant I1 en fonction du temps (rang 35-39).	96
Figure 5.18	La variation des harmoniques de courant I2 en fonction du temps (rang 35-39).	97
Figure 5.19	La variation des harmoniques de courant I3 en fonction du temps (rang 35-39).	99
Figure 5.20	Spectre harmonique de tension avant l'installation du filtre	100
Figure 5.21	Spectre harmonique de courant avant l'installation du filtre	100
Figure 5.22	Spectre harmonique de tension IGBT 1-6 après l'installation du filtre	101
Figure 5.23	Spectre harmonique de courant IGBT 1-6 après l'installation du filtre.....	101
Figure 5.24	La forme d'onde des courants de TGBT1-6 avant l'installation du filtre.....	102
Figure 5.25	La forme d'onde des courants d'IGBT 1-6 après l'installation du filtre	102

Liste des abréviations

APRUE	Agence nationale pour la production et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie
ASAL	Agence Spatiale algérienne
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
CEM	Compatibilité Electromagnétique
CENELEC	Comité Européen de la Normalisation Électrotechnique
CEREFÉ	Commissariat Aux Energies Renouvelables Et A L'efficacité Energétique
FAP	Filtre Actif Parallèle
FAS	Filtre Actif Série
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
IEEE	Institute of Electrical And Electronics Engineer
TEP	Tonne d'Equivalent Pétrole
MT/BT	Moyenne Tension / Basse Tension
PCC	Point de couplage commun
PME	Power Monitoring Expert
SVC	Static Var Compensator
TDD	Total Demand Distortion
TGBT	Tableau General Basse Tension
THD	Total Harmonics Distortion
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
UPS	Uninterruptible Power Supply

Introduction générale

La qualité d'énergie est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années, essentiellement pour son impact sécuritaire, stratégique et aussi économique. Cette notion concerne tous les acteurs du domaine énergétique [1].

L'augmentation régulière du nombre d'équipements dans le monde de l'industrie a mené à l'augmentation des taux d'harmoniques, des déséquilibres de courants et de tensions et de la consommation de l'énergie réactive. D'autre part, d'autres incidents peuvent survenir et causer des chutes et creux de tension tel que le démarrage brusque des machines tournantes à fortes puissances. Bien entendu toutes ces perturbations ont des conséquences pouvant aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale des équipements. Et c'est sur ce problème que nous focaliserons notre étude, en traitant un cas pratique au sein de l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL), tout en respectant les normes internationales qui régissent la qualité de l'énergie électrique.

Les objectifs de ce mémoire sont:

- de comprendre, à travers les études sur le sujet, les principaux phénomènes qui diminuent la qualité de l'énergie électrique, leurs effets, leurs origines, les conséquences sur les équipements et les solutions permettant de les diminuer ;
- de surveiller la qualité de l'énergie électrique à travers l'analyse et la mesure des perturbations électromagnétiques, en effectuant des audits énergétiques.

Pour atteindre ces objectifs de recherche, notre mémoire sera composé de cinq chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la description de la maîtrise de l'énergie dans le monde ainsi qu'à la notion de qualité de l'énergie, son importance dans l'industrie, ainsi que les normes et les institutions nationales qui la réglementent.

Dans le deuxième chapitre, qui concerne les perturbations électromagnétiques, nous commencerons par présenter les approches normatives, afin de décrire les différents types de perturbations électromagnétiques, leurs origines et leurs impacts sur les installations électriques.

Le troisième chapitre de ce mémoire sera consacré à l'étude des harmoniques d'une manière profonde, en abordant les normes qui les traitent et en donnant des solutions techniques et technologiques.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons une méthodologie de l'audit énergétique dans les sites industriels, qui va permettre de définir un modèle énergétique (par la collecte des données ou par la mesure) et de suivre la performance énergétique du site audité.

Finalement, dans le cinquième chapitre, nous effectuerons l'application pratique des audits énergétiques et des notions théoriques qu'on a citées précédemment au sein de l'agence spatiale algérienne.

Chapitre 01:

Travaux sur la qualité d'énergie

1 Travaux sur la qualité de l'énergie

1.1 Introduction

Pour répondre au besoin croissant d'une grande fiabilité et d'une meilleure qualité d'énergie, les mesures d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique prennent beaucoup d'importance ces dernières années. Les composants de l'électronique de puissance sont de plus en plus utilisés pour la conversion de l'énergie et pour la commande, de ce fait plus de perturbations électromagnétiques sont provoquées au niveau des équipements. Ces perturbations peuvent causer des problèmes, des pannes ou des dégâts par l'affectation d'un ou de plusieurs paramètres.

Dans ce chapitre nous commencerons par une brève description de l'état de l'énergie électrique dans le monde ; sa production, sa consommation et les organismes qui la traitent. Puis nous aborderons la qualité de l'énergie électrique et nous allons définir les paramètres qui la conditionnent, ensuite nous parlerons de son importance dans le secteur industriel. Par la suite, nous passerons aux normes internationales qui régissent la qualité de l'énergie électrique et les institutions nationales qui la réglementent.

1.2 Etat des lieux de la maîtrise de l'énergie électrique dans le monde

L'énergie électrique joue un rôle très important dans la satisfaction des différents besoins de l'être humain. Son développement conditionne l'amélioration de plusieurs secteurs comme l'économie, la santé, la sécurité et l'environnement.

1.2.1 Production de l'énergie électrique

L'énergie existe sous des formes très diverses (figure 1.1), la production de l'énergie électrique est réalisée en transformant les sources primaires d'énergie (qui existent déjà dans la nature). Deux types d'énergie existent :

- les énergies fossiles ;
- les énergies renouvelables.

1.2.1.1 Energies fossiles

C'est un type d'énergie non renouvelable, issu de la transformation de la matière vivante.

Les ressources fossiles les plus connues sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Ces matières premières sont faciles à transporter et à stocker, mais elles sont à coût fluctuant et causent la diminution des réserves mondiales.

L'uranium 235, utilisé pour la production de l'énergie nucléaire, est un combustible non renouvelable. Cependant, on ne peut pas le qualifier de combustible fossile car il est dépourvu de carbone.

1.2.1.2 Energies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergies d'énergie naturelles dont le renouvellement est suffisamment rapide pour qu'elles puissent être considérées comme presque inépuisables.

Il existe cinq types d'énergies renouvelables :

- l'énergie renouvelable de type solaire ;
- l'énergie renouvelable de type éolien;
- l'énergie renouvelable de type hydraulique;
- l'énergie issue de la biomasse;
- l'énergie renouvelable de type géothermique.

→ La production de l'énergie électrique était issue en 2018 des combustibles fossiles (63,9%), du nucléaire (10.1%) et des énergies renouvelables (25.5%) [2].

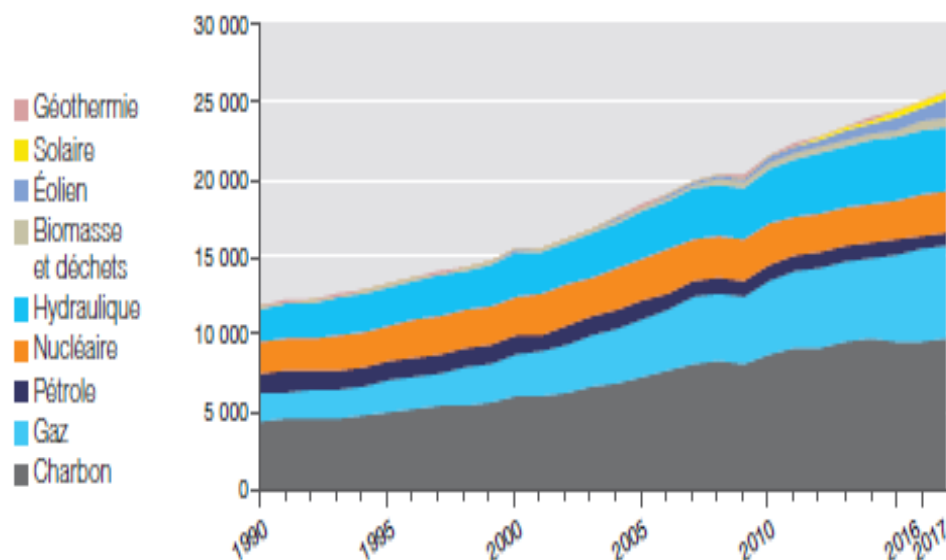


Figure 1.1 Répartition de la production d'électricité dans le monde entre 1990 et 2017 [2]

1.2.2 Consommation de l'énergie électrique

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en forte croissance dans toutes les régions du monde, cette demande croissante est due à l'accroissement de la population, le besoin montant de confort et la croissance économique.

L'énergie électrique totale consommée augmente d'une moyenne de 3% d'année en année à partir de l'an 2000, en 2017 elle a atteint 22315 tWh [3].

Il semble que les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part.

Face à cette demande croissante, les entreprises d'énergie électrique ont été contraintes d'exploiter de plus en plus leurs réseaux, ce qui pourrait causer le dépassement des limites de sécurité des équipements et l'augmentation des pertes joule, qui engendre l'augmentation des pertes totales du réseau électrique (l'écart entre l'énergie injectée sur le réseau et l'énergie livrée aux consommateurs).

1.2.3 Le besoin de la maîtrise de l'énergie électrique

La maîtrise de l'énergie électrique est nécessaire pour les raisons suivantes :

- l'augmentation de la puissance électrique installée et l'introduction de nouveaux types de charges [3] ;
- la complexification des systèmes électriques et de leurs architectures ;
- la généralisation des équipements sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations ;
- les arrêts de production, les pertes de matières premières, la baisse de la qualité de la production, le vieillissement prématuré des équipements et le coût élevé, qui résultent des perturbations électromagnétiques [4] ;
- La nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises suite à l'ouverture du marché de l'électricité.

1.2.4 Amélioration de la qualité de l'énergie électrique

Selon l'IEEE, on appelle "power quality problem" toute variation dans l'alimentation en puissance électrique, ayant pour conséquence le dysfonctionnement d'équipements des utilisateurs, telle que : les creux de tension, les surtension temporaires, les fluctuations de tension, les harmoniques, le déséquilibre... Cependant, tous ces phénomènes affectent essentiellement la tension qui est fournie à l'utilisateur. Si ce dernier n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie. C'est pourquoi on dit parfois que la qualité de l'énergie se réduit à la qualité de la tension ("power quality = voltage quality") [5].

La dégradation de la qualité de l'énergie électrique peut avoir deux sources :

- Les charges ou les équipements.
- Les lignes de transmission ou de distribution.

Pour améliorer la qualité de l'énergie électrique, on doit :

1. la surveiller: cette étape représente l'étape préliminaire dans la recherche de solutions à travers la mesure et l'analyse des perturbations électriques dans les réseaux. La surveillance permet de comprendre l'origine des perturbations et d'évaluer leurs impacts sur les équipements afin de trouver la solution la plus appropriée [6] ;

2. trouver des solutions préventives et curatives : en utilisant les composants de l'électronique de puissance qui permettent de contrôler le flux de puissance active et réactive [6].

Par conséquent l'électronique de puissance peut agir de deux façons:

- en évitant que les perturbations générées par les charges perturbatrices soient injectées au réseau ;
- en protégeant les charges sensibles des perturbations présentes sur le réseau.

1.3 Importance de la qualité d'énergie dans l'industrie

1.3.1 Consommation de l'énergie dans le secteur industriel

La consommation totale d'énergie du secteur industriel (hors usages en matière première qui représente un peu de moins de 10%) est très élevée, répartie dans différents secteurs (figure 1.2), [7].

La connaissance de la consommation énergétique et de son efficacité est essentielle pour toute entreprise en recherche de meilleures performances [8].

Si les entreprises n'ont pas une vision claire de leurs consommations énergétiques, alors il leur est impossible d'envisager des améliorations d'efficacité énergétique.

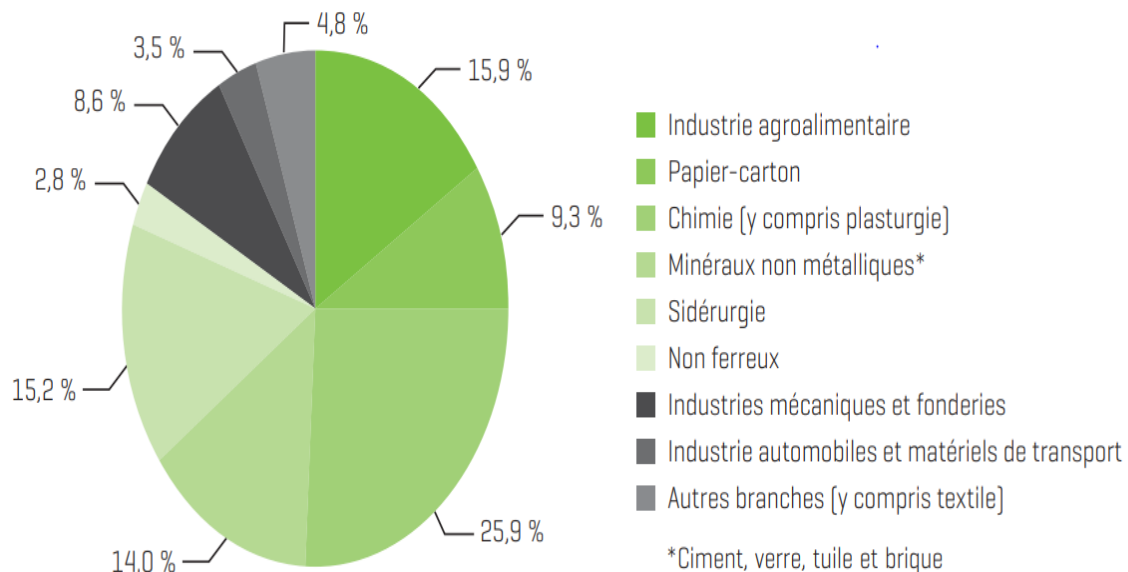


Figure 1.2 Poids énergétique de chaque secteur industriel en 2011 (source CEREN ,2013) [7]

1.3.2 Les effets de la dégradation de la qualité de l'énergie électrique dans l'industrie

- la non continuité du service qui résulte du dysfonctionnement des équipements ou de l'arrêt de la chaîne;
- le surdimensionnement, la réduction du rendement et la surcharge des installations.

1.4 Perturbations électromagnétiques

Les ondes électriques (courant, tension) sont toujours périodiques quelles que soient les perturbations. La déformation du signal électrique est suivie de perturbations en restant périodique, ce qui nous permet d'utiliser des outils mathématiques comme la série de Fourier qui nous permet de décomposer le signal périodique déformé en une somme d'harmoniques [7].

L'énergie électrique est la variation du produit tension-courant dans le temps et est donnée par l'équation suivante:

$$E(t) = \int_0^t u(t).i(t).dt$$

- La tension est fournie par le distributeur.
- Le courant électrique est absorbé par le consommateur.

Alors la qualité de l'énergie dépend à la fois du fournisseur et du consommateur (signal de tension-courant).

1.5 Organismes qui traitent la maîtrise de l'énergie électrique

1.5.1 CEI

La Commission électrotechnique internationale (CEI-IEC) dont le siège est à Genève (Suisse) est une organisation créée en 1906 et ses normes sont reconnues par plus de 100 pays.

Elle vise à créer pour ses membres une complicité internationale pour normaliser et établir des règles et recommandations régissant différents matériels faisant partie des domaines de l'électrotechnique, de l'électronique, de la compatibilité électromagnétique et des techniques connexes, ceci afin de faciliter les échanges dans le monde, améliorer la qualité des produits et assurer la sécurité dans leurs utilisations. La CEI élabore également des normes en collaboration avec l'IEEE [9].

La CEI diffuse essentiellement les publications suivantes :

- les normes internationales;
- les spécifications techniques;
- les rapports techniques;
- les spécifications accessibles au public;
- les guides (publications non normatives);
- les accords techniques industriels;
- les documents d'évaluation des orientations technologiques.

1.5.2 IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

L'IEEE est une association qui développe, définit et révisé les normes électriques et informatiques. Sa mission est de favoriser l'innovation et l'excellence technologiques au profit de l'humanité.

Elle se fait connaître en publiant des revues, journaux et magazines, portant sur des sujets du domaine de l'ingénierie électrotechnique.

L'IEEE joue un rôle très important dans l'établissement de normes, depuis sa création elle a pu définir de nombreuses normes, par l'IEEE Standards Association.

Elle assure la publication de ses propres normes et des autres textes rédigés par des membres de son organisation.

1.6 Normes régissant la qualité de l'énergie électrique

1.6.1 IEEE 519

Cette norme a été introduite en 1981, puis elle a connu plusieurs mises à jour et amélioration. Elle règlemente qualité de l'énergie qui doit être fournie au point de couplage commun (le point électriquement le plus proche d'une charge particulière, situé sur le réseau de distribution, auquel d'autres charges sont ou pourraient être raccordées) et indique les limites de distorsion des formes d'onde du courant et de la tension en abordant les harmonique d'une manière détaillée (méthode de mesures, limites...).

1.6.2 IEEE 1159

Cette norme concerne les projets de surveillance de la qualité de l'énergie électrique et la surveillance des caractéristiques des systèmes électriques.

Elle résume et décrit les phénomènes qui mènent aux problèmes de dégradation de la qualité d'énergie.

Elle présente aussi les instruments qui permettent d'effectuer la surveillance de la qualité de l'énergie électrique et fournie des informations sur leurs applications : marges de sécurité, zones à surveiller, les seuils de mesure, techniques de mesure...

1.6.3 EN50160

Créée par le CENELEC (Comité Européen de la Normalisation Électrotechnique), la norme EN 50160 définit, décrit et spécifie les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution à basse, moyenne et haute tension dans des conditions normales d'exploitation. Elle présente les différents types de perturbations auxquelles la tension d'un réseau peut être soumise, les paramètres à surveiller et la durée de leur surveillance.

Elle concerne les paramètres suivant :

- la fréquence ;
- l'amplitude de la tension fournie ;
- la forme d'onde ;

- l'équilibre entre tensions.

Cette norme indique les caractéristiques de ces quatre paramètres. Ces derniers varient lorsqu'ils sont sous l'effet des perturbations électromagnétiques [10].

1.7 Les institutions nationales qui régissent la maîtrise de l'énergie

1.7.1 Agence nationale pour la production et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE)

C'est l'institution nationale qui est chargée de la promotion de la mise en œuvre des politiques en matière d'énergie. Cette agence placée sous la tutelle du ministère de l'énergie et des mines, a été créée par décret présidentiel en 1985.

L'APRUE dans le cadre du programme national est organisée en trois niveaux:

1-Le cadre économique et de planification:

Elle assure :

- la maintenance d'une base de données sur la consommation d'énergie,
- l'établissement d'un plan global pour la maîtrise de l'énergie,
- l'évaluation des programmes d'énergie,
- l'étude des scénarios futurs en matière de demande en énergie,
- l'évaluation des économies d'énergie possibles.

2- Les programmes et projets sectoriels dans le cadre de partenariats :

Elle se charge d'élaborer des projets dans le cadre de partenariats en prenant en considération les dimensions techniques, économiques, environnementales et financières.

3-Le cadre du savoir-faire et de la promotion:

L'APRUE se charge aussi de l'organisation et de la promotion des informations appropriées pour le développement de la maîtrise de l'énergie.

1.7.2 Le commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (CEREFÉ)

Le CEREFÉ est un établissement public qui a pour missions de :

- participer à l'élaboration d'un cadre législatif et réglementaire attractif pour le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique,
- suivre l'évolution technique et économique se rapportant à son objet,
- rassembler, traiter, exploiter, conserver, valoriser et diffuser l'information scientifique et technique liée à ses activités,
- identifier et évaluer le potentiel en ressources énergétiques renouvelables disponibles dans les différentes régions du pays.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions générales relatives à la qualité de l'énergie électrique. Nous avons d'abord décrit l'état de l'énergie électrique dans le monde: ses types, sa production et sa consommation.

Par la suite, nous avons abordé la notion de qualité d'énergie électrique et nous avons constaté que cette dernière dépend à la fois de la qualité de la tension et de celle du courant. Nous avons aussi constaté que l'énergie électrique est exposée à des perturbations électromagnétiques qui influencent sa qualité.

A la fin du chapitre, nous avons donné les normes ainsi que les institutions nationales et internationales qui sont concernées par la maîtrise de l'énergie électrique.

Chapitre 02:

Perturbations électromagnétiques

2 Perturbations électromagnétiques

2.1 Introduction

La forte consommation d'énergie électrique dans le secteur industriel induit des exigences sur la qualité de l'énergie à fournir. La tension au point de livraison influence considérablement la qualité de l'énergie électrique. Cette tension, affectée par certains incidents peut se détériorer. Différentes perturbations apparaissent par conséquent comme : Les surtensions, les déséquilibres, les fluctuations, les harmoniques et les creux de tension.

Selon leur fréquence, les perturbations sont classées en deux groupes: perturbations au niveau du fondamental et perturbations harmoniques. Les perturbations au niveau du fondamental affectent l'amplitude des grandeurs d'intérêt (tension ou courant) [10].

L'utilisation accrue, dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoque aussi de grands problèmes de perturbation.

Les perturbations affectent directement ou indirectement les composants de l'installation électrique, c'est pour cela que des normes visant à les limiter sont établies.

Dans ce chapitre, nous allons traiter principalement le premier type de perturbations, c'est-à-dire les perturbations au niveau du fondamental. La première partie de ce chapitre sera consacrée aux normes relatives aux perturbations électromagnétiques ; nous allons présenter particulièrement la **EN 50160** ainsi que les principaux points qu'elle aborde. Dans la deuxième partie, nous allons citer les différents types des perturbations ainsi que leurs effets.

2.2 Approche normative

Plusieurs normes traitent le problème de perturbations électromagnétiques, nous allons nous intéresser particulièrement aux normes suivantes :

- IEEE 519 : elle concerne les perturbations électromagnétiques qui touchent le courant et la tension, et se concentre principalement sur le problème d'harmoniques qui va être traité d'une manière détaillée dans le chapitre suivant.
- EN 50160 : elle traite toutes les perturbations électromagnétiques qui influencent la tension fournie par le réseau public de distribution.

2.2.1 EN 50160

Cette Norme Européenne définit, décrit et spécifie les caractéristiques principales de tension fournie par un réseau public de basse tension, moyenne tension et haut tension dans des conditions normales d'exploitation. Elle spécifie :

- les variations de la tension qui peuvent avoir lieu en chaque point de livraison du réseau,

- les perturbations électromagnétiques de la tension.

Les caractéristiques de la tension données dans cette norme ne sont pas destinées à être utilisées comme des niveaux de compatibilité électromagnétique (CEM) ou comme des limitations d'émission de l'utilisateur pour les perturbations conduites dans les réseaux publics de distribution [9].

2.2.2 Domaine d'application

Elle ne s'applique pas dans les cas suivants [9]:

- a) lors des conditions d'alimentation provisoires qui assurent la continuité de l'alimentation des utilisateurs du réseau suite à une avarie ou pendant les travaux d'entretien;
- b) dans le cas de non-conformité de l'installation ou des équipements aux normes ou aux exigences techniques qui sont établies soit par l'administration, soit par le gestionnaire du réseau;
- c) dans des situations exceptionnelles comme :
 - les conditions climatiques exceptionnelles et autres catastrophes naturelles ;
 - les grèves (soumises à des exigences légales) ;
 - les interruptions dues à des causes externes.

2.2.3 Objet de la norme

La norme s'intéresse à la qualité de la tension qui est caractérisée par quatre paramètres, à savoir [9]:

- la fréquence ;
- l'amplitude ;
- la forme d'onde ;
- l'équilibre entre tensions.

La norme définit ces caractéristiques qui, durant des conditions exploitation normales sont soumises à des variations dues aux variations de la charge, aux perturbations émises par certains équipements et aux défauts qui résultent d'incidents externes [9].

Il est difficile d'indiquer des valeurs précises pour ces caractéristiques pour deux raisons :

- leurs variations aléatoires dans le temps et dans l'espace;
- certains phénomènes qui ont une influence sur la tension et qui sont particulièrement imprévisibles.

2.3 Classification des perturbations électromagnétiques

2.3.1 Classification selon les paramètres caractérisant la tension

Les perturbations électromagnétiques (figure 2.1) affectent un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. Ainsi, on peut distinguer quatre types de perturbation [11]:

- les fluctuations de la fréquence ;
- les variations de l'amplitude ;

- la modification de la forme d'onde (harmoniques, interharmoniques, bruits);
- la dissymétrie du système triphasé (le déséquilibre).

Comme la fréquence est la grandeur d'équilibrage instantané entre la production et la puissance appelée, les variations de fréquence sont, en principe, inévitables. En pratique, elles sont rares et minimales dans les réseaux interconnectés et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple, lors de certains défauts de grande ampleur en réseau ou de production [12].

Pour les variations de l'amplitude, il s'agit des variations rapides de tension. Ce type de perturbations inclut les creux de tensions, les coupures brèves, les surtensions et les fluctuations de flicker.

Les formes d'onde du courant et de la tension ne garderont pas leurs formes sinusoïdales, elles seront décomposées en : une onde fondamentale à 50 Hz, des harmoniques de fréquence multiple de 50 Hz et des interharmoniques à des fréquences quelconques.

L'alimentation de charges monophasées (trains, fours électriques de grande puissance...) entraîne l'inégalité des déphasages des tensions.

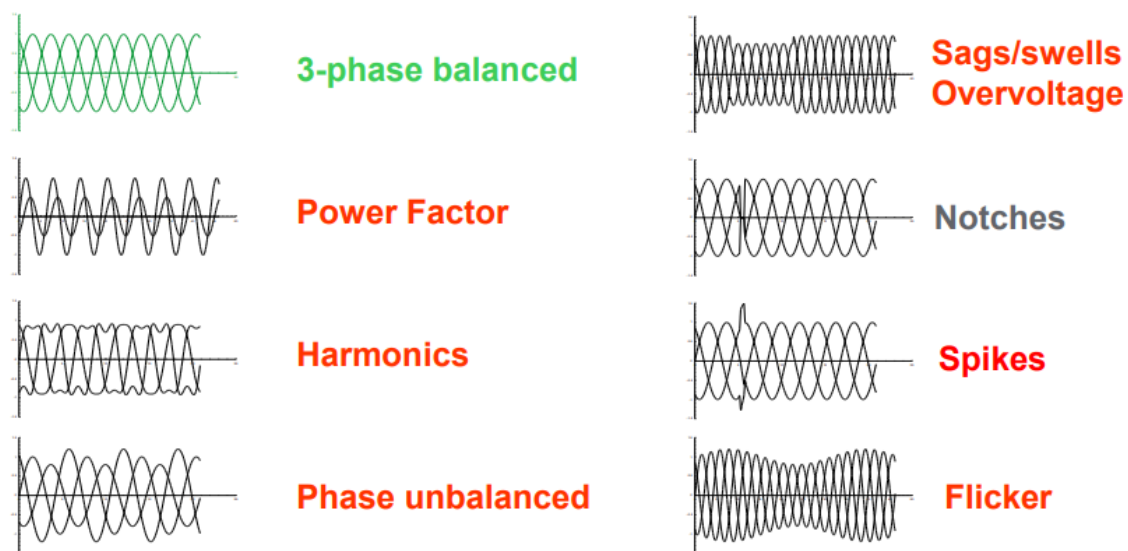


Figure 2.1 Formes d'ondes de différentes perturbations électromagnétiques [11]

2.3.2 Classification des perturbations électromagnétiques selon leur durée

En se basant sur leur durée, les perturbations électromagnétiques peuvent également être classées en [10]:

- perturbations transitoires ;
- perturbations de courte durée ;
- perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur

le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre [11].

Les perturbations de courte durée se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension et ont par conséquent des effets néfastes et coûteux sur les équipements électriques. Il s'agit des creux de tension, des coupures brèves et des surtensions. Elles sont provoquées par les courts-circuits.

Les perturbations permanentes sont : les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires au sein du réseau électrique, mais peuvent aussi résulter de la déformation de la tension d'alimentation. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude de la tension. Leurs effets sont [11]: l'échauffement, les pertes supplémentaires, le vieillissement prématuré des équipements électriques et le dysfonctionnement de certains appareillages de contrôle-commande.

2.4 Creux des tensions

2.4.1 Définitions

Aucun réseau électrique n'est à l'abri des perturbations électriques indésirables. L'amplitude de la tension étant l'un des paramètres caractéristiques du système électrique, elle peut connaître une baisse brutale de l'amplitude (creux de tension) ou une disparition totale de la tension (coupure), pendant un intervalle de temps (Figure 2.2).

Les creux de tension sont définis par leur amplitude et leur durée. Les valeurs de ces dernières varient suivant les différentes normes existantes, ces perturbations n'ont donc pas de définition universelle.

Selon l'EN50160, un creux de tension est une diminution brusque de la tension fournie U_f à une valeur inférieure à 90 % de la tension de référence. La durée d'un creux de tension est prise conventionnellement supérieure à 10 ms (les phénomènes de durée inférieure sont considérés comme des phénomènes transitoires) et usuellement inférieure à 1 min [9].

La tension de référence est soit la tension nominale soit la tension déclarée.

La valeur de la tension déclarée (U_c) est généralement la même que celle de la tension nominale du réseau, mais peut différer selon l'accord du gestionnaire du réseau et de l'utilisateur.

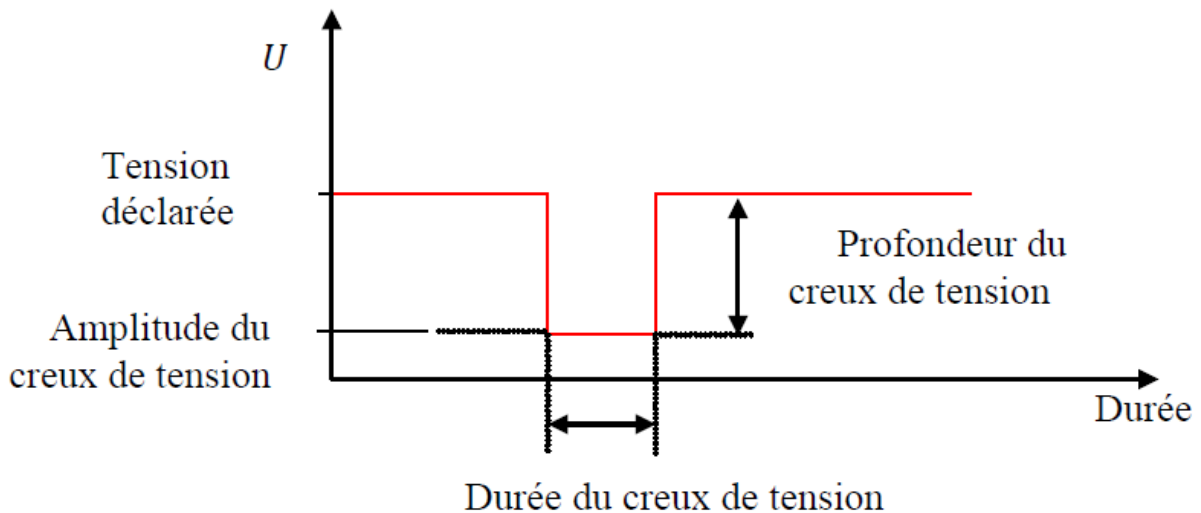


Figure 2.2 Caractérisation d'un creux de tension [13]

Si la tension d'alimentation est inférieure à 5% de la tension de référence pour une durée inférieure ou égale à 3min (figure 2.3), on est dans le cas des coupures brèves de tension [9].

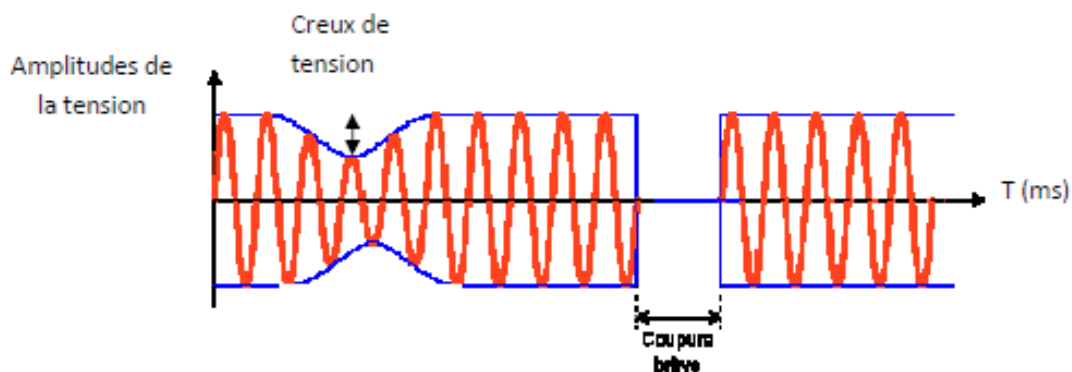


Figure 2.3 Comparaison entre un creux et une coupure brève de tension [14]

La durée d'un creux de tension ou d'une coupure brève est liée à la temporisation de fonctionnement des organes de protection et l'isolement des défauts par les dispositifs de protections (disjoncteurs...) [14].

2.4.2 Causes des creux de tension

Les creux de tension ont pour principales origines :

- les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées ;
- le démarrage des moteurs de forte puissance ;
- Conditions climatiques (vent, foudre, pluie, etc.).

Les courts-circuits engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps (figure 2.4.a) [11].

Le courant des moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (figure 2.4.b). Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases [11].

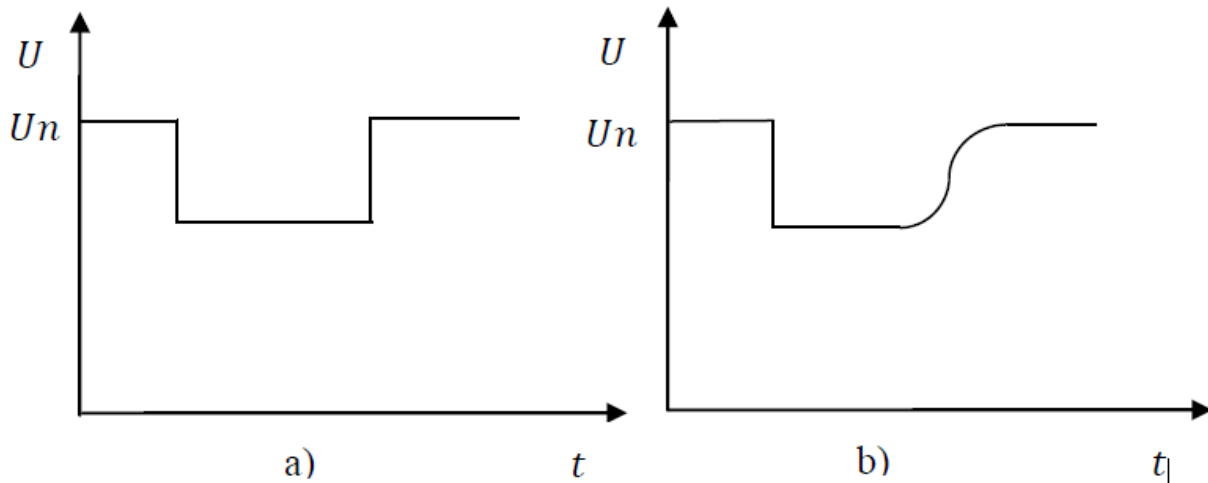


Figure 2.4 Amplitude d'un creux de tension provoqué par

a) un court-circuit

b) le démarrage d'un moteur de forte puissance [11]

2.4.3 Effets et conséquences des creux de tension

A cause de leur fréquence et de la sensibilité de plusieurs appareillages présents dans les réseaux industriels face aux creux de tension, ces derniers peuvent avoir des conséquences graves sur les installations électriques. Ils peuvent entraîner l'arrêt imprévu ou le mauvais fonctionnement de certains équipements (tableau 2.1).

Tableau 2.1 Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles [1]

Types d'équipement	Conséquences néfastes
Systèmes d'éclairage	Moins de luminosité, extinction et rallumage.
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt ou mauvais fonctionnement des équipements.
Dispositifs de protection	Déclenchement en ouverture des contacteurs.
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension.
Variation de vitesse pour un moteur à courant continu	En mode onduleur : destruction des protections. En mode redresseur : ralentissement de la machine.
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur.
Variateurs de vitesse pour un moteur	Ralentissement, décrochage, surintensité au

asynchrone	retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur.
------------	--

2.4.4 La protection contre les creux de tension

Avant de déterminer les mesures de protection on doit d'abord mesurer et analyser les perturbations, ceci permet d'évaluer le degré de vulnérabilité des équipements.

Des courants importants résultent des courts-circuits provoqués par les défauts d'isolement. Pour limiter l'impact en durée de ces courants, une solution souvent adoptée par les distributeurs consiste à mettre hors tension l'ouvrage concerné par le défaut, en déclenchant le ou les disjoncteurs qui le relie au reste du réseau.

Afin d'assurer la reprise de service le plus rapidement possible, un automatisme de ré enclenchement associé au système de détection et d'élimination du défaut est installé [11].

Pour limiter des chutes de tension provoquées par des démarrages de moteurs, les solutions sont [11]:

- l'installation d'un système de démarrage afin de limiter l'appel de courant ;
- l'installation d'un compensateur statique d'énergie réactive qui compense l'appel de puissance réactive au moment du démarrage. Cette solution est cependant à court terme coûteuse ;
- La désensibilisation des équipements les plus sensibles.

2.5 Déséquilibre de la tension et du courant

Il est important de traiter les courants déséquilibrés car ils entraînent l'asymétrie des tensions. Cette dernière est un des paramètres qui caractérisent la qualité de la tension.

Dans un réseau triphasé, on a idéalement trois courants (ou tensions) de même fréquence et de même amplitude qui sont déphasés entre eux de 120 degrés.

Lorsque les tensions ou les courants présentent une différence d'amplitude ou lorsque la séparation de phase n'est pas de 120 degrés il y a déséquilibre ; on parle alors de déséquilibre d'amplitude (figure 2.5) ou de déséquilibre de phase [9].

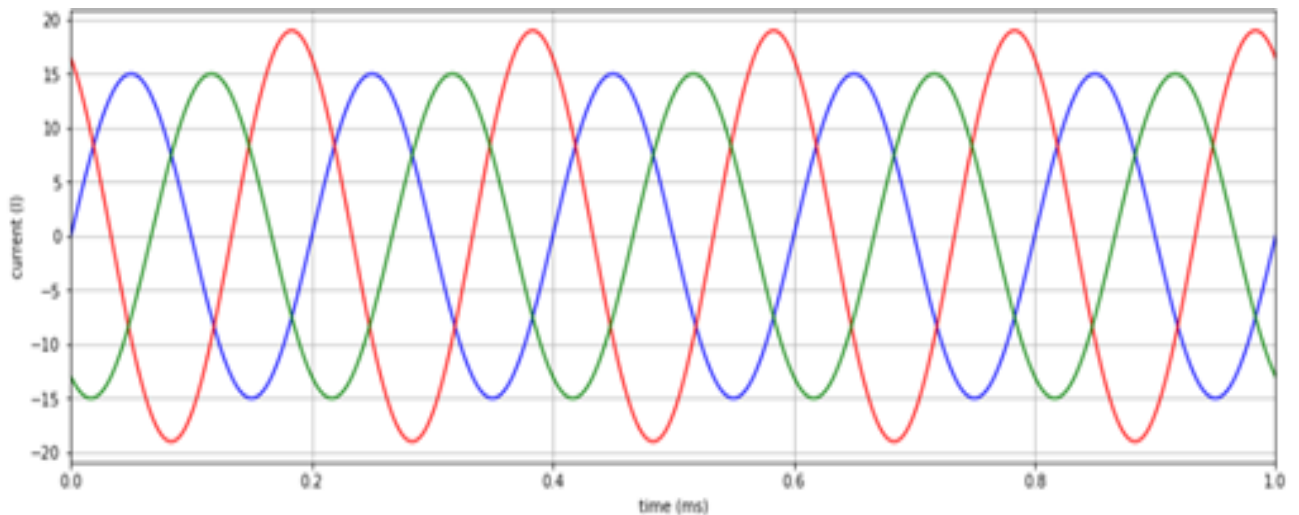


Figure 2.5 Déséquilibre du courant clair - La phase rouge a une valeur efficace différente de celle des 2 autres phases [15].

2.5.1 Causes du déséquilibre de tension et de courant

Le déséquilibre de tension peut être causé par [15]:

- **les charges monophasées mal réparties** : car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente. Les charges monophasées doivent être réparties le plus uniformément possible entre les trois phases ;
- **Les charges triphasées déséquilibrées** : chacune des charges triphasées doit appeler un courant identique sur chaque phase.

2.5.2 Effets des déséquilibres de tension

Les déséquilibres de tension ont pour conséquences :

- apparition de composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. En règle générale, un déséquilibre de tension de 1% entraîne un déséquilibre de courant plus élevé (d'environ de 5%), ce qui provoque une augmentation de chaleur de 10°C. Cette augmentation de chaleur peut réduire de la durée de vie des moteurs à la moitié [16] ;
- un fonctionnement perturbé des dispositifs à thyristors à commande de phase ;
- Mauvais fonctionnement des appareils monophasés alimentés par des tensions très faibles (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage par exemple) ;
- Destruction des appareils monophasés alimentés par des tensions trop élevées, il peut être détruit.

2.5.3 Solutions

Le déséquilibre de tension peut être déterminé en calculant le rapport entre les composantes directes et les composantes inverses de la tension d'alimentation (en %). Un seuil de 2% a été défini, au-delà duquel le déséquilibre est considéré comme élevé [16].

Si le rapport est supérieur à 2 %, il est recommandé de :

- équilibrer les charges monophasées sur les trois phases ;
- prévoir une protection adaptée des équipements ;
- augmenter la puissance de court-circuit ;
- intégrer des dispositifs de rééquilibrage ;
- compenser la puissance réactive ;
- modifier l'architecture du réseau.

2.6 Définition des Surtensions et leurs origines

Les surtensions représentent une augmentation de l'amplitude de la tension à un point donné du système d'alimentation électrique.

Comme pour les creux de tension et les coupures brèves, cette perturbation est caractérisée par deux grandeurs : son amplitude et sa durée.

Les surtensions sont de trois natures [11] :

- temporaires à fréquence industrielle (figure 2.6);
- de manœuvre;
- d'origine atmosphérique (foudre).

Pour les surtensions temporaires à fréquence industrielle, l'augmentation de l'amplitude est égale ou supérieure à 10% de la tension de référence, et la durée est comprise entre 10 ms et 1 min [9].

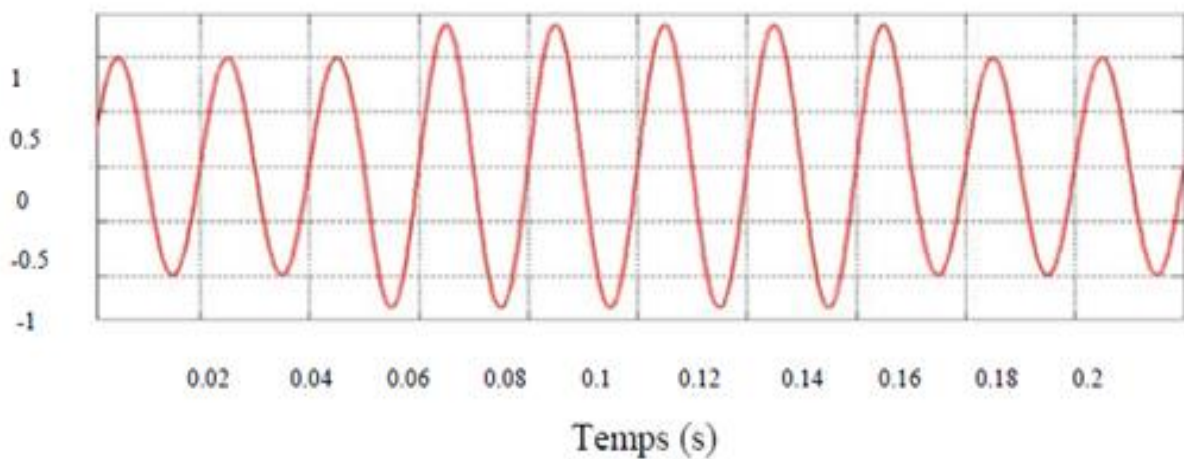


Figure 2.6 Exemple de surtension temporaire [11]

Si leur durée dépasse 1 min (figure 2.7), elles sont considérées comme des surtensions de longue durée ou permanente [17].

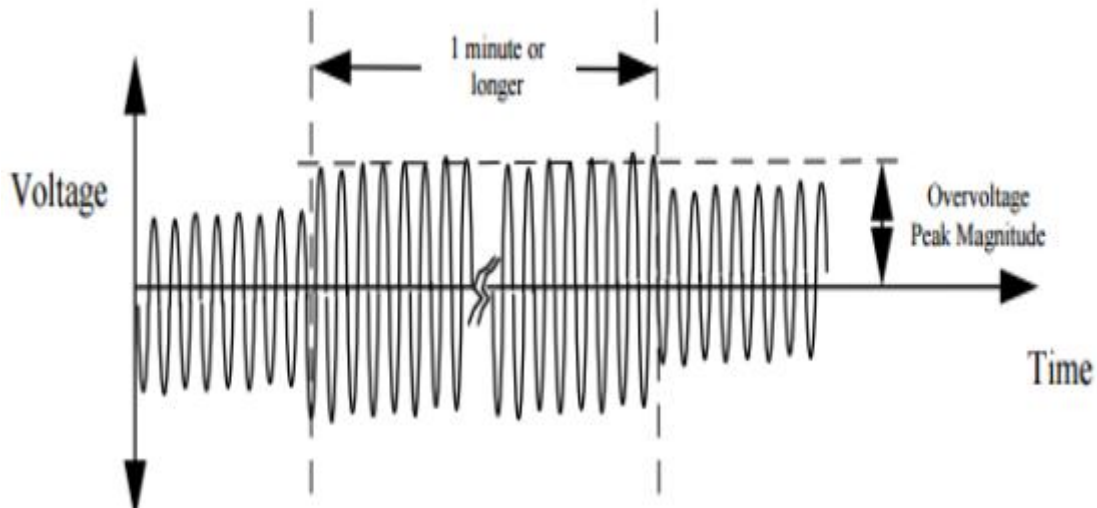


Figure 2.7 Forme d'onde de surtension permanente [18]

2.6.1 Origines des surtensions

Surtensions à fréquence industrielle

Elles sont causées par [11]:

- les défauts d'isolement;
- la Ferro résonance, Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable;
- rupture du conducteur de neutre;
- les défauts des régulateurs des alternateurs ou des régulateurs en charge des transformateurs ;
- la surcompensation de l'énergie réactive.

Surtensions de manœuvre

Elles sont provoquées par:

- la commutation en charge normale;
- l'établissement et l'interruption de faibles courants inductifs;
- la manœuvre de circuits capacitifs.

Surtensions atmosphériques

Elles sont causées par des phénomènes naturels comme la foudre.

2.6.2 Effets

La longue durée de la surtension peut entraîner :

- la perte de service des appareils électriques et électroniques connectés ;
- la réduction de la durée de vie des équipements ;

- la surchauffe des équipements qui peut même provoquer un incendie.

2.6.3 Solutions

Les solutions pour protéger une installation électrique contre les effets de ces augmentations de tension sont :

- la mise hors service de tout ou d'une partie des condensateurs en période de faible charge ;
- l'utilisation des disjoncteurs de branchement différentiels et sélectif ;
- l'installation de self de choc pour limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs ;
- la Protection contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées ...)

2.7 Fluctuations et flicker

Le flicker ou papillotement (figure 2.8) est une gêne ressentie par le système visuel humain lors des variations d'intensité lumineuse de l'éclairage [9].

Les fluctuations brusques de la tension du réseau sont à l'origine de ce phénomène.

La gêne correspondant au scintillement se manifeste sur les lampes BT. Elle augmente rapidement avec l'augmentation de l'amplitude de la fluctuation [9].

On peut exprimer la sévérité du Flicker par l'expression [9]:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st}^3}{12}}$$

Où :

P_{st} : la sévérité mesurée sur une période de dix minutes.

P_{lt} : la sévérité mesurée à partir d'une séquence de douze valeurs de P_{st} sur une période de deux heures.

Sous des conditions de fonctionnement normales, la sévérité du Flicker P_{lt} doit être inférieure ou égale à 1, 95% du temps. Pour certains cas, la P_{lt} peut être supérieure à 1 sans que cela cause des gênes.

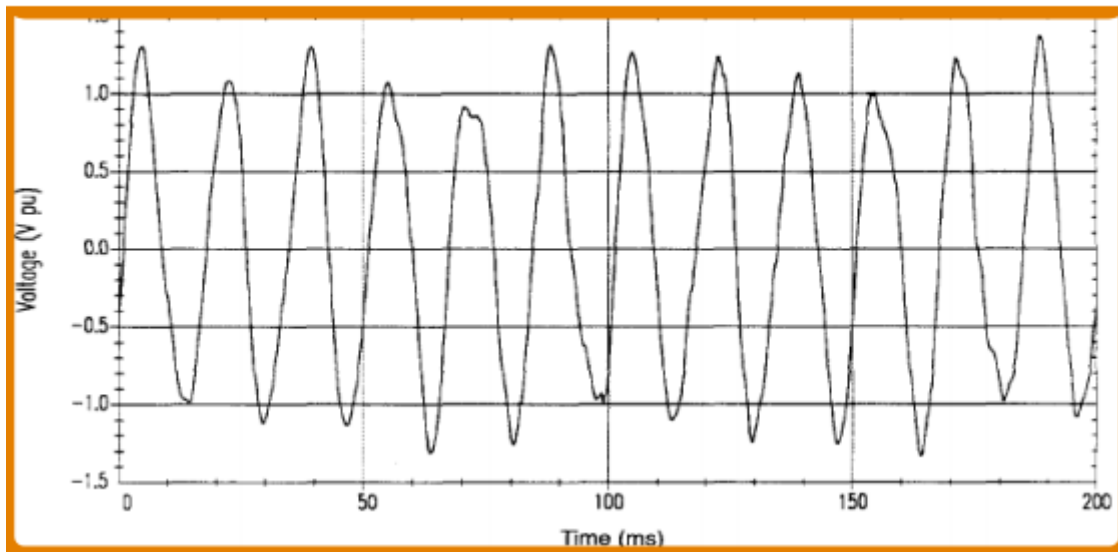


Figure 2.8 Forme d'onde des fluctuations de la tension [19]

La figure 2.9 résume différents phénomènes qui affectent la valeur efficace de la tension :

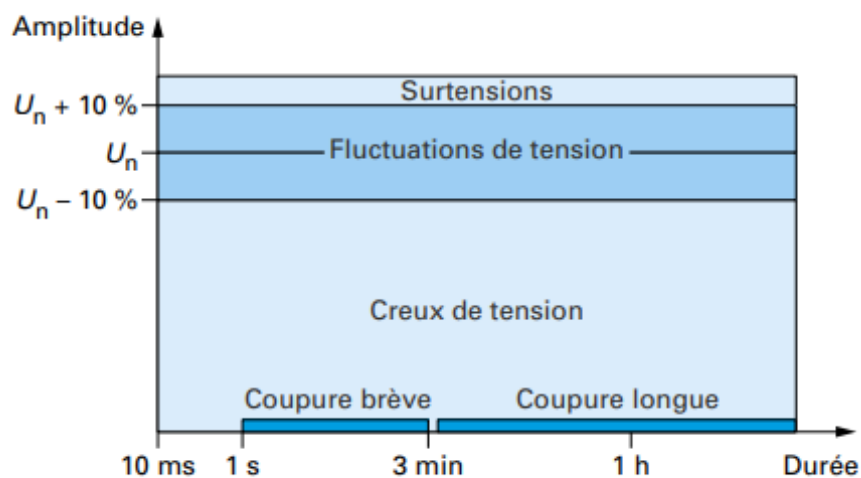


Figure 2.9 Perturbations affectant la valeur efficace de la tension [19]

2.7.1 Classification

Il y a plusieurs types de fluctuations de tension. Elles sont classées de la façon suivante dans la publication CEI 61000-3-3 (figure 2.10) :

- type a : à-coups de tension (variations soudaines non périodiques de la tension) rectangulaires et périodiques d'amplitude constante (par exemple : commutation de charges résistives, machines à souder à résistances, certains cycles de déclenchements/ré enclenchements automatiques);

- type b : série d'à-coups de tension irréguliers. Leurs amplitudes peuvent être identiques ou non, aussi bien en descendant qu'en montant;
- type c : variations de tension clairement séparées qui ne sont pas toutes des à-coups (par exemple : commutation de charges non résistives, démarrage de moteurs) ;
- type d : série de fluctuations aléatoires ou continues de tension (par exemple : charges variant cycliquement ou aléatoirement, fours à arc typiquement).

Le type de fluctuation de tension peut être déduit des caractéristiques de l'appareil générateur de celle-ci ou observé par un appareil de mesure adapté.

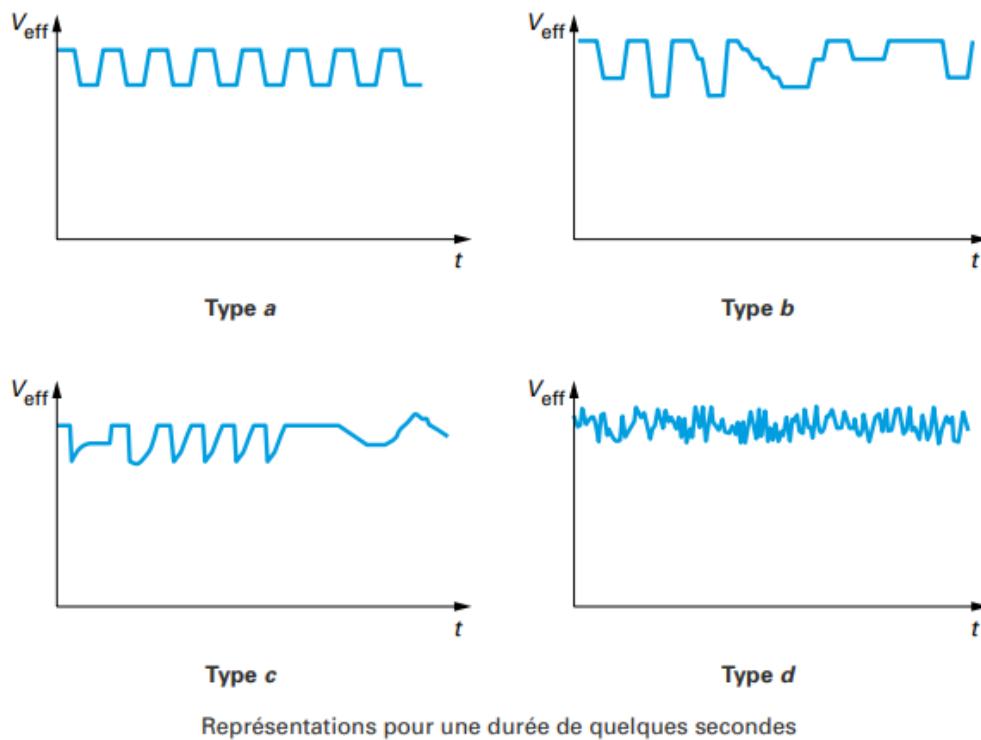


Figure 2.10 Fluctuations de tension [19]

2.7.2 Origine

Les principales sources de fluctuations de tension sont [19]:

- les charges industrielles : machines à souder par résistance, laminoirs, moteurs de puissance importante dont la charge varie (tunneliers), fours à arc, soudeuses à arc, enclenchements de condensateurs, chaudières de forte puissance ;
- des charges de forte puissance raccordées au réseau public basse tension chez des artisans ou des clients de profession libérale : appareils à rayons X (radiologues), lasers, grosses photocopieuses ou tireuses de plan (architectes), moteurs, par exemple pour des pompes à chaleur chez des clients domestiques ou pour des groupes frigorifiques de chambres froides (boucheries).

Il est important de noter que ces fluctuations, produites par des charges industrielles, peuvent affecter un grand nombre de consommateurs lorsqu'ils sont alimentés par la même source.

2.7.3 Solutions

Les principaux effets du papillotement sur l'homme peuvent être le mal de tête, l'irritabilité et parfois même l'épilepsie.

Pour les diminuer, on peut :

- modifier le type d'éclairage,
- modifier la structure du réseau,
- installer des équipements de réduction de flicker.

2.8 Variations de la fréquence d'alimentation

La fréquence nominale de la tension d'alimentation doit être de 50 Hz. Les valeurs mesurées de la fréquence fondamentale ; pour les systèmes interconnectés et pour une période d'échantillonnage de 10 s doivent être de l'ordre de [9]:

50 Hz \pm 1% durant 99.5% de l'année ;

50 Hz +4% /-6 % durant 100% du temps.

La variation de fréquence (Figure 2.11) est extrêmement rare dans les systèmes électriques stables, en particulier dans les systèmes interconnectés via un réseau électrique. Lorsque des sites possèdent des générateurs de secours dédiés ou ont une mauvaise infrastructure électrique, la variation de fréquence est plus fréquente, surtout si le générateur a une forte charge. Les équipements informatiques sont à tolérance de fréquence et ne sont généralement pas affectés par des décalages mineurs de la fréquence de générateur locale. En revanche, le problème affectera les appareils à moteur ou les équipements sensibles ayant besoin d'un cycle permanent régulier du courant dans le temps. Les variations de fréquence peuvent faire accélérer ou ralentir un moteur en fonction de la fréquence du courant d'entrée. Le moteur peut ainsi fonctionner de manière inefficace et/ou produire davantage de chaleur et s'abîmer sous l'effet de la vitesse accrue et/ou de la consommation de courant excessive [15].

Une augmentation ou une diminution de la puissance fréquence. La durée d'un écart de fréquence de fréquence peut aller de quelques cycles à plusieurs heures.

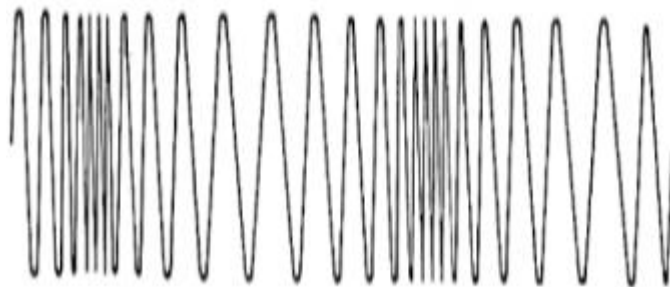


Figure 2.11 Forme d'onde de la variation de fréquence [15]

Pour corriger ce problème, il convient d'évaluer, puis réparer, corriger ou remplacer toutes les sources d'électricité provoquant une variation de fréquence.

2.9 Conclusion

L'usage généralisé de l'électronique a rendu plus sensible le sujet de la qualité de l'alimentation électrique et de son impact sur les équipements électriques critiques utilisés dans les entreprises. Notre monde est de plus en plus contrôlé par de petits microprocesseurs sensibles aux perturbations électriques, même faibles.

Pour que les industriels puissent comprendre ces perturbations et savoir comment les prévenir, il faut une terminologie et des définitions communes. Dans ce chapitre on a tenté de définir et illustrer les perturbations électromagnétiques qui affecte la qualité de l'alimentation électrique telles que présentées dans la norme EN50160. Nous avons abordé leurs origines, leurs effets ainsi que les solutions qui permettent de les diminuer.

Chapitre 03 :

Les harmoniques et l'énergie réactive

3 Les harmoniques et l'énergie réactive

3.1 Introduction

Si on se base sur leurs durées, les perturbations électriques peuvent être classées en : des perturbations transitoires, des perturbations de courte durée et des perturbations permanentes [10]. C'est dans la dernière catégorie qu'on retrouve les harmoniques, qui ont des effets néfastes sur l'installation électrique, d'où la nécessité de les filtrer. Pour ce faire, il est incontournable de comprendre non seulement leur génération et leur propagation, mais aussi de mesurer leur ampleur.

Dans ce chapitre nous commencerons par l'aspect théorique des harmoniques, où nous allons aborder la manière dont les harmoniques se propagent, leurs différentes sources ainsi que leur influence sur la qualité de l'énergie et leurs effets. Nous allons finir par citer les différentes solutions existantes et visant à diminuer le taux d'harmoniques, notamment celle du filtrage.

3.2 Définitions

Les signaux sont périodiques dans les réseaux électriques mais pas toujours sinusoïdaux. Cependant, grâce à la théorie de Fourier, une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peuvent être décomposés en une suite d'ondes sinusoïdales dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale. Ce sont ces dernières qui, ajoutées à la composante fondamentale donner au courant et à la tension des formes non sinusoïdales.

Une harmonique est une composante d'ordre supérieur à 1 sur la série de Fourier (c'est une composante sinusoïdale d'un signal de fréquences multiples de sa fréquence fondamentale). Par exemple, dans un système à 60 Hz, l'harmonique d'ordre 3, également appelé «troisième harmonique», est 180 Hz [17]. C'est-à-dire que la k ème harmonique est de fréquence kf_0 , où f_0 est la fréquence fondamentale et k est un nombre entier positif.

Cependant, Les composantes sinusoïdales dont la fréquence n'est pas un multiple entier de la fréquence fondamentale du signal sont nommées les interharmoniques [17]. Ce sont des harmoniques de rang non entier.

Les harmoniques se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et ont plusieurs effets désagréables sur l'installation électrique ainsi que sur ses composants comme : l'échauffement et le vieillissement prématuré des équipements électriques.

3.3 Propagation des harmoniques

Les harmoniques de courant se propagent avec peu d'atténuation lorsque le courant augmente. Par contre, les harmoniques de tension s'atténuent lorsque la tension diminue [17]. Cependant, la présence de résonances dans le réseau peut modifier ce processus.

3.4 Origine des harmoniques

Les harmoniques peuvent être générés à travers deux paramètres: le courant et la tension. Les principales sources d'harmoniques dans le système électrique sont :

- Les enroulements de transformateur et la capacité magnétique dans les stators et les rotors des machines électriques ;

- La saturation magnétique dans les noyaux de transformateurs ;
- Les redresseurs et les onduleurs ;
- Les charges non linéaires et les processus de commutation.

3.4.1 Harmoniques de tension

Les centrales électriques (sources de tension) produisent en général, une onde parfaitement sinusoïdale et de fréquence fixe [20]. Cependant, il peut arriver que cette onde soit déformée à partir de la source (avant d'arriver au consommateur) ; il s'agit dans ce cas d'harmoniques de tension.

Les harmoniques de courant (forme d'onde déformée) circulent à travers l'impédance du système (impédances de source et de ligne) et provoquent une chute de tension harmonique aux bornes des impédances. Cela déforme la forme d'onde de la tension d'alimentation. Ainsi, des harmoniques de tension sont générées. Les longs parcours de câbles et les transformateurs à haute impédance contribuent à une impédance de source plus élevée et conduisent donc à des harmoniques de tension plus élevées.

Comme il est montré dans le tableau 3.1, l'impédance de source influence considérablement les variations d'harmoniques de tension.

Tableau 3.1 Influence de l'impédance de source [20]

Impédance de source	Courants Harmoniques	Distorsion en tension
faible	favorise leur circulation	faible
élevée	réduit leur circulation	élevée

Un système électrique typique présente les impédances suivantes, comme indiqué dans le diagramme de la figure (3.1).

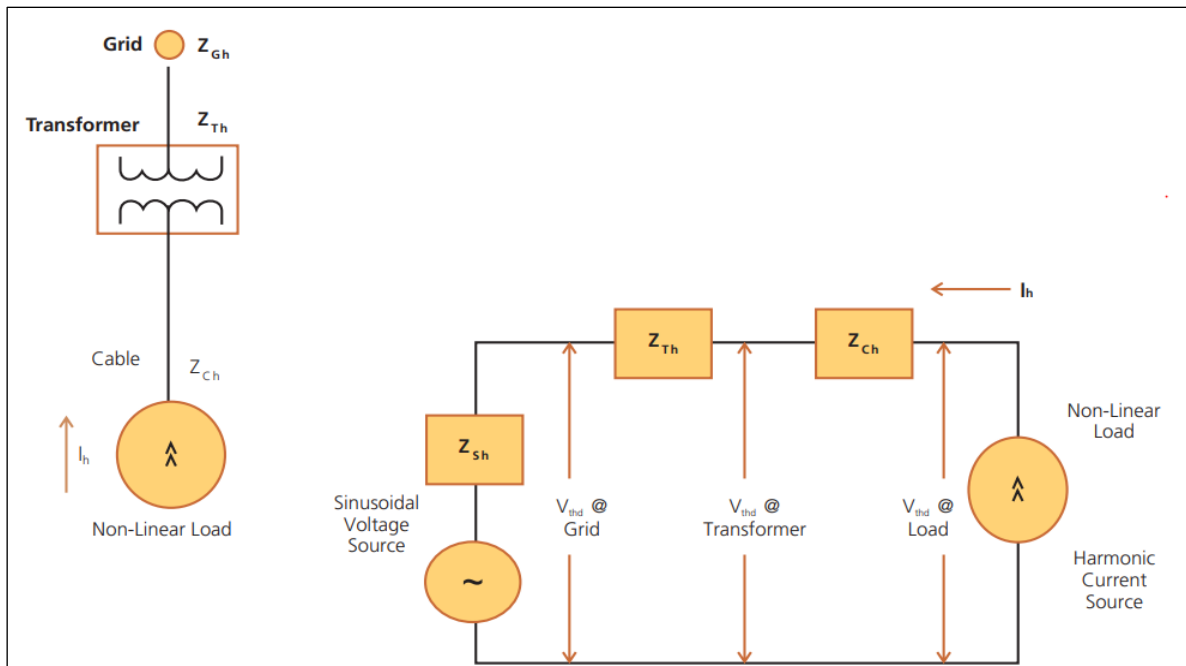


Figure 3.1 Impédances dans un système électrique [21]

Où :

V_h = tension harmonique

I_h = courant harmonique

Z_h = impédance de l'harmonique

Z_{Gh} = impédance de l'harmonique au niveau de la source

Z_{th} = impédance de l'harmonique au niveau du transformateur

V_{thd} = Distorsion harmonique totale de la tension

A la charge ; $V_h = I_h(Z_h + Z_{th} + Z_{Gh})$

Au niveau du transformateur $V_h = I_h(Z_{th} + Z_{Gh})$

Au niveau du réseau $V_h = I_h(Z_{gh})$

Habituellement, les impédances du réseau sont très faibles ; par conséquent les distorsions harmoniques de tension le sont également. Cependant, elles peuvent être beaucoup plus élevées du côté de la charge, car elles sont soumises à l'impédance du système complet. En définitif, il devient important de savoir où sont effectuées les mesures d'harmoniques.

Toutefois, dans le cas des groupes électrogènes, l'impédance de source est importante ; ce qui entraîne des harmoniques de tension élevées malgré de faibles harmoniques de courant. Ainsi, une distinction claire entre les harmoniques de courant et de tension devient importante.

Une industrie A, par exemple, qui a de grandes charges non linéaires va générer d'énormes harmoniques de courant dans son système. Une industrie voisine, l'industrie B, connectée au

même réseau peut ne pas avoir de charges non linéaires, mais elle peut être soumise à des harmoniques de tension élevées. Ces harmoniques de tension sont le résultat des harmoniques de courant élevées de l'industrie A et de l'impédance du réseau et du transformateur. Ainsi, l'industrie B, malgré de faibles harmoniques de courant, présente des harmoniques de tension élevées. Cependant, si l'industrie B procède à une correction du facteur de puissance, alors, en raison de la présence de condensateurs, des harmoniques de courant peuvent également apparaître dans le système, amplifiant davantage les harmoniques de tension [21].

3.4.2 Harmoniques de courant

Comme il a été cité précédemment, les producteurs d'énergie électrique produisent généralement une onde parfaitement sinusoïdale et de fréquence fixe, et c'est le courant absorbé par les charges qui cause des distorsions.

On distingue deux types de charges:

- Les charges linéaires

Les charges linéaires consomment un courant sinusoïdal lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale. Par contre, un certain déphasage existe souvent entre le courant et la tension.

Ce type de charges se compose généralement de condensateurs, de résistances et d'inductances.

- Les charges non linéaires

Contrairement aux charges linéaires, les charges non linéaires sont caractérisées par la relation non linéaire qui existe entre le courant et la tension. Elles consomment un courant non sinusoïdal lorsqu'elles sont alimentées par une tension sinusoïdale.

Elles ne présentent pas une impédance constante durant chaque alternance de l'onde de tension (figure 3.2).

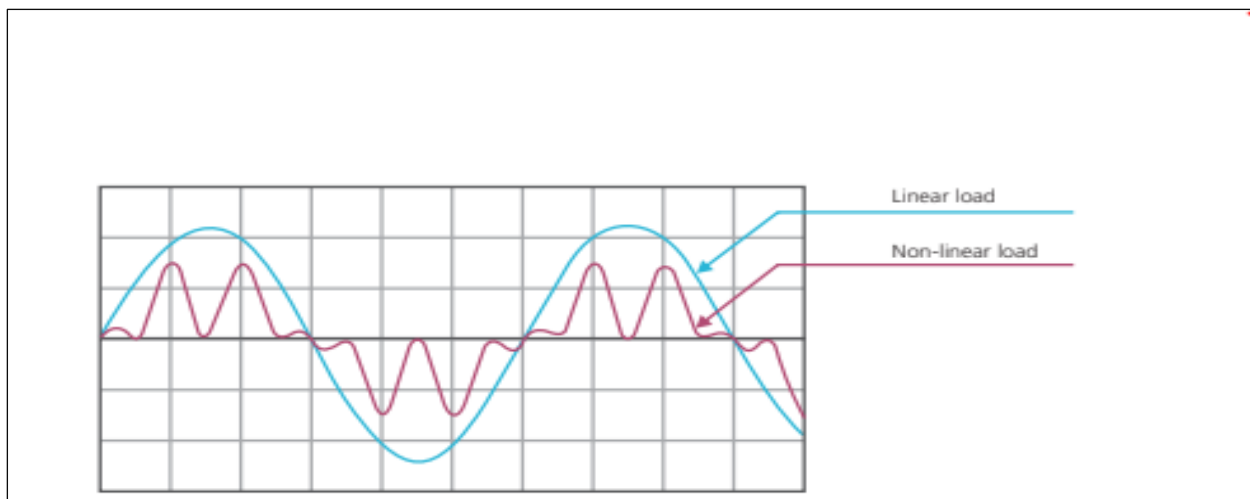


Figure 3.2 Formes d'onde pour les charges linéaires et non linéaires [22]

Quand les courants non sinusoïdaux sont absorbés par les Charges non Linéaires, ils traversent les connexions des lignes et des transformateurs. Par conséquent, des tensions non sinusoïdales apparaissent dans le réseau et provoquent à leur tour des courants non sinusoïdaux, bien souvent au désagrément du reste des charges connectées.

Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques.

Ce sont des charges qu'il est possible de distinguer selon leurs domaines, industriels ou domestiques [23].

1-Les charges industrielles

- Équipements d'électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage.
- Charges utilisant l'arc électrique : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents).

A noter que du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement énergétique, performances élevées...) l'utilisation d'équipements à base d'électronique de puissance se généralise.

2-Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage :

- Les téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes.

De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes.

3.5 Indices caractérisant les harmoniques

3.5.1 Rang de l'harmonique

Il s'agit du rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental qui est généralement la fréquence industrielle 50 Hz :

$$n = \frac{f_n}{f_0} \quad (3.1)$$

Où :

f_n : fréquence de l'harmonique

f_0 : fréquence du fondamental

3.5.2 Expression de la grandeur déformée

L'équation de la décomposition harmonique d'une fonction périodique $y(t)$ est présentée ci-

dessous :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \varphi_h) \quad (3.2)$$

Où :

- Y_0 : valeur de la composante continue généralement nulle
- Y_h : valeur efficace de l'harmonique de rang h ,
- ω : vitesse angulaire de la fréquence fondamentale,
- φ_h : phase de la composante harmonique à $t = 0$.

L'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

3.5.3 Valeur efficace d'une grandeur déformée

La valeur efficace de la grandeur déformée est importante et doit être prise en compte car c'est par cette valeur que sont exprimées les grandeurs harmoniques en général.

Pour une grandeur déformée et en régime permanent, l'énergie dissipée par effet Joule est la somme des énergies dissipées par chacune des composantes harmoniques, soit :

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=\infty} I_h^2} \quad (3.3)$$

La mesure de la valeur efficace de la grandeur déformée s'effectue soit directement par le biais des appareils à vraie valeur efficace ou à l'aide d'analyseurs de spectre.

3.5.4 Facteur de crête

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur crête du courant ou de la tension (I_M ou U_M) et leurs valeurs efficaces.

- Pour un signal sinusoïdal, le facteur de crête est donc égal à $\sqrt{2}$.
- Pour un signal non sinusoïdal, le facteur de crête peut être supérieur ou inférieur à $\sqrt{2}$.

3.5.5 Le taux de distorsion harmonique (THD)

C'est le rapport exprimé en pourcent, entre la valeur efficace des composantes harmoniques et l'amplitude du fondamental.

Le taux de distorsion harmonique de courant THD_i ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le taux de distorsion harmonique de la tension THD_v est en fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit imposée par le réseau.

Le THD_i peut être calculé par :

$$THD_i \% = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_{Lh}}{I_{Lf}}\right)^2} \quad (3.4)$$

Le THD_v peut être calculé par :

$$THD_v \% = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_{Lh}}{V_{Lf}}\right)^2} \quad (3.5)$$

3.5.6 Distorsion totale de la demande (TDD)

La TDD représente la quantité d'harmoniques par rapport au courant de charge maximal sur une période de temps considérable (et non le courant de demande maximal) ; tandis que les THD représentent le contenu harmonique par rapport au courant de charge réel au moment de la mesure.

Le TDD est exprimé par les expressions suivantes :

$$TDD_i \% = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_{Lh}^2}{I_L^2}} \quad (3.6)$$

$$TDD_v \% = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_{Lh}^2}{V_n^2}} \quad (3.7)$$

3.5.7 Facteur de Puissance

Le facteur de puissance est défini par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S, rapport qui tient compte des harmoniques:

$$Fp = \frac{P}{S}$$

Où :

Fp : facteur de puissance

S : puissance apparente

P : puissance active

Q : puissance réactive

D : puissance due à la déformation.

Avec :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.5.7.a)$$

$$D = 3V_{Lf} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{Lh}^2} \quad (3.5.7.b)$$

Où :

V_{Lf} et I_{Lf} : tension et courant instantanés, sous fréquence fondamentale.

Il est important de ne pas confondre le facteur de puissance avec le cosinus Φ ($\cos\Phi$) qui est le facteur de déplacement de la puissance. Ce facteur, doit être tenu proche de 1.

La seule possibilité très rare d'avoir le $\cos\Phi$ égal au facteur de puissance est lorsque la tension et le courant tirés du réseau sont tous deux purement sinusoïdaux. Puisque le $\cos\Phi$ se rapporte uniquement à la fréquence fondamentale, dès lors que les harmoniques sont pris en compte, il devient différent du facteur de puissance.

$$\text{Si } D=0 : Fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \cos \Phi \quad (3.5.7.c)$$

3.6 Les effets des harmoniques

Les harmoniques sont très dangereuses pour les systèmes électriques et les équipements qui leurs sont liés. Les harmoniques de courant et les harmoniques de tension ont plusieurs effets (figure 3.2), parmi lesquels on cite :

- Une augmentation des pertes Joule dans tous les conducteurs qu'ils parcourent du fait de l'augmentation de la valeur efficace du courant en présence d'harmoniques de courant, et un échauffement supplémentaire dans les transformateurs, les appareillages et les câbles,

- Les pertes supplémentaires au niveau des machines asynchrones résultantes de la circulation des courants de fréquences supérieures à 50 Hz dans le rotor,
- Le sur dimensionnement des matériels afin de permettre aux courants harmoniques de circuler, car leurs fréquences sont plus élevées que la fréquence du fondamental,
- La violation des limites des disjoncteurs peut provoquer leur déclenchement, ce qui entraîne des coûts supplémentaires liés au temps de la remise en marche,
- Le Phénomène de résonance,
- La réduction de la durée de vie des équipements.

Tableau 3.2 Effet des harmoniques sur les matériels [23]

Matériels	Effets
Condensateurs	Echauffement ; vieillissement
Moteurs	-Pertes et échauffement supplémentaires. -Réduction des possibilités d'utilisation à pleine charge. -vibrations et nuisances sonores.
Transformateurs	-Pertes Joule et échauffements supplémentaires. -Vibrations mécaniques et nuisances sonores
Disjoncteurs	Dépassements des valeurs crête de la tension.
Câbles	Pertes diélectriques particulièrement dans le neutre en cas de présence
Ordinateurs	Troubles fonctionnels.
Electronique de puissance	Troubles liés à la forme d'onde (commutations).

3.7 La Réglementation sur la Pollution Harmonique

L'électricité est sujette à des normes qui les régulent. Ces normes sont déterminées par des organisations telles que la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) et l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

Elles ont pour principal rôle d'assurer une qualité d'énergie fiable pour tous les usagers.

Les deux normes que nous allons aborder sont :

- IEEE 519 standard : elle concerne les harmoniques de courant.
- Norme EN50160: elle concerne les perturbations électromagnétiques liées à la tension.

3.7.1 La norme IEEE 519

Elle a pour objectif de limiter l'injection d'harmoniques de courant dans le réseau de façon à ce qu'ils ne causent pas de distorsion de tension inacceptable. L'IEEE 519 spécifie les limites harmoniques (tableau 3.3) sur la distorsion totale de la demande et non sur la distorsion harmonique totale. [13]

Les directives IEEE 519-2014 au niveau du PCC sont les suivantes :

Tableau 3.3 Limites (en %) de distorsion de courant pour les systèmes de distribution générale (120V à 69 kV) [17]

I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Avec :

PCC: le point électriquement le plus proche d'une charge particulière, situé sur le réseau de distribution, auquel d'autres charges sont ou pourraient être raccordées. Selon la définition de la CEI.

I_{sc} =courant de court-circuit maximal au PCC.

I_L =courant de charge maximal au PCC.

Les systèmes avec un I_{sc}/I_L plus élevé ont des impédances plus petites et contribuent donc moins à la distorsion de tension globale du système électrique auquel ils sont connectés. Ainsi, les limites TDD deviennent moins strictes pour les systèmes ayant des valeurs I_{sc}/I_L plus élevées.

Tableau 3.4 Limites de distorsion de tension [17]

La tension au PCC	Harmonique (%)	THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
1 kV < $V \leq 69$ kV	3.0	5.0
69 kV < $V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$V > 161$ KV	1.0	1.5

Dans notre cas (1 kV < $V \leq 69$ kV) (tableau 3.4), l'amplitude de chaque harmonique de tension ne doit pas dépasser 3% de celle de la fondamentale, et les THD sont limitées à 5 % au niveau du PCC. Des niveaux d'harmoniques supérieurs à ces limites peuvent entraîner un mauvais fonctionnement de l'équipement. Dans les applications critiques comme les hôpitaux et les aéroports, les limites sont plus strictes (moins de 3%) pour le THD car un fonctionnement erroné peut avoir de graves conséquences [17].

3.7.2 La norme EN50160

Les limites de distorsion de tension sont données par cette norme.

Selon la norme, on effectue les mesures durant une semaine, 95% des valeurs moyennes des harmoniques de tension pendant 10 min doivent être inférieures ou égales aux valeurs données dans les tableaux 3.5, 3.6, 3.7.

De plus, le THD de la tension de source (en incluant toutes les harmoniques) doit être inférieur ou égal à 8%.

Cas de la basse tension :

Tableau 3.5 Limites de distorsion de tension (U_h %) dans le cas de basse tension [9]

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiples de 3		Multiples de 3			
rang de l'harmonique	U_h (%)	rang de l'harmonique	U_h (%)	rang de l'harmonique	U_h (%)
5	6.0 %	3	5.0 %	2	2.0 %
7	5.0 %	9	1.5 %	4	1.0 %
11	3.5 %	15	0.5 %	6 ... 24	0.5 %
13	3.0 %	21	0.5 %		
17	2.0 %				
19	1.5 %				
23	1.5 %				
25	1.5 %				
On ne donne pas de valeur pour les harmoniques d'ordre supérieur à 25, puisqu'elles sont généralement faibles et imprévisibles.					

Cas de la moyenne tension :

Tableau 3.6 Limites de distorsion de tension (U_h %) dans le cas de la moyenne tension [9]

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiples de 3		Multiples de 3			
rang de l'harmonique	U_h (%)	rang de l'harmonique	U_h (%)	rang de l'harmonique	U_h (%)
5	6.0 %	3	5.0 %	2	2.0 %

7	5.0 %	9	1.5 %	4	1.0 %
11	3.5 %	15	0.5 %	6 ... 24	0.5 %
13	3.0 %	21	0.5 %		
17	2.0 %				
19	1.5 %				
23	1.5 %				
25	1.5 %				
On ne donne pas de valeur pour les harmoniques d'ordre supérieur à 25, puisqu'elles sont généralement faibles et imprévisibles.					

Cas de la haute tension :

Tableau 3.7 Limites de distorsion de tension (U_h %) dans le cas de la haute tension [9]

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiples de 3		Multiples de 3			
rang de l'harmonique	U_h (%)	rang de l'harmonique	U_h (%)	rang de l'harmonique	U_h (%)
5	5 %	3	3 %	2	1.9 %
7	4 %	9	1.3 %	4	1.0 %
11	3 %	15	0.5 %	6 ... 24	0.5 %
13	2.5 %	21	0.5 %		
17	u.c.				
19	u.c.				
23	u.c.				
25	u.c.				
On ne donne pas de valeur pour les harmoniques d'ordre supérieur à 25, puisqu'elles sont généralement faibles et imprévisibles.					

3.8 Compensation des harmoniques

Plusieurs solutions existent pour limiter la circulation des harmoniques dans les réseaux électriques, et d'éviter ainsi leurs effets néfastes.

Deux types de filtrages existent :

- Le filtrage passif.
- Le filtrage actif.

3.8.1 Le filtrage passif

Le principe du filtrage passif est de piéger les courants harmoniques dans des circuits LC. Il s'agit de placer en parallèle dans le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer, et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [24] [25].

Un filtre peut être installé pour une charge ou pour un ensemble de charges. Il comprend une série de gradins qui correspondent tous à un rang d'harmonique.

Le spectre harmonique, la charge et l'impédance de la source d'énergie déterminent le dimensionnement du filtre.

Les filtres passifs présentent plusieurs inconvénients, les plus importants sont :

- Des résonances qui pourraient amplifier des fréquences qui ne posaient pas de problèmes avant l'installation du filtre ;
- Plusieurs filtres passifs peuvent être nécessaires pour pouvoir filtrer plusieurs composants ;
- Une efficacité moyenne et peu de flexibilité.

On distingue deux types de filtres passifs : [24]

- Le filtre passif résonant (Figure 3.3).
- Le filtre passif amorti ou passe-haut (Figure 3.4).

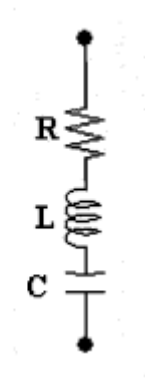


Figure 3.3 Filtre passif résonnant [24]

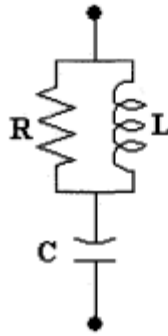


Figure 3.4 Filtre passif amorti [24]

Les deux types de filtres passifs sont utilisés pour la diminution des harmoniques et aussi pour la compensation de l'énergie réactive. La différence entre les deux est que le filtre passif amorti peut compenser des harmoniques de fréquences plus élevées que sa propre fréquence, tandis que le filtre résonant fonctionne sur une fréquence bien déterminée. Ce dernier peut être connecté en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

3.8.2 Le filtrage actif

Les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées. Grace aux semi-conducteurs d'aujourd'hui comme les thyristors GTO (Gate Turn Off thyristor) et les transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) qui sont rapides et puissants, ce type de filtre peut s'avérer très efficace et flexible et peut s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique.

Son principe de fonctionnement est de générer des courants au niveau de l'installation de manière à compenser les harmoniques qui existent en temps réel et à limiter la dégradation des performances de l'installation électrique.

Les différentes structures de compensation active diffèrent généralement entre elles par le nombre de convertisseurs utilisés et leur mode d'association, leur type (source de tension, source de courant), leur mode de régulation (compensation en courant ou en tension) et leur association éventuelle avec des composants passifs (voire même de filtres passifs). Cependant, le seul point en commun entre ces systèmes actifs reste le fait qu'ils injectent tous des courants qui s'opposent aux harmoniques créés par les charges non linéaires. Nous citerons quatre topologies possibles de filtres actifs : [17]

- Le filtre actif parallèle (FAP) qui concerne toutes les perturbations de courant,
- Le filtre actif série (FAS) qui est conçu pour compenser toutes les perturbations de tension,
- La combinaison parallèle-série active pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension,
- Les structures hybrides actives et passives utilisées pour réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs.

3.8.2.1 Le filtre actif parallèle (FAP)

Appelé aussi compensateur shunt, le FAP est connecté en parallèle dans le réseau de distribution (Figure 3.5). Il est le plus souvent commandé comme générateur de courant [16] [26]-[27].

Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension.

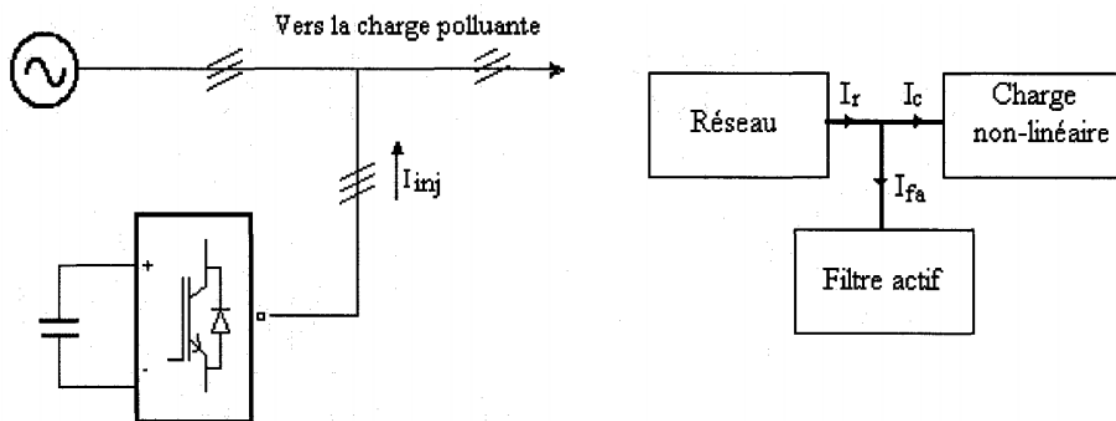


Figure 3.5 Filtre actif parallèle [16]

Ce filtre peut fonctionner selon deux modes :

- En filtre dédié.
- En filtre adaptatif.

Le premier est utilisé dans le cas où les harmoniques à filtrer sont déjà connues où on peut les estimer, c'est-à-dire si la charge non linéaire est connue. La commande peut donc être dédiée à la charge.

Le filtre adaptatif permet d'identifier les harmoniques afin de s'adapter automatiquement à leurs variations. Sa commande lui permet de générer en temps réel des courants harmoniques en opposition de phase.

3.8.2.2 Le filtre actif série (FAS)

Ce type de filtre actif est connecté en série dans le réseau (Figure 3.6). Il engendre des tensions harmoniques de manière à ce que leur superposition avec la tension du réseau donne une onde sinusoïdale.

Ce filtre est une solution adaptée à la compensation des perturbations de tensions (harmoniques, déséquilibres et creux de tension). Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même, mais peuvent parfois être provoquées aussi par les charges non linéaires.

Le FAS est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices [31] [27].

En résumé, dans la distribution, ce compensateur sert principalement à aider à la fourniture d'une énergie de qualité.

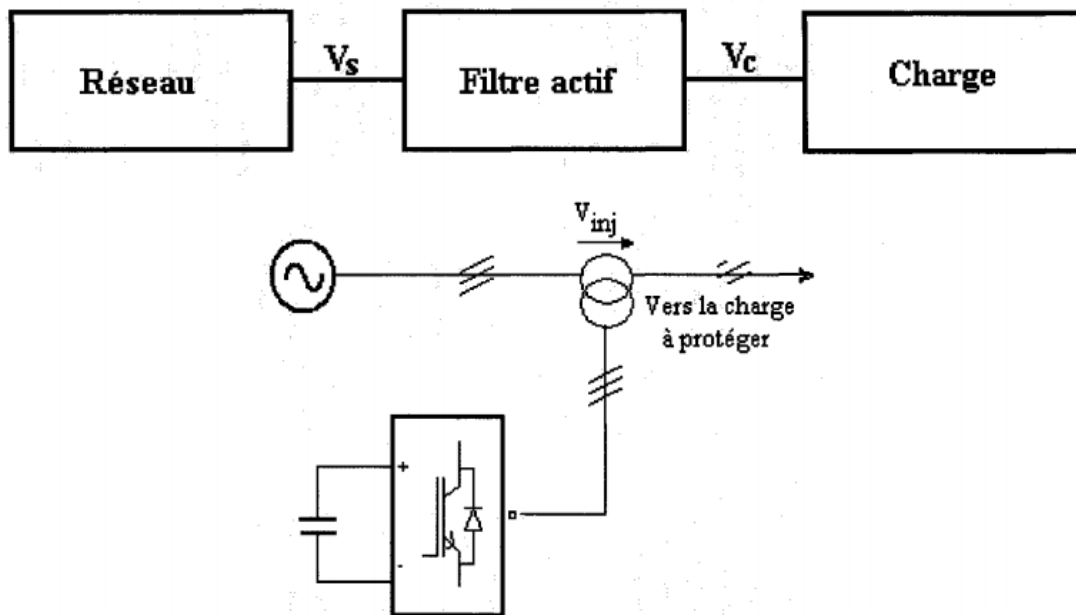


Figure 3.6 Filtre actif série [28]

3.8.2.3 La combinaison parallèle-série active

Aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), la combinaison parallèle-série active consiste en l'association de deux filtres actifs parallèle et série (Figure 3.7).

Cette méthode permet donc de bénéficier des avantages des deux filtres actifs associés, en assurant un courant et une tension du réseau électrique de forme sinusoïdale.

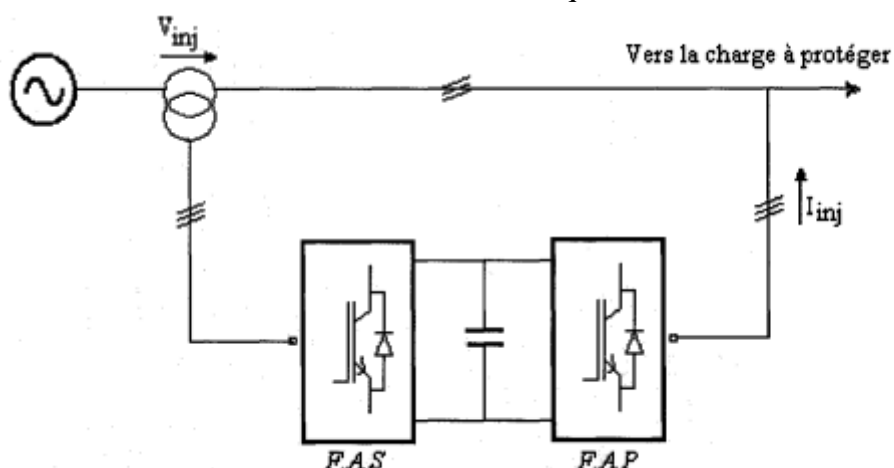


Figure 3.7 Combinaison des filtres actifs série et parallèle (UPQC) [29]

3.8.2.4 Les structures hybrides actives et passives

Plusieurs variantes hybrides existent. Nous présentons particulièrement le type dit «série/parallèle», qui associe des compensateurs actifs et passifs (Figure 3.8).

Ce système de filtrage est constitué d'un filtre passif et d'un filtre actif série, et à pour rôle d'obliger les courants harmoniques à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences ; ce qui va les empêcher de circuler vers le réseau. Ce filtre actif se comporte donc comme une impédance (de valeur fixée pour chaque rang) pour les fréquences harmoniques.

En bref, ce type de montage permet d'une part de minimiser la puissance du filtre actif, car une grande partie des courants harmoniques est absorbée par les filtres passifs, et d'améliorer d'autre part les performances des filtres passifs.

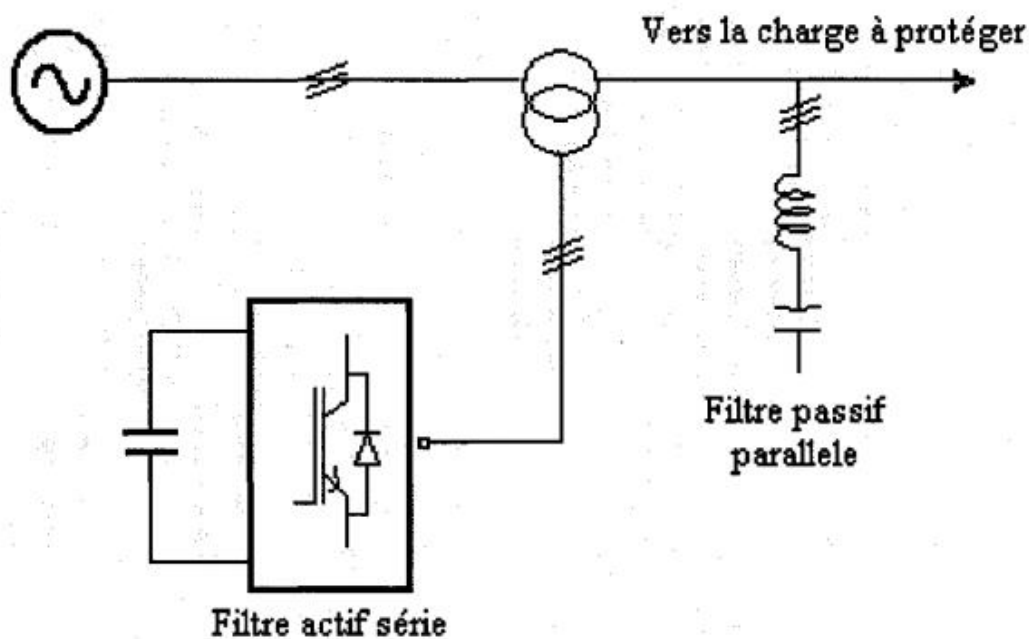


Figure 3.8 Filtre actif série et filtre passif parallèle [29]

3.9 Compensation de la puissance réactive

3.9.1 Energie réactive

L'énergie réactive est l'énergie qui n'est pas exploitable directement par l'utilisateur pour l'éclairage, le chauffage... C'est l'énergie nécessaire à la magnétisation. La plupart des appareils ont besoin d'énergie réactive en plus de l'énergie active pour produire du courant.

3.9.2 Intérêt de la compensation de l'énergie réactive

On doit compenser l'énergie réactive car la circulation d'un courant élevé dans les appareils engendre plusieurs effets négatifs, dont :

- L'échauffement des Câbles d'alimentation,
- Les chutes de tension importantes,
- Les pertes Joules supplémentaires,
- Le surdimensionnement de l'installation.

3.9.3 Méthode de compensation de l'énergie réactive

La puissance réactive est généralement consommée par des dispositifs à base d'électronique de puissance.

Plusieurs méthodes existent pour la compenser. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau, soit par condensateurs fixes soit par batteries de condensateurs à régulation automatique (permettant l'adaptation aux variations de la charge).

Cependant, la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et ne s'adapte pas à l'évolution du besoin. Un compensateur statique (SVC) permet d'éviter ce problème en consommant une partie de la puissance réactive qui s'adapte aux variations de celle-ci à travers de fortes inductances.

Afin d'augmenter la performance dynamique et réaliser une compensation variable en fonction de la consommation d'énergie réactive de la charge, il est nécessaire d'utiliser des convertisseurs statiques de puissance réactive avancée. Ils sont utilisés plus particulièrement pour injecter de la puissance réactive en un point du réseau, de façon à augmenter la puissance maximale transmissible et la stabilité du réseau [17] [30] [31].

La compensation d'énergie réactive peut-être.:

- Globale : en tête d'installation ;
- Partielle : par secteur ;
- Local : aux bornes de chaque récepteur inductif.

La compensation idéale est la compensation locale puisqu'elle permet de produire l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande.

3.9.4 Calcul de la puissance de compensation des condensateurs

Dans une installation, avant l'introduction de condensateurs nous avons :

Q : la puissance réactive

S : la puissance apparente

Après l'installation des condensateurs, la puissance réactive passe de Q à Q' avec $Q' = Q - Q_c$
Où :

Q_c : Une batterie de condensateurs de puissance installée

La puissance apparente passe de S à S' (figure 3.9), elle sera diminuée.

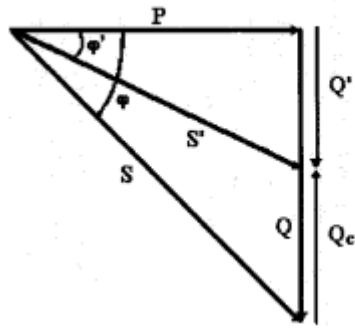


Figure 3.9 Diagramme de Fresnel de la puissance de compensation [30]

3.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités relatives aux harmoniques dans les installations électriques. Nous avons aussi abordé les indices qui caractérisent les harmoniques.

Puis, nous avons cité deux normes ; la première concerne les harmoniques de courant et la deuxième concerne les harmoniques de tension et les perturbations qui leur sont liées. Ces normes ont pour rôle de limiter le taux des harmoniques se trouvant au sein de l'installation électrique ainsi que le nombre et la durée des tests à faire obligatoirement. Si ces limites sont dépassées, les harmoniques auront de néfastes effets sur les différents éléments de l'installation. La dernière partie de ce chapitre a été consacré aux différents types de filtrage.

Chapitre 04 :

Audit énergétique

4 Audit énergétique

4.1 Introduction

L'énergie est aujourd'hui l'une des bases du développement des pays ; son amélioration devient capitale. Pour l'améliorer on doit d'abord savoir comment elle est consommée et on doit donc passer par l'audit énergétique.

L'audit énergétique est entrepris dans le but d'élaborer un bilan de la situation énergétique globale d'un établissement, de quantifier les potentiels d'économies d'énergie et de définir les actions nécessaires à la réalisation de ces économies [32]. Il fournit les techniques et les moyens qui permettent de minimiser les pertes après les avoir déterminées, sans affecter la production et la qualité.

Dans ce chapitre nous aborderons la réalisation d'audits énergétiques dans le secteur de l'industrie. Nous commencerons à décrire brièvement et d'expliquer les objectifs de l'audit énergétique, puis nous donnerons une présentation de l'état de l'audit énergétique en Algérie. Par la suite, nous présenterons une méthodologie de l'audit énergétique qui va permettre de suivre la performance énergétique d'une entreprise, sans affecter la production et la qualité. Puis nous détaillerons les étapes à suivre, les règles à respecter et les instruments nécessaires pour l'effectuer. A la fin de ce chapitre, nous présenterons un logiciel qui va faciliter la réalisation d'audits énergétiques.

4.2 Objectifs de L'audit énergétique

Les objectifs de l'audit énergétique sont :

- D'obtenir une image globale de la consommation énergétique au sein d'un établissement,
- De réduire le gaspillage de l'énergie électrique,
- De repérer les dysfonctionnements ou la nécessité d'entretiens plus réguliers de certains équipements,
- De déterminer les modifications à apporter aux procédés et utilités du site industriel ou à leur mode d'exploitation, afin de réaliser des économies d'énergie.

Et on obtient comme résultats :

- L'amélioration de l'efficacité énergétique du système,
- La réduction des coûts d'exploitation.

4.3 Audit énergétique en Algérie

L'efficacité énergétique a un programme national qui s'établit sous la responsabilité du ministre chargé de l'énergie et qui est approuvé par le Gouvernement. Ce programme vise à réduire la consommation énergétique de 9% d'ici 2030, notamment à travers l'introduction des équipements et des technologies performantes [32].

Avant de chercher à réduire la consommation énergétique, on doit évaluer le potentiel d'économie d'énergie et le quantifier à travers l'audit énergétique. En Algérie, l'activité

d'audit énergétique a été lancée effectivement en 2014, conformément aux dispositions du décret exécutif n°05-495 du 26 décembre 2005 [32].

Trois secteurs sont concernés dans la mesure où leur consommation est significative (figure 4.1), à savoir :

- Le secteur industriel,
- Le secteur tertiaire,
- Le secteur du transport.

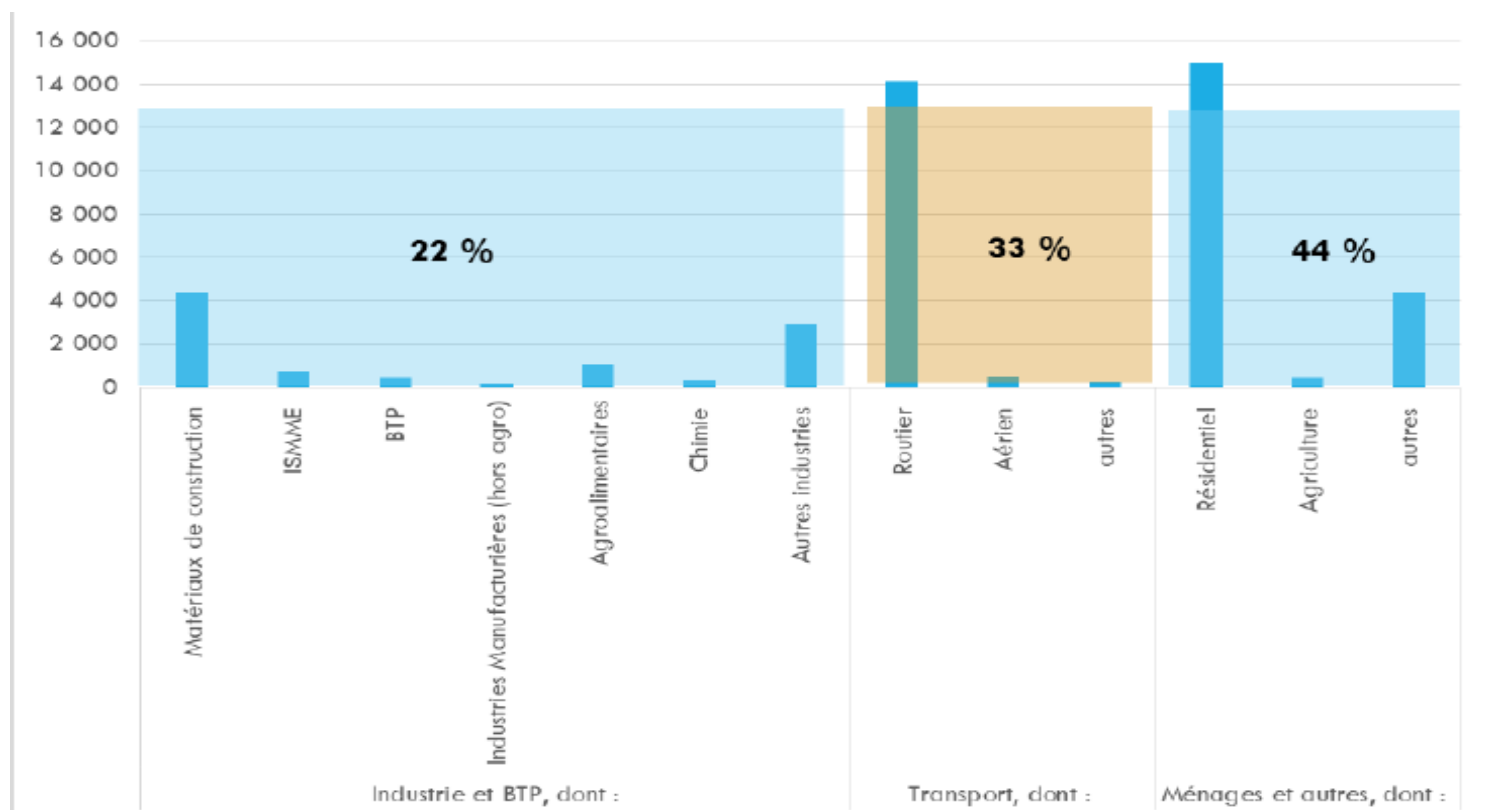


Figure 4.1 Répartition de la consommation énergétique nationale par secteur 2017 en kTEP (mille Tonne d'Equivalent Pétrole) [Bilan énergétique national 2018, ministère de l'énergie]

On s'intéresse particulièrement au secteur industriel non seulement car l'énergie est consommée en grande quantité dans ce secteur, mais aussi parce que cette consommation est localisée. C'est-à-dire qu'on peut accéder à des gisements d'économies d'énergie faciles et importants.

Le décret vise à définir les seuils de consommation énergétique et détermine :

- les critères d'assujettissement des établissements à l'audit,
- la périodicité de l'audit,
- les conditions et modalités de mise en œuvre de l'audit énergétique,
- les conditions d'agrément des auditeurs.

Ce décret prévoit un système d'audit énergétique obligatoire et périodique pour les établissements grands consommateurs d'énergie. Dans le secteur industriel, il s'agit des établissements dont la consommation annuelle totale d'énergie est égale ou supérieure à 2000 TEP. L'électricité

produite par les énergies renouvelables est exclue du calcul de la consommation totale d'énergie [33].

Les établissements soumis à l'audit énergétique obligatoire doivent l'effectuer, à leurs frais, périodiquement par un auditeur agréé.

Pour les établissements industriels et de transports, la périodicité de l'audit énergétique est fixée à trois (3) ans [33].

4.4 Modalités d'agrément des auditeurs

Conformément à l'arrêté interministériel du 29 Septembre 2010 relatif aux modalités d'agrément des auditeurs, sont qualifiées les personnes physiques titulaires d'un diplôme d'ingénieur ou un diplôme universitaire équivalent dans l'une des spécialités techniques suivantes:

- Génie mécanique.
- Énergétique.
- Thermique.
- Génie chimique.
- Génie des procédés.
- Électrotechnique.
- Électromécanique.

et disposant d'une expérience d'au moins cinq ans.

L'agrément des bureaux d'études activant dans le domaine énergétiques se fera sur la base des qualifications de leur personnel technique permanent agréé.

Il est nécessaire de développer un corps d'auditeurs énergétiques qualifiés dans les différents segments d'activités du secteur industriel. C'est pourquoi l'agence pour la promotion et de la rationalisation de l'utilisation de l'énergie APRUE programme annuellement des sessions de formation continue des auditeurs, adaptées aux besoins de l'industrie.

Ces sessions permettront aux auditeurs d'être en mesure de réaliser un audit énergétique sur un site industriel et de présenter des résultats préliminaires, tout en maîtrisant la méthodologie de l'audit énergétique et en respectant la réglementation le régissant.

La liste des experts et des bureaux d'audit énergétique agréés, avec leurs références, est communiquée par l'APRUE aux établissements concernés [33].

4.5 Généralités sur l'audit énergétique

Un audit énergétique est une analyse complète de la consommation énergétique, menée par une équipe interne ou externe à l'entreprise et dirigée par un expert en audit énergétique. Il est réalisé pour déterminer les modifications à apporter afin d'assurer des économies d'énergie. Ceci après avoir tiré une image de la répartition des consommations d'énergie entre les différentes activités de l'entreprise. Ainsi, il permet d'optimiser l'efficacité énergétique.

Pour améliorer l'efficacité énergétique le principe est d'assurer une consommation minimale d'énergie pour une même production.

Avant de réaliser l'audit énergétique, l'auditeur visite le site industriel afin de collecter les données disponibles, de réaliser une analyse préliminaire et de déterminer les mesures qui seront effectuées ainsi que la liste des appareils de mesure nécessaires. Cette visite permet aussi de préparer un planning d'intervention.

Lors de l'audit énergétique, l'auditeur analyse des données existantes pour valider l'analyse préliminaire puis il complétera les données qui manquent en effectuant des mesures.

L'analyse au niveau de l'entreprise se fait en prenant en compte l'ensemble des consommateurs énergétiques liés aux [34] :

- Procédés de fabrication,
- Services généraux ("utilités"),
- Locaux de travail sous tous leurs aspects énergétiques.

Les utilités sont des processus énergétiques qui permettent d'alimenter les équipements en énergie lors du processus de production.

A la fin, l'auditeur doit établir un rapport d'audit énergétique approfondi qui contient :

- Toutes les informations collectées,
- Les recommandations de l'auditeur et le plan d'actions d'efficacité énergétique.

4.6 Règles à respecter dans la conduite de l'audit

L'auditeur s'attache à respecter un ensemble de règles qui sont:

- Être à l'écoute de l'industriel et lui proposer une proposition claire au moment de l'offre de prestation.
- Elaborer convenablement le bilan énergétique ainsi que son suivi, et estimer au mieux les économies d'énergie réalisables et en préciser les conditions économiques de réalisation.
- Suivre une démarche rigoureuse explicitée et justifiée dans ses rapports d'études et dans les réunions de suivi et être exhaustif dans ses préconisations et fournir toutes les informations objectives nécessaires au maître d'ouvrage pour décider des suites à donner [35].
- L'auditeur ne doit pas intervenir sur des installations conçues, réalisées ou gérées par lui-même, il doit garantir l'objectivité en justifiant son indépendance vis-à-vis des fournisseurs d'énergie, des services énergétiques et des équipements.
- Ne pas privilégier a priori un type d'énergie ni certaines modalités de fourniture d'énergie [35].

4.7 Les étapes de L'audit

4.7.1 Analyse préalable

Le bon déroulement de l'audit est conditionné par le bon démarrage. Une réunion de démarrage va permettre de :

- clarifier tous les objectifs de l'audit énergétique ;
- planifier les visites et réunions de travail nécessaires ;
- déterminer les informations complémentaires qui seront nécessaires à la réalisation de l'audit.

Les visites sont nécessaires car elles permettent de comprendre le fonctionnement et l'organisation de l'entreprise, d'assurer les relevés de terrain nécessaires, de rencontrer les intervenants clés et de réaliser les éventuelles campagnes de mesures [36].

4.7.2 Collecte des données

L'auditeur adresse au responsable de l'établissement la liste des documents à fournir lors de la réunion de démarrage. Il s'agit :

- du plan de l'entreprise et des installations ;
- de l'inventaire des équipements techniques (marque, type, quantité, caractéristiques, année d'installation, localisation) ;
- des données de production, des relevés des compteurs, des contrats et factures d'énergie, des consommations d'énergie détaillées ;
- d'éventuels rapports d'audits énergétiques déjà existants.

Cette étape laisse le temps à l'entreprise de vérifier les informations qui sont disponibles (le plan, les facteurs, les catalogues ...), celles qui ne le sont pas et celles qui pourraient être disponibles et/ou reconstituées [36].

4.7.3 Analyse des données existantes et rapport préliminaire

A l'issue de la visite et des entretiens, l'auditeur traite les données et réalise ainsi une première approche du bilan énergétique du site.

Puis il rédige le rapport comprenant le bilan de la situation énergétique du site et un programme d'actions [35].

4.7.4 Campagne de mesures complémentaires

Une campagne de mesures peut s'avérer incontournable pour l'auditeur car elle lui permet :

- d'observer comment l'énergie est répartie au sein du tableau de consommation d'énergie,
- de voir l'état de fonctionnement de certains équipements.

4.7.5 Analyse détaillée

Durant cette étape l'auditeur analyse les données complémentaires et établit la consommation énergétique du site, à partir de calculs, de simulations ou d'estimation. Les résultats trouvés sont comparés aux données réelles. Il continue son analyse jusqu'à la convergence acceptable entre les deux.

Il doit [35] :

- rechercher les périodes de fonctionnement pour lesquelles les consommations d'énergie paraissent anormales ;
- déterminer et calculer les indicateurs qui permettent d'évaluer la performance énergétique ;
- étudier l'adéquation entre les dimensionnements des équipements, les systèmes de régulation et les besoins ;
- appréhender les conditions de conduite, d'entretien et de maintenance ;
- identifier les paramètres ayant un impact sur l'environnement.

4.7.6 Bilan énergétique global

En fonction des éléments complémentaires recueillis, l'auditeur établit des bilans (thermiques, électriques, économiques, etc.) des systèmes étudiés. Ces éléments sont réintégrés dans le bilan global du site [35].

Ce bilan énergétique va permettre de déterminer la part variable de la consommation énergétique et les rendements. Il va aussi permettre d'établir un diagramme de flux énergétiques, mettant en évidence l'énergie entrante, l'énergie produite, l'énergie récupérée, l'énergie utile et l'énergie perdue.

4.7.7 Plan d'actions énergétique

L'audit doit permettre de définir un plan d'actions menant à la détermination d'objectifs d'économies d'énergie à atteindre. Le diagnostic énergétique établi dans la phase précédente va permettre la détermination de ce programme énergétique. Pour dresser le plan d'actions énergétique, on identifie d'abord les postes les plus consommateurs d'énergie et on analyse, pour chacun d'entre eux, toutes les possibilités de réduction de consommation [35].

4.7.7.1 Réunion(s) de brainstorming

Une réunion de brainstorming, au minimum, est nécessairement programmée avec une équipe interne à l'entreprise comprenant au moins un responsable technique de l'entreprise, un responsable de production, et un responsable énergie/environnement/qualité/sécurité. Ce type de réunion permet d'établir une analyse détaillée des tableaux de consommations par activité et d'imaginer et d'identifier des mesures d'amélioration énergétique.

4.7.7.2 Tableau de synthèse des mesures d'amélioration identifiées

Après leur identification, les mesures d'amélioration seront organisées sous forme d'un tableau et ce dernier sera présenté dans le rapport final de l'audit énergétique. Dans ce tableau on précisera :

- une description de l'amélioration identifiée

- la faisabilité de l'amélioration.

Les améliorations seront regroupées par catégorie : entreprise (équipements, éclairages, ...), activités opérationnelles (forces motrices, fours, ...), utilités (air comprimé,...), énergies renouvelables (solaire photovoltaïque, cogénération, ...).

Il importe que chacune des mesures soit relative à une action précise de manière à être capable, dans une seconde étape, d'y associer une économie et un investissement [35].

4.7.8 Rapport d'audit

La rédaction du rapport va permettre :

- de communiquer les résultats de l'audit à l'établissement, et de commenter les résultats obtenus.
- de s'assurer de l'harmonie des résultats obtenus avec les objectifs stratégiques de l'entreprise.
- de justifier les actions préconisées, de montrer leur pertinence et de définir les priorités, les délais et les responsabilités de leur mise en œuvre au sein de l'entreprise.

4.7.8.1 Données générales

La page de couverture du rapport doit bien entendu identifier l'entreprise concernée et l'année considérée, son nom et son adresse doivent être visibles, ainsi que ceux des autres entreprises concernées.

Il est obligatoire que les informations suivantes apparaissent aussi :

- le nom et le contact de la personne de référence au sein de l'entreprise dans le cadre de cet audit,
- le nom de l'auditeur ayant effectué l'audit.

Le rapport d'audit comprendra un rappel de l'objet du travail, une description générale de l'entreprise et de ses activités en fonction de considérations énergétiques couvrant les productions de biens, les services (dont l'entreprise), la production ou transformation d'énergie (utilités).

La démarche suivie et le périmètre de l'audit seront définis précisément, et l'exclusion d'un élément de ce dernier doit être justifiée.

4.7.8.2 Analyse et recommandations

Le rapport d'audit énergétique doit contenir l'analyse qualitative de la situation énergétique de l'établissement.

L'auditeur présente dans le rapport un résumé des différentes consommations énergétiques ainsi que leurs coûts.

Le rapport doit aussi contenir la description de toutes les recommandations d'économie d'énergie possible.

4.7.8.3 Présentation du plan d'action

A partir des recommandations établies, l'auditeur doit présenter dans le rapport un plan d'action chronologique qui contiendra les actions les plus rentables [35].

Ces actions peuvent être classées en trois catégories [34]:

- l'action immédiate qui permet une économie d'énergie sans nécessiter d'investissement,
- l'action prioritaire à mener à court terme car elle a un niveau de rentabilité élevé,
- l'action utile à mettre en œuvre car elle est de rentabilité certaine mais pouvant être différée du fait d'implications sur le fonctionnement de l'entreprise plus lourdes à gérer ou d'interactions avec des actions prioritaires.

4.8 Les campagnes de mesures

Afin de pouvoir calculer les bilans énergétiques et massiques et de pouvoir proposer des modifications qui permettront d'économiser de l'énergie, il est incontournable de réaliser des campagnes de mesures sur le site de l'audit. Ces campagnes permettront de confirmer les informations fournies et de les compléter si nécessaire.

4.8.1 Liste des Mesures de contrôle énergétique

Les mesures qui doivent être prises lors de la réalisation de l'audit énergétique sont représentées dans le tableau 4.1:

Tableau 4.1 Mesure de contrôle énergétique [35]

Procédé	Paramètres	Action requise
Utilisation de combustible liquide	Débit du combustible Température du combustible	Mesuré Mesurée
Utilisation d'électricité	Consommation unitaire Courant Tension Facteur de puissance Coefficient de charge Taux d'utilisation Bilan de puissance Compensation de l'énergie réactive	Mesurée ou déduite Mesuré ou déduit Mesurée ou déduite Mesuré Mesuré Mesuré ou déduit Mesuré ou déduit Mesurée ou déduite
Combustion	Température des fumées Débit des fumées Produits de combustion Air rejeté Coefficient de charge Taux d'utilisation	Mesurée Mesurée Dérivés Dérivé Mesuré Mesuré ou déduit
Gaz	Débit du volume Température Teneur en humidité	Mesuré Mesurée Mesurée
Chaleur	Débit du flux Température	Mesuré Mesurée

	Pression	Mesurée
Air comprimé	Analyse du réseau Taux de fuite Rendement	Mesuré ou calculé Mesuré ou calculé
Groupe de froid	Etude du système Rendement	Mesuré ou calculé
Perte de chaleur des surfaces	Température Superficie Vitesse de l'air	Mesurée Mesurée Mesurée ou calculée

4.8.2 Types de mesures

Les mesures peuvent être classées en fonction de la fréquence de leur réalisation [35]: mesures instantanées, mesures instantanées répétées et mesures continues.

- **Mesures instantanées** : elles concernent les paramètres recherchés dans des conditions stables de fonctionnement, comme la perte de chaleur d'une surface et les conditions de combustion d'un brûleur.
- **Mesures instantanées répétées** : elles sont réalisées lorsque l'objet de mesure fonctionne dans un régime qui n'est pas stable (le cas de l'agence spatiale pour les harmoniques).
- **Mesures continues** : elles sont nécessaires dans le cas où le régime de fonctionnement varie constamment. On effectue alors des enregistrements pendant une période relativement longue. Ces mesures sont aussi utiles pour déterminer le modèle d'utilisation ou de consommation d'énergie pendant la nuit ou le week-end. [35]

4.9 Instrumentation

Les instruments portables de base (figure 4.2), qui sont généralement nécessaires pour effectuer un audit énergétique sont :

1. analyseur d'oxygène,
2. analyseur de gaz de combustion (oxygène et gaz carbonique),
3. tube Pitot ou manomètre (pour mesurer le débit des fumées),
4. pyromètre à infrarouge,
5. thermomètres avec différentes sondes de température,
6. débitmètre,
7. hygromètre ou thermo-hygromètre,
8. analyseur de réseau électrique (tension, courant, $\cos\phi$, consommation d'énergie etc.),
9. ampèremètres,
11. appareils de mesure de l'éclairement (luxmètre) ,
12. analyseur d'harmoniques,

13. multimètre,

14. pinces ampérométriques.



Figure 4.2 Instruments portables de base, nécessaires pour effectuer un audit énergétique [35]

4.9.1 Analyseur de réseau électrique

Le rôle d'un analyseur de réseau triphasé (figure 4.3) est triple. Il permet de:

- mesurer les tensions, les courants, les puissances et les perturbations des réseaux de distribution d'électricité,
- obtenir une image instantanée des principales caractéristiques du réseau,
- enregistrer les différents paramètres électriques dans le temps.

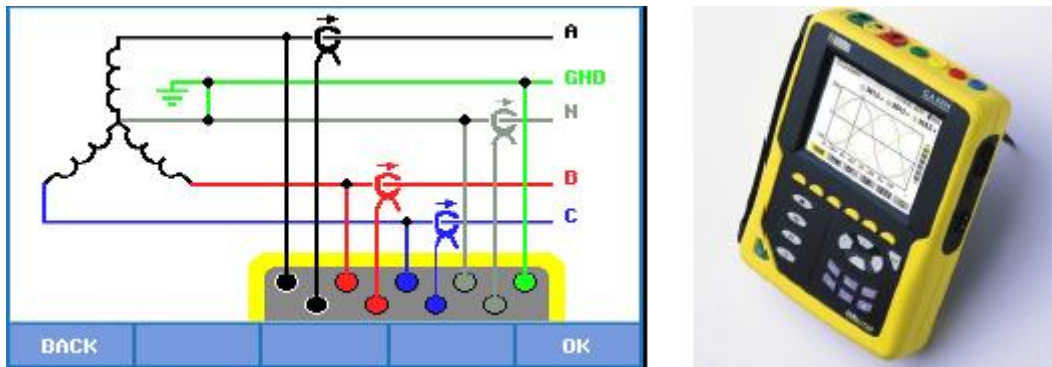


Figure 4.3 Analyseur de réseau [35]

4.9.2 Logiciel Power Monitoring Expert

Les systèmes électriques devenant plus complexes et les réglementations plus sévères, de nouvelles solutions sont proposées pour l'amélioration de la sécurité, l'économie du temps et de l'argent.

Une de ces solutions est le logiciel Power Monitoring Expert (PME) [37]. Il s'agit d'une plateforme logicielle (figure 4.4) qui permet d'aider les installations à forte consommation d'énergie à optimiser leurs consommations d'énergie et d'analyser la qualité de l'alimentation électrique.

Nous allons nous servir de ce logiciel, choisi d'après plusieurs critères, pour observer les phénomènes de perturbations électromagnétiques (harmoniques, creux de tension..) et leurs effets.

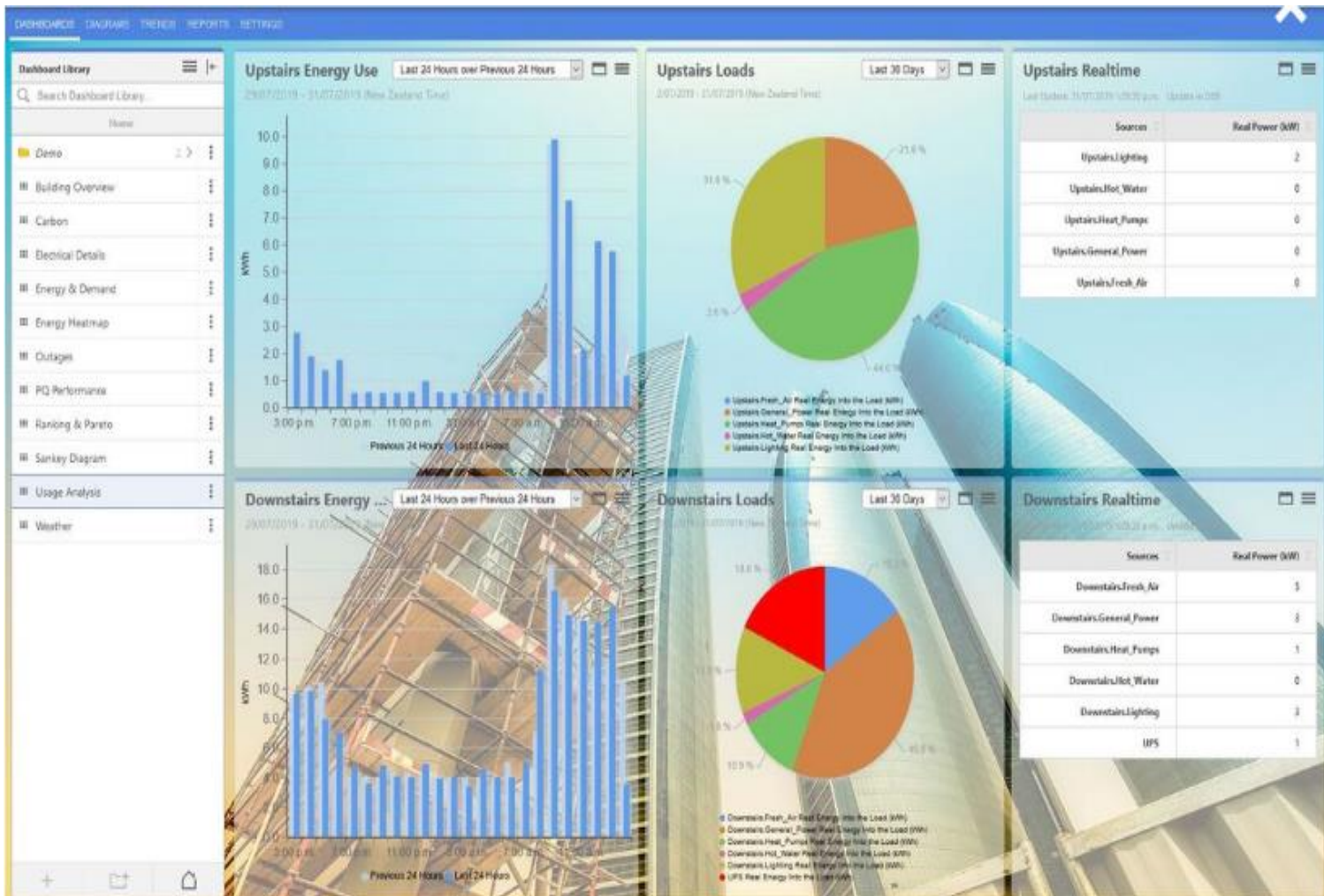


Figure 4.4 Interface de logiciel Power Monitoring Expert [37]

4.9.3 Fonctions

Les principales fonctions du logiciel PME sont [37]:

- assurer la sécurité des équipements,
- améliorer le facteur de puissance et alimenter les différentes structures en énergie.

Le logiciel permet nous donne la capacité de réduire les dépenses et de valider toutes les initiatives de conservation.il permet aussi le suivi (figure 4.5) des services publics non électriques : eau, gaz... [9].

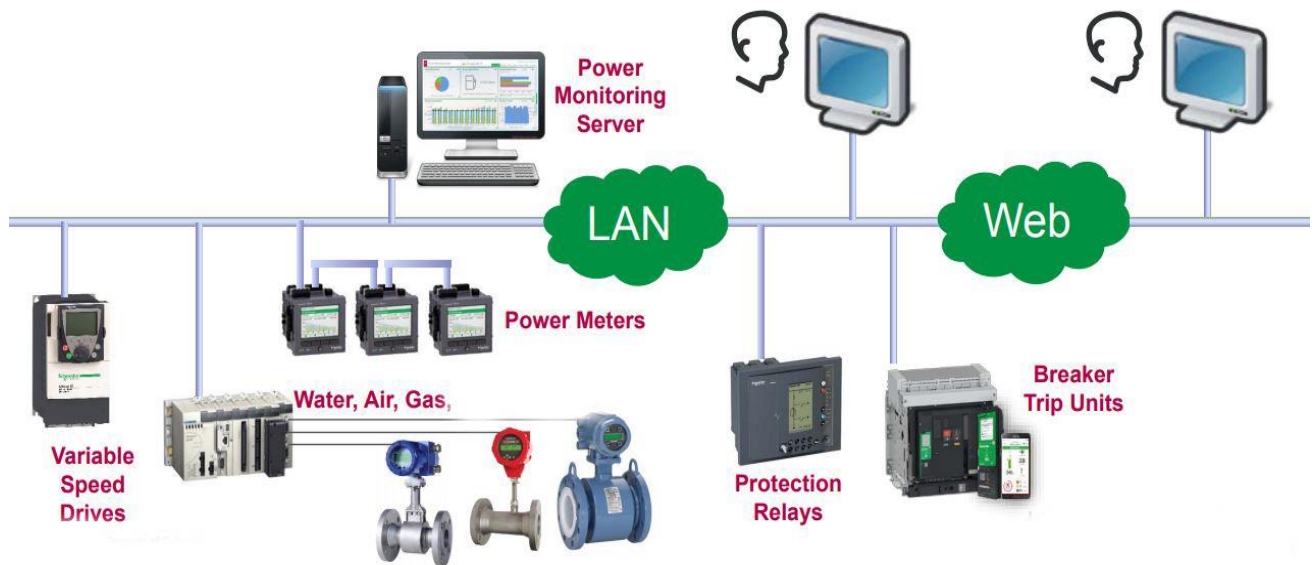


Figure 4.5 Architecture du logiciel PME [37]

4.9.3.1 Fonctions de qualité de l'énergie du logiciel

Vue d'ensemble des harmoniques

L'appareil de mesure associé au logiciel permet de mesurer les harmoniques de tensions jusqu'au 15^e rang et les harmoniques de courant jusqu'au 31^e rang, et de calculer la distorsion harmonique totale (THD).

L'appareil de mesure définit les phases présentes et détermine le mode de calcul des harmoniques de courant et de tension phase-phase et phase-neutre.

Puissance et facteur de puissance

Les mesures échantillonnées de tension et de courant prises aux entrées de l'appareil fournissent des données pour le calcul de la puissance et du facteur de puissance.

4.10 Conclusion

L'audit énergétique est un outil puissant pour réaliser des économies d'énergie relativement acceptables. Il est nécessaire de l'effectuer dans les sites industriels pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les coûts.

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthodologie d'audit énergétique. Elle consiste à collecter en premier lieu toutes les informations nécessaires à l'établissement d'un modèle énergétique. En second lieu, elle permet d'analyser ce modèle, afin d'identifier les améliorations possibles pour atténuer le gaspillage d'énergie et réduire les coûts.

En dernier lieu, toutes les informations collectées, les résultats de l'analyse ainsi que les recommandations de l'auditeur sont présentés dans le rapport d'audit.

Chapitre 05 :

Application pratique : audit énergétique des installations électriques de l'ASAL

5 Application pratique : audit énergétique des installations électriques de l'ASAL

5.1 Introduction

L'objectif premier de l'audit énergétique au niveau de l'agence spatiale Algérienne (ASAL) est de déterminer les modifications à apporter aux procédés et utilités, afin de remédier au problème techniques constaté (effets néfastes des harmoniques). Pour cela, il est nécessaire de déterminer les principaux postes de consommation énergétique et d'effectuer une analyse par comparaison entre les signaux avant et après la mise en œuvre des solutions. Il convient également de décrire ces solutions aussi précisément que possible et de donner une première approche de la forme des signaux après l'application des solutions proposées et du temps de retour.

Dans ce chapitre nous commencerons par la présentation de l'ASAL et son système de distribution électrique. Puis nous aborderons le premier audit énergétique qui nous permettra d'identifier le problème et son origine et de proposer des recommandations pour le résoudre.

La solution adéquate étant d'installer des filtres actifs, nous allons d'abord les dimensionner pour pouvoir les installer. Après leur installation, nous réaliserons un deuxième audit énergétique qui va nous permettre d'évaluer les résultats de la solution proposée.

5.2 Présentation de L'ASAL

L'agence Spatiale Algérienne (ASAL) est un établissement scientifique public national. Elle a été créée auprès du chef du gouvernement par **décret présidentiel n° 02-48 du 16 janvier 2002**.

L'ASAL est l'instrument de conception et de mise en œuvre de développement de l'activité spatiale. Son objectif principal est de faire de l'outil spatial afin d'accélérer le développement économique, social et culturel du pays et d'assurer la sécurité et le bien-être de la communauté nationale.

Elle est constituée par 15 départements ministériels, d'un comité scientifique composé d'experts dans les domaines des technologies et applications spatiales.

5.2.1 Missions et attributions

- Proposer au gouvernement les émissions de développement de l'activité spatiale et d'en assurer l'exécution.
- Mettre en place une infrastructure spatiale destinée à renforcer les capacités de la recherche scientifique.
- Proposer les programmes annuels de développement des activités spatiales nationales et d'en assurer le suivi et l'évaluation.

5.2.2 Entités opérationnelles

L'Agence Spatiale Algérienne est constituée d'une structure centrale de quatre entités opérationnelles :

- Le Centre des Techniques Spatiales (CTS)
- Le Centre de Développement des Satellites (CDS)
- Le Centre des Applications Spatiales (CAS)

- Le Centre d'Exploitation des Systèmes de Télécommunications (CEST)

5.2.3 Distribution de l'énergie au niveau de l'ASAL

La sous station électrique au niveau de l'ASAL permet de distribuer et contrôler le flux d'énergie pour les différents consommateurs. Dans cette sous station il y a les équipements suivants :

5.2.3.1 Les cellules MT

Il y a six cellules (Figure 5.1, figure 5.2) :

- la première cellule est une cellule d'arrivée de la ligne du fournisseur (SONELGAZ),
- la deuxième cellule est une cellule de départ
- la troisième cellule est consacrée pour le comptage,
- la quatrième cellule est une cellule de protection générale (disjoncteurs),
- les deux dernières cellules sont des cellules de protection pour les transformateurs.



Figure 5.1 Les cellules MT au niveau de l'ASAL

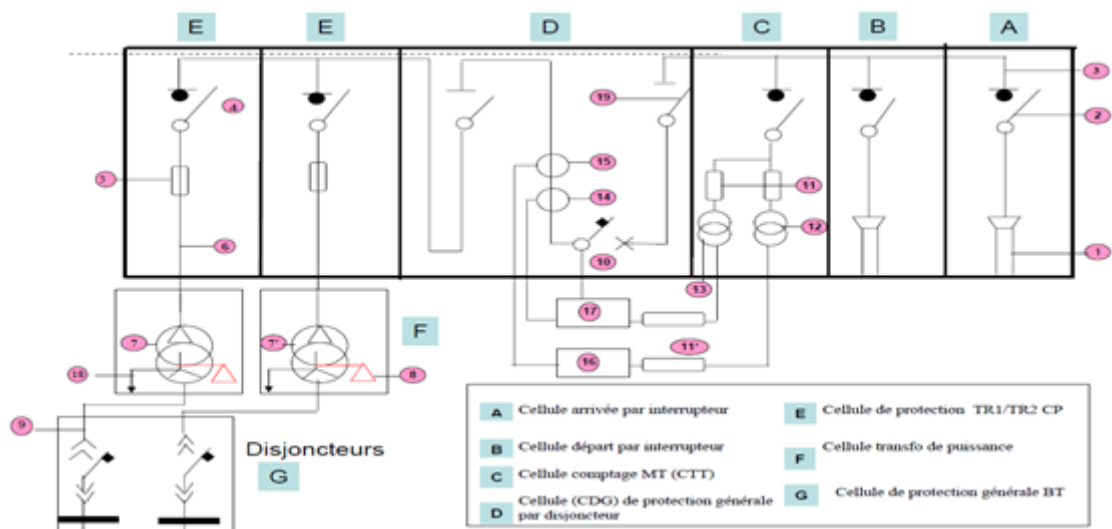


Figure 5.2 Schéma unifilaire d'un poste de livraison HTA/BT à comptage HTA

5.2.3.2 Les transformateurs

Il existe aussi deux transformateurs abaisseurs 30/0.4 kV avec une puissance de 800kVA, l'un est mis en marche et l'autre en standby.

5.2.3.3 TGBT (tableau général basse tension)

C'est un système de distribution (Figure 5.3), qui contient des disjoncteurs de protection pour chaque départ, ces disjoncteurs sont de type fixe avec des calibres qui correspondent aux courants consommés par les charges.

On analyse les perturbations électromagnétiques qui se trouvent dans les équipements de l'ASAL par l'intégration d'un analyseur de réseau intelligent dans le TGBT ce dernier est relié avec un logiciel de gestion de l'énergie de marque Schneider (Power Monitoring Expert) qui propose plusieurs fonctionnalité d'analyse (énergie active, réactive, facteur de puissance, harmonique, événement électromagnétique ...etc.).

Il y a deux partie des TGBT au niveau de l'ASAL :

- **TGBT 1-6 BOUCHAOUI** : assure l'alimentation de la salle de permanence (54.9 kVA), des deux bâtiments de sécurité et de support (respectivement 222,22 kVA et 106 kVA), de l'éclairage et du CVC (604,9 kVA), de la salle des pompes (81,5 kVA), du bâtiment des bureaux (91,8 kVA), et de la salle des fêtes (81,5 kVA).et les charges de la salle des transformateurs (30 kVA).
- **TGBT 7-12 BOUCHAOUI** : assure l'alimentation du bâtiment support (195,2 kVA), de l'éclairage et du CVC (604,9 kVA), la salle des pompes (81,5kVA), le bâtiment administratif (234,3 kVA), les charges de la salle des transformateurs (30kVA), le contrôle de la sécurité incendie (91,8kVA) et l'éclairage extérieur (80kVA).



Figure 5.3 TGBT de l'ASAL

5.2.3.4 Gaine à barres

C'est un jeu de barres qui permet de relier les cellules MT et les TGBT (Figure 5.4).



Figure 5.4 Gaine à barre

5.2.4 Description de l'installation audité

L'installation audité fait partie du Centre d'exploitation des systèmes de télécommunications (CEST) qui est chargé de la gestion, de l'exploitation et de la commercialisation des produits et services de télécommunications par satellite prévus dans le cadre du programme spatial national.

L'installation contient deux transformateurs parallèles de 800 kVA couplés l'un à l'autre de manière à ce que chacun alimente un TGBT à la fois dans des conditions normales. De plus, l'alimentation de l'installation en énergie est assurée par un générateur de 1000 kVA.

Les charges principales sont :

- les bâtiments et les bureaux,
- les équipements de télécommunication,
- Un-Interruptible Power Supply (UPS) et HVAC.

Une batterie de compensation de puissance réactive est installée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie.

5.2.4.1 UPS

C'est un équipement qui assure la continuité d'alimentation en énergie lorsque l'alimentation électrique fait défaut ou chute à un niveau de tension inacceptable.

La station BOUCHAOUI dispose de 2 UPS (Un-interruptible Power Supply, Alimentation sans interruption) différents ; le premier avec une capacité de sortie nominale de 160 kVA, le second avec une capacité de sortie nominale de 400 kVA.

Les deux UPS ont un rendement de 93% à la charge nominale et fonctionnent à une température comprise entre 0 et 40°C.

5.2.4.2 Compensation de l'énergie réactive

La compensation de l'énergie réactive est un processus essentiel pour améliorer l'efficacité énergétique. Elle permet une utilisation optimale des installations, en réduisant la consommation électrique et donc son coût.

Le TGBT de la station contient une batterie de compensation d'énergie réactive G6E AAR/100 COMAR CONDENSATOR d'une puissance nominale de 200 kVAr sous 400V -50 Hz et un $THD_{V_{max}}=3\%$.

5.2.4.3 Autres charges

En plus de l'onduleur et de la compensation réactive, chaque TGBT alimente un certain nombre de charges réparties dans l'installation.

Le TGBT 1-6 BOUCHAOUI assure l'alimentation de la salle de permanence (54.9 kVA), des deux bâtiments de sécurité et de support (respectivement 222.22 kVA et 106 kVA), de l'éclairage et du HVAC (604.9 kVA), de la salle des pompes (81.5kVA), du bâtiment des bureaux (91.8 kVA) et des charges de la salle des transformateurs (30kVA).

5.3 Description du problème

Plusieurs problèmes ont été constatés au niveau de la sous-station de l'ASAL tel que : le déclenchement répétitif des dispositifs de protection, l'échauffement au niveau des câbles, la résonance sonore au niveau de certains équipements.

Il a donc été recommandé à l'ASAL de réaliser un audit énergétique afin d'identifier l'origine de ces effets perturbateurs dans ses installations. Pour ce faire, l'ASAL a fait appel à El Kindi Engineering qui est entreprise d'étude et réalisation spécialiste dans la gestion et l'audit énergétiques.

La démarche de la solution proposée par El Kindi Engineering était de :

- Effectuer un audit énergétique d'une durée d'une semaine (en application des exigences des normes en vigueur IEEE 519 et EN 50160)
- Proposer la solution technique adéquate (dans ce cas c'était l'installation des filtre actifs)
- Effectuer un audit de vérification des performances de la solution proposé

5.4 Déroulement du premier audit et recommandations

D'après les recommandations des experts technique d'effectuer un audit énergétique pour les deux TGBT (TGBT 1-6 et TGBT 7-12) afin d'identifier les causes des problèmes constatés, l'ASAL à fait appel à El Kindi Engineering vu son expérience dans ce domaine.

L'audit énergétique est fait en deux étapes, la première étape était consacrée à l'évaluation de la qualité d'énergie au niveau du système de distribution de l'énergie et la proposition des solutions technique adéquate, la deuxième était consacrée à la vérification des performances de la solution proposée

Les résultats du premier audit sont représentés comme suite :

5.4.1 Les paramètres de TGBT1-6

- **Puissance active et réactive**

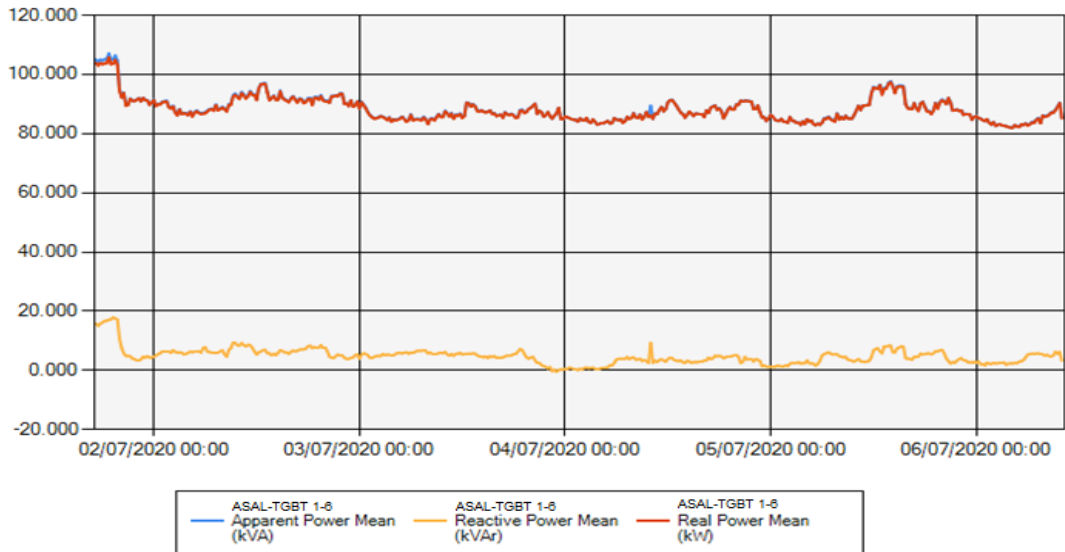


Figure 5.5 La variation de la puissance active et réactive au niveau de TGBT1-6

Interprétation

Il est à constater que la puissance totale consommée est d'environ 100 KVA (figure 5.5) avec un niveau de consommation quasi stable, sachant que le transformateur de puissance a une puissance nominale de 800 KVA, il est clair que le transformateur est peu chargé (fonctionnement en sous-charge), le transformateur de puissance fonctionne à 12,5 % de sa charge nominale ce qui n'est pas recommandé par les fabricants, dans ce cas, le pourcentage de perte d'énergie est élevé et peut réduire la durée de vie du transformateur, de plus le rendement du transformateur est très faible.

Comme recommandation, il est conseillé d'utiliser un seul transformateur pour les deux TGBT afin d'obtenir un niveau acceptable de charge de fonctionnement (proche du taux recommandé de 80%).

- **Facteur de puissance**

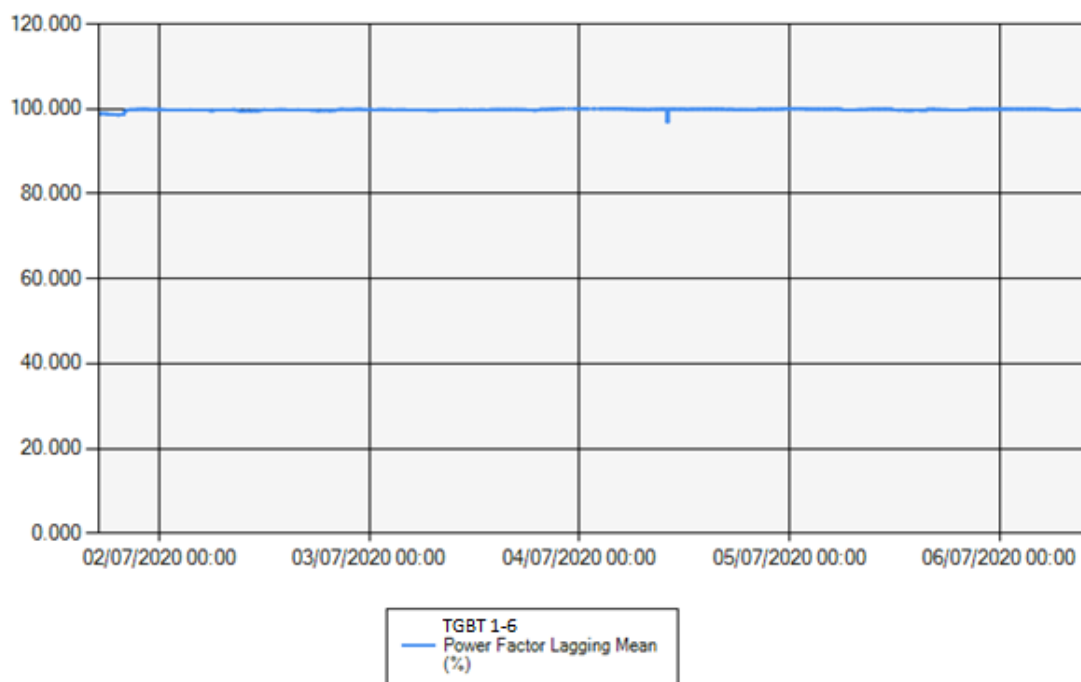


Figure 5.6 La variation de facteur de puissance au niveau de TGBT1-6

Interprétation

Sur la figure 5.6, nous remarquons que le facteur de puissance est proche de l'unité en raison des batteries de compensation de l'énergie réactive installées. Cette valeur peut changer lorsque la puissance totale augmente car le facteur de puissance dépend de la puissance.

Dans ce cas, il est recommandé de maintenir un niveau acceptable de compensation en fonction de la puissance totale consommée.

5.4.2 Analyse des caractéristiques électriques selon la norme EN 50160

5.4.2.1 La fréquence

La fréquence nominale est de 50 Hz.

Tableau 5.1 Les mesures de la fréquence pendant une semaine au niveau de TGBT1-6

Exigence de la norme EN50160	Fréquence mesurée	Résultat
99,5% de la semaine : 49,50 Hz - 50,50 Hz	49.97 Hz – 50.02 Hz	PASSER
100% de la semaine : 47 Hz - 52 Hz	49.90 Hz – 50.07 Hz	PASSER

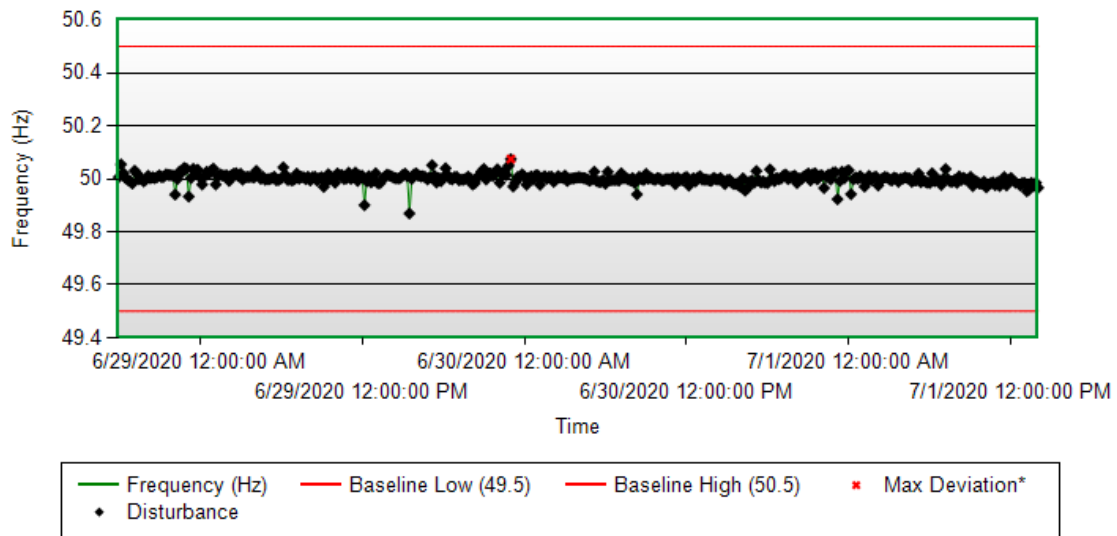


Figure 5.7 La variation de la fréquence pendant la semaine au niveau de TGBT1-6

Commentaire

On remarque (figure 5.7) que la fréquence au niveau de TGBT1-6 est aux alentours de 50 Hz avec un niveau quasi stable. Car le réseau est dans un point stable.

La qualité de la fréquence est conforme aux exigences de la norme EN50160 (tableau 5.1).

5.4.2.2 Variation de la tension d'alimentation

Tension nominale : 230.00V L-N / 400.00V L-L

Tableau 5.2 Les mesures de la tension d'alimentation pendant la semaine au niveau de TGBT1-6

Exigence de la norme EN50160	Mesuré la Tension L1	Mesuré la Tension L2	Mesuré la Tension L3	Résultat
95% de la semaine : 207V - 253V	236.31V – 242.24V	235.49V -241.45 V	235.75V – 241.64 V	PASSER
100% de la semaine : 195,5V - 253V	235.23V -242.94 V	233.74V -242.15 V	234.85V – 242.26V	PASSER

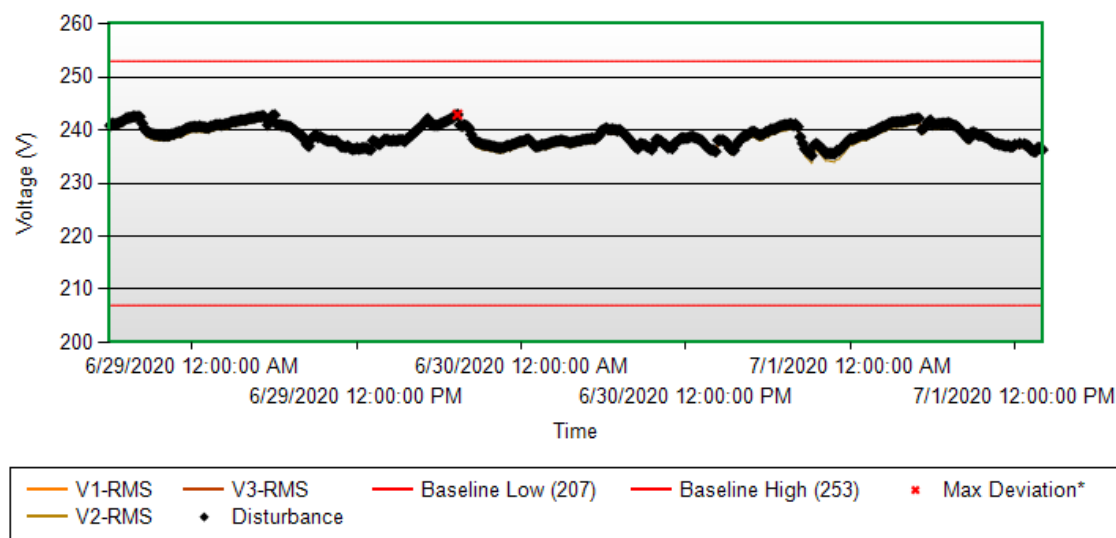


Figure 5.8 La variation de la tension pendant la semaine au niveau de TGBT1-6

Commentaire

On remarque que la tension d'alimentation au niveau de TGBT1-6 est d'environ 240 V avec un niveau de variation acceptable.

Il est clair sur la figure 5.8 que la tension prend des valeurs entre 207 V et 253 V, la condition de l'EN 50160 est donc satisfaite (tableau 5.2).

5.4.2.3 Harmoniques de tensions

Tableau 5.3 Les harmoniques de la tension V1

Harmoniques impaires								Harmoniques paires			
Non multiples de 3				Multiples de 3							
Ordre	EN50160 limite	95% valeurs	Résultat	Order h	EN50160 limite	95% valeurs	Résultat	Ordre h	EN50160 limite	95% valeurs	Résultat
H5	6.0%	1.15%	PASSER	H3	5.0%	0.22%	PASSER	H2	2.0%	0.18%	PASSER
H7	5.0%	1.43%	PASSER	H9	1.5%	0.08%	PASSER	H4	1.0%	0.11%	PASSER
H11	3.5%	1.93%	PASSER	H15	0.5%	0.08%	PASSER	H6	0.5%	0.02%	PASSER
H13	3.0%	1.03%	PASSER	H21	0.5%	0.07%	PASSER	H8	0.5%	0.21%	PASSER
H17	2.0%	0.10%	PASSER					H10	0.5%	0.08%	PASSER
H19	1.5%	0.15%	PASSER					H12	0.5%	0.02%	PASSER
H23	1.5%	0.47%	PASSER					H14	0.5%	0.13%	PASSER
H25	1.5%	0.13%	PASSER					H16	0.5%	0.1%	PASSER
								H18	0.5%	0.02%	PASSER
								H20	0.5%	0.13%	PASSER
								H22	0.5%	0.06%	PASSER

Tableau 5.4 Les harmoniques de la tension V2

Harmoniques impaires								Harmoniques paires			
Non multiples de 3				Multiples de 3							
Ordre	EN50160 limite	95% valeurs	Result	Ordre h	EN50160 limite	95% valeurs	Résultat	Ordre h	EN50160 limite	95% valeurs	Résultat
H5	6.0%	2.62%	PASSER	H3	5.0%	0.63%	PASSER	H2	2.0%	0.30%	PASSER
H7	5.0%	3.34%	PASSER	H9	1.5%	0.55%	PASSER	H4	1.0%	0.27%	PASSER
H11	3.5%	5.12%	ECHEC	H15	0.5%	0.16%	PASSER	H6	0.5%	0.07%	PASSER

H13	3.0%	2.41%	PASSER	H21	0.5%	0.11%	PASSER	H8	0.5%	0.54%	ECHEC
H17	2.0%	0.31%	PASSER					H10	0.5%	0.17%	PASSER
H19	1.5%	0.40%	PASSER					H12	0.5%	0.09%	PASSER
H23	1.5%	1.30%	PASSER					H14	0.5%	0.25%	PASSER
H25	1.5%	0.25%	PASSER					H16	0.5%	0.24%	PASSER
								H18	0.5%	0.03%	PASSER
								H20	0.5%	0.32%	PASSER
								H22	0.5%	0.13%	PASSER

Tableau 5.5 Les harmoniques de la tension V3

Harmoniques impaires								Harmoniques paires			
Non multiples de 3				Multiples de 3							
Ordre h	EN50160 limite	95% valeurs	Résultat	Order h	EN50160 limite	95% valeurs	Résultat	Ordre h	EN50160 limite	95% valeurs	Résultat
H5	6.0%	2.55%	PASSER	H3	5.0%	0.57%	PASSER	H2	2.0%	0.42%	PASSER
H7	5.0%	3.33%	PASSER	H9	1.5%	0.19%	PASSER	H4	1.0%	0.26%	PASSER
H11	3.5%	5.03%	ECHEC	H15	0.5%	0.11%	PASSER	H6	0.5%	0.06%	PASSER
H13	3.0%	2.42%	PASSER	H21	0.5%	NA		H8	0.5%	0.48%	PASSER
H17	2.0%	NA						H10	0.5%	0.14%	PASSER
H19	1.5%	NA						H12	0.5%	0.10%	PASSER
H23	1.5%	NA						H14	0.5%	0.33%	PASSER
H25	1.5%	NA						H16	0.5%	0.23%	PASSER
								H18	0.5%	NA	
								H20	0.5%	NA	
								H22	0.5%	NA	

Commentaire

Il y a un dépassement des limites de la norme EN50160 pour :

- la 8^e et la 11^e harmonique de la tension V₂ (tableau 5.4).
- la 11^e harmonique de la tension V₃ (tableau 5.5).

5.4.2.4 La conformité à la norme EN50160

Tableau 5.6 Les exigences de réussite et d'échec de la norme EN50160

Paramètre de qualité de l'énergie	Conformité EN50160	Remarques
Puissance Fréquence	PASSER	
Variations de la tension d'alimentation	PASSER	
Tensions harmoniques	ECHEC	L2 : H8 et H11 L3 : H11

Interprétation

On remarque (tableau 5.6) qu'il y a un dépassement des limites de la norme EN50160. Les UPS sont l'une des principales sources d'harmoniques dans toute installation, leur présence provoque l'augmentation de certains rangs harmoniques qui peuvent même conduire à dépasser les limites définies par les normes.

Dans ce cas, il est recommandé d'installer des filtres afin d'éliminer ces harmoniques.

5.4.3 Analyse des harmoniques du courant selon l'IEEE 519-2014

Conformément à la norme IEEE 519-2019, les limites de distorsion du courant ne doivent pas dépasser les valeurs indiquées dans le tableau 5.7.

Les directives IEEE 519-2014 au niveau du PCC sont les suivantes :

Tableau 5.7 Limites de distorsion du courant pour les systèmes de 120 V à 69 kV

I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Avec :

PCC : le point électriquement le plus proche d'une charge particulière, situé sur le réseau de distribution, auquel d'autres charges sont ou pourraient être raccordées. Selon la définition de la CEI.

I_{sc} =courant de court-circuit maximal au PCC.

I_L =courant de charge maximal au PCC.

Le rapport $\frac{I_{sc}}{I_L}$ pour l'installation électrique de l'ASAL est inférieur à 20.

Nous allons donc prendre les limites données dans la première ligne du tableau 5.7 pour les harmoniques impaires du courant. Pour les harmoniques paires, Les limites sont de 25% des limites données pour les harmoniques impaires.

La distorsion du courant mesurée pour chaque ordre harmonique est la suivante :

5.4.3.1 Les harmoniques de courant I_1

Tableau 5.8 Harmoniques impaires du courant I_1

$3 \leq h < 11$			$11 \leq h < 17$			$17 \leq h < 23$			$23 \leq h < 35$			$35 \leq h \leq 50$		
Limite: 4%			Limite: 2%			Limite: 1.5%			Limite: 0.6%			Limite: 0.3%		
H3	3.98%	PASSER	H11	20.60%	ECHEC	H17	0.81%	PASSER	H23	2.88%	ECHEC	H35	0.54%	ECHEC

H5	6.96%	ECHEC	H13	8.62%	ECHEC	H19	1.19%	PASSER	H25	0.74%	ECHEC	H37	1.27%	ECHEC
Û!H7	6.90%	ECHEC	H15	0.79%	PASSER	H21	0.44%	PASSER	H27	0.3%	PASSER	H39	0.17%	PASSER
H9	1.11%	PASSER							H29	0.27%	PASSER	H41	NA	
									H31	0.88%	ECHEC	H43	NA	
									H33	0.34%	PASSER	H45	NA	
												H47	NA	
												H49	NA	

Tableau 5.9 Harmoniques paires du courant I1

$2 \leq h < 11$			$11 \leq h < 17$			$17 \leq h < 23$			$23 \leq h < 35$			$35 \leq h \leq 50$		
Limite: 1%			Limite: 0.5%			Limite: 0.375%			Limite: 0.15%			Limite: 0.075%		
H2	12.27%	ECHEC	H12	0.23%	PASSER	H18	0.13%	PASSER	H24	NA		H36	NA	
H4	3.39%	ECHEC	H14	1.39%	ECHEC	H20	0.98%	ECHEC	H26	NA		H38	NA	
H6	0.47%	PASSER	H16	NA		H22	0.38%	ECHEC	H28	NA		H40	NA	
H8	3.58%	ECHEC							H30	NA		H42	NA	
H10	1.26%	ECHEC							H32	NA		H44	NA	
									H34	NA		H46	NA	
												H48	NA	
												H50	NA	

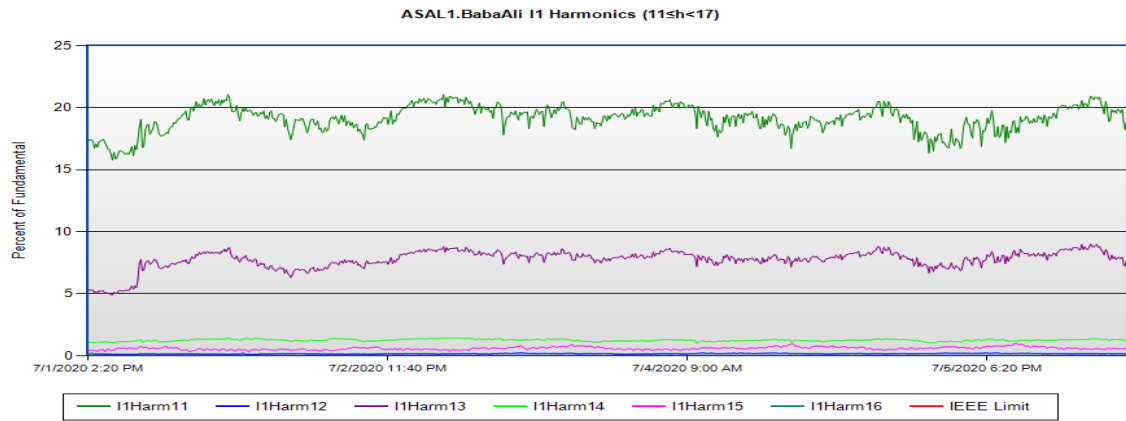


Figure 5.9 La variation des harmoniques de courant I1 en fonction du temps (rang 11-16)

5.4.3.2 Les harmoniques de courant I₂

Tableau 5.10 Les harmoniques impaires du courant I₂

3 ≤ h < 11			11 ≤ h < 17			17 ≤ h < 23			23 ≤ h < 35			35 ≤ h ≤ 50		
Limite: 4%			Limite: 2%			Limite: 1.5%			Limite: 0.6%			Limite: 0.3%		
H3	2.49%	PASSER	H11	22.89%	ECHEC	H17	1.08%	PASSER	H23	3.38%	ECHEC	H35	0.53%	ECHEC
H5	8.11%	ECHEC	H13	8.59%	ECHEC	H19	1.24%	PASSER	H25	0.58%	PASSER	H37	1.24%	ECHEC
H7	5.90%	ECHEC	H15	0.54%	PASSER	H21	0.26%	PASSER	H27	0.15%	PASSER	H39	0.19%	PASSER
H9	1.35%	PASSER							H29	0.4%	PASSER	H41	NA	
									H31	1.01%	ECHEC	H43	NA	
									H33	0.25%	PASSER	H45	NA	
												H47	NA	
												H49	NA	

Tableau 5.11 Les harmoniques paires du courant I₂

2 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h ≤ 50
Limite: 1%	Limite: 0.5%	Limite: 0.375%	Limite: 0.15%	Limite: 0.075%

H2	8.06%	ECHEC	H12	0.45%	PASSER	H18	0.08%	PASSER	H24	NA		H36	NA	
H4	3.43%	ECHEC	H14	1.1%	ECHEC	H20	1%	ECHEC	H26	NA		H38	NA	
H6	0.64%	PASSER	H16	0.91%	ECHEC	H22	0.34%	PASSER	H28	NA		H40	NA	
H8	4.05%	ECHEC							H30	NA		H42	NA	
H10	0.99%	PASSER							H32	NA		H44	NA	
									H34	NA		H46	NA	
												H48	NA	
												H50	NA	

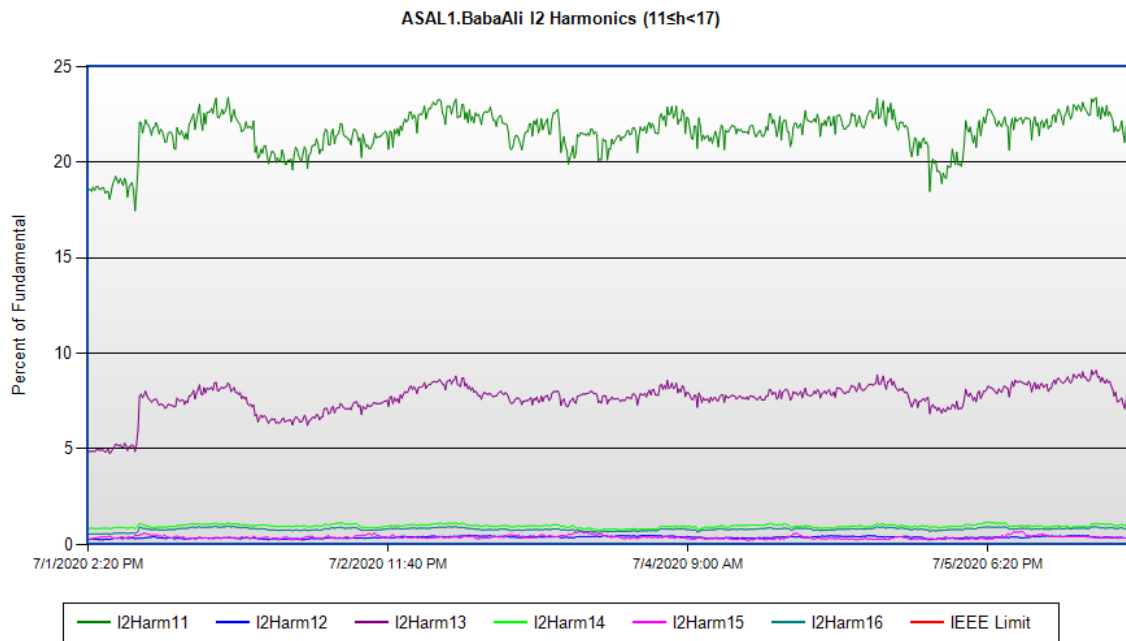


Figure 5.10 La variation des harmoniques du courant I2 en fonction du temps (rang 11-16)

5.4.3.3 Les harmoniques de courant I3

Tableau 5.12 Les harmoniques impaires de courant I3

$3 \leq h < 11$			$11 \leq h < 17$			$17 \leq h < 23$			$23 \leq h < 35$			$35 \leq h \leq 50$		
Limite: 4%			Limite: 2%			Limite: 1.5%			Limite: 0.6%			Limite: 0.3%		
H3	2.17%	PASSER	H11	24.67%	ECHEC	H17	1.14%	PASSER	H23	3.37%	ECHEC	H35	0.54%	ECHEC

H5	9.25%	ECHEC	H13	9.41%	ECHEC	H19	1.37%	PASSER	H25	0.96%	ECHEC	H37	1.38%	ECHEC
H7	5.55%	ECHEC	H15	0.52%	PASSER	H21	0.33%	PASSER	H27	0.26%	PASSER	H39	0.28%	PASSER
H9	1.90%	PASSER							H29	0.44%	PASSER	H41	NA	
									H31	1.08%	ECHEC	H43	NA	
									H33	0.36%	PASSER	H45	NA	
												H47	NA	
												H49	NA	

Tableau 5.13 Les harmoniques paires de courant I3

$2 \leq h < 11$			$11 \leq h < 17$			$17 \leq h < 23$			$23 \leq h < 35$			$35 \leq h \leq 50$		
Limite: 1%			Limite: 0.5%			Limite: 0.375%			Limite: 0.15%			Limite: 0.075%		
H2	12.11%	ECHEC	H12	0.51%	ECHEC	H18	0.14%	PASSER	H24	NA		H36	NA	
H4	3.24%	ECHEC	H14	1.5%	ECHEC	H20	1.01%	ECHEC	H26	NA		H38	NA	
H6	0.67%	PASSER	H16	0.96%	ECHEC	H22	0.53%	ECHEC	H28	NA		H40	NA	
H8	3.85%	ECHEC							H30	NA		H42	NA	
H10	0.95%	PASSER							H32	NA		H44	NA	
									H34	NA		H46	NA	
												H48	NA	
												H50	NA	

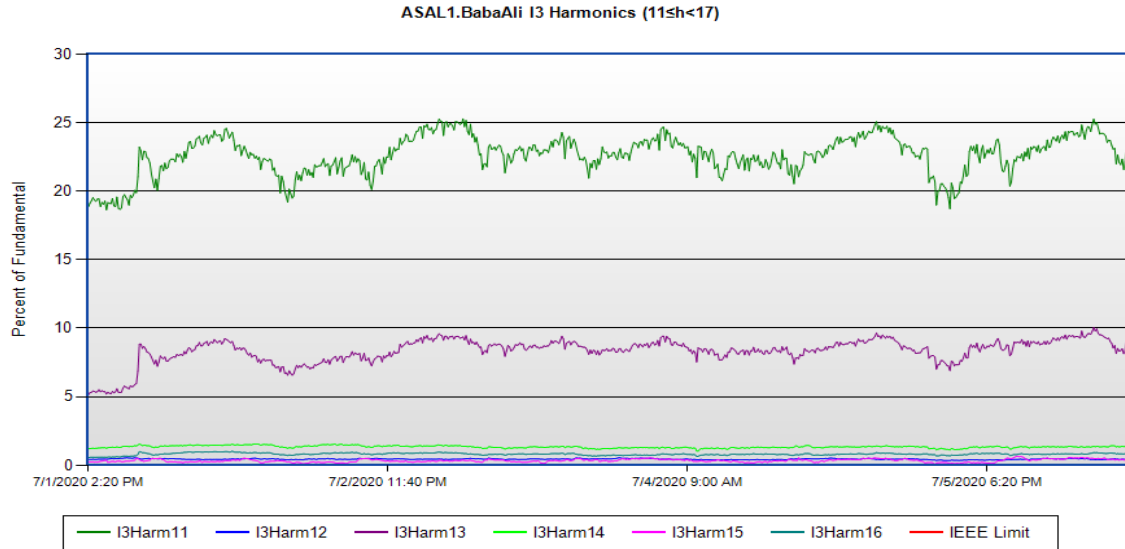


Figure 5.11 La variation des harmoniques du courant I3 en fonction du temps (rang 11-16)

Commentaires

D'après les tableaux (5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13) et les figures (5.9, 5.10 et 5.11) au-dessus, on remarque qu'il y a beaucoup de dépassements des limites données par la norme IEE519-2014.

Ce qui signifie que le courant est déformé. Cependant, les tests selon l'EN50160 ont montrés que la qualité d'énergie fournit par SONELGAZ est de niveau acceptable.

Ceci revient à la nature des charges (non linéaires) se trouvant au niveau de l'installation, qui absorbent des courants non sinusoïdaux alors que la tension fournie est sinusoïdale.

Conclusion

La solution du problème passe par le filtrage des harmoniques.

On va utiliser des filtres actifs qui vont permettre de:

- résoudre le problème avec des coûts raisonnables et facilement amortissables par l'économie en matière de pertes,
- Augmentation de la durée de vie de certains équipements des installations et optimisation de l'infrastructure de distribution (câbles canalisations, transformateurs,...).

5.5 Dimensionnement du filtre actif

Certains des problèmes de perturbations qui ont été constatés précédemment au niveau de L'ASAL peuvent être mitigés et corrigés au moyen de filtres actifs. Les filtres actifs sont la solution idéale pour des installations avec une grande quantité de charges monophasées et triphasées, qui seraient génératrices d'harmoniques et avec différents régimes de consommation.

Les filtres actifs sont des équipements basés sur des convertisseurs avec une modulation de largeur d'impulsion PWM. Deux types peuvent être distingués : Filtres en série et filtres en parallèle figure 5.12.

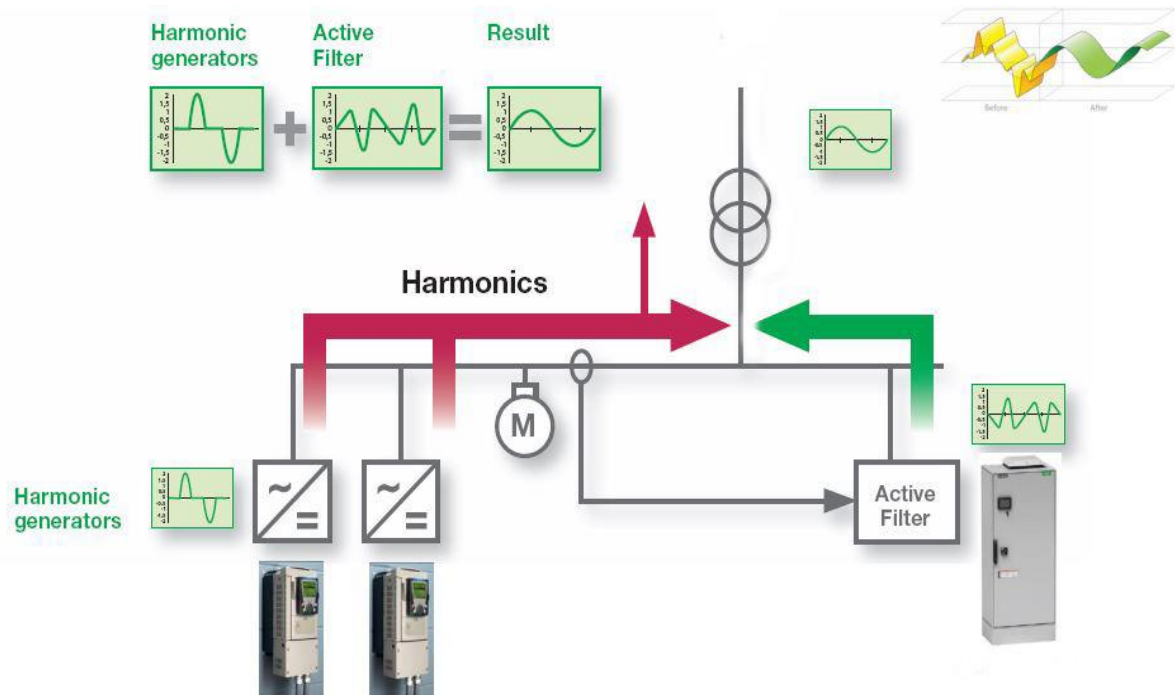


Figure 5.12 L'architecture pour la résolution du problème des harmoniques

Habituellement, pour respecter les normes **IEC-61000-3.4** et **IEEE-519**, des filtres en parallèle sont employés. Le principe de fonctionnement de ces filtres consiste en l'injection au réseau, à travers un onduleur, d'harmoniques qui ont la même amplitude que les harmoniques consommées par les charges mais qui sont de phase opposée.

Ce principe de fonctionnement est illustré sur la figure 5.12 en montrant les courants de charge, de filtre et de réseau. On observe que de la somme de $I_{CHARGE} + I_{FILTRE}$ on obtient un courant I_{RED} qui est sinusoïdal.



Figure 5.13 Principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle

Pour trouver le filtre adapté au problème qui se trouve dans L'ASAL on doit suivre ce processus :

- D'abord on détermine la valeur efficace et fondamentale du courant et du THD_i.
- On fixe la valeur de THD target : c'est le THD qu'on veut avoir après l'installation du filtre.
- On détermine les valeurs des courants harmoniques.
- La différence de valeur entre les deux courants harmoniques permet de définir le filtre adapté.

Nous avons :

$$I_{RMS} = 800A$$

En prenant X comme courant de fréquence fondamentale

$$I_{RMS} = (\sqrt{1^2 + THD_i^2}) * X$$

$$THD_i = 20\%$$

Alors :

$$X = 784.46A$$

Calcul du courant harmonique au niveau de l'installation:

I_h : courant harmonique

$$I_{RMS} = \sqrt{X^2 + I_h^2}$$

$$I_h = 156.91A$$

Calcul du courant harmonique souhaité :

Si on choisit un THD_i de 10% (Une valeur appropriée pour satisfaire les services d'alimentation électrique), on obtient :

$$I_{RMS2} = \sqrt{X^2 + (0.1 * X)^2}$$

$$I_{RMS2} = 788.372542974 A$$

$$I_{RMS2} = \sqrt{X^2 + I_{h2}^2}$$

$$I_{h2} = 78.44 A$$

Ainsi - Pour réduire le % THDi au niveau de l'onduleur de **20% à 10%**,

Il faut injecter un courant de **78.44 A**.

Alors, le filtre le plus adapté au TGBT1-6 (figure 5.13) est le filtre de I=120 A:



Figure 5.14 Filtre actif d'harmoniques - 120 A 380..480 V CA -Boîtier IP31 installé pour TGBT 1-6

5.6 Deuxième audit (audit de vérification)

5.6.1 Les paramètres de TGBT1-6 après l'installation du filtre

- Puissance active et réactive :

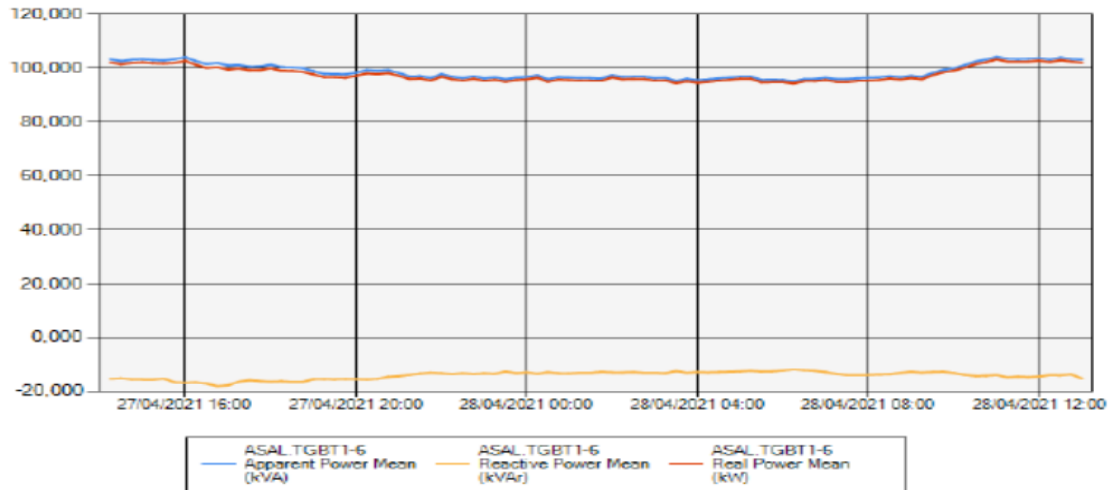


Figure 5.15 La consommation de la puissance active et réactive de TGBT1-6 en fonction du temps

Interprétation

On remarque que la puissance totale consommée est d'environ 100 KVA (figure 5.14) avec un niveau de consommation quasi stable, sachant que le transformateur de puissance a une puissance nominale de 800 KVA, il est clair que le transformateur est faiblement chargé

(fonctionnement en sous-charge), le transformateur de puissance fonctionne à 12,5 % de sa pleine charge, ce qui n'est pas recommandé par les fabricants.

Dans ce cas, le pourcentage de perte d'énergie est élevé et peut réduire la durée de vie du transformateur. Il est alors conseillé d'utiliser un transformateur pour les deux TGBT afin d'obtenir un niveau acceptable (proche du taux recommandé de 80%).

- **Facteur de puissance :**

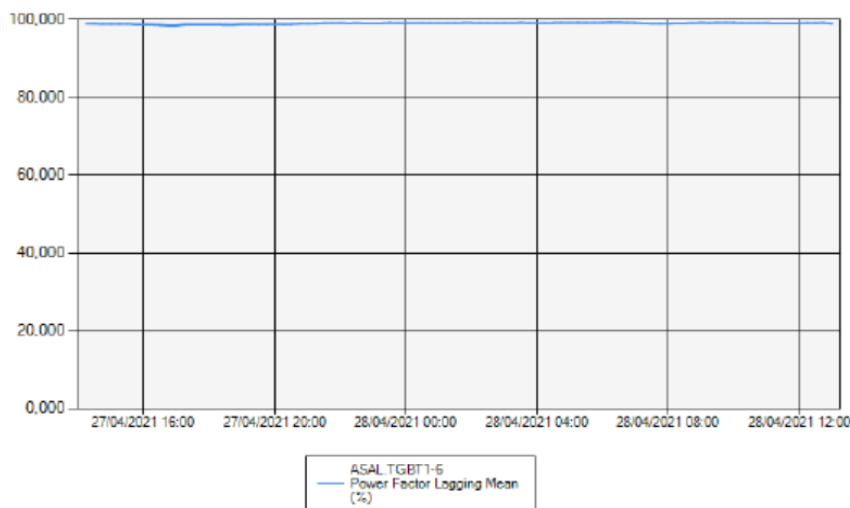


Figure 5.16 La variation du facteur de puissance de TGBT1-6 en fonction du temps

Interprétation

Sur la figure 5.15, on remarque que le facteur de puissance est proche de l'unité ; ceci est le résultat des équipements de compensation de la puissance réactive installés. Cette valeur peut changer lorsque la puissance totale augmente (dépend de la puissance).

5.6.2 Les harmoniques de tension

Tableau 5.14 Les harmoniques de tension V1

Harmoniques impairs											
Non multiples de 3				Multiples de 3				Harmoniques paires			
Orderh	EN50160 limit	95%	Resultat	Orderh	EN50160 Limite	95%	Resultat	Orderh	EN50160 limit	95%	Resultat
H5	6.0%	1.03%	PASSER	H3	5.0%	0.23%	PASSER	H2	2.0%	0.01%	PASSER
H7	5.0%	1.33%	PASSER	H9	1.5%	0.09%	PASSER	H4	1.0%	0.01%	PASSER
H11	3.5%	0.44%	PASSER	H15	0.5%	0.06%	PASSER	H6	0.5%	0.01%	PASSER
H13	3.0%	0.34%	PASSER	H21	0.5%	0.03%	PASSER	H8	0.5%	0.02%	PASSER
H17	2.0%	0.10%	PASSER					H10	0.5%	0.01%	PASSER
H19	1.5%	0.07%	PASSER					H12	0.5%	0.005%	PASSER
H23	1.5%	0.08%	PASSER					H14	0.5%	0.006%	PASSER
H25	1.5%	0.05%	PASSER					H16	0.5%	0.004%	PASSER
								H18	0.5%	0.006%	PASSER
								H20	0.5%	0.004%	PASSER
								H22	0.5%	0.01%	PASSER

Tableau 5.15 Les harmoniques de tension V2

Harmoniques impairs								Harmoniques paires			
Non multiples de 3				Multiples de 3							
Orderh	EN50160 limit	95%	Resultat	Orderh	EN50160 Limit	95%	Resultat	Orderh	EN50160 limit	95%	Resultat
H5	6.0%	2.15%	PASSER	H3	5.0%	0.89%	PASSER	H2	2.0%	0.04%	PASSER
H7	5.0%	2.93%	PASSER	H9	1.5%	0.17%	PASSER	H4	1.0%	0.03%	PASSER
H11	3.5%	1.10%	PASSER	H15	0.5%	0.17%	PASSER	H6	0.5%	0.04%	PASSER
H13	3.0%	0.77%	PASSER	H21	0.5%	0.09%	PASSER	H8	0.5%	0.04%	PASSER
H17	2.0%	0.16%	PASSER					H10	0.5%	0.01%	PASSER
H19	1.5%	0.08%	PASSER					H12	0.5%	0.01%	PASSER
H23	1.5%	0.17%	PASSER					H14	0.5%	0.01%	PASSER
H25	1.5%	0.08%	PASSER					H16	0.5%	0.01%	PASSER
								H18	0.5%	0.01%	PASSER
								H20	0.5%	0.01%	PASSER
								H22	0.5%	0.02%	PASSER

Tableau 5.16 Les harmoniques de tension V3

Harmoniques impairs								Harmoniques paires			
Non multiples de 3				Multiples de 3							
Orderh	EN50160 limit	95%	Resultat	Orderh	EN50160 Limit	95%	Resultat	Orderh	EN50160 limit	95%	Resultat
H5	6.0%	2.30%	PASSER	H3	5.0%	0.88%	PASSER	H2	2.0%	0.04%	PASSER
H7	5.0%	3.14%	PASSER	H9	1.5%	0.22%	PASSER	H4	1.0%	0.05%	PASSER
H11	3.5%	1.27%	PASSER	H15	0.5%	0.13%	PASSER	H6	0.5%	0.03%	PASSER
H13	3.0%	0.73%	PASSER	H21	0.5%	0.09%	PASSER	H8	0.5%	0.04%	PASSER
H17	2.0%	0.12%	PASSER					H10	0.5%	0.03%	PASSER
H19	1.5%	0.07%	PASSER					H12	0.5%	0.02%	PASSER
H23	1.5%	0.19%	PASSER					H14	0.5%	0.02%	PASSER
H25	1.5%	0.11%	PASSER					H16	0.5%	0.01%	PASSER
								H18	0.5%	0.01%	PASSER
								H20	0.5%	0.01%	PASSER
								H22	0.5%	0.02%	PASSER

Commentaire

On remarque (tableau 5.14, 5.15 et 5.16) qu'après l'installation du Filtre Actif, les rangs qui étaient élevés ont diminué. Il n'y a aucun dépassement des limites de la norme EN50160.

5.6.3 Analyse harmonique du courant selon la norme IEEE 519-2014 après l'installation filtre

5.6.3.1 Les harmoniques de courant I₁

Tableau 5.17 Les harmoniques impaires du courant I1

$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$
-----------------	------------------	------------------	------------------	---------------------

Limit: 4%			Limit: 2%			Limit: 1.5%			Limit: 0.6%			Limit: 0.3%		
H3	0.55%	PASSER	H11	0.19%	PASSER	H17	0.06%	PASSER	H23	0.11%	PASSER	H35	0.38%	ÉCHEC
H5	3.13%	PASSER	H13	0.44%	PASSER	H19	0.13%	PASSER	H25	0.11%	PASSER	H37	0.65%	ÉCHEC
H7	1.90%	PASSER	H15	0.07%	PASSER	H21	0.06%	PASSER	H27	0.08%	PASSER	H39	0.11%	PASSER
H9	0.17%	PASSER							H29	0.14%	PASSER	H41	NA	
									H31	0.49%	PASSER	H43	NA	
									H33	0.08%	PASSER	H45	NA	
												H47	NA	
												H49	NA	

Tableau 5.18 Les harmoniques paires du courant I1

$2 \leq h < 11$			$11 \leq h < 17$			$17 \leq h < 23$			$23 \leq h < 35$			$35 \leq h \leq 50$		
Limit: 2.5%			Limit: 1.12%			Limit: 1%			Limit: 0.37%			Limit: 0.17%		
H2	0.53%	PASSER	H12	0.06%	PASSER	H18	0.04%	PASSER	H24	NA		H36		NA
H4	0.97%	PASSER	H14	0.09%	PASSER	H20	0.05%	PASSER	H26	NA		H38		NA
H6	0.09%	PASSER	H16	NA		H22	0.05%	PASSER	H28	NA		H40		NA
H8	0.15%	PASSER							H30	NA		H42		NA
H10	0.09%	PASSER							H32	NA		H44		NA
									H34	NA		H46		NA
												H48		NA
												H50		NA

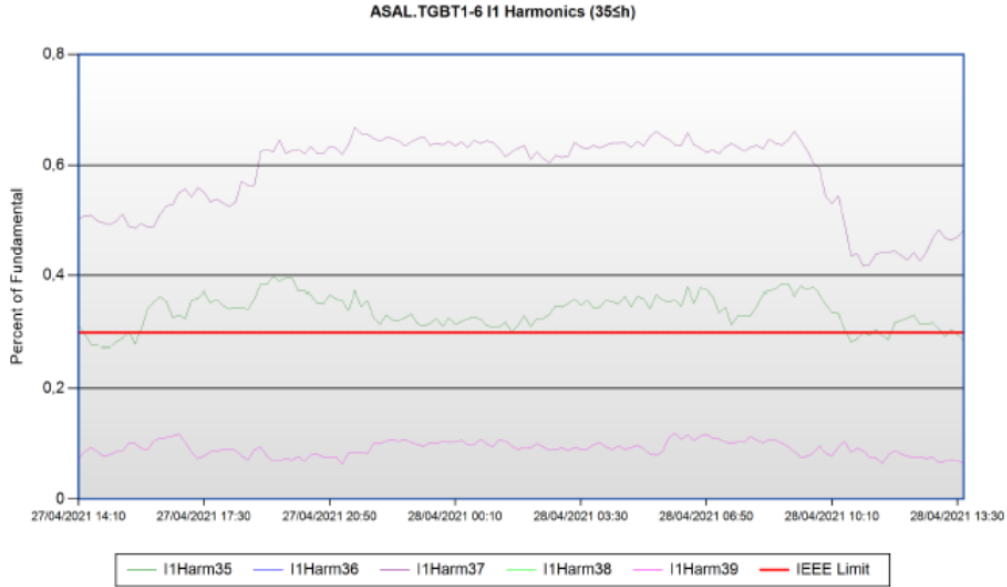


Figure 5.17 La variation des harmoniques de courant I1 en fonction du temps (rang 35-39)

5.6.3.2 Les harmoniques de courant I₂

Tableau 5.19 Les harmoniques impaires du courant I₂

$3 \leq h < 11$			$11 \leq h < 17$			$17 \leq h < 23$			$23 \leq h < 35$			$35 \leq h \leq 50$		
Limit: 4%			Limit: 2%			Limit: 1.5%			Limit: 0.6%			Limit: 0.3%		
H3	1.43%	PASSER	H11	0.97%	PASSER	H17	0.06%	PASSER	H23	0.08%	PASSER	H35	0.31%	PASSER
H5	2.78%	PASSER	H13	0.41%	PASSER	H19	0.10%	PASSER	H25	0.10%	PASSER	H37	0.63%	ÉCHEC
H7	1.55%	PASSER	H15	0.08%	PASSER	H21	0.05%	PASSER	H27	0.17%	PASSER	H39	0.16%	PASSER
H9	0.10%	PASSER							H29	0.20%	PASSER	H41	NA	
									H31	0.55%	PASSER	H43	NA	
									H33	0.13%	PASSER	H45	NA	
												H47	NA	
												H49	NA	

Tableau 5.20 Les harmoniques paires du courant I2

2 ≤ h < 11			11 ≤ h < 17			17 ≤ h < 23			23 ≤ h < 35			35 ≤ h ≤ 50		
Limit: 2.5%			Limit: 1.12%			Limit: 1%			Limit: 0.37%			Limit: 0.17%		
H2	0.48%	PASSER	H12	0.08%	PASSER	H18	0.05%	PASSER	H24	NA		H36	NA	
H4	0.72%	PASSER	H14	0.09%	PASSER	H20	0.04%	PASSER	H26	NA		H38	NA	
H6	0.09%	PASSER	H16	0.09%	PASSER	H22	0.08%	PASSER	H28	NA		H40	NA	
H8	0.11%	PASSER							H30	NA		H42	NA	
H10	0.06%	PASSER							H32	NA		H44	NA	
									H34	NA		H46	NA	
												H48	NA	
												H50	NA	

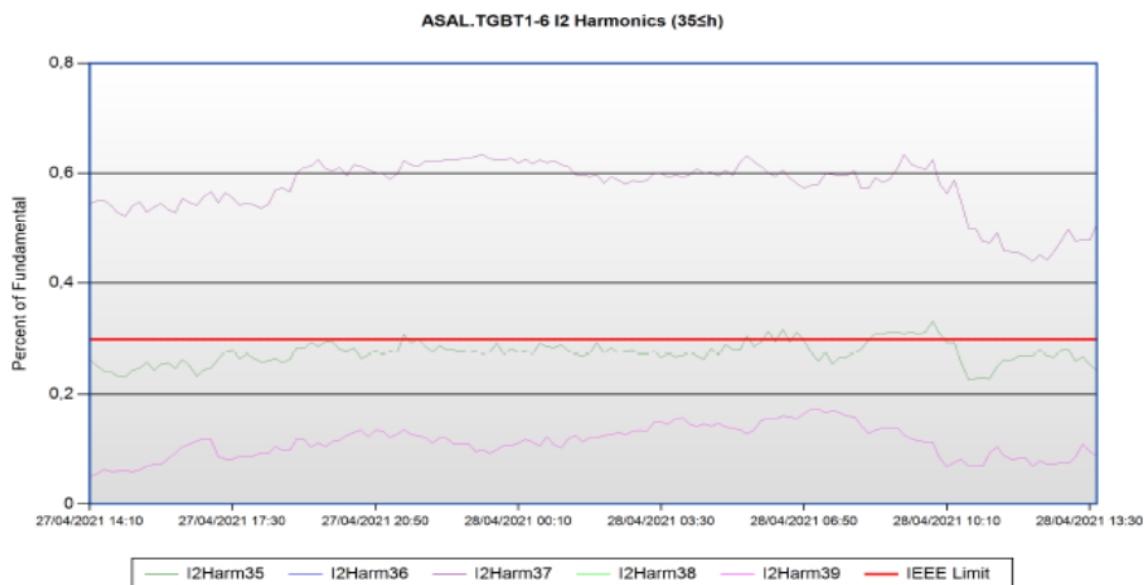


Figure 5.18 La variation des harmoniques de courant I2 en fonction du temps (rang 35-39)

5.6.3.3 Les harmoniques de courant I3

Tableau 5.21 Les harmoniques impaires du courant I3

3 ≤ h < 11			11 ≤ h < 17			17 ≤ h < 23			23 ≤ h < 35			35 ≤ h ≤ 50		
Limit: 4%			Limit: 2%			Limit: 1.5%			Limit: 0.6%			Limit: 0.3%		
H3	1.10%	PASSER	H11	0.98%	PASSER	H17	0.10%	PASSER	H23	0.11%	PASSER	H35	0.34%	ÉCHEC
H5	3.06%	PASSER	H13	0.37%	PASSER	H19	0.07%	PASSER	H25	0.11%	PASSER	H37	0.56%	ÉCHEC
H7	1.86%	PASSER	H15	0.06%	PASSER	H21	0.04%	PASSER	H27	0.12%	PASSER	H39	0.07%	PASSER
H9	0.07%	PASSER							H29	0.13%	PASSER	H41	NA	
									H31	0.55%	PASSER	H43	NA	
									H33	0.07%	PASSER	H45	NA	
												H47	NA	
												H49	NA	

Tableau 5.22 Les harmoniques paires du courant I3

2 ≤ h < 11			11 ≤ h < 17			17 ≤ h < 23			23 ≤ h < 35			35 ≤ h ≤ 50		
Limit: 2.5%			Limit: 1.12%			Limit: 1%			Limit: 0.37%			Limit: 0.17%		
H2	0.38%	PASSER	H12	0.07%	PASSER	H18	0.05%	PASSER	H24	NA		H36	NA	
H4	0.95%	PASSER	H14	0.07%	PASSER	H20	0.05%	PASSER	H26	NA		H38	NA	
H6	0.10%	PASSER	H16	0.06%	PASSER	H22	0.06%	PASSER	H28	NA		H40	NA	
H8	0.15%	PASSER							H30	NA		H42	NA	
H10	0.06%	PASSER							H32	NA		H44	NA	
									H34	NA		H46	NA	
												H48	NA	
												H50	NA	

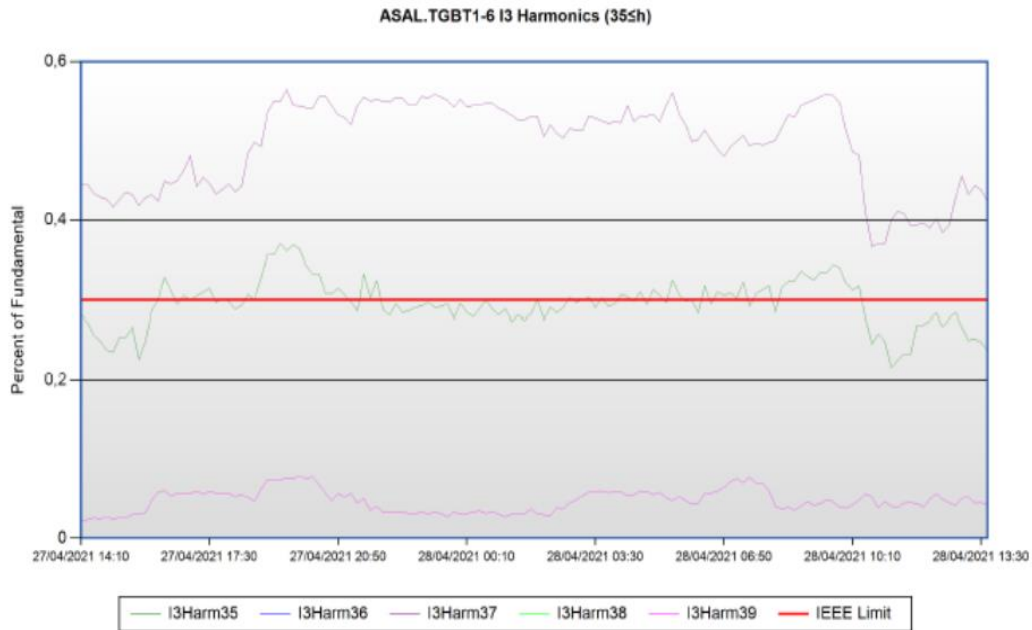


Figure 5.19 La variation des harmoniques de courant I3 en fonction du temps (rang 35-39)

Interprétation

On remarque d'après les tableaux (5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21 et 5.22) et les figures (5.16, 5.17, 5.18) au-dessus, que les valeurs des harmoniques ont diminué en dessous des limites permises par la norme IEEE519 pour le courant. Après l'installation du filtre.

Il y a un dépassement des limites données par la norme IEE519-2010, uniquement pour la 35^e et la 37^e harmonique. Ceci est dû au fait que la configuration du filtre qu'on a utilisé ne filtre pas les harmoniques d'ordre supérieur à 25.

5.7 Comparaison entre les résultats des deux audits

5.7.1 Les spectres harmoniques

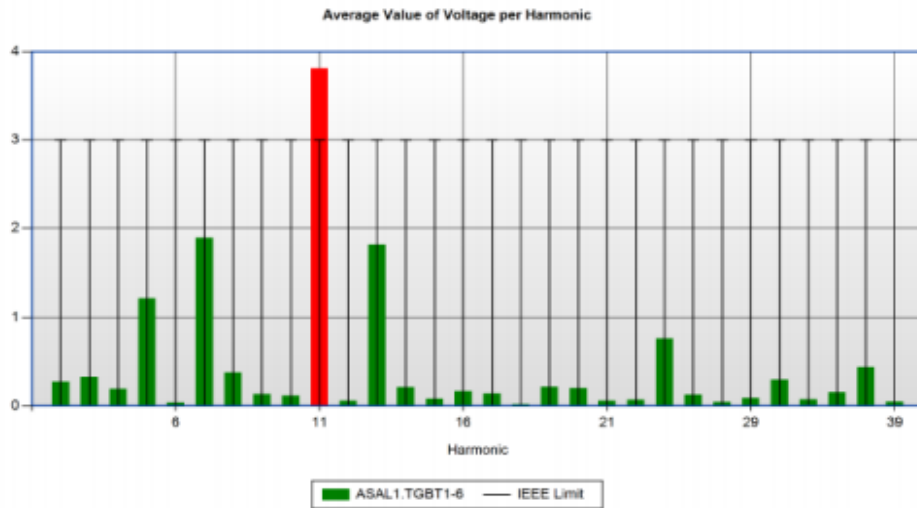


Figure 5.20 Spectre harmonique de tension avant l’installation du filtre

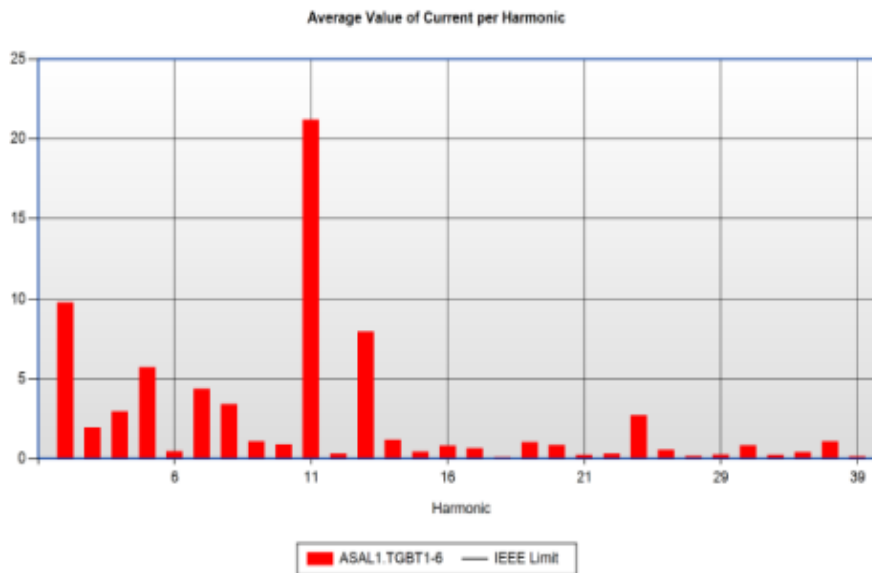


Figure 5.21 Spectre harmonique de courant avant l’installation du filtre

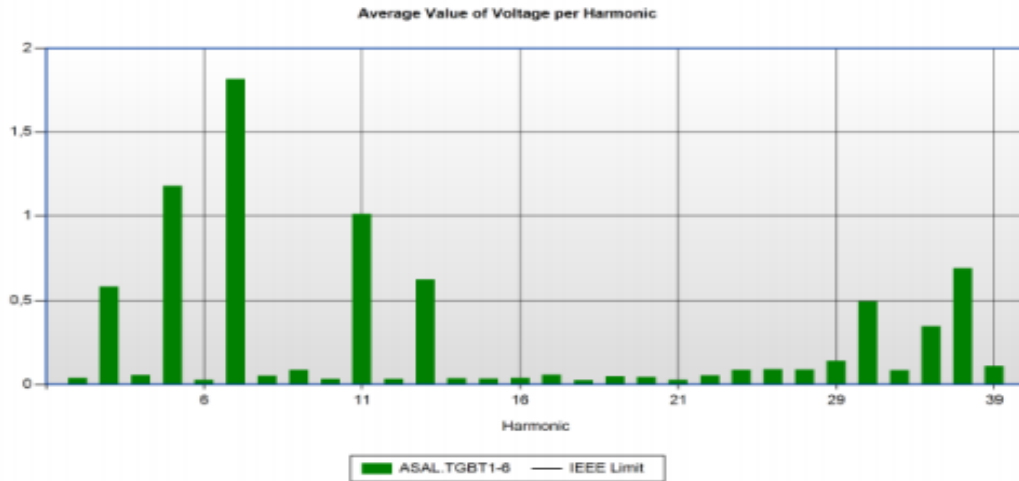


Figure 5.22 Spectre harmonique de tension IGBT 1-6 après l’installation du filtre

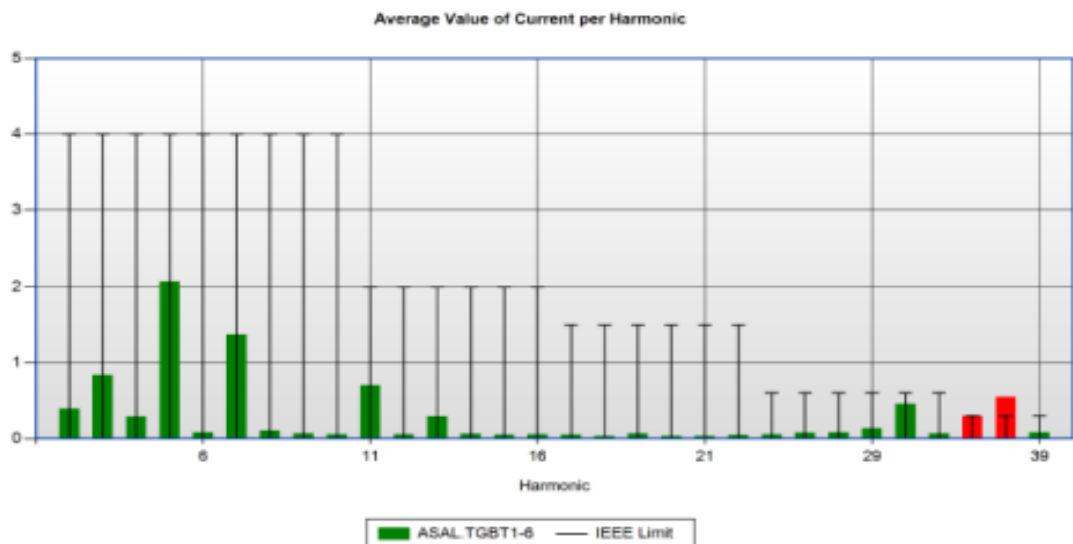


Figure 5.23 Spectre harmonique de courant IGBT 1-6 après l’installation du filtre

Interprétations

On remarque qu’après l’installation du Filtre Actif (figures 5.21 et 5.22), les valeurs des harmoniques ont diminué en dessous des limites permises par la norme IEEE519 pour le courant.

On remarque que les rangs d'harmoniques 35e et du 37e qui restent au-dessus des limites en raison de la configuration utilisée dans le filtre qui ne prend pas en considération les rangs supérieurs au 25ème rang.

5.7.2 La forme d'onde des courants

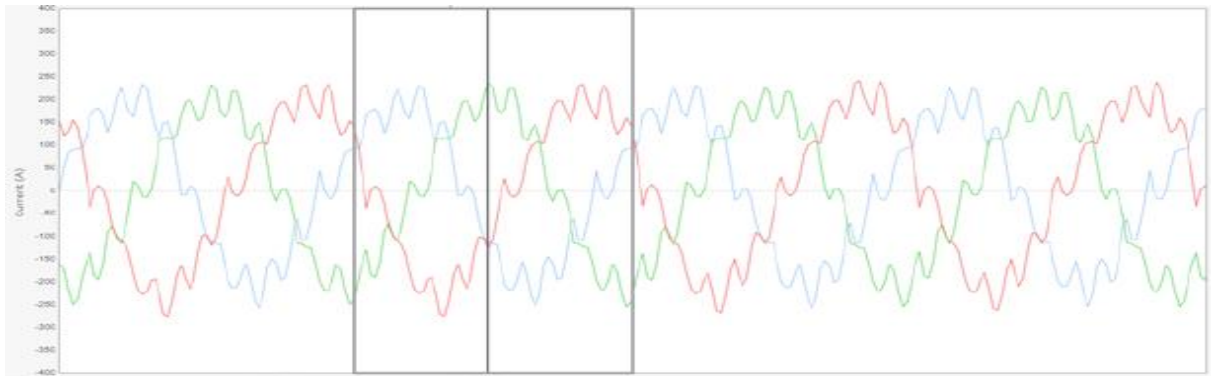


Figure 5.24 La forme d'onde des courants de TGBT1-6 avant l'installation du filtre

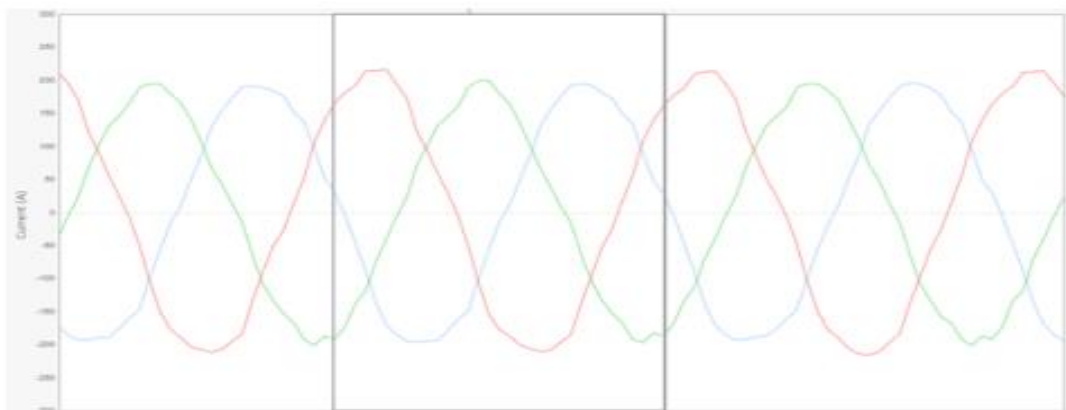


Figure 5.25 La forme d'onde des courants d'IGBT 1-6 après l'installation du filtre

Commentaire

On remarque que la forme d'onde avant l'installation du filtre (figure 5.23) est fortement déformée en raison des valeurs harmoniques élevées.

L'effet de la diminution des valeurs harmoniques est clairement illustré dans la figure 5.24, où la forme sinusoïdale est clairement visible.

La comparaison entre la forme d'onde des courants avant et après l'installation représente une forte preuve de l'impact positif de l'installation du filtre harmonique et de sa capacité à compenser les valeurs harmoniques présentées.

5.8 Conclusion

L'apparition des effets comme la surchauffe et les déclenchements répétitifs des disjoncteurs au niveau de l'ASAL a indiqué la dégradation de la qualité de l'énergie électrique. Cette dégradation peut résulter de la dégradation de la qualité de la tension ou celle du courant.

La dégradation de la qualité de l'énergie électrique peut causer des pertes additionnelles significatives ou un surdimensionnement des installations.

Pour identifier les origines du problème un premier audit énergétique a été réalisé. Les résultats ont démontré que c'est la présence d'un taux important d'harmoniques au niveau de l'ASAL qui a causé les problèmes de qualité.

Vu les effets néfastes des harmoniques, le filtrage actif a été proposé comme solution pour les diminuer.

Nous avons effectué un deuxième audit énergétique afin de vérifier l'efficacité de la solution proposée et la valider. Les résultats du deuxième audit ont montré l'impact positif de l'installation du filtre d'harmonique et de sa capacité à compenser les valeurs harmoniques présentées.

Conclusion générale

L'électricité est devenu un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance, de gestion de sites tertiaires ou industriels ainsi que pour les constructeurs d'équipements.

Nous nous sommes confrontés, dans ce travail, à des problèmes majeurs affectant la qualité de l'énergie électrique, à savoir l'analyse des problèmes de perturbations électromagnétiques et de la pollution harmonique au sein de l'Agence Spatial Algérienne.

Dans un premier temps, nous nous sommes familiarisés avec la notion de la qualité de l'énergie, nous avons essayé de connaître l'origine de l'intérêt qui lui est porté, les différents phénomènes qui l'influençaient et les normes qui la régissaient. Ceci nous a permis de voir l'importance du maintien d'une bonne qualité d'énergie, particulièrement dans le secteur industriel. Ça nous a aussi permis de constater que la qualité de l'énergie dépend à la fois de la qualité de la tension qui provient du fournisseur et des charges qu'utilise l'utilisateur. Et c'est pourquoi nous sommes passés à l'étape suivante, où nous avons cherché à comprendre les perturbations électromagnétiques qui influençaient principalement la qualité de la tension d'alimentation et par conséquent la qualité de l'énergie électrique. Dans cette étape, nous avons tenté de définir et illustrer les perturbations de la qualité de l'alimentation électrique telles que présentées dans la norme EN50160, puis nous avons examiné leurs conséquences sur les installations électriques, puis nous avons entrepris les solutions existantes pour protéger les installations contre ces perturbations.

Le partie suivante a été consacré aux harmoniques, puisque c'est la problématique que nous avons rencontré au niveau de l'ASAL et puisque leur présence peut entraîner des effets néfastes résultants de l'augmentation de la valeur du courant efficace. Nos recherches sur le sujet, nous ont permis de voir que les harmoniques ont deux origines : le fournisseur (harmoniques de tension) ou l'utilisateur (harmoniques de courant), et qu'elles sont principalement caractérisé par le THD, le TDD ainsi que par leur rang. Les recherches que nous avons effectuées nous ont aussi permis de connaître que la présence des harmoniques dans les installations électriques est limitée par des taux donnés par la norme IEEE 519. Si ces limites sont dépassées la solution est la mise en place de filtre. Plusieurs types de filtres sont réalisables, tout dépend du réseau établi, fixe ou variable et aussi du but à atteindre. Dans notre cas, un filtre actif a été installé.

Ce travail nous a permis également de nous initier aux audits énergétiques, compte tenu du fait que l'évaluation de la qualité de l'énergie et de son amélioration au sein de la sous station de l'ASAL a été réalisée à travers des audits énergétiques. Nous avons commencé par l'analyse des résultats du premier audit énergétique, qui a eu lieu après l'observation de plusieurs phénomènes qui perturbaient le fonctionnement de la sous-station. Ceci nous a permis de réaliser, comme il a été cité plus haut, que les taux des harmoniques de courant dépassaient les taux donnés par l'IEEE 519, et nous avons pu grâce à cette analyse de vérifier que la qualité de la tension était acceptable selon la norme EN50160. La solution proposée pour le problème rencontré a été la conception d'un filtre actif parallèle que nous avons pu dimensionner et comprendre le fonctionnement. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons réalisé un deuxième audit énergétique pour voir l'impact du filtre sur la qualité de l'énergie. La comparaison entre les résultats des deux audits énergétiques nous a permis de confirmer l'impact positif de l'installation du filtre d'harmoniques et de sa capacité à compenser les taux d'harmoniques qui existait dans la sous-station.

En définitive, les objectifs de ce mémoire étaient de comprendre les perturbations électromagnétiques, particulièrement les harmoniques et de les analyser. Nous avons pu atteindre ces objectifs avec les recherches théoriques et l'application pratique de l'audit énergétique.

Liste des références

- [1] H. Sakkou, conception d'une compensatrice active multifonction corrigeant toutes les perturbations en tension générée par les champs non linéaires et les fours à arc, Mémoire de fin d'études, ETS Montréal, janvier 2007.
- [2] Ph. Ladoux, F. Richardeau, L. Raulin, Électronique de Puissance pour la qualité de l'énergie des réseaux de bord d'avion, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, Unité Mixte de Recherche INPT-ENSEEIH / CNRS, Volume 4, 2005.
- [3] V. Ignatova, Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique : Application aux creux de tension et à la pollution harmonique, thèse de Doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2006..pdf
- [4] A. Robert, Qualité de l'électricité dans le marché libéralisé, Séminaire organisé par le professeur Jean-Louis LILIE, Université de Liège, 8 décembre 2004.
- [5] S.Haddad, Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission, thèse de doctorat, faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Badji mokhtar Annaba, 2010.
- [6] A. De La Faire, un monde d'énergie, Rapport sur l'état de l'énergie dans le monde, la Stratégie Groupe d'ENGIE, avril 2019.
- [7] T.Deslandres, P.Maurras, les harmoniques sur les réseaux électriques, collection de la Direction Des Etudes et Recherche, Electricité de France ,1998
- [8] Y.Machefert-Tassin, La Commission électrotechnique internationale (CEI) et le Comité français (CEF). Normes et recommandations, 1948- 1988, Revue d'histoire des chemins de fer, 2003
- [9] EN 50160 Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution ,2010
- [10] G. T. Heydt, Electric Power Quality: A Tutorial Introduction, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 11, 1998, pp. 15 – 19.
- [11] B. Gattal, méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension, mémoire de magister, Université de Batna, mai 2012
- [12] M. A. Alali, Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension, thèse de doctorat, l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, septembre 2002
- [13] Y. Liu, J.G. Wang, W.J. Zhou, B. Ma, Lightning current withstand capacity and voltage limiting characteristics of TVS, Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, vol. 1-2, 2006, pp. 314-319.
- [14] M. A. Tahir, S. Zalouk, T. Zermani, Diagnostic d'un réseau électrique industriel en termes de perturbations harmoniques: Application à l'ENIEM, Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.
- [15] S. Kincic, X.T. Wan, D.T. McGillis, A. Chandra, F.D. Galiana, G. Joos, Voltage support by distributed static VAR systems, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 20, No. 2, 2005, pp. 1541- 1549.
- [16] A. Chandra, B. Singh, B.N. Singh, K. Al-Haddad, An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads; IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, mai 2000, pp. 495- 507.
- [17] IEEE STD 519-2014, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. – IEEE 519 working Group2014.
- [18] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli, Arc-Furnace Model for

- the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks; IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 4, Octobre 1994, pp. 2026- 2036.
- [19] O. Ozgun, A. Abur, Flicker Study Using a Novel Arc Furnace Model; IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 17, No. 4, Octobre 2002, pp. 1158- 1163.
- [20] M. D. Epanya, application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique, mémoire de fin d'étude, Université du Québec à Trois-Rivières, septembre 2010.
- [21] T. R. Bosela, Introduction to Electrical Power System Technology, New Jersey, Prentice Hall, 1997, pp. 458 462.
- [22] A. Baghini, Z. Hanzelka, Handbook of Power Quality, John Wiley and Sons Ltd. England 2008, pp. 187 236.
- [23] F. Bouacida, M. Zebiri, qualité de l'énergie électrique et la norme IEEE-519, Mémoire de fin d'études, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, juin 2009.
- [24] B.R. Lin, B.R. Yang, T.L. Hung, Implementation of a hybrid series active filter for harmonic current and voltage compensations, IEEE Power Electronics, Machines and Drives, International Conference (Conf. Publ. No. 487), 4-7 June 2002, pp. 598 603.
- [25] H. Fujita, T. Yamasaki, H. Akagi, A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems; IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 15, No. 2, March 2000, pp. 215 222.
- [26] A. Esfandiari, M. Parniani, H. Mokhtari, A new control strategy of shunt active filters for power quality improvement of highly and randomly varying loads; IEEE Ind. Electronics, Vol. 2, 4-7 May 2004, pp. 1297 -1302.
- [27] H. Akagi; Active harmonic filters; IEEE Proc., Vol 93, No 12, December 2005, pp. 2128 2141
- [28] G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Oliver; design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbances; IEEE Power Electronics Congress, CIEP 2000, 15-19 Oct. 2000, pp. 93 98.
- [29] H. Akagi, H. Fujita; A new power line conditioner for harmonic compensation in power systems, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No 3, July 1995, pp. 1570 1575.
- [30] D.O Koval, M.B Hughes, Frequency of Industrial and Commercial Voltage, Canadian National Power Quality Survey: IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 33, No. 3, MAY/JUNE 1997, pp. 622 627.
- [31] D. M. Mputu, Caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par les réseaux moyenne et basse tension; rapport n° 30012-01-02, Hydro-Québec, Février 2001.
- [32] Programme De Développement De L'efficacité Énergétique À L'horizon 2030, APRUE, 2015
- [33] Décret exécutif n° 05-495 relatif à l'audit énergétique des établissements grands consommateurs d'énergie, au 26 décembre 2005.
- [34] Annexe I, Les cahiers des charges définissant la méthodologie, le rapport d'audit et sa synthèse, Ministère de l'Énergie et des Mines.
- [35] Annexe II, Le guide méthodologique, Ministère de l'Énergie et des Mines.
- [36] B. Touhami, audit énergétique, conférence, centre universitaire Belhadj Bouchaib -Ain Temouchent, 2016.
- [37] Power Monitoring Expert, Schneider Electric, 2021.