

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.



UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI OUZOU.

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE.

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme

D'ingénieur d'état en électrotechnique

OPTION :

RESEAUX ELECTRIQUES

THEME

ETUDE ET CALCUL DES PERTES DE PUISSANCE DUES AUX HARMONIQUES DANS UN RESEAU ELECTRIQUE INDUSTRIEL

Proposé par :

M^r: S.RABAHALLAH

Etudié par :

M^r H.GHEMRAS

M^r H.DAHMANI

M^r K.BOUKHERCHOUFA

- Promotion 2008 -

Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements à notre promoteur Mr.S.RABAHALLAH pour l'assistant qui nous a témoigné tout au long de ce modeste travail, ces précieux commentaires et pour l'aide moral et matérielle qu'il nous a toujours prodigué.

Nous remercions aussi les membres du jury qui nous feront l'honneur d'examiner ce travail.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui nous ont apporté leurs aides de près ou de loin à réaliser ce modeste travail.

Sommaire

Introduction générale	1
<i>Chapitre I : Généralités sur les perturbations affectant la qualité de l'énergie électriques.</i>	
I.1- Introduction	3
I.2- Les différentes perturbations affectant la qualité d'énergie électrique.....	3
I.2.1- Creux de tensions et coupures.....	3
I.2.1.1- Définitions.....	3
I.2.1.2- Conséquences des creux de tensions.....	4
I.2.2-Variation et fluctuation de tension.....	7
I.2.2.1-Définitions	7
I.2.2.2-Conséquences des variations et fluctuations de tension	7
I.2.3-Surtensions.....	8
I.2.3.1-Définitions	8
I.2.3.2-Les surtensions temporaires.....	9
I.2.3.3-Les surtensions de manœuvre.....	9
I.2.3.4-Les surtensions atmosphériques.....	10
I.2.3.5-Conséquences des surtensions	10
I.2.4-Déséquilibre du système triphasé de tension (la non symétrie).....	10
I.2.4.1-Définitions	10
I.2.4.2- Les conséquences de déséquilibre de la tension.....	11
I.2.5-Harmoniques et inter harmoniques.....	11
I.2.5.1-Introduction.....	11
I.2.5.2-Définitions	12
I.2.5.3- Outil mathématique pour l'analyse des harmoniques	13
I.2.5.4-Origine des harmoniques.....	16
I.2.5.5-Les principales sources d'harmoniques.....	19
I.2.5.6-Les effets néfastes de la pollution harmonique	23
I.3-Conclusion	27
<i>Chapitre II : Pertes de puissance dans différents récepteurs.</i>	
II.1- Introduction	28
II.2-Les pertes de puissance dans les machines électriques.....	28
II.2.1- Les pertes de puissance dans les transformateurs.....	28
II.2.1.1- Les pertes en charges (pertes dans le cuivre).....	29
II.2.1.2- Les pertes à vide	29
II.2.1.2.1- Les pertes apparentes.....	29
II.2.1.2.2- Les pertes fer (pertes magnétiques).....	30
II.2.1.3-Les pertes auxiliaires.....	33
II.2.2- Les pertes dans les moteurs.....	33
II.2.2.1- Les pertes à vide	33
II.2.2.1.1-Les pertes fer.....	33
II.2.2.2- Les pertes en charge.....	34
II.2.2.2.1-Les pertes dans le cuivre(pertes Joule).....	34
II.2.2.2.2-Les pertes supplémentaires en charge.....	34
II.2.2.3-Les pertes mécaniques.....	35

II.2.3- Les pertes dans les câbles.....	35
II.2.4- Les pertes dans les condensateurs.....	35
II.2.5- Les pertes dans les redresseurs.....	38
II.3- Les pertes de puissance dues aux harmoniques.....	39
II.3.1- Les pertes de puissance dans les transformateurs.....	39
II.3.1.1- Les pertes Joule dans les enroulements	39
II.3.1.2- Les pertes fer dans le noyau.....	40
II.3.2 -Les pertes dans les moteurs.....	43
II.3.3- Les pertes dans les câbles.....	44
II.3.4- Les pertes dans les condensateurs.....	45
II.3.5- Les pertes dans les redresseurs.....	46
II.4-Conclusion.....	47

Chapitre III : Réglementation et remèdes

III.1- Introduction.....	48
III.2- Normes et réglementations	49
III.3- Stratégies de prévention des perturbations.....	51
III.3.1-Modification du mode de raccordement.....	51
III.3.2-Un bon choix des disjoncteurs	52
III.3.3-Le déclassement	52
III.3.4-Un bon choix des condensateurs de compensation de l'énergie réactive.....	52
III.3.4.1- Premières précautions	53
III.3.4.2- Eviter la résonance	54
III.3.5- Remplacement du réseau par une source alternative non perturbée	55
III.3.6- Compensation des perturbations provenant du réseau	56
III.3.7- Le surdimensionnement du conducteur du neutre.....	56
III.3.8- Confinement des harmoniques.....	56
III.3.8.1- Transformateurs étoile -zigzag Y_{Zn}	57
III.3.8.2- Transformateur triangle-étoile Δ_{yn}	58
III.4- Stratégies de minimisation des effets des perturbations	59
III.4.1- Inductance anti harmoniques de protection des condensateurs.....	60
III.4.2- Solution de filtrage.....	63
III.4.2.1-Le filtrage passif.....	63
III.4.2.1.1- Le shunt résonant.....	63
III.4.2.1.1.1-Principales caractéristiques d'un shunt résonant.....	64
III.4.2.1.2- Les filtres amortis.....	67
III.4.2.2- Le filtrage actif.....	72
III.4.2.3- Le filtrage hybride (mixte actif passif).....	73
III.5- Conclusion.....	74

Chapitre IV : Calcul les pertes de puissance dues aux harmoniques

IV.1- Introduction	75
IV.2- Application	75
IV.3- Présentation des données des éléments du réseau	78
IV.3.1-Les transformateurs	78
IV.3.2-Les câbles.....	78
IV.3.3- Le condensateur.....	79

IV.4- Calcul des courants dans les différents éléments.....	79
IV.4.1- Calcul des courants dans les transformateurs	79
IV.4.2-Calcul des courants dans les câbles.....	79
IV.4.3-Les données pour le condensateur	80
IV.5- Les pertes de puissance dans les différents éléments.....	80
IV.5.1- Dans les transformateurs	80
IV.5.2-Dans les câbles.....	80
IV.5.3-Dans le condensateur.....	80
IV.5.4-Les pertes totales dues aux harmoniques et au fondamental dans le réseau.....	81
IV.6-Tableau récapitulatif des résultats obtenus.....	81
IV.6.1-Discutions des résultats.....	84
IV.7-Interprétation des résultats.....	84
IV.8-Conclusion.....	85
IV.9- Conclusion générale	86

Introduction générale

Il arrive souvent que les tensions et les courants d'un réseau électrique n'aient pas une forme d'onde sinusoïdale, cette distorsion affecte la qualité d'énergie offerte par le fournisseur d'électricité. Elle affecte aussi les performances des équipements raccordés au réseau électrique, pour ces raisons, une connaissance des harmoniques et leurs effets devient nécessaire. Au cours de ces dernières années, l'abondance des charges non linéaires a engendré des pertes de puissance supplémentaires dans le réseau électrique.

Les pertes de puissance sont inévitables dans un réseau électrique ; les pertes par effet Joule dans le circuit électrique, les pertes fer dans le circuit magnétique et les pertes auxiliaires. Elles augmentent avec la charge puisqu'elles dépendent du courant, de la tension et de la fréquence. Ces dernières apparaissent directement dans la consommation d'énergie.

Notre travail porte sur l'étude et l'évaluation des pertes de puissance dues aux harmoniques générées par les différents récepteurs d'un réseau électrique industriel.

Dans le premier chapitre, seront présentés la théorie généralisée de la qualité de l'énergie électrique, l'origine des perturbations, leurs propagations, leurs effets, leurs caractérisations et d'autres aspects importants pour l'analyse de la qualité de l'énergie. L'ensemble de ces perturbations peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des pertes de puissance dans les éléments constituant un réseau électrique tels que les machines électriques, les câbles, les condensateurs ainsi que les redresseurs.

Dans le troisième chapitre, nous analyserons les différentes techniques d'amélioration de la qualité qui peuvent être utilisées pour minimiser les conséquences des perturbations agissant sur la forme d'onde et sur la valeur de la tension du réseau. En ce qui concerne la partie technique de l'étude, il est nécessaire d'identifier la nature des perturbations, leurs caractéristiques et leurs origines, pour ensuite pouvoir proposer différentes méthodes d'amélioration. Une fois constatée la nécessité d'améliorer la qualité de fourniture d'une charge ou d'un ensemble de charges données et identifiées les caractéristiques et la nature des perturbations qui provoquent sa dégradation, il faut choisir la technique d'amélioration à implanter.

En général, il y a deux types de stratégies possibles d'amélioration de la qualité d'énergie :

- Stratégies de prévention des perturbations.
- Stratégies de minimisation ou d'élimination des effets des perturbations par filtrage.

Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter un exemple d'application pour le quel nous allons évaluer les pertes de puissance dues aux harmoniques dans chaque élément du réseau industriel. L'évaluation des pertes se fera à l'aide d'un programme de calcul réalisé sous MATLAB basé sur le calcul théorique traité dans le même chapitre.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale.

I.1.Introduction

Les problèmes liés à la qualité de l'énergie électrique impliquent l'ensemble des partenaires, du distributeur d'énergie à l'utilisateur. Ces perturbations font l'objet d'une norme européenne EN 50160 élaborée par le CENELEC (comité européen de normalisation électrotechnique) et validé par la CEI (commission électrotechnique internationale) qui sont recensées et sont principalement les suivantes :

- creux de tension et coupures,
- fluctuations de tension,
- variations de la fréquence d'alimentation.
- surtensions,
- déséquilibres de tension,
- harmoniques, et inter harmoniques,

L'ensemble de ces perturbations peut être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension.

Plusieurs de ces caractéristiques sont souvent modifiées simultanément par une même perturbation. Elles peuvent aussi être classées selon leur caractère aléatoire (foudre, court-circuit, manœuvre...) permanent ou semi permanent.

I.2.Les différentes perturbations affectant la qualité d'énergie électrique

I.2.1.Creux de tensions et coupures [8]

I.2.1.1.Définitions

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension.
Il est caractérisé par :

- Sa profondeur (ΔU),
- Sa durée (ΔT).

La mesure d'un creux de tension s'effectue par la détermination de la valeur efficace de la tension toutes les demi périodes (avec recouvrement d'une demi période).

Une coupure brève est un cas particulier de creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90% et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes), alors que les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution.

Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencheurs, isolations de défaut).

On observe un plus grand nombre de creux de tension et de coupures sur les réseaux aériens que sur les réseaux souterrains du fait des intempéries (excepté, bien entendu, s'ils sont raccordés sur le même départ).

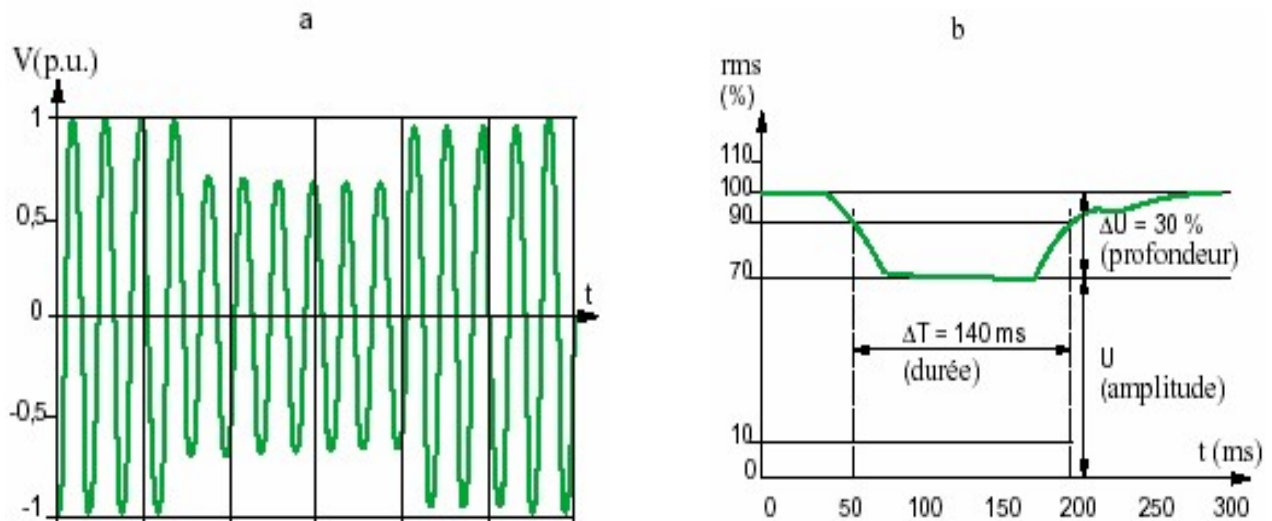


Figure I.1. Paramètres caractéristiques d'un creux de tension.

I.2.1.2. Conséquences des creux de tension

Les creux de tension et les coupures perturbent de nombreux appareils raccordés au réseau. Ils sont la cause la plus fréquente de problèmes de la qualité d'énergie. Un creux de tension ou une coupure de quelques centaines de millisecondes peut se traduire par des conséquences néfastes durant plusieurs heures. Les applications les plus sensibles sont :

- Les chaînes complètes de fabrication en continu dont le procédé ne tolère aucun arrêt temporaire d'un élément de la chaîne (imprimerie, sidérurgie, papeterie, pétrochimie...) ;
- Les éclairages et systèmes de sécurité (hôpitaux, balisage des aéroports, locaux recevant du public, immeubles de grande hauteur...) ;
- Les équipements informatiques (centres de traitement de données, banques, télécommunications...) ;
- Les auxiliaires essentiels de centrales.

Les paragraphes suivants passent en revue les principales conséquences des creux de tension et coupures sur les principaux équipements utilisés dans les secteurs industriels, tertiaires et domestiques.

a) Moteur asynchrone

Lors d'un creux de tension, le couple d'un moteur asynchrone (proportionnel au carré de la tension) diminue brutalement et provoque un ralentissement. Ce ralentissement est fonction de l'amplitude et de la durée du creux, de l'inertie des masses tournantes et de la caractéristique couple-vitesse de la charge entraînée. Si le couple que le moteur développe devient inférieur au couple résistant, le moteur s'arrête (décroche).

Après une coupure, le retour de la tension engendre un appel de courant de réaccélération proche du courant de démarrage et dont la durée dépend de la durée de la coupure.

Lorsque l'installation comporte de nombreux moteurs, leurs réaccélérations simultanées peuvent provoquer une chute de tension dans les impédances amont du réseau qui allonge la durée du creux et peut rendre la réaccélération difficile (redémarrages longs avec suréchauffement) voire impossible (couple moteur inférieur au couple résistant).

La réalimentation rapide (~150 ms) d'un moteur asynchrone en cours de ralentissement sans précaution peut conduire à un réenclenchement en opposition de phase entre la source et la tension résiduelle entretenue par les moteurs asynchrones. Dans ce cas la première crête du courant peut atteindre trois fois le courant de démarrage (15 à 20 I_n).

Ces surintensités et les chutes de tension qui en découlent ont des conséquences pour le moteur (échauffements supplémentaires et efforts électrodynamiques dans les bobines pouvant engendrer des ruptures d'isolation et des à-coups sur le couple avec des contraintes mécaniques anormales sur les accouplements et les réducteurs d'où une usure prématurée voire une rupture) mais aussi sur les autres équipements tels que les contacteurs (usure voire soudure des contacts). Les surintensités peuvent conduire au déclenchement des protections générales de l'installation provoquant ainsi l'arrêt du procédé.

b) Moteur synchrone

Les effets sont à peu près identiques au cas des moteurs asynchrones.

Les moteurs synchrones peuvent cependant supporter des creux de tension plus importants (de l'ordre de 50 %) sans décrocher, du fait de leur inertie généralement plus importante, des possibilités de surexcitation et de la proportionnalité de leur couple avec la tension.

En cas de décrochage, le moteur s'arrête, et il faut reprendre tout le processus de démarrage qui est assez complexe.

c) Actionneurs

Les organes de commande (contacteurs, disjoncteurs équipés de bobine à manque de tension) alimentés directement par le réseau sont sensibles aux creux de tension dont la profondeur dépasse 25 % de U_n . En effet, pour un contacteur classique, il existe une valeur de tension minimale à respecter (dite tension de retombée) en deçà de laquelle les pôles se séparent et transforment alors un creux de tension (de quelques dizaines de millisecondes) ou une coupure brève en une coupure longue (de plusieurs heures).

d) Equipements de type informatique

Les équipements informatiques (ordinateurs, appareils de mesure) occupent aujourd'hui une place prépondérante dans la surveillance et le contrôle et la commande des installations, la gestion, et la production. Ces équipements sont tous sensibles aux creux de tension dont la profondeur est supérieure à 10 % de U_n .

e) Machines à vitesse variable

Les problèmes posés par les creux de tension appliqués aux variateurs de vitesse sont :

- impossibilité de fournir la tension suffisante au moteur (perte de couple, ralentissement) ;
- impossibilité de fonctionnement des circuits de contrôle alimentés directement par le réseau ;
- surintensité au retour de la tension (recharge du condensateur de filtrage des variateurs) ;
- surintensité et déséquilibre de courant en cas de creux de tension sur une seule phase ;
- perte de contrôle des variateurs à courant continu en fonctionnement onduleur (freinage par récupération d'énergie).

Les variateurs de vitesse se mettent généralement en défaut pour une chute de tension supérieure à 15 %.

f) Eclairage

Les creux de tension provoquent un vieillissement prématuré des lampes à incandescence et des tubes fluorescents.

Les creux de tension de profondeur supérieure ou égale à 50 % et dont la durée est de l'ordre de 50 ms provoquent l'extinction des lampes à décharge.

Une durée d'extinction de quelques minutes est alors nécessaire au refroidissement de l'ampoule avant réallumage.

I.2.2.Variation et fluctuation de tension [8]

I.2.2.1.Définition

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale. Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude.

Le phénomène est dû à la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareils dont la puissance absorbée varie de manière rapide (les fours à arcs, les machines à souder, les moteurs à démarrages fréquents, ...).

I.2.2.2.Conséquences des variations et fluctuations de tension

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation.

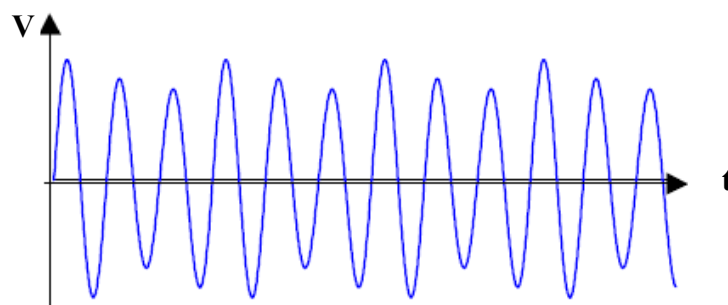


Figure I-3 : Fluctuation de tension

I.2.3. Variations de la fréquence [8]

C'est une variation de fréquence, normalement fixée, du réseau, elle est en général observée sur les perturbations de vitesse des moteurs.

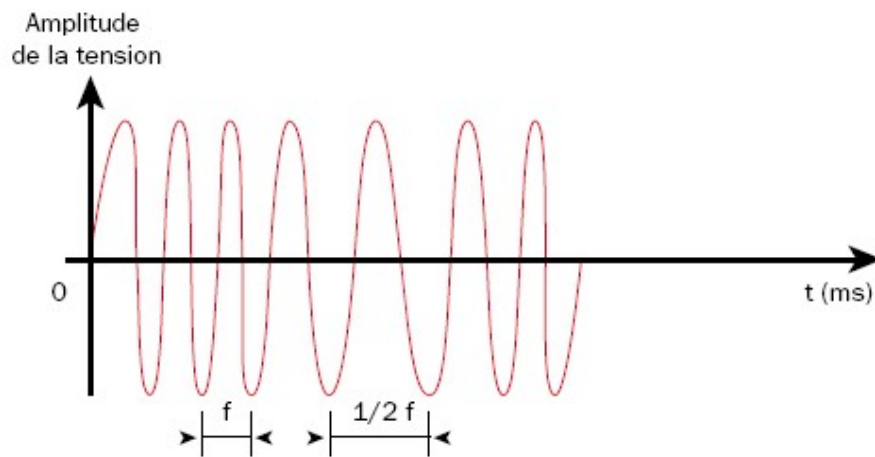


Figure I.4 : Exemple de fluctuation de la fréquence

1.2.4. Surtensions [8]

1.2.4.1. Définitions

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures :

- Temporaires (à fréquence industrielle) ;
- De manœuvre ;
- D'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître :

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre) ;
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

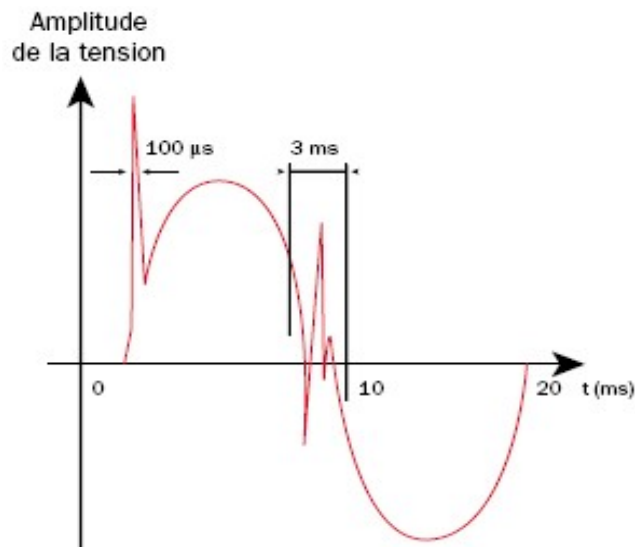


Figure I.5 : Les surtensions transitoires.

I.2.4.2. Les surtensions temporaires

Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz). Elles ont plusieurs origines :

❖ Un défaut d'isolement

Lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la terre dans un réseau à neutre impédance ou isolé, la tension des phases saines par rapport à la terre peut atteindre la tension composée. Des surtensions sur les installations BT peuvent provenir des installations HT par l'intermédiaire de la prise de terre du poste HT/BT.

❖ La rupture du conducteur de neutre

Les appareils alimentés par la phase la moins chargée voient leur tension augmenter (parfois jusqu'à la tension composée).

❖ Les défauts entre la HT, MT et BT

I.2.4.3. Les surtensions de manœuvre

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...). On distingue :

- les surtensions de commutation en charge normale,
- les surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de courants inductifs,
- les surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs).

Par exemple la manoeuvre d'une batterie de condensateurs provoque une surtension transitoire dont la première crête peut atteindre deux fois la valeur efficace de la tension du réseau, et une surintensité transitoire de valeur crête pouvant atteindre 100 fois le courant assigné du condensateur.

I.2.4.4. Les surtensions atmosphériques

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre).

1.2.4.5. Conséquences des surtensions

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée, la fréquence :

- claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...) ;
- dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées) ;
- coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels) ;
- perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible ;
- contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :

➤ La foudre essentiellement

Les réseaux aériens sont les plus affectés par la foudre, mais les installations alimentées par des réseaux souterrains peuvent subir des contraintes de tension élevées en cas de foudroiement à proximité du site

➤ Les surtensions de manoeuvre

Qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue. Elles peuvent conduire à des dégradations aussi importantes que la foudre.

I.2.5. Déséquilibre du système triphasé de tension (la non symétrie) [8]

I.2.5.1. Définitions

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de 120^0 .

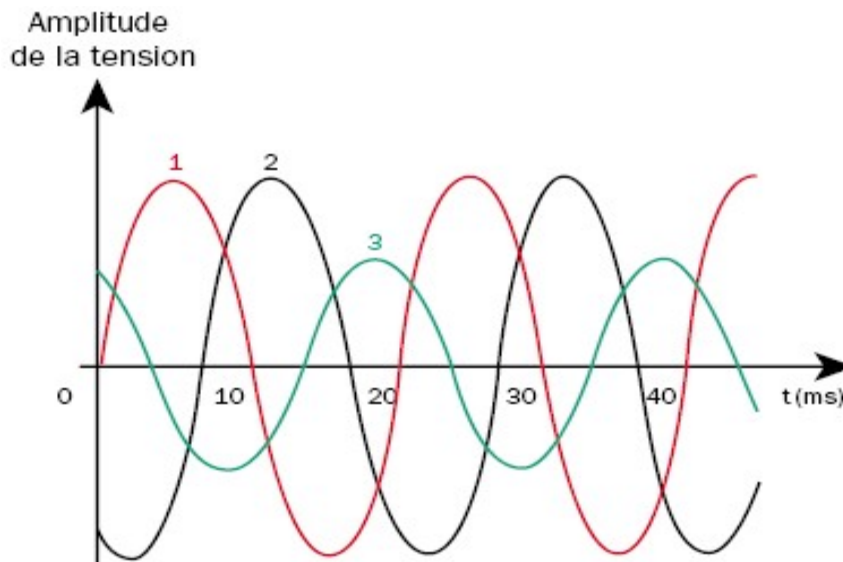


Figure I.6 : Représentation de la non symétrie du système triphasé de tensions

I.2.5.2. Les conséquences de déséquilibre de la tension

Le principal effet est le suréchauffement des machines asynchrones triphasées. Le taux de déséquilibre en courant sera donc plusieurs fois celui de la tension d'alimentation. Les courants de phase peuvent alors différer considérablement ; ce qui accroît l'échauffement de la ou des phases parcourues par le courant le plus élevé et réduit la durée de vie de la machine. En pratique, un taux de déséquilibre de tension de 1 % pendant une longue période, et 1,5 % de moins de quelques minutes est acceptable

I.2.6. Harmoniques et inter harmoniques

I.2.6.1. Introduction

La forme des ondes de courant et de tension relevée sur les réseaux d'énergie et dans les réseaux industriels et tertiaires s'éloigne assez souvent de la sinusoïde idéale pure. La déformation de la tension résulte de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux qui sont dus à la pollution harmonique. Ce phénomène est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

I.2.6.2.Définitions

Les harmoniques [2] [8]

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non linéaires.

Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension.

Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiple de celle du fondamental (50 Hz pour le réseau de distribution).

Chaque composante est caractérisée par son rang (par exemple rang 5 pour une composante à la fréquence de 250 Hz, soit 5×50 Hz) et par son amplitude exprimée en pourcentage par rapport à celle du fondamental.

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant.

Les inters harmoniques

Les inters harmoniques sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental (donc situées entre les harmoniques). Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteurs tels que fours à arc, machines à souder et convertisseurs de fréquence (variateurs de vitesse, cycloconvertisseurs). Les fréquences de télécommande utilisées par le distributeur d'énergie sont aussi des inter harmoniques.

Le foisonnement

L'effet de foisonnement est une diminution du niveau des perturbations harmoniques à cause de la multiplication des sources de perturbations harmoniques.

L'impédance harmonique

On définit, en tout point d'un réseau, une impédance harmonique Z_h qui dépend du rang harmonique h considéré, elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point.

Le rang d'un harmonique (h)

C'est le rapport de sa fréquence (f_h) à celle du fondamental.

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I-1})$$

I.2.6.3. Outil mathématique pour l'analyse des harmoniques

- **Décomposition en série de Fourier**

Joseph Fourier a démontré que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée par une somme de termes sinusoïdaux dont le premier, à la fréquence de répétition de la fonction, est appelé fondamental, et les autres à des fréquences multiples du fondamental appelés harmoniques.

Un signal périodique $S(t)$ représente un courant ou une tension de période T , $f = \frac{1}{T}$ et de pulsation $\omega = 2\pi f$

Ce signal se décompose de la façon suivante :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(\omega_h t) + b_h \sin(\omega_h t)] \quad (\text{I-2})$$

Avec :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt \quad (\text{I-3})$$

$$\text{et pour } h \geq 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} a_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(\omega_h t) dt \\ b_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(\omega_h t) dt \end{array} \right. \quad (\text{I-4})$$

$$(\text{I-5})$$

Ou également :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \quad (\text{I-6})$$

$$\text{Avec : } \theta_h = \arctg \frac{a_h}{b_h} \quad (\text{I-7})$$

$$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (\text{I-8})$$

a_0 : Composante continue ou valeur moyenne du signal.

a_h et b_h : Amplitudes efficaces des composantes harmoniques de rang h .

ω_h : Pulsation harmonique de rang h .

La grandeur C_h est l'amplitude de l'harmonique de rang h .

Les harmoniques au delà du rang 25 sont négligeables.

La figure ci-dessous illustre un exemple de cette décomposition

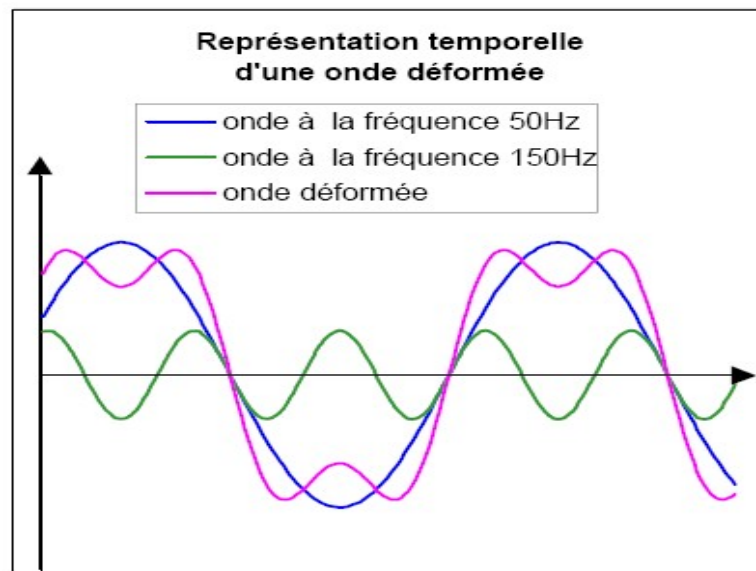


Figure I- 7 : Onde déformée et sa décomposition

▪ Représentation spectrale

Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmoniques .On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre, c'est-à-dire à l'aide d'un schéma où l'on porte en abscisse la fréquence harmonique et en ordonnée l'amplitude

Amplitude (%)

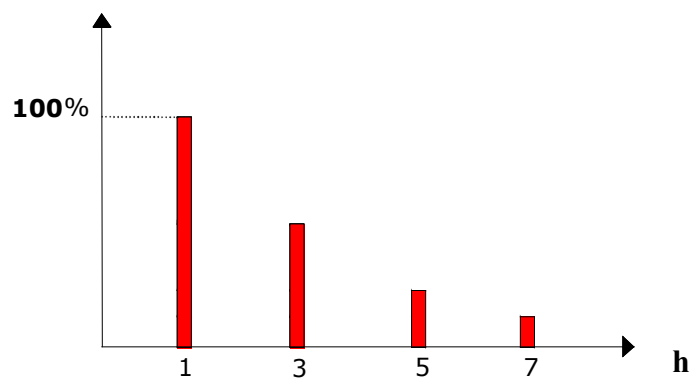


Figure I.8 : Spectre harmonique d'un signal

▪ **Valeurs caractérisant un signal déformé**

✓ **Valeur efficace**

La valeur efficace d'un signal $g(t)$ périodique de période T est donné par :

$$g_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^n g_h^2} \quad (\text{I-3})$$

g_h : Valeur efficace de l'harmonique de rang h .

✓ **Taux individuel**

C'est le rapport de la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique de rang h à celle du fondamental.

$$T_h (\%) = 100 \left(\frac{g_h}{g_1} \right) \quad (\text{I-4})$$

✓ **Le taux de distorsion harmonique global (TDH)**

Le taux de distorsion harmonique global donne une mesure de la déformation du signal.

✓ **TDH global en tension**

$$TDH_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^2} \quad (\text{I-5})$$

✓ **TDH global en courant**

$$TDH_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{I_h}{I_1} \right]^2} \quad (\text{I-6})$$

✓ **Facteur de crête**

C'est le rapport entre la valeur de crête d'un signal et sa valeur efficace, il caractérise la surintensité ou la surtension instantanée maximale subie par un appareil. Nous savons qu'il existe un rapport de $\sqrt{2}$ entre la valeur de crête (I_{MAX}) d'une onde sinusoïdale et la valeur efficace de ce même signal.

$$\frac{I_{MAX}}{I_{eff}} = \sqrt{2} \quad (I-7)$$

Lorsque le courant est déformé, le facteur de crête atteint des valeurs supérieures à $\sqrt{2}$ et traduit la non linéarité du circuit en question.

Pour un même courant efficace, les formes d'ondes peuvent être très différentes.

Le facteur de crête F_C permet de caractériser la forme du courant et d'apprécier qualitativement la déformation de celui-ci.

Facteurs de crête courant :

- - charge linéaire : $\sqrt{2}$ → absence d'harmonique ;
- - Matériel informatique : 2 à 3 → présence d'harmoniques ;
- - variateur de vitesse : 2 → présence d'harmoniques.

I.2.6.4.Origine des harmoniques

- **Notion de charges linéaires et non linéaires et facteur de puissance**

A un certain temps, non lointain, la majorité des charges utilisées sur le réseau électrique étaient des charges dites linéaires, des charges appelant un courant de forme identique à la tension. C'est-à-dire quasi sinusoïdale. Aujourd'hui, avec l'apport de l'électronique intégré dans de nombreux dispositifs électriques, les charges produisent des courants déformés dont l'allure n'est plus sinusoïdale.

Aussi, il est impératif de bien faire la distinction entre les charges linéaires et les charges non linéaires. Cette identification peut s'effectuer soit par reconnaissance du type de charges lorsque la technologie intégrée est connue, soit par la mesure afin de vérifier les caractéristiques du courant appelé par la charge.

La valeur efficace d'un signal s'avère aujourd'hui insuffisante pour apprécier la déformation de ce signal. Elle n'est, dans la valeur d'un courant, que l'image des effets thermiques de celui-ci, mais ne renseigne pas sur la forme du signal, qui est un critère d'appréciation indispensable actuellement pour une analyse précise de la QEE sur un réseau de distribution basse tension.

On peut citer, dès à présent, quelques exemples d'équipements responsables de la déformation des signaux :

- les convertisseurs d'électronique de puissance ;
- les machines à souder, four à arc ;

-la généralisation des alimentations à découpage dans l'informatique des secteurs tertiaire et industriel aussi bien que dans les appareils électroménagers. D'une façon générale, tous les équipements comportant des dispositifs à semi conducteurs.

Les équipements pollueurs sont nombreux dans le secteur industriel. Ils sont répartis sur les différents postes d'équipements électriques.

- **Une application de charge dite linéaire**

Revenons à notre charge dite linéaire, correspondant à un type de charge connu des utilisateurs du réseau de distribution électrique. Cette catégorie de charge se trouve dans des récepteurs classiques tels que les convecteurs électriques, les lampes à incandescence ou, encore, tout simplement des récepteurs comportant des éléments purement résistifs mais cela peut être aussi une charge comprenant des éléments inductifs ou capacitifs.

Aussi la charge linéaire, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale, absorbe un courant de même allure .Il y'a ainsi, à tout instant, proportionnalité entre tension et courant.

La puissance absorbée correspondant à ces deux grandeurs électriques, tension et courant, est le simple produit de ces composantes dans le cas d'une charge dite linéaire associant des éléments purement résistifs.

Un déphasage existe lorsque l'on observe, entre deux signaux, sur un même circuit, un décalage de l'un par rapport à l'autre dans le temps.

La différence de phase constatée fait alors référence au facteur de puissance, intervenant dans le calcul de la puissance absorbée du récepteur en plus des composantes tension et courant :

$$k = \frac{P}{S} \quad \textbf{(I-8)}$$

Le facteur de puissance k d'un circuit est le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Il est toujours inférieur à un.

La puissance apparente est calculée de la façon suivante :

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

On parle de $\cos\varphi$ pour les signaux purement sinusoïdaux .

La puissance active consommée par un récepteur linéaire en régime sinusoïdal est donnée par la relation suivante :

- En monophasé : $P = UI \cos \varphi$ (I-10)

- En triphasé : $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ (I-11)

La notion de charge linéaire est donc valable pour des charges comprenant non seulement des éléments résistifs mais aussi des composants passifs, tels que les inductances ou encore des condensateurs, qui, à tout instant, conservent la proportionnalité entre tension et courant. Le facteur de puissance peut être unitaire (dans le cas d'une charge résistive), inférieure à 1 (dans le cas d'une charge inductive tel qu'un moteur asynchrone).

- **Application d'une charge dite non linéaire**

La charge dite non linéaire correspond à un type de charge composée d'éléments semi-conducteurs constituant essentiellement des dispositifs de l'électronique.

Aussi, la charge non linéaire, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïde, absorbe un courant dit déformé. Il n'y a donc plus proportionnalité entre tension et courant. fig. 1-8.

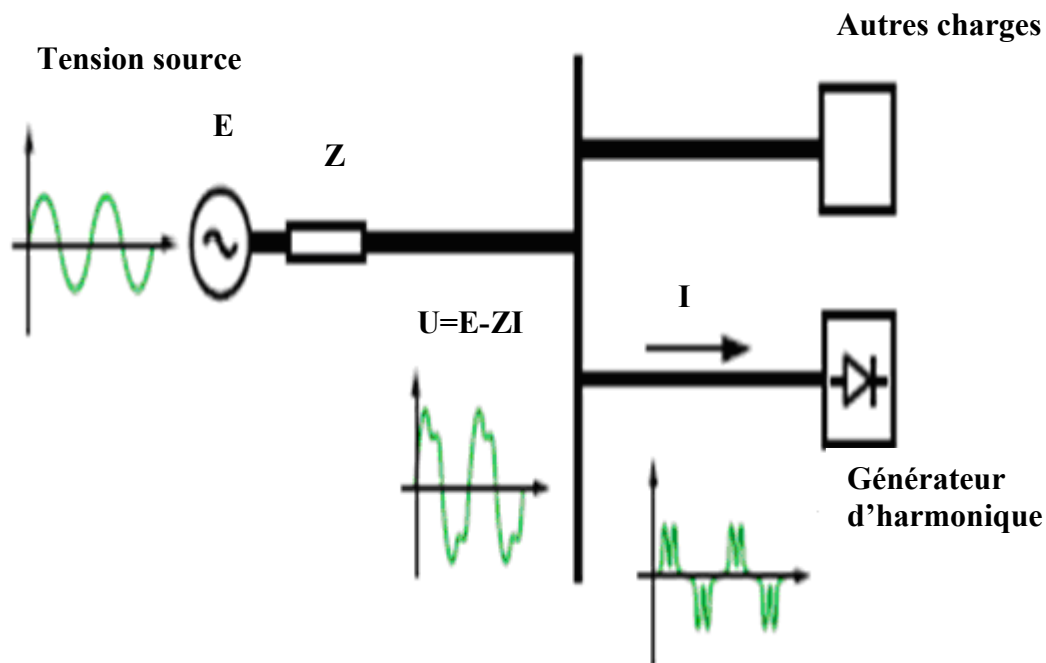


Figure I.8. Dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire

La notion de $\cos \varphi$ n'est plus applicable dans le cas des signaux déformés. On parle de facteur de puissance F_p

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (\text{I-12})$$

En développant cette notion de facteur de puissance, on voit apparaître un nouveau terme dans l'expression, D, pour la puissance appelée puissance déformante :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I-13})$$

Cette puissance déformante D traduit les effets de la distorsion harmonique sur l'installation considérée. La dégradation de la valeur du facteur de puissance est donc augmentée sur ce type d'installation, comparativement à une installation ne comportant que des charges linéaires, et ceci en raison de la présence d'harmoniques issus des charges non linéaires.

Afin de lever l'ambiguïté entre le $\cos\phi$, dans le cas de signaux sinusoïdaux, et le facteur de puissance k, dans le cas de signaux déformés, les appareils de mesure et d'analyse d'énergie utilisent le terme DPF (déplacement de facteur de puissance) pour désigner le $\cos\phi$ en régime perturbé. La compensation de l'énergie réactive mise en œuvre sur une installation n'étant pas faite sur les harmoniques, c'est le paramètre DPF qui est pris en compte dans les calculs.

Ainsi, le DPF est égal au facteur de puissance F_p uniquement pour les signaux déformés. En d'autres termes, le DPF représente le cosinus de déphasage entre les fondamentales de la tension et le courant. Le DPF constitue alors la véritable représentation entre les signaux U et I.

I.2.6.5. Les principales sources d'harmoniques

La génération des courants harmoniques sur des réseaux d'alimentation électrique est due à de nombreux types d'équipements, dont on a dressé une liste non exhaustive et que l'on retrouve dans les matériels suivants :

➤ Moteurs asynchrones monophasés et triphasés

Les moteurs ou encore les alternateurs produisent des courants harmoniques, et ceci en raison des imperfections dues aux dissymétries de leurs bobinages. Les taux de distorsion mesurés sont, en général, faibles ce qui signifie que plus les moteurs sont de forte puissance, moins les harmoniques sont présents. Les moteurs asynchrones sont intégrés dans les matériels suivants :

- électroménagers ;
- climatiseurs ;
- outillage et machines-outils ;
- équipements industriels.

➤ **Les transformateurs**

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension de ces appareils reste toujours inférieur à 1 %.

➤ **Redresseurs monophasés**

Le redresseur monophasé à filtre capacitif permet de convertir la tension alternative du réseau en une tension redressée et filtrée. Ce montage entraîne l'émission de courant harmonique de rangs 3, 5, 7, 11 et 13 avec un fort taux de distorsion harmonique, essentiellement pour les rangs 3 et 5.

Ces redresseurs sont intégrés dans les matériels suivants :

- micro-ordinateurs ;
- imprimantes et périphériques d'ordinateurs ;
- variateurs de vitesse pour les moteurs alternatifs ;
- ballasts électroniques ;
- téléviseurs.

➤ **Redresseurs triphasés à base de semi conducteurs**

La version triphasée du redresseur à diodes avec filtrage capacitif constitue bien souvent le montage d'entrée du variateur de vitesse pour un moteur asynchrone. Les courants générés par ce type de convertisseurs sont riches en harmoniques et correspondent aux rangs 3, 5, 11 et 13.

Le redresseur triphasé à thyristors est un convertisseur de l'électronique de puissance très utilisé dans les applications industrielles. Il réalise la modulation de puissance de la charge (vitesse variable des moteurs à courant continu ou des moteurs synchrones, électrolyseurs, etc.), en faisant varier la tension continue appliquée à ses bornes à l'aide des thyristors.

Ces convertisseurs constituent une source importante de pollution harmonique dans le secteur industriel. Les rangs harmoniques essentiellement présents sont les rangs 5, 7, 11 et 13.

➤ **Onduleurs de tension**

Les équipements informatiques alimentés par des dispositifs techniques permettant de pallier des coupures électriques du réseau d'alimentation utilisent des onduleurs de tension. Le courant de sortie de l'onduleur est déformé et produit des harmoniques de rang impair avec un fort taux de distorsion.

Dans les dispositifs récents d'onduleurs de tension, encore appelés ASI (alimentation statique ininterrompible) et qui assurent le plus souvent l'alimentation des équipements

informatiques, les technologies internes utilisées permettent d'appliquer à la charge non linéaire une tension quasi sinusoïdale. De ce fait, les ASI de technologie récente au même titre que les alternateurs, ne sont pas, ou tout au moins très faiblement, responsables de la pollution harmonique des réseaux électriques.

➤ **Fours à arc**

Les fours à arc utilisés en sidérurgie peuvent être à courant alternatif ou à courant continu. L'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies paires, impaires et une composante continue à des fréquences quelconques entraînant l'apparition d'un spectre continu.

➤ **L'éclairage**

Les appareils d'éclairage sont intégrés dans les matériels suivants :

- lampes à fluorescence ;
- lampes à vapeur haute pression ;
- lampes fluo compactes.

L'éclairage fluorescent, doté de ballast, absorbe un courant qui n'est pas d'allure sinusoïdale et génère ainsi des courants harmoniques de rangs impairs : 3,5,7,9...

Les lampes à vapeur haute pression présentent une plus grande efficacité lumineuse avec un coût plus élevé et sont aussi génératrices de courants harmoniques. La présence, aujourd'hui, de plus en plus fréquente, de ballasts électroniques conduit à une émission d'harmoniques plus importante.

La commande de lampes halogènes est réalisée à partir des gradateurs utilisant des thyristors afin d'assurer la modulation de la puissance fournie à la lampe. Les courants consommés produisent des harmoniques de rangs impairs : 3,5,7,9...

Un résumé des principaux types de charges et de l'allure des courants correspondants appelés sur le réseau est fourni dans le tableau ci-dessous. Ceci pour des applications de types domestiques, tertiaires et industriels.

Différents types de charges polluantes

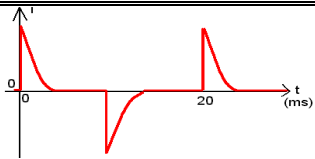
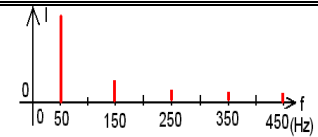
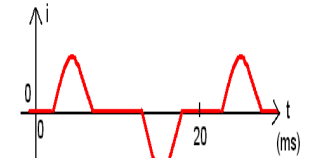
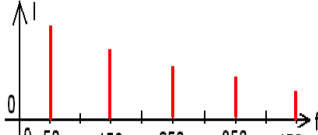
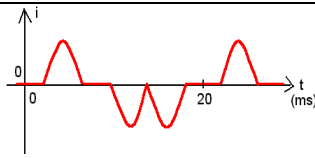
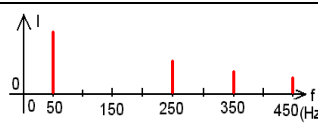
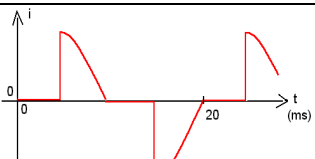
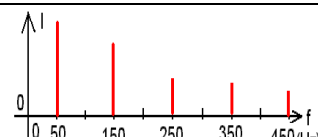
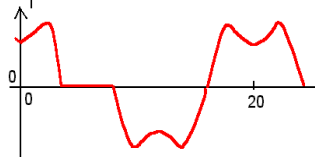
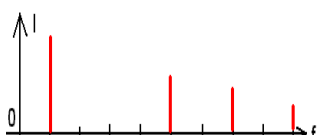
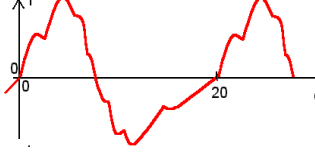
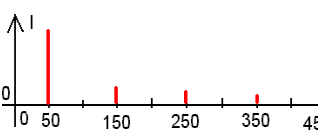
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Eclairage	Tubes fluorescents Lampes à vapeur HP		
Redresseur monophasé à diodes avec filtrage, alimentation à découpage	Micro-informatique Télévisions Lampes à ballast électronique		
Redresseur triphasé à thyristors avec filtrage	Variation de vitesse des moteurs asynchrones		
Gradateur monophasé	Régulation de puissance des fours à résistances Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristors	Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	Machines-outils Appareils électroménagers Ascenseurs		

Tableau II.1. Différentes types de charges polluantes

I.2.6.6. Les effets néfastes de la pollution harmonique

On peut considérer que les perturbations provoquées par les harmoniques se manifestent de deux façons sur les appareils et les équipements électriques :

- **Les effets instantanés**

Ils sont dus à la déformation de l'onde et aux phénomènes de résonance et concernent les déclenchements intempestifs de disjoncteurs et de relais d'automatisme, la destruction de matériel (condensateurs par exemple) ou encore la perturbation des dispositifs de régulation provoquant des erreurs supplémentaires sur les compteurs d'énergie à induction : Par exemple un compteur classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3 % avec un taux de 5 % d'harmonique 5 sur le courant et la tension, mais ils provoquent aussi la diminution du facteur de puissance.

- **Les effets à long terme**

Ils génèrent des échauffements dans les condensateurs et provoquent un vieillissement prématuré du matériel ou encore des échauffements dus aux pertes supplémentaires dans les machines et dans les transformateurs. Les problèmes rencontrés sont essentiellement de nature thermique et affectent alors la durée de vie des équipements concernés.

- **Principaux phénomènes rencontrés**

- **Les phénomènes de résonance**

Les phénomènes de résonance proviennent de la présence d'éléments capacitifs et inductifs sur le réseau d'alimentation électrique (impédance de ligne et de la source, capacité de relèvement du facteur de puissance), générant ainsi des amplitudes élevées sur certains rangs harmoniques (rangs 5 et 7 par exemple).

Lorsque les courants harmoniques ont une fréquence correspondant à la fréquence de résonance des circuits LC existants, il peut en résulter une augmentation des tensions harmoniques et ceci en raison de l'impédance élevée pour ce rang harmonique. La tension harmonique voit alors sa valeur augmenter suivant la loi d'Ohm, affectant ainsi la tension du réseau d'alimentation électrique.

- **Les échauffements dans les conducteurs et équipements électriques**

Les conducteurs électriques véhiculent des courants harmoniques qui produisent, par effet Joule, un échauffement des conducteurs au même titre que le courant fondamental. Malheureusement, les harmoniques ne contribuent pas au transfert de la puissance active. Ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance de l'installation.

Les condensateurs sont particulièrement sensibles à la circulation des courants harmoniques du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang élevé des harmoniques.

- Les facteurs de crêtes élevés

Des déclenchements intempestifs des dispositifs magnétiques des disjoncteurs peuvent se produire, notamment, dans le domaine des installations tertiaires comprenant un parc de matériel informatique important. Ils sont, bien souvent, dus aux problèmes de pollution harmonique.

En effet, les disjoncteurs assurant la protection des installations électriques comprenant des matériels informatiques voient leur seuil de sensibilité atteint lors des pointes de courant engendrées par des signaux déformés ayant des facteurs de crête importants.

- Les effets dans le conducteur neutre

En régime sinusoïdal, dans le cas d'un système triphasé équilibré, tant du point de vue de la source que de celui des récepteurs eux-mêmes, la somme vectorielle des courants s'annule au point neutre. Ainsi, il n'y a pas de circulation de courant dans le conducteur neutre. La norme utilise alors un sous-dimensionnement du conducteur neutre vis-à-vis des phases afin de réaliser une économie de cuivre.

Le signal déformé issu d'une charge non linéaire comprend plusieurs composantes harmoniques de fréquences multiples. Si l'on s'intéresse à la somme des harmoniques de rang multiple de 3 pour les trois phases : rang 3, rang 9 etc., on s'aperçoit que cette somme ne donne pas lieu à une annulation du courant dans le conducteur neutre.

Un résumé des principaux effets de la pollution harmonique ainsi que les charges victimes de cette pollution sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Effets instantanés

VICTIME	EFFETS
Consommateur	Diminution du facteur de puissance et surcoût de la facturation d'électricité
Dispositifs de télécommande : relais de protection et d'automatisme, fusibles, disjoncteurs thermiques	Déclenchements intempestifs dus aux facteurs de crête élevés ou aux phénomènes de résonance ; difficultés pour calibrer les protections
Condensateurs	Claquage suite à une surcharge provoquée par un courant harmonique important du au phénomène de résonance parallèle
Dispositifs de régulation de systèmes électroniques	Les conditions de commutation des thyristors sont influencées par les tensions harmoniques qui déplacent le passage à zéro de la tension
Compteurs d'énergie à induction et appareils de mesure	Erreurs de mesure. Par exemple, un compteur classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3% avec un taux de 5% d'harmonique 5 sur le courant et la tension.
Télécommande centralisée à fréquence musicale utilisée par les distributeurs d'énergie	Erreurs d'instruction dues aux perturbations par des tensions harmoniques de fréquence voisine de celle utilisée par les récepteurs et émetteurs de la télécommande
Appareils électromagnétiques : transformateurs et inductances	Vibrations, bruits acoustiques dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques
Machines tournantes	Vibrations dues aux couples mécaniques pulsatoires engendrés par les champs tournants harmoniques, entraînant une perte de stabilité mécanique.
Lignes à courant faible : téléphone, contrôle commande	Perturbation de ces lignes lorsque celles-ci circulent le long d'une canalisation de distribution électrique
Ordinateurs	Fonctionnement incorrect. Dysfonctionnement dus aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques

Tableau I.2. Effets instantanés.**Effets à long terme :**

VICTIME	EFFETS
Condensateurs	Echauffement et vieillissement : le phénomène de résonance avec l'inductance du réseau amont suite à la présence de certains rangs harmoniques peut entraîner un facteur d'amplification du courant dans le condensateur, provoquant ainsi sa surcharge et donc son échauffement (d'autant que l'impédance du condensateur diminuant avec la fréquence, les courants harmoniques de rang élevé circuleront plus facilement)
Transformateurs	Pertes supplémentaires : -effet de peau : la résistance du cuivre augmente avec la fréquence, et donc l'effet Joule -augmentation de l'hystérésis et des courants de Foucault Risques de saturation
Machines tournantes	Echauffement dû aux pertes supplémentaires : augmentation des pertes cuivre et fer au stator et surtout au rotor due aux différences importantes de vitesse entre les champs tournants harmoniques et le rotor
Conducteur de neutre	Surcharge et échauffement : les harmoniques de rang 3 étant en phase, elles s'ajoutent algébriquement dans le neutre. (cf. Annexe 6 pour la construction graphique) NB : dans le cas d'un système triphasé équilibré, la norme autorise un sous dimensionnement du conducteur neutre vis à vis des phases afin de réaliser une économie de cuivre. D'où un problème de dimensionnement de ce conducteur.
Conducteur	Plus grandes pertes en ligne : -effet de peau : la résistance apparente de l'âme augmente avec la fréquence -augmentation des pertes diélectriques dans l'isolant si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable -augmentation des sections des câbles : le calcul de la section des conducteurs doit être adapté au courant efficace et non pas au seul fondamental

Tableau I.3. Effets à long terme.**I.3.Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les creux et coupures de tension, les variations et fluctuations de tension, les surtensions, la non symétrie (déséquilibre) de tension et les harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application: de l'inconfort à la perte de l'outil de production, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, voire même à la mise en danger des personnes.

II.1.Introduction

Aujourd'hui, les réseaux et les installations électriques sont soumis à plus rude épreuve qu'il y a dix ans. L'une des raisons en est l'utilisation croissante des équipements électriques engendrant des harmoniques, en particulier l'harmonique 3. Cet harmonique est susceptible d'engendrer dans le neutre des courants exceptionnellement importants pouvant souvent dépasser le courant de phase.

Le transfert d'énergie d'un point à un autre s'accompagne d'une certaine perte de puissance et donne lieu à un échauffement des différentes parties du réseau et une diminution de rendement.

L'étude des phénomènes occasionnant des pertes de puissance est d'un grand intérêt, car elle nous révèle comment ces pertes peuvent être réduites.

Dans ce chapitre nous analysons les pertes dans les éléments constituant un réseau électrique tels que les machines électriques, les câbles, les condensateurs ainsi que les redresseurs.

II.2.Les pertes de puissance dans les machines électriques

Les machines électriques peuvent être classées en deux groupes : celles qui comprennent les parties tournantes (moteurs, génératrices) et celles qui n'en ont pas (transformateurs). Des pertes électriques et mécaniques sont produites dans les machines tournantes. Par contre dans les machines fixes seules les pertes électriques existent.

II.2.1.Les pertes de puissance dans les transformateurs [3]

Comme toute machine électrique, le transformateur occasionne des pertes de puissance. Ces pertes sont causées par :

- L'effet Joule dans les deux enroulements ;
- L'hystérésis et les courants de Foucault dans le fer.

Les pertes dans le transformateur se manifestent sous forme de chaleur et donnent lieu :

- A une élévation de température ;
- A une diminution de rendement.

Elles sont classées en deux types :

II.2.1.1. Les pertes en charge (Pertes dans le cuivre)

Ce sont des pertes Joule, dues aux courants de charge traversant les enroulements, causant ainsi l'échauffement et la chute de tension au niveau du transformateur. Elles sont données par la formule suivante :

$$P_{ch} = R_1 I_1^2 \quad (\text{II-1})$$

P_{ch} : Pertes en charge dans le transformateur [W].

R_1 : Résistance équivalente des enroulements primaire et secondaire [Ω].

I_1 : Courant de charge (parcourant l'enroulement de la résistance R_1) [A].

Il est possible de réduire les pertes en charge en augmentant la taille du conducteur comportant les spires, ce qui diminue la densité du courant et, par conséquent, l'importance de la perte. Les pertes en charge sont proportionnelles au carré du courant de la charge; il est donc essentiel de prendre aussi en compte la répartition dans le temps de la charge du transformateur.

II.2.1.2. Les pertes à vide

Elles se composent de deux types :

II.2.1.2.1. Les pertes apparentes

Elles sont dues au courant traversant l'enroulement primaire ; causant la chute de tension, ces pertes sont données par la formule suivante :

$$P_{app} = RI^2 \quad (\text{II-2})$$

P_{app} : Pertes apparentes [W].

R : Résistance de l'enroulement primaire [Ω].

I : Courant traversant l'enroulement primaire [A].

II.2.1.2.2. Les pertes fer (pertes magnétiques)

Toute variation d'induction dans une matière magnétique provoque, à l'intérieur de celle-ci, une dissipation d'énergie apparaissant le plus souvent sous forme de chaleur et n'est, généralement, pas récupérable, d'où l'expression pertes magnétiques utilisée pour désigner ce phénomène.

On distingue deux types de pertes magnétiques :

1. Pertes par hystérésis [6]

L'hystérésis est la propriété d'un matériau magnétique en vertu de laquelle le flux magnétique dépend de ses conditions antérieures de magnétisation.

Ces pertes sont dues au travail des forces de freinage agissant sur les parois de Bloch (zone de transition entre deux domaines magnétiques) en mouvement, c'est-à-dire aux frottements des domaines magnétiques (régions polarisées dans un échantillon de taille macroscopique ; c'est à dire que les moments magnétiques atomiques sont alignés parallèlement les uns aux autres) lorsque ceux-ci changent de sens.

Elles correspondent au travail nécessaire pour parcourir lentement le diagramme (B-H) ou cycle d'hystérésis statique.

Les pertes par hystérésis dépendent :

- De la qualité du matériau magnétique et de sa masse,
- De la fréquence : période/seconde,
- Pratiquement du carré d'induction maximale du champ magnétique (B_m).

L'énergie dissipée au cours d'un cycle vaut par unité de volume du matériau :

$$W_{hy} = \oint H dB \quad (\text{II-3})$$

W_{hy} : Energie dissipée par unité de volume au cours d'un cycle [$J.m^3$].

H : Champ magnétique [A/m].

B : Induction magnétique [T].

Cette intégrale, étendue à un cycle (C), a pour valeur l'aire découpée par (C) dans le plan (H-B). Cependant, cette formule est difficilement utilisable ; on lui préfère des expressions empiriques donnant la puissance consommée en fonction du champ d'induction maximale B_m .

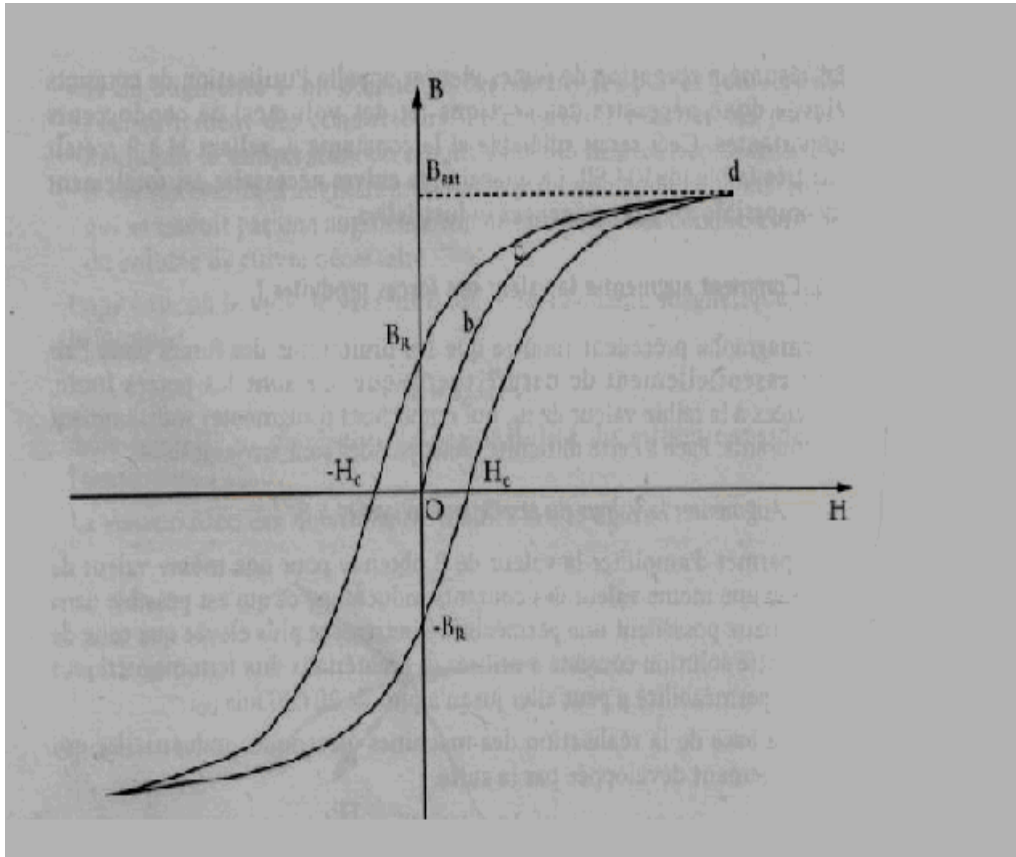


Figure. II.1 : Cycle d'hystérésis (C)

B_R : Induction rémanente pour un champ nul ($H=0$).

B_{sat} : Induction de saturation, induction maximale qui peut être atteinte.

H_c : Champ coercitif, valeur du champ à créer pour annuler l'induction dans le matériau.

La variation est linéaire dans la partie Ob mais s'aplatit après jusqu'à l'apparition d'un phénomène de saturation.

Si, à partir du point c, on diminue la valeur de H, on met en évidence la non réversibilité du phénomène. Le cycle, alors décrit, est appelé cycle d'hystérésis statique.

L'expression de la puissance perdue par hystérésis est donnée par la relation ci-dessous qui est la formule de Richter.

$$P_{hy} = K_{hy} f B_m^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (\text{II-5})$$

f : Fréquence du cycle [Hz].

K_{hy} : Constantes qui dépendent de la nature du matériau.

B_m : Induction maximale [T].

Cette dernière formule est généralement mieux adaptée que celle de Steinmetz aux matériaux ferromagnétiques modernes.

Pour réduire les pertes par hystérésis, il faut choisir un matériau ferromagnétique avec un cycle d'hystérésis le plus étroit possible.

2. Pertes par courants de Foucault ou courants induits [6]

On appelle pertes par courants de Foucault, les pertes par effet Joule résultant des courants créés dans toute matière conductrice (magnétique ou non), par un flux variable dans le temps. Ces pertes provoquent une dissipation de l'énergie et un réchauffement du circuit magnétique ; elles peuvent être importantes dans les matériaux de faible résistivité comme les alliages magnétiques.

Les courants induits ou courants de Foucault sont induits dans la masse du matériau ferromagnétique en vertu de la loi de Lenz, lorsque ce matériau est soumis à un champ d'induction variable. Ces courants provoquent, par effet Joule, une dissipation d'énergie et un échauffement du circuit magnétique.

Ces pertes se calculent par la formule suivante :

$$P_F = K_e f^2 B^2 \quad \textbf{(II-6)}$$

P_F : Pertes de puissance par courants de Foucault [W/kg].

K_e : Constante qui dépend de la résistivité et l'épaisseur du matériau.

f : Fréquence [Hz].

B : Induction magnétique [T].

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, le noyau est feuilleté. C'est-à-dire qu'il est constitué de tôles vernies, donc isolées les unes des autres. La taille des boucles de courant de Foucault est alors limitée par l'épaisseur de la tôle. Plus les boucles sont petites, plus les pertes sont réduites.

Il est possible de diminuer les pertes à vide en choisissant un acier plus performant pour fabriquer le noyau. Au fil des ans, davantage d'aciers spécialisés ont été élaborés pour les noyaux de transformateurs. La récente élaboration du fer amorphe constitue un progrès important, qui permet de réduire les pertes par le fer dans les transformateurs.

II.2.1.3. Pertes auxiliaires [5]

Elles sont dues au refroidissement du transformateur, le refroidissement se fait par ventilation si la tension atteint 133% de la tension nominale et avec les pompes si la tension atteint 167% de la tension nominale.

Plus les autres types de pertes sont importants, plus le refroidissement est nécessaire, et plus les pertes en refroidissement seront élevées.

II.2.2. Les pertes dans les moteurs

Elles sont subdivisées en deux catégories : les pertes à vide et les pertes en charge.

II.2.2.1. Les pertes à vide**II.2.2.1.1. Les pertes fer**

Elles se produisent dans les parties en fer où le flux varie en grandeur ou en direction. C'est le cas du circuit magnétique des machines à courant alternatif dans lesquelles le flux est alternatif. Les pertes dans le fer sont attribuables au phénomène d'hystérésis et aux courants de Foucault.

1. Les pertes par hystérésis [6]

Les pertes par hystérésis sont proportionnelles au nombre de fois que l'alimentation change de sens par seconde, donc à la vitesse de rotation des parties tournantes.

Elles sont données par l'expression suivante :

$$P_{hy} = K_{hy} f B_m^2 \quad (\text{II-7})$$

P_{hy} : Pertes par hystérésis [W/kg].

K_{hy} : Coefficient des pertes par hystérésis.

B_m : Induction magnétique maximale [T].

f : Fréquence [Hz].

2. Pertes par courants de Foucault [5]

En tournant, le noyau coupe des lignes de flux et, d'après la loi de Lenz, une tension est induite dans le noyau même, avec les polarités indiquées. Cette tension fait circuler des courants provoquant un échauffement par effet Joule du noyau de fer. La chaleur dégagée correspond à une

perte de puissance proportionnelle au carrée de la vitesse de rotation et au carrée de la densité de flux.

$$P_F = K_F f^2 B_m^2 \quad (\text{II-8})$$

P_F : Pertes par courants de Foucault [W/kg].

K_F : Coefficient des pertes par courants de Foucault.

f : Fréquence [Hz].

B_m : Induction magnétique maximale [T].

Pour minimiser les pertes par courants de Foucault, on est amené à feuilletter le noyau de l'induit. Le noyau est alors formé d'un empilage de tôles minces, isolées les unes des autres afin d'empêcher le passage du courant d'une tôle à l'autre. Les tôles sont disposées parallèlement au sens des lignes de force.

II.2.2.2. Les Pertes en charge

Elles sont classées en deux types :

II.2.2.2.1. Les pertes dans le cuivre (pertes Joule)

Un moteur n'est sensé dissiper de la puissance que par les résistances de ses enroulements et cela par effet Joule, ces pertes sont appelées pertes dans le cuivre. Ces pertes sont calculées séparément pour le rotor et le stator. Elles sont exprimées par l'expression :

$$P_J = RI^2 \quad (\text{II-9})$$

P_J : Pertes par effet Joule [W].

R : Résistance du circuit électrique [Ω].

I : Courant traversant le circuit électrique [A].

II.2.2.2.2. Les pertes supplémentaires en charge [5]

La détermination expérimentale des pertes supplémentaires en charge est l'un des problèmes les plus aigus dans la caractérisation des pertes du moteur, mais on peut dire que la définition la plus objective des pertes supplémentaires peut être exprimée sous forme mathématique et en fonction des autres pertes comme suit :

$$P_{\text{sup}} = P_T - P_{fv} - P_{fer} - P_{cur} - P_{cus} \quad (\text{II-10})$$

P_{sup} : Pertes supplémentaires [W].

P_T : Pertes totales en charge [W].

P_{fv} : Pertes par frottement et ventilation [W].

P_{fer} : Pertes dans le fer [W].

P_{cur} : Pertes dans le cuivre du rotor [W].

P_{cus} : Pertes dans le cuivre du stator [W].

II.2.2.3. Pertes mécaniques [3]

Les pertes mécaniques proviennent :

1. Du frottement dans les paliers ;
2. Du frottement des balais sur le collecteur ou sur les bagues ;
3. Du frottement de l'air sur l'induit et sur le ventilateur destiné au refroidissement de la machine.

Les pertes qui proviennent du frottement du rotor sur des organes fixes (paliers, balais) contribuent à l'échauffement de la machine. Plus la machine tourne vite, plus les pertes mécaniques deviennent importantes. Ces pertes dépendent de nombreux facteurs et il est très difficile de prédire leur valeur. Pour les déterminer avec exactitude, il faut faire des essais sur la machine.

II.2.3. Les pertes dans les câbles

Ce sont des pertes, par effet Joule, qui se dégagent sous forme de chaleur.

Elles sont exprimées par la relation ci-dessous :

$$P_{ca} = 3LRI^2 \quad (\text{II-11})$$

P_{ca} : Pertes de puissance dans le câble [W].

L : Longueur du câble [m].

R : Résistance linéique du câble [Ω/m].

I : Courant traversant le câble [A].

II.2.4. Les pertes dans les condensateurs

Aucun isolant n'est parfait, le diélectrique d'un condensateur présente des pertes qui dépendent de :

- La nature de l'isolant ;
- La fréquence d'utilisation ;
- La température ;
- La tension appliquée au condensateur ;
- Le volume du diélectrique.

Les pertes dans les condensateurs sont des pertes diélectriques qui se manifestent dans les isolants soumis à des champs électriques alternatifs sinusoïdaux et qui sont le siège de pertes d'énergie active sous forme thermique. Ces pertes se caractérisent par le facteur de pertes diélectriques ($\tan \delta$). Ces pertes peuvent être dues à la conduction mais surtout à l'hystérésis diélectrique.

II.2.4.1. Pertes par conduction

Elles sont dues au courant de fuite qui traverse le diélectrique comme si celui-ci était une résistance. Cette "résistance de fuite" ou résistance d'isolement R_i est déterminée par la résistivité de l'isolant utilisé et par les dimensions du condensateur.

Les pertes par conduction peuvent être calculées avec la formule :

$$P_c = R_i I^2 \quad \text{(II-12)}$$

P : Pertes par conduction [W]

R_i : Résistance d'isolement [Ω]

I : Courant de fuite qui traverse le diélectrique [A]

Dans les condensateurs autres qu'électrolytiques, ces pertes sont très faibles car la résistance d'isolement est en, général, de plusieurs dizaines voire milliers de mégohms.

II.2.4.2. Pertes par hystérésis diélectrique

L'énergie dissipée dans le diélectrique du condensateur en une seconde correspond à une puissance. Comme pour les pertes par conduction, le diélectrique peut être assimilé à une résistance fictive R_{es} (résistance équivalente série) qui dissiperait la même puissance dans des conditions identiques.

Du point de vue des pertes par hystérésis, le condensateur peut être représenté par un condensateur idéal C en série avec la résistance R_s . Les tensions U_p et U_c sont déphasées de 90° . L'angle δ est appelé angle de pertes. On utilise la tangente de cet angle de perte pour exprimer la qualité du diélectrique.

En remplaçant U_p et U_c par leurs valeurs en fonction de R_s et X_c (capacitance de C) on démontre la formule :

$$\operatorname{tg} \delta = 2\pi f C R_s \quad (\text{II-13})$$

Ces pertes sont gênantes car elles peuvent provoquer un échauffement du condensateur et la modification de ses caractéristiques (permittivité du diélectrique, résistance d'isolement, augmentation de l'angle de perte...).

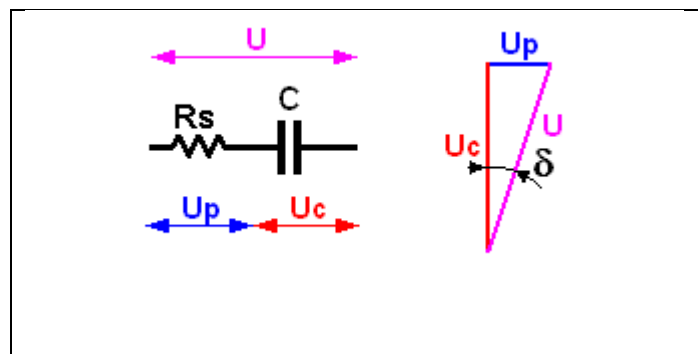


Figure. II.2 : Représentation de condensateur du point de vue des pertes par hystérésis.

II.2.4.2. 1.Caractéristiques de quelques diélectriques

Ces valeurs sont des ordres de grandeurs car les caractéristiques varient dans de grandes proportions.

L'angle de perte est généralement mesurer en basse fréquence (50 Hz à 1kHz) et la résistance d'isolement à 20°C.

Isolant	tg δ
céramique	$<3.10^{-2}$
mica	4.10^{-4}
papier	$<10^{-2}$
Papier métallisé	10^{-2}
polycarbonate	10^{-3}
Polyester (Mylar)	$<5.10^{-4}$
Polystyrène	$<5.10^{-4}$
polysulfone	10^{-4}
PVC	3.10^{-2}
Verre	5.10^{-4}

Tableau. II.1 : Angles de perte à 20°C.

Les pertes totales dans le condensateur sont déterminées par la formule suivante :

$$P_N = 2\pi f C (\tan \delta) V_N^2 \quad (\text{II-14})$$

P_N : Pertes de puissance dans le diélectrique [W].

f : Fréquence [Hz].

C : Capacité diélectrique [F].

$\tan \delta$: Tangente de l'angle de dissipation

V_N : Tension nominale [V].

II.2.5. Pertes dans les redresseurs [5]

On peut écrire, en termes de puissance moyenne dissipée, P_{tot} :

$$P_{\text{tot}} = f E_{\text{on,off}} + d(V_0 I + R I^2) + (1-d) V I + (1-d) V I_R \quad (\text{II-15})$$

Où :

P_{tot} : Pertes de puissance moyenne dissipée [W].

f : Fréquence [Hz].

$E_{\text{on, off}}$: Pertes statiques des états passant et bloqué [W].

d : Rapport du temps de conduction à la période du cycle de commutation (rapport cyclique).

V_0 : Tension de seuil de conduction [V].

I : Courant qui traverse le redresseur [A].

I_R : Courant de fuite dans l'état bloqué [A].

RI^2 : Chute de tension dans la résistance apparente de la « base » du dispositif.

II.3. Les pertes de puissance dues aux harmoniques

L'augmentation du taux de distorsion harmonique en tension, en courant ou les deux ensemble, influe sur les pertes de puissance dans les éléments du réseau électrique (transformateurs, câbles, condensateurs et moteurs...).

Les conducteurs électriques véhiculent des courants harmoniques qui produisent, par effet Joule, un échauffement des conducteurs au même titre que le courant fondamental. Malheureusement, les harmoniques ne contribuant pas au transfert de la puissance active, ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance de l'installation.

II.3.1. Les pertes de puissance dans les transformateurs

Les harmoniques ont deux impacts négatifs sur les transformateurs : d'une part, ils augmentent les pertes en charge, d'autre part, ils augmentent la température des spires et de la structure métallique, réduisant la durée de vie du transformateur.

Les répercussions concrètes des courants harmoniques dépendent en grande partie de leur fréquence, de la conception et de la charge du transformateur.

Les pertes provoquées par les harmoniques augmentent de façon plus que proportionnelle avec l'augmentation de la charge. Par conséquent, dans un transformateur très chargé, les harmoniques peuvent provoquer une perte tellement importante que la température devient trop élevée à certains endroits dans les spires. Cela peut nettement réduire la durée de vie d'un transformateur, et peut même causer des dommages immédiats.

Elles sont classées comme suit :

II.3.1.1. Les pertes Joule dans les enroulements [5]

Des pertes Joule qui sont proportionnelles au carré de l'intensité efficace vraie, donc intégrant les harmoniques.

$$p_{Jh} = R_h I_{eff}^2 \quad (II-16)$$

Où :

$$I_{eff} = I_1 + \sum_{h=2}^n I_h$$

P_{jh} : Pertes Joule dues aux harmoniques [W].

I_{eff} : Courant efficace [A].

I_1 : Courant fondamental [A].

I_h : Courant harmonique [A].

R_h : Résistance harmonique [Ω].

II.3.1.2.Les pertes fer dans le noyau [5]

Elles se décomposent en :

II.3.1.2.1.Les pertes par hystérésis

Une inductance à noyau de fer est génératrice d'harmoniques pour deux raisons :

- La non linéarité de l'induction B et du champ H (production d'harmoniques de rang pair).
- La présence d'un cycle d'hystérésis (production d'harmoniques de rang impair).

Nous nous proposons de représenter point par point la courbe $i(t)$ du courant d'excitation d'une bobine à noyau de fer alimentée sous une tension sinusoïdale u .

On dispose d'une part du cycle d'hystérésis de la bobine, cycle que l'on peut, par un changement d'échelle, mettre sous la forme $B(t)$, d'autre part du graphe $B(t)$ qui, comme le flux, est une sinusoïde décalé de 90° en arrière par rapport à la tension d'alimentation (Fig. II-2).

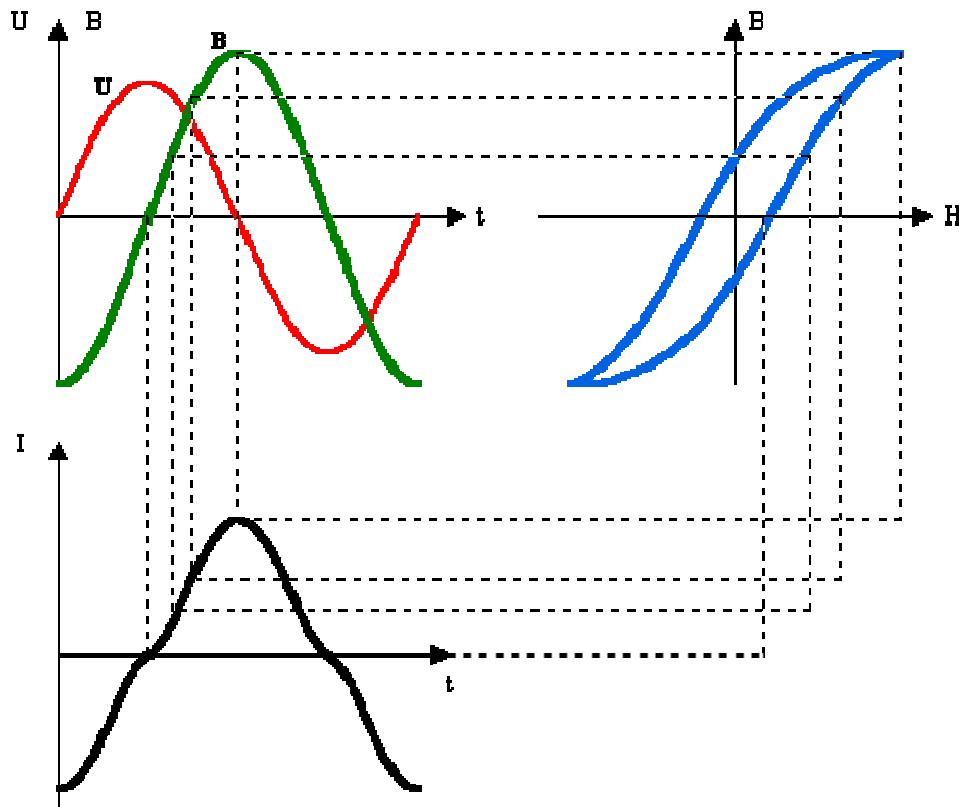


Figure. II.2 : L'influence du cycle d'hystérésis sur la forme du courant $i(t)$ absorbé par une inductance.

Le diagramme ci-dessus montre l'influence du cycle d'hystérésis sur la forme du courant $i(t)$ absorbé par une inductance. Ce courant, en retard d'un quart de période sur la tension, n'est pas une fonction sinusoïdale, mais une fonction périodique qui pourra être décomposée en série de Fourier. Dans ces conditions, la puissance instantanée a une valeur moyenne qui n'est pas nulle.

L'hystérésis entraîne une consommation d'énergie qui, comme les courants de Foucault, apparaît sous forme de chaleur au sein du circuit magnétique.

Pour chaque cycle décrit, l'énergie perdue par unité de volume est proportionnelle à l'aire du cycle. En conséquence, ces pertes augmentent avec la fréquence et avec l'induction maximale.

Pour les réduire, on doit utiliser des tôles de qualité (tôles au silicium) qui ont des cycles d'hystérésis très étroits.

En l'absence de saturation, la déformation du courant pourra être considérée comme négligeable.

Ces pertes sont calculées par la formule suivante :

$$P_{hys} = VSfh \quad (\text{II-17})$$

Où :

P_{hys} : Pertes par hystérésis [W].

S : Surface du cycle d'hystérésis [TA/m].

V : Volume du circuit magnétique [m³].

f : Fréquence [Hz]

h : Rang harmonique.

2. Les pertes par courants de Foucault [5]

Ces pertes qui sont, d'après la formule suivante, proportionnelles au carré de la fréquence, mettent en évidence l'importance de la présence néfaste des harmoniques.

$$P_f = \frac{\pi^2 d^2}{6\rho} B_{\text{eff}}^2 f^2 \quad (\text{II-18})$$

Où :

ρ : Résistivité du matériau [Ω/mm^2].

d : Epaisseur des tôles magnétiques (largeur de la lame) [mm].

B_{eff} : Induction efficace [T].

f : Fréquence au rang h [Hz].

Les pertes totales de puissance dues aux harmoniques dans les transformateurs s'expriment par :

$$P_{hT} = \frac{P_N}{(1 + K_w)} \sum_h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \left[1 + \frac{K_w \sum_h \left(\frac{h I_h}{I_1} \right)^2}{\sum_h \left(\frac{I_h}{I_1} \right)} K_{h1} \right] \quad (\text{II-19})$$

Où :

P_{hT} : Pertes de puissance dues aux harmoniques dans un transformateur [W].

P_N : Pertes de puissance dues au fondamental [W].

I_1 : Courant fondamental [A].

I_h : Courant harmonique [A].

I_N : Courant nominal [A].

$K_w = 0.04$ (coefficient de pertes fer).

$$K_{h1} = -0.87 + (3.853h^{0.5}) - (2.263h) + (0.1058h^{1.5}) + (0.2337h^2) - (0.06478h^{2.5}) + (0.005235h^3)$$

II.3.2. Les pertes dans les moteurs [5]

La présence de tensions harmoniques se traduit par la circulation des courants harmoniques dans les enroulements du moteur et crée donc des échauffements supplémentaires ainsi qu'une altération du couple moteur. Ces pertes s'expriment par :

$$P_{hM} = P_1 + 35P_{Nm} \left(\frac{V_1}{V_N} \right)^2 \sum_{h=2} \frac{1}{h} \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2 \quad (\text{II-20})$$

$$P_{Nm} = 0.746 HP \left(\frac{100 - \eta}{\eta} \right) \quad (\text{II-21})$$

Où :

P_{hM} : Pertes de puissance dues aux harmoniques dans le moteur [W].

P_1 : Pertes de puissance dues au fondamental [W].

V_1 : Tension du fondamental [W].

V_N : Tension nominale [V].

V_h : Tension harmonique [V].

P_M : Pertes de puissance dans le moteur [W].

η : Rendement.

HP=736 [W].

II.3.3. Les pertes dans les câbles [10]

Un courant harmonique qui circule dans un conducteur entraîne une augmentation des pertes et une augmentation de la température du conducteur.

Les pertes dans les câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées par :

-L'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence, phénomène dû à l'effet de peau.

-L'élévation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence.

Les pertes de puissance sont en fonction de $3rl^2$; le tableau II.2 représente les valeurs de R_{dc} qui sont utilisées dans le calcul des pertes pour les conducteurs le cuivre et l'aluminium.

Section (mm ²)	Aluminium (Ω/km)	Cuivre (Ω/km)
70	0.433	0.255
95	0.319	0.188
120	0.253	0.149
150	0.202	0.119
185	0.164	0.097
240	0.126	0.074

Tableau.II.2 : Résistance admissible maximale (R_{dc}) de chaque conducteur/km à 20°C.

La circulation de courants harmoniques dans le câble se traduit par des pertes Joule.

La relation approximative est donnée par :

$$P_{hc} = 3L \sum_{h=2} r_h I_h^2 \quad (\text{II-22})$$

$$r_h = r_c \left(1 + \frac{1}{12} f h \frac{\mu}{2} r_c - \frac{1}{180} f h \frac{\mu}{2} r_c \right)$$

$$\mu = 4\pi 10^{-7}$$

Où :

P_{hc} : Pertes de puissances dues aux harmoniques dans le câble [W].

r_h : Résistance harmonique [Ω].

L : Longueur du câble [m].

I_h : Courant harmonique [A].

r_c : résistance du câble en continu [Ω].

h : rang harmonique.

f : fréquence [Hz].

La puissance dissipée est limitée pour éviter les points chauds. Les câbles sont dimensionnés pour supporter un courant efficace. La présence de composantes harmoniques se traduit donc par une nécessité de déclassement à 50Hz du courant admissible.

II.3.4. Les pertes dans les condensateurs

Les condensateurs sont particulièrement sensibles à la circulation des courants harmoniques du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang élevé des harmoniques en présence dans le signal déformé.

Lorsqu'un condensateur est parcouru par un courant distorsionné, la tension à ses bornes n'a pas la même forme d'onde que celle du courant. Ceci est dû au fait que le condensateur ne présente pas la même réactance à la fréquence fondamentale et aux harmoniques.

Les pertes dans le condensateur sont ainsi affectées par la présence des harmoniques. Ces pertes ont leur origine dans le diélectrique qui sépare les plaques métalliques. En première approximation, on peut considérer que les pertes sont proportionnelles à la fréquence, et au carré de la tension correspondante aux bornes du condensateur.

Les pertes sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans le diélectrique dues à la surtension.

Les condensateurs sont sensibles aux surcharges qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence des tensions harmoniques.

Ces pertes sont définies par l'angle de perte (δ) du condensateur. On les exprime par l'expression suivante :

$$P_{hcond} = P_{Ncond} \sum_{h=2} h \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2 \quad (\text{II-23})$$

$$P_{Ncond} = 2\pi f C (\tan \delta) V_N^2$$

Où :

P_{hca} : Pertes de puissance dues aux harmoniques dans le condensateur [W].

P_{Nca} : Pertes de puissance dans le condensateur à l'onde fondamentale [W].

H : Rang harmonique.

V_h : Tension harmonique [V].

V_1 : Tension à l'onde fondamentale [V].

F : Fréquence [Hz].

C : Capacité [F].

$\tan \delta$: Tangente de l'angle de dissipation.

V_N : Tension nominale [V].

La relation (II-23) est valable si on suppose que $\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_h$ et $V_1 = V_N$.

II.3.5. Les pertes dans les redresseurs [5]

L'électronique de puissance a donné naissance à de nombreuses applications offrant au client un confort, une flexibilité et une efficacité. Cependant, au cours de la dernière décennie certains problèmes ont surgi tels que les pertes de puissance dues aux harmoniques générées par cette charge non linéaire. Ces pertes s'expriment par :

$$P_{hred} = 3R_{hred} I_h^2 \quad (\text{II-24})$$

Où :

$$I_h = \frac{I_1}{\left(h - \frac{5}{h}\right)^{1.2}}$$

$$R_{hred} = \frac{1}{\pi^2 \sigma \delta a} k \left(\frac{r}{a} \right) \left(1 - \exp \left\{ \frac{-2b}{\delta} \right\} \right)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu_0 \sigma f h}} \quad r = \sqrt{a^2 - b^2}$$

P_{hred} : Pertes dues aux harmoniques dans le redresseur [W].

I_h : Courant harmonique [A]

I_1 : Courant fondamental [A]

R_{hred} : Résistance harmonique [Ω].

μ_0 : Perméabilité du vide.

r : Facteur de correction $a=2$: $b=1.9$

f : Fréquence [Hz].

$\delta=5.88*400*10^7$

k : facteur de déclassement.

L'ensemble de ces pertes va entraîner un déclassement des transformateurs et des machines ayant à supporter des harmoniques. Le facteur de déclassement est :

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0.1 \sum_{n=2}^{n=\infty} h^2 n^{1.6}}}$$

Avec :

h : Taux individuel d'harmonique.

n : Rang d'harmonique.

II.3.5.Conclusion

Le courant et la tension harmoniques causent des pertes. Ces pertes augmentent avec l'augmentation d'ordre harmonique (fréquence), et, par conséquent, pour la plus haute fréquence, les composantes harmoniques peuvent être très importantes causant l'échauffement du matériel électrique.

Dans le circuit aimanté du transformateur les pertes se composent des pertes Joule dans les enroulements et des pertes fer dans le noyau (hystérésis et courants de Foucault). Tous les harmoniques causent l'augmentation des pertes dans les enroulements et le noyau du transformateur.

L'effet Joule diminue le rendement des machines et des lignes de transport car l'énergie calorifique est de l'énergie perdue.

L'élévation de température consécutive à l'effet Joule peut abréger la durée de vie des machines. En effet, quand une machine est surchargée, son échauffement est supérieur à la valeur normale, ce qui provoque la détérioration des isolants qui entourent ses conducteurs.

Dans ces conditions sa durée de vie est abrégée ; la machine peut même être mise totalement hors d'usage.

III.1 Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons présenté la théorie généralisée de l'énergie électrique, l'origine des perturbations, leurs propagations, leurs effets, leurs caractérisations et d'autres aspects importants pour l'analyse de la qualité de l'énergie. Dans ce paragraphe, les techniques d'amélioration de la qualité sont analysées.

Une qualité de fourniture idéale n'est ni possible ni viable, car elle aurait un coût excessif. Le but des distributeurs d'énergie est d'assurer un niveau de qualité suffisamment élevée de façon à permettre le fonctionnement satisfaisant de la plupart des charges pendant la plupart du temps, et ce, avec un investissement permettant une exploitation rentable du réseau. Normalement, ceci est le cas des pays développés où, mis à part les cas exceptionnels comme les orages de très grande intensité, catastrophes naturelles etc., la qualité de fourniture est plus qu'acceptable pour la grande majorité des clients.

La nécessité d'amélioration de la qualité dans nos réseaux est aujourd'hui un aspect très localisé qui concerne des zones et des charges très spécifiques. Néanmoins, elle peut devenir plus fréquente dans l'avenir à cause de l'évolution des charges (charges plus polluantes, plus sensibles, charges actives ou générateurs intermittents, etc.).

Donc, l'objectif de l'amélioration de la qualité est l'élimination ou la minimisation des perturbations agissant sur les charges, là où le niveau de qualité n'est pas suffisamment élevé pour une charge donnée, donc quand les coûts et les inconvénients de son dysfonctionnement sont inacceptables. Par conséquent, le domaine de l'amélioration de la qualité est un domaine d'études non seulement technique mais également économique, car l'objectif est de trouver une solution qui permettra de réduire à un niveau acceptable les coûts et inconvénients des imperfections de la fourniture sous contrainte de coût raisonnable qui sera en général amorti par la réduction du temps de dysfonctionnement de la charge. Evidemment, ceci est très souvent difficile à évaluer, car l'économie produite par la réduction du temps de dysfonctionnement n'est pas évidente à évaluer. Ce coût dépend énormément du type de charge et il est donc nécessaire de réaliser une étude individualisée pour chaque installation. De plus, quelques analystes proposent de tenir compte non seulement des coûts des matériaux mais aussi des coûts dérivés comme, par exemple, la baisse de la productivité produite par l'impact des dysfonctionnements répétitifs sur le moral des travailleurs, ce qui complique encore plus l'évaluation du coût.

En ce qui concerne la partie technique de l'étude, il est nécessaire d'identifier la nature des perturbations, leurs caractéristiques et leurs origines, pour ensuite pouvoir proposer différentes méthodes d'amélioration. Il n'y a pas une solution standard pour tous les problèmes de fourniture et

il faut choisir les mieux adaptées pour chaque application, en prenant en compte certains critères techniques et économiques.

Une fois constatée la nécessité d'améliorer la qualité de fourniture d'une charge ou d'un ensemble de charges données et identifiées les caractéristiques et la nature des perturbations qui provoquent sa dégradation, il faut choisir la technique d'amélioration à implanter.

En général, il y a deux types de stratégies possibles d'amélioration de la qualité d'énergie :

- Stratégies de prévention des perturbations.
- Stratégies de minimisation des effets des perturbations par filtrage.

Dans ce chapitre, on va analyser les différentes techniques d'amélioration de la qualité qui peuvent être utilisées pour minimiser les conséquences des perturbations agissant sur la forme d'onde et sur la valeur de la tension du réseau. On réalise un bilan général des méthodes de prévention et des stratégies de minimisation des effets des perturbations sur les charges.

III.2 Normes et réglementations [10]

Au niveau international, les normes 1000 de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définissent le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser. La norme CEI-1000-3-2 (tableau III.1) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A.

Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme. Par ailleurs, un projet de norme (CEI-1000-3-4) est en cours d'élaboration pour les appareils dont le courant consommé est supérieur à 16A

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques en tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement (tableau III.2).

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rangs	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rangs	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2,30	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,30
9	0,40	$8 \leq k \leq 40$	$0,23 * 8/k$
11	0,33		
13	0,21		
$15 \leq k \leq 39$	$0,15 * 15/k$		

Tableau III.1 : Limite des composantes harmoniques en courant pour les équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A.

Harmoniques impairs non Multiple de 3		Harmoniques impairs Multiple de 3		Harmoniques pairs	
Rang	$V_k(\%)$	Rang	$V_k(\%)$	Rang	$V_k(\%)$
5	6	3	5	2	2
7	6	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
25	1,5				
> 25	$0,2 + 0,5 * 25/k$				

Tableau III.2 : Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension

Le respect de ces normes impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau de tension, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques.

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques.

La première classe de solutions s'intéresse à la conception des circuits tandis que la seconde, que nous présentons par la suite consiste à filtrer les courants ou les tensions harmoniques. Les principales techniques se rattachant à cette dernière approche sont proposées et comparées dans la suite de ce chapitre.

III.3 Stratégies de prévention des perturbations

Avant d'envisager de mettre en place une solution de filtrage pour combattre les harmoniques, il faut vérifier certaines stratégies de prévention et de réduction des perturbations harmoniques.

III.3.1 Modification du mode de raccordement [7]

Le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé, si possible, sur la source qui présente l'impédance la plus faible, (transformateur le plus puissant par exemple). Lorsque l'impédance de source est faible, la puissance de court-circuit est importante, ce qui réduit les problèmes dus aux harmoniques. Aussi, les charges polluantes doivent être raccordées le plus en amont possible de la source afin de bénéficier du niveau le plus élevé de puissance de court circuit. D'autre part, il faut éviter de raccorder un récepteur sensible à proximité d'une charge déformante. La position de branchement des charges déformantes au sein d'une installation revêt ainsi un double intérêt :

- assurer la séparation des charges,
- bénéficier de la puissance de court circuit la plus élevée (Figure 3.1).

La séparation des sources est aussi une solution employée bien que coûteuse. Elle consiste à attribuer un transformateur indépendant pour l'alimentation unique de la charge non linéaire.

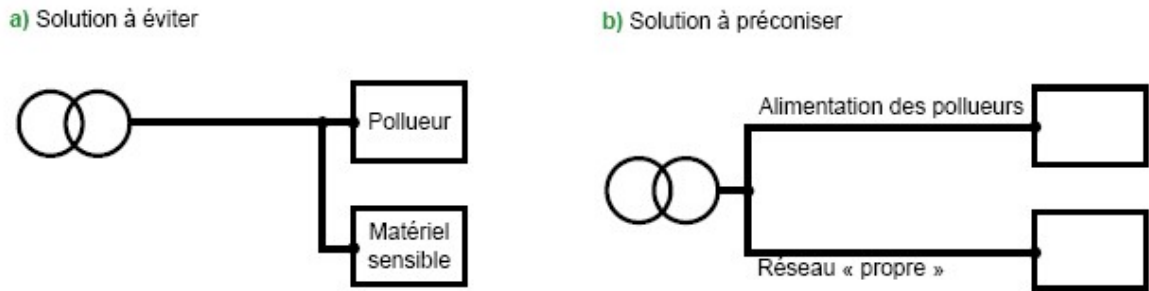


Figure 3.1 : Préconisation de raccordement des charges déformantes.

III.3.2 Un bon choix des disjoncteurs [7]

Les harmoniques peuvent provoquer des déclenchements intempestifs des dispositifs de protection. Pour les éviter, il convient de bien choisir ces appareils.

Les disjoncteurs peuvent être équipés de deux types de déclencheurs, magnétothermiques ou électroniques.

Les premiers cités sont surtout sensibles aux harmoniques par leurs capteurs thermiques qui appréhendent bien la charge réelle imposée aux conducteurs par la présence des harmoniques. De ce fait ils sont bien adaptés à leur usage, essentiellement domestique et industriel, sur les circuits de petites intensités. Les seconds, selon leur mode de calcul des intensités véhiculées, peuvent présenter le risque de déclenchement intempestif, aussi il convient de bien choisir ces appareils et de veiller à ce qu'ils mesurent la valeur efficace vraie du courant (RMS). De tels appareils présentent alors l'avantage de mieux suivre l'évolution de la température des câbles notamment dans le cas de charges à fonctionnement cyclique car leur mémoire thermique est plus performante que celle des bilames à chauffage indirect.

III.3.3 Le déclassement [7]

Cette solution, applicable à certains équipements, est une réponse facile et souvent suffisante à la gêne occasionnée par les harmoniques.

III.3.4 Un bon choix des condensateurs de compensation de l'énergie réactive [7]

L'installation de batteries de condensateurs pour compenser l'énergie réactive engendre au point de raccordement et aux nœuds proches, une ou plusieurs résonances. Les conséquences pour les batteries de condensateurs sont :

- un risque de surcharge en raison des surintensités qui les traversent,

- un risque de claquage si les tensions harmoniques à leurs bornes sont très élevées,
- une augmentation du courant harmonique injecté sur le réseau,
- une augmentation du courant harmonique en provenance du réseau amont vers les condensateurs.

En dehors des résonances, les batteries de condensateurs ont un effet bénéfique sur le réseau, car elles absorbent les courants harmoniques.

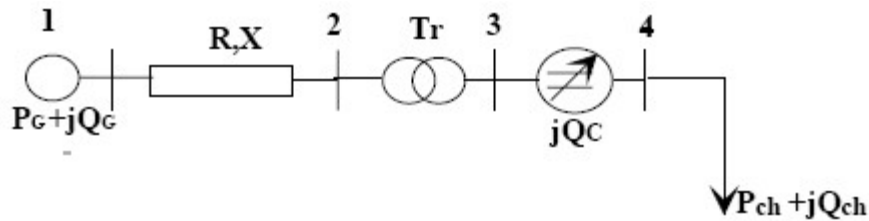


Figure 3.2 : Schéma d'alimentation d'un réseau électrique avec une compensation série

III.3.4.1. Premières précautions

- **Réduire la puissance des batteries de condensateurs au minimum nécessaire**

Il convient d'adapter la puissance des condensateurs à la puissance réactive effectivement consommée, par exemple en utilisant des régulateurs var métriques ou à défaut, une horloge si la charge a un cycle de fonctionnement régulier.

En effet, lorsque la puissance appelée par l'installation est faible, les facteurs d'amplification augmentent sensiblement (l'impédance à la résonance est inversement proportionnelle à la puissance active de la charge alimentée). Les batteries de condensateurs participent alors inutilement au relèvement des niveaux de tensions harmoniques de rangs faibles sur les réseaux internes.

- **Mettre hors service les batteries de condensateurs sur les réseaux à vide**

Il peut être alors préférable de les mettre hors service, car, en général, on ne risque pas de surcharge en courant au niveau du transformateur.

- **Augmenter la puissance de court circuit de l'alimentation aux bornes des batteries de condensateurs**

On obtient cela en les connectant le plus en amont possible. Cela a pour effet d'augmenter les fréquences de résonance vers des rangs où l'on trouve moins d'injections harmoniques.

- Séparer électriquement les convertisseurs des batteries de condensateurs de compensation d'énergie réactive.

III.3.4.2 Eviter la résonance [2]

La résonance peut se produire en présence de l'association de condensateurs et d'inductances, il est impératif de choisir la valeur de la capacité de relèvement du facteur de puissance de telle sorte que la fréquence de résonance soit éloignée des rangs harmoniques caractéristiques (rangs 3, 5, 7, etc.).

La fréquence de résonance peut ainsi être connue à l'avance afin de vérifier qu'elle ne coïncide pas avec une fréquence harmonique caractéristique (150Hz, 250Hz, 350Hz, etc.).

La démarche est la suivante : L'inductance globale du circuit amont s'obtient à partir de la puissance de court circuit :

Avec :

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{VV}{VI} = \frac{V^2}{S_{cc}} = L\omega$$

$$S_{cc} = \frac{S_{transformateur}}{U_{cc}}$$

Soit l'inductance :

$$L = \frac{V^2}{S_{cc}\omega}$$

La puissance réactive du condensateur est :

$$Q = CV^2\omega$$

On déduit la capacité :

$$C = \frac{Q}{V^2\omega}$$

L'expression de la fréquence :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

On remplace, au sein de cette dernière relation, les expressions précédentes de L et de C :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\frac{V^2}{S_{cc}\omega} \frac{Q}{V^2\omega}}} = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

Et $\omega = 2\pi f$.

La fréquence de résonance s'écrit à présent :

$$f_r = f \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

Le risque de résonance est écarté lorsque cette fréquence est très élevée.

Reprenons, en exemple, l'installation évoquée précédemment et présentant les caractéristiques suivantes :

- puissance active absorbée par le récepteur : 490 kW,
- puissance réactive déterminé pour la batterie de condensateur : 136 kVAR,
- puissance de court circuit au niveau du jeu de barres : 10 MVA,
- réseau 400 V ; 50 Hz.

La fréquence de résonance prédéterminée est ainsi de :

$$f_r = f \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} = 50 \times \sqrt{\frac{10000}{136}} = 429 \text{ Hz}$$

Cette fréquence de 429 Hz, proche du rang 9(450Hz), devra faire l'objet d'une étude particulière afin de vérifier si le rang harmonique 9 est présent sur le réseau du fait des charges non linéaires raccordées sur l'installation en question.

Avant d'effectuer un choix technologique de la batterie de condensateur, il faut donc vérifier que la fréquence de résonance calculée est éloignée des fréquences harmoniques sur le réseau. Le réajustement de la puissance réactive de cette batterie devra être réalisé de façon à s'écarter de ces fréquences harmoniques.

III.3.5 Remplacement du réseau par une source alternative non perturbée [2]

Ce principe d'amélioration est très simple, il consiste à détecter une perturbation, de décider si elle est inacceptable du point de vue de la qualité et de procéder à son remplacement par une autre source (qui peut être une autre connexion au réseau ou une génératrice locale).

III.3.6 Compensation des perturbations provenant du réseau [1]

Dans ce cas-là, on ne remplace pas la source perturbée, mais on superpose une autre source d'énergie qui est capable d'absorber ou compenser les perturbations, de façon à éviter qu'elles arrivent à la charge. Cette superposition peut être réalisée en connectant la source compensatrice en série avec le réseau, en parallèle ou bien des deux manières simultanément (connexion dite universelle).

III.3.7 Le surdimensionnement du conducteur du neutre [1]

Les alimentations à découpage et les éclairages fluorescents à ballast électronique sont de plus en plus fréquents dans les installations tertiaires.

Le fort pourcentage d'harmonique 3 dans ce type de charge peut avoir un impact important sur le dimensionnement du conducteur de neutre.

Dans un immeuble de bureaux, le courant dans le conducteur de neutre peut atteindre 1,4 à 1,7 fois le courant dans une phase. Plusieurs types de dispositifs peuvent être utilisés pour éliminer les effets des courants harmoniques de rang 3.

Les principales solutions à la surcharge du conducteur de neutre sont les suivantes :

- Utiliser un conducteur de neutre séparé pour chaque phase,
- Doubler le calibre du conducteur de neutre.

III.3.8 Confinement des harmoniques [12]

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation.

Si le montage est un montage équilibré, les harmoniques de rang $3k$ sont en phase. En l'absence de neutre, ces courants ne peuvent circuler.

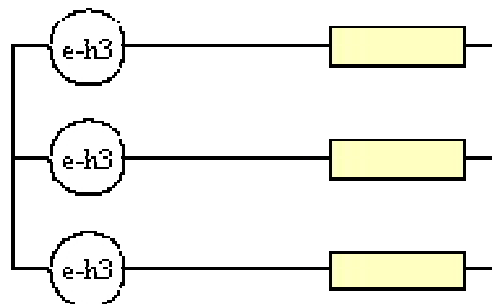


Figure 3.3 : Schéma équivalent d'un montage équilibré en l'absence de neutre

Si on raccorde le neutre à un tel montage, les harmoniques de rang $3k$ peuvent circuler dans chacune des phases, et s'additionnent dans le neutre.

La présence dans le neutre de ces courants harmoniques de rang $3k$ obligent à surdimensionner ce conducteur. Dans certains cas (éclairage fluorescent, alimentations électroniques,...), ces courants peuvent être supérieurs au fondamental.

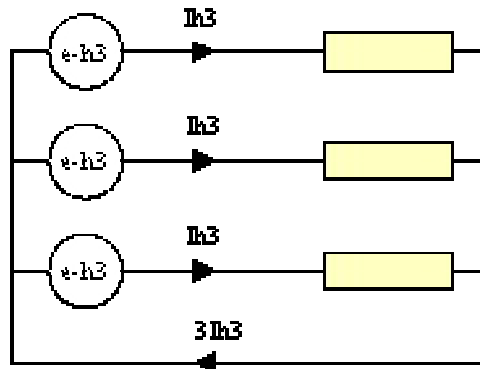


Figure 3.4 : Schéma équivalent d'un montage équilibré en présence de neutre

Pour éviter la circulation de ces courants de rang $3k$ sur l'ensemble du réseau, il faut effectuer un découplage par transformateur.

III.3.8.1 Transformateur Yzn

L'utilisation d'un transformateur dont le primaire est couplé en étoile et le secondaire en zigzag permet d'éliminer au primaire les courants de pulsation $3k$.

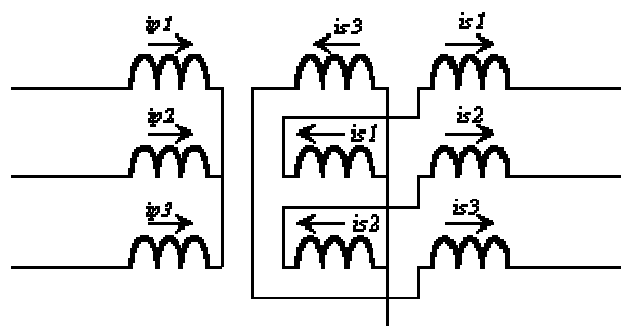


Figure 3.5 : Transformateur YZn et atténuation des harmoniques de rangs $3k$.

Le courant qui circule dans le premier enroulement primaire vaut :

$$i_{p1} = \frac{n_2}{n_1} (i_{s1} - i_{s3})$$

Avec pour les courants de pulsation $3k$

$$i_{s1}(3k) = i_{s1}(3k) \sin 3k\omega t$$

$$i_{s3}(3k) = i_{s3}(3k) \sin 3k(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

$$= i_{s3}(3k) \sin(3k\omega t - \frac{12k\pi}{3})$$

$$= i_{s3}(3k) \sin(3k\omega t - 4k\pi)$$

$$= i_{s3}(3k) \sin(3k\omega t)$$

Le courant au primaire vaut donc :

$$i_{p1}(3k) = \frac{n_2}{n_1} (i_{s1}(3k) - i_{s3}(3k))$$

III.3.8.2 Transformateur triangle – étoile Dyn

Les courants harmoniques de rang $3k$ circulant au secondaire d'un transformateur triangle – étoile ne sont pas transmis à la ligne d'alimentation du transformateur. Cette disposition est couramment utilisée en distribution, ce qui évite la circulation de courants harmoniques de rang $3k$ dans les réseaux de distribution et de transport. Sachant que le courant dans le neutre ne peut dépasser 1,7 fois le courant dans chaque phase, ceci est une solution technologique simple pour éviter la surcharge du conducteur de neutre.

A noter que l'élimination des courants harmoniques de rang $3k$ n'est totale que si les charges sont parfaitement équilibrées. Dans le cas contraire, les courants harmoniques de rang $3k$ des 3 phases ne sont pas égaux et ne se compensent pas totalement aux sommets du triangle.

Les harmoniques de rang $3k$ étant en phase, ils ne peuvent circuler sur le réseau en amont du transformateur.

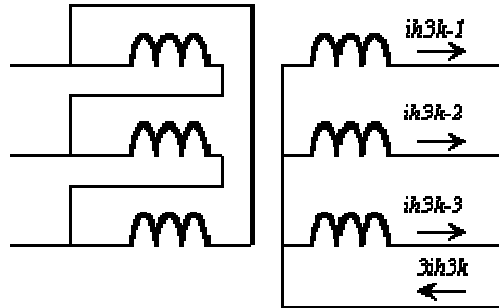


Figure 3.6 : Schéma d'un transformateur Dyn

Il est également possible d'éliminer en ligne certains rangs d'harmoniques en les déphasant. Le calcul montre que ce sont les rangs $6k \pm 1$ avec k impair qui peuvent être éliminés, c'est à dire essentiellement les rangs 5 et 7 qui sont les plus importants en amplitude. Pour cela, il faut :

- que les récepteurs pollueurs aient la même puissance et utilisent la même technologie
- utiliser :
 - soit un transformateur Dyn
 - soit un transformateur avec deux secondaires déphasés de 30° .

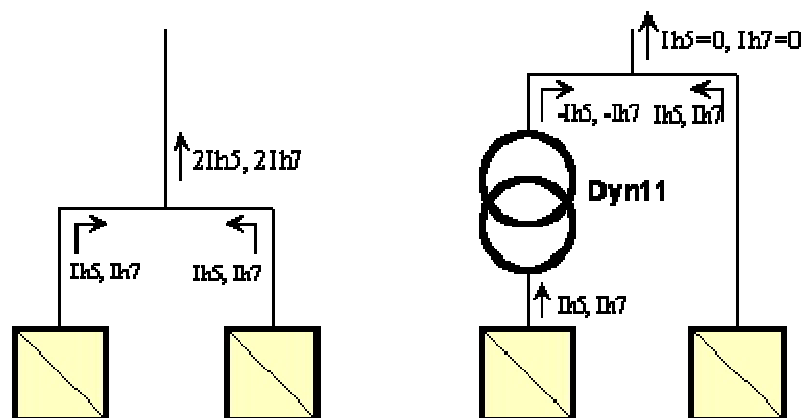


Figure 3.7 : Modèle d'utilisation d'un transformateur Dyn11

III.4 Stratégies de minimisation des effets des perturbations.

Un certain nombre de solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles et le réseau EDF vis-à-vis de la pollution harmonique.

III.4.1 Inductance anti harmoniques de protection des condensateurs [2], [7]

D'autres solutions sont utilisées, notamment dans les convertisseurs d'énergie de type onduleurs ou variateurs de vitesse, mettant en œuvre une inductance en série avec le récepteur déformant. L'inductance, dont l'impédance augmente avec la fréquence, conduit à réduire l'amplitude des harmoniques de rang élevé. Lorsque cette inductance est placée en amont du convertisseur polluant, on observe une diminution sensible des courants générés par l'équipement sur le réseau d'alimentation électrique et, par conséquent, du taux de distorsion harmonique en tension.

Une autre solution, utilisée pour la protection des condensateurs de relèvement du facteur de puissance, consiste à placer en série avec le condensateur une inductance appelée inductance anti harmoniques. La valeur de la fréquence de résonance de l'ensemble du montage doit être placée en dessous des valeurs de fréquences harmoniques présentes, protégeant ainsi les condensateurs de compensation d'énergie réactive contre les surcharges harmoniques comme le décrit la figure 3.8.

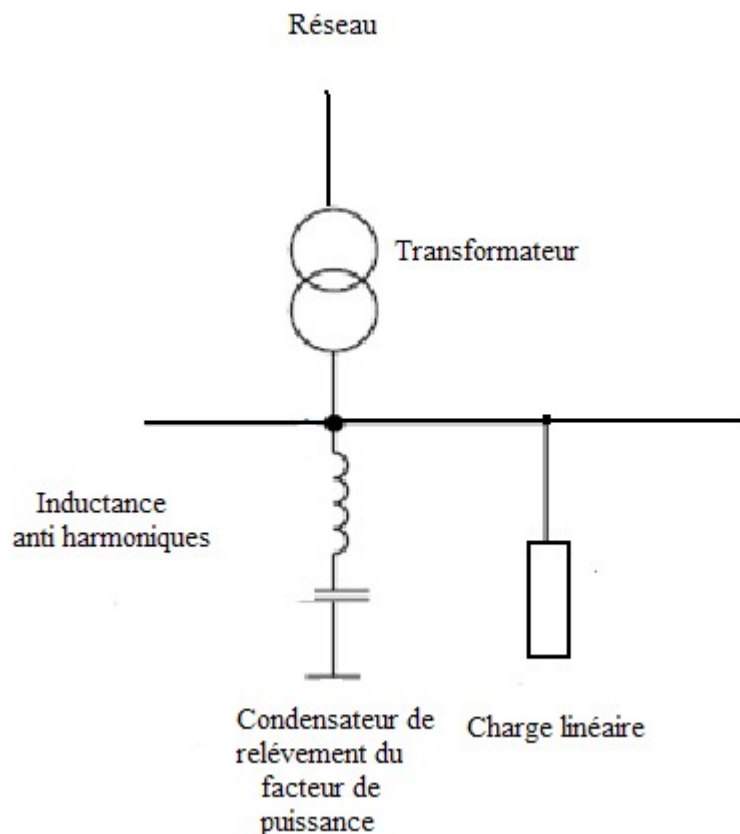


Figure 3.8 : Montage de l'inductance anti harmoniques.

L'emploi d'une inductance anti-harmonique présente alors un double intérêt :

- elle supprime les risques de claquage du condensateur dus au fort courant harmonique (l'impédance d'un condensateur diminue avec l'augmentation de fréquence),
- elle réduit les taux de distorsion harmonique en tension sur le réseau considéré.

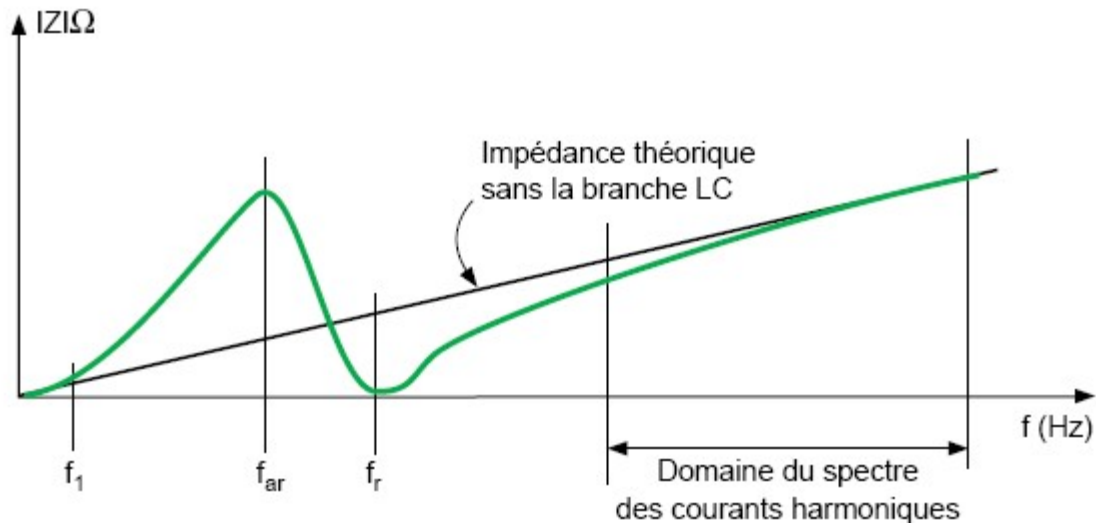


Figure 3.9 : L'impédance du réseau vue du jeu de barres de raccordement de la branche L-C.

L'inductance L doit être calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents dans l'installation. Cette règle permet de supprimer les risques de forts courants harmoniques dans les condensateurs. Le schéma équivalent montre que ce circuit présente :

- une résonance parallèle appelée antirésonance pour la fréquence :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{cc} + L)C}}$$

- une résonance série dans la branche L C, pour la fréquence

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

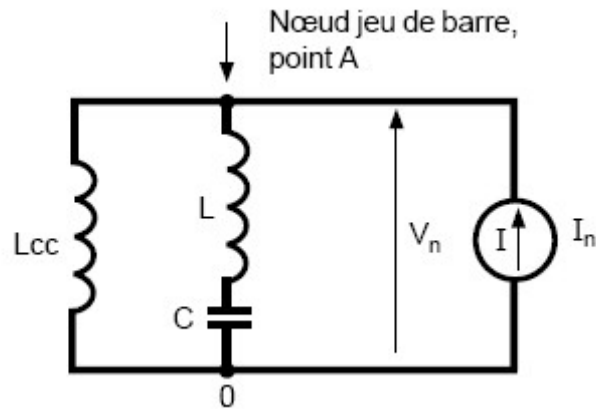


Figure 3.10 : Self, placée en série avec le condensateur.

Le choix de f_{ar} dépend de l'impédance de court circuit du réseau (L_{cc}) et du circuit LC, alors que celui de L_c ne dépend que de L et de C . La courbe qui suit représente la variation de l'impédance en fonction de la fréquence, vue du jeu de barres.

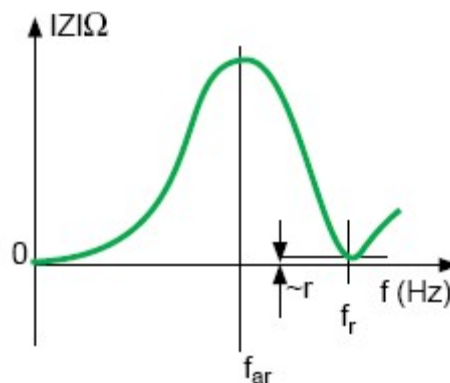


Figure 3.11 : Impédance du réseau au point A.

Cependant, des précautions s'imposent :

- Il ne doit pas y avoir d'autres batteries de condensateurs pouvant donner, par une antirésonance, un caractère capacitif au réseau initial dans le domaine du spectre.

- Il faut veiller à ne pas placer la fréquence d'antirésonance sur une fréquence de télécommande du distributeur, car cela provoquerait une charge accrue des générateurs Haute Fréquence (175 Hz, 188 Hz). Or les fréquences d'accord f_r des inductances anti harmoniques sont généralement comprises entre 135 et 225 Hz pour un réseau 50 Hz.

- A cause du spectre continu, l'inductance anti harmoniques ne s'applique au four à arc qu'avec certaines précautions (études particulières).

III.4.2 Solution de filtrage [7]

La limitation à une faible valeur spécifiée des tensions harmoniques du réseau est spécifique de l'emploi des filtres.

Il existe deux classes de filtrage permettant de réduire les tensions harmoniques :

- Filtrage passif,
- Filtrage actif.

III.4.2.1 Filtrage passif

Contrairement à l'utilisation présentée précédemment, le filtre passif associe un condensateur et une inductance placée en série, dans le but d'obtenir la fréquence de résonance sur un harmonique donné. Le filtre passif est donc défini au cas par cas afin d'être accordé sur un harmonique précis à filtrer.

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- le filtre résonant (ou filtre de type *shunt*),
- le filtre amorti.

III.4.2.1.1 Le shunt résonant

Le filtre shunt résonant est constitué par la branche L-C dont la fréquence d'accord f_r

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

est placée sur la fréquence de la tension harmonique que l'on veut éliminer.

Cette finalité diffère fondamentalement de celle de l'inductance anti harmoniques.

Le shunt résonant présente, à f_r , une impédance minimale réduite à la résistance r de l'inductance.

Il dérive donc en lui-même la presque totalité des courants harmoniques injectés de fréquence f_r , avec un taux de tension harmonique de fréquence f_r faible, car proportionnel au produit de la résistance r par le courant traversant le filtre.

En principe, il y a autant de shunts résonants que d'harmoniques à traiter, à raccorder au jeu de barres où la réduction des tensions harmoniques est spécifiée. Leur ensemble constitue une batterie.

La figure 3.12 représente l'impédance harmonique d'un réseau équipé d'une batterie de quatre filtres de rang 5, 7, 11 et 13. Elle montre qu'il y a autant d'antirésonances que de filtres. Ces antirésonances doivent se situer entre les raies du spectre. Ce qui impose, si une segmentation de la batterie est jugée nécessaire, une étude soignée.

III.4.2.1.1.1 Principales caractéristiques d'un shunt résonant

Elles sont fonction de $n_r = f_r / f_1$ rang d'accord du filtre, avec :

- f_r : fréquence d'accord,
- f_1 : fréquence du fondamental (ou industrielle, 50 Hz par exemple).

Ces caractéristiques sont :

- **La puissance réactive de compensation Q_{var}**

Le shunt résonant, capacitif au-dessous de son accord, réalise la compensation d'énergie réactive à la fréquence industrielle.

La puissance réactive de compensation du shunt sous la tension de service U_1 au jeu de barres de raccordement, est donnée par la formule :

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} u_1^2 C 2\pi f_1$$

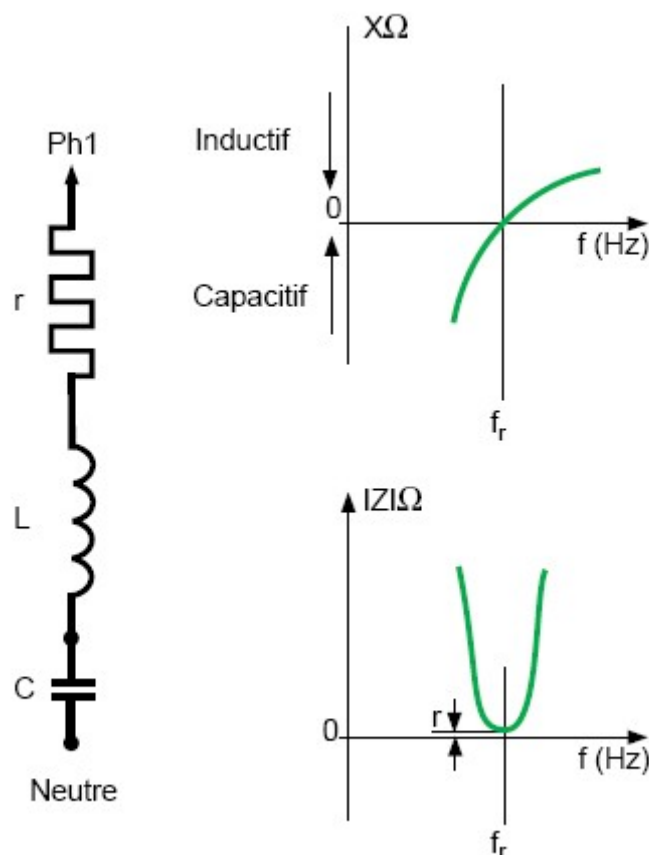


Figure 3.12 : Filtre résonant.

Rappel : L'indice **1** est relatif au fondamental ; **C** étant la capacité phase neutre d'une des trois branches de la batterie vue en étoile.

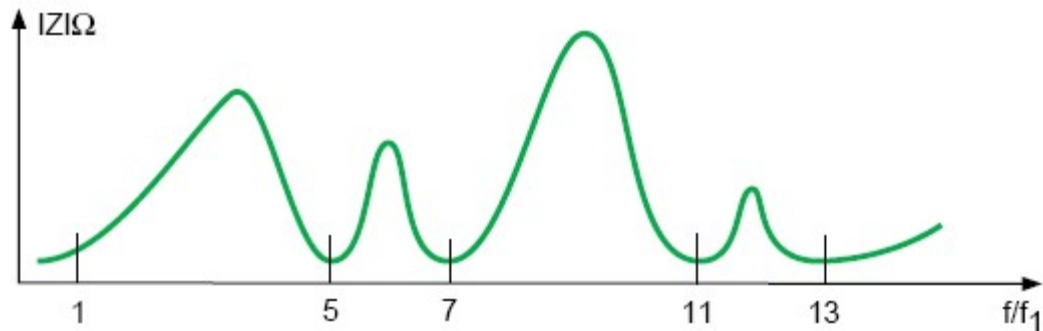


Figure 3.13 : Impédance d'un réseau équipé de filtres shunt.

A première vue, il semble paradoxal que la présence de l'inductance augmente l'énergie réactive fournie, cependant, cela s'explique par l'augmentation de tension à fréquence industrielle f_1 provoquée par l'inductance sur les bornes des condensateurs.

- **L'impédance caractéristique X_0**

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- **Le facteur de qualité q**

$$q = \frac{X_0}{r}$$

Un filtre efficace doit avoir une inductance possédant un grand facteur q , donc $r \ll X_0$ à la fréquence f_r .

- **Ordres de grandeur de q :**
 - 75 pour les inductances dans l'air,
 - supérieur à 75 pour les inductances à fer.
- **La bande passante (figure 3.14) en valeur relative BP**

$$BP = \frac{1}{q} = 2 \frac{f - f_r}{f_r} = \frac{r}{X_0}$$

- **La résistance de l'inductance, r**

Elle est définie à la fréquence f_r , et elle est fonction de l'effet de peau. C'est aussi l'impédance à l'accord du shunt résonant.

$$r = \frac{X_0}{q}$$

- **Les pertes dues au courant capacitif à fréquence fondamentale, p1**

$$P_1 = \frac{Q_{var}}{qn_r}$$

Avec :

- Q_{var} : puissance de compensation réactive du filtre,
- p_1 : pertes du filtre à fréquence industrielle en W.

- **Les pertes dues aux courants harmoniques**

Ces courants ne peuvent pas s'exprimer par de simples formules ; elles sont supérieures à l'expression de P_n dans laquelle U_{nr} est la tension composée harmonique de rang n_r sur le jeu de barres après filtrage.

$$P_n = \frac{U_{nr}^2}{r}$$

Dans la pratique, les performances du shunt résonant sont limitées par des causes de désaccord du filtre. Des solutions spécifiques sont donc à prévoir :

- pour pallier de façon satisfaisante les inconvénients des tolérances de fabrication, des prises de réglage peuvent être placées sur l'inductance ;
- la sensibilité au désaccord, pour accepter des variations de f_l (fréquence du réseau), et de f_r (Provoquées par des variations de la capacité des condensateurs en fonction de la température), peut être réduite par un juste compromis entre son facteur q et ses performances de filtrage.

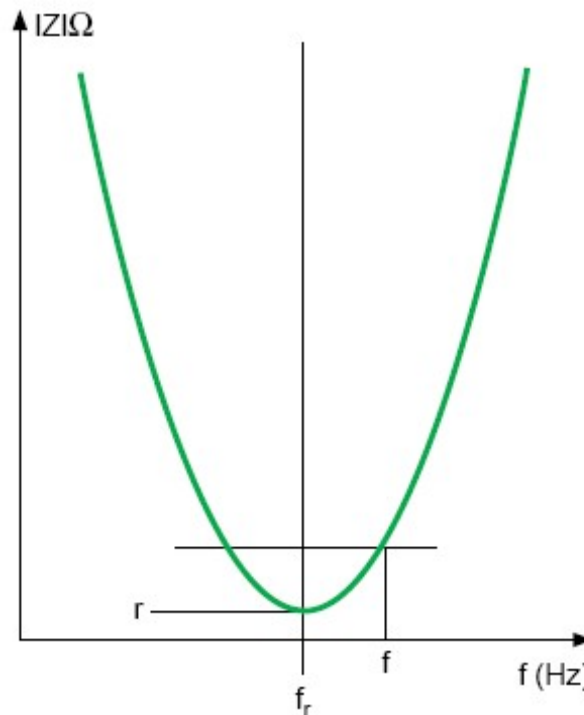


Figure 3.14 : Courbe $Z = f(f)$ d'un shunt résonant.

III.4.2.1.2 Les filtres amortis

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance. Il est utilisé pour des applications susceptibles de générer des courants harmoniques proches de l'anti résonance. On distingue :

- **Le filtre amorti d'ordre deux**

Sur four à arc, le shunt résonant doit être amorti. En effet, le spectre continu du four à arc traduit une probabilité d'un courant injecté de fréquence égale à celle de l'antirésonance. Alors il ne faut plus se contenter de réduire les tensions harmoniques de rang caractéristique, mais également réduire les antirésonances, les amortir. D'autre part, le montage d'un nombre élevé de shunts résonants en batterie n'est pas économique, la solution est de faire appel à un filtre de large spectre qui possède les propriétés suivantes :

- amortir les antirésonances,
- réduire les tensions harmoniques de fréquences égales ou supérieures à son accord, d'où le nom de « filtre amorti passe-haut »,
- amortir rapidement le régime transitoire à la mise sous tension du filtre.

Le filtre amorti d'ordre deux est constitué d'un shunt résonant auquel est adjointe, aux bornes de l'inductance, une résistance d'amortissement R. La figure 3.15 représente une des trois phases du filtre.

Le filtre amorti d'ordre deux présente une réactance nulle pour la fréquence f_r plus grande que la fréquence f avec :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Et

$$f_r = \frac{1 + Qq}{2\pi q\sqrt{(Q^2 - 1)LC}}$$

.

Où :

Q = facteur de qualité du filtre amorti,

q = facteur de qualité de l'inductance.

Sachant que le filtre est étudié pour que f_r coïncide avec la première raie caractéristique du spectre à filtrer, cette raie est généralement la plus importante.

Lorsque Q (ou R) tend vers de fortes valeurs, f_r tend vers f, ce qui revient à écrire que le shunt résonant est un cas limite du filtre amorti d'ordre deux.

Ne pas confondre Q facteur de qualité et Qvar puissance réactive de compensation du filtre.

- **Fonctionnement d'un filtre amorti d'ordre deux :**

- **Au dessous de f_r**

La résistance d'amortissement contribue à la réduction de l'impédance du réseau à l'antirésonance, donc réduit les tensions harmoniques éventuelles.

- **A f_r**

La réduction de la valeur de la tension harmonique à une valeur spécifiée est possible car, à cette fréquence, il ne peut pas exister de résonance entre le réseau et le filtre, ce dernier présentant alors une impédance à caractère purement résistif. Cependant, cette impédance étant plus élevée que la résistance r de l'inductance, il en résulte une performance de filtrage inférieure au shunt résonant.

- Au dessus de f_r

Le filtre présente une réactance inductive de même nature que le réseau (inductif), ce qui lui permet une certaine absorption des raies de spectre supérieures à f_r , et notamment un spectre continu. Cependant, la présence éventuelle d'antirésonances dans l'impédance du réseau sans le filtre, dues à des batteries de condensateurs existantes, réduit les performances du filtrage.

Aussi, les batteries existantes doivent être prises en compte dans l'étude de réseau, et quelquefois, faire l'objet d'aménagements.

Les principales caractéristiques électriques du filtre amorti d'ordre deux sont fonction de $n_r = f_r/f_1$ rang d'accord du filtre, avec :

- f_r = fréquence d'accord,
- f_1 = fréquence du fondamental (ou industrielle, 50 Hz par exemple).

Ces caractéristiques sont :

- La puissance réactive de compensation .Pour un filtre amorti d'ordre deux sous la tension de service U_1 (l'indice 1 est relatif au fondamental), elle est sensiblement celle du shunt résonant de même inductance et même capacité, soit en pratique :

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} U_1^2 C 2\pi f_1$$

C étant la capacité phase neutre d'une des trois branches de la batterie vue en étoile.

-L'impédance caractéristique X_0 :

$$X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- Le facteur de qualité de l'inductance $q = X_0/r$

Avec

r : résistance de l'inductance, fonction de l'effet de peau, définie à la fréquence f_r .

- Le facteur de qualité du filtre $Q = R/X_0$

Les facteurs de qualité Q utilisés sont généralement compris entre 2 et 10.

- Les pertes dues au courant fondamental de compensation et aux courants harmoniques sont plus élevées que celles du shunt résonant et ne peuvent être déterminées que par l'étude de réseau.

Le filtre amorti est utilisé seul, ou bien en batterie de deux filtres, ou bien associé à un shunt résonant, dans ce cas le shunt résonant est placé sur la plus basse des raies du spectre.

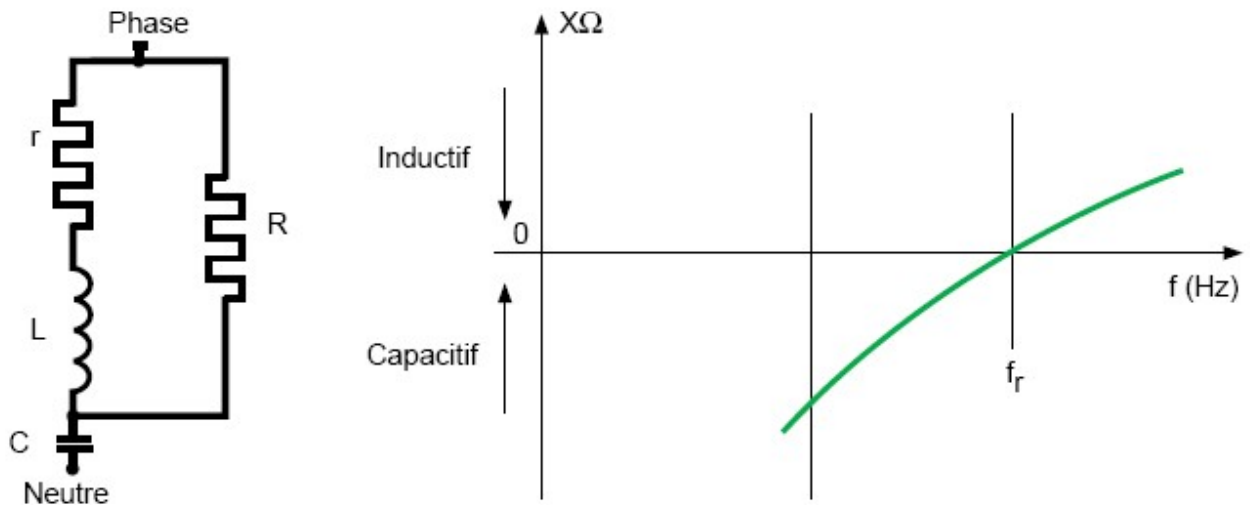


Figure 3.15 : Filtre amorti d'ordre 2.

La figure 3.16 permet de comparer l'impédance d'un réseau selon qu'il comporte un filtre amorti d'ordre deux, ou un shunt résonant.

- **Le filtre amorti d'ordre trois (Figure 3.17 -a)**

De conception plus complexe que le filtre d'ordre deux, le filtre d'ordre trois est spécifique des fortes puissances de compensation.

Le filtre d'ordre trois est obtenu à partir du filtre d'ordre deux par adjonction d'une batterie complémentaire C_2 en série avec la résistance R , cette disposition permet la réduction des pertes dues au fondamental.

Le choix de C_2 permet également d'améliorer le comportement du filtre au dessous de la fréquence d'accord, ce qui est favorable à la réduction de l'antirésonance.

Le filtre d'ordre trois devrait se trouver sur les premières fréquences du spectre.

Cependant, la complexité du filtre d'ordre trois et l'aspect économique qui en découle, rendent le filtre d'ordre deux souvent préférentiel dans le domaine industriel.

- **Le filtre amorti type C (Figure 3.17-b)**

Dans ce filtre, la batterie auxiliaire C_2 est en série avec l'inductance. Ce filtre a sensiblement les mêmes propriétés que le filtre d'ordre trois.

- **Le filtre double amorti (Figure 3.17- c)**

Composé de deux shunts résonants reliés par une résistance R , ce filtre amortit surtout l'antirésonance située entre les deux accords.

- **Le shunt résonant à faible q**

Ce filtre, se comportant comme un filtre amorti à large bande, est d'un usage spécifique : il ne pourrait convenir que pour de très petites unités ne devant pas assurer de compensation de réactif, car l'inductance ayant une très forte résistance (souvent du fait de l'adjonction d'une résistance série) entraîne des pertes prohibitives dans le domaine industriel.

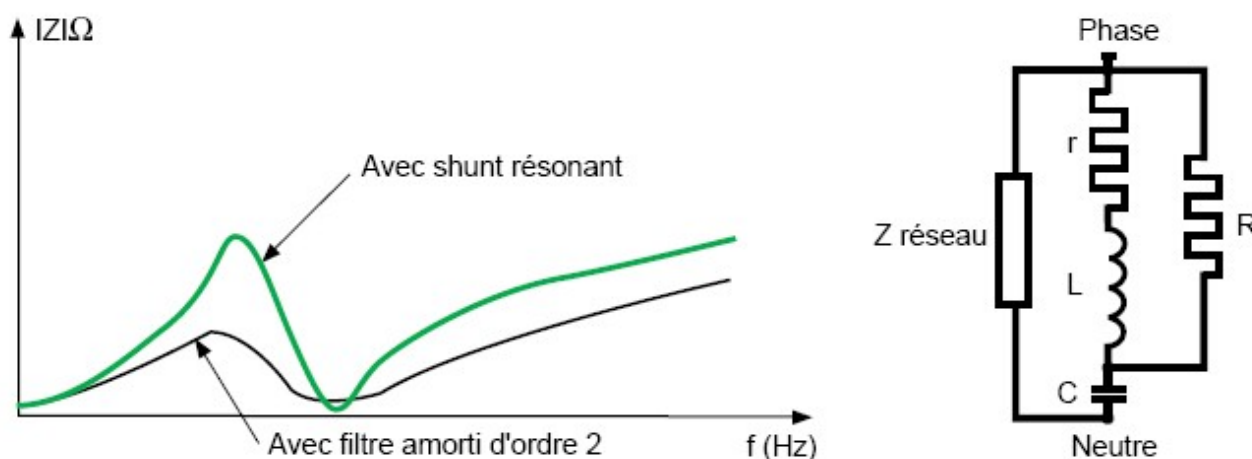


Figure 3.16 : L'impédance, vue du point A, d'un réseau comportant soit un filtre d'ordre deux, soit un shunt résonant.

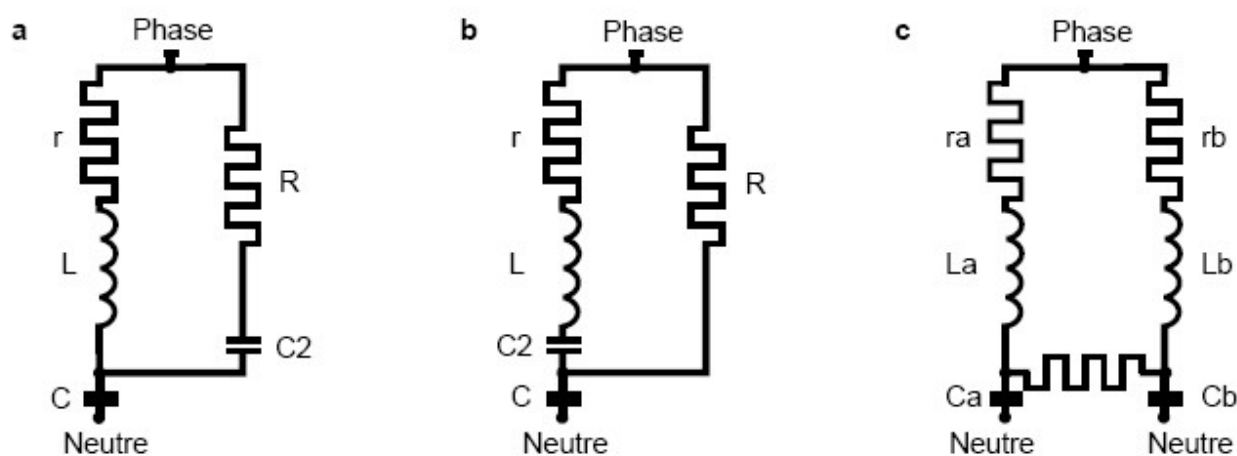


Figure 3.17 : Filtre amorti d'ordre 3 [a] ; filtre type C [b] ; filtre double, amorti [c].

III.4.2.2 Le filtrage actif

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorées par les constructeurs de ces équipements.

Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé par la charge quasi sinusoïdal.

Ces filtres actifs, encore appelés compensateurs actifs, sont utilisés en parallèle ou en série au sein d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Le filtre actif est d'une utilisation plus large que le filtre passif puisqu'il peut compenser plusieurs rangs harmoniques à la fois.

L'association d'un filtre passif avec un filtre actif est baptisée filtre hybride et nécessite de paramétrer le filtre actif sur des fréquences d'accord différentes de celle du filtre passif.

Le principe du filtre actif de type shunt réalise l'injection d'un courant dit compensateur en opposition avec le courant déformé absorbé par la charge non linéaire. Le courant résultant en amont de la charge est un courant reconstitué proche de la sinusoïde classique, transformant alors, vis-à-vis du réseau, la charge non linéaire en une charge linéaire. Les effets néfastes des harmoniques sont ainsi annulés. La figure 3.18 donne une représentation schématique de ce type de filtre.

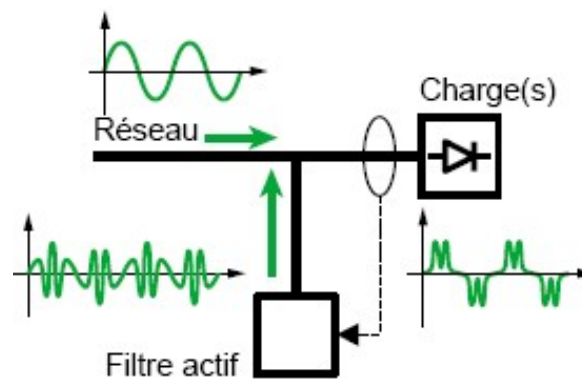


Figure 3.18 : Principe du filtrage actif

Le filtre actif constitue une solution intéressante pour la dépollution des réseaux industriels. Cet équipement, intégrant des technologies d'électronique de puissance à commutation rapide est capable de s'adapter automatiquement aux valeurs des rangs harmoniques présents sur le réseau électrique de l'installation. D'autre part, ce dispositif n'affecte pas les caractéristiques d'impédance ou de résonance du réseau.

Le filtre actif peut être mis en œuvre, au sein d'une installation, en compensation globale pour différents pollueurs ou encore en compensation locale pour une charge déformante importante en puissance.

Les filtres actifs trouvent de nombreuses utilisations, notamment pour des convertisseurs d'énergie de type onduleur.

III.4.2.3 Filtrage hybride (mixte actif-passif).

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques ; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance / coût et d'avoir une meilleure tenue en tension.

De nombreuses variantes sont possibles, mais peu ont été réalisées industriellement. Des performances élevées sont possibles, même avec un filtre actif de puissance réduite.

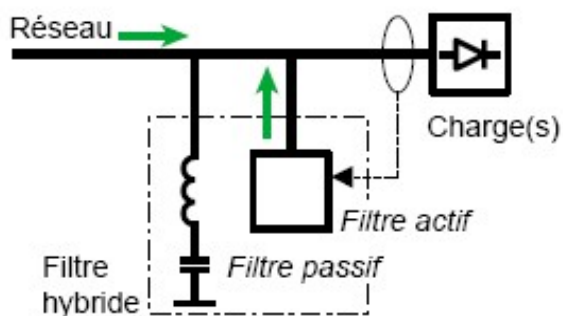


Figure 3.19 : Principe du filtrage hybride



Figure 3.20 : Equipement Rectifiasse de marque Merlin Gerin.

III.5 .Conclusion

La croissance de l'utilisation des charges polluantes perturbatrices du réseau électrique est devenue un problème majeur. Le traitement de ce problème se fait avec plusieurs stratégies. Les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution. Elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

De nouvelles méthodes ont été mises au point telles que les filtres actifs qui sont plus souples et performants. C'est ainsi que dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives.

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présentons un exemple d'application pour lequel nous avons évalué les pertes de puissance dues aux harmoniques dans chaque élément du réseau de distribution. L'évaluation des pertes se fera à l'aide d'un programme de calcul réalisé sous MATLAB. Il est représenté sous la forme d'organigramme ci-dessous :

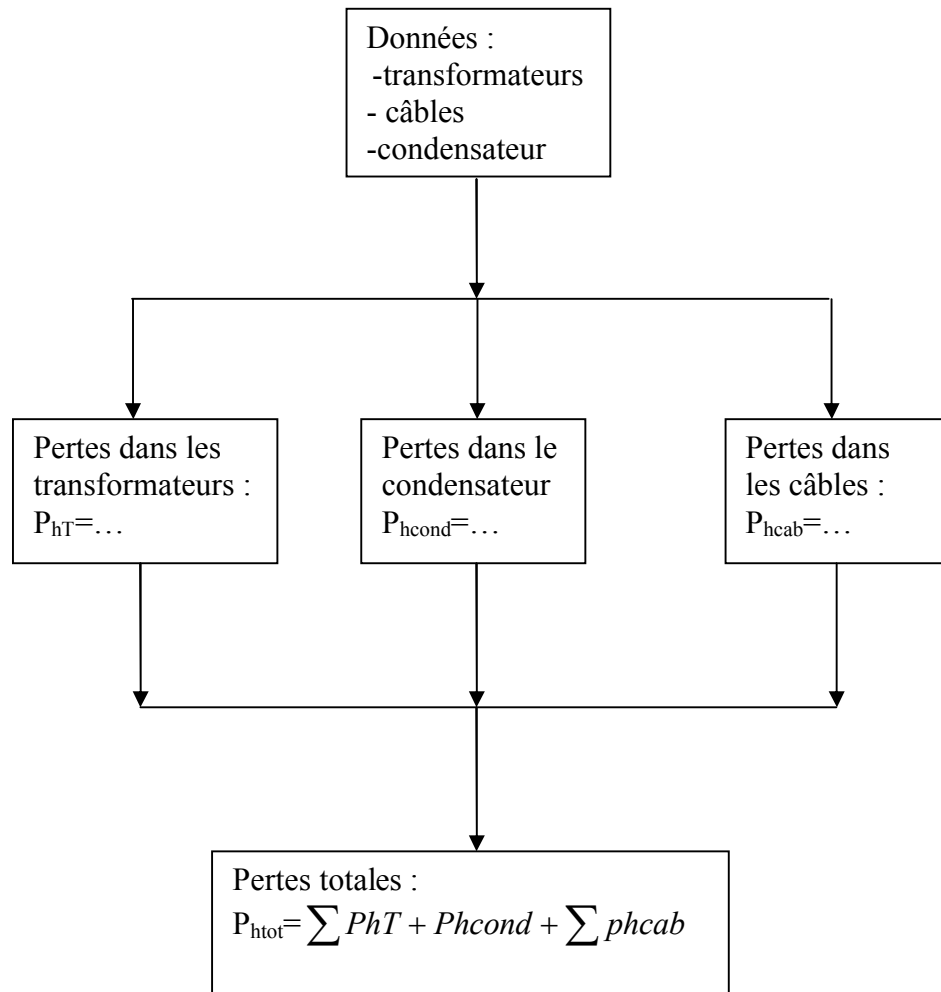


Figure 4.1 : Organigramme de calcul

IV.2.Application

L'application se fera sur un réseau de distribution industriel équilibré constitué de deux générateurs : un générateur d'approvisionnement de service (G1), un générateur local (G2), treize jeux de barre, sept transformateurs, un condensateur, une charge polluante raccordée au jeu de barre N° 7, et cinq charges saines. L'usine est alimentée par une tension de service de 69 kV et le réseau local de distribution d'usine fonctionne à 13.8kV. Ce réseau est montré dans la figure 4.1. Ses caractéristiques sont données.

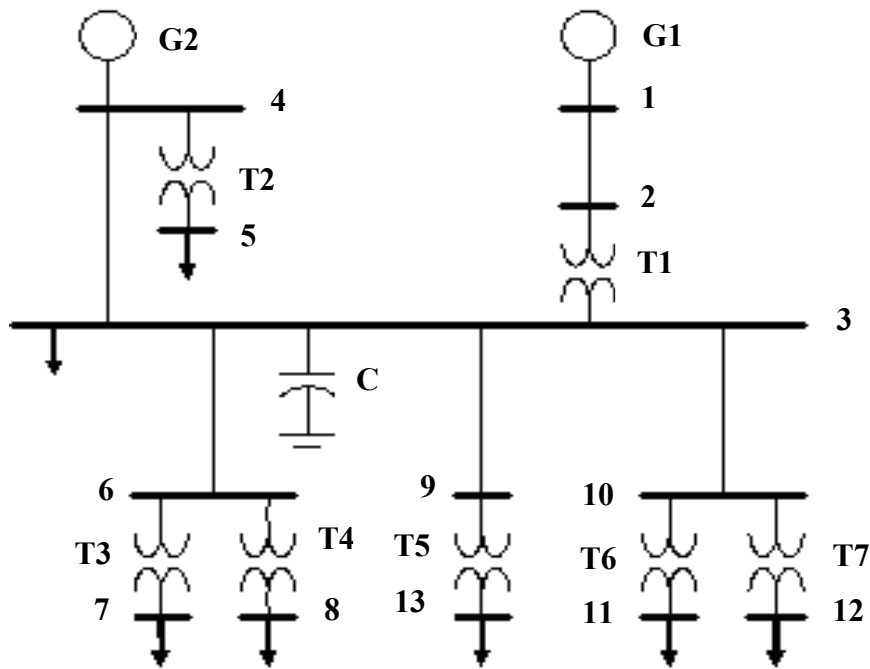


Figure 4.1 : Réseau de distribution industriel équilibré

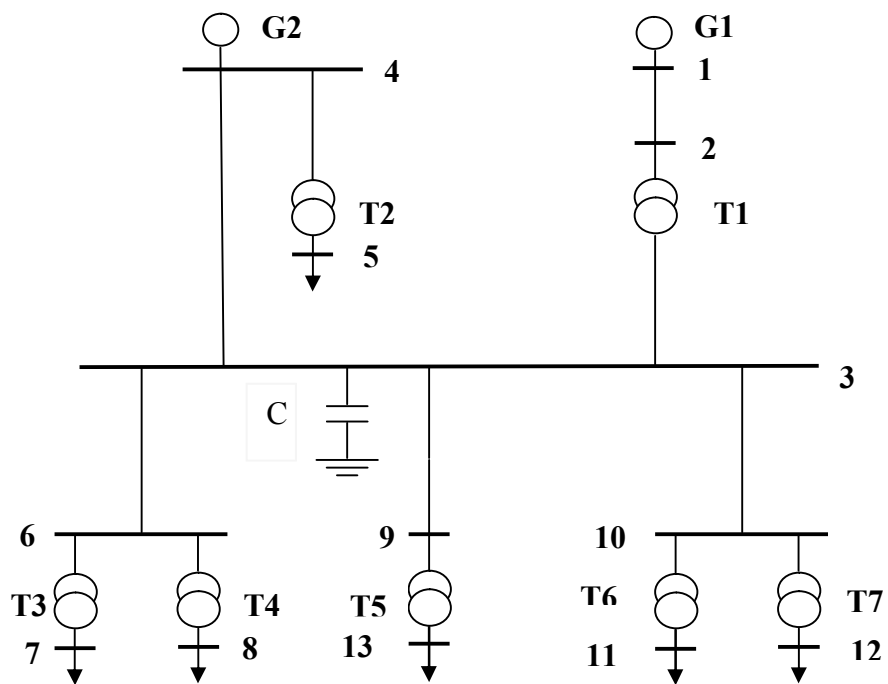


Figure 4.2 : Le schéma électrique équivalent du système industriel équilibré

Harmoniques	Courant (%)	Angle de déphasage par rapport au fondamental
1	100.00	0.00
5	18.24	-55.68
7	11.90	-84.11
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.58
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30
23	0.94	-24.61
25	0.86	-67.64
29	0.71	-145.46
31	0.62	176.83
35	0.44	97.40
37	0.38	54.36

Tableau IV.1 : Données de base de la source harmonique

Jeux de barre	V ₁ (V)	V ₅ (V)	V ₇ (V)	TDH _v (%)
1	39645.7	40.37	104.23	0.28
2	39538	52.36	135.14	0.37
3	7712.77	53.51	138.13	1.93
4	7726.55	51.72	133.51	1.87
5	262.74	1.72	4.40	1.81
6	7709.24	54.07	138.35	1.94
7	269.89	1.279	12.83	8.02
8	2240.05	14.83	37.21	1.80
9	7709.07	53.48	138.04	1.93
10	7703.35	53.43	137.91	1.93
11	260.40	1.78	4.59	1.90
12	1302.74	8.58	21.78	1.81
13	256.29	1.71	4.36	1.84

Tableau IV.2 : Les tensions harmoniques.

Jeux de barre	P_{gen} (kW)	Q_{gen} (kVAR)	P_{ch} (kW)	Q_{ch} (kVAR)
1	7450	540	-	-
2	-	-	-	-
3	-	-	2240	2000
4	2000	1910	-	-
5	-	-	600	530
6	-	-	-	-
7	-	-	1150	290
8	-	-	1310	1130
9	-	-	-	-
10	-	-	-	-
11	-	-	370	330
12	-	-	2800	2500
13	-	-	810	800

Tableau IV.3 : Les puissances actives et réactives sur les jeux de barre

IV.3. Présentation des données des éléments du réseau

IV.3.1. Les transformateurs

Transformateur	Tension nominale primaire	Tension nominale secondaire	S (kVA)	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)
T1	69	13.8	15000	0.75	12.67	13.68
T2	13.8	0.48	1500	0.61	3.60	3.65
T3	13.8	0.48	1250	0.56	3.38	3.43
T4	13.8	4.16	1725	0.41	3.29	3.31
T5	13.8	0.48	1500	0.56	3.61	3.71
T6	13.8	0.48	1500	0.53	3.45	3.49
T7	13.8	2.4	3750	0.12	1.39	1.4

Tableau IV.3 : Données des transformateurs

IV.3.2. Les câbles

Câbles	R (Ω)	X (Ω)	Z (Ω)
1-2	0.6620	1.410	1.5576
3-4	0.02323	0.04628	0.05178
3-6	0.01428	0.01200	0.01865
3-9	0.02990	0.02495	0.03894
3-10	0.02076	0.01733	0.302704

Tableau IV.4 : Les données des câbles

Câble	V ₁ (V)	V ₅ (V)	V ₇ (V)
1-2	107.7	12	30.91
3-4	13.78	1.79	4.62
3-6	3.43	0.56	0.22
3-9	3.7	0.3	0.09
3-10	9.42	0.08	0.22

Tableau IV.5 : Les chutes de tension dans les câbles.

IV.3.3.Le condensateur

Q=6000 kVAR

V_c=7713V

$$C = \frac{Q}{3 * 2\pi * f * V_c^2}$$

C=1.07 10⁻⁴F

IV.4. Calcul des courants dans les différents éléments

IV.4. 1.Calcul des courants dans les transformateurs

Transformateur	I _{1T} (A)	I _{5T} (A)	I _{7T} (A)
T1	79.08	3.34	6.15
T2	47.34	0.13	0.28
T3	14.61	2.17	9.74
T4	84.29	0.30	0.65
T5	91.84	0.24	0.50
T6	62.13	0.13	0.25
T7	151.86	0.59	1.30

IV.4.2.Calcul des courants dans les câbles

Câble	I _{1ca} (A)	I _{5ca} (A)	I _{7ca} (A)
1-2	79.08	3.34	6.15
3-4	222.46	7.70	14.18
3-6	189.28	9.19	2.58
3-9	91.84	0.24	0.50
3-10	348.55	0.90	1.79

IV.4.3. Les données pour le condensateur

Rang (h)	1	5	7
$V_{\text{hcond}} \text{ (V)}$	7712.77	53.51	138.13
$\text{tang}\delta_h$	0.004	0.004	0.004

IV.5. Les pertes de puissance dans les différents éléments

Les pertes de puissance dues aux harmoniques et pour le fondamental dans les différents éléments du réseau sont présentées dans les tableaux suivants :

IV.5.1. Dans les transformateurs

Transformateur	$P_1 \text{ (kW)}$	$P_5 \text{ (kW)}$	$P_7 \text{ (kW)}$
T1	14.071	0.036	0.130
T2	4.101	0.00044	0.0022
T3	0.359	0.0113	0.243
T4	8.870	0.0016	0.0079
T5	14.170	0.0014	0.0064
T6	6.138	0.0004	0.0015
T7	8.282	0.0018	0.0093
$P_{\text{tot}} \text{ (kW)}$	55.991	0.0529	0.4003

IV.5.2. Dans les câbles

Câble	$P_1 \text{ (kW)}$	$P_5 \text{ (kW)}$	$P_7 \text{ (kW)}$
1-2	12.419742	0.022155	0.075115
3-4	3.414703	0.004091	0.013874
3-6	1.504731	0.003547	0.000280
3-9	0.759113	0.000005	0.000023
3-10	7.653687	0.000051	0.000202
$P_{\text{tot}} \text{ (kW)}$	25.751976	0.029849	0.089493

IV.5.3. Dans le condensateur

Rang (h)	1	5	7
Pertes (kW)	24	0.006	0.054

IV.5.4. Les pertes totales dues aux harmoniques et au fondamental dans le réseau

Rang (h)	1	5	7
Pertes (kW)	105.743	0.088	0.544

IV.6. Tableau récapitulatif des résultats obtenus

Les éléments du réseau	Les pertes totales dues aux harmoniques dans chaque élément (kW)	Le % des pertes harmoniques de chaque élément par rapport aux pertes harmoniques totales du réseau.	Les pertes de puissance totales dans chaque élément du réseau (kW)	Le % des pertes de puissance dans chaque élément par rapport aux pertes totales dans le réseau.
Transformateurs	0.45	45.47	56.44	32.36
Câbles	0.48	48.54	93.93	53.85
Condensateur	0.06	6.02	24.06	13.79
P_{tot}	0.99	100	174.44	100

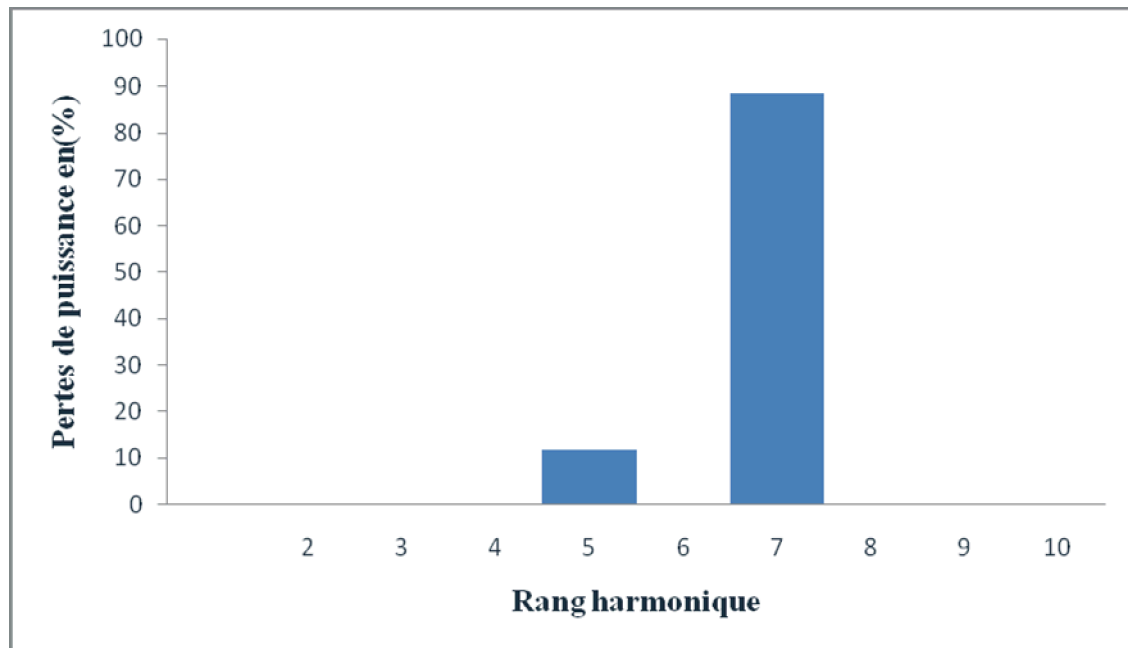


Figure 4.3 : Pertes de puissance dues aux harmoniques dans les transformateurs

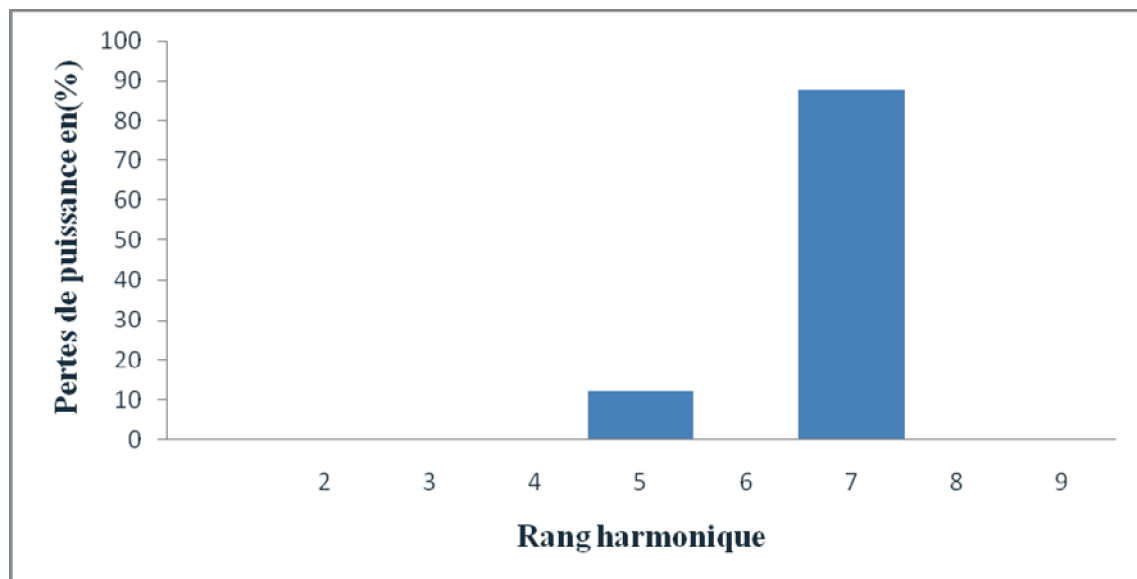


Figure 4.4 : Pertes de puissance dues aux harmoniques dans les câbles

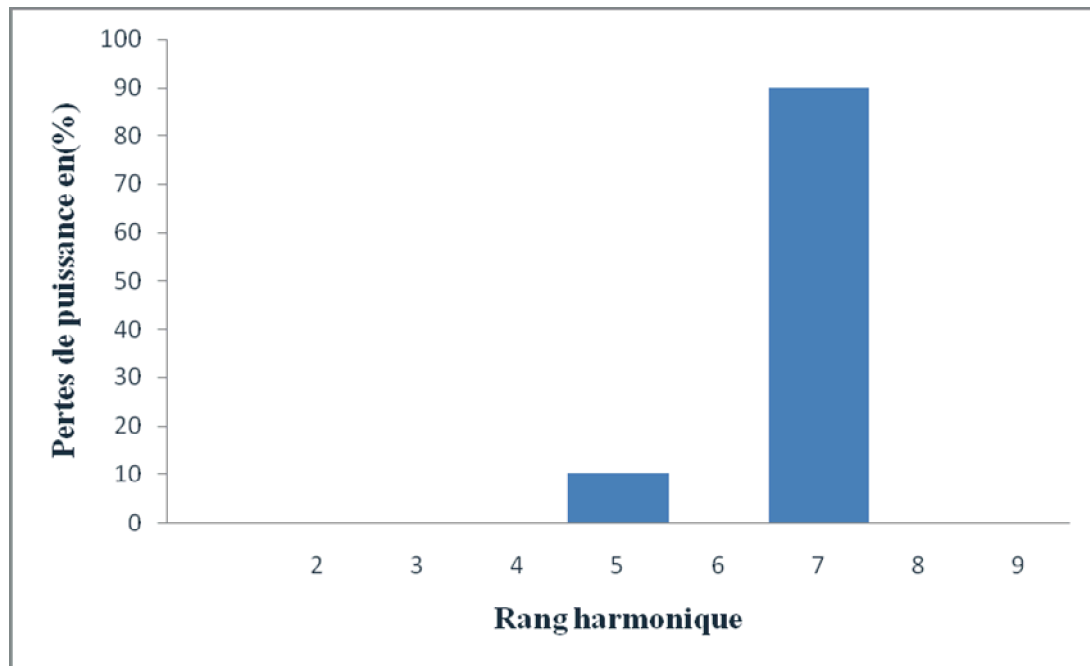


Figure 4.5 : Pertes de puissance dues aux harmoniques dans le condensateur

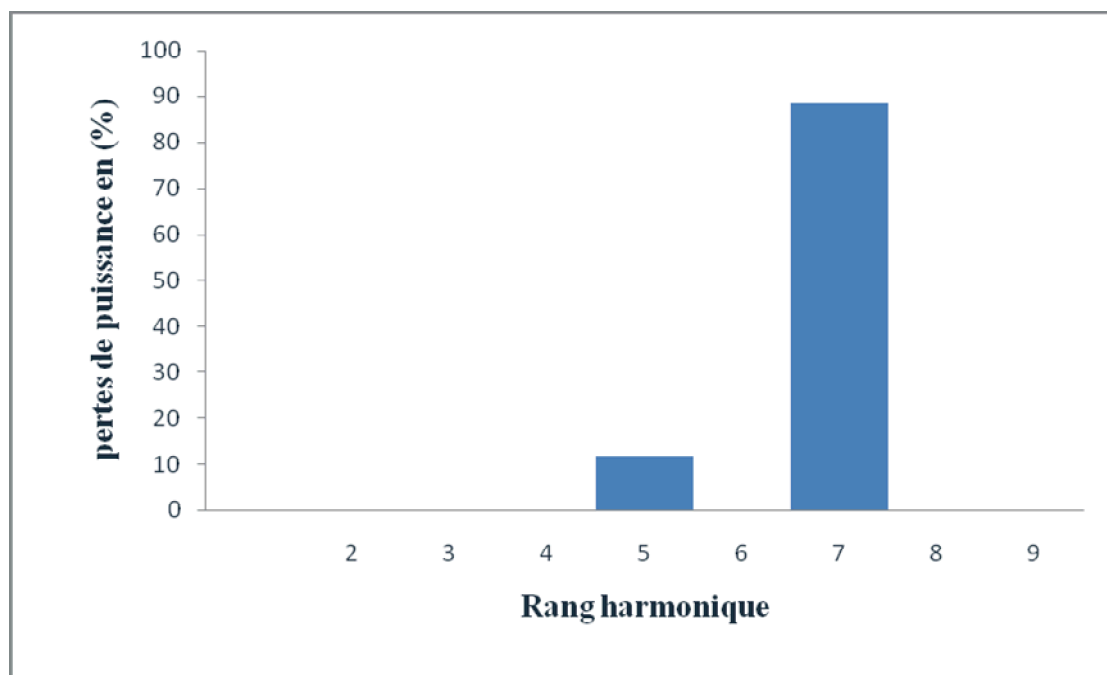


Figure 4.6 : Pertes de puissance dues aux harmoniques dans tout les éléments du réseau

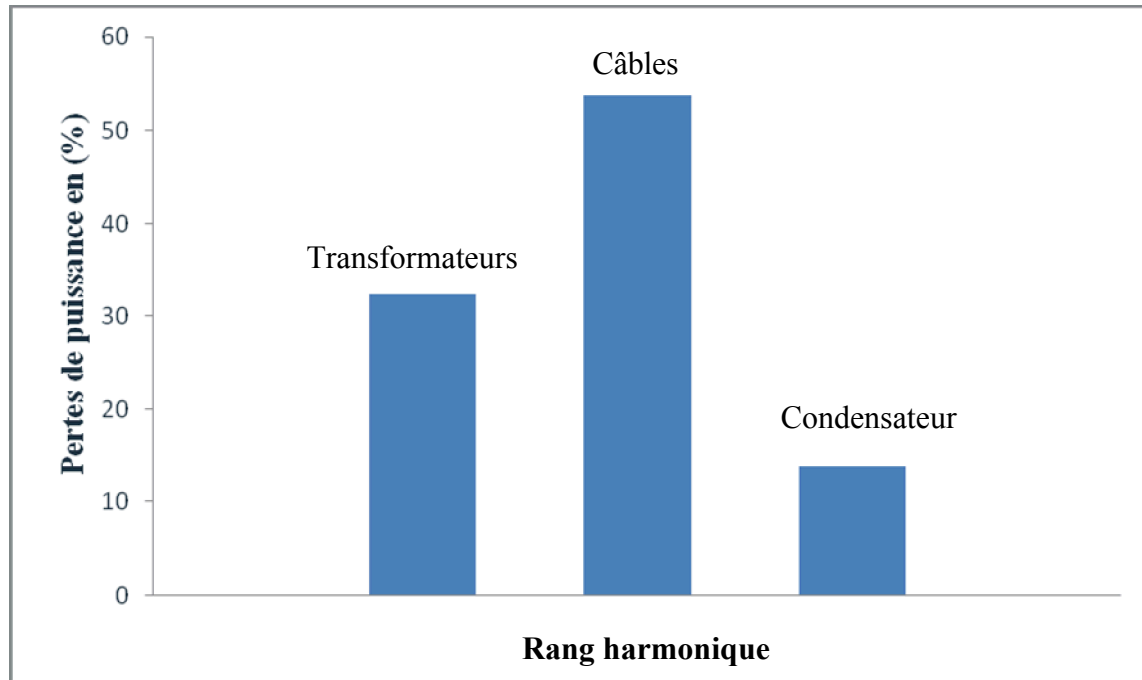


Figure 4.7 : Pertes de puissance totales dans tout les elements du réseau

IV.6. Discussions des résultats

Les pertes de puissance dues aux harmoniques dans les transformateurs sont de 0.45 kW, elles représentent 45.47 % des pertes totales dues aux harmoniques, et les pertes totales dans les transformateurs représentent 32.36 % par rapport aux pertes totales dans le réseau.

Les pertes de puissance dues aux harmoniques dans les câbles sont de 0.48 kW, elles représentent 48.54 % des pertes totales dues aux harmoniques et les pertes totales dans les câbles représentent 53.85 % par rapport aux pertes totales dans le réseau.

Les pertes de puissance dues aux harmoniques dans le condensateur sont 0.06 kW, elles représentent 6.02 % des pertes totales dues aux harmoniques et les pertes totales dans le condensateur représentent 13.79 % par rapport aux pertes totales dans le réseau.

IV.7. Interprétation des résultats

Dans cette étude on a constaté que les pertes de puissances dues au rang 7 sont supérieures à celles du rang 5, cela est du à la caractéristique de la charge polluante qui possède un TDH de rang 7 supérieur à celui du rang 5 qui sont injectés dans le réseau.

Les pertes dans les câbles sont prédominantes car ils possèdent des résistances un peu plus importantes.

IV.8.Conclusion

Les pertes de puissance dues aux harmoniques sont négligeables devant le fondamental car le TDH_V total de la source harmonique est de l'ordre de 23%, et au niveau des jeux de barre ne dépasse pas 8%.

On a constaté que les charges polluantes sur notre réseau test ont été séparées des charges saines, et plus que cela, elles sont branchées sur une source indépendante (transformateur). Les transformateurs utilisés sont de couplage triangle du côté primaire pour empêcher la transmission en amont des rangs harmoniques 3 et multiples de 3. Ce qui veut dire que cette installation a été conçue d'une façon à éliminer la pollution harmonique. Ce qui justifie le faible taux de pertes de puissance dues aux harmoniques cité précédemment.

Conclusion générale

Ce travail nous a permis de nous familiariser avec les grandeurs harmoniques en électrotechnique, de connaître les effets néfastes des courants et tensions harmoniques, les précautions à prendre lors de la conception d'un réseau et ce, pour prévenir les effets des harmoniques et les solutions à envisager pour les éliminer.

Dans ce travail, on a vu que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires sont injectés dans le réseau électrique. Ils produisent une distorsion de la tension qui affecte la qualité de service pour tous les clients branchés sur le même réseau, causant des pertes de puissance dans les différents éléments constituant ce réseau. Ces pertes provoquent :

- Une augmentation des pertes en charge, une saturation du circuit magnétique, une augmentation de la température des spires et de la structure métallique dans les machines électriques. Par conséquent une diminution de rendement et une réduction de la durée de vie des machines électriques.
- Un échauffement au niveau des composants des circuits électroniques constituant le redresseur.
- Une détérioration du diélectrique de la batterie de condensateurs.

Afin d'évaluer ces pertes, un programme de calcul a été réalisé sous MATLAB et a donné les résultats suivants :

99.406 % de la totalité des pertes sont dues au fondamental.

0.594 % de la totalité des pertes sont dues aux harmoniques.

D'après ces résultats obtenus, on constate que les pertes dues aux harmoniques sont négligeables ; notre réseau n'est donc pas pollué, les ondes de tension et de courant peuvent être considérées comme sinusoïdales.

On a constaté que les charges polluantes sur notre réseau test ont été séparées des charges saines, et plus que cela, elles sont branchées sur une source indépendante (transformateur). Les transformateurs utilisés sont de couplage triangle du côté primaire pour empêcher la transmission en amont des rangs harmoniques 3 et multiples de 3. Ce qui veut dire que cette installation a été conçue d'une façon à éliminer la pollution harmonique. Ce qui justifie le faible taux de pertes de puissance dues aux harmoniques cité précédemment.

Les amplitudes des taux de distorsion harmonique en tension les plus élevées sont observées pour les rangs 5 et 7. Les autres, à savoir, les rangs 11, 13, 17, 19, ... sont négligés.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : THIERRY DEFLANDRE, PHILIPPE MAURAS : « Les harmoniques sur les réseaux électriques », Edition Eyrolles, Paris, 1998.
- [2] : ERIC FELICE : « Perturbations harmoniques effets, origine, mesures, diagnostic, remèdes », Edition DUNOD, Paris, 2000.
- [3] : TEODORE WILLDI : « Electrotechnique », 3^e édition, 2003.
- [4] : THIERRY GOURAUD : « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », thèse de doctorat, école centrale de Nantes, 1997.
- [5] : N.HANED et M.HADJI : « Evaluation des pertes de puissances dues aux harmoniques dans un réseau électrique », mémoire d'ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2006.
- [6] : H.GHEZZAZ et M.HADDOUCHE : « Etude des pertes fer dans les tôles FeSi sous diverses inductions magnétiques », mémoire d'ingénieur, université de Tizi-Ouzou, 2003.
- [7] : C.COLLOMBERT, J.MARC LUPIN et J.SCHONER : « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués et leurs traitements », Cahier technique n° 152, Edition Schneider Electric 1999.
- [8] : PHILIPPE FERRACCI : « La qualité de l'énergie électrique », Cahier technique n° 199, Edition Schneider Electric 2001.
- [9] : R. ABU-HASHIM, R.BURCH et G. CHANG : « Test systems for harmonics modeling and simulation » IEEE Standard 399-1990, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis", IEEE, New York, 1990.
- [10] : KAMILIA YUCEF MOUHAMED ASHOUR : « Losses in electrical energy », Société de distribution d'électricité, ALEXANDRIE (EGYPTE), 2004.
- [11] : CHERIF FETHA : « analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique », thèse de doctorat, université de BATNA, 2006.