

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de génie électrique
Laboratoire de Maitrise des Energies Renouvelables

Polycopié de cours UED 121
1^{ère} Année Master ELT
Spécialités CE & ME

Intitulé

QUALITE DE L'ENERGIE
ELECTRIQUE

Dr. CHEKKAL Samira

Avant-propos

La qualité de l'énergie électrique est un enjeu majeur pour tous les acteurs du secteur énergétique, qu'il s'agisse de gestionnaires de réseaux, de fournisseurs, de producteurs ou de consommateurs. Ce sujet revêt une importance particulière pour plusieurs raisons. D'une part, les perturbations électriques peuvent engendrer des coûts considérables pour les industriels. D'autre part, l'essor des équipements sensibles et générateurs de perturbations, grâce à leurs nombreux avantages (flexibilité, rendement élevé, performances optimales), témoigne d'une généralisation de l'électronique de puissance. Ces équipements, tout en offrant des performances accrues, sont à la fois vulnérables aux variations de tension et sources de perturbations. Ce document a été conçu comme un support de cours destiné aux étudiants de première année de master dans les spécialités commande électrique et machine électrique. Il se compose de quatre chapitres, qui examinent en détail les phénomènes principaux altérant la qualité de l'énergie électrique, leurs origines, ainsi que les conséquences sur les équipements, en mettant l'accent sur la dégradation de la tension et du courant ainsi que les perturbations dans les réseaux. Pour faciliter l'apprentissage, des exercices pratiques, des questions à choix multiple (QCM) avec solutions, et des ressources pédagogiques sont inclus. Ces éléments aideront les étudiants à maîtriser et comprendre les phénomènes qui se produisent sur le réseau en conditions normales et critiques. En outre, les apprenants seront en mesure de prendre les mesures nécessaires pour éviter les dysfonctionnements du réseau, qui pourraient entraîner une coupure totale de l'alimentation électrique, en mettant en œuvre des techniques modernes pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Sommaire

Chapitre I : Introduction à la Qualité de l'Energie Electrique (QEE)

I.1 Introduction.....	1
I.2 Contexte actuel et enjeux de la qualité de l'énergie électrique.....	1
I.2.1 Nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises	2
I.2.2 Equipements sensibles aux perturbations de la tension et / ou eux-mêmes générateurs de perturbations.....	3
I.2.3 Ouverture du marché de l'électricité.....	3
I.3 Définition et terminologie de la qualité de l'énergie	3
I.4 Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie	5
I.4.1 Application contractuelle	5
I.4.2 Gestion des dysfonctionnements en maintenance curative.....	5
I.4.3 Installations électriques.....	6
I.4.4 Enquêtes statistiques	6
I.4.5 Caractériser la qualité de l'énergie	7
I.4.6 Mesures à prendre	7
I.5 Synthèse	8

Chapitre II : Niveau de qualité de l'énergie et normes

II.1. Introduction	9
II.2 Caractéristiques, Limites et Méthodes d'Évaluation de la Qualité de Tension	9
II.2.1Caractéristiques principales de la tension aux points d'alimentation.....	9
II.2.2 Limites quasi garanties	9
II.2.3 Méthode d'évaluation statistique.....	9
II.3 Niveaux de planification.....	10
II.4 Stratégie de mesure des paramètres de la tension.....	11
II.5 Normes.....	11
II.5.1 Norme de base	11
II.5.2 Norme génériques.....	12
II.5.3 Normes spécifiques à un produit	12
II.5.4 Normes de la compatibilité électromagnétique	12
II.5.5 Exemple de norme	13
II.6 Analyseurs de qualité réseau	14
II.6.1 Mesure de grandeurs électriques	14
II.6.2 Analyseur de perturbations.....	14
II.6.3 Analyseur de puissance et d'harmonique	15
II.6.4 Flickmètre.....	15
II.6.5 Analyseur d'harmonique	15
II.6.6 Traitement de l'information.....	15
II.7 Synthèse	17

Chapitre III : Dégradation de la qualité de l'énergie

III.1 Introduction	18
III.2 Creux de tension.....	18
III.2.1 Origine.....	19
III.2.2 Conséquence.....	19

III.3 Coupure de la tension.....	19
III.4 Surtension.....	19
III.4.1 Surtensions temporaires à fréquence industrielle.....	20
III.4.2 Surtensions de manœuvre.....	21
III.4.3 Surtensions d'origine atmosphérique.....	22
III.4.4 Surtensions électrostatiques (ESD - décharges électrostatiques).....	23
III.4.5 Impulsions électromagnétiques nucléaires (IEMN).....	23
III.5 Variations de tension.....	24
III.5.1 Variation lentes de la tension.....	25
III.5.2 Fluctuation de tension-flicker.....	25
III.6. Harmoniques.....	26
III.6.1 Origine des harmoniques.....	26
III.6.2 Exemples de quelques causes des perturbations-Distorsions harmoniques.....	27
III.6.3 Problèmes de contentieux.....	28
III.6.4 Définition des taux de distorsion.....	31
III.7 Inters harmoniques.....	34
III.8 Générateurs d'harmoniques.....	35
III.9 Notion de la charge déformante.....	35
III.10 Nature des principaux pollueurs.....	36
III.11 Propagation des harmoniques.....	37
III.12 Impacts des harmoniques sur le réseau électrique.....	41
III.13 Compatibilité électromagnétique.....	42
III.13.1 Perturbations courants.....	43
III.13.2 Principales caractéristiques des perturbations E.M.....	43
III.13.3 Source de perturbation permanente.....	44
III.13.4 Source de perturbations intermittente ou rayonnées.....	46
III.13.5 Couplages.....	46
III.14 Impacts de la foudre.....	47
III.15 Déséquilibre du système triphasé.....	48
III.16 Synthèse.....	49

Chapitre IV : Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique

IV.1 Introduction.....	50
IV.2 Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.....	50
IV.2.1 Creux de tension et coupures.....	51
IV.2.2 Harmoniques.....	51
IV.2.3 Surtensions.....	61
IV.2.4 Fluctuations de la tension.....	64
IV.2.5 Non symétrie (Déséquilibres) de la tension.....	65
IV.2.6 Méthodes mathématiques pour le calcul des tensions déséquilibrées.....	65
IV.2.7 Solution pour contrôler le déséquilibre.....	66
IV.3 Synthèse.....	67

Auto-évaluation

Application N°1.....	68
Solution de l'application N°1	68
Application N°2.....	69
Exercice N°1	69
Exercice N°2	69
Exercice N°3	69
Solution de l'application N°2.....	69
Exercice N°1	69
Exercice N°2	70
Exercice N°3	71
Bibliographie.....	72

Chapitre I

Introduction à la Qualité de l'Energie Electrique (QEE)

I.1 Introduction

La sensibilisation à la qualité de l'énergie électrique est devenue essentielle dans l'enseignement de l'électrotechnique contemporaine. Dans ce chapitre, nous examinerons le problème de la qualité de l'énergie électrique, tout en rappelant brièvement le contexte actuel et en précisant les critères d'évaluation associés. Le domaine de la qualité de l'énergie électrique se décline principalement en deux axes de recherche : d'une part, les solutions préventives et correctives, et d'autre part, le monitoring, qui englobe la mesure et l'analyse des perturbations électriques. Ce monitoring constitue une étape fondamentale dans la recherche de solutions, car il permet d'identifier l'origine des perturbations, d'évaluer leur impact sur les équipements, et de sélectionner la solution la plus adaptée tant sur le plan économique que technique. Il convient de noter que la qualité de l'énergie électrique est mesurable de la même manière que la qualité de l'air.

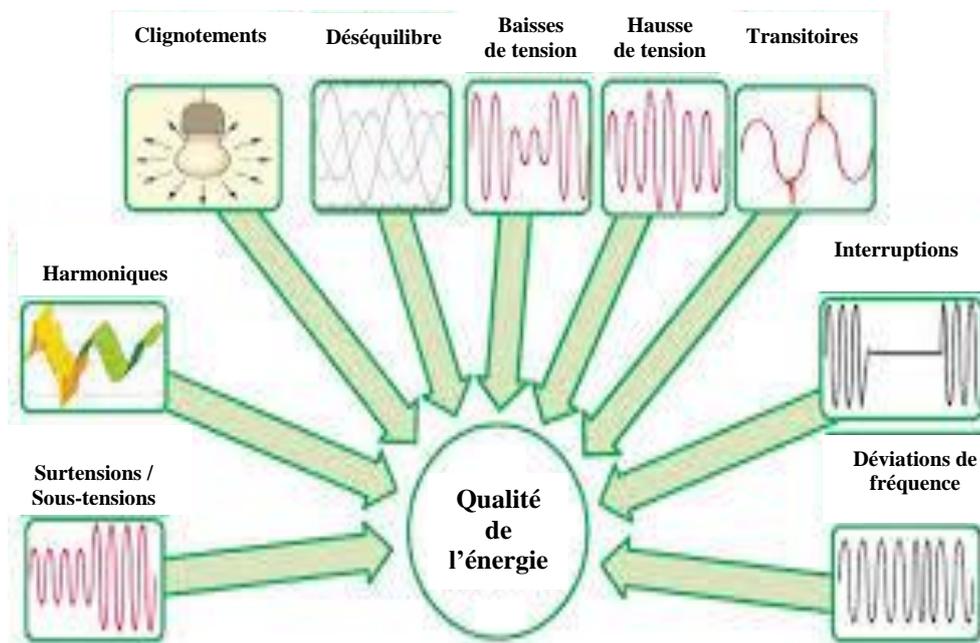


Fig I.1 Phénomènes affectant la qualité de l'énergie électrique

I.2 Contexte actuel et enjeux de la qualité de l'énergie électrique

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique

prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle. Ces dispositifs sensibles, mais qui dégradent également la qualité de la tension, existent dans toutes les catégories d'utilisateurs :

- Dans le domaine industriel par l'emploi de constituants d'électronique de puissance ;
- Dans le domaine tertiaire avec le développement de l'informatique ;
- Dans le domaine domestique par l'utilisation en grand nombre des téléviseurs, magnétoscopes, lampes à économie d'énergie, ...

L'ouverture du marché de l'énergie électrique, la nécessité de garantir les productions pour les entreprises, font de la qualité de l'énergie électrique un enjeu majeur pour les compagnies d'électricité et pour les fabricants d'équipements.

La notion de qualité du produit « électricité » est attachée au niveau de satisfaction de l'utilisateur. Les performances de ses équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation. Par exemple, une variation de 10 % de l'amplitude de la tension se traduira par une perte de couple de 19 % pour une machine asynchrone.

Les équipements d'un utilisateur peuvent apporter des perturbations sur le réseau susceptible de gêner les autres utilisateurs. Le distributeur (système d'alimentation) et l'utilisateur (installations) sont l'un et l'autre concernés par la qualité de l'électricité.

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

- La nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises, la généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations ;
- L'ouverture du marché de l'électricité.

I.2.1 Nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises

- ***La réduction des coûts liés à la perte de continuité de service et à la non-qualité***

Le coût des perturbations (coupures, creux de tension, harmoniques, surtensions atmosphériques, etc.) est élevé.

Ces coûts doivent prendre en compte le manque à produire, les pertes de matières premières, la remise en état de l'outil de production, la non qualité de la production, les retards de livraison. Le dysfonctionnement ou l'arrêt de récepteurs prioritaires tels que les ordinateurs, l'éclairage et les systèmes de sécurité peuvent mettre en cause la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, locaux recevant du public, immeubles de grande hauteur, etc.). Ceci passe aussi par la détection par anticipation des problèmes par une maintenance préventive, ciblée et optimisée. On constate de plus, un transfert de responsabilité de l'industriel utilisateur, vers le constructeur d'appareillage, pour assurer la maintenance des sites ; le constructeur devient fournisseur du produit électricité.

- **La réduction des coûts liés au surdimensionnement des installations et aux factures énergétiques :**

D'autres conséquences plus insidieuses de la dégradation de la QEE sont :

- ✚ La réduction du rendement énergétique de l'installation, ce qui alourdit la facture Energétique ;
- ✚ La surcharge de l'installation, d'où son vieillissement prématuré avec le risque accru de pannes qui conduit à un surdimensionnement des équipements de distribution.

Et donc, les utilisateurs professionnels de l'électricité expriment le besoin d'optimiser le fonctionnement de leurs installations électriques.

I.2.2 Equipements sensibles aux perturbations de la tension et / ou eux-mêmes générateurs de perturbations

Du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement, performances élevées, etc.) on constate le développement et la généralisation des automatismes, des variateurs de vitesse dans l'industrie, des systèmes informatiques, des éclairages fluo-compact dans le tertiaire et le domestique. Ces équipements ont la particularité d'être à la fois sensibles aux perturbations de la tension et générateurs de perturbations.

Leur multiplicité au sein d'un même procédé exige une alimentation électrique de plus en plus performante en termes de continuité et de qualité. En effet, l'arrêt temporaire d'un élément de la chaîne peut provoquer l'arrêt de l'outil de production (fabrication de semi-conducteurs, cimenterie, traitement de l'eau, manutention, imprimerie, sidérurgie, pétrochimie, etc.) ou de services (centres de calcul, banques, télécommunications, etc.).

En conséquence, les travaux de la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) sur la compatibilité électromagnétique (CEM) conduisent à des normes et recommandations de plus en plus contraignantes (limitations des niveaux d'émission des perturbations, etc.).

I.2.3 Ouverture du marché de l'électricité

Les règles du jeu du secteur électrique ont ou vont évoluer en profondeur : ouverture à la concurrence de la production d'électricité, production décentralisée, possibilité pour les (gros) consommateurs d'électricité de choisir leur fournisseur.

Ainsi en 1985, la commission européenne a établi que l'électricité était un produit (directive 85/374), ce qui rend nécessaire de bien en définir les caractéristiques essentielles.

Par ailleurs dans le contexte de la libéralisation du marché de l'énergie, la recherche de la compétitivité par les compagnies d'électricité fait que la qualité est un facteur différenciateur. Sa garantie peut être, pour un industriel, un critère de choix d'un fournisseur d'énergie.

I.3 Définition et terminologie de la qualité de l'énergie

Pourquoi utiliser souvent l'expression anglaise power quality ? On rencontre un grand nombre de traductions françaises de cette expression mais aucune ne fait encore l'unanimité : qualité de l'alimentation, qualité de la tension, qualité du courant, qualité de l'onde, qualité de la fourniture, qualité du produit, qualité de l'énergie électrique, qualité de l'électricité..., etc.

Il est à remarquer que la traduction littérale « qualité de la puissance » n'est jamais utilisée, sans doute parce que l'expression originale « power quality » n'a pas beaucoup de sens.

Selon L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), on appelle « power quality problem » toute variation dans l'alimentation en puissance électrique, ayant pour conséquence le dysfonctionnement ou l'avarie d'équipements des utilisateurs, telle que : creux de tension, surtension, transitoire, distorsion harmonique, parasites. Cependant, tous ces phénomènes affectent essentiellement la tension qui est fournie à l'utilisateur. Si ce dernier n'utilise pas de charges perturbatrices, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension. Cependant, l'expression « power quality » s'entend généralement dans une acception plus large : elle recouvre aussi le concept de « continuité de la tension » ou « fiabilité de l'alimentation ».

On ne peut évidemment parler de « qualité de la tension » que lorsque la tension est présente. En cas d'interruption de la tension « brève » ou « longue », selon que la durée est inférieure ou supérieure à 3 min, c'est d'un problème de continuité de la tension (fiabilité de l'alimentation) qu'il faut parler. L'alimentation est d'autant plus fiable que le nombre annuel d'interruptions est petit et que leur durée moyenne est faible. L'équation correspondant à l'interprétation la plus correcte est donc :

Qualité de l'électricité = continuité+ qualité de la tension+ qualité de service

- **Qualité de l'onde de la tension** : Recouvre les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Différents termes peuvent être utilisés en fonction des caractéristiques de la perturbation : Creux de tension, surtensions impulsionnelles, tensions hautes ou basses, variations de fréquence, papillotement, taux d'harmoniques et d'inter-harmonique, déséquilibre entre phases. L'onde de tension délivrée par le système électrique prend idéalement la forme d'une sinusoïde de fréquence constante 50Hz et d'amplitude constante. Mais, l'onde de tension n'est jamais parfaitement sinusoïdale, la fréquence et l'amplitude de cette onde varient en permanence, et peuvent parfois s'écarter significativement de leurs valeurs de référence.

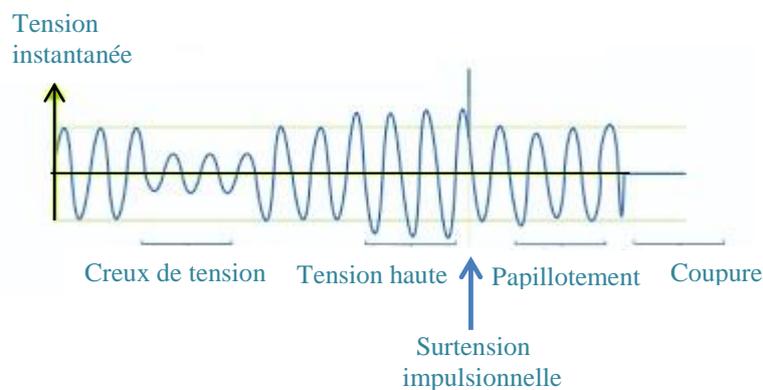


Fig I.2 Types de Perturbations de la Qualité de l'Énergie Électrique

- **Continuité d'alimentation** : Recouvre les coupures, ou interruptions, subies par les utilisateurs. Il existe un certain nombre de critères pour classer ces coupures, et il est notamment fait distinction entre coupures programmées et coupures non programmées, et entre coupures longues (supérieures à 3 minutes) et coupures brèves (entre 1 seconde et 3 minutes).
- **Qualité de service** : elle caractérise la relation entre le gestionnaire ou fournisseur et l'utilisateur des réseaux. Délai de mise ou remise en service, délai d'intervention d'urgence, délai de raccordement, notification de coupure programmée, tenue des horaires de rendez-vous.

I.4 Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie

- Caractériser les perturbations pouvant dégrader la qualité de l'énergie au sein d'un réseau électrique.
- Appliquer les techniques de mesure et les normes relatives à la qualité de l'énergie électrique.
- Apporter des solutions dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie au sein d'un réseau électrique.

Selon les applications, les paramètres à mesurer et la précision de la mesure ne sont pas les mêmes.

I.4.1 Application contractuelle

Des relations contractuelles peuvent s'établir entre fournisseur d'électricité et utilisateur final, mais aussi entre producteur et transporteur ou entre transporteur et distributeur dans le cadre d'un marché dérégulé. Une application contractuelle nécessite que les termes soient définis en commun et acceptés par les différentes parties. Il s'agit alors de définir les paramètres de mesure de la qualité et de comparer leurs valeurs à des limites prédéfinies voire contractuelles. Cette application implique souvent le traitement d'un nombre important de données.

I.4.2 Gestion des dysfonctionnements en maintenance curative

Malgré le respect des règles de l'art (conception de schéma, choix des protections, de régime de neutre et mise en place de solutions adaptées) dès la phase de conception, des dysfonctionnements peuvent apparaître en cours d'exploitation :

- ✓ Les perturbations peuvent avoir été négligées ou sous-estimées,
- ✓ L'installation a évolué (nouvelles charges et /ou modification).

C'est généralement suite à ces problèmes qu'une action de dépannage est engagée. L'objectif est souvent d'obtenir des résultats aussi rapidement que possible, ce qui peut conduire à des conclusions hâtives ou infondées.

Des systèmes de mesure portatifs (sur des temps limités) ou des appareils fixes (surveillance permanente) facilitent le diagnostic des installations (détection et archivage des perturbations et déclenchement d'alarmes).

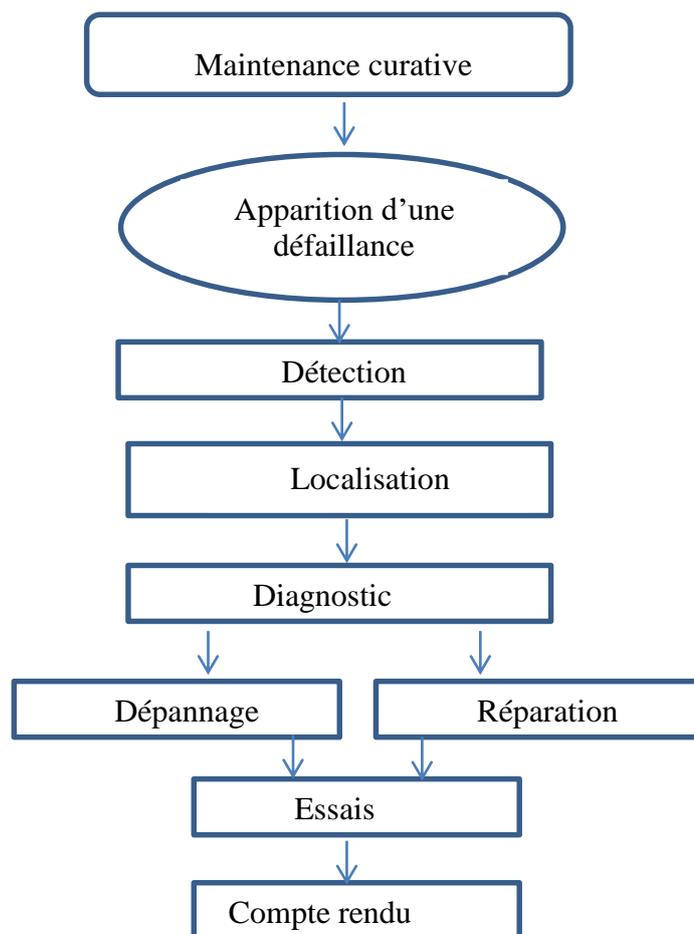


Fig I. 3 Processus de gestion de la maintenance curative

I.4.3 Installations électriques

Pour réaliser des gains de productivité, il faut une bonne gestion de l'énergie, deux facteurs qui dépendent de la QEE.

- ✓ Qualité d'énergie électrique adaptée aux besoins est un objectif des personnels d'exploitation,
- ✓ De maintenance et de gestion de sites tertiaires ou industriels.

I.4.4 Enquêtes statistiques

Cette étude nécessite une approche statistique sur la base de nombreux résultats obtenus par des enquêtes généralement réalisées par les exploitants de réseaux de transport et de distribution.

a. Enquêtes sur les performances générales d'un réseau

Elles permettent, par exemple, de :

- Planifier et cibler les interventions préventives grâce à une cartographie des niveaux de perturbations sur un réseau. Ceci permet de réduire les coûts d'exploitation ainsi qu'une meilleure maîtrise des perturbations.

- Comparer la QEE fournie par différents distributeurs en différents lieux géographiques. En effet des clients potentiels peuvent demander des caractéristiques de fiabilité pour la fourniture de l'électricité avant d'installer de nouvelles usines.

b. Enquêtes sur les performances en un point particulier du réseau

Elles permettent de :

- Déterminer l'environnement électromagnétique auquel une installation future ou un nouvel équipement sera soumis.
- Spécifier et vérifier les performances auxquelles le fournisseur d'électricité s'engage de façon contractuelle.

I.4.5 Caractériser la qualité de l'énergie

- a. La qualité de l'énergie électrique dépend :
 - ✓ De la qualité de l'énergie livrée au point de raccordement par le distributeur,
 - ✓ Des caractéristiques de votre installation intérieure
- b. La non qualité de l'énergie électrique se caractérise par :
 - ✓ Des coupures longues ou brèves dont on mesure la durée cumulée par an et par client sur une zone géographique,
 - ✓ L'altération du signal électrique, incluant les micro- coupures, les surtensions et les variations irrégulières du signal, etc.

Ces phénomènes se propagent sur le réseau et altèrent la qualité du signal fourni à la clientèle

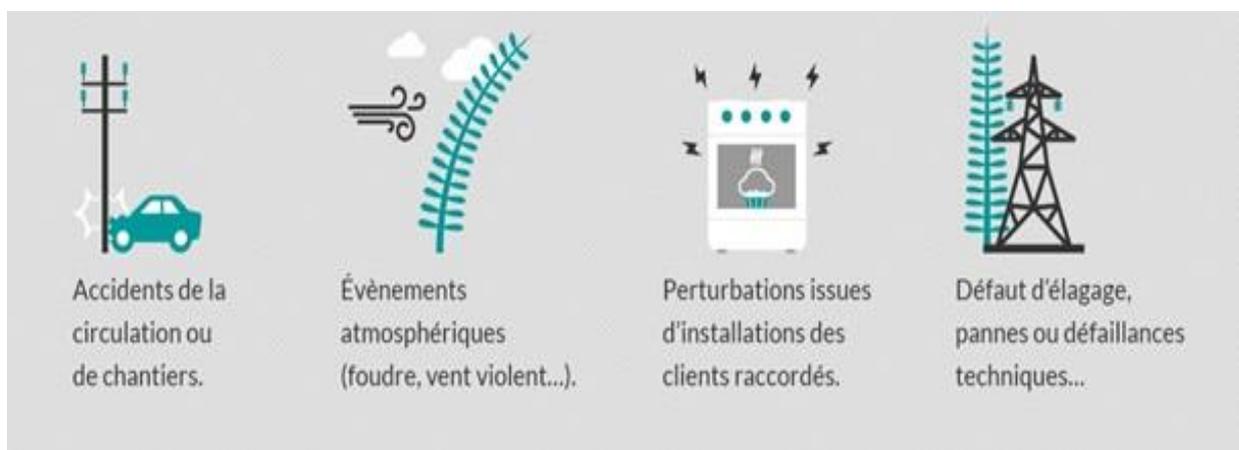


Fig I.4 Causes de l'altération du signal électrique

I.4.6 Mesures à prendre

Pour garantir une qualité optimum de l'électricité distribuée il faut :

- ✓ Enregistrer et suivre les perturbations dans les postes sources et sur les lignes moyennes tension,
- ✓ Prendre toutes les mesures nécessaires pour équilibrer les éventuels déphasages,
- ✓ Réaliser régulièrement des investissements pour le réaménagement des réseaux et leur renforcement,
- ✓ Mettre en œuvre un programme d'élagage pour limiter les risques de perturbations liées à la végétation.

Pour garantir une bonne qualité de l'alimentation électrique, il convient :

- ✓ Que les installations intérieures soient conformes à la norme NF C15-100 qui prescrit les types de protections électriques à mettre en œuvre contre les surtensions temporaires et les baisses de tension.
- ✓ Que les équipements répondent aux normes européennes de construction,
- ✓ De protéger les installations électriques à l'aide entre autres d'un onduleur et d'un parasurtenseur.

I.5 Synthèse

L'importance croissante de la qualité de l'énergie électrique dans le domaine de l'électrotechnique souligne la nécessité de surveiller et d'évaluer les perturbations électriques. Avec l'augmentation des équipements électroniques sensibles, il est crucial de garantir une alimentation fiable pour assurer la compétitivité des entreprises. Les principaux acteurs distributeurs et utilisateurs ont une responsabilité partagée dans le maintien de cette qualité. Cela implique de respecter des normes rigoureuses et d'adopter des solutions appropriées.

Chapitre II

Niveau de qualité de l'énergie et normes

II.1 Introduction

Pour assurer la compatibilité entre toutes les installations perturbatrices et toutes les installations sensibles alimentées par le réseau, il faut imposer des limites d'émission aux premières et donner aux secondes des niveaux d'immunité suffisants. En tous les points d'alimentation des installations raccordées aux réseaux, les niveaux effectifs de perturbations peuvent être supérieurs aux limites individuelles d'émission mais doivent rester inférieurs aux niveaux individuels d'immunité : le concept de « niveau de compatibilité » s'introduit très naturellement.

II.2 Caractéristiques, limites et méthodes d'évaluation de la qualité de tension

La norme EN50160 définit les principales caractéristiques des tensions électriques dans les réseaux publics de distribution, tant en basse qu'en moyenne tension, afin d'assurer une qualité de service optimale pour les clients. Elle établit un cadre de référence rigoureux, garantissant que les paramètres de qualité de la tension, tels que la fréquence, l'amplitude et la distorsion harmonique, respectent des limites spécifiées. Ce cadre repose sur des méthodes d'évaluation précises, basées sur des mesures statistiques effectuées sur des périodes de temps définies, afin d'assurer une conformité durable aux exigences de qualité.

II.2.1 Caractéristiques principales de la tension aux points d'alimentation

La norme EN50160 fixe des paramètres de qualité de la tension, comme sa fréquence, son amplitude, et sa distorsion harmonique, aux points d'alimentation des utilisateurs. Elle s'applique dans des conditions normales d'exploitation, c'est-à-dire lorsque le réseau fonctionne sans perturbations importantes (pannes, maintenance, etc.).

II.2.2 Limites quasi garanties

La norme définit des limites spécifiques pour certains paramètres de qualité (par exemple, la tension nominale ou la distorsion harmonique). Ces limites sont « quasi garanties », signifiant que dans la majorité des cas, elles sont respectées, bien qu'il puisse exister des écarts ponctuels. Ces limites sont souvent proches des niveaux de compatibilité, c'est-à-dire des valeurs en dessous desquelles les équipements électriques peuvent fonctionner correctement sans subir de perturbations ou de dysfonctionnements.

II.2.3 Méthode d'évaluation statistique

Pour vérifier si les caractéristiques du réseau respectent les limites spécifiées par la norme, la méthode d'évaluation est basée sur une approche statistique. Cette méthode ne consiste pas à

mesurer en continu la qualité de la tension, mais à observer les variations sur une période donnée et à les analyser statistiquement.

✓ **Période de mesure d'une semaine**

Pour évaluer la conformité d'un paramètre comme les tensions harmoniques, les mesures sont prises sur une durée d'une semaine.

✓ **Valeurs moyennes quadratiques (RMS)**

Les valeurs des tensions sont mesurées sur des périodes successives de 10 minutes, et 95 % de ces valeurs RMS ne doivent pas dépasser les limites définies par la norme. Cela signifie que sur une semaine, seules 5 % des valeurs mesurées peuvent être supérieures à la limite, ce qui donne une marge de tolérance pour de courtes variations.

II.3 Niveaux de planification

Les niveaux de planification sont spécifiés par le gestionnaire de réseau pour tous les étages de tension et peuvent être considérés comme des objectifs internes de qualité. Ils sont normalement égaux ou inférieurs aux niveaux de compatibilité. Seules des valeurs indicatives peuvent être données dans les recommandations internationales car les niveaux cibles sont différents d'un cas à l'autre, selon la structure du réseau et les circonstances. La méthode d'estimation d'un niveau de perturbation réel se base sur une statistique uniquement temporelle, comme les caractéristiques de la tension, mais vise à caractériser de plus près le pouvoir perturbateur du phénomène et fournit donc généralement des résultats plus élevés. Ces résultats plus élevés devant être comparés à des limites plus basses, on comprend que les exigences soient nettement plus sévères pour le réseau. La figure II.1 illustre les concepts de base décrits ci-dessus et mettent en évidence les relations les plus importantes entre ceux-ci.

Dans un système étendu (figure II.1) les caractéristiques de la tension peuvent être égales ou supérieures au niveau de compatibilité, elles sont spécifiées par la norme EN 50160. Les niveaux de planification peuvent être égaux ou inférieurs au niveau de compatibilité, ils sont spécifiés par les gestionnaires du réseau, sur la base des rapports techniques CEI61000-3-6 et 61000-3-7. Les niveaux d'essais d'immunité sont spécifiés par les normes appropriées ou convenus entre utilisateurs et constructeurs.

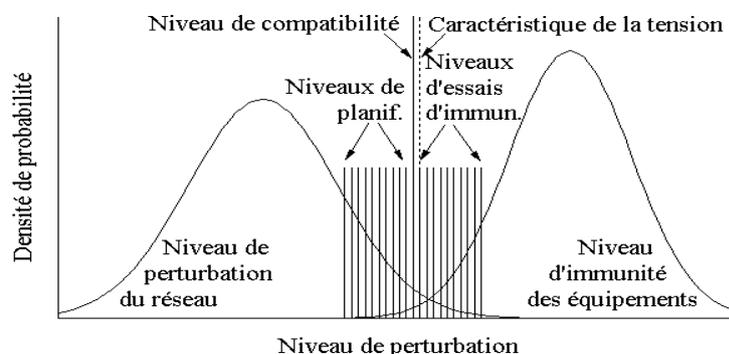


Fig II.1 Normalisation de la qualité de l'électricité : Concepts de base et statistiques spatio-temporelles du système

II.4 Stratégie de mesure des paramètres de la tension

Certains règlements ou contrats spécifiques engagent les fournisseurs d'énergie à maintenir les caractéristiques de tension en tous points d'alimentation dans des limites spécifiées. Ces spécifications précisent des limites ou des valeurs relatives à la tension, la fréquence, aux variations rapides de tension, aux harmoniques et inter-harmoniques, au déséquilibre, aux surtensions et sous-tensions, aux interruptions, etc.

Habituellement, les mesures sont effectuées côté fournisseur d'énergie (afin de vérifier que l'énergie délivrée est conforme au contrat) et côté consommateur (afin de vérifier que l'énergie reçue est conforme au contrat) avec des instruments de mesure de classe A selon la norme CEI 61000-4-30.

La qualité de l'énergie conditionne directement le niveau de performance des installations et donc les coûts d'exploitation. En évitant les pertes d'énergie, les sources de pollution (harmoniques, sauts et creux de tension, autres phénomènes transitoires, ...etc.), chaque équipement fonctionne à son niveau maximal de performance tout en évitant les dysfonctionnements.

Mesure du taux d'harmoniques et analyse des harmoniques rangs par rang :

- ✓ Pour identifier les sources de pollution afin de les séparer des charges sensibles ;
- ✓ Pour déterminer l'origine des pannes ;
- ✓ Pour déclasser les organes de puissance (transformateurs, câbles, etc.)
- ✓ Pour mettre en place des solutions de filtrage.

Détection et capture d'ondes des creux et des sauts de tension :

- ✓ Pour déterminer l'origine des pertes ou des arrêts de production.

Détection et capture d'ondes des phénomènes transitoires :

- ✓ Pour déterminer l'origine des pannes.

Vérification de la conformité de la fourniture électrique à la norme EN 50160 :

- ✓ Pour évaluer la qualité de l'énergie distribuée et pour vérifier que le distributeur respecte la norme.

II.5 Normes

Elles peuvent prendre effet au niveau d'un pays. Les législations des différents pays se chargent de les appliquer. Ces normes peuvent être de trois types :

- Normes de base ;
- Normes génériques ;
- Normes spécifiques à un produit.

II.5.1 Norme de base

Ces normes précisent les phénomènes électromagnétiques concernés, les caractéristiques des dispositifs de mesure et les niveaux recommandés. C'est à partir d'elle que seront élaborées les normes génériques et les normes spécifiques à un produit.

- ✓ **Exemples de normes de base**

EN 61000-3-2 Compatibilité électromagnétique (CEM) : limites pour les émissions de courant harmoniques (courant appelé par les appareils inférieurs à 16 A par phase).

EN 61000-3-3 Compatibilité électromagnétique (CEM) : limitation des variations de tension, des fluctuations de tensions et du papillotement dans les réseaux publics d'alimentation basse tension.

II.5.2 Norme génériques

Ces normes définissent les exigences d'émission pour les appareils électriques dépourvus de réglementation spécifique. Elles s'appliquent aussi bien aux secteurs résidentiels qu'industriel, en précisant les niveaux d'émission à respecter.

✓ Exemples de normes génériques

EN 61000-6-3 : Emission pour les environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère.

EN 61000-6-4 : Emission pour les environnements industriels.

EN 61000-6-1 : Immunité pour les environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère.

EN 61000-6-2 : Immunité pour les environnements industriels.

II.5.3 Normes spécifiques à un produit

Les normes spécifiques à un produit contiennent des détails sur la façon dont le produit doit être configuré et doit fonctionner pendant l'essai et quels paramètres doivent être observés.

✓ Exemple de normes usuelles

NF NE 55011 : Limites et méthodes de mesures des caractéristiques de perturbations radioélectriques.

NF NE 50014 : Appareils électrodomestiques incluant des moteurs ou des dispositifs thermiques, outils électriques. Limites et méthodes de mesures des perturbations radioélectriques.

NF.NE 50015 : Limites et méthodes de mesures des perturbations radioélectriques produites par les appareils électriques d'éclairage.

NF.NE 55020 : Récepteurs de radiodiffusion et équipements associés. Exigences d'immunité

NF.NE 50022 : ATI (Appareils de traitement de l'information). Limites et méthodes de mesure et caractéristiques de perturbations radioélectriques.

II.5.4 Normes de la compatibilité électromagnétique

Au niveau de la Communauté Economique Européenne (CEE), la réglementation est élaborée par les différents Comités Techniques (TC) du Comité Européen de Normalisation en Electrotechnique (CENELEC). La Directive européenne n°89/336/CEE stipule que dans tous les états membres de la CEE, les appareils susceptibles de générer des perturbations électromagnétiques ou dont le fonctionnement peut être affecté par ces perturbations ne peuvent être commercialisés dans les pays de la CEE que s'ils sont conformes aux spécifications en matière de CEM. Cette directive est rentrée en application le 28 octobre 1992. Toutefois, une période de transition de quatre ans a été prévue pour permettre aux fabricants de s'adapter et au CENELEC d'élaborer tous les documents. Nous donnons ci-dessous un échantillon des normes Européennes. Au plan international, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) a créé un comité spécial, le Comité International Spécial des perturbations Radioélectriques (CISPR) en vue de formuler les normes CEM. Les publications du

CISPR sont généralement utilisées par les différents pays comme document de base pour l'établissement de leurs propres normes.

Tableau II.1 : Principales normes européennes en matière de CEM

	Standards Européens	Titre	Equivalent international
Emission	EN55011	Exigences sur l'émission des équipements Industriels, Scientifiques et médicaux	CISPR 11
	EN55013	Exigences sur les récepteurs de radiodiffusion	CISPR 13
	EN55014	Exigences sur l'émission des équipements électroménagers et des outils portatifs	CISPR 14
	EN55015	Exigences sur l'émission des lampes fluorescentes et les luminaires	CISPR 15
	EN55022	Exigences sur l'émission des équipements de traitement de l'information	CISPR 22
	EN60555-1	Définitions des harmoniques, sous-harmoniques et du scintillement	IEC 555-1
	EN60555-2	Perturbations harmoniques provoquées par les équipements électroménagers et similaires	IEC 555-2
	EN60555-3	Variations de tension provoquées par les équipements électroménagers et similaires	IEC 555-3

II.5.5 Exemple de norme

Considérons la norme 55022 qui concerne une catégorie importante d'appareils électriques, les appareils de traitement de l'information. Cette norme est directement dérivée de la publication n°22 du CISPR et distingue deux classes d'appareils :

- ✓ Les appareils de classe A qui sont destinés à être utilisés en milieu industriel, commercial ou d'affaires ;
- ✓ Les appareils de classe B qui sont destinés à être utilisés dans des locaux d'habitation.

Tableau II.2 : Limites de champ perturbateur rayonné pour les appareils de classe A

Game de Fréquences (MHz)	Limites quasi-crête dB μ V/m
30 à 230	30
230 à 1000	37

Tableau II.3 : Limites de champ perturbateur rayonné pour les appareils de classe B

Game de Fréquences (MHz)	Limites quasi-crête dB μ V/m
30 à 230	30
230 à 1000	37

Tableau II.4 : Limites de tension perturbatrice aux bornes du RSIL pour les appareils de classe A

Game de Fréquences (MHz)	Limites quasi-crête dB μ V	Limites Valeur moyenne dB μ V
0.15 à 0.50	79	66
0.50 à 30	73	60

Tableau II.5 : Limites de tension perturbatrice aux bornes du RSIL pour les appareils de classe B

Game de Fréquences (MHz)	Limites quasi-crête dB μ V	Limites Valeur moyenne dB μ V
0.15 à 0.50	66 à 56	56 à 46
0.50 à 5	56	46
5 à 30	60	50

II.6 Analyseurs de qualité réseau

Selon les modèles, les analyseurs de réseau proposent toutes ou partie des fonctions suivantes :

II.6.1 Mesure de grandeurs électriques : U , V , I , P , Q , S , F_p , V_{cc} , Q_{comp} , en valeurs maximales, minimales et moyennes. Ces grandeurs permettent de surveiller et d'évaluer la qualité de l'alimentation électrique dans un réseau en termes de performance, d'efficacité et de stabilité.

Avec :

- ✓ **U (Tension)** : La tension électrique (en volts, V) est la différence de potentiel entre deux points d'un circuit électrique. Elle peut être mesurée sous forme de valeurs maximales, minimales ou moyennes ;
- ✓ **V (Tension)** : Similaire à la grandeur U, il peut s'agir de la même variable ou d'une tension à un autre point de référence dans le système. Elle est souvent utilisée de manière interchangeable avec U dans ce contexte ;
- ✓ **I (Courant)** : Le courant électrique (en ampères, A) représente le flux d'électrons à travers un conducteur. L'analyseur mesure l'intensité maximale, minimale et moyenne du courant.
- ✓ **P (Puissance active)** : La puissance active (en watts, W) est la puissance réellement consommée par les charges résistives dans le réseau. C'est la composante de la puissance qui effectue un travail utile, comme le chauffage ou le fonctionnement de moteurs ;
- ✓ **Q (Puissance réactive)** : La puissance réactive (en voltampères réactifs, VAR) est la puissance utilisée pour maintenir les champs électriques et magnétiques dans les systèmes à courant alternatif. Elle ne produit pas de travail mais est nécessaire au bon fonctionnement des équipements ;
- ✓ **S (Puissance apparente)** : La puissance apparente (en voltampères, VA) est la combinaison de la puissance active et réactive. Elle représente la puissance totale demandée par le système électrique ;
- ✓ **F_p (Facteur de puissance)** : Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S). Il indique l'efficacité avec laquelle l'énergie est utilisée. Un facteur de puissance proche de 1 est optimal ;
- ✓ **V_{cc} (Tension continue ou composante continue de la tension)** : Cela représente la tension continue présente dans un système électrique, ou parfois la composante continue dans un signal alternatif ;
- ✓ **Q_{comp} (Puissance réactive compensée)** : Il s'agit de la puissance réactive compensée, obtenue après correction du facteur de puissance. Cela est souvent fait pour améliorer l'efficacité énergétique du réseau.

II.6.2 Analyseur de perturbations

Microcoupures, variations lentes de tension, pic de tension, flicker, bruit haute fréquence, symétrie des tensions.

II.6.3 Analyseur de puissance et d'harmonique

L'analyseur de puissance électrique permet de mesurer la puissance en watts ou mesurer et analyser les harmoniques.

II.6.4 Flickmètre

Cet appareil mesure selon la norme CEI 61000-4-15 (précédemment CEI 868). L'appareil de mesure de référence est défini dans la norme, ainsi que la méthode de calibration.

II.6.5 Analyseur d'harmonique

Au maximum jusqu'au 50^e rang, THD global et rang par rang, déphasage de chaque harmonique.

II.6.6 Traitement de l'information

Ports de communication pour la télérelève, programmation de campagne de mesures, logiciels associés pour stockage et suivi des valeurs, rédaction de rapports en temps réel (représentation vectorielle ou temporelle, dépouillement et tri statistique, etc..).

Les principaux industriels proposant des analyseurs de réseau sont Chauvin Arnoux et Fluke.

Le modèle CA8335 proposé par Chauvin Arnoux, offre quatre entrées tension et quatre entrées courant pour la mesure de tous les paramètres de tension, courant et puissances jusqu'au diagnostic complet d'une installation électrique. Il capture et enregistre simultanément tous les paramètres, transitoires, alarmes et forme d'ondes. Ces données sont affichables en temps réel sur un écran couleur de 6, en mode graphique ou tableau. Sa capacité mémoire permet l'enregistrement de tous les paramètres sur une durée de plus d'un mois (figure II.2).

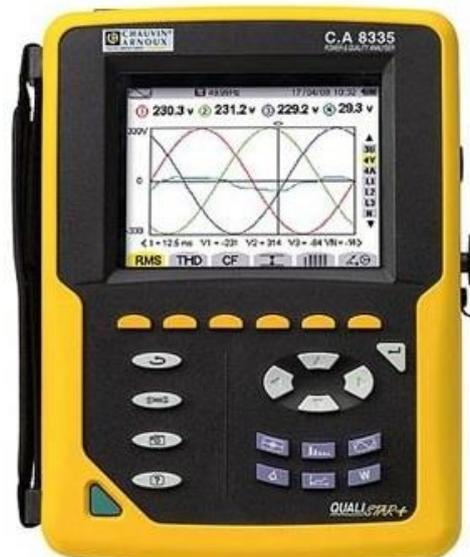


Fig II.2 Analyseur de réseau CA8335

« Chauvin Arnoux »

Le modèle C.A 8332B destiné aux services de contrôle et de maintenance des bâtiments industriels ou administratifs, il permet d'obtenir une image instantanée des principales caractéristiques de la qualité du réseau électrique. Maniable et très compact, cet appareil propose également de nombreuses valeurs calculées et plusieurs fonctions de traitement (figure II.3).

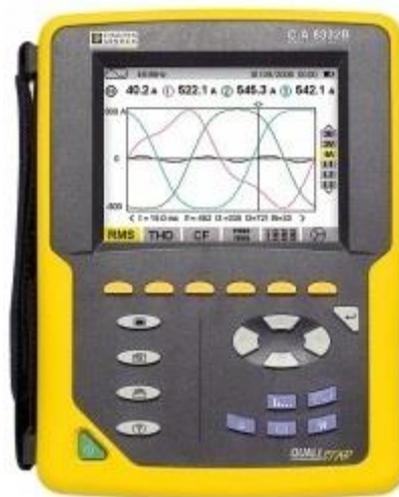


Fig II.3 Analyseur de reseau CA8332
« Chauvin Arnoux »

Le modèle C.A 8352 est un appareil d'analyse de réseaux électriques (harmonique, puissance, EN 50160, flicker...), d'utilisation intuitive, le C.A 8352 comprend les fonctions d'analyse FFT et le mode oscilloscope pour visualisation des courbes, ensuite, la configuration de l'appareil est définie par l'utilisateur suivant l'option choisie (Décomposition jusqu'au 50^e rang, Mesure de tension et de courant H_n par rapport au fondamental et en absolu, THD global et rang par rang, Déphasage de chaque harmonique, ...etc) (Figure II.4).

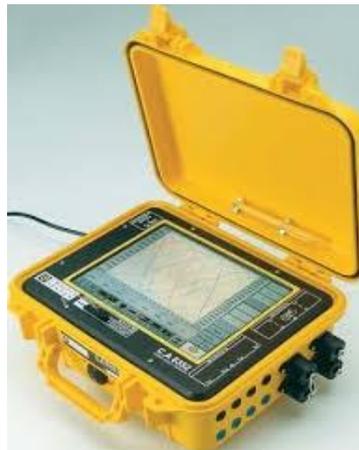


Fig II.4 Analyseur de réseau CA8352
« Chauvin Arnoux »

Le modèle 43B proposé par Fluke représente le meilleur choix pour un technicien chargé de résoudre les problèmes de qualité d'énergie et la plupart des pannes dans tous les domaines de l'industrie, regroupe l'ensemble des fonctions proposées par les analyseurs de réseaux (figure II.5).

✚ Fonctions

- ✓ Calcul de la puissance triphasée sur charges équilibrées à partir de la mesure d'une seule phase ;
- ✓ Mesure des harmoniques de puissance et capture des chutes de tension, des transitoires et des courants de démarrage ;
- ✓ Fonctions de surveillance pour relever les problèmes intermittents et les prestations du système d'alimentation ;

- ✓ Menus utilisant une terminologie électrique familière ;
- ✓ Commutation entre les modes de qualité de puissance les plus répandus à l'aide d'une seule touche ;
- ✓ Enregistrement de deux paramètres au choix pendant une période pouvant durer jusqu'à 16 jours.



Fig II.5 Analyseur de réseau Fluke 43B

II.7 Synthèse

La qualité de l'énergie électrique et les normes associées garantissent la compatibilité entre installations perturbatrices et sensibles. Elles définissent les caractéristiques essentielles des tensions dans les réseaux publics, en établissant des limites pour la fréquence, l'amplitude et la distorsion harmonique. Ces paramètres sont mesurés statistiquement sur des périodes spécifiques. Les gestionnaires de réseau fixent des niveaux de planification souvent inférieurs aux normes de compatibilité. L'utilisation d'analyseurs de qualité réseau permet d'évaluer la performance électrique pour optimiser le fonctionnement des équipements.

Chapitre III

Dégradation de la qualité de l'énergie

III.1 Introduction

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées. La mesure de QEE consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau).

III.2 Creux de tension

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% par rapport à la tension de référence, suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (8 ms à 16ms) et une minute. La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée ou avant perturbation pour les réseaux MT et HT.

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps. Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles (figure III.1).

La Norme EN50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale pendant une durée de $\frac{1}{2}$ période (10ms à 50Hz) jusqu'à 1mn.

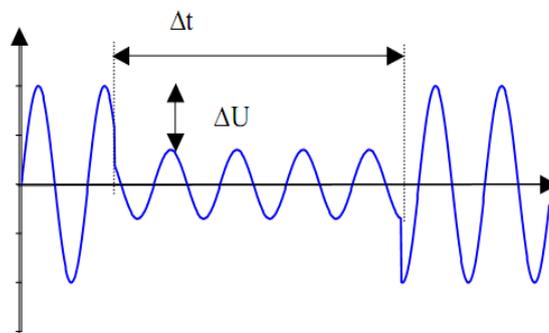


Fig III.1 Creux de Tension, Caractéristiques et Origines

III.2.1 Origine

- A. Défaut sur l'installation : la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (gros moteurs).
- B. Défaut sur le réseau : défaut d'isolement du matériel, blessure d'un câble souterrain provoquent des court-circuits qui génèrent de chutes de tension importantes.

La plupart des creux de tension ont une durée de moins d'une sec et une profondeur inférieure à 60 %. Les creux de tension sont des perturbations brèves mais fréquentes qui touchent tous les réseaux électriques et qui ne peuvent être évitées totalement.

III.2.2 Conséquence

Les creux de tension conduisent à :

- Une perturbation du fonctionnement de l'installation telle que l'élévation de la tension provenant des creux de tension. Ce qui peut provoquer une surintensité dans les machines tournantes et par conséquent des sur-échauffements et des efforts aérodynamiques de brèves durées. Toutes ces contraintes engendrent une fatigue du matériel préjudiciable à terme.
- Une augmentation des pertes ou une altération de la production, une détérioration de l'outil de production aussi bien qu'une perte de temps pour la remise en état et la remise en route de l'outil de production.

Tableau III.1 Effets des creux de tension sur quelques équipements électrique, sensibles

Types d'appareils	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et ré-allumage (lampes à arc)
Système à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Fusion fusible BT et ouverture des contacteurs
Moteurs synchrones	Perte de synchronisation, décrochage et arrêt du moteur
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité
Conducteur	Echauffement

III.3 Coupure de la tension

Une coupure brève de la tension est un cas particulier du creux de tension dont la profondeur est supérieure à 90% est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3mn). Pour les durées supérieures à 3mn on parle de coupure longue.

III.4 Surtension

Les surtensions électriques perturbent le fonctionnement des installations et peuvent provoquer des dégâts matériels sur les équipements électriques (figure III.2).



Fig III.2 Surtensions électriques

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête dépasse les limites d'une plage ($U_n + 10\%$) défini par une norme est une surtension.

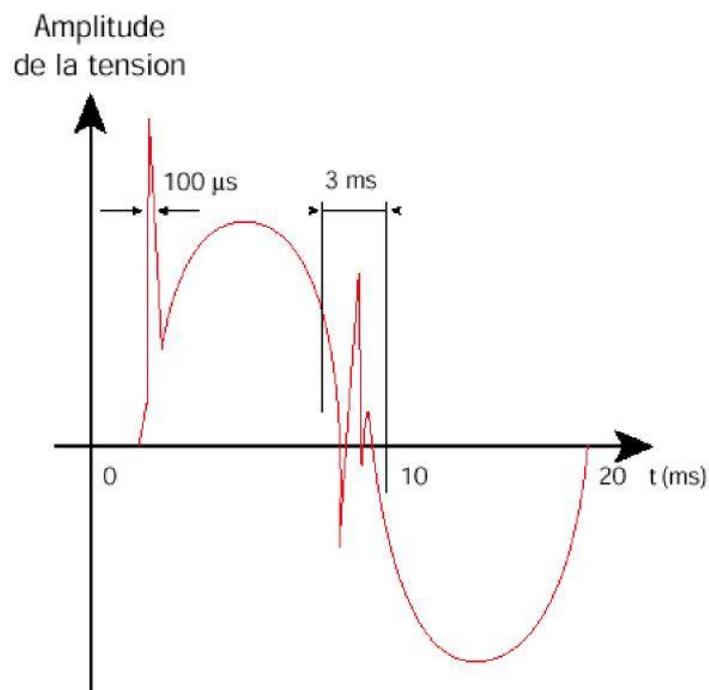


Fig III.3 Surtensions électriques

III.4.1 Surtensions temporaires à fréquence industrielle

Les surtensions temporaires à fréquence industrielle se caractérisent par des augmentations significatives de la tension nominale, se produisant à la fréquence du réseau (50 ou 60 Hz). Ces surtensions peuvent être causées par des déséquilibres dans le réseau ou des pannes d'isolation. Leur durée est généralement plus longue que celle des surtensions transitoires, allant de quelques secondes à plusieurs minutes, ce qui les rend susceptibles d'endommager les équipements électriques non protégés de manière adéquate. Ces surtensions se manifestent comme des pics

brusques de la valeur efficace de la tension sur une ou plusieurs phases, dépassant 110 % de la tension nominale, et durant entre 3 secondes et 1 minute. Elles peuvent avoir diverses origines, notamment un défaut d'isolement entre phase et terre (dans le cas d'un neutre isolé), des surtensions sur de longues lignes à vide (phénomène de Ferranti), des surtensions dues à la ferro-résonance, ainsi que la surcompensation de l'énergie réactive, ou encore une réduction de la charge ou l'élimination d'un court-circuit.

III.4.2 Surtensions de manœuvre

Les surtensions de manœuvre se manifestent lors de l'ouverture ou de la fermeture de circuits électriques, qu'il s'agisse de disjoncteurs, de sectionneurs ou d'autres dispositifs de commutation. Ces actions entraînent des pics de tension transitoires qui peuvent nuire aux équipements connectés au réseau. Bien qu'elles soient généralement de courte durée (de l'ordre de quelques microsecondes), ces surtensions peuvent atteindre des niveaux élevés, risquant ainsi d'endommager l'isolation ou de provoquer des dysfonctionnements des composants électroniques.

A. Définition

Les surtensions les plus élevées rencontrées par les utilisateurs, bien que moins fréquentes, proviennent souvent de la foudre, avec des amplitudes pouvant atteindre plusieurs kilovolts dans les réseaux aériens de basse tension (BT). De tels transitoires peuvent également se propager aux réseaux souterrains.

B. Origine

Des surtensions transitoires plus courantes surviennent dans les installations des clients, par exemple lors de l'activation d'appareils en BT. Bien que leur énergie soit inférieure à celle des surtensions foudroyantes, leur amplitude peut dépasser 1 kV, avec des fronts très raides (temps de montée d'environ 1 ns, soit 10^{-9} s), représentant ainsi un danger pour les circuits électroniques. Pour se protéger contre ces surtensions, il est recommandé d'utiliser des parasurtenseurs. De plus, d'autres phénomènes transitoires peuvent entraîner des dysfonctionnements, même sans générer des surtensions d'amplitude élevée. Deux exemples de transitoires provenant de sources variées sont illustrés dans les figures III.4 et III.5.

La sensibilité aux transitoires a considérablement augmenté avec le développement de l'électronique de contrôle-commande et de puissance. Autrefois, l'enclenchement direct de batteries de condensateurs en moyenne tension (MT) était courant et ne posait pas de problème. Actuellement, la grande sensibilité des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones nécessite des précautions spécifiques, telles que des réactions en série, des résistances de pré-insertion et un enclenchement synchronisé.

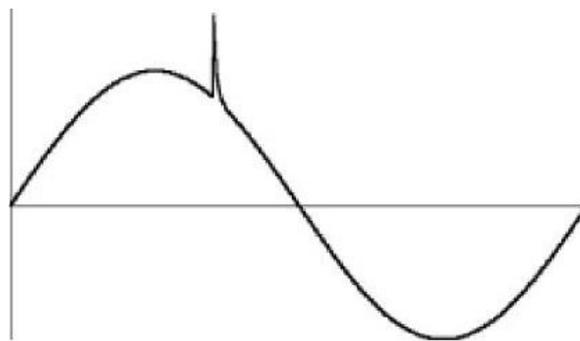


Fig III.4 Surtension transitoire due au déclenchement d'un appareil BT

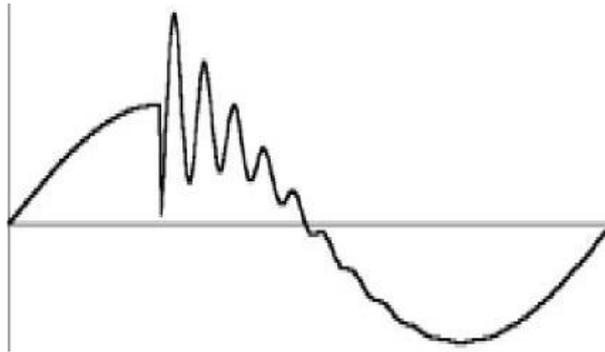


Fig III.5 Oscillation transitoire amortie due à l'enclenchement d'une batterie de condensateur

III.4.3 Surtensions d'origine atmosphérique

Les surtensions d'origine atmosphérique sont principalement causées par la foudre. Lorsqu'un éclair frappe un réseau électrique, il entraîne une augmentation brutale de la tension, souvent à des niveaux extrêmement élevés, ce qui constitue un danger pour les installations. Ces surtensions peuvent se propager sur de longues distances, affectant des équipements éloignés du point d'impact direct. Pour atténuer ces phénomènes, il est essentiel d'utiliser des dispositifs de protection, tels que les parafoudres.

A. Définition

Les réseaux de distribution aériens en haute tension (HTA) et basse tension (BT) sont particulièrement vulnérables aux surtensions et surintensités d'origine atmosphérique, notamment celles causées par la foudre.

B. Origine

Les surtensions peuvent résulter de deux types d'événements :

1. Les coups de foudre directs, touchant une ligne ou une structure.
2. Les effets indirects d'un coup de foudre, qui incluent les surtensions induites et la montée en potentiel de la terre (voir figure III.6).

C. Conséquences

Les conséquences des surtensions atmosphériques sont multiples :

- Claquage diélectrique.
- Coupures prolongées dues à la destruction d'équipements.
- Perturbations des circuits de contrôle et de communication.
- Arrêts ou démarrages incontrôlés des machines électriques.

La norme EN50160 définit les niveaux de surtension en fonction du schéma de mise à la terre de l'installation :

- ✓ Pour un réseau à neutre à la terre (raccordement direct ou avec impédance), la surtension ne doit pas dépasser 1,7 fois la tension nominale (U_n) ;
- ✓ Pour un réseau à neutre isolé ou résonnant, la surtension ne doit pas dépasser $2U_n$.

Les surtensions se classifient en trois catégories :

- ✓ Surtension à la fréquence industrielle (50 Hz) ;
- ✓ Surtension de manœuvre ;

- ✓ Surtension atmosphérique.

Elles se manifestent selon deux modes :

- ✓ Mode commun : entre un conducteur actif et la masse ou la terre ;
- ✓ Mode différentiel : entre conducteurs actifs (phase-phase ou phase-neutre) ;

La surtension à la fréquence industrielle résulte d'un défaut d'isolement entre phase et terre, d'une surcompensation de l'énergie réactive ou d'une ferro-résonance causée par l'interaction d'un circuit inductif et d'un condensateur. Les surtensions de manœuvre surviennent lors de modifications dans la structure du réseau, comme la mise en service de gradins de condensateurs sur une ligne à vide. En revanche, les surtensions atmosphériques proviennent directement des impacts de foudre.

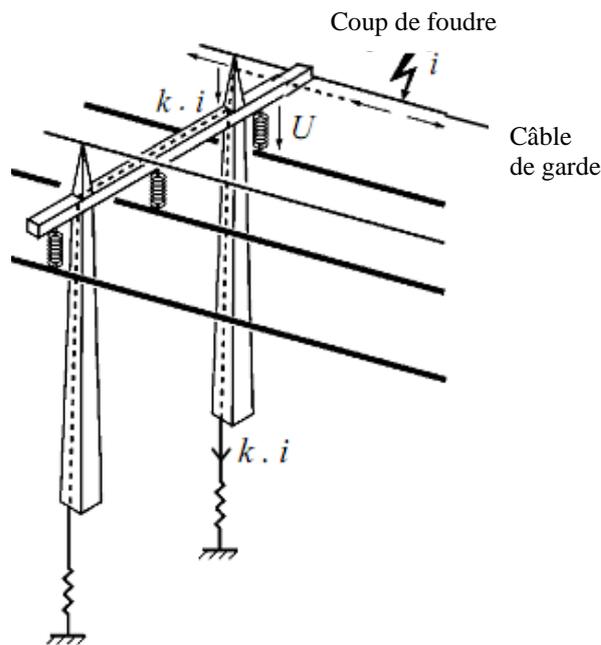


Fig III.6 Surtension atmosphérique (coups de foudre)

III.4.4 Surtensions électrostatiques (ESD - décharges électrostatiques)

Les décharges électrostatiques (ESD) surviennent lorsque des charges électriques accumulées sur une surface (comme un être humain ou un objet) sont soudainement transférées à un autre objet, souvent électronique. Ce phénomène se produit principalement dans des environnements où les objets peuvent facilement s'électriser (par exemple, des environnements secs ou avec beaucoup de frottements). L'ESD peut provoquer des dommages aux circuits électroniques sensibles, voire des pannes.

III.4.5 Impulsions électromagnétiques nucléaires (IEMN)

Les impulsions électromagnétiques nucléaires (IEMN) sont des surtensions d'origine artificielle causées par des explosions nucléaires, qui génèrent un champ électromagnétique intense et transitoire. L'IEMN peut induire des surtensions massives dans les réseaux électriques et électroniques, endommageant gravement ou détruisant les équipements connectés. Bien que rare, l'IEMN est une menace critique pour les infrastructures essentielles et nécessite des mesures de protection spécifiques.

A. Types d'effets dans le domaine électrique

Les effets dans le domaine électrique se divisent en trois types :

a. Impact sur les lignes aériennes

Celles-ci étant très exposées, elles peuvent être frappées directement par la foudre, ce qui causera premièrement une destruction totale ou partielle des câbles, et ensuite une onde de tension importante qui se propagera naturellement le long des conducteurs jusqu'aux équipements raccordés à la ligne. L'importance de l'agression sera, bien sûr, fonction de la distance entre l'équipement et l'impact.

b. Remontée du potentiel de terre

L'écoulement du courant de foudre dans le sol crée des élévations des potentiels de terre qui sont fonction de l'intensité du courant et de l'impédance de la terre locale. En cas d'installation pouvant être connectée à des terres différentes (exemple : liaison inter-bâtiments), des différences de potentiel très importantes apparaîtront lors d'un tel phénomène et les équipements connectés aux réseaux sollicités seront, soit détruits, soit fortement perturbés.

c. Rayonnement électromagnétique

L'éclair peut être assimilé à une antenne de plusieurs kilomètres de hauteur parcourue par un courant impulsionnel de plusieurs dizaines de kilo-ampères, donc qui rayonne des champs électromagnétiques intenses (plusieurs kV/m à plus d'un kilomètre). Ceux-ci vont induire des tensions et des courants élevés sur les lignes proches ou sur les équipements en fonction de la proximité et des caractéristiques de la liaison (figure III.7).

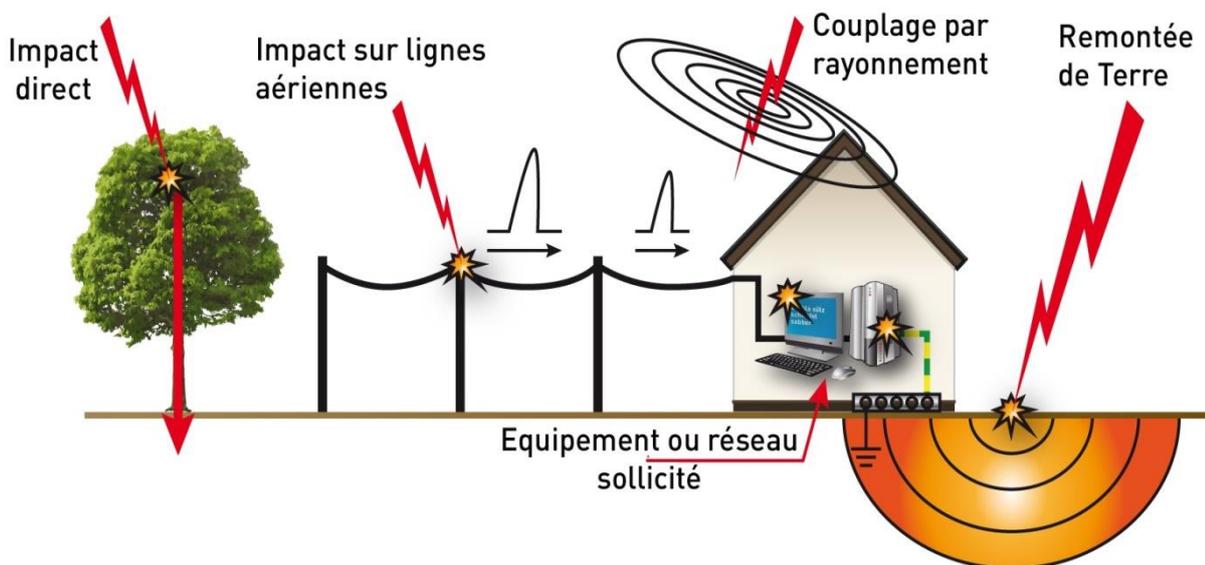


Fig III.7 Rayonnement électromagnétique

III.5 Variations de tension

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. Il existe deux types de variation de tension :

III.5.1 Variations lentes de la tension

Augmentation ou diminution de tension provoquée par la variation de la charge totale du réseau de distribution ou une partie de ce réseau (HTA ou BT).

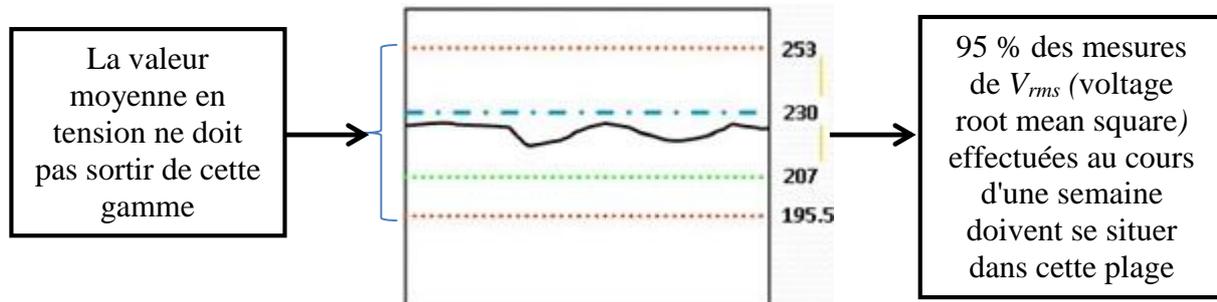


Fig III.8 Variations lentes de tension

A. Origine

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges (élévation ou baisse de la charge électrique) connectées au réseau électrique.

- ✓ 95 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans la plage définie de tension nominale $U_n \pm 10\%$;
- ✓ 100 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans la plage $+10\%$ et -15% (par rapport U_n).

B. Conséquences

Ces variations sont souvent acceptables pour les équipements.

III.5.2 Fluctuation de tension-flicker

Des variations rapides de tension, sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, téléviseurs, éoliennes, les moteurs à démarrage fréquent, tube fluorescent, etc. Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10%.

Les effets nocifs sur l'œil humain observant le flicker sont : La fatigue, l'irritabilité et même l'épilepsie. Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1% de la tension. On parle de papillotement du flux lumineux.

Pour être cohérent avec le contrat passé avec les clients et avec la facture d'électricité que leur est adressée, il faut livrer un produit de qualité c- à-d une tension triphasée équilibrée sinusoïdale de fréquence 50Hz sous une valeur nominale.

La norme NF_EN 50160 a été élaborée afin de caractériser la qualité de la tension fournie.

La Norme CEI/EN 61000-4-30 définit les méthodes de mesure de chaque paramètre les conditions et les modalités de mesure.

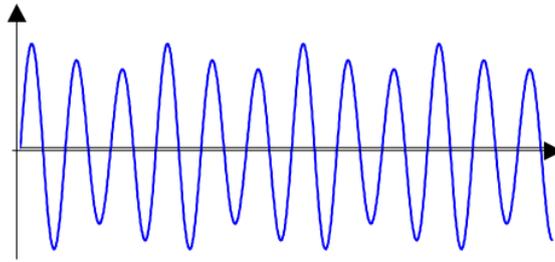


Fig III.9 Fluctuation de tension

A. Origines

- ✓ Dysfonctionnement du système d'éclairage,
- ✓ Machines à charges fluctuantes,
- ✓ Les machines à souder.

B. Conséquences

- ✓ Fluctuation de luminosité des lampes (papillotement),
- ✓ Gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse).

III.6. Harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations introduites dans le réseau par des charges non linéaires prévenant d'équipements intégrant des redresseurs et des électroniques de découpage. Les principaux problèmes sont causés par les harmoniques, ils sont à l'origine de perturbations majeures. Les courants et tensions harmoniques ne sont pas confiés à l'endroit où ils sont produits, mais ils se propagent à travers les lignes. Des normes et des directives sont dictées à cet effet, ils sont fixés par des organismes internationaux pour limiter les harmoniques

C.E.I : Commission Electrotechnique internationale

CIGRE : Conseil International des Grands Réseaux Electricque

CIGREE : Conseil International des Grands Réseaux Electricque et Electronique

III.6.1 Origine des harmoniques

Les courants harmoniques sont émis par les charges non-linéaires qui consomment des courants non-sinusoidaux :

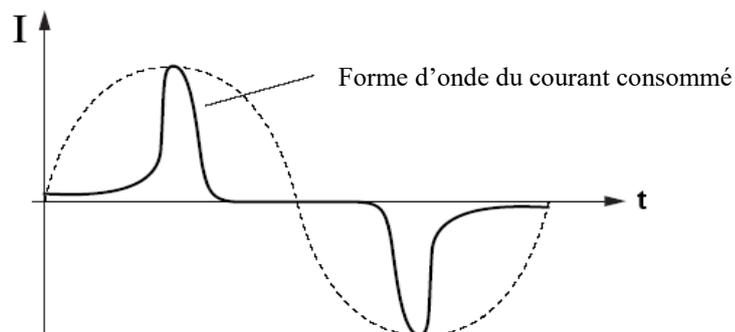


Fig.III.10 Exemple de l'évolution des courants harmoniques

Les appareils de production, de transport et de distribution incluent des alternateurs et des transformateurs de puissance. Du côté des charges industrielles, on retrouve des convertisseurs de puissance, tels que les redresseurs et les onduleurs, ainsi que des équipements équipés de convertisseurs statiques, comme les variateurs de vitesse pour machines. Pour les charges domestiques, les récepteurs de télévision, les ordinateurs, les appareils commandés par des triacs (tels que les gradateurs de lumière et les équipements électroménagers) ainsi que les lampes fluorescentes sont couramment utilisées.

III.6.2 Exemples de quelques causes des perturbations-Distorsions harmoniques

A. Alimentation via des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques de l'électronique de puissance sont les plus producteurs d'harmonique pratiquement tous les convertisseurs

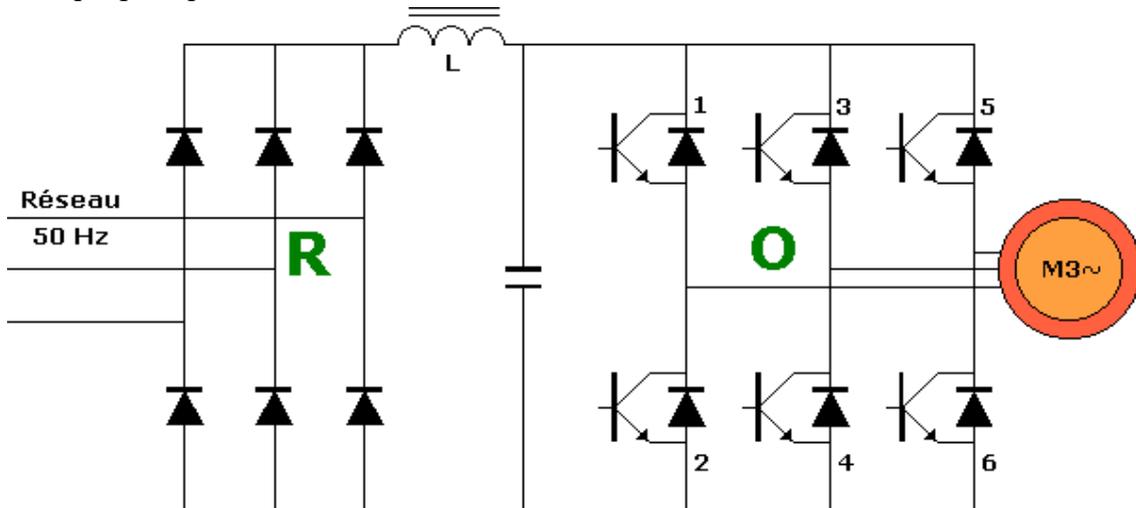


Fig III.11 Alimentation via des convertisseurs statiques

Courant absorbé par un moteur à courant continu type brushless à travers un variateur de vitesse. Courants riches en harmonique 5, 7, 11, 13. THD autours de 30%

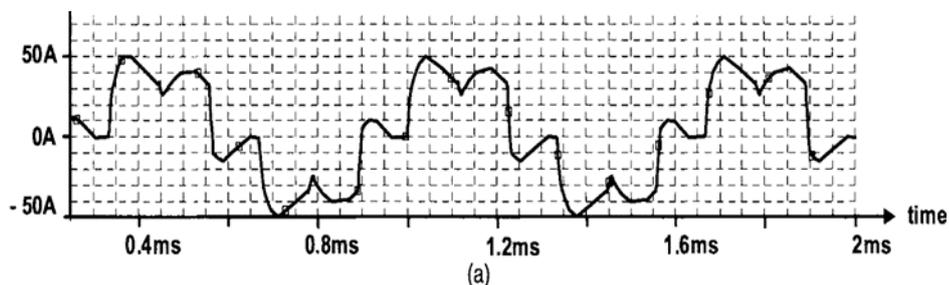


Fig III.12 Courant absorbé par un moteur à courant continu

En général tous les appareils dont l'alimentation est basée sur la conversion AC/DC

- ✓ Les interruptions complètes (quelques secondes à plusieurs heures)
- ✓ Les creux ou fléchissement pendant lesquels la tension baisse.
- ✓ Les coupures très brèves sont dommageables pour certaines opérations.

Les processus continus où une coupure brève entraîne la désynchronisation des machines causant des encombrements de produits semi-finis.

Les opérations successives où un arrêt peut annuler les opérations précédentes

Le traitement des données où un arrêt entraîne des pertes énormes (ISME pour 20 mn)

III.6.3 Problèmes de contentieux

Les points de vue des clients et des fournisseurs sont largement divergents.

1. Une coupure ou une chute de tension est un événement parfois difficile à prouver. Il est d'autant plus difficile d'attribuer une perte de production ou un dysfonctionnement à un défaut bref (expertise-contreexpertise).
2. Le fournisseur évalue les dommages en termes de coûts d'électricité non fournie alors que le client raisonne en termes de manque à gagner ou pertes.
3. Le fournisseur prend la responsabilité des coupures de longue durée. Il engage alors des solutions qui augmentent les performances de ses installations (Modernisation, identification des problèmes voir générateurs de défauts).
4. Les harmoniques sont toujours des défauts qui incriminent les clients qui les créent et les rejettent dans le réseau dans lequel elles se propagent.

Certaines solutions très sophistiquées dépassent les normes requises peuvent leur être proposées. Elles vont occasionner des investissements exorbitants et donc économiquement pas viables. Des doutes pouvant être émis quant à leurs fiabilités (pertes à faible puissance gadget) ;

Le problème de la qualité de l'énergie pose alors une importante question où est la juste mesure ?

1. Évaluer le comportement d'un composant précis lors d'un creux de tension facile ;
2. Déterminer l'incidence du creux en un endroit précis difficile ;
3. Les effets sont-ils commutatifs (additif) par de nouveaux consommateurs ?
4. Y'a-t-il compatibilité entre les différents équipements ?

Étant donné que le cœur du problème dans la qualité de l'énergie réside dans le fait que les courants et les tensions peuvent être alternatifs mais non sinusoïdaux. Il est nécessaire de faire un bref rappel sur les grandeurs électriques et ce en présence d'harmoniques.

Le théorème de Fourier indique que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée sous la forme d'une somme de termes ou série composée de :

- Un terme sinusoïdal de même fréquence. Le signal périodique original c.-à-d. le fondamental ;
- De termes sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ce sont les harmoniques ;
- Éventuellement d'un terme constant qu'on appelle composante continue.

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{III.1})$$

Avec n : entier

$n = 1$ C'est le fondamental ;

$n > 1$ C'est le rang de l'harmonique ;

y_0 : Généralement nulle valeur de la composante continue

y_n : Valeur efficace de l'harmonique de rang n

φ_n : Déphasage de la composante harmonique à $t=0$

$$y_n \sqrt{2} = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \tag{III.2}$$

A_n et B_n sont les coefficients de Fourier

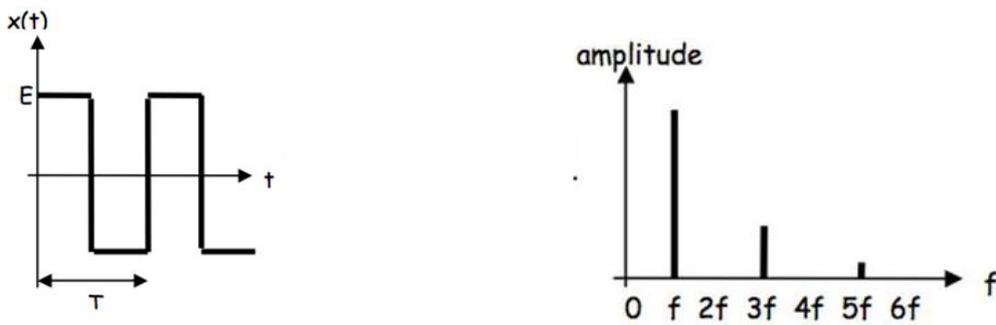
En mathématique, la série constitue une généralisation de la notion de somme, pour une succession infinie de termes. L'étude des séries consiste à effectuer la somme d'un nombre fini n de terme successifs, puis à observer le comportement lorsque n devient indéfiniment grand, par un calcul de limite. Un certain nombre de méthodes permettent de déterminer la nature (convergence ou non) des séries sans réaliser explicitement ces deux calculs. Voici quelques exemples :

Exemple 1 de Série de terme général $a_n : \sum_{n=0}^{\infty} a_0 + a_1 + a_2 + \dots + a_i + \dots$

Exemple 2 d'une série trigonométrique dont le terme général est une fonction trigonométrique où la fréquence varie selon l'indice n ,

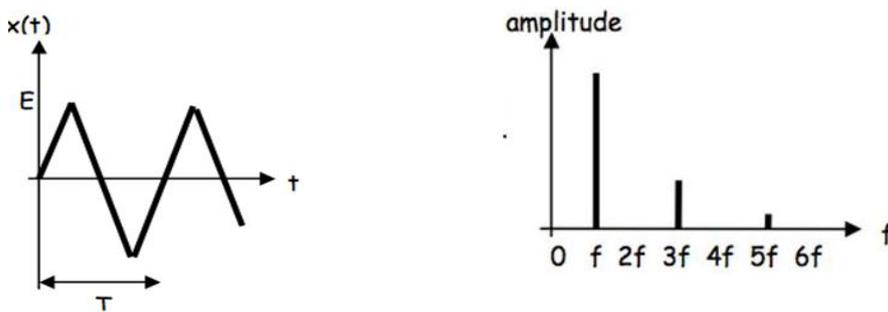
$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + \dots + a_i \cos(i\omega t) + \dots$$

Exemple 3 de signaux en électronique de puissance



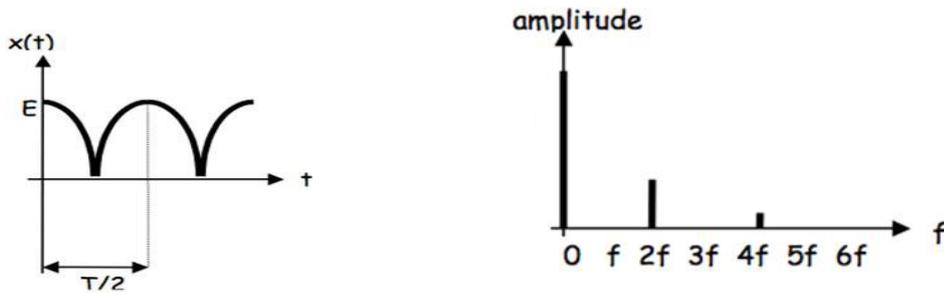
(a)

$$x(t) = \frac{4E}{\pi} \left[\sin(\omega t) + \frac{\sin(3\omega t)}{3} + \frac{\sin(5\omega t)}{5} + \dots \right] \tag{III.3}$$



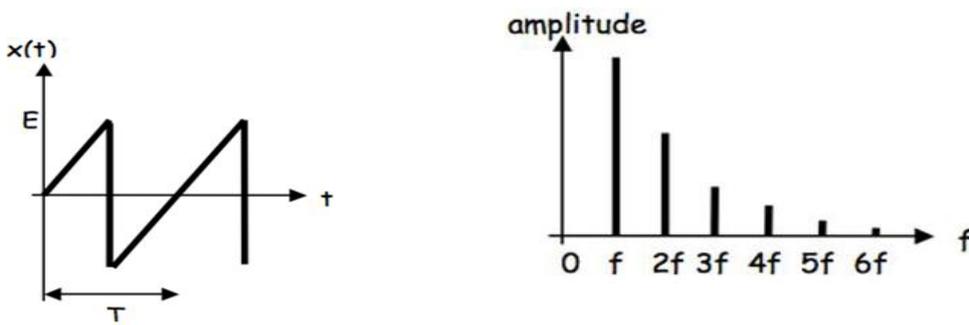
(b)

$$x(t) = \frac{8E}{\pi^2} \left[\sin(\omega t) - \frac{\sin(3\omega t)}{3^2} + \frac{\sin(5\omega t)}{5^2} - \dots \right] \tag{III.4}$$



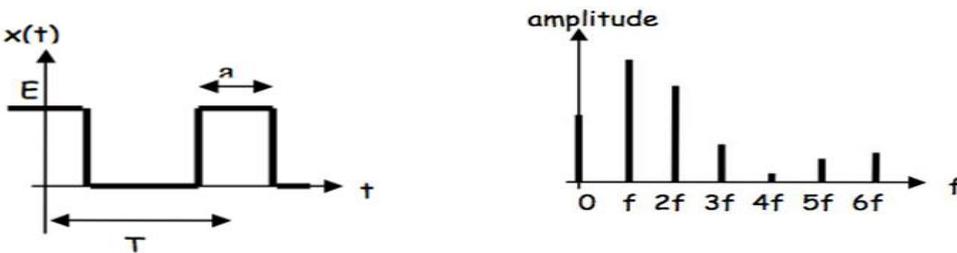
(c)

$$x(t) = \frac{2E}{\pi} \left[1 + \frac{2 \cos(2\omega t)}{3} - \frac{2 \cos(4\omega t)}{15} + \dots \right] \tag{III.5}$$



(d)

$$x(t) = \frac{2E}{\pi} \left[\sin(\omega t) - \frac{\sin(2\omega t)}{2} + \frac{\sin(3\omega t)}{3} + \dots \right] \tag{III.6}$$



(e)

$$x(t) = aE \left[1 + \frac{2 \sin(\pi a)}{\pi a} \cos(\omega t) + \dots + \frac{2 \sin(n\pi a)}{n\pi a} \cos(n\omega t) + \dots \right] \tag{III.7}$$

La valeur efficace d'une grandeur alternative non sinusoïdale est donnée par :

$$y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} \tag{III.8}$$

Avec la représentation harmonique

$$y_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} y_n^2}$$

III.6.4 Définition des taux de distorsion

Pour estimer l'altération ou le degré d'éloignement de la forme sinusoïdale, on estime la déformation du signal à travers le THD (Taux Harmonique-Distorsion).

Selon la norme CEI ou IEC commission Internationale D'Electrotechnique, ce facteur représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques ($n \geq 2$) à celle de la grandeur alternative.

La conséquence de la présence des harmoniques est liée à l'augmentation de la valeur de crête. (Claquage des isolants) augmentation des valeurs efficace (échauffement supplémentaires) spectre de fréquence (vibrations et fatigue mécanique) des courants et tensions.

Les effets des harmoniques ont toujours un impact économique du fait du surcoût :

- Dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes) ;
- Surdimensionnement des équipements ;
- Pertes de productivité (vieillesse accélérée des équipements plus déclenchements intempestifs) ;
- Augmentation des pertes fer et des courants de Foucault dans les transformateurs et les moteurs ;
- Échauffement du conducteur neutre. Les courants d'harmonique 3 et multiple de 3 s'ajoutent et reviennent à la source par le neutre.

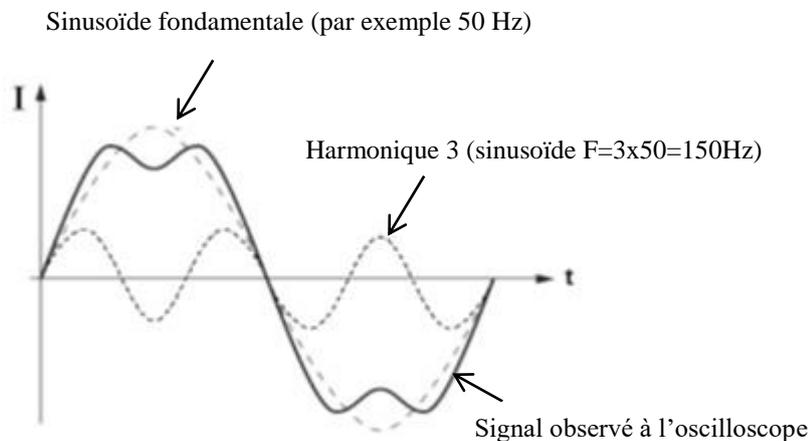


Fig III.13 Visualisation de l'harmonique 3 et des signaux fondamentaux et mesurés à l'oscilloscope

A. Valeur efficace d'une grandeur déformée

Puisque c'est la valeur efficace qui conditionne les échauffements donc les grandeurs harmoniques seront aussi exprimées en valeurs efficaces :

$$y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} \quad y_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} y_n^2} \quad (\text{III.9})$$

$$y_{eff} = \sqrt{y_0^2 + y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2 + \dots + y_n^2}$$

Exemple

Valeurs données par l'analyseur de spectre dans l'exemple du signal carré :

$$IH1 = 104 A$$

$$IH3 = 30 A$$

$$IH5 = 10 A$$

$$y_{eff} = \sqrt{104^2 + 30^2 + 10^2} = 109 A$$

La mesure de la valeur efficace de la grandeur déformée s'effectue directement par des appareils dits à vrai valeur efficace (Ferromagnétique) ou à l'aide d'analyseur de spectre.

B. Taux de distorsion

C'est pour estimer l'altération du signal, c.-à-d., son éloignement de la forme sinusoïdale ou son degré de pollution ou défini :

C. Taux Individuel

Il donne une mesure de chaque harmonique par rapport au fondamental. Le taux individuel de distorsion est le rapport de la valeur efficace de l'harmonique de rang n par rapport à celle du fondamental

$$\text{Taux de } I_n (\%) = \frac{I_n}{I_1} 100 \quad (\text{III.10})$$

D. Taux global

Il donne l'influence de l'ensemble des harmoniques, c'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace soit :

- Du fondamental (CEI 61000-2-2)

$$D = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} y_n^2}}{y_1} \quad (\text{III.11})$$

D peut être très grand

- De la grandeur déformée (Rarement)

$$D = \frac{\sqrt{\sum_2^n y_n^2}}{\sqrt{\sum_1^{\infty} y_n^2}} \quad 0 < D < 1 \quad (\text{III.12})$$

Pour déterminer le taux global de distorsion THD on utilise l'une ou l'autre des définitions. Lorsque la distorsion n'est pas exagérée ce qui est souvent le cas pour la tension, les deux expressions donnent des résultats très proches.

Exemple $\sqrt{\sum_2^n y_n^2} = 10\% Y_1$

La norme CEI donne :

$$THD = 100 \frac{\sqrt{(0.1)^2}}{\sqrt{1+0.1^2}} = 9.95\%$$

La norme CIGREE donne : $THD = 100 \frac{0.1}{1} = 10\%$

E. Facteur de puissance

Le facteur de puissance est considéré comme le rapport de la puissance active P à la puissance apparente S $F.P = \lambda = \frac{P}{S} (\neq \cos \varphi)$

Ce facteur de puissance ne doit être confondu avec le facteur de déphasage $\cos \varphi_1$

$$\lambda_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos \varphi_1$$

$\cos \varphi_1$ Facteur de déphasage du fondamental

P_1 : Puissance active de la composante fondamentale

S_1 : Puissance apparente de composante fondamentale

F. Facteur de déformation

Selon la norme CEI 146-1, il permet de définir le lien entre le facteur de puissance et $\cos \varphi_1$

$$\nu = \frac{\lambda}{\cos \varphi_1}$$

Pour les tensions et courants sinusoïdaux $\nu = 1$ alors $\lambda = \cos \varphi_1$

G. Facteur de crête

Selon la norme CEI, c'est le rapport de la valeur de crête à la valeur efficace d'une grandeur périodique $\sqrt{2}$ pour les sinusoïdes.

H. Relation entre Distorsion de courant et de tension

Pour une source donnée il est toujours possible de définir une impédance de sortie Z_s même si celle-ci dépend de la fréquence et indépendante de la valeur du courant (linéarité).

On peut calculer pour chaque harmonique de courant la tension harmonique correspondante et par la suite déduire le taux individuel d'harmonique.

I. Tension Harmonique

La tension harmonique se réfère aux composants de tension qui oscillent à des multiples entiers de la fréquence fondamentale, influençant ainsi la qualité de l'alimentation électrique."

$$U_n = Z_{sn} I_n$$

Z_{sn} : Impédance de sortie pour harmonique n

$$\checkmark \text{ Le taux individuel d'harmonique } H_n = \frac{U_n}{U_1} \quad (\text{III.13})$$

Avec U_1 valeur du fondamental

$$\checkmark \text{ Le taux global de distorsion } D\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} U_n^2}}{U_1} = 100 \sqrt{\sum_2^{\infty} H_n} \quad (\text{III.14})$$

Plus l'impédance de la source sera élevée plus le taux de distorsion sera grand pour un courant non sinusoïdal donné.

Les harmoniques ne proviennent pas en générale de l'alimentation mais du réseau client qui par des charges non-linéaires absorbe des courants non sinusoïdaux.

✓ Cas particulier de l'harmonique 2

En générale, les charges sont symétriques c- à-d qu'elles ont le même comportement dans un sens ou dans l'autre alors les harmoniques pairs sont nuls.

✓ Cas de l'harmonique 3

Les courants harmoniques de rang multiple de 3 correspondant aux trois phases vont s'additionner et donner naissance dans le conducteur neutre à la circulation d'un courant. Ce sont essentiellement, les harmoniques de rang 3 qui sont prédominants dans ce cas (les harmoniques de rangs 9, 27, etc. sont négligeables en général devant l'harmonique de rang 3). La fréquence du courant mesuré dans le conducteur neutre est de 150Hz, ce qui correspond bien à l'harmonique de rang 3.

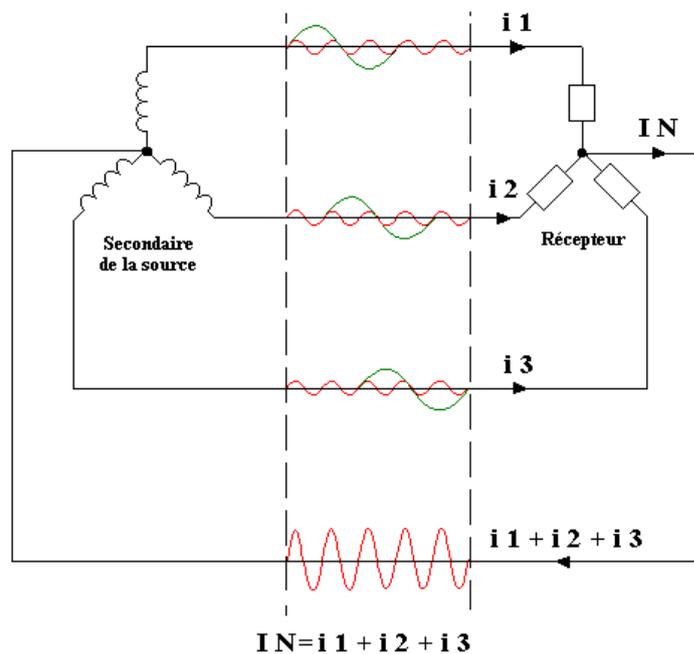


Fig.III.14 Effets des harmoniques dans le conducteur neutre

Remarque : De nombreux incendies de bâtiments industriels sont dus à l'échauffement excessif du conducteur du Neutre.

III.7 Inters harmoniques

L'appellation inter harmoniques renvoi à des indices entre des rangs donc ce sont des composants sinusoïdaux dont les fréquences ne sont pas des multiples entiers de celle du fondamentale leurs rangs sont non entiers.

A. Origine des inters harmoniques

Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteurs tels les fours à Arc, machine à souder et les convertisseurs de fréquence (variateurs de vitesse), les cyclo-convertisseurs qui sont des convertisseurs matriciels actuels ou les SVC (Static Var compensator). Leur spectre peut être discret ou continue et variable de façon aléatoire (Four à Arc) ou intermittente (Machine à souder).

Ceci bon indicateur de la distorsion est celui qui tiendra compte des inters harmoniques. Le TDR (Rapport Total de Distorsion) est défini comme suit :

$$TDR = \frac{TDC}{y_1} = \frac{\sqrt{y^2 - y_1^2}}{y_1} \quad (\text{III.15})$$

Avec,

y_1 : Valeur efficace du fondamental ;

y : Valeur efficace totale de la grandeur.

Lorsque le rang de l'harmonique est inférieur à 1 on parle alors d'intra harmonique et on lui attribue la lettre « m » d'après la norme IEC 61000-2-2.

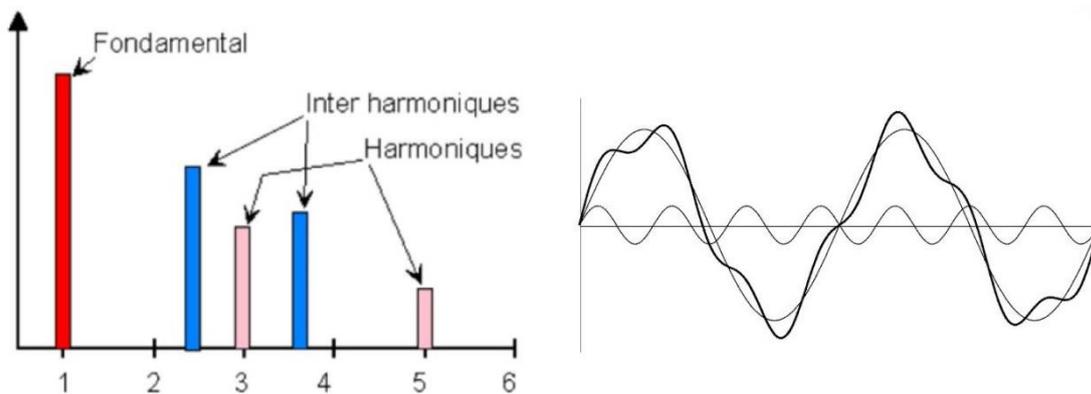


Fig III.15 Distorsion provoquée par un seul interharmonique (h=3,5)

III.8 Générateurs d'harmoniques

Des récepteurs tels que les moteurs asynchrones, les transformateurs, les alternateurs génèrent des harmoniques. Soit à cause de la dissymétrie dans les enroulements, soit à cause de la répartition non sinusoïdale du champ soit à cause de la saturation.

Les alternateurs des centrales électriques produisent en générale. Une tension qui contient très peu d'harmoniques, (taux 0.5%). Les transformateurs lorsqu'il fonctionnement en régime saturé peuvent produire jusqu'à 1% et les groupes électrogènes produisent jusqu'à 5%.

III.9 Notion de la charge déformante

Les charges déformantes, encore appelées non linéaires, sont présentes dans de nombreux dispositifs de l'électrotechnique : les variateurs de vitesse (figure III.16) ou encore les redresseurs dans le domaine industriel, mais aussi les alimentations à découpage dans les ordinateurs et les onduleurs de tension (figure III.17) pour le domaine tertiaire.

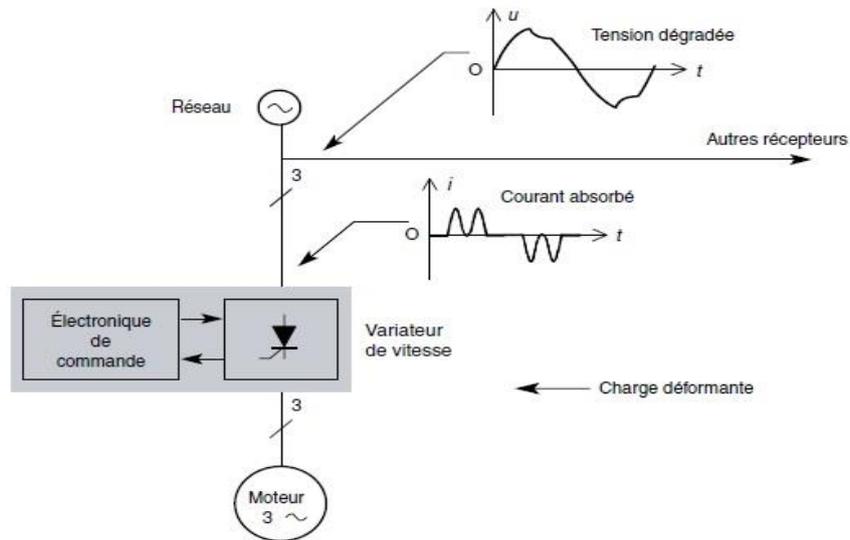


Fig III.16 Moteur Asynchrone équipé de son variateur de vitesse

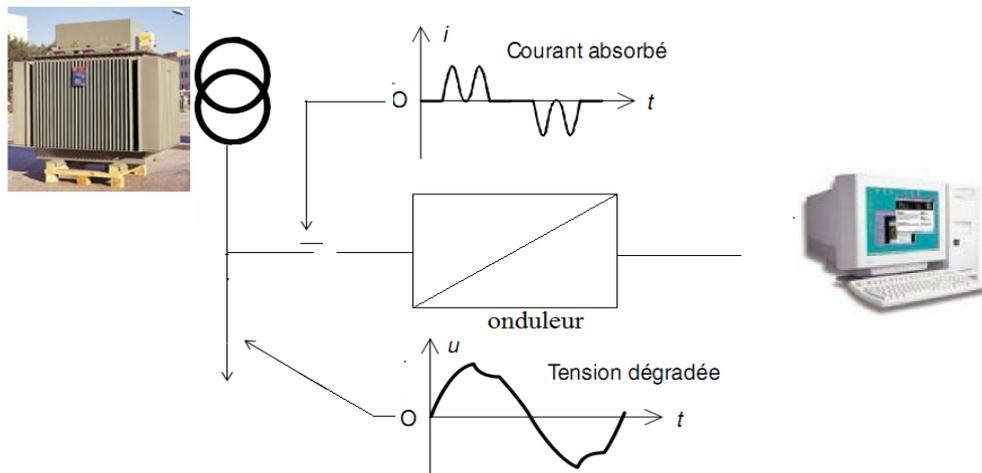


Fig III.17 Onduleur de tension alimentant un poste micro-ordinateur

III.10 Nature des principaux pollueurs

A. Redresseur monophasé

Ce convertisseur statique est intégré dans :

- Micro-ordinateur ;
- Imprimante et périphérique ;
- Variateur de vitesse ;
- Téléviseurs.

B. Gradateur à angle de phase

Il est intégré dans :

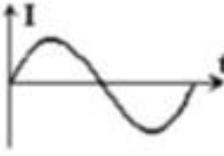
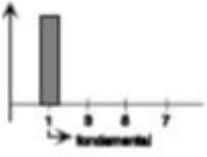
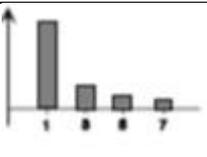
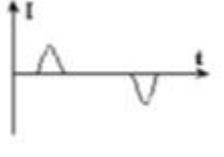
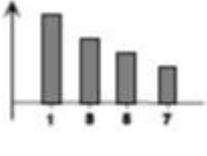
- Modulation de l'éclairage ;
- Commande fours électrique ;
- Variateur de puissance ;
- Démarreur progressif de moteurs.

C. Redresseur triphasé à base de semi-conducteurs

On le trouve dans :

- Les variateurs de vitesse de moteurs (pompe-convoyeur) ;
- Four à induction ;
- Electrolyseurs.

Tableau III.2 Principaux types de charges et allure des courants absorbés

Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spctre harmonique correspondant
Récepteur résistif	-Fours industriels à résistances réglées par commande à trains d'ondes -Lampe à incandescence, chauffe- eau		
Eclairage	-Tube fluorescents, -Lampes à vapeur HP.		
Redresseur monophasé à diodes avec filtrage Alimentation à découpage	-Micro-informatique -Télévisions -Lampes à ballast électronique.		

III.11 Propagation des harmoniques

Lorsque des charges non linéaires sont connectées au réseau, elles génèrent des courants harmoniques qui se propagent à travers l'ensemble du système. En traversant les impédances des différents éléments du réseau, ces courants induisent des tensions harmoniques, perturbant ainsi la qualité de l'alimentation électrique.

$$V_h = Z_h I_h \tag{III.16}$$

A. Impédances du réseau

Les impédances des éléments du réseau jouent un grand rôle dans la propagation des perturbations harmoniques, cette impédance est fonction de la fréquence.

Soit le schéma équivalent suivant :

Les impédances du réseau, une formulation générale pourrait être :

$$Z_h(f) = R + j\omega L - \frac{j}{\omega C} \tag{III.17}$$

Où :

- ✓ R est la résistance,
- ✓ L est l'inductance,
- ✓ C est la capacité,
- ✓ ω est la fréquence angulaire ($\omega=2\pi f$)

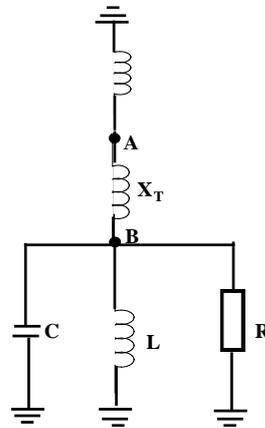


Fig III.18 Impédances du réseau

- ✓ En aval du point A, l'impédance observée est la suivante :

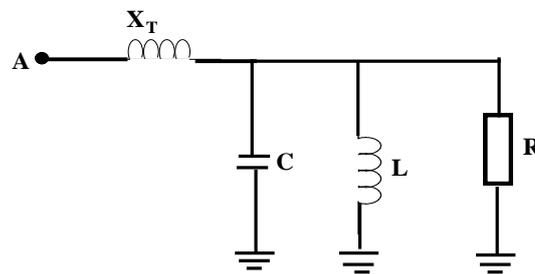


Fig III.19 Impédance Z_h en aval du point A

- ✓ En amont du point A, l'impédance observée est la suivante :

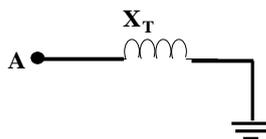


Fig III.20 Impédance Z_h en amont du point A

B. Variation de l'impédance harmonique

Lorsqu'on est en présence d'élément inductif ou résistif (lignes-transformateur-charge), la variation de l'impédance est linéaire. Dès que des condensateurs sont présents, alors la linéarité se perd et une modification sensible est observée.

- ✓ **Pour BF :** La bande de fréquence basse (BF) englobe généralement les fréquences allant de quelques hertz à quelques kilohertz, et elle est souvent associée aux signaux audio et aux communications à courte portée.

$$\text{BF } Z = L\omega$$

- ✓ **Pour HF :** La bande de fréquence haute (HF) couvre les fréquences de plusieurs mégahertz à des centaines de mégahertz, et elle est couramment utilisée dans les transmissions radio, les communications sans fil et les technologies de données."

$$\text{HF } Z = \frac{1}{C\omega}$$

Il peut en résulter alors des résonances qui vont grandement influencer sur la propagation des harmoniques

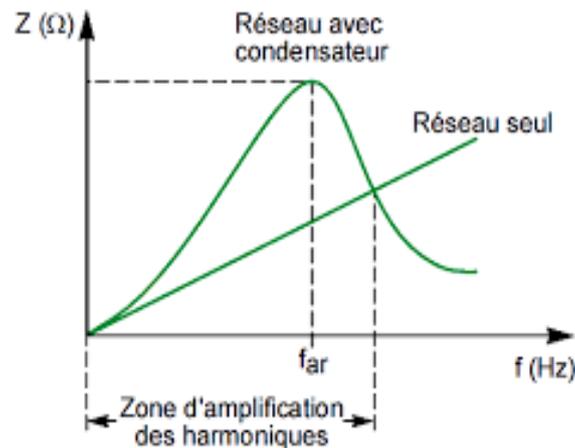


Fig III.21 Variation de l'impédance harmonique en fonction des fréquences

C. Phénomène de résonance

Ces phénomènes apparaissent lors d'association d'éléments inductifs et capacitifs. Ils peuvent entraîner des valeurs très élevées ou très faibles de tensions, courants et impédances harmoniques. Il y a deux types de résonances :

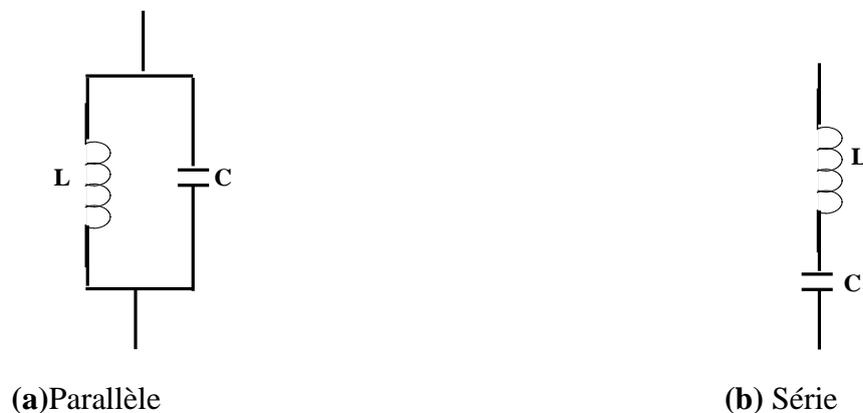


Fig III.22 Types de Résonance dans les Circuits Inductifs et Capacitifs

✓ **Résonance Parallèle**

Dans ce cas l'impédance harmonique s'écrit

$$Z_h = \frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2} \quad (\text{III.18})$$

La résonance se manifeste pour

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{III.19})$$

C'est-à-dire pour $1 - LC\omega^2 = 0$

C'est alors que Z_h devient infinie

✓ **Résonance série**

$$Z_h = \frac{1 - LC\omega^2}{jC\omega} \quad (\text{III.20})$$

Dès que $LC\omega^2 = 1$ c'est-à-dire pour la fréquence $f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ l'impédance harmonique

devient nulle. Les risques encourus par la présence de ces résonances sont grands dans un réseau électrique :

X_{ch} : Traduit la puissance réactive de la charge ;

R_{ch} : Traduit la puissance active de la charge.

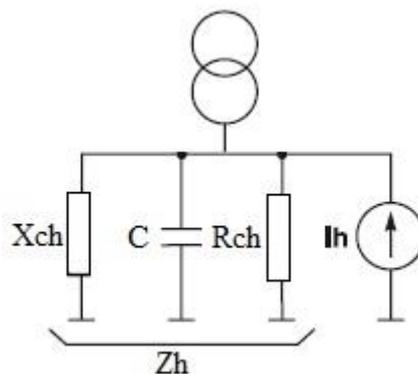


Fig III.23 Résonance série et impédance harmonique dans un réseau électrique

Si le réseau est à vide c'est-à-dire R_{ch} tend vers l'impédance Z_h au niveau du jeu de barres devient infinie $V_h = Z_h I_h$ alors les courants dans C et X_{ch} sont alors infinis. En conclusion lors de la résonance parallèle les condensateurs peuvent être soumis à d'énormes tensions qui peuvent les détruire, seulement dans la plupart des cas, la résistance R_{ch} n'est pas infinie, elle permet alors d'amortir la résonance.

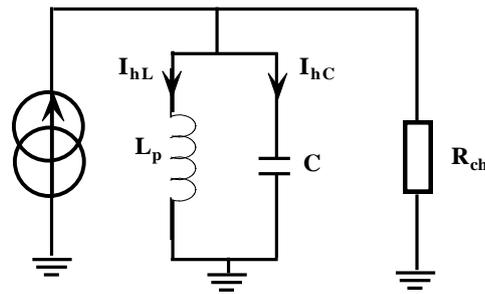


Fig III.24 Impact de la résonance parallèle sur les condensateurs en réseau à vide

Le circuit LC se comporte comme un circuit ouvert et une faible résistance R_{ch} (forte charge active) peut limiter la tension harmonique.

✓ *Gestion de la résonance et impact sur les condensateurs dans les transformateurs*

La résonance entraîne un courant harmonique infini, ce qui conduit à une tension harmonique infinie aux bornes de l'élément X du transformateur. Par conséquent, lors de l'installation de condensateurs, il est essentiel de s'assurer qu'ils ne se situent pas dans la zone de résonance. Cela permet d'optimiser leur performance vis-à-vis des harmoniques, grâce à leur faible impédance aux fréquences élevées.

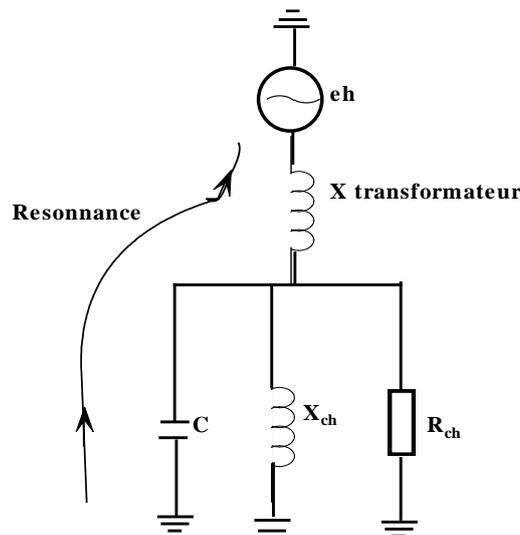


Fig III.25 Effets de la résonance sur le courant et la tension harmonique

III.12 Impacts des harmoniques sur le réseau électrique

A. Effets immédiats

- ✓ Dégradation du facteur de puissance ;
- ✓ Dysfonctionnement des ordinateurs ;
- ✓ Réduction de la puissance des moteurs ;
- ✓ Bruits et vibrations anormaux ;
- ✓ Claquage des condensateurs ;

- ✓ Différences de potentiel entre masses ;
- ✓ Déclenchement intempestif des protections ;
- ✓ Fusions des fusibles BT ;
- ✓ Surcharges des lignes, câbles, transformateurs et moteurs.

B. Effets à moyen/long terme

- ✓ Réduction de la durée de vie des moteurs,
- ✓ Réduction de la durée de vie des transformateurs,
- ✓ Echauffement dans les conducteurs (surtout le neutre),
- ✓ Pertes en ligne supplémentaires.

C. Effets sur les transformateurs de puissance

- ✓ Sous l'effet de peau, plus le rang de l'harmonique est élevé, plus la résistance des enroulements augmente.
- ✓ Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à la fréquence.
- ✓ Les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de la fréquence.

La proportion d'harmoniques de courant et le taux de charge du transformateur auront donc tous les deux un impact sur le comportement thermique du transformateur ;

La réduction de la durée de vie des équipements peut coûter très cher. Par exemple l'obligation de remplacer des transformateurs après 7 ou 10 ans, alors qu'une durée de vie normale est de 30 à 40 ans.

III.13 Compatibilité électromagnétique

Tous les systèmes électriques et électroniques sont soumis à des perturbations qui proviennent de l'énergie parasite qui franchit d'une manière non intentionnelle leurs frontières. Cette énergie parasite est appelée perturbation électromagnétique. La Compatibilité électromagnétique est une discipline qui a pour objectif d'étudier les problèmes de cohabitation électromagnétique. Elle a pour vocation de :

- ✓ Etudier les transferts d'énergie non intentionnels entre systèmes électriques et/ou électroniques ;
- ✓ Mettre au point des procédés permettant de limiter les perturbations électromagnétiques émises et de ce fait satisfaire à la réglementation en vigueur ;
- ✓ Mettre au point des procédés permettant d'accroître l'immunité des systèmes aux parasites.

Un système électro magnétiquement compatible respecte 3 critères :

- ✓ Il ne produit aucune interférence (perturbation) avec d'autres systèmes ;
- ✓ Il n'est pas susceptible aux émissions des autres systèmes ;
- ✓ Il ne produit aucune interférence (perturbation) avec lui-même.

Il est bien connu que tout équipement est exposé à diverses perturbations électromagnétiques, qui peuvent être générées de différentes manières. Celles-ci se produisent souvent, principalement, en raison de variations soudaines du courant ou de la tension. Ces perturbations se propagent soit :

- Par conduction le long des fils et câbles ;
- Par rayonnement sous forme d'onde E.M ;
- Elles engendrent alors des phénomènes gênants :
- Brouillage des ondes radios ;

- Interférences dans les émissions de signaux radio électriques dans les systèmes de contrôle et de commande.

De nos jours la C.E.M trouve son importance dans le fait que :

- Les perturbations dus au courant et à la tension sont en constante augmentation ;
- Les circuits électroniques sont de plus en plus sensibles ;
- Pour la réduction des encombrements les distances entre les circuits sensibles (électroniques) et les circuits de puissance (perturbateurs) sont en constante diminution.

III.13.1 Perturbations courants

Tableau III.3

Ordre	Type	Origines
Energétique	Creux de tension	-Perturbation de sources -Court-circuit -Démarrage de gros moteurs
Fréquences Moyenne	Harmonique	Système E. d. P Fours à Arc
H. F	Surtension Décharges électrostatiques	-Coup de foudre -Manœuvre d'appareillage

Les études en C.E.M s'intéressent à :

- La source de perturbation ;
- L'élément qui subit la perturbation (victime) ;
- La propagation ou le couplage.

Si l'étude de la source et de la victime ne pose pas de gros problèmes, l'étude de la propagation par contre s'avère compliquée. Elle renvoie à des équations différentielles complexes dites équations de Maxwell. On a recours alors à certaines hypothèses simplificatrices et des modèles que l'on valide après expérimentation et par la mesure.

III.13.2 Principales caractéristiques des perturbations E.M

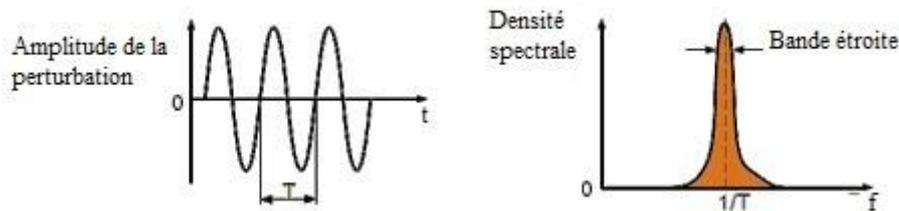
Les sources de perturbation se distinguent par les caractéristiques des perturbations qu'elles génèrent :

- Le spectre ;
- La forme de l'onde, le temps de montée ou la forme de l'onde ;
- L'amplitude ;
- L'énergie ;

A. Le spectre

C'est aussi la bande de fréquence couverte qui peut être large ou étroite. Des perturbations peuvent être impulsionnelles avec une bande large pouvant atteindre des centaines de MHz. C'est le cas des décharges électrostatiques ou d'appareillage de manœuvre (Relais, Sectionneur, Contacteurs, Disjoncteurs).

Cas d'un signal radio



Cas d'un effet indirect de coup de foudre

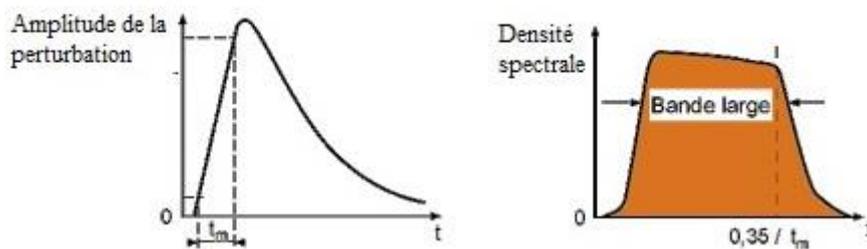


Fig.III.26 Caractéristiques des perturbations électromagnétiques et leur Spectre

B. Forme de l'onde

Elle décrit la forme temporelle de la perturbation, qui peut être sinusoïdale, amortie ou exponentielle. Cette caractérisation s'exprime par le temps de montée t_m , ou par une fréquence équivalente, calculée comme $f=0.35/t_m$ pour une bande large. Pour une bande étroite, on utilise la fréquence de la perturbation. On peut également l'exprimer en termes de longueur d'onde, notée $\lambda=c/f$, où $c=3*10^8m/s$.

C. L'amplitude

L'amplitude est la valeur maximale atteinte par le signal perturbant tension(V). Champ électrique (V/m).

D. L'énergie

C'est l'intégrale de sa puissance sur toute la durée de la perturbation (J).

III.13.3 Source de perturbation permanente

Dans le domaine de l'électrodynamique des puissances (E.D.P), les sources de perturbations sont principalement liées aux variations de tension, pouvant atteindre plusieurs centaines de volts (0 à 600 V) en quelques dizaines de nanosecondes. Dans le cadre de la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI), ces variations peuvent engendrer des gradients de tension $\frac{dv}{dt}$ de l'ordre de 10^9 V/S. Ces gradients de tension entraînent des courants circulant à travers les capacités parasites de l'ordre de $I = C_p \frac{dv}{dt}$, qui peuvent générer des courants de plusieurs milliampères,

notamment lorsque ces courants circulent dans des conducteurs de référence à « zéro » de tension dans les montages électroniques. Ces phénomènes peuvent avoir plusieurs conséquences :

- Ils peuvent altérer les ordres de commande où fausser des mesures sensibles en se superposant à des informations critiques.
- Ils peuvent perturber d'autres utilisateurs en étant réinjectés dans le réseau.

Pour atténuer ces effets, la compatibilité électromagnétique (C.E.M) recommande de ralentir les fronts de montée de la tension. Cependant, cette approche a pour effet d'augmenter les pertes par commutation dans les semi-conducteurs (comme les thyristors), ce qui accroît les contraintes thermiques.

L'idéal serait d'augmenter l'impédance du mode commun entre la structure et la masse. Lors de l'implantation des composants électroniques de puissance, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre :

- Lorsque les règles de sécurité le permettent, les radiateurs de refroidissement des composants sont laissés flottants, c'est-à-dire sans liaison électrique.
- On cherche à réduire la capacité parasite entre le composant et son radiateur en utilisant des isolants performants ayant une faible constante diélectrique.

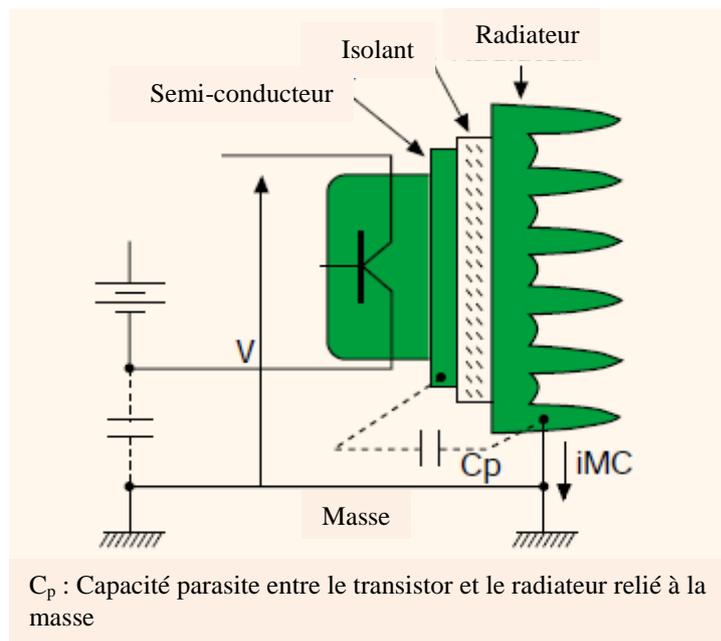


Fig III.27 Sources de perturbation permanente dans l'électrodynamique des puissances"

Tableau III.4 : Caractéristiques des Isolants : Épaisseur et Capacité Parasite

Isolant	Épaisseur (mm)	Capacité parasite (pF)
Mica	0.1	160
Plastique	0.2	95
Alumine	2	22

III.13. 4 Source de perturbations intermittente ou rayonnées

Certaines manœuvres d'appareillage dans les postes MT et HT entraînent lors de la fermeture des variations de tension très importantes

Exemple : fermeture d'un interrupteur de 24kV, les claquages de pré amorçages engendrent des variations de plusieurs kV en quelques nanosecondes. Ce qui fait apparaître des champs impulsionnels de 7 à 8 kV/m de crête avec des fréquences de 80MHz. Comparer à un Talkie-Walkie dont l'antenne génère à 1m des champs de l'ordre de 3 à 5V/m.

Ces ondes se propagent extrêmement vite le long des conducteurs, jeux de barres, câbles, lignes aériennes qui se comportent alors comme de véritables auteurs rayonnants.

III.13.5 Couplages

C'est tout ce qui favorise le passage ou la transmission des perturbations E.M de la source vers la victime. Le couplage est caractérisé par un coefficient $k=20\log A$ A : amplitude de la perturbation.

k exprimé en dB pouvant traduire l'efficacité de transmission d'une perturbation.

Dans les études de CEM, ce coefficient est important car plus il est faible, la perturbation effectivement reçue est d'autant plus faible et la CEM est meilleure.

Modes des couplages

- ✓ Couplage champ à câble en mode commun ou différentiel ;
- ✓ Couplage par impédance commune ;
- ✓ Couplage câble à câble en mode différentiel ou diaphonie

a. Couplage champ à câble

Le champ électromagnétique peut agir sur tout fil donc tout câble et y induire des tensions en mode commun (par rapport à la masse) soit en mode différentiel (entre-fils), tel que :

- ✓ En mode commun la perturbation met en œuvre une tension qui s'applique à l'ensemble des conducteurs actifs. Elle est référentielle par rapport à la masse.
- ✓ En mode différentiel, cela concerne l'ensemble des tensions et courants entre deux phases ou entre deux fils qui transportent un signal de mesure à l'électronique.

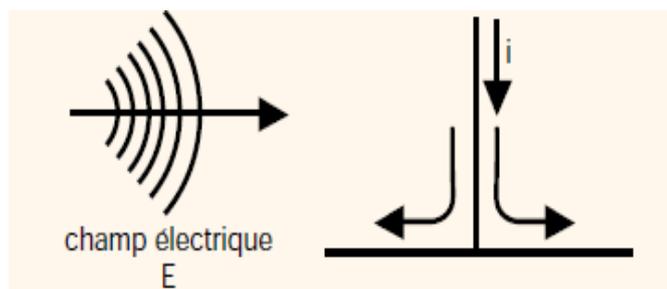


Fig II.28 Couplage électromagnétique entre câbles

b. Couplage à impédance commune

Le couplage à impédance commune résulte de la présence d'un circuit partagé entre différents appareils. Parmi ces circuits, on trouve notamment :

- Le circuit d'alimentation
- Le circuit de masse
- Le réseau de protection PE et PEN (Protective Earth, Protective Earth and Neutral)

La figure III.29 illustre que lorsque des courants de haute fréquence, des courants de défaut à 50 Hz, ou des impulsions dues à la foudre circulent dans ces impédances communes (Z), les deux équipements peuvent subir une différence de potentiel indésirable $V_A - V_B$, ce qui représente un risque pour les circuits électroniques à faible niveau.

Il est important de noter que tous les câbles, y compris le conducteur de protection (PE), présentent une impédance qui augmente avec la fréquence.

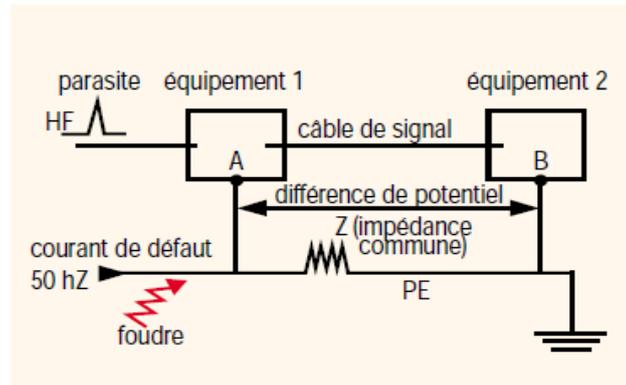


Fig III.29 Couplage à impédance commune et risques de différence de potentiel entre équipements

c. Couplage magnétique ou diaphonie inductive

Une variation de courant dans un conducteur génère un champ magnétique (H) variable. Il va créer une force contre-électromotrice qui développera une tension perturbatrice (e) dans un câblage victime présentant une boucle de surface (S).

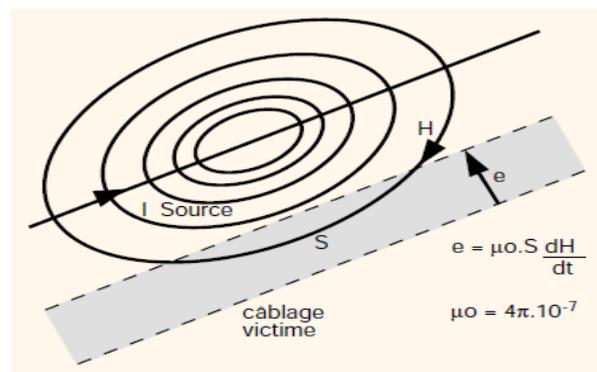


Fig III.30 Couplage magnétique : Diaphonie Inductive et effets des variations de courant

III.14 Impacts de la foudre

Depuis l'arrêté du 15 janvier 2008, toutes les entreprises classées comme installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) doivent se prémunir contre les effets de la foudre. Ce phénomène naturel survient généralement lors des orages et peut avoir des conséquences significatives. On distingue deux types d'effets : les coups de foudre directs, qui touchent directement une ligne ou une structure, et les effets indirects, tels que les surtensions induites et la montée du potentiel de la terre. Les réseaux aériens sont particulièrement vulnérables à ces phénomènes. Lorsque la foudre s'abat sur une ligne de moyenne tension (MT), elle provoque

l'amorçage de l'éclateur ou du parafoudre, permettant à une partie de l'onde de choc de passer. Ce dernier peut être amplifié par le phénomène de réflexion d'onde. La figure III.31 illustre le nombre et le niveau des surtensions que l'on peut s'attendre à rencontrer au cours d'une année.

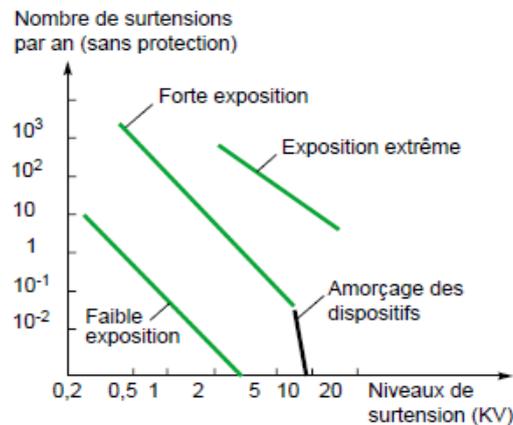


Fig III.31 Fréquence et niveau des surtensions attendues sur une année

III.15 Déséquilibre du système triphasé

Le déséquilibre du système triphasé s'observe lorsque les 3 tensions du système ne sont pas égales et/ou déphasé de 120° les unes par rapport aux autres. La quantification du phénomène fait appel à la décomposition de la composante fondamentale selon des composantes symétriques de Fortescue. En se référant à la composante directe, on définit un degré de déséquilibre inverse et un degré de déséquilibre homopolaire.

Le déséquilibre inverse est le rapport entre la composante inverse du fondamental de la tension et sa composante directe.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \quad (\text{III.21})$$

Le degré de déséquilibre homopolaire est le rapport entre la composante homopolaire du fondamental de la tension et sa composante directe.

$$\Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|} \quad (\text{III.22})$$

La norme EN50160 fixe le taux de déséquilibre inverse admissible à 2% sur les valeurs efficaces calculées sur 10mn pour 95% du temps d'une semaine.

Le déséquilibre du système triphasé de tension est dû essentiellement aux charges monophasées ou déséquilibrées raccordées sur le réseau. Les dissymétries du réseau ne provoquent que de faibles niveaux de déséquilibre de la tension (généralement limités à quelques dixièmes de pour-cent). Par contre, certaines charges monophasées (en particulier la traction ferroviaire en courant alternatif) sont la cause de courants déséquilibrés importants et des lors d'un déséquilibre significatif de la tension. Le problème principal engendré par le déséquilibre est l'échauffement supplémentaire des machines tournantes triphasées.

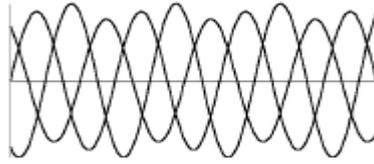


Fig III.32 Déséquilibre de tension.

III.16 Synthèse

La dégradation de la qualité de l'énergie est causée par des perturbations électromagnétiques, qui se divisent en deux catégories : les perturbations conduites et rayonnées. Les creux de tension et les coupures, souvent provoqués par des courts-circuits et le démarrage de moteurs, compromettent la stabilité du réseau électrique. De plus, les surtensions, lorsqu'elles dépassent 10 % de la tension nominale, peuvent causer des dommages importants aux équipements. Les harmoniques, résultant de charges non linéaires, engendrent également divers dysfonctionnements. Il est donc crucial de gérer la compatibilité électromagnétique et de surveiller le déséquilibre dans les systèmes triphasés afin d'assurer un fonctionnement optimal et fiable.

Chapitre IV

Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique

IV.1 Introduction

Des phénomènes, tels que : défaut d'isolement du matériel, coup de foudre, blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien, provoquent des courts-circuits qui génèrent des chutes de tension importantes dans une zone plus ou moins étendue autour de l'origine du défaut. Une dégradation de la qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques. Ceci suppose trois éléments :

- ✓ Un ou plusieurs générateurs de perturbations,
- ✓ Un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations,
- ✓ Entre les deux un chemin de propagation de ces perturbations.

IV.2 Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique

Les solutions consistent à agir sur tout ou sur une partie de ces trois éléments soit de façon globale (installation) soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs).

Ces solutions peuvent être mises en œuvre pour corriger un dysfonctionnement dans une installation, d'agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie et de réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en kVA, réduction de la consommation).

Les récepteurs n'étant pas sensibles aux mêmes perturbations et avec des niveaux de sensibilité différents, la solution adoptée, en plus d'être la plus performante d'un point de vue technico-économique, doit garantir un niveau de qualité de l'énergie électrique sur mesure et adapté au besoin réel.

Un diagnostic préalable effectué par des spécialistes, de façon à déterminer la nature des perturbations contre lesquelles il faut se prémunir, est indispensable. Il conditionne l'efficacité de la solution retenue. L'étude, le choix, la mise en œuvre et la maintenance (qui assure l'efficacité dans le temps) de solutions doivent aussi être effectués par des spécialistes.

L'utilité même de choisir une solution et de la mettre en œuvre dépend :

- Du niveau de performance souhaité : Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairages et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale...etc.).
- Des conséquences financières du dysfonctionnement : Tout arrêt non programmé, même très court, de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie...etc.) conduit à une perte ou à une production de mauvaise qualité.

- Du temps de retour sur investissement souhaité : C'est le rapport entre les pertes financières (matières premières, pertes de production...etc.) provoquées par la non-qualité de l'énergie électrique et le coût (étude, mise en œuvre, fonctionnement, maintenance) de la solution.

D'autres critères tels que les habitudes, la réglementation et les limites de perturbations imposées par le distributeur sont aussi à prendre en compte.

IV.2.1 Creux de tension et coupures

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension qui sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés. Pour dépolluer les réseaux électriques de ces perturbations, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de non symétrie de tension.

Quant à la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

La solution moderne pour la compensation des creux de tension se base sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASI (Alimentation Sans Interruption). Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

IV.2.2 Harmoniques

L'approche peut être faite soit à leur suppression par le filtrage passif ou actif soit à éviter de les produire. Puisque les principaux pourvoyeurs d'harmonique sont les convertisseurs statiques de l'électronique de puissance alors on s'attache à les améliorer. L'amélioration consiste à étudier la structure ou une morphologie convenable ou à utiliser une commande appropriée du convertisseur.

A. Structure du convertisseur

Une diminution substantielle du THD peut être obtenue par l'association en série de deux convertisseurs identiques. Une association judicieuse permet d'obtenir une tension de sortie d'indice de pulsation égal à 12.

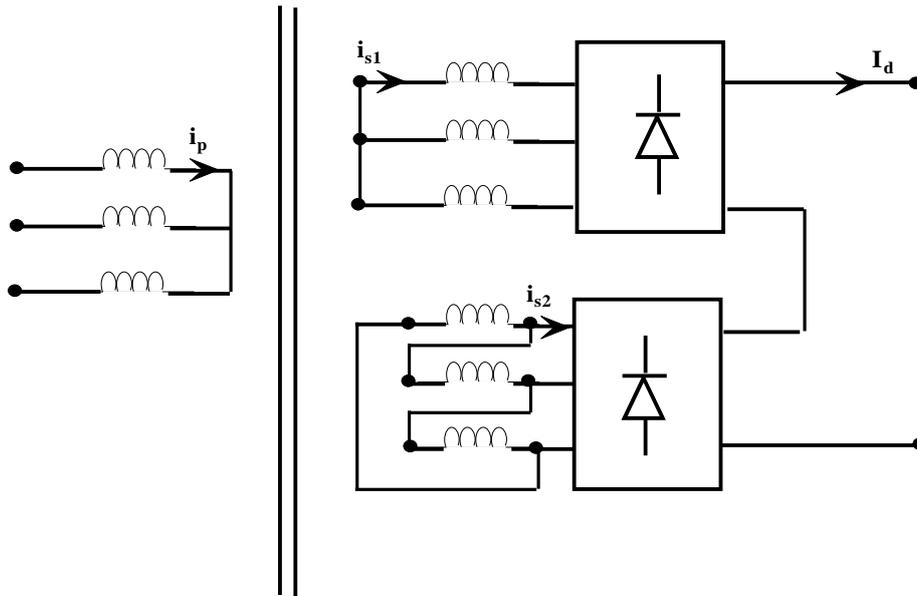


Fig IV.1 Association de Deux Convertisseurs

On utilise un transformateur à 2 secondaires, l'un couplé en étoile l'autre couplé en triangle pour créer un déphasage entre les tensions qui alimentent les deux convertisseurs.

En étoile le courant est de la forme :

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5 \omega t - \frac{1}{7} \sin 7 \omega t + \frac{1}{11} \sin 11 \omega t + \frac{1}{13} \sin 13 \omega t - \frac{1}{17} \sin 17 \omega t - \frac{1}{19} \sin 19 \omega t \dots) \tag{IV.1}$$

Le courant débité par le secondaire en triangle est de la forme d'une inductance forte mais la tendance

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5 \omega t + \frac{1}{7} \sin 7 \omega t + \frac{1}{11} \sin 11 \omega t + \frac{1}{13} \sin 13 \omega t + \frac{1}{17} \sin 17 \omega t + \frac{1}{19} \sin 19 \omega t \dots) \tag{IV.2}$$

Le THD pour chacun des secondaires est de l'ordre de 31%.

Au primaire le courant qui est la somme des courants produits par les deux secondaires sera de la forme

$$i_p = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega t + \frac{1}{11} \sin 11 \omega t + \frac{1}{13} \sin 13 \omega t + \frac{1}{23} \sin 23 \omega t \dots) \tag{IV.3}$$

Son taux d'harmonique est de l'ordre de 15%, soit une réduction de 50%. On peut envisager un montage série de 3 convertisseurs pour avoir un indice de pulsation de 18

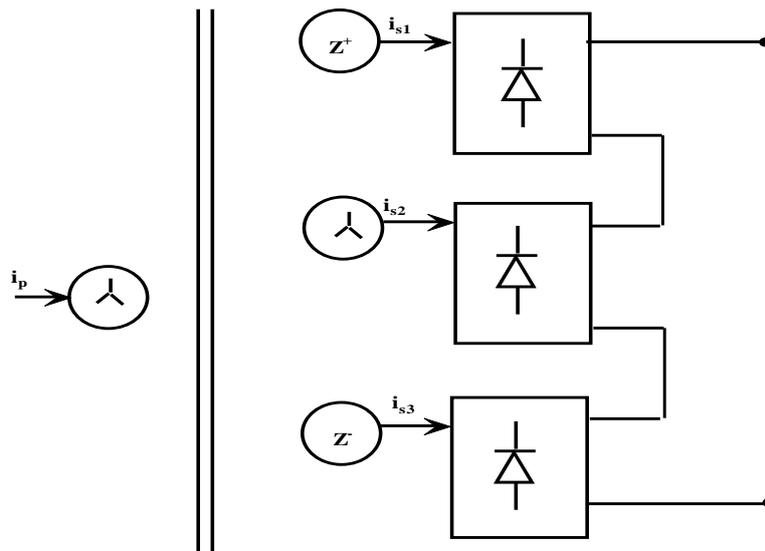


Fig IV.2 Association de trois Convertisseurs

Ce type de montage est capable d'éliminer les harmoniques les plus dominants à savoir le 5eme, le 7eme, le 11eme et le 13eme. Le THD au niveau de chaque secondaire est de 24% tandis qu'au primaire il est seulement de 3%.

B. Utilisation d'une grosse inductance

Les harmoniques dus à un convertisseur statique de fréquence peuvent être fortement réduites par l'insertion d'une grosse inductance. La réduction de la taille de L_d .

100kW, 400 V, 50Hz ($L_d=100\text{mH}$ ou 25mH)

1mH/kW THD=29%

0.25mH/kW THD=45%

C. Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

L'objectif n'est pas d'éliminer les courants harmoniques circulant dans l'installation électrique, mais plutôt de faire avec, en évitant leurs conséquences. Au moment de la conception d'une installation nouvelle, l'idée consiste à surdimensionner tous les éléments de l'installation susceptibles de véhiculer des courants harmoniques, à savoir, les transformateurs, les câbles, les disjoncteurs, les groupes électrogènes et les tableaux de distribution. La solution la plus largement utilisée est le surdimensionnement du conducteur neutre.

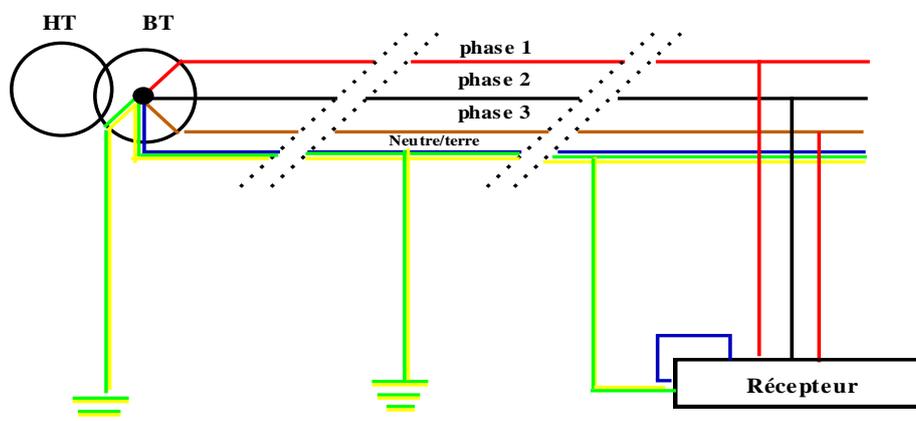


Fig IV.3 Surdimensionnement et déclassement des installations électriques

La conséquence est un accroissement important du coût de l'installation. Dans des installations existantes, la solution la plus répondeuse consiste à décaisser les équipements de distribution électrique soumis aux courants harmoniques. La conséquence est l'impossibilité de tirer profil du potentiel réel de l'installation.

D. Transformateurs à couplage spécial

Cette solution empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et de leurs multiples. Il s'agit d'une solution centralisée pour un ensemble de charges monophasées. Elle n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques (H5, H7, ...etc.). Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de la ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.

E. Couplage de Transformateur Dyn

Ce type de couplage utilisé seulement pour éliminer l'harmonique 3 et 9.

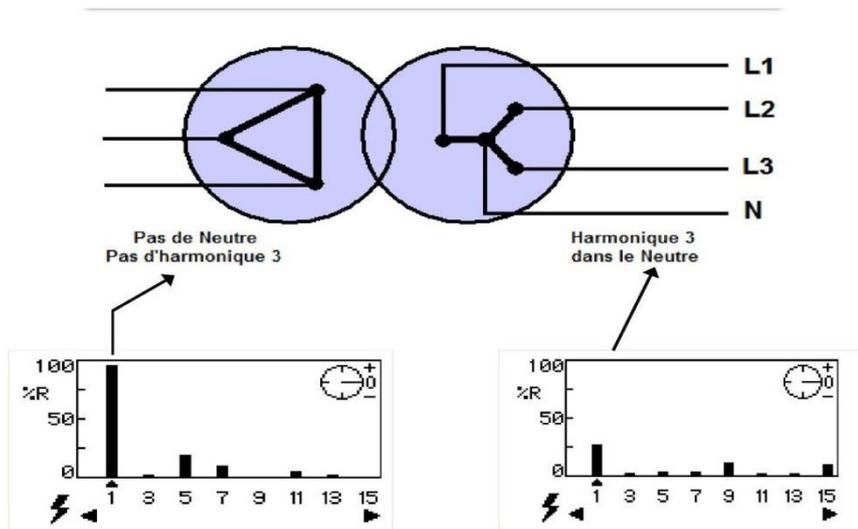


Fig IV.4 Transformateurs à Couplage Spécial pour Atténuer les Harmoniques de Rang 3

Ce type de l'installation est utilisé pour éliminer l'harmonique 5 et 7

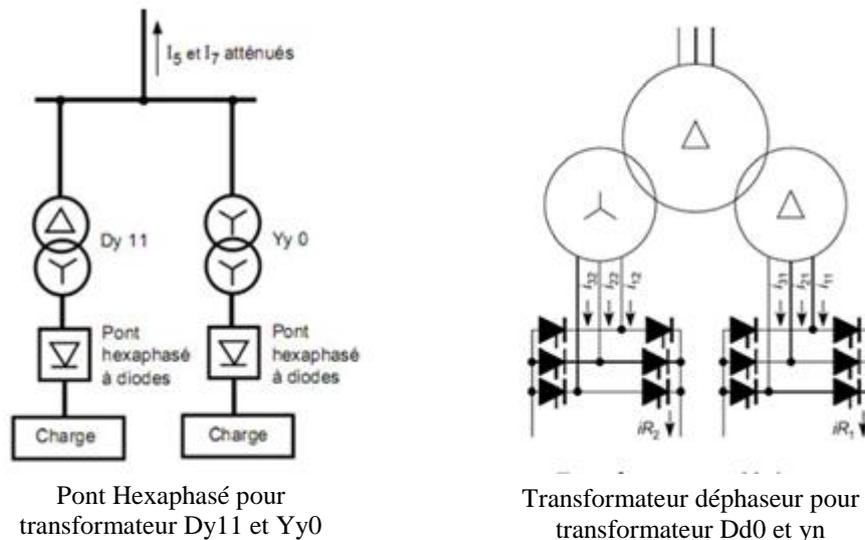


Fig IV.5 Installation Spécialisée pour l'Élimination des Harmoniques 5 et 7

F. Inductances (selfs) série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateur de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux.

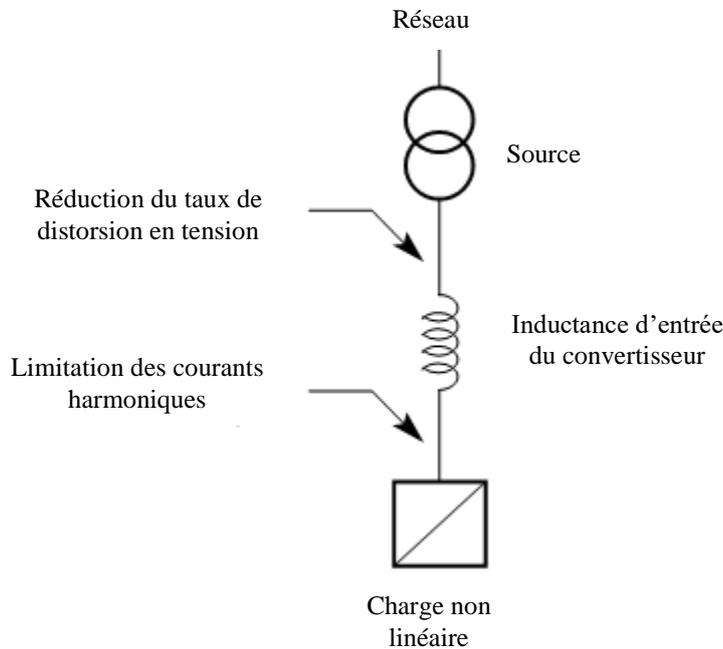


Fig IV.6 Inductances en série pour atténuer la distorsion de courant

G. Filtre passif accordé

Le principe est de piéger les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Un filtre comprend donc une série de gradins qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés.

On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Il convient également de coordonner ses caractéristiques avec les besoins en puissance réactive des charges, enfin. Il est souvent difficile de concevoir les filtres de manière à éviter un facteur de puissance avance (capacitif) pour certaines conditions de charge.

Cette solution est d'une efficacité moyenne et sa conception dépend entièrement de la source d'énergie et des charges concernées. Elle n'offre très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité. Son utilisation peut créer des résonances, qui dépendent des caractéristiques spécifiques du réseau.

Note :

« Lorsqu'il est bien conçu, ce type de filtre peut aussi être utilisé pour éliminer la distorsion harmonique déjà présente sur le réseau électrique du distributeur d'énergie, sous réserve d'un surdimensionnement significatif pour l'absorption des harmoniques issue du réseau ».

H. Compensateur actif d'harmoniques

Le concept de compensateurs actifs d'harmoniques, aussi appelés filtres actifs, est relativement ancien même si l'absence d'une technologie performante à un prix compétitif a freiné son développement pendant un certain nombre d'années.

A l'heure actuelle, l'utilisation largement répandue des transistors IGBT, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal préparent la voie d'un avenir beaucoup plus brillant pour le compensateur actif d'harmoniques.

Le principe du compensateur actif d'harmoniques est d'utiliser l'électronique de puissance pour produire des composantes harmoniques qui annulent les composantes harmoniques des charges non linéaires. Il est proposé un certain nombre de topologies différentes, quelques-unes d'entre elles sont décrites ci-après. Pour chaque topologie interviennent des problèmes de caractéristiques nominales requises des composants, et de méthode de détermination des caractéristiques du compensateur pour les charges à compenser.

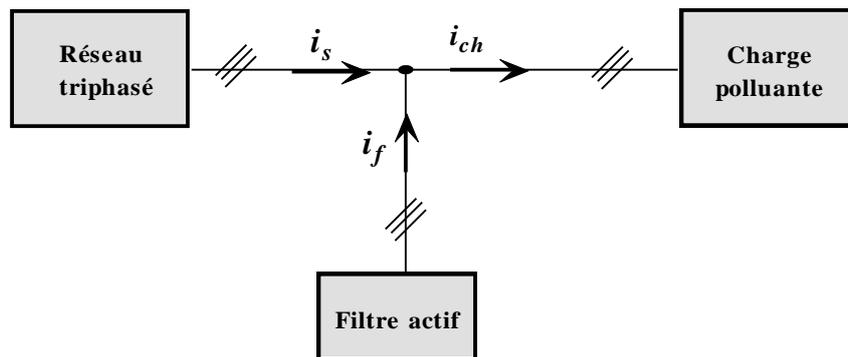


Fig.IV.7 Schéma de principe de fonctionnement d'un compensateur actif d'harmoniques

Avec :

i_s : Courant délivré par la source

i_{ch} : Courant consommé par la charge

i_f : Courant débité par le filtre actif

I. Compensateurs série

Ce type de compensateur, connecté en série sur le réseau de distribution, compense à la fois les courants harmoniques générés par la charge et la distorsion de tension déjà présente sur le réseau. Proche du principe des conditionneurs de réseau, ils doivent être dimensionnés pour la puissance totale de la charge.

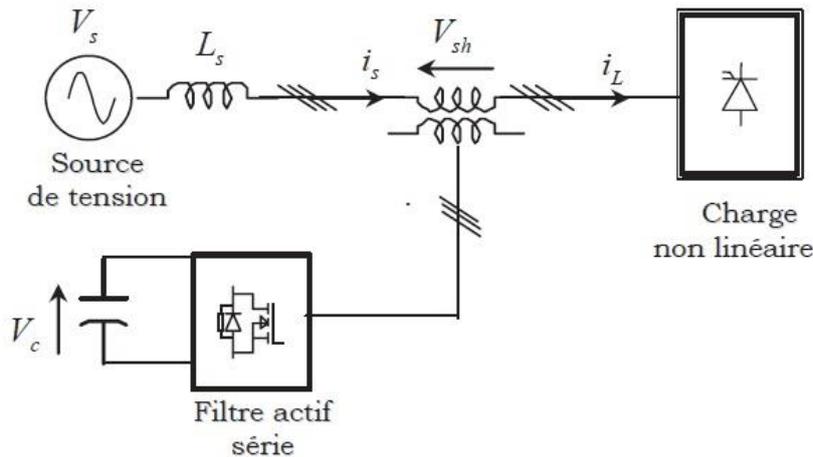


Fig.IV.8 Compensateurs série pour harmoniser courants et distorsion de tension

J. Compensateur parallèle

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau. Il est dimensionné pour la seule puissance harmonique (ou le courant harmonique) absorbée par la ou les charges non linéaires. La topologie parallèle choisie pour Sine-wave ne dépend en rien de la charge ou des caractéristiques du réseau.

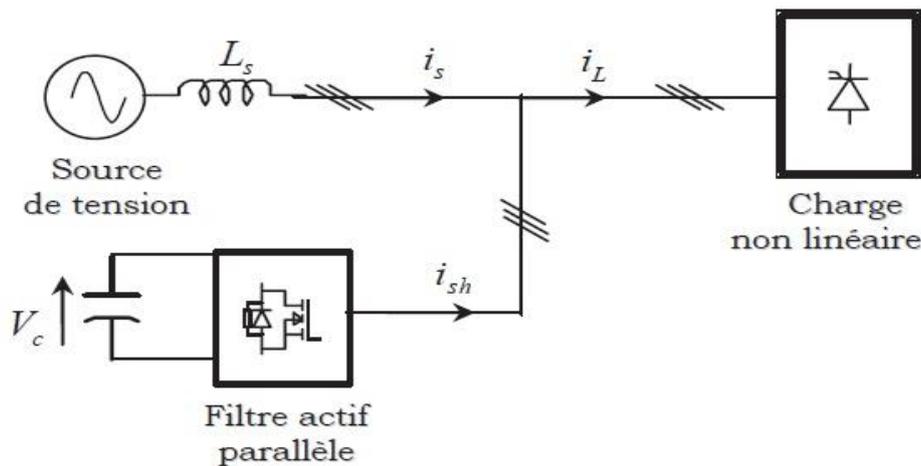


Fig.IV.9 Compensateur parallèle pour l'absorption des courants harmoniques

K. Compensateur hybride

- *Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles*

De type série ou de type parallèle, il est constitué de l'association d'un compensateur actif et d'un filtre passif. Dans certains cas, cette solution est économiquement intéressante. Le filtre passif effectue le filtrage de base (rang 5, par exemple), et le compensateur actif, grâce à son action précise et dynamique, couvre les autres rangs et renforce l'efficacité des filtres passifs en empêchant les courants harmoniques de remonter. Il réduit, ainsi, le risque d'antirésonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau.

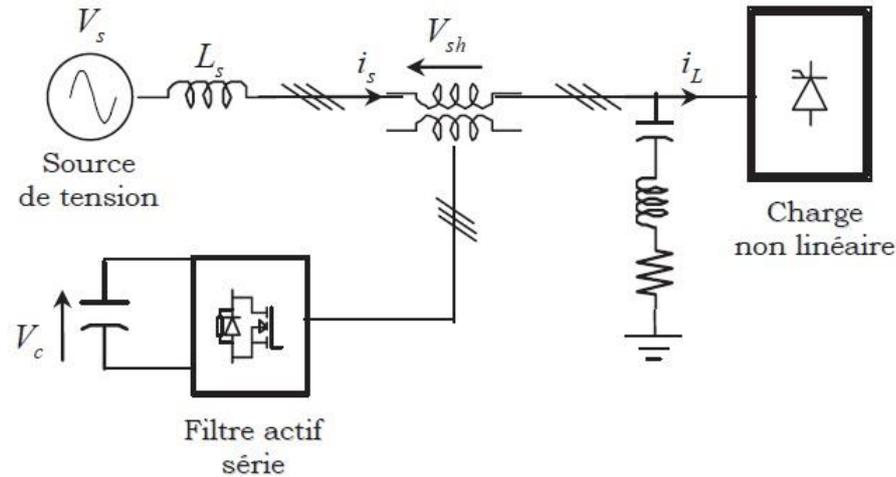


Fig.IV.10 Compensateur hybride : Filtres actifs et passifs pour la gestion des harmoniques

- **Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles**

Dans cette configuration, le filtre actif est placé en série avec les filtres passifs parallèles telle que le montre la figure IV.11. Cette structure à 2 avantages. D'une part, le courant qui le traverse est moins important. Par conséquent, la puissance du filtre actif série est plus faible que celle du filtre hybride. D'autre part, le filtre actif série n'étant plus connecté en série avec la charge, par conséquent, en cas de court-circuit dû à cette même charge, le filtre actif n'est plus affecté.

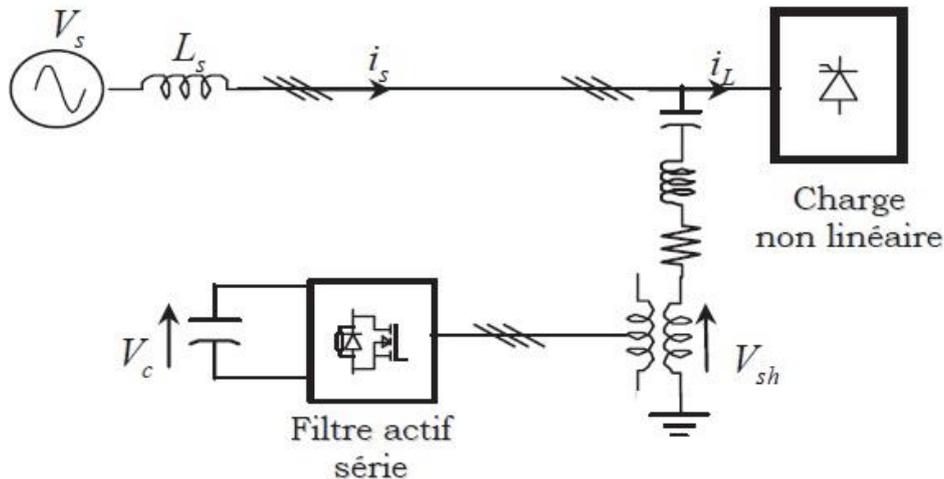


Fig.IV.11 Filtre actif en série avec filtres passifs pour configuration et bénéfices

- **Combinaison d'un filtre actif parallèle avec un filtre actif série : Conditionneur actif de puissance**

Il ressort clairement que ni le filtre actif de puissance parallèle ni le filtre actif de puissance série ne parviennent à fournir un filtrage complet, garantissant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant exempt d'harmoniques du côté du réseau.

Cet objectif ne peut être atteint qu'en utilisant un filtre actif de puissance mixte, qui se compose de deux filtres actifs : l'un est connecté en série et l'autre en parallèle avec la charge, comme l'illustre la figure IV.12.

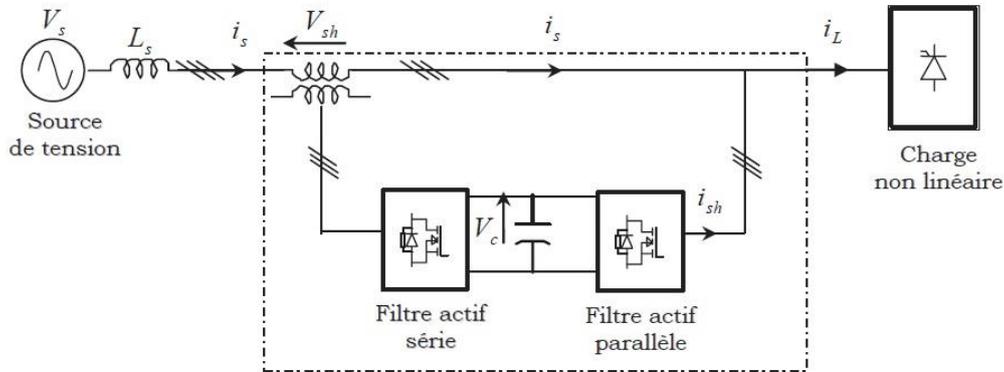


Fig.IV.12 Conditionneur actif de puissance avec filtres actifs en série et en parallèle

L. Redresseur à principe de la MLI

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant sinusoïdal. Les convertisseurs « propres », comme les redresseurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI), sont constitués de semi-conducteurs à ouverture et fermeture commandées, associés à des diodes (voir figure IV.13). Ils mettent en œuvre la technique de commutation MLI, qui a pour but de repousser les harmoniques vers des fréquences élevées.

Ces convertisseurs ont deux principales applications :

- ✓ En tant que convertisseurs d'énergie à faible taux de pollution harmonique et à consommation de puissance réactive nulle, permettant ainsi une consommation ou un renvoi d'énergie active sur le réseau.
- ✓ En tant que compensateurs d'énergie réactive, offrant une forte dynamique et un encombrement réduit.

L'application principale de ces dispositifs est la compensation des fluctuations rapides de la tension (flicker) et la stabilisation des réseaux à haute tension.

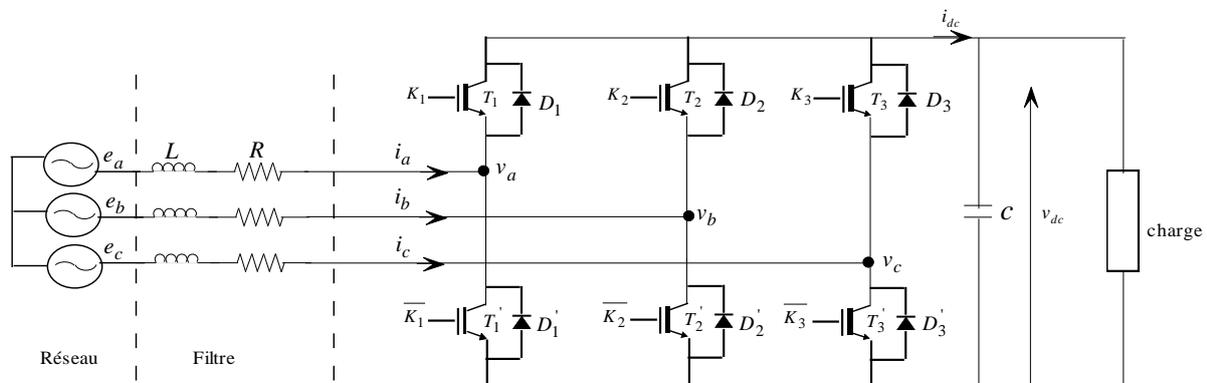


Fig.IV.13 Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension

Inconvénients

Malgré leurs avantages, plusieurs limitations subsistent dans l'utilisation de ces dispositifs :

- ✓ Compensation fixe
- ✓ Équipements encombrants
- ✓ Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau
- ✓ Manque de flexibilité pour s'adapter aux variations du réseau et de la charge

Ces inconvénients, ainsi que l'émergence de nouveaux composants semi-conducteurs tels que les thyristors GTO et les transistors IGBT, ouvrent la voie à de nouvelles solutions pour atténuer les perturbations des réseaux électriques.

M. Solutions non conventionnelles

En complément des solutions classiques et modernes déjà évoquées, de nouvelles approches ont émergé pour le traitement des perturbations. Parmi celles-ci, on peut citer :

- **Système Amélioré de Convertisseur AC-DC de Qualité Énergétique (IPQC)**

Il a pour mission d'alimenter, d'une part, une charge non linéaire et, d'autre part, de compenser toutes les charges non linéaires environnantes qui génèrent des pollutions harmoniques, comme l'illustre la figure IV.14. Les avantages de cette solution, selon les auteurs, comprennent :

- ✓ Amélioration du facteur de puissance
- ✓ Optimisation du contenu harmonique du courant de source
- ✓ Fonctionnement du redresseur actif dans les quatre quadrants
- ✓ Pas besoin d'un filtre actif de puissance parallèle

Cependant, certains inconvénients subsistent, notamment :

- ✓ La complexité de l'implémentation de son circuit de protection
- ✓ Les charges non linéaires à traiter doivent être situées à proximité du redresseur actif.

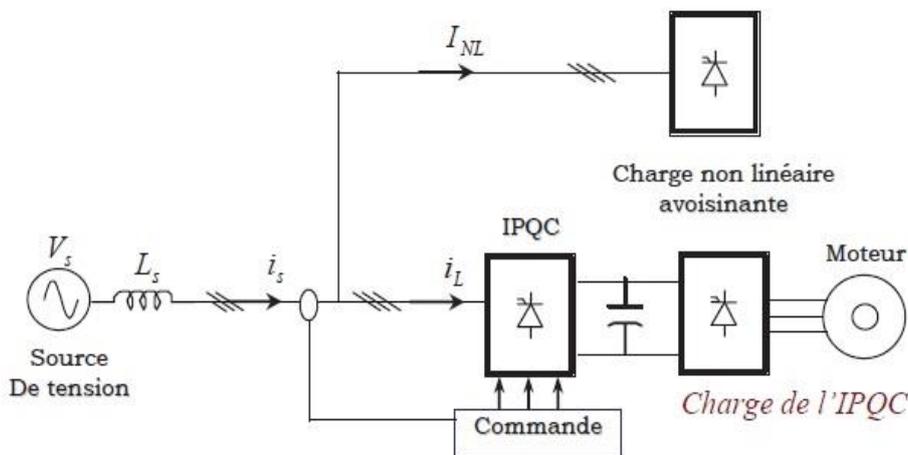


Fig.IV.14 Convertisseur AC-DC amélioré et gestion des charges non linéaires

- **Système de communication par courant porteur en ligne (PLC)**

Il repose sur une nouvelle configuration d'onduleur agissant comme un filtre actif de puissance, où chaque phase du compensateur est connectée de manière distincte à la même phase monophasée de la source, comme l'illustre la figure IV.15.

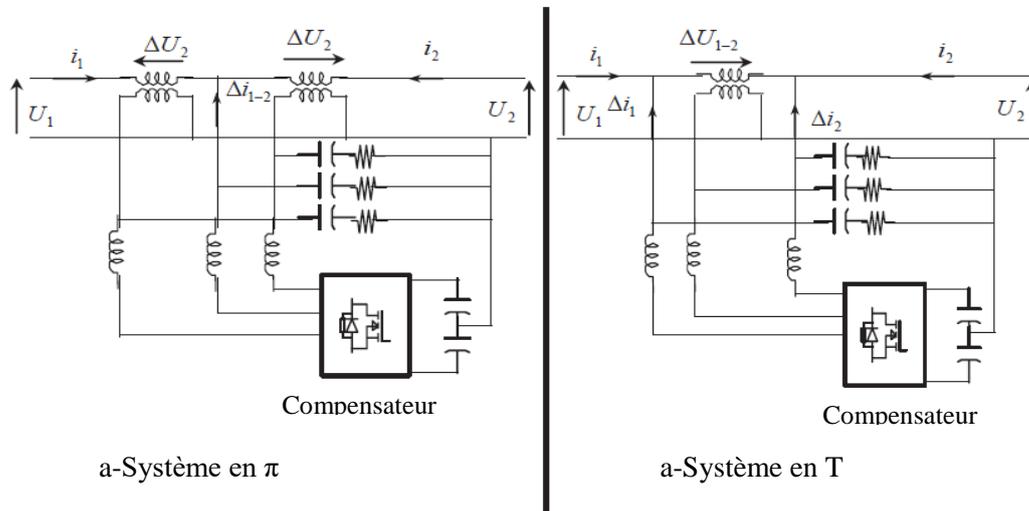


Fig.IV.15 Système PLC avec onduleur en filtre actif

- **Filtrage actif à l'aide d'une machine synchrone à double alimentation**

Cette solution est d'un certain intérêt car elle présente les avantages suivants :

- Compensation sélective d'harmonique ;
- Réduction de l'encombrement lié à ce mode de filtrage. Cet avantage est, particulièrement, intéressant pour des dispositifs de filtrage dits embarqués ;
- Adaptabilité aux variations de la fréquence du réseau ;
- Pertes joules dues au régime fondamental, principalement. Constituées des pertes dans la résistance du circuit bouchon, sont faibles pour ce type de montage. Pour le régime harmonique, ces pertes sont dissipées au niveau des résistances statorique et rotorique de la machine.

Toutefois, ce mode de filtrage présente quelques inconvénients. Parmi elles, on note :

- Non possibilité de filtrer plusieurs harmoniques simultanément et efficacement ;
- Risques de résonance entre le réseau, la machine et le circuit bouchon ne sont pas écartés, contrairement à l'emploi de filtres actifs constitués d'onduleurs.

IV.2.3 Surtensions

Obtenir une bonne coordination d'isolement c'est réaliser la protection des personnes et des matériels contre les surtensions avec le meilleur compromis technico-économique. Elle nécessite de :

- Connaître le niveau et l'énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau ;
 - Choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes ;
 - Utiliser des protections quand cela est nécessaire.
- En fait, les solutions à retenir dépendent du type de surtensions rencontrées.

A. Surtensions à fréquence industrielle

- Mettre hors service tout ou une partie des condensateurs en période de faible charge ;
- Eviter de se trouver dans une configuration à risque de Ferro résonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène.

B. Surtensions de manœuvre

- Limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs, par l'installation de self de choc, résistances de pré insertion ;
- Placer des inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence pour limiter les effets des surtensions transitoires ;
- Utiliser des disjoncteurs de branchement différentiels et sélectif.

C. Surtensions atmosphériques

- Protection primaire : elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câbles de garde / fil tendu);
- Protection secondaire : elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre.
- Des parafoudres (de moins en moins des éclateurs) sont installés sur les points des réseaux HT et en MT particulièrement exposés et à l'entrée des postes MT/BT.

- ***Parafoudre***

L'énergie délivrée par les coups de foudre est très élevée. Lorsqu'un coup de foudre survient près d'un réseau électrique, l'énergie peut se propager dans les installations situées à proximité et provoquer une surtension électrique sur le réseau. Ce risque est augmenté par la présence d'ouvrages de grande hauteur, de lignes électriques aériennes, etc. Les parafoudres permettent d'écouler vers la terre la surtension électrique générée par le coup de foudre. Selon le niveau d'exposition de l'installation, il est recommandé de procéder à une analyse précise du risque foudre afin de déterminer la protection la mieux adaptée. Localement, les équipements sensibles peuvent aussi être protégés des surtensions électriques à l'aide de prises para surtenseurs.

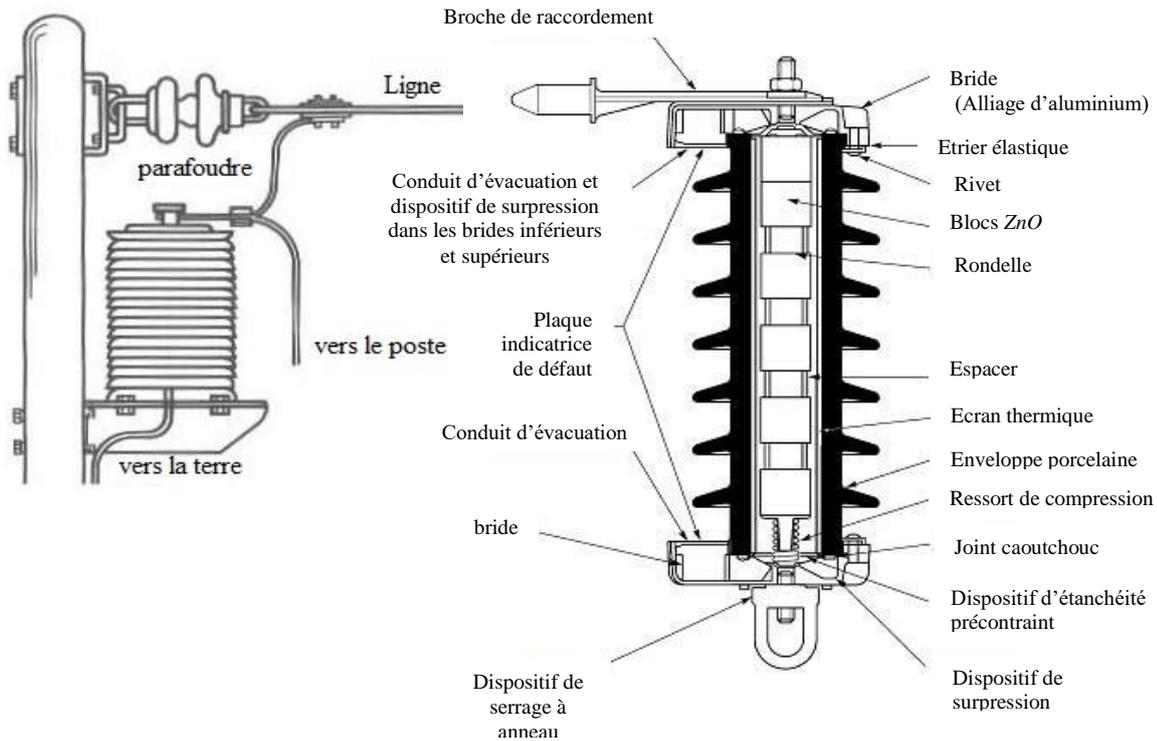


Fig.IV.16 Dispositif de protection parafoudre

- **Eclateur**

Installés au secondaire des transformateurs MT/BT des circuits à neutre isolé (IT) ou à neutre impédant, les éclateurs permettent l'écoulement à la terre en cas de surtensions électriques. Ils doivent être associés à un contrôleur d'isolement Vigil Ohm pour garantir le bon fonctionnement du système de protection.

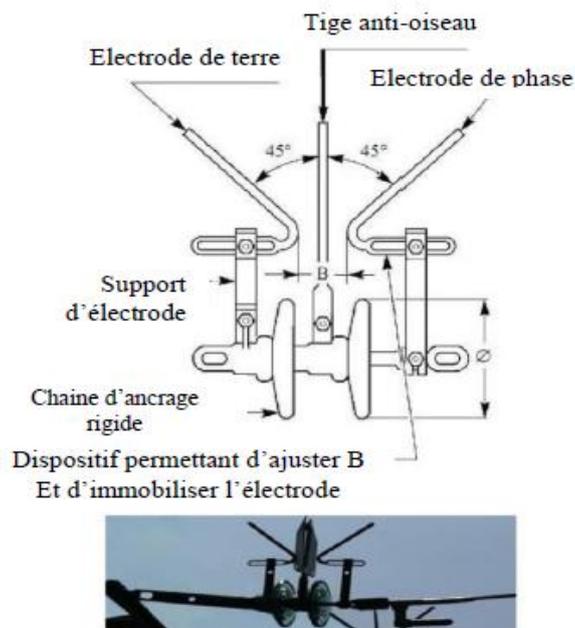


Fig.IV.17 Éclateur dispositif de protection électrique

- **Paratonnerre**

Le paratonnerre est un dispositif de protection conçu pour détourner les coups de foudre et protéger les structures des dégâts causés par la foudre.

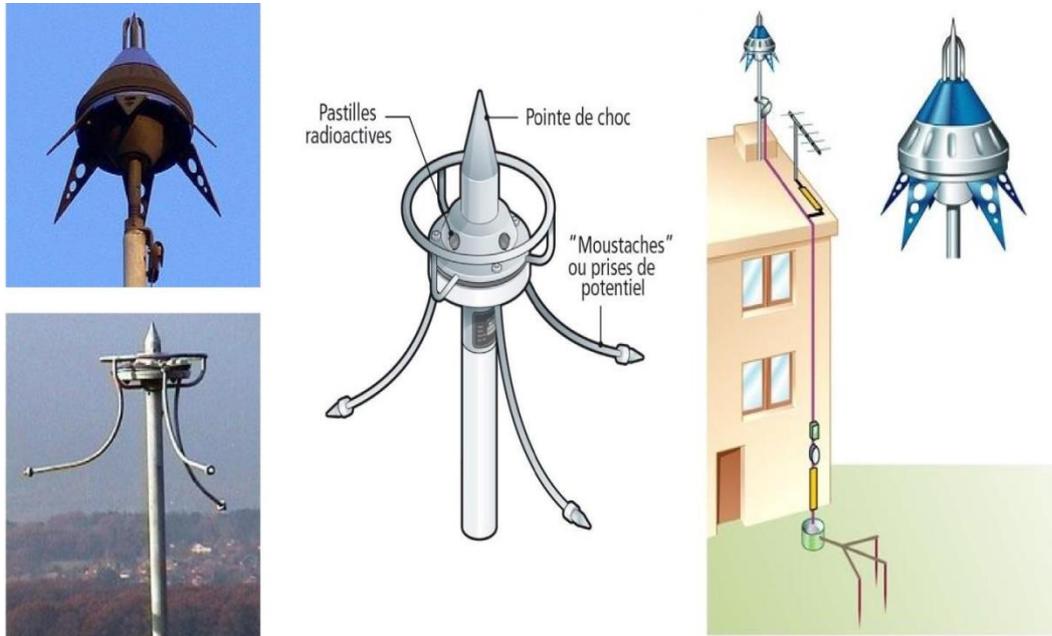


Fig.IV.18 Paratonnerre pour protection contre la foudre

IV.2.4 Fluctuations de la tension

Les fluctuations produites par les charges industrielles peuvent affecter un grand nombre de consommateurs alimentés par la même source. L'amplitude de la fluctuation dépend du rapport entre l'impédance de l'appareil perturbateur et celle du réseau d'alimentation. Les solutions consistent à

- Changer de mode d'éclairage : Les lampes fluorescentes ont une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence ;
- Installer une alimentation sans interruption : Elle peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés ;
- Modifier le perturbateur : Le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités ;
- Modifier le réseau : Augmenter la puissance de court-circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point d'alimentation, et éloigner « électriquement » la charge perturbatrice des circuits d'éclairage en alimentant la charge perturbatrice par un transformateur indépendant.
- Utiliser un compensateur automatique : Cet équipement réalise une compensation en temps réel phase par phase de la puissance réactive. Le flicker peut être réduit de 25 % à 50 % ;
- Placer une réactance série : En réduisant le courant appelé, une réactance en aval du point de raccordement d'un four à arc peut réduire de 30 % le taux de flicker.

IV.2.5 Non symétrie (Déséquilibres) de la tension

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, les solutions sont :

- Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases ;
- Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles ;
- Prévoir une protection adaptée des machines ;
- Augmenter la puissance de court-circuit ;
- Placer un dispositif de rééquilibrage ;
- Modifier l'architecture du réseau ;
- Compenser la puissance réactive.

IV.2.6 Méthodes mathématiques pour le calcul des tensions déséquilibrées

L'outil principal pour l'analyse des circuits déséquilibrés est la théorie des composantes symétriques introduite par Charles Fortescue, qui stipule que tout système déséquilibré peut être décomposé en trois composantes équilibrées : composante directe, (positive-séquence), qui tourne dans le même sens que le système original, composante inverse, (négative-séquence), tournant dans le sens inverse, et composante homopolaire (zéro- séquence), données par :

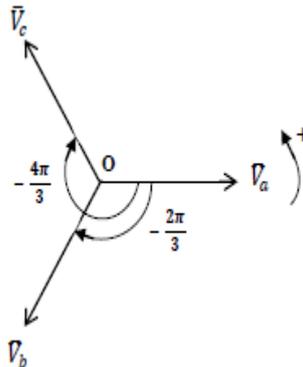


Fig.V.19 Vecteurs de tensions triphasées symétriques

En prenant le vecteur \bar{V}_a comme origine on obtient :

$$\bar{V}_a = \bar{V}_a; \quad \bar{V}_b = a^2 \bar{V}_a; \quad \bar{V}_c = a \bar{V}_a;$$

Dans un système équilibré

$$\bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{V}_c = \bar{V}_a(1 + a^2 + a) + \bar{V}_a \left(1 + e^{i\frac{2\pi}{3}} + e^{i\frac{4\pi}{3}}\right) = 0 \quad (IV.4)$$

Le théorème de décomposition de Fortescue s'énonce ainsi : Un système triphasé déséquilibré de grandeurs sinusoïdales, de tensions simples $\bar{V}_a, \bar{V}_b, \bar{V}_c$ peut être considéré comme la superposition de 3 systèmes équilibrés tel que :

- Un système homopolaire (défini par \overline{V}_0) constitué de 3 grandeurs ayant le même module le même argument. $\overline{V}_0, \overline{V}_0, \overline{V}_0$;
- Un système direct (défini par \overline{V}_d) constitué de 3 grandeurs ayant le même module et d'arguments différents tels que : $\overline{V}_d, a^2\overline{V}_d, a\overline{V}_d$;
- Un système inverse (défini par \overline{V}_i) constitué de 3 grandeurs ayant le même module et différents tels que : $\overline{V}_i, a\overline{V}_i, a^2\overline{V}_i$.

Les vecteurs $\overline{V}_0, \overline{V}_d, \overline{V}_i$ sont appelés composantes ou coordonnées symétriques du système de vecteurs $\overline{V}_a, \overline{V}_b, \overline{V}_c$.

On définit la matrice de Fortescue :

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.5})$$

Et son inverse

$$F^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

Transformation de Fortescue

$$\begin{cases} \overline{V}_a = \overline{V}_0 + \overline{V}_d + \overline{V}_i \\ \overline{V}_b = \overline{V}_0 + a^2\overline{V}_d + a\overline{V}_i \\ \overline{V}_c = \overline{V}_0 + a\overline{V}_d + a^2\overline{V}_i \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

Sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_a \\ \overline{V}_b \\ \overline{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}_0 \\ \overline{V}_d \\ \overline{V}_i \end{bmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

Transformation inverse

$$\begin{cases} \overline{V}_0 = \frac{1}{3}(\overline{V}_a + \overline{V}_b + \overline{V}_c) \\ \overline{V}_d = \frac{1}{3}(\overline{V}_a + a\overline{V}_b + a^2\overline{V}_c) \\ \overline{V}_i = \frac{1}{3}(\overline{V}_a + a^2\overline{V}_b + a\overline{V}_c) \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

Sous la forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \overline{V}_0 \\ \overline{V}_d \\ \overline{V}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{V}_a \\ \overline{V}_b \\ \overline{V}_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

IV.2.7 Solution pour contrôler le déséquilibre

La protection des installations électriques repose sur des détecteurs appropriés, parmi lesquels les caméras infrarouges se distinguent comme les instruments les plus efficaces.

- ✓ Ils sont utilisés à tous les points de connexion à charge élevée, tels que les transmissions, interrupteurs et commandes, notamment dans les zones où les températures sont relativement élevées ;
- ✓ Suivez le circuit et examinez les branches et charges associées ;
- ✓ Contrôlez les connexions et dispositifs électriques lorsqu'ils sont chauds et en fonctionnement stable.

IV.3 Synthèse

La présence de charges déformantes dans de nombreux réseaux industriels nécessite des solutions adaptées pour remédier aux perturbations harmoniques, notamment par l'installation de filtres passifs, actifs ou hybrides. L'augmentation constante de ces charges, couplée aux exigences des distributeurs d'énergie électrique, impose aux fabricants d'équipements d'électronique industrielle de développer de nouvelles stratégies.

Les techniques déjà mises en œuvre dans de nombreux dispositifs commerciaux intègrent la modulation de largeur d'impulsion (MLI) dans les convertisseurs d'énergie électrique. Ces convertisseurs, qualifiés de « propres », évitent la pollution du réseau d'alimentation. Ils interviennent en permanence pour corriger la déformation du signal courant absorbé par la charge, réalisant ainsi un prélèvement sinusoïdal qui restitue une sinusoïde stable. Ce dispositif requiert une régulation très rapide, facilitée par les avancées récentes en électronique de puissance.

Les convertisseurs évolués vont au-delà en intégrant une compensation auto-adaptative du facteur de puissance, améliorant ainsi les performances électriques globales de l'installation.

Auto-évaluation

Application N°1

1. Citer les quatre caractéristiques principales de la qualité d'un système alternatif triphasé (tension/courant).
2. Quelle est la différence entre les harmoniques et le bruit ?
3. Quelle est le rang d'une harmonique, si sa fréquence est de 350Hz, et la fréquence du fondamentale est de 50Hz ?
4. Définir une perturbation harmonique.
5. Quelle est la source de la puissance déformante (D) ?
6. Quelle est la différence entre la charge linéaire et la charge non linéaire ?
7. Donner la formule de la décomposition en série de Fourier du signal périodique $s(t)$.
8. Que signifie THD ? Donner sa formule.
9. Citer trois critères différencie un filtre passif et un filtre actif.

Solution de l'application N°1

1. Les quatre caractéristiques principales de la qualité d'un système alternatif triphasé (tension/courant) sont : l'amplitude, la fréquence, la forme d'onde et la symétrie.
2. Les harmoniques sont des ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. Le bruit est un signal perturbateur apériodique.
3. Le rang d'une harmonique de fréquence 350 Hz si le fondamental est de 50Hz est égale $\frac{350\text{Hz}}{50\text{Hz}} = 7$
4. Les perturbations harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental.
5. La source de la puissance déformante (D) est les harmoniques
6. La différence entre la charge linéaire et la charge non linéaire :
 - La charge linéaire absorbe un courant sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale.
 - La charge non linéaire absorbe un courant non sinusoïdal, même si elle est alimentée par une tension sinusoïdale.
7. Décomposition en série de Fourier du $s(t)$: $s(t) = a_0 + \sum_{n=1} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$

Avec $a_n = \left(\frac{2}{T}\right) \int s(t) \cos(n\omega t) dt$ et $b_n = \left(\frac{2}{T}\right) \int s(t) \sin(n\omega t) dt$

8. Le THD (Total Harmonic Distorsion) (taux de distorsion harmonique)

$$THD_F = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1}$$

9. Filtre Passif : plus simple, moins chère et volumineux
Filtre Actif de puissance : plus compliqué, plus cher et adaptatif

Application N°2

Exercice N°1

Un condensateur de $440\mu\text{F}$ possède des pertes de 20W en régime nominal $600\text{V}-60\text{Hz}$. Ce condensateur est traversé par un courant distordu composé d'un fondamental de valeur efficace $100\text{A}-60\text{Hz}$ et du 5^{ème} harmonique de valeur efficace 70A .

- 1) Calculer le THD de la tension aux bornes du condensateur.
- 2) Calculer les pertes supplémentaires si on estime que les pertes dans le condensateur sont proportionnelles à la fréquence et au carré de la tension.

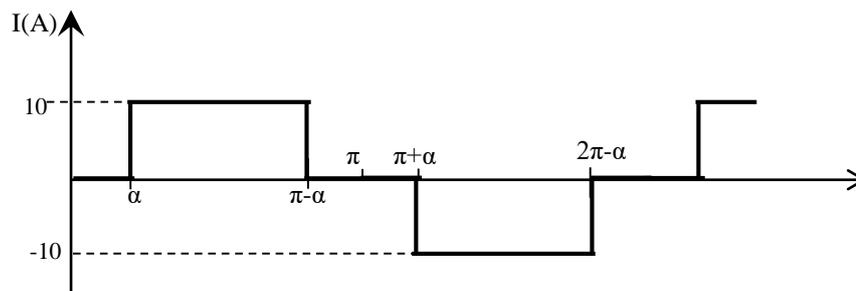
Exercice N°2

Un courant distordu possède une valeur efficace de 63A . Sachant que la valeur efficace du fondamental est de 59A , Calculer :

- 1) La valeur efficace de l'ensemble des harmoniques.
- 2) Le THD des courants.
- 3) La valeur efficace des harmoniques de rang $n>7$, si les valeurs efficaces des harmoniques 5 et 7 sont respectivement $15,6\text{A}$ et $10,3\text{A}$.

Exercice N°3

Un courant périodique de fréquence 50Hz dû à une charge polluante possède la forme indiquée sur la figure ci-dessous :



- 1) Faire l'analyse de fourrier de ce courant

Solution de l'application N°2

Exercice N°1

- 1) Calcule du THD

$$C=440.10^{-6}\text{F}$$

$$V_{effF} = \frac{I}{c\omega_1} I_{effF} = \frac{I}{440.10^{-6} 2\pi.60} * 100 = 603,17V$$

$$V_{effh5} = \frac{I}{c\omega_5} I_{effh5} = \frac{I}{440.10^{-6} .2\pi.5.60} * 70 = 84.42V$$

$$THD_1 = \frac{V_{effh5}}{V_{effF}} * 100 = \frac{84.42}{603.17} * 100 = 14\%$$

$$THD_5 = \frac{V_{effh5}}{V_{effh5} + V_{effF}} = \frac{84.42}{84.42 + 603.17} * 100 = 12,28\%$$

2) Calcule des pertes supplémentaires

$$V_{eff} = \sqrt{V_{effh5}^2 + V_{effF}^2} = 609,049V$$

$$600V \rightarrow 20W$$

$$609,049V \rightarrow P_{sup}$$

$$P_{sup} = \frac{609.049 * 20}{600} = 20,19w$$

Exercice N°2

On a : $I_{1eff} = 59A$ et $I_{eff} = 63A$

$$I_{eff} = \sqrt{I_{1eff}^2 + I_{heff}^2}$$

$$I_{heff} = \sqrt{I_{eff}^2 + I_{1eff}^2} = \sqrt{(63)^2 - (59)^2} = 22.09A$$

$$I_{heff} = 22.09A$$

2/ Calcule du THD

$$THD_1 = \frac{I_{heff}}{I_{eff}} * 100 = \frac{22.09}{63} * 100 = 35.06\%$$

$$THD_2 = \frac{I_{heff}}{I_{1eff}} * 100 = \frac{22.09}{59} * 100 = 37.44\%$$

3/ Calcule de la valeur efficace des harmoniques de rang >7

$$I_h = \sqrt{I_{eff}^2 - I_{1eff}^2 - I_{5eff}^2 - I_{7eff}^2} = \sqrt{(63)^2 - (59)^2 - (15.6)^2 - (10.3)^2} = 11.77A$$

Exercice N°3

Faire l'analyse de fourrier de ce courant

$$A_0 = \frac{1}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} Id\theta + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} -Id\theta \right] = \frac{1}{n\pi} [(\pi - \alpha - \alpha) - (2\pi - \alpha) + \pi + \alpha] = 0$$

$$A_n = \frac{I}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} I \cos n\theta d\theta - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} I \cos n\theta d\theta \right] = \frac{I}{n\pi} \left[[\sin n\theta]_{\alpha}^{\pi-\alpha} - [\sin n\theta]_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} \right]$$

$$A_n = \frac{I}{n\pi} \left[\sin(n\pi - n\alpha) - \sin n\alpha - \sin(2\pi n - n\alpha) + \sin(\pi n + n\alpha) \right]$$

$$A_n = \frac{I}{n\pi} \left[\sin n\pi \cos n\alpha - \sin n\alpha \cos n\pi - \sin n\alpha - \sin 2n\pi \cos n\alpha + \right. \\ \left. \sin n\alpha \cos 2n\pi + \sin n\pi \cos n\alpha + \sin n\alpha \cos n\pi \right]$$

$$A_n = \frac{I}{n\pi} [2 \sin n\pi \cos n\pi] = 0$$

$$B_n = \frac{I}{\pi} \left[\int_{\alpha}^{\pi-\alpha} I \sin n\theta d\theta - \int_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} I \sin n\theta d\theta \right] = \frac{I}{n\pi} \left[[-\cos n\theta]_{\alpha}^{\pi-\alpha} + [\cos n\theta]_{\pi+\alpha}^{2\pi-\alpha} \right]$$

$$B_n = \frac{I}{n\pi} \left[\cos n\alpha - \cos(n\pi - n\alpha) + \cos(2\pi n - n\alpha) - \cos(\pi n + n\alpha) \right]$$

$$B_n = \frac{I}{n\pi} \left[\cos n\alpha - \cos n\alpha \cos n\pi - \sin n\pi \sin n\alpha + \cos 2n\pi \cos n\alpha + \right. \\ \left. \sin n\alpha \sin 2n\pi - \cos n\pi \cos n\alpha + \sin n\pi \cos n\alpha \right]$$

$$B_n = \frac{2I}{n\pi} [2 \cos n\alpha - 2 \cos n\pi \cos n\alpha] = \frac{I}{n\pi} [\cos n\alpha - \cos n\pi \cos n\alpha]$$

si n est paire $\cos n\pi = 1 \Rightarrow B_n = 0$

si n est impaire $\cos n\pi = -1 \Rightarrow B_n = \frac{4I}{n\pi} \cos n\alpha$

$$i(t) = \frac{4I}{\pi} \left[\cos \alpha \sin \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\alpha \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\alpha \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\alpha \sin 7\omega t + \dots \right]$$

Bibliographie

- ❖ FELICE, 'Perturbations harmoniques, Effets, origine, mesures, diagnostic, remèdes', édition : DUNOD, 2000 ;
- ❖ C. COLLOMBET, J.M. LUPIN, J. SCHONEK, 'Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement', cahier technique Schneider, N° :152, édition septembre 1999.
- ❖ S. LENNART, G. MEHRDAD, 'Static analysis of power systems', Electric Power Systems, Royal Institute of Technology, august 2010
- ❖ M. CRAPPE, 'Commande et régulation des réseaux électriques', édition : LAVOISIER, 2003 ;
- ❖ PH. FERRACCI, 'La qualité de l'énergie électrique', cahier technique Schneider, N° :199, édition octobre 2001.
- ❖ O. ROGER, 'Qualité de la tension- Harmonique', Techniques de l'Ingénieur, D4264 v1,2002.
- ❖ E. BETTEGA, J.N. FIORINA, 'Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs', cahier technique Schneider, N° :183, édition juin 1998.
- ❖ E. FELICE, PH. REVILLA 'Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique', édition : DUNOD, 2009 ;
- ❖ J. DELABALLE, 'La CEM : la compatibilité électromagnétique', cahier technique Schneider, N° :149, édition décembre 2001.