

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux Electriques

THÈME

**Diagnostic Des Contraintes Pour Une Performance De La Qualité
D'énergie**

Préparé par : ABED Abdelkader

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
ALLAOUI Tayeb	PR	Président
BELHACEL Kheira	MAA	Examinateur
SMAILI Atallah	PR	Encadreur

PROMOTION 2015 /2016

Remerciements

Avant tout nous remercions Allah, maître de l'univers sans lui, nous n'aurons jamais pu congestionner ce travail, et grand salut sur notre prophète Mohamed que le salut soit sur lui ;

Je tiens tous particulièrement à exprimer nos profondes gratitudee au Professeur At. Smaili pour avoir accepté de diriger ce travail ainsi que pour ses précieux conseils et ces encouragements pendant toute cette période ;

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce mémoire de fin d'étude.

Particulièrement à nos familles ;

Nos remerciements vont à l'ensemble des membres de jury qui fera l'honneur de juger notre travail

Dédicace

Ce présent mémoire et dédié :

A Mon père Allah yerhimeh

A Ma mère ;

*Ma petite famille spécialement à ma femme et mes enfants chaïmaa et
Younes*

Mes frères

Mon encadreur Mr : at. Smaïli

Touts mes amis sans oublier personne ;

Abed Abdelkader

Liste des figures et des tableaux

Liste des figures

Chapitre 1	Généralité sur la qualité d'énergie électrique
Figure 1.1	schéma d'alimentation d'une charge.....2
Figure 1.2.	Qualité d'énergie.....4
Figure 1.3 :	La compatibilité électromagnétique (CEM) au sens large.....4
Figure 1.4 :	Les composantes principales de la qualité de l'électricité.....5
Figure 1.5.	Classification de la stabilité des réseaux de puissances.....9
Figure 1.6.	Tracé de l'angle rotorique en fonction du temps.....13
Tableau 1.1	.Vue d'ensemble des principales perturbations électriques.....15
Chapitre 2	Creux de tension et coupures brèves
Figure 2.1.	Creux de tension.....17
Figure 2.2.	Amplitude d'un creux de tension provoqué par.....18
Figure 2.3.	Creux de tension (a) et sa signature dans le plan complexe (b).....19
Figure 2.4.	Diviseur de tension pour l'étude de la propagation des creux de tension.....20
Figure 2.5.	Modification du type de creux de tension via un transformateur Dy11.....21
Figure 2.6.	Types de courts-circuits.....23
Figure 2.7.	Régime de neutre : direct (a) et isolé (b).....24
Figure 2.8.	Signatures des creux de tension dus à un défaut monophasé.....25
Figure 2.9.	Les différents types de creux de tension.....26
Figure 2.10.	Transformation des types de creux de tension.....28
Tableau 2.1.	Propagation des creux de tension.....28
Figure 2.11.	Exemple de surtension.....32
Figure 2.12.	Exemple de variation de tension.....34
Figure 2.13.	Exemple de déséquilibre de tension.....35
Figure 2.14.	Fluctuations de tension.....36
Chapitre 3	Les Harmoniques
Figure 3.1.	Exemple des harmoniques.....39

Figure 3.2. Harmoniques de rang 3.....	40
Fig. 3.3. Exemples des charges non linéaires causant des harmoniques.....	43
Fig. 3.4. Les harmoniques de rang 3.....	46
Fig. 3.5. Quand il y a des harmoniques H3 et leurs multiples impairs.....	47
Fig. 3.6. Spectre des harmoniques du courant absorbé par une charge non linéaire.....	49
Fig. 3.7. Produit de $U \times I$ pour les composantes fondamentales.....	52
Fig. 3.8. Les harmoniques de rang 3.....	53

Chapitre 4

Amélioration de la qualité d'énergie électrique

Figure4.1. Schéma de principe d'une ASI dite "on-line".....	57
Figure4.2. Schéma de principe d'une ASI dite "off-line".....	58
Figure4.3. Schéma de principe d'une ASI dite Interactive.....	58
Figure : 4.4. Schéma de principe d'une ASI on-line double conversion (VFI).....	59
Figure 4.5. Filtre passif série.....	64
Figure 4.6. Filtre passif parallèle.....	65
Figure 4.7. Filtre amorti.....	65
Figure 4.8. Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.....	66
Figure 4.9. Pont dodécaphasé.....	67
Figure 4.10. Schéma généralisé pour le filtre actif.....	68
Figure 4.11. Principe de configuration de filtre actif parallèle.....	69
Figure 4.12. Principe de configuration de filtre actif série.....	70
Figure 4.13. Principe de configuration de filtre actif universel «UPQC».....	71
Figure 4.14. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle.....	73
Figure 4.15. Filtre actif parallèle avec filtre passif série.....	73
Figure 4.16. Filtre actif série avec filtre passif parallèle.....	74
Figure 1.17: Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle.....	75

Sommaire

Introduction Générale

Chapitre 1 Généralité sur la qualité d'énergie électrique

1. Introduction.....	1
1.1. Qualité de l'électricité et compatibilité électromagnétique (CEM).....	1
1.1.1 Qualité de l'électricité.....	1
1.1.2. Compatibilité électromagnétique (CEM).....	3
1.1.3. Objectifs de la mesure de la qualité d'énergie.....	5
1.1.4. Application contractuelle.....	5
1.1.5. Maintenance corrective.....	5
1.2. Optimisation du fonctionnement des installations électriques.....	6
1.2.1. Enquêtes statistiques.....	6
1.2.3. Qualité de la tension.....	7
1.2.4. Amplitude.....	7
1.2.5. Fréquence.....	7
1.2.6. Forme d'onde.....	8
1.2.7. Symétrie.....	8
1.2.8. Qualité du courant	8
1.2. Classification de la stabilité	9
1.3.1. Stabilité de tension.....	10
1.3.2. Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations.....	11
1.3.3. Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations.....	11
1.3.4. Stabilité de fréquence.....	11
1.3.5. Stabilité angulaire.....	11
1.3.6. Stabilité angulaire aux petites perturbations.....	12

1.3.8. Stabilité transitoire.....	12
1.4. Classification des perturbations électriques.....	13
Conclusion.....	16

Chapitre 2

Creux de tension et coupures brèves

1. Introduction.....	17
2.1. Creux de tension et coupures brèves.....	17
2.1.1. Définition, origine et conséquences.....	17
2.1.2. Représentation dans le plan complexe.....	19
2.2. Propagation.....	20
2.2.1. Propagation en amont et en aval du réseau.....	20
2.2.3. Propagation via les transformateurs.....	21
2.3. Paramètres déterminant les types de creux de tension.....	23
2.3.1. Types de courts-circuits.....	23
2.3.2. Régime de neutre.....	24
2.3.3. L'endroit du défaut.....	25
2.3.4. Type de mesures.....	26
2.3.5. Classification.....	26
2.4. Conséquences des creux de tension et coupures.....	29
2.4.1. Moteur asynchrone.....	30
2.4.2. Moteur synchrone.....	30
2.4.3. Actionneurs.....	31
2.4.4. Equipements de type informatique.....	31
2.4.5. Machines à vitesse variable.....	31
2.4.6. Eclairage.....	32
2.4. Surtensions et surintensités.....	32
2.5.1. Conséquence surtensions.....	33
2.5.3. Variations de tension.....	33
2.5.4. Déséquilibre du Système Triphasé.....	34
2.5.6. Conséquence de déséquilibre.....	35
2.6. Fluctuations de Tension (Flicker).....	36
2.6.1. Conséquences de fluctuations de tension.....	36
Conclusion.....	37

Chapitre 3

Les Harmoniques

3. Introduction.....	38
3.1. Définition.....	38
3.1.1. Décomposition en série de Fourier.....	38
3.1.2. Rang des harmoniques.....	39
3.1.3. Taux de Distorsion THD.....	40
3.1.4. Spectre harmonique.....	41
3.2. Harmonique de courant et de tension.....	41
3.2.1 Harmonique de courant.....	41
3.2.2. Tension harmonique.....	42
3.2.3. Puissances en présence des harmoniques.....	42
3.3. Origine des harmoniques.....	43
3.3.1. Charges linéaires et non linéaires.....	43
3.3.2. Charges linéaires.....	44
3.3.3. Charges non linéaires.....	44
3.4. Types d'harmoniques aspects spécifiques des harmoniques à séquence zéro.....	44
3.4.1. Types d'harmoniques.....	44
3.4.2. Valeur efficace des harmoniques.....	47
3.4.4. Intensité efficace totale.....	48
3.4.5. Harmoniques individuelles.....	48
3.4.6. Distorsion harmonique de la tension et du courant.....	48
3.4.7. Facteur de crête.....	49
3.4.8. Spectre de courant harmonique.....	49
3.4.9. Facteur de puissance.....	49
3.4.10. Déphasage entre le courant fondamental et la tension.....	50
3.4.11. Facteur de distorsion.....	50
3.4.12. Puissance.....	50
3.4.12.1 Charge linéaire.....	50
3.4.12.2. Charge non linéaire.....	51
3.4.12.3. Facteur de distorsion.....	51
3.5. Effets des harmoniques.....	51
3.5.1. Perte de puissance apparente.....	51
3.5.2. Échauffement des câbles.....	52
3.5.3. Courant dans le neutre.....	53

3.5.4. Conséquences.....	53
3.6. Effets des harmoniques.....	53
3.6.1. Risque de perturbation des générateurs.....	53
3.6.1.1. Conséquences.....	54
3.6.2. Déperditions dans les moteurs asynchrones.....	54
3.6.3. Effets sur les systèmes d'ASI récents.....	54
3.6.4. Effets sur d'autres équipements.....	54
Conclusion.....	55

Chapitre 4 **Amélioration de la qualité d'énergie électrique**

4. Introduction.....	56
4.1. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.....	56
4.1.1. Les Creux de Tension.....	56
1) types d'ASI "on-line".....	57
2) Type off-line (VD)	57
3) Type Interactive (VI).....	58
4) Type on line double conversion (VFI).....	58
4.1.2 Surtensions.....	60
4.1.3. Surtensions à fréquence industrielle.....	60
4.1.4. Surtensions de manœuvre.....	60
4.1.5. Surtensions atmosphériques.....	60
4.2. Déséquilibre du Système Triphasé.....	61
4.2.1. Fluctuations de la Tension (Flicker).....	61
4.2.2. Dépollution des Harmoniques.....	62
4.3. Solutions traditionnelles.....	62
a) Action sur la structure de l'installation.....	62
b) Augmentation de la puissance de court-circuit.....	62
c) Placement d'une inductance de ligne.....	63
d) Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....	63
e) Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	63
f) Compensation de la puissance réactive.....	63
4.3.1. Les filtre passifs.....	64

4.3.1.1 Classification des filtres passifs.....	64
4.3.1.2. Filtre passif série.....	64
4.3.1.3 Filtre passif parallèle.....	65
4.3.1.5. Filtre résonant.....	66
4.3.1.6. Les avantages et les inconvénients des filtres passifs.....	66
4.4. Solutions modernes.....	67
4.4.1. Redresseur dodécaphasé.....	67
4.4.2. Les filtre actifs.....	68
4.4.3. Classification des filtres actifs.....	69
4.4.4. Filtre actif parallèle.....	69
4.4.4. Filtre actif série.....	70
4.4.5. Filtre actif universelle (UPQC).....	70
4.4.6. Les avantages et les inconvénients du filtre actif.....	71
4.5. Filtre hybride.....	72
4.5.1. Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle.....	72
4.5.2. Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif série.....	73
4.5.3. Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle.....	74
4.5.4. Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle.....	74
4.6.État de l'art de la qualité d'énergie électrique.....	75
Conclusion.....	75
Conclusion Générale.....	76

Introduction générale

Introduction générale

La qualité de l'énergie électrique est un problème de très grande actualité, dont l'importance est imposée par le rôle déterminant que l'énergie électrique joue dans la vie de la société contemporaine. La nécessité d'étudier la qualité de celle-là dérive de la présence des perturbations, qui affectent défavorablement l'alimentation des consommateurs à tous les investissements du système (production, transport, distribution)

La qualité de l'énergie électrique doit être analysée dans le contexte de la relation entre les fournisseurs et le client (le bénéficiaire de l'énergie). Celle-ci peut être définie comme l'ensemble des paramètres (indicateurs) qui conditionnent l'usage de l'énergie électrique, et satisfont les nécessités des récepteurs (consommateurs électriques) en concordance avec leur fonction. La garantie de la qualité de l'énergie électrique signifie le maintien de ces indicateurs dans des limites admissibles.

Il est important de préciser que la qualité de l'énergie électrique est déterminée à la fois par la demande individuelle et collective des clients et par les avaries provoquées dans le système de production, de transport et de distribution par les contraintes électriques ou mécaniques dues à des facteurs très variés (conditions climatiques, usure normale, vieillissement etc..). C'est pour cette raison que les caractéristiques de l'énergie électrique sont traitées en termes de statistique et de probabilité.

Les paramètres et leurs principales (anomalies), permettant de caractériser une alimentation électrique, sont suivants :

- ✓ Amplitude : variation, coupures, creux, surtension.
- ✓ Fréquence : variation.
- ✓ Forme d'onde : harmoniques, transitoires, courant porteurs.
- ✓ Phase : déséquilibre.

Le travail présenté dans ce mémoire est pour objectif d'étudier les différentes perturbations qui peuvent déséquilibrer les réseaux électriques et les différentes solutions pour remédier à ces problèmes.

Outre l'introduction et la conclusion générales, ce mémoire comprend quatre (04) chapitres.

Le chapitre I présente des généralités sur la qualité d'énergie électrique.

Le chapitre II est consacré à la présentation de quelques perturbations et défauts les plus gênants et les plus communément rencontrés.

Le chapitre III est consacré à l'étude et la modélisation des harmoniques qui sont dus aux perturbations et aux charges non linéaires.

Le chapitre IV porte sur les différentes techniques utilisées pour améliorer la qualité d'énergie à savoir : les filtres passifs et actifs.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique. Des perspectives pour ce travail sont également exposées.

Chapitre 1

Généralité sur la qualité d'énergie électrique

1. INTRODUCTION :

La qualité de l'énergie électrique, au niveau de la distribution, se réfère largement à maintenir une tension sinusoïdale, d'une amplitude et fréquence nominales [1]. De ce fait la notion «**qualité de l'énergie**» est devenue très importante, en raison de l'utilisation à grande échelle de systèmes à base d'électronique de puissance à la fois par les utilisateurs et les fournisseurs [2]. L'énergie électrique doit d'être délivrée sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées. Ce système de tensions est caractérisé par

1. L'égalité de l'amplitude des trois tensions.
2. La fréquence.
3. La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
4. La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs. La qualité de l'énergie délivrée aux utilisateurs dépend de ces quatre paramètres [3].

1.1. Qualité de l'électricité et compatibilité électromagnétique (CEM) :

1.1.1 Qualité de l'électricité :

Pourquoi utiliser souvent l'expression anglaise "power quality" ? On rencontre nombre de traductions françaises de cette expression mais aucune ne fait vraiment 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... 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'IEEE1, 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, fluctuations de tension, harmoniques, déséquilibre...

Cependant, tous ces phénomènes affectent essentiellement la tension qui est fournie à l'utilisateur. Si ce dernier n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie [2].

C'est pourquoi on dit parfois que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension (power quality = voltage quality).

Par contre, si le client utilise des charges perturbatrices, celles-ci ont d'abord pour effet de perturber le courant, ce qui se traduit ensuite par une perturbation de la tension (parce que l'impédance du réseau n'est pas nulle) et de ce fait par une dégradation de l'alimentation des autres clients. Pour illustrer ceci, voyons le mécanisme de base de la génération des harmoniques.

En supposant qu'il n'existe aucune tension harmonique dans le réseau avant le raccordement de la charge déformante (non linéaire) du client, la situation peut être schématisée comme sur le schéma ci-après. [4]

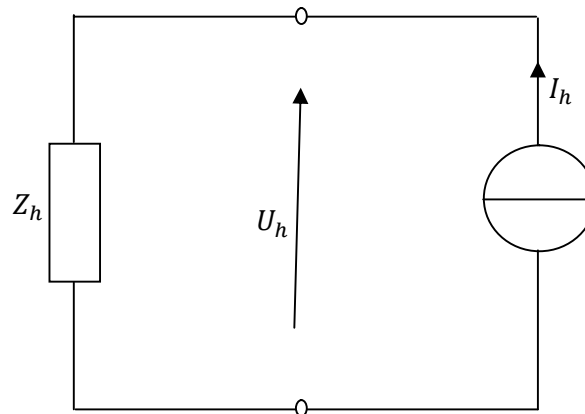


Figure 1.1 schéma d'alimentation d'une charge

Bien qu'elle soit alimentée par une tension purement sinusoïdale au départ, cette charge absorbe un courant déformé (fondamentale + harmoniques) et responsable de la circulation de courants harmoniques dans le réseau. Elle se comporte donc comme une source de courants harmoniques. En vertu de la loi d'Ohm, des tensions harmoniques apparaissent alors aux bornes de la charge, pour chaque rang h d'harmonique :

$$U_h = Z_h \times I_h \quad (1.1)$$

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 :

$$\text{Qualité de l'Electricité} = \text{Continuité} + \text{Qualité de la Tension} \quad [1]$$

1.1.2. Compatibilité électromagnétique (CEM) :

Dans cet effort de clarification des concepts, on ne peut passer sous silence l'expression très courante de "Compatibilité Electromagnétique" (CEM). Où se situe la CEM vis-à-vis de la Qualité de l'Electricité ? La CEI4 définit la CEM comme l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement. C'est donc un concept plus large, couvrant les perturbations entrant par les entrées/sorties d'un appareil en plus de son alimentation électrique, les perturbations rayonnées en plus des perturbations conduites, les phénomènes HF (> 9 kHz) en plus des phénomènes BF (< 9 kHz). Une certaine ambiguïté résulte du fait que l'on utilise l'expression CEM dans deux acceptions différentes :

- Dans le cadre de la normalisation, on tend à utiliser CEM au sens large : il s'agit d'assurer la compatibilité par une bonne coordination des niveaux d'immunité des appareils sensibles et des niveaux d'émission des appareils perturbateurs ; cela couvre tous les phénomènes et c'est la philosophie des comités 77 en CEI et 210 en CENELEC5 ;
- Dans le langage courant, on considère le plus souvent que CEM et Qualité de l'Electricité couvrent deux domaines distincts, mettant en œuvre des techniques d'analyse et de compensation différentes, avec certains recouvrements (la Qualité de l'Electricité se soucie des perturbations à basse fréquence, pénétrant par l'alimentation électrique ; la CEM se soucie des perturbations à haute fréquence, ou des perturbations pénétrant par d'autres voies que l'alimentation électrique - les prises de terre, les entrées/sorties de signaux, par couplage inductif ou capacitif, par rayonnement) [5].

La (**Figure 1.2**) et la (**Figure 1.3**) résument l'ensemble des considérations qui précèdent.

- Le concept de fiabilité est souvent inclus dans le concept de qualité au sens général. Lorsque la distinction est faite, elle ne l'est pas toujours dans l'acception adoptée ici (par exemple, "fiabilité" peut se rapporter à l'ensemble des phénomènes "creux et interruptions de tension"). On peut faire ici un parallèle entre le "produit électricité" et tout produit industriel outre le service, les trois caractéristiques principales pour la clientèle sont le prix, la qualité et le délai (supérieur à zéro pour l'électricité quand il y a une interruption).

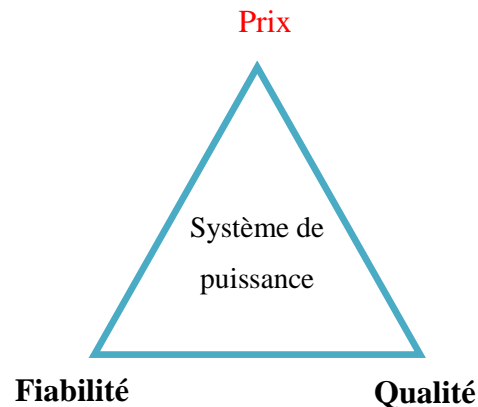


Figure 1.2. Qualité d'énergie

CEI = Commission Electrotechnique Internationale, l'organisme de normalisation à l'échelle mondiale dans le domaine de l'électrotechnique.

CENELEC = Comité Européen de Normalisation en électronique et électrotechnique, l'organisme de normalisation à l'échelle européenne dans le domaine de l'électricité (en étroite coordination avec la CEI ; le CENELEC ne développe une norme propre que si celle-ci n'existe pas et n'est pas à l'étude en CEI)

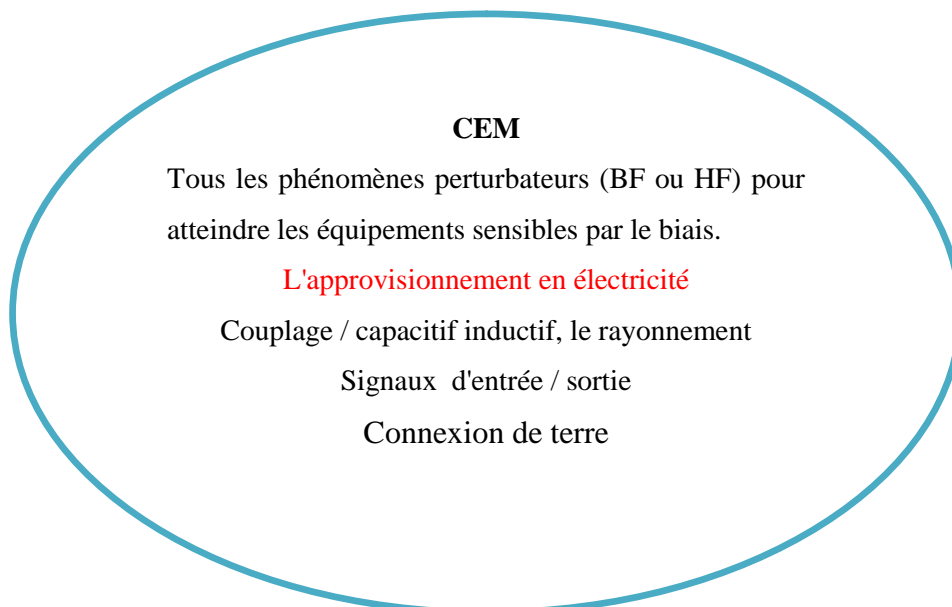


Figure 1.3 : La compatibilité électromagnétique (CEM) au sens large

La qualité de l'électricité en est un sous-ensemble, qui se limite aux perturbations à basse fréquence (< 9 kHz) touchant les équipements sensibles via l'alimentation électrique

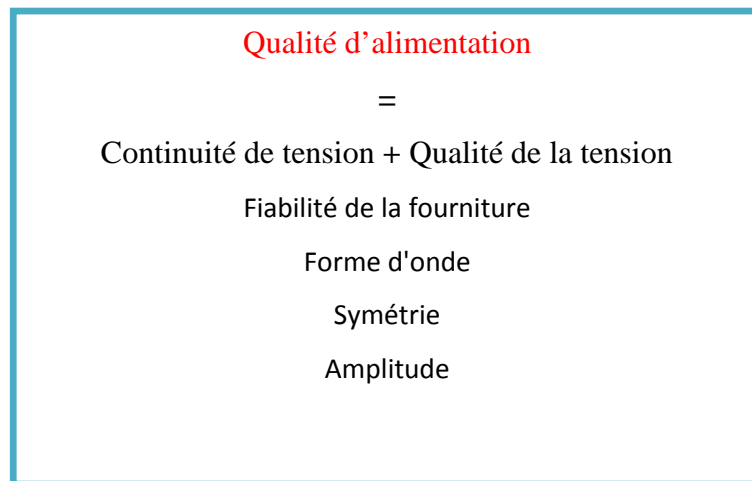


Figure 1.4 : Les composantes principales de la qualité de l'électricité

Il ne faut cependant pas perdre de vue que la responsabilité du gestionnaire de réseau ne se limite pas à assurer la qualité de l'électricité aux points d'interface avec les utilisateurs du réseau et les réseaux voisins. Il doit également se soucier des répercussions de et vers les systèmes tiers (réseaux de télécommunications, traction électrique, conduites enterrées...), sans oublier l'environnement au sens large.

1.1.3. Objectifs de la mesure de la qualité d'énergie :

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

1.1.4. 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.

1.1.5. Maintenance corrective :

Malgré le respect des règles de l'art (conception de schéma, choix des protections, du 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.[5]

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).

1.2. Optimisation du fonctionnement des installations électriques :

Pour réaliser des gains de productivité (économies de fonctionnement et / ou réduction des coûts d'exploitation) il faut avoir un bon fonctionnement des procédés et une bonne gestion de l'énergie, deux facteurs qui dépendent de la QEE. Disposer d'une QEE adaptée aux besoins est un objectif des personnels d'exploitation, de maintenance et de gestion des sites tertiaires ou industriels.

Des outils logiciels complémentaires assurant le contrôle-commande et la surveillance permanente de l'installation sont alors nécessaires [6].

1.2.1. Enquêtes statistiques :

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

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.

Une situation anormale par rapport à un niveau moyen peut être détectée et être corrélée avec le raccordement de nouvelles charges.

Les tendances saisonnières ou des dérives peuvent aussi être étudiées.

- Comparer la QEE fournie par différents distributeurs en différents lieux géographiques.

Des clients potentiels peuvent en effet demander des caractéristiques de fiabilité pour la fourniture de l'électricité avant d'installer de nouvelles usines.

- Enquêtes sur les performances en un point particulier du réseau; Elles permettent de :
 - a- Déterminer l'environnement électromagnétique auquel une installation de future ou un nouvel équipement sera soumis.

- b- Des actions d'amélioration du réseau de distribution et/ou de désensibilisation du réseau du client peuvent alors être engagées de façon préventive.
- c- Spécifier et vérifier les performances auxquelles le fournisseur d'électricité s'engage de façon contractuelle. Ces informations sur la qualité de l'électricité sont particulièrement stratégiques pour les compagnies d'électricité qui dans le contexte de la libéralisation du marché de l'énergie recherchent la meilleure compétitivité, la satisfaction des besoins et la fidélisation de leurs clients.[6]

1.2.3. Qualité de la tension :

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

1.2.4. Amplitude :

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale.

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions.

Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.

- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale.

Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

1.2.5. Fréquence :

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes

importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge.

Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle $50\text{HZ} \pm 1\%$ pendant 99,5% de l'année, et $-6\% \div 4\%$ durant 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.[7]

1.2.6. Forme d'onde :

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques.

Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

1.2.7. Symétrie :

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

1.2.8. Qualité du courant :

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres :

amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de $3/2\pi$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « **qualité du courant** » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement lié à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « **la qualité de l'énergie électrique** » est souvent réduite à « **la qualité de la tension** ».

C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « **qualité de l'énergie** » s'applique uniquement à celle de la tension. [6]

1.2. Classification de la stabilité :

Les diverses formes de l'instabilité résultantes ne peuvent pas être correctement comprises et efficacement traitées en même temps. En raison de la dimensionnalité élevée et la complexité des problèmes de la stabilité, la classification aide à produire une simplification des conditions, pour analyser des types spécifiques, en employant un degré approprié de détail pour la représentation du système et des techniques analytiques. L'analyse de la stabilité, y compris l'identification des facteurs principaux qui contribuent à l'instabilité, est considérablement facilitée par une classification de la stabilité. La classification est donc essentielle pour une analyse pratique significative et une résolution des problèmes de la stabilité des réseaux électriques. [8]

La classification de la stabilité proposée ici est basée sur la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude des perturbations. On peut donc classifier les types de la stabilité comme suit :

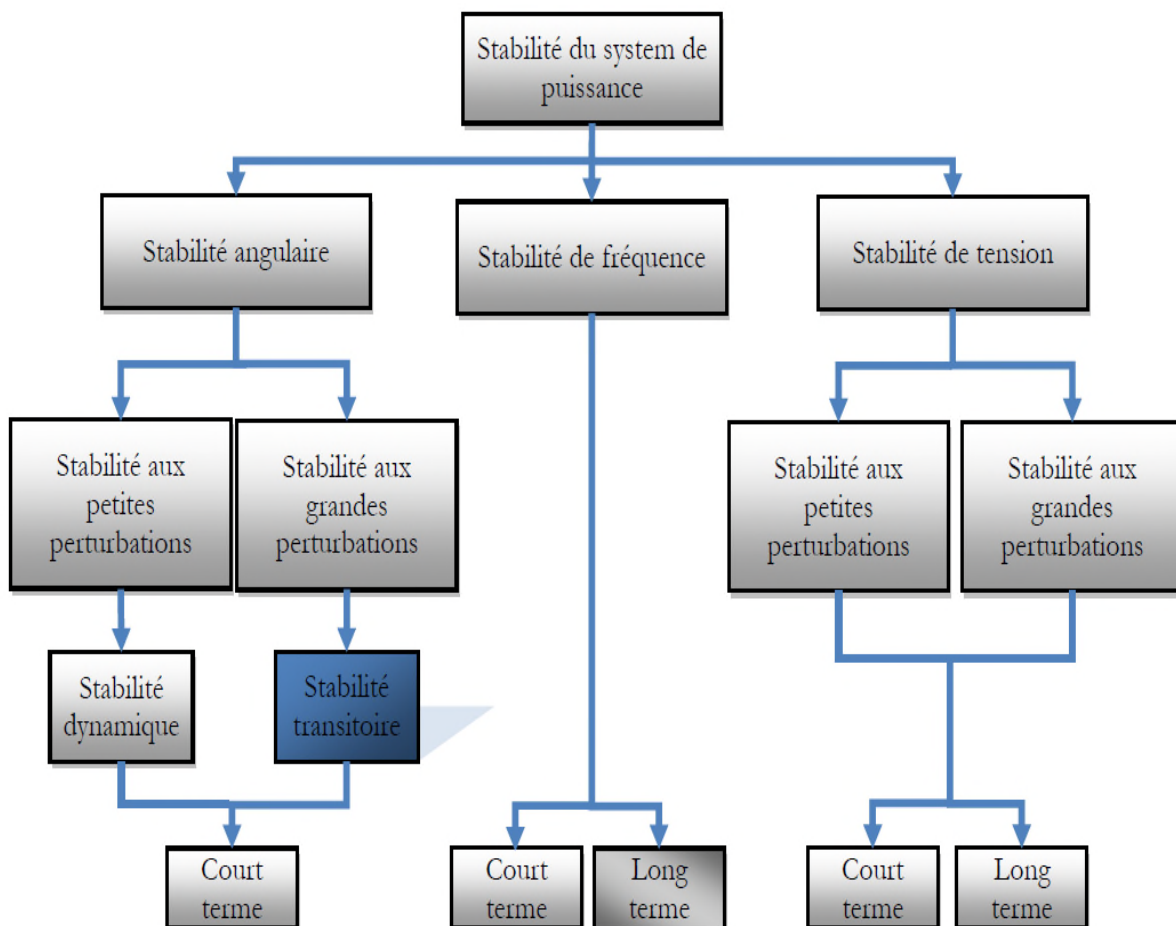


Figure 1.5. Classification de la stabilité des réseaux de puissances

1.3.1. Stabilité de tension :

La stabilité de tension est la capacité d'un réseau électrique de maintenir la tension de fonctionnement normal dans les limites admissibles à tous les jeux de barres, après avoir été soumis à une perturbation, pour une condition de fonctionnement initiale donnée [9].

Le facteur principal qui cause l'instabilité est l'inaptitude du système électrique de satisfaire la demande de la puissance réactive [10]. L'instabilité résultante peut se produire sous forme de chute progressive ou élévation de la tension de quelques jeux de barres [11].

Les résultats possibles de l'instabilité de tension sont la perte de la charge dans un secteur, ou déclenchement des lignes de transmission et même d'autres éléments, par leurs systèmes de protection à des pannes en cascades.

Il est démontré que la majorité des blackouts sont causés par l'instabilité de tension [11]. Plusieurs changements dans le système de puissance peuvent contribuer à l'instabilité de tension, ce sont par exemple [9]:

- une augmentation de charge
- des générateurs, des condensateurs synchrones, ou des SVCs (Static Var Compensator systems) qui atteignent les limites de puissance réactive :
- une panne de générateur, une perte d'une charge importante ou un déclenchement de ligne :
- une perte d'une source de puissance réactive (condensateurs, machines synchrones,...).

La plupart de ces changements ont des effets significatifs sur la production, la consommation et la transmission de puissance réactive, ainsi sur la stabilité de tension. Par conséquent, des mesures peuvent être utilisées pour améliorer la stabilité de tension, tels que:

- Un contrôle automatique des condensateurs shunts.
- Un blocage des régleurs en charge automatique.
- Une nouvelle répartition de la génération.
- Une ré planification du fonctionnement des générateurs et des nœuds de commande.
- Une régulation de tension secondaire.
- Un plan de délestage.

Il est important de noter que l'instabilité de tension ne se produit pas toujours toute seule. Souvent, l'instabilité de tension et l'instabilité de l'angle de rotor se produisent ensemble, l'une pouvant entraîner l'autre.

Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations.

1.3.2. Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations :

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production,...etc.

1.3.3. Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations :

Elle est définie comme étant la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit,...etc.

1.3.4. Stabilité de fréquence :

C'est la capacité d'un réseau électrique à maintenir la fréquence dans les limites admissibles, suite à une perturbation grave dans le réseau. Cette perturbation résulte d'un déséquilibre significatif entre la production et la charge. Cette stabilité dépend des capacités de maintenir ou restaurer l'équilibre entre la production et la charge, avec une perte minimale involontaire de la charge [9].

L'instabilité résultante se produit sous forme d'oscillations de la fréquence soutenue, menant au déclenchement des unités de production et/ou des charges pendant les variations de la fréquence. Le temps qui caractérise les processus et les dispositifs actifs, s'étend de la fraction de secondes à plusieurs minutes. Par conséquent, la stabilité de la fréquence peut être un phénomène à court ou à long terme [12].

1.3.5. Stabilité angulaire :

Quand le système est perturbé, la puissance électrique de la machine varie rapidement, mais la variation de puissance mécanique fournie à la machine est relativement lente. En raison de cette différence de vitesse de réponse, un écart temporaire d'équilibre de puissance a lieu. Par conséquent, ce déséquilibre de puissance entraîne une variation des couples agissant sur le rotor. Ceci entraîne une accélération ou décélération du rotor selon le sens du déséquilibre, en entraînant une perte de synchronisme du générateur avec le reste du système. Si l'équilibre de puissance n'est pas rétabli, la machine est mise hors service par une protection de survitesse ou de perte de synchronisme, et la stabilité du système est mise en danger [6]. Suite à une perturbation, le facteur principal qui détermine l'évolution de l'état du système est l'écart entre les angles de rotor. Nous pouvons dire que les angles de rotor d'un système de puissance peuvent évaluer selon deux scénarios :

- Soit, les angles de rotor s'accroissent ensemble et oscillent à l'unisson. Ils peuvent éventuellement atteindre de nouvelles valeurs stables. Tant que les écarts entre les angles de rotor restent constants, le système reste stable et il demeure au synchronisme.

- Soit, un ou plusieurs angles du rotor s'accroissent plus rapidement que les autres. Alors, les écarts entre les angles de rotor divergent dans le temps. Le système devient par conséquent instable et il perd le synchronisme.

La stabilité angulaire, ou stabilité d'angle rotorique, se rapporte aux capacités des machines synchrones d'un réseau électrique interconnecté à rester dans le synchronisme après avoir été soumis à une perturbation [11].

Elle dépend de la capacité de maintenir ou restaurer l'équilibre entre le couple mécanique et le couple électromagnétique de chaque machine synchrone [13].

L'instabilité, qui peut résulter, se produit sous forme d'augmentation d'oscillation angulaire de quelques générateurs menant à leur perte du synchronisme avec d'autres générateurs.

Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire aux petites perturbations ou de la stabilité transitoire.

1.3.6. Stabilité angulaire aux petites perturbations :

La stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique) concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc. L'instabilité résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non-oscillatoire, entre les angles de rotor [11].

Pour des petites perturbations, la variation de puissance reste approximativement proportionnelle à la variation de l'angle des exemples typiques des petites perturbations peuvent être donnés par des variations de niveau de 10 % de la puissance mécanique appliquée à une machine du système ou sur sa charge,... [6]

L'analyse d'un tel système peut être accomplie par la linéarisation du système d'équations différentielles non linéaires. La stabilité du système peut être évaluée par l'analyse des valeurs propres de la matrice d'état du système.

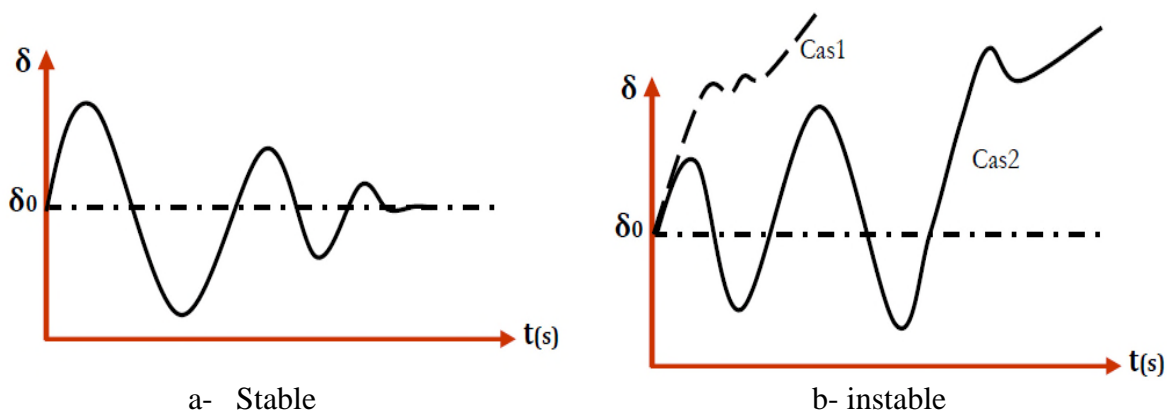
1.3.8. Stabilité transitoire :

La stabilité transitoire reste toujours une considération de base et d'une grande importance dans le design et le fonctionnement du réseau électrique. Elle se rapporte à l'aptitude du système électrique

de retrouver une position d'équilibre stable après une perturbation brusque et de forte amplitude. Cette perturbation peut écarter notablement le réseau de sa position initiale. La réponse du système implique de grandes variations des angles rotoriques. La stabilité transitoire dépend de la relation non-linéaire couples- angles. Le phénomène de la stabilité transitoire concerne les grandes perturbations telles que [3];

- Les courts-circuits affectant un élément du réseau, notamment aux bornes des machines.
- La perte d'un ouvrage (une ligne de transmission...).
- La perte d'un groupe de production.

Les conséquences de ces défauts peuvent être très graves, pouvant même conduire à l'effondrement total du réseau. Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation (en anglais First Swing Instability), (**cas a, figure 1.6**), et elle s'étend sur 3 à 5 secondes. Elle peut résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation, provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation (instabilité de multi oscillations), (**cas b, figure 1.6**). La gamme de temps associée s'étend de 10 à 20 secondes.



Cas1 instabilité de première oscillation

Cas2 instabilité de plusieurs oscillations

Figure 1.6. Tracé de l'angle rotorique en fonction du temps [13]

1.4. Classification des perturbations électriques :

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques :

- A. les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker)
- B. les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- C. les modifications de la forme d'onde (harmoniques, inter harmoniques, bruits)
- D. la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.
- E. Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée.
- F. les perturbations transitoires.
- G. les perturbations de courte durée.
- H. les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre.

Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques. [14]

Dans la catégorie « **perturbations permanentes** » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, des pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande.

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories :

- a- les défauts au sein des réseaux électriques.
- b- la présence de charges non-linéaires ou fluctuantes. Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles :

1- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...).

2- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

Le tableau 1.1 récapitule les remarques précédentes en présentant les principales perturbations, leurs origines ainsi que leurs conséquences. L'amplitude de la tension est également indiquée en pu (per unit) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude [15].

Tableau 1.1 .Vue d'ensemble des principales perturbations électriques.

Durée	Type de perturbations	Amplitude	Origine	conséquences
< 10ms	Transitoires (Impulsion et oscillations)	-	Déclanchement des appareils, enclenchement des condensateurs, commutations	Dysfonctionnements Gênants
10ms a 1min	Creux de tension	0.1-0.9pu	Court-circuit. Démarrage de gros moteurs, commutation	Arrêts d'équipements, pertes de protection
	coupures brèves	< 0.1	Courts-circuits	Arrêts d'équipements, pertes de protection
	surtension	1.1-1.8 pu	Court-circuit, débranchement des charges importantes	Déclenchements, danses pour les personnes et pour les matériels
Régime établi	Déséquilibre	-	Charges asymétriques ou monophasées	Echauffement des machines, tournantes, vibrations
	Variation de tension (flicker)	0.1 – 7%	Charges fluctuantes (fours à arc, moteur à démarrage fréquent,	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0 – 20%	Charge non linéaires (structures D'électronique de puissance, arc électriques	Echauffements, pertes vieillissements, troubles fonctionnels, Supplémentaires
	Bruit	0 – 1%	Four à arc, charge non linéaires	Echauffements, vieillissements, Pertes
	Variation de la tension	-	Déséquilibre entre la production Et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

Conclusion :

Ce chapitre à été consacré sur les problèmes de la qualité d'énergie qui sont multiples et de nature différentes. Plus que jamais la question de la qualité d'énergie représente un domaine séparé. Depuis les lignes de transmission de la haute tension jusqu'aux appareils domestiques.

Les différents types de perturbations qui dégradent la qualité d'énergie électrique ainsi leurs origines. Comme nous avons le constater.

Dans ce qui suit, nous présenterons en détail les différentes perturbations et leur effet sur la qualité d'énergie électrique.

Chapitre 2

Creux de tension et coupures brèves

2. Introduction :

Un creux de tension, même relativement faible, peut engendrer des problèmes très importants. Pour les industriels et les chefs d'entreprise, cela se traduit par des arrêts de production, la mise au rebut de produits ou de matières premières. Pour estimer précisément les coûts d'une perturbation électrique, il faut aussi prendre en compte d'autres aspects : l'insatisfaction des clients (à cause des retards de livraison, par exemple), le risque pour la sécurité du personnel et des outils de production, perte des données, etc. Mais globalement, des solutions existent pour limiter les dégâts dus aux creux de tension; toutefois, leur acceptabilité au plan technico-financier ne pourra être établie qu'après une estimation aussi correcte que possible des coûts induits.[16]

2.1. Creux de tension et coupures brèves :

2.1.1. Définition, origine et conséquences :

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min [IEEE Std. 1159]. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min. [16]

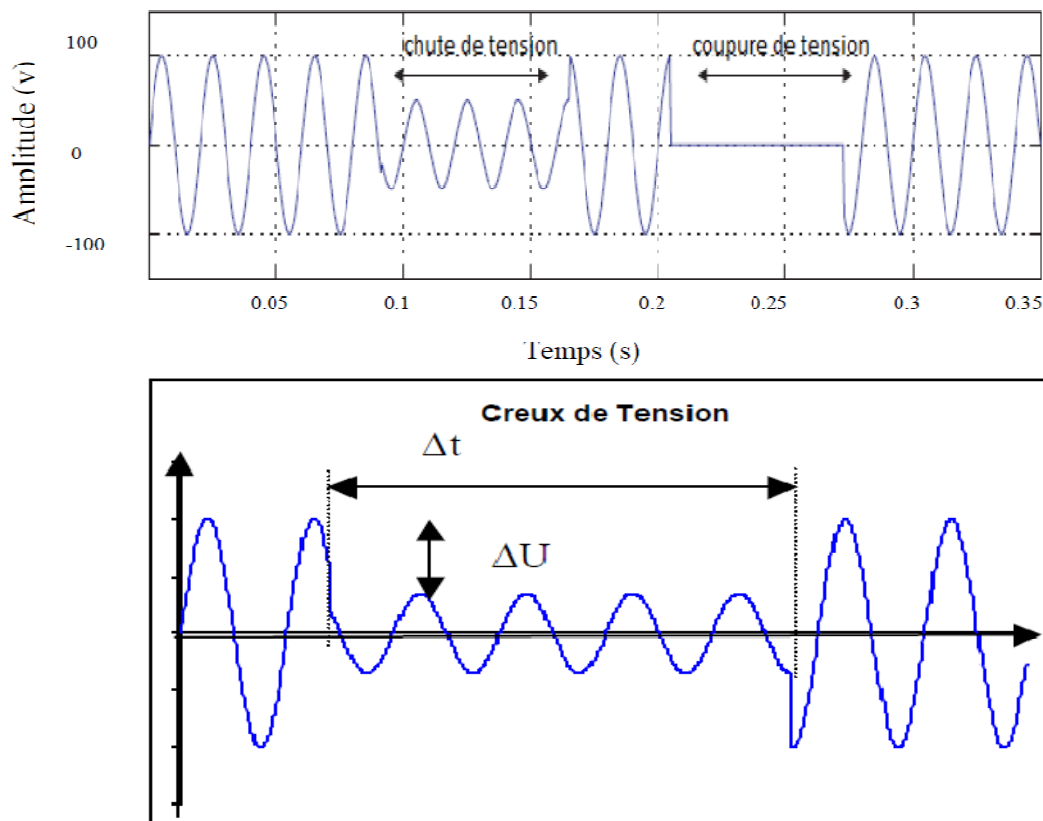


Figure 2.1. Creux de tension

Il est caractérisé par

- sa profondeur (ΔU).
- sa durée (Δt).

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 (**voir figure 2.2a**).

Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles.

Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale.

Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (**voir figure 2.2b**). Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases.

Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes.

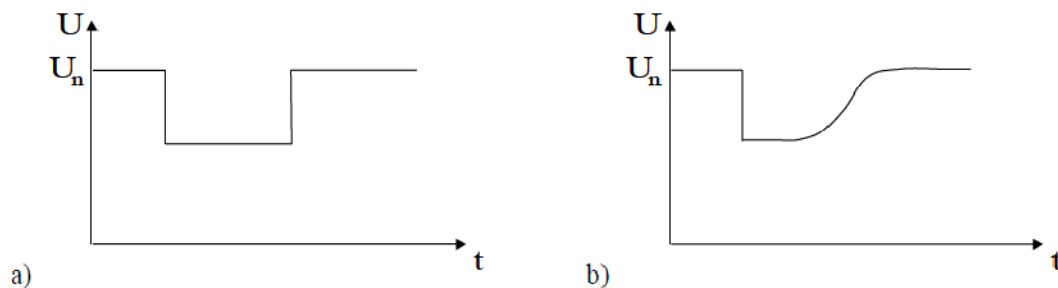


Figure 2.2. Amplitude d'un creux de tension provoqué par

a) un court-circuit

b) le démarrage d'un moteur de forte puissance

Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes. [17]

2.1.2. Représentation dans le plan complexe :

Les creux de tension monophasés se caractérisent principalement par leur amplitude et leur phase. L'amplitude des creux de tension est liée à leur proximité par rapport au défaut, la nature du défaut et la puissance de court-circuit du réseau. La durée du creux de tension est liée au temps d'élimination du court-circuit par les protections du réseau ou des installations raccordées. En plus de la durée et de l'amplitude, les creux de tension triphasés se caractérisent par le déphasage entre les tensions de phase qui dépend de la nature et de l'endroit du défaut. Les creux de tension triphasés sont souvent analysés dans le plan complexe, où les trois grandeurs sont représentées sous forme des vecteurs caractérisés par leur amplitude et leur phase, appelés également phaseurs. La relation entre les phaseurs dans le plan complexe est appelée signature ou type du creux de tension. Par exemple, le creux de tension de **figure 2.2a** se caractérise par la signature présentée en **figure 2.3b**

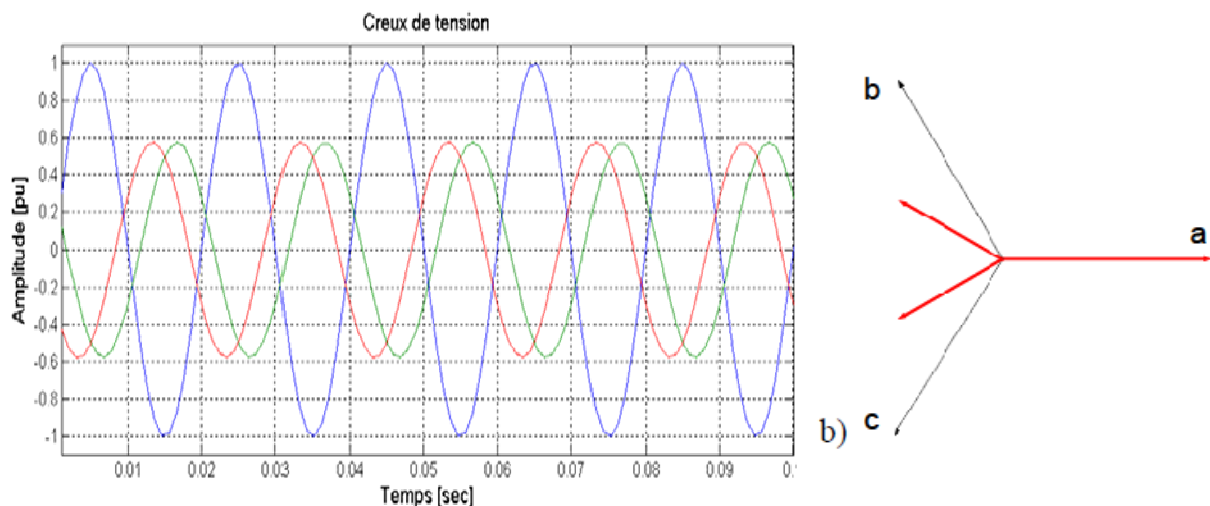


Figure 2.3. Creux de tension (a) et sa signature dans le plan complexe (b)

2.2. Propagation :

2.2.1. Propagation en amont et en aval du réseau :

Les creux de tension se propagent en amont et en aval du réseau, et leur sévérité dépend de l'endroit de mesure du creux de tension par rapport à l'événement qui l'a engendré.

La propagation des creux de tension en amont dépend de deux paramètres : la puissance de court circuit et la distance entre l'endroit de défaut et l'endroit de mesure.

Plus la puissance de court-circuit élevée et le défaut éloigné, plus le creux de tension est atténué.

Pour mieux illustrer la propagation des creux de tension, l'exemple d'un diviseur de tension monophasé affecté par un court-circuit franc au point D est présenté en **figure 2.4**.

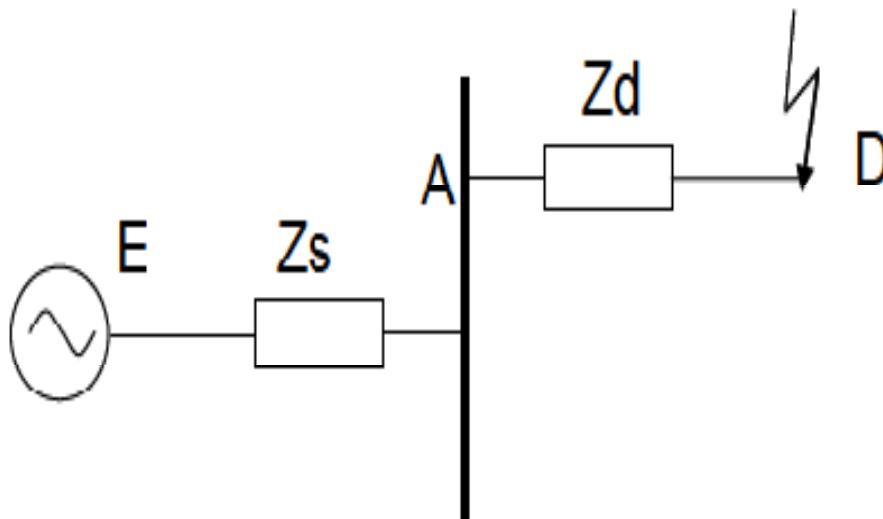


Figure 2.4. Diviseur de tension pour l'étude de la propagation des creux de tension

La tension à l'endroit du défaut D est nulle, puisque le court circuit est franc. La tension à l'endroit de mesure A est donnée par :

$$V_A = \frac{Z_d}{Z_d + Z_s} E \quad (2.1)$$

Si la distance électrique entre l'endroit de défaut et le point de mesure A est importante, l'impédance de ligne Z_d se caractérise par une valeur importante. En conséquence, l'amplitude de la tension V_A est proche à celle de la source E, c'est à dire que le creux de tension mesuré au point A est atténué par rapport au creux de tension mesuré au point D.

Si la puissance de court-circuit au niveau de la source est importante, l'impédance de la source Z_S est faible. En conséquence, la tension V_A est proche de la tension de la source et le creux de tension à l'endroit de la mesure se caractérise par une profondeur moins importante que le creux de tension à l'endroit de défaut.

Le diviseur de tension de figure I.3 montre que les creux de tension sont atténués lorsqu'ils se propagent en amont dans le réseau. En revanche, les creux de tension se propagent en aval sans s'atténuer. En effet, si on reprend l'exemple de **figure 2.4** en supposant que le court-circuit franc est produit avant le point de mesure A, la tension à l'endroit de mesure est nulle et par conséquent, le potentiel du point aval D est également nul. [17]

2.2.3. Propagation via les transformateurs :

La signature des creux de tension peut être modifiée par les transformateurs situés au sein du réseau.

Par exemple, le creux de tension présenté à gauche de la **figure 2.5** se caractérise par une chute de tension sur la phase a uniquement. Lors de son passage par le transformateur Dy11, il se transforme en creux de tension biphasé, avec des chutes de tension principales sur les phases b et c.

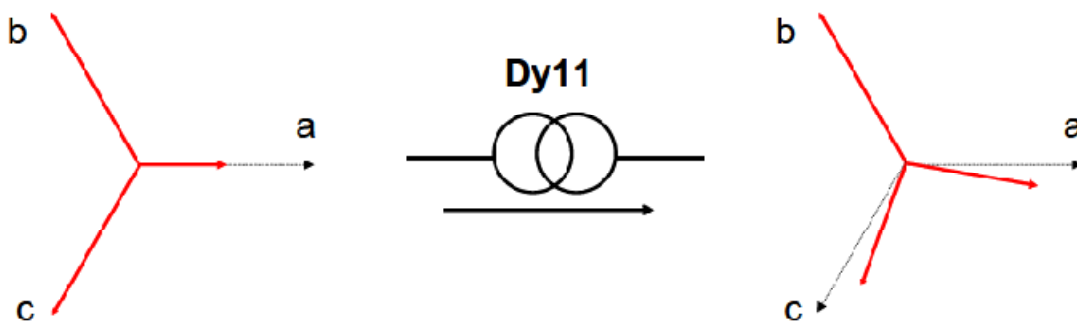


Figure 2.5. Modification du type de creux de tension via un transformateur Dy11

En effet, un creux de tension peut se caractériser par des signatures différentes du côté primaire et du côté secondaire d'un transformateur en fonction de son type et de sa connexion. En fonction des modifications introduites dans les signatures des creux de tension, on distingue trois familles de transformateurs :

- La signature du creux de tension n'est pas modifiée.

Les tensions du côté secondaire en pu sont égales aux tensions du côté primaire en pu. Dans cette catégorie on ne distingue qu'un seul transformateur de type $Y_n Y_n$.

Le rapport entre les tensions du côté primaire (v_{ABC}) et les tensions du côté secondaire (v_{abc}) peut être représenté sous la forme suivante :

$$v_{abc} = kT v_{ABC} \quad (2.2)$$

Avec k est le rapport de transformation et T représente la matrice de transformation.

La matrice de transformation pour ce type de transformateur est la matrice identité,

$$\text{C'est à dire : } T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

- La composante homopolaire est enlevée.

Les tensions du côté secondaire sont obtenues en enlevant la composante homopolaire des tensions du côté primaire [18].

Dans cette famille, on distingue les transformateurs de type Dd, Dz, Yny, Yyn. Leur matrice de transformation est définie par :

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

- Les tensions de phase sont modifiées en tensions composées et vice versa.

Les tensions du côté secondaire sont proportionnelles à la différence de deux tensions du côté primaire. Dans cette catégorie on distingue les transformateurs de type Dy, Yz, Yd. La matrice de transformation correspondante est la suivante :

$$T_3 = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

De manière analogue, la connexion des charges détermine le type de creux de tension que celles-ci subissent. Les charges connectées en triangle ou en étoile avec neutre flottant modifient le type de

creux de tension, alors que les charges connectées en étoile avec neutre connecté à la terre ne modifient pas la signature des perturbations. [18]

2.3. Paramètres déterminant les types de creux de tension :

2.3.1. Types de courts-circuits :

Les courts-circuits sont la cause principale des creux de tension. Si on excepte les différentes variantes de courts-circuits entre phases et neutre, on distingue alors quatre types de courts-circuits monophasés, biphasés entre phase et terre, biphasés entre deux phases et triphasés (voir figure 2.6)

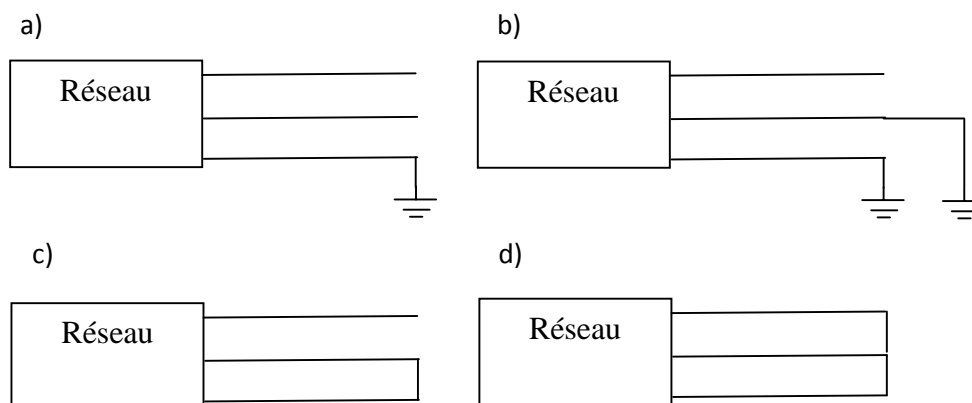


Figure 2.6. Types de courts-circuits : monophasé (a), biphasé entre phase et terre (b), biphasé entre deux phases (c) et triphasé (d)

- Les courts-circuits monophasés représentent 70% des courts-circuits selon et sont donc les plus fréquents. Ils se caractérisent par une chute de tension sur une des trois phases à l'endroit du court-circuit. En fonction du régime de neutre, les deux autres phases restent les mêmes ou se caractérisent par des surtensions avec déphasages.
- Les creux de tension biphasés entre deux phases viennent en seconde position puisqu'ils représentent 15% des courts-circuits. Ils se caractérisent par des chutes de tension et déphasage pour deux des phases à l'endroit du défaut. la phase non affectée par le défaut reste la même qu'avant le défaut
- Les creux de tension biphasés entre phase et terre représentent 10% des courts-circuits. Ils sont à l'origine des chutes de tension sur deux phases à l'endroit du court-circuit avec ou sans déphasage supplémentaire. En fonction du régime de neutre, la phase saine peut rester la même ou se caractériser par une surtension.

En fin, les creux de tension triphasés sont les creux de tension les plus sévères, mais ils ne sont pas très fréquents et ne représentent que 5% des courts-circuits. Ils se caractérisent par des chutes de tension de même amplitude sur les trois phases sans déphasages supplémentaires [19].

2.3.2. Régime de neutre :

L'allure des creux de tension engendrés par les courts-circuits précédents dépend également du régime de neutre du réseau électrique. On distingue en effet deux régimes de neutre principaux : neutre isolé (ou fortement impédant) et neutre relié directement à la terre (ou par une faible impédance). Afin d'illustrer ce point, considérons l'exemple simple d'un court-circuit monophasé.

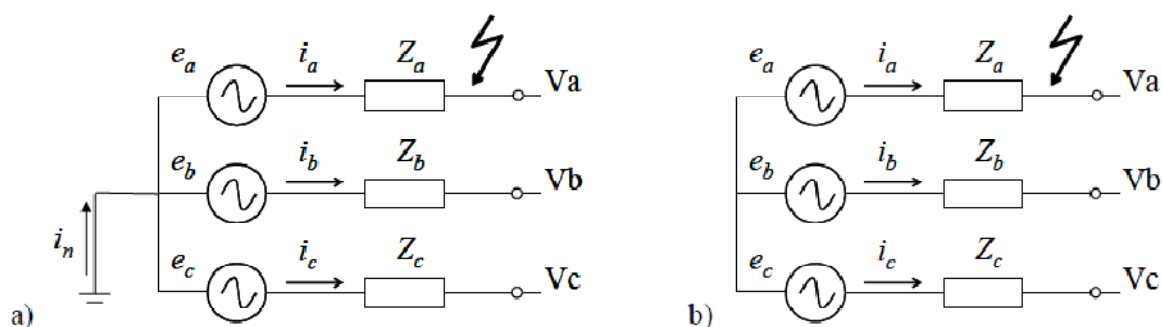


Figure 2.7. Régime de neutre : direct (a) et isolé (b)

Le schéma simplifié d'un système avec neutre relié directement à la terre est présenté en (figure 2.7a).

La relation entre les courants des trois phases et le courant du conducteur de neutre est la suivante :

$$i_a + i_b + i_c = i_n \quad (2.6)$$

Supposons que la phase a soit affectée par un court-circuit. Le courant i_a dans la ligne où le défaut se produit augmente et entraîne une chute de la tension V_a , car

$$V_a = e_a - i_a Z_a \quad (2.7)$$

Les changements dans le courant de phase i_a impliquent des modifications dans le courant du conducteur de neutre i_n , mais n'entraînent pas de changements dans les autres courants de ligne i_b et i_c (voir équation. 2.6).

En conséquence, les tensions des deux autres phases restent les mêmes, seule la tension de la phase a est modifiée par le court-circuit (**figure 2.7b**).

Le schéma d'un système avec neutre isolé est présenté en (**figure 2.7b**). La relation entre les courants de phase et le conducteur de neutre est donnée par :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.8)$$

Si la phase a est affectée par un court-circuit, le courant de ligne augmente et provoque une chute de tension dans la phase où le défaut se produit.

L'augmentation du courant i_a entraîne une diminution des deux autres courants i_b et i_c , qui à leur tour provoquent des surtensions dans les phases b et c (**figure 2.7b**).

Ce phénomène est d'autant plus accentué que les neutres côté charge et côté source ont des potentiels éloignés. [20]

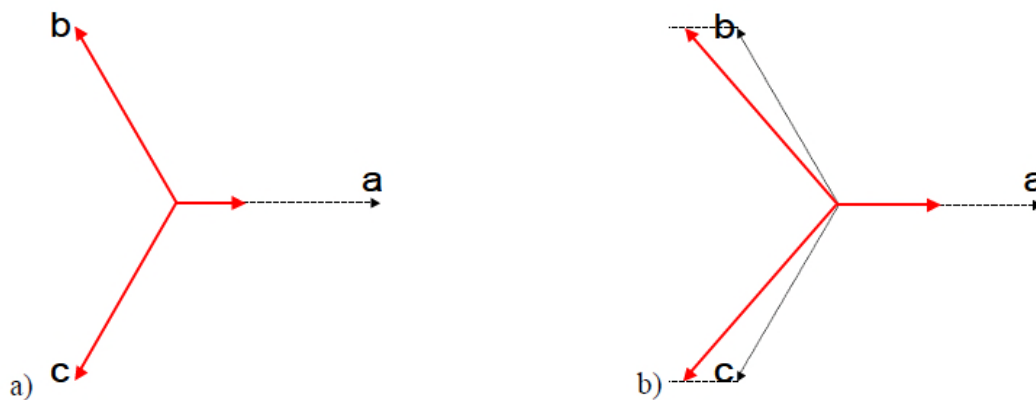


Figure 2.8. Signatures des creux de tension dus à un défaut monophasé en régime de neutre relié directement à la terre (a) et à distribution isolée (b)

2.3.3. L'endroit du défaut :

Le type et les caractéristiques d'un creux de tension dépendent également de l'endroit du défaut qui l'engendre, et de l'endroit où il est mesuré au sein du réseau électrique. En effet, on que les creux de tension se propagent en aval du réseau en modifiant leurs signatures via les transformateurs.

2.3.4. Type de mesures :

On distingue deux principaux types de connexions des appareils de mesure :

entre phase et neutre ou phase et terre (connexion en étoile), et entre phases (connexion en triangle).

La connexion entre phases est en général utilisée dans des systèmes avec des charges connectées en triangle afin de mesurer les perturbations électriques telles qu'elles sont subies par ces charges.

Cependant, dans des systèmes avec des charges connectées en étoile et en triangle, les mesures de type phase - terre ou phase - neutre sont mieux adaptées.

En effet, la connexion en étoile donne accès à plus d'informations que la connexion en triangle, comme par exemple le nombre des défauts et leur localisation.

De plus, les tensions composées peuvent être déduites des tensions simples, alors que l'inverse n'est pas toujours possible.

2.3.5. Classification :

D'après la classification des creux de tension universellement reconnue [Bol-99], on distingue sept principaux types de creux de tension dénotés par les lettres de A à G présentées en

figure 2.9, où d est l'amplitude de la chute de tension la plus importante, appelée aussi profondeur du creux de tension. Pour les creux de tension de type C, G et I, la grandeur d ne correspond pas exactement à la profondeur du creux de tension du fait des déphasages supplémentaires des tensions.

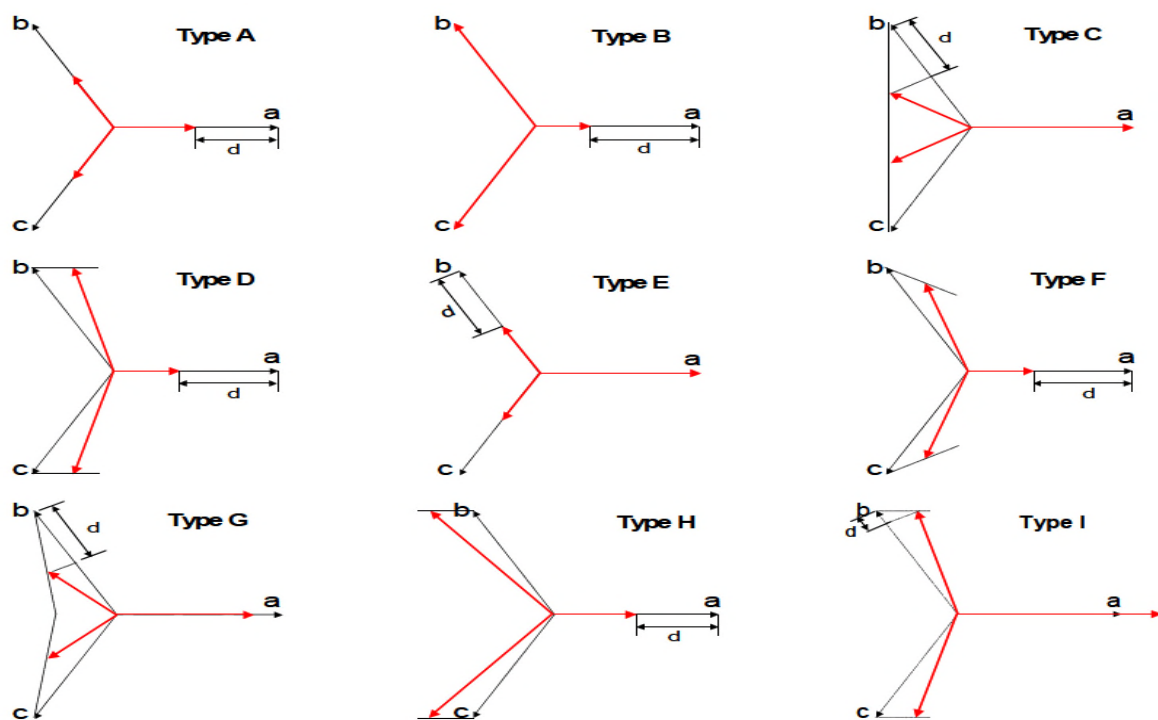


Figure 2.9. Les différents types de creux de tension

Cependant, pour des chutes de tension peu importantes, d peut être considéré identique à la profondeur du creux de tension [21].

- Les creux de tension A, B, C et E sont mesurés au niveau de tension où le défaut se produit. Ils se propagent en aval du réseau en modifiant leur signature en fonction du type des transformateurs, donnant naissance à d'autres types de creux de tension qui peuvent être de type : C, D, F et G.
- La **(figure 2.10)** et le **tableau 2.1** présentent la transformation des creux de tension A, B, C et E, lorsqu'ils se propagent en aval du réseau, via les transformateurs les plus souvent utilisés Dy.
- Les creux de tension de **type A**, dus à des défauts triphasés, présentent des chutes de tension de la même profondeur sur les trois phases sans déphasages supplémentaires. Ce type de creux de tension se propage en aval du réseau sans modifier sa signature.
- Les creux de tension de **type B** doivent leur origine à des défauts monophasés. Ils se caractérisent par une chute de tension sur une des phases, les phases non affectées par le défaut n'étant pas modifiées.

Ce type de creux de tension se propage en aval du réseau en modifiant sa signature. Par exemple, en passant par un transformateur de type Dy il se transforme en creux de tension biphasé de type C.

- Les creux de tension de **type C** sont produits soit par des défauts biphasés entre deux phases, soit par la propagation des creux de tension de type B ou D via les transformateurs. Ils se caractérisent par des chutes de tensions avec déphasages supplémentaires pour deux des phases, la troisième n'étant pas modifiée. En se propageant en aval du réseau, ces creux de tension se transforment en type D.
- Les creux de tension de **type D** doivent leur origine à la propagation des creux de tension de type C via les transformateurs. Ils se caractérisent par une chute principale sur une des phases et de faibles chutes de tension et déphasages supplémentaires pour les deux autres phases. En se propageant en aval du réseau, ces creux de tension se transforment en type C.
- Les creux de tension de **type E** proviennent de défauts entre deux phases et la terre, et présentent des chutes de tension sans déphasage sur deux des phases. Ils se propagent en aval du réseau en générant des creux de tension de type F.

- Les creux de tension de **type F** proviennent de la propagation des creux de type E via les transformateurs. Ils se caractérisent par une chute de tension sur une des phases et de faibles chutes de tension avec déphasage pour les deux autres phases. Leur propagation via un transformateur donne naissance à des creux de type G.
- Les creux de tension de **type G** présentent des chutes de tension avec déphasages supplémentaires pour deux des phases et une faible baisse de tension pour la troisième phase. Ce type de creux de tension est assez rare, car il provient de la double transformation d'un creux de tension de type E.

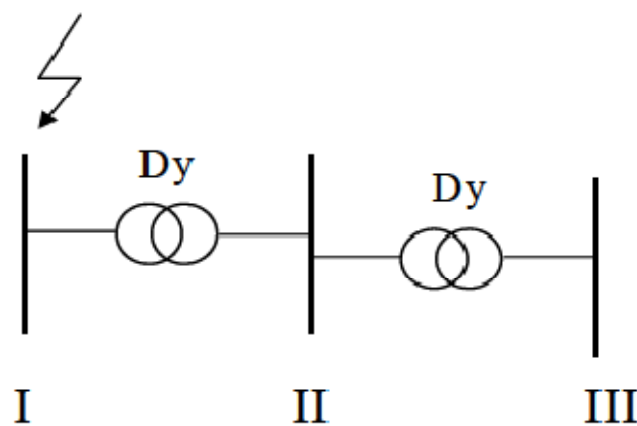


Figure 2.10. Transformation des types de creux de tension

Tableau 2.1. Propagation des creux de tension

Niveau de tension	I	II	III
Types de creux de tension	A	A	A
	B	C	D
	C	D	C
	E	F	G
	-	H/I	-

- Les creux de tension avec surtension dus aux défauts dans les systèmes à neutre isolé ne sont pas représentés dans la classification de [Bol-99] car d'une part ils ne se propagent pas, et d'autre part ils ne sont pas subis par les charges généralement connectées en triangle dans les systèmes à neutre isolé [21].

Cependant ces creux de tension sont envisagés d'identifier et de localiser certains défauts, et sont très souvent présents au niveau MT en cas de connexion en étoile des appareils de mesure. Les creux de tension avec surtensions sont dénotés par les lettres H et I, et leurs

signatures sont également présentées en (**figure 2.9**) où leur profondeur est indiquée par d .

- Les creux de tension de **type H** présentent chute de tension sur une des phases et des surtensions sur les deux autres phases. Les creux de tension de **type I** se caractérisent par des chutes de tension sur deux des phases et une surtension sur la troisième phase. En fonction de leur profondeur, les creux de tension de type I présentent deux signatures différentes. Pour une profondeur $0 \leq d \leq 0,25pu$, les trois tensions sont modifiées le long du même axe.

Ce type de creux de tension est également dénoté par I^* .

Pour une profondeur du creux de tension $d \geq 0,25 pu$, les tensions en chute sont modifiées le long de l'axe perpendiculaire à la phase en surtension. La valeur de celle-ci est alors fixe et de $1,5pu$.

- Les creux de tension de type B, D et F sont souvent appelés monophasés, car ils se caractérisent par une chute de tension sur une des phases. Les creux de tension de type C, E et G se caractérisent par des chutes de tension sur deux des phases et sont dénommés biphasés. Le creux de tension de type A est appelé triphasé. Les creux de tension de type H et I se caractérisent à la fois par des chutes de tension et des surtensions et sont également appelés creux de tension avec surtensions.

2.4. Conséquences des creux de tension et coupures :

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

Les applications les plus sensibles sont les :

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

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

2.4.1. Moteur asynchrone :

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

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

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

La réalimentation rapide (~ 150 ms) d'un moteur asynchrone en cours de ralentissement sans précaution peut conduire à un ré enclenchement en opposition de phase entre la source et la tension résiduelle entretenue par les moteurs asynchrones.

Dans ce cas la première crête du courant peut atteindre trois fois le courant de démarrage (15 à 20 In). Ces surintensités et les chutes de tension qui en découlent ont des conséquences pour le moteur (échauffements supplémentaires et efforts électrodynamiques dans les bobines pouvant engendrer des ruptures d'isolation et des à-coups sur le couple avec des contraintes mécaniques anormales sur les accouplements et les réducteurs d'où une usure prématurée voire une rupture) mais aussi sur les autres équipements tels que les contacteurs (usure voire soudure des contacts).

Les surintensités peuvent conduire au déclenchement des protections générales de l'installation provoquant ainsi l'arrêt du procédé.

2.4.2. Moteur synchrone :

Les effets sont à peu près identiques au cas des moteurs asynchrones. Les moteurs synchrones peuvent cependant supporter des creux de tension plus importants (de l'ordre de 50 %) sans

décrocher, du fait de leur inertie généralement plus importante, des possibilités de surexcitation et de la proportionnalité de leur couple avec la tension. En cas de décrochage, le moteur s'arrête, et il faut reprendre tout le processus de démarrage qui est assez complexe.

2.4.3. Actionneurs :

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

2.4.4. Equipements de type informatique :

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

2.4.5. Machines à vitesse variable :

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

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

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

2.4.6. Eclairage :

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

Les creux de tension de profondeur supérieure ou égale à 50 % et dont la durée est de l'ordre de 50 ms provoquent l'extinction des lampes à décharge. Une durée d'extinction de quelques minutes est alors nécessaire au refroidissement de l'ampoule avant ré allumage [6].

2.5. Surtensions et surintensités :

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1,1 pu à 1,8 pu. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions.

En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1,73 pu, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1,5 pu.

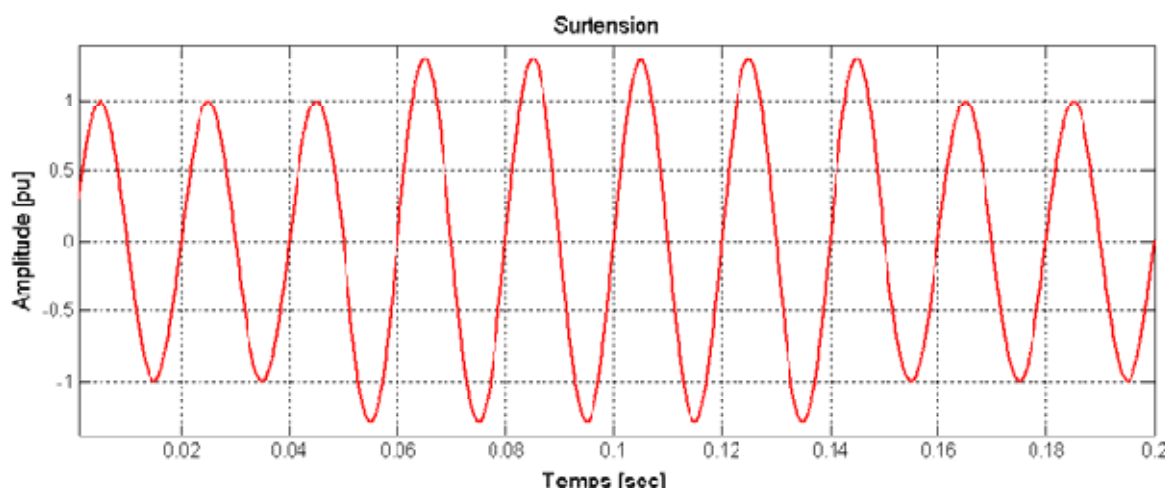


Figure 2.11. Exemple de surtension

Des surtensions peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions, par ferromésonance ou par des manœuvres sur le réseau.

Ce type de surtensions se caractérise généralement par une durée très brève et s'assimile le plus souvent à des transitoires [21].

2.5.1. Conséquence surtensions :

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

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

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

b) Les surtensions de manœuvre : qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue. Elles peuvent conduire à des dégradations aussi importantes que la foudre [6].

2.5.3. Variations de tension :

La mise en service ou hors service des appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des variations de tension qui se manifestent sous deux formes principales :

- Des variations lentes de tension se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes.

Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les $\pm 10\%$ de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques.

- Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25Hz. Ces variations sont dues aux charges dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents.

Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs.

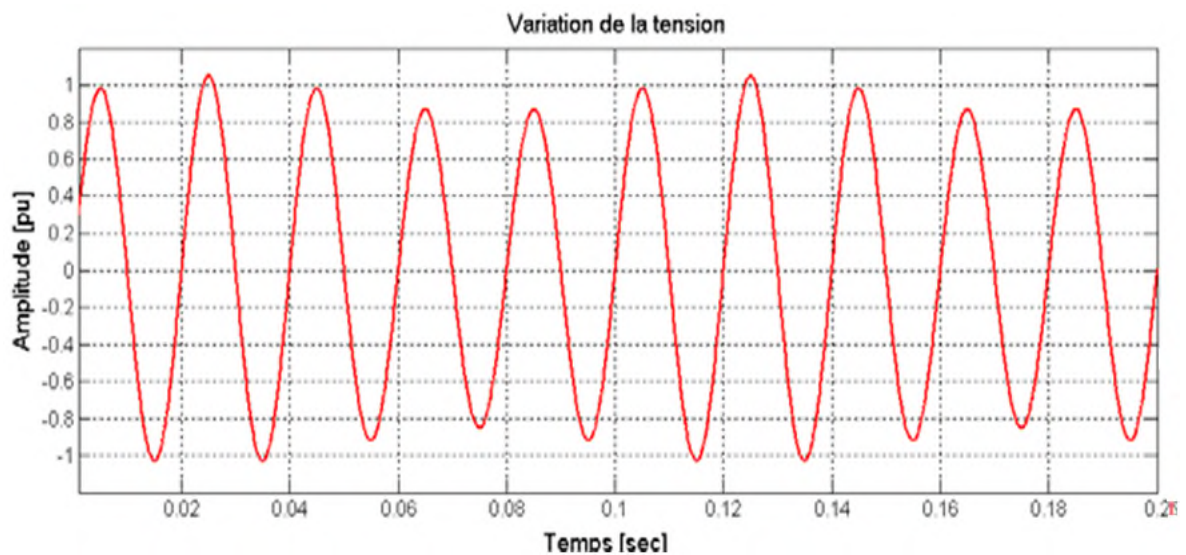


Figure 2.12. Exemple de variation de tension

2.5.4. Déséquilibre du Système Triphasé :

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré (**figure 2.13**).

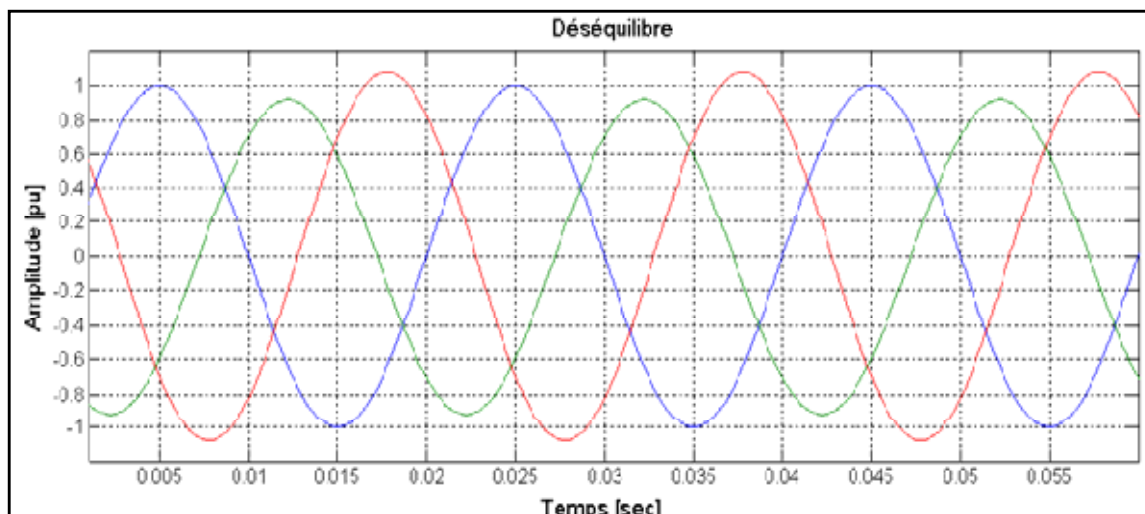


Figure 2.13.Exemple de déséquilibre de tension

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions.

Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques.

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° .

- a) Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre.
- b) Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase [21].

2.5.6. Conséquence de déséquilibre :

Le principal effet est le sur échauffement des machines asynchrones triphasées .En effet, la réactance inverse d'une machine asynchrone est équivalente à sa réactance pendant la phase de

démarrage. Le taux de déséquilibre en courant sera donc plusieurs fois celui de la tension d'alimentation. Les courants de phase peuvent alors différer considérablement.

Ce qui accroît l'échauffement de la ou des phases parcourues par le courant le plus élevé et réduit la durée de vie de la machine. En pratique, un taux de déséquilibre de tension de 1 % pendant une longue période, et 1,5 % de moins de quelques minutes est acceptable [6].

2.6. Fluctuations de Tension (Flicker) :

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 et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude.

Le terme Flicker est dérivé de l'impact visible sur les lampes (papillotement de la lumière) dû à la fluctuation de la tension. Parmi les causes les plus fréquentes de la fluctuation de la tension dans les réseaux de transmission et distribution sont les fours à arc.

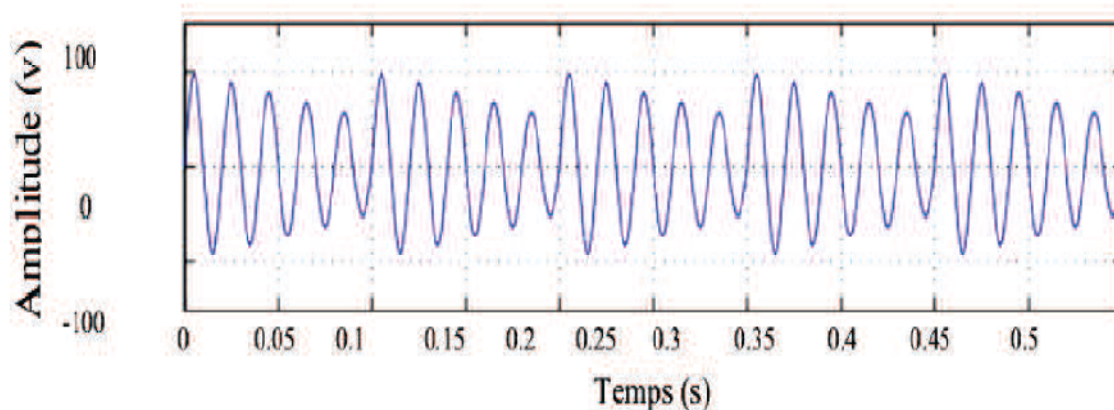


Figure 2.14. Fluctuations de tension

2.6.1. Conséquences de fluctuations de tension :

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation ; par ex Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker) [22].

Conclusion :

Dans ce chapitre. Une attention particulière est portée aux perturbations les plus gênantes et les plus communément rencontrées et leur conséquences sur les différents équipements électrique, c'est-à-dire les creux de tension, les coupures brèves, les variations de tension.

Chapitre 3

Les harmoniques

3. Introduction :

Les harmoniques dans les installations électriques ont commencé à prendre de l'importance dans les années 90, car la proportion de charges électroniques est devenue comparable à celle des équipements électriques traditionnels. Habituellement les utilisateurs se retournent vers les fournisseurs d'énergie électrique quand des problèmes de qualité apparaissent sur la distribution et pourtant dans la plupart des cas, ils sont causés par les équipements que l'abonné met en œuvre sur sa propre installation.

Du matériel comme des ordinateurs, des ballasts électroniques, des onduleurs ou des sources d'alimentation sont autant d'exemples dont le principe de fonctionnement utilise des composants électroniques de puissance :

Diodes, thyristors, transistors, triacs etc. Ces composants sont en général, la cause des perturbations électriques et en particulier des harmoniques.

3.1. Définition :

Selon la norme EN 50160, une tension harmonique est une tension sinusoïdale dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale de la tension d'alimentation.

La définition des harmoniques découle des travaux du mathématicien français **Joseph Fourier**.

3.1.1. Décomposition en série de Fourier :

Tout signal périodique quelle que soit sa forme, peut être décomposé en somme de signaux sinusoïdaux dont la fréquence respective est un multiple entier de la fréquence du fondamental.

La fréquence du fondamental est la fréquence du signal d'origine (50 Hz).

$$S(t) = \sum (A_0 + A_1 \sin(2\pi \cdot f_1) + A_2 \sin(2\pi \cdot 2f_1) + A_3 \sin(2\pi \cdot 3f_1) + \dots + A_n \sin(2\pi \cdot nf_1)) \quad (3.1)$$

Cette expression mathématique permet de décomposer n'importe quel signal en somme de signaux sinusoïdaux, où f_1 est fréquence de la composante fondamentale et $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ sont les amplitudes respectives de chaque sinusoïde. Ces amplitudes se calculent en appliquant des relations définies par les séries de Fourier.

Nous pouvons donc, définir les harmoniques comme des oscillations sinusoïdales multiples du fondamental.

De ce fait, les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est supérieure à celle du fondamental [23].

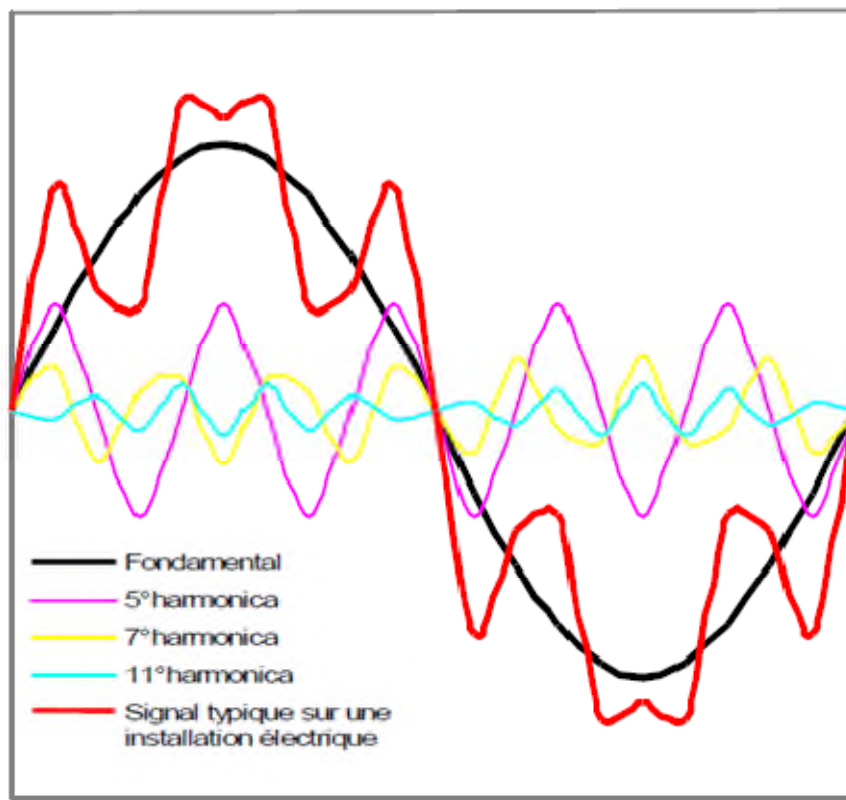


Figure 3.1. Exemple des harmoniques

3.1.2. Rang des harmoniques :

Les harmoniques sont classés selon leur rang, leur fréquence et leur sens.

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fréquence	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Sens	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Le rang d'un harmonique est le nombre entier défini par rapport de sa fréquence à la fréquence du fondamental.

Exemple : rang 7 implique une fréquence égale à $7 \times 50 = 350$ Hz

On peut voir dans le tableau qu'il existe des harmoniques de rang pair et impair.

Les harmoniques impairs sont présents dans les installations électriques, industriels et dans les bâtiments à usages commerciaux.

Les harmoniques de rang pairs n'existent que si le signal est asymétrique, en présence d'une composante continue. Le sens peut être positif, négatif ou nul.

Dans le cas d'un moteur asynchrone triphasé avec neutre câblé, les harmoniques de sens positif créent un couple pulsant de même sens que celui créé par le fondamental. Il en découle une surintensité dans le moteur, source d'échauffements qui réduisent sa durée de vie et qui risquent de diminuer le niveau d'isolement des enroulements du moteur avec risques de panne.

Dans tout les cas ils sont la cause d'échauffements dans les câbles, les moteurs, les transformateurs etc.

Les harmoniques de sens négatif créent un couple pulsant de sens opposé à celui créé par le fondamental ralentissant de ce fait la machine et provoque des échauffements.

Les harmoniques de sens nul appelés homopolaires n'ont pas d'effet sur la rotation des machines mais s'additionnent dans le conducteur neutre. Le conducteur neutre sera parcouru par 3 fois plus de courant sur le rang 3, 6, 9 que chacun des conducteur de phase. Ils engendrent échauffement dans les conducteurs, dégradation des matériels et destruction des batteries de condensateurs [23].

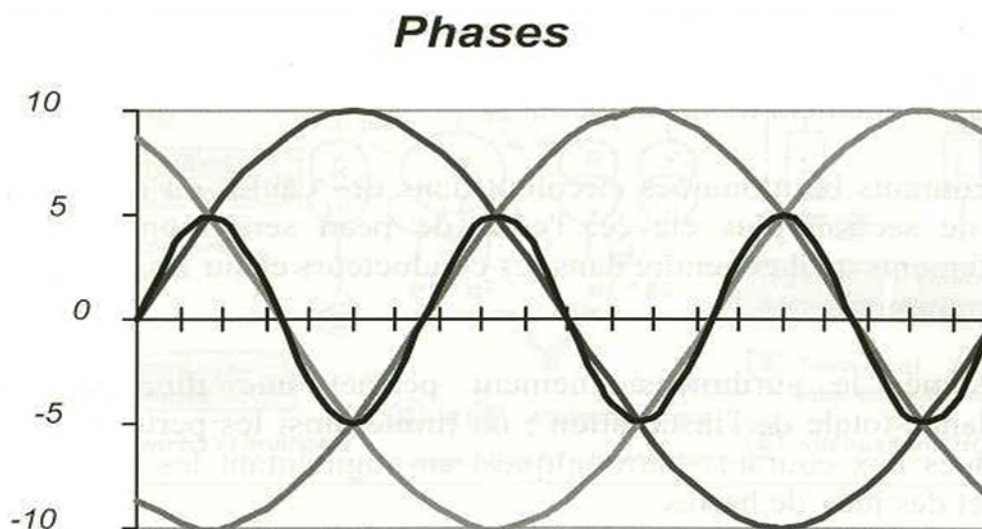


Figure 3.2. Harmoniques de rang 3

3.1.3. Taux de Distorsion THD :

Le THD (Total Harmonic Distorsion) permet la quantification en un point de mesure donné.

Le THD mesure la distorsion harmonique totale par rapport au fondamental

$$\text{THD}_f = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} 100\% \quad (3.2)$$

La distorsion harmonique totale peut dépasser 100%, cela signifie que sur cette installation, en ce point de mesure, la contribution harmonique sera supérieure au fondamental.

En l'absence d'harmonique, le THD est nul. Dans la pratique un THD inférieur à 10-15% constitue une bonne référence.

- **Inter harmoniques** : sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence fondamentale.
- **Infra harmoniques**: ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental

3.1.4. Spectre harmonique :

Le spectre harmonique est la décomposition harmonique d'un signal dans sa représentation sous forme de barre-greffe.

Chaque barre-gaffe y représente un harmonique, avec sa fréquence, sa valeur efficace, sa contribution et son terme de phase [24].

3.2. Harmonique de courant et de tension :

3.2.1 Harmonique de courant :

Dans la plupart des cas, les harmoniques présentés sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charge non linéaire.

Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension de réseau auquel elles sont raccordées.

Une charge passive est une charge ne comportant pas de systèmes de commutation rapide autorisant un découpage de l'onde 50 Hz, au contraire des charges actives. Les charges actives utilisent toujours des commutateurs électroniques de puissance.

3.2.2. Tension harmonique :

On peut également parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. En effet dans ce cas, on s'intéresse à l'étude du raccordement d'un récepteur de faible puissance, sa connexion au réseau ne modifie pas sensiblement le niveau précédent [23].

3.2.3. Puissances en présence des harmoniques :

En présence d'harmoniques, (S^2) n'est pas la résultante de.

$$P^2 + Q^2 \quad (3.3)$$

On introduit la notion de puissance de distorsion ou déformante D telle que:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.4)$$

S: est la puissance apparente

P : La puissance active

Q: La puissance réactive

D : La puissance déformante ou de distorsion.

P et **Q** : ne dépendent que du fondamental du courant, de la tension (supposée sinusoïdale) et de l'angle φ .

φ : est le déphasage entre le fondamental du courant et la tension.

D : dépend uniquement des courants harmoniques.

(FP): Facteur de puissance et de déphasage $\cos\varphi$.

Le facteur de puissance noté **(FP)** est le rapport de la puissance active (**P**) à la puissance apparente (**S**). Il tient compte des harmoniques.

$$FP = P/S \quad (3.5)$$

Le facteur de puissance **(FP)** ne doit pas être confondu avec **($\cos\varphi$)** appelé aussi facteur de déplacement de la puissance **(FDP)**.

3.3. Origine des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques.

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques.

Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. [6]

Parmes ces équipements on peut citer :

- ◆ Des convertisseurs de puissance (alternatif/continu –continu/alternatif), comme {Redresseurs- onduleurs ... }
- ◆ Démarreurs électroniques des moteurs.
- ◆ Les variateurs électroniques de vitesse.
- ◆ Les ordinateurs et autres dispositifs électroniques.
- ◆ Les éclairages électroniques



Fig. 3.3. Exemples des charges non linéaires causant des harmoniques

3.3.1. Charges linéaires et non linéaires :

Le réseau électrique fournit aux charges une tension sinusoïdale de 50/60 Hz.

La forme d'onde du courant fourni par la source en réponse aux besoins de la charge dépend du type de charge [24].

3.3.2. Charges linéaires :

Le courant absorbé est sinusoïdal avec la même fréquence que la tension. Le courant peut être en retard (déphasage, angle φ) par rapport à la tension.

La loi d'Ohm définit une relation linéaire entre la tension et le courant ($U = ZI$) avec un coefficient constant, l'impédance de charge. Le rapport entre le courant et la tension est linéaire.

C'est parce qu'elles sont conformes à cette loi qu'on nomme linéaires des charges telles que les ampoules classiques, les systèmes de chauffage, les charges résistives, les moteurs, les transformateurs, etc....

Elles ne contiennent aucun composant électronique actif, seulement des résistances (R), des bobines d'inductance (L) et des condensateurs (C).

3.3.3. Charges non linéaires :

- Le courant absorbé par la charge est périodique, mais pas sinusoïdal : la forme d'onde du courant est déformée par les courants harmoniques.
- La loi d'Ohm définissant le rapport entre la tension totale et le courant n'est plus valide car l'impédance de la charge varie au cours d'une période ; le rapport entre le courant et la tension n'est pas linéaire.
- Le courant absorbé par la charge résulte en fait de la combinaison des éléments suivants :
 - 1) un courant sinusoïdal appelé « composante fondamentale », à une fréquence de 50 ou 60 Hz
 - 2) les harmoniques, qui sont des courants sinusoïdaux dotés d'une amplitude inférieure à celle de la composante fondamentale, mais dont la fréquence est un multiple de la composante fondamentale et définit l'ordre des harmoniques. Par exemple, l'harmonique de rang 3 possède une fréquence égale à 3 x 50 Hz (ou 60 Hz) [6].

3.4. Types d'harmoniques aspects spécifiques des harmonique à séquence zéro :**3.4.1. Types d'harmoniques :**

Les charges non linéaires causent trois types de courants harmoniques, tous de rang impair (car la sinusoïde est une fonction « impaire »).

Harmoniques H7 - H13 - Séquence positive.

Harmoniques H5 - H11 - Séquence négative.

Harmoniques H3 - H9 -Séquence zéro.

Aspects spécifiques des harmoniques à séquence zéro (H3 et multiples)

Les courants harmoniques à séquence zéro (H3 et multiples impairs, écrit $3(2k+1)$, où k est un entier) dans les systèmes triphasés s'accumulent dans le conducteur du neutre.

Comme leur rang est un multiple du nombre de phases (3), les harmoniques coïncident avec le déphasage (un tiers de période) des courants de phase.

La **figure 3.4** illustre ce phénomène sur une période. Les courants des trois phases sont déphasés d'un tiers de période ($T/3$), c'est-à-dire que les harmoniques I_{H3} respectives I_{H3} sont en phase et que les valeurs instantanées s'ajoutent. Par conséquent :

Quand il n'y a pas d'harmoniques, le courant dans le neutre est égal à zéro :

$$I_N = I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (3.5)$$

Quand il y a des harmoniques, le courant dans le neutre est égal à :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 3H_3 I \quad (3.6)$$

Il est donc nécessaire de faire particulièrement attention à ce type d'harmoniques dans les installations ayant un neutre distribué (applications commerciales et d'infrastructure).

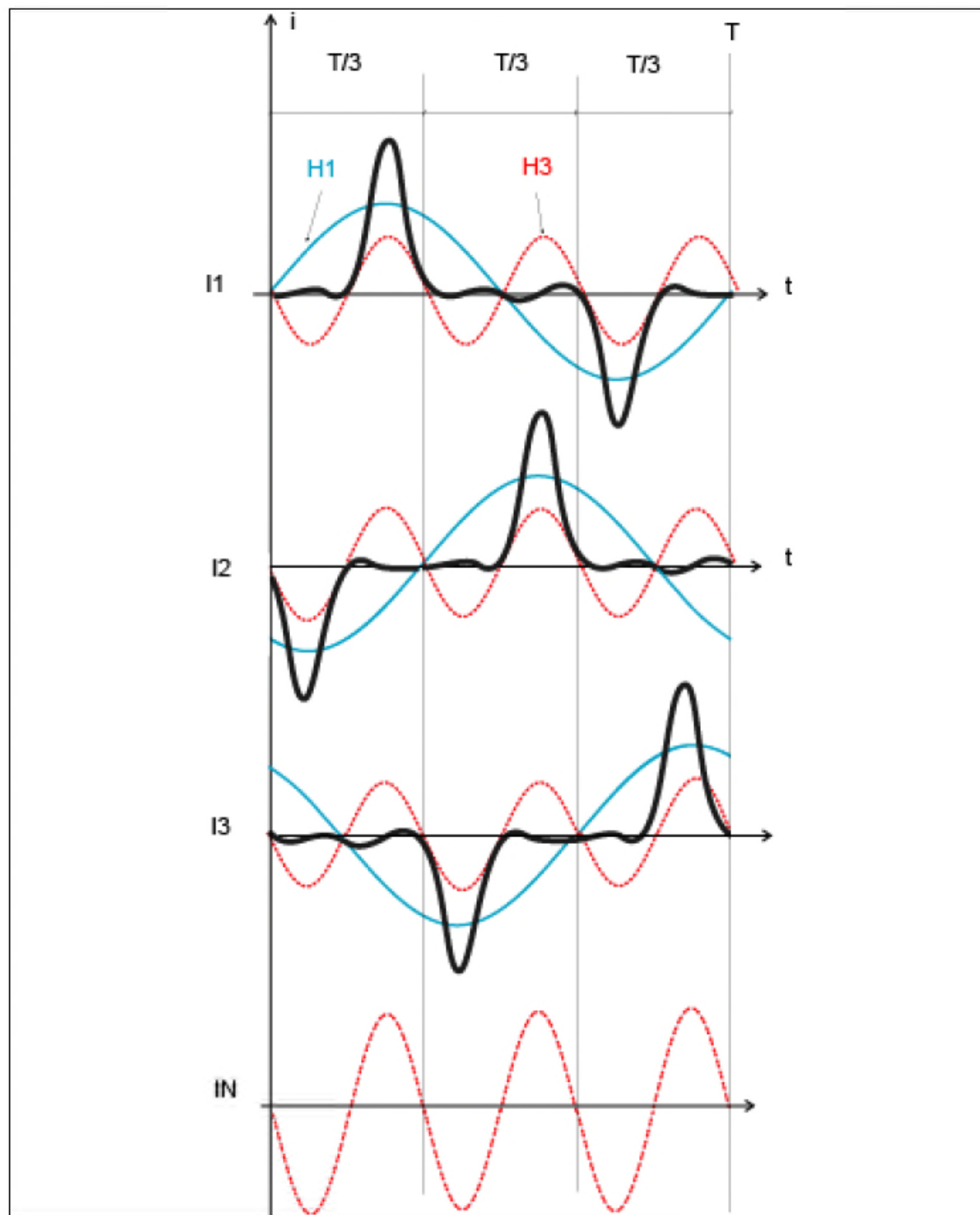


Fig. 3.4. Les harmoniques de rang 3 et leurs multiples s'additionnent dans le conducteur neutre.

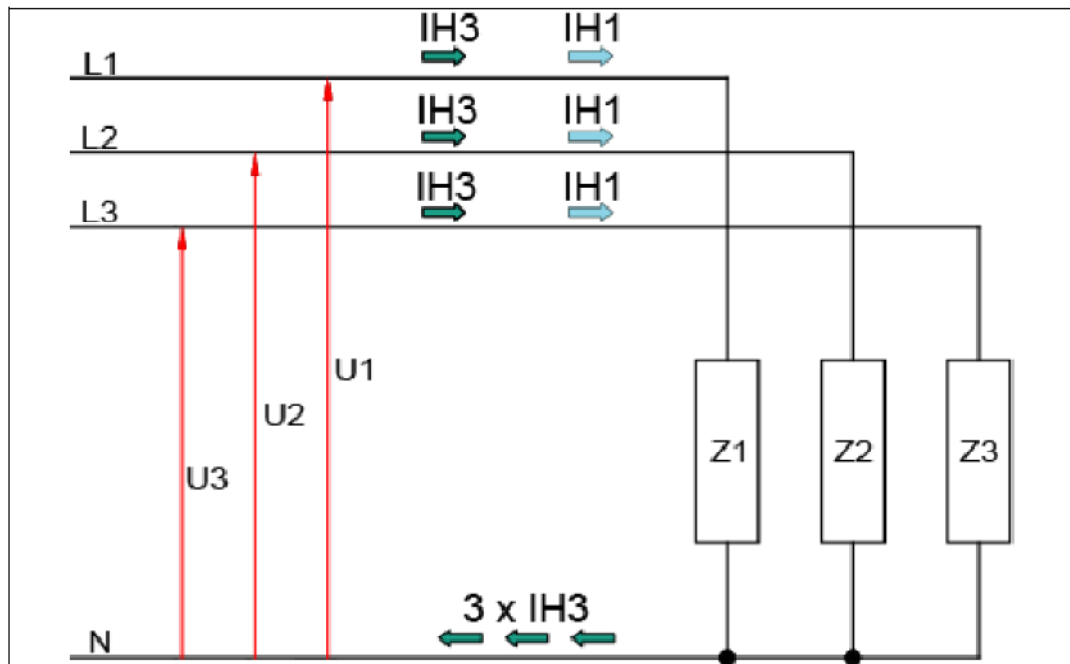


Fig. 3.5. Quand il y a des harmoniques H3 et leurs multiples impairs, le courant du conducteur neutre n'est plus égal à zéro, il est la somme des harmoniques de séquence zéro.

L'analyse harmonique d'un courant non linéaire consiste à déterminer les éléments suivants :

- le rang des harmoniques présentes dans le courant.
- l'importance relative de chaque rang.

Vous trouverez ci-dessous quelques valeurs caractéristiques d'harmoniques et des rapports à la composante fondamentale utilisés dans l'analyse des harmoniques. [24]

3.4.2. Valeur efficace des harmoniques :

Il est possible de mesurer la valeur efficace de chaque rang d'harmonique car les différents courants harmoniques sont sinusoïdaux, mais leurs fréquences sont des multiples différents de la fréquence fondamentale.

$-I_{H_1}$ est la composante fondamentale (50 ou 60 Hz).

$-I_{H_k}$ est la composante harmonique, où k est le rang d'harmonique (k fois 50 ou 60 Hz).

L'analyse harmonique est utilisée pour déterminer les valeurs.

3.4.4. Intensité efficace totale :

$$I_{eff} = \sqrt{IH_1^2 + IH_2^2 + IH_3^2 + \dots + IH_K^2 + \dots} \quad (3.7)$$

3.4.5. Harmoniques individuelles :

Chaque harmonique est exprimée sous forme d'un pourcentage, c'est-à-dire le rapport entre sa valeur efficace et celle de la composante fondamentale. Ce rapport est le niveau de l'harmonique en question [6].

$$HK\% = \text{distorsin de l'armonique } K = 100 \frac{IH_K}{IH_1} \quad (3.8)$$

3.4.6. Distorsion harmonique de la tension et du courant :

Les charges non linéaires créent des harmoniques de courant et de tension. En effet, pour chaque harmonique de courant de charge, il existe une harmonique de tension d'alimentation de même fréquence. Par conséquent, la tension subit également une distorsion par les harmoniques.

La distorsion d'une onde sinusoïdale est présentée sous forme de pourcentage :

THD*% = distorsion totale = 100

* Distorsion harmonique totale.

Les valeurs suivantes sont définies :

- **THDU%** pour la tension, fonction des harmoniques de tension.
- **THDI%** pour le courant, fonction des harmoniques de courant.

La valeur THDI (ou THDU pour la tension) est mesurée à l'aide de l'équation :

$$THDI\% = 100 \frac{\sqrt{IH_2^2 + IH_3^2 + IH_4^2 + \dots + IH_K^2 + \dots}}{IH_1} \quad (3.9)$$

3.4.7. Facteur de crête :

Le facteur de crête (F_c), utilisé pour caractériser la forme du signal (courant ou tension), est le rapport entre la valeur de crête et la valeur efficace.

$$F_c = \frac{\text{Valeur max}}{\text{Valeur efficace}} \tag{3.10}$$

Ci-dessous sont les valeurs typiques pour différentes charges :

- Charge linéaire : $F_c = \sqrt{2} = 1,414$
- Grand système : $F_c = 2$ à $2,5$
- Ordinateurs personnels : $F_c = 2$ à 3

3.4.8. Spectre de courant harmonique :

La définition du spectre d'un courant harmonique consiste à déterminer la forme d'onde du courant et les différentes harmoniques, ainsi que certaines valeurs telles que THDI et F_c .

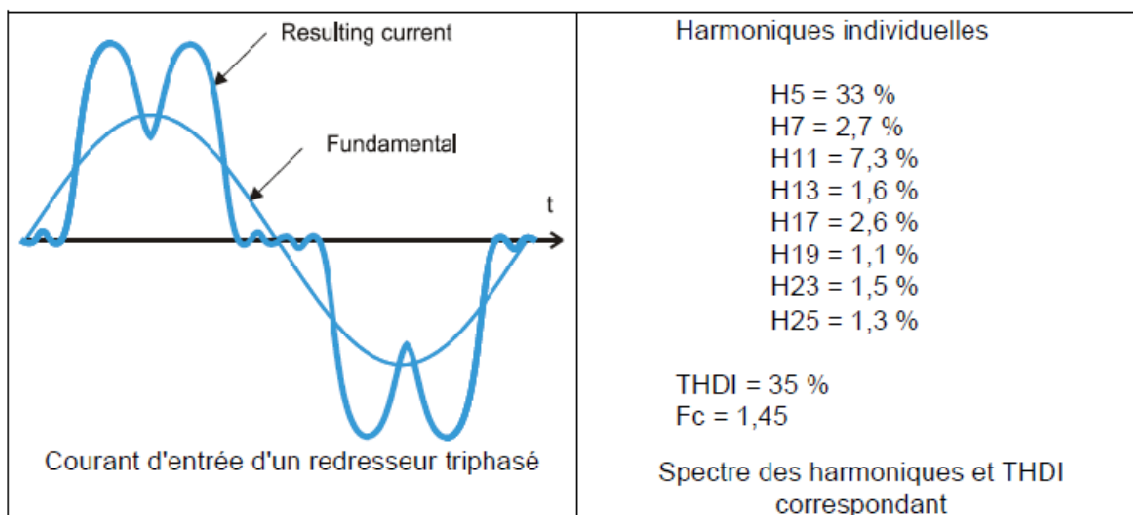


Fig. 3.6. Spectre des harmoniques du courant absorbé par une charge non linéaire

3.4.9. Facteur de puissance :

Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active (en kW) et la puissance apparente S (en kVA) entre les bornes d'une charge non linéaire.

$$\lambda = \frac{P(KW)}{S(KVA)} \quad (3.11)$$

Il n'exprime pas le déphasage entre la tension et le courant, car ils ne sont plus sinusoïdaux.

3.4.10. Déphasage entre le courant fondamental et la tension :

Le déphasage φ_1 entre le courant fondamental et la tension, tous deux sinusoïdaux,

Peut être défini comme :

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (3.12)$$

Où P_1 et S_1 sont respectivement les puissances active et apparente, correspondant à la composante fondamentale.

3.4.11. Facteur de distorsion :

$$v = \sqrt{1 - \frac{1}{1+THD^2}} = \frac{\lambda}{\cos\varphi_1} \quad (3.12)$$

(tel que défini par CEI 60146).

Lorsqu'il n'y a pas d'harmoniques, ce facteur est égal à 1 et le facteur de puissance est simplement $\cos\varphi$ [23].

3.4.12. Puissance :

3.4.12.1 Charge linéaire :

Entre les bornes d'une charge linéaire triphasée équilibrée alimentée par une tension entre phases U et un courant I , où le déphasage entre U et I est φ , les valeurs de puissance sont :

- P apparente : $S = U \times I$ (kVA) (3.13)

- P active : $P = S \times \cos\varphi$ (kW) (3.14)

- P réactive : $Q = S \times \sin\varphi$ (kvar) (3.15)

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.16)$$

3.4.12.2. Charge non linéaire :

Entre les bornes d'une charge non linéaire, l'équation définissant P est beaucoup plus complexe car U et I contiennent des harmoniques. P peut toutefois être exprimé simplement par l'équation :

$$P = S \lambda \quad (\lambda = \text{facteur de puissance}) \quad (3.17)$$

Pour les composantes fondamentales U_1 et U_2 , déphasée de φ_1

3.4.12.3. Facteur de distorsion :

Le facteur de distorsion est défini comme

$$-P \text{ fondamentale apparente :} \quad S_1 = U_1 \times I_1 \sqrt{3} \quad (\text{kVA}) \quad (3.18)$$

$$-P \text{ fondamentale active :} \quad P_1 = S_1 \times \cos \varphi_1 \quad (\text{kW}) \quad (3.19)$$

$$-P \text{ fondamentale réactive :} \quad Q_1 = S_1 \times \sin \varphi_1 \quad (\text{kvar}) \quad (3.20)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.21)$$

Où D est la puissance de distorsion, due aux harmoniques [23].

3.5. Effets des harmoniques :

Dans les dispositifs électriques, les harmoniques ne produisent pas de puissance active ou réactive, seulement des pertes par l'effet joule.

3.5.1. Perte de puissance apparente :

La **figure 3.7** montre que le produit d'une tension à la fréquence fondamentale sans harmoniques et d'un courant harmonique multiple de trois est nul à la fin d'une période. Cela reste vrai quels que soient la phase et le rang de l'harmonique.

$$\text{Cela est exprimé par la relation :} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.22)$$

Une partie de la puissance apparente est consommée par les harmoniques, sans effet.

Dans les machines rotatives, le couple du moteur obtenu est égal à zéro, et seul un couple parasite pulsatoire existe, créant des vibrations.

La seule puissance active présente pendant une chute de tension est la chaleur produite par le courant harmonique (I_{H_k}) dans un conducteur de résistance r ($rI_{H_k}^2$).

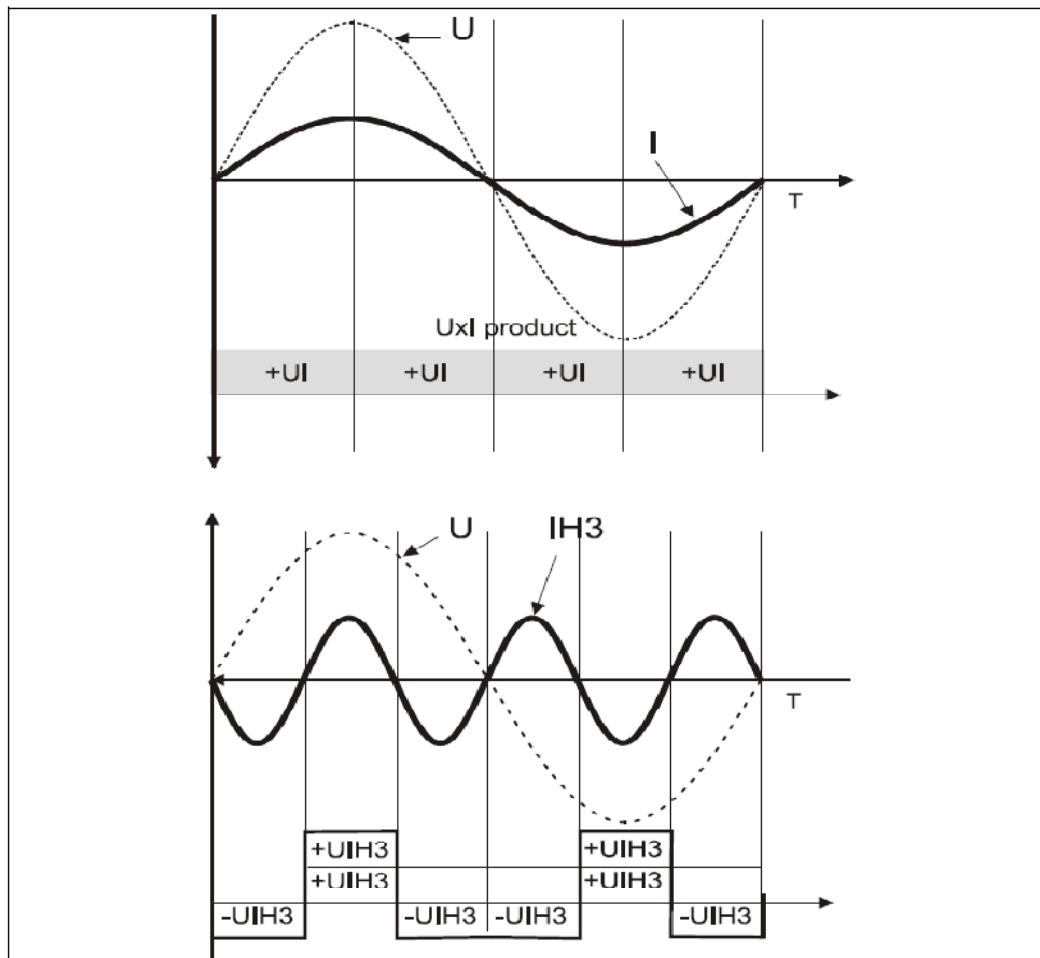


Fig. 3.7. Produit de $U \times I$ pour les composantes fondamentales (haut) et pour les fondamentales avec harmoniques (bas).

3.5.2. Échauffement des câbles :

L'échauffement des câbles est exprimé par l'équation :

$$Pertes = r \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \tag{3.23}$$

L'échauffement dû aux courants harmoniques s'ajoute à l'échauffement causé par le courant fondamental.

3.5.3. Courant dans le neutre :

Les harmoniques de rang 3 et leurs multiples s'additionnent dans le conducteur neutre (**voir fig. 3.8**). Le courant dans le neutre peut atteindre 1,7 fois celui des phases.

3.5.4. Conséquences :

Pertes considérables dans le neutre $rI_{neutre}^2 = \text{échauffement du neutre}$.

Le neutre doit être surdimensionné pour prendre en compte les harmoniques de troisième rang et leurs multiples.

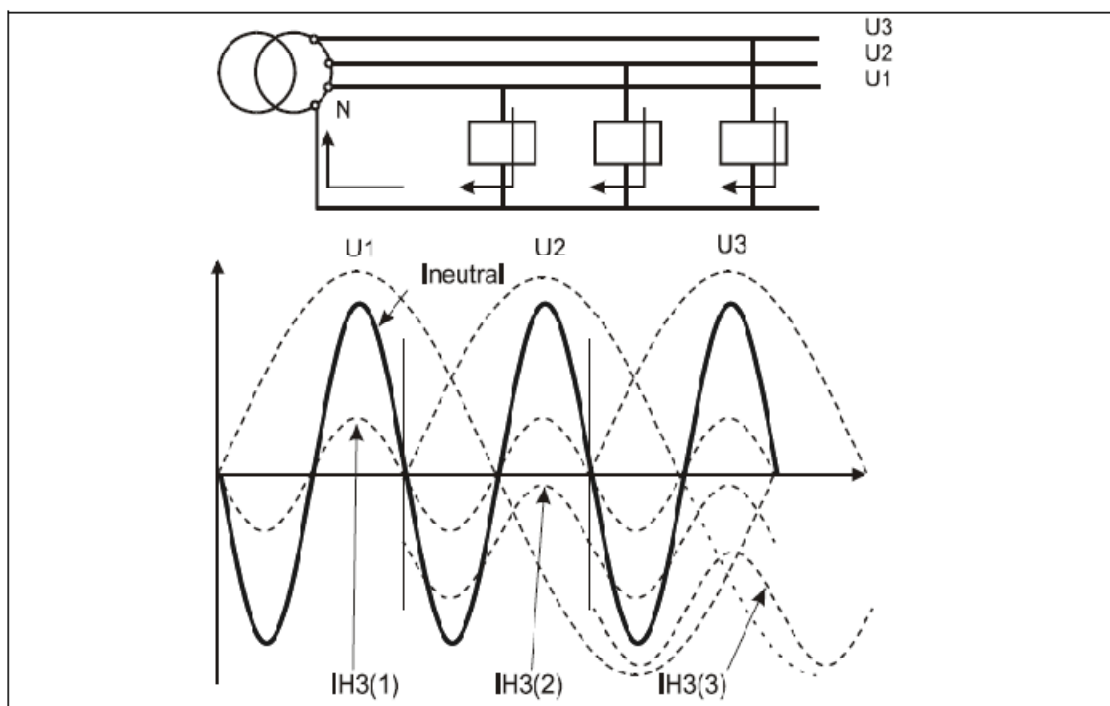


Fig. 3.8. Les harmoniques de rang 3 et leurs multiples s'additionnent dans le conducteur neutre.

3.6. Effets des harmoniques :

3.6.1. Risque de perturbation des générateurs :

Similaires aux transformateurs, les générateurs subissent des pertes plus importantes en raison de l'hystérésis et des courants de Foucault.

La réactance subtransitoire X'' d augmente en fonction de la fréquence.

-Le champ rotatif « **harmonique** » balaye le rotor à une fréquence différente de celle du synchronisme (50 ou 60 Hz).

- En pratique, le THDI du courant dans le générateur ne doit pas dépasser 20 %. Pour toute valeur supérieure, le déclassement est nécessaire [6].

3.6.1.1. Conséquences :

Création d'un couple parasite causant un rendement moindre de la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique ;

pertes supplémentaires dans les bobines d'inductance et dans l'amortisseur du rotor ;

présence de vibrations et de bruits anormaux.

3.6.2. Déperditions dans les moteurs asynchrones :

Les harmoniques produisent les effets suivants dans les moteurs asynchrones :

- augmentations des pertes par effet Joule et des pertes fer (pertes au stator) couple pulsatoire (pertes au rotor avec une chute du rendement mécanique).
- Le THDU doit être inférieur à 10 % pour limiter ces phénomènes

3.6.3. Effets sur les systèmes d'ASI récents :

Les ASI modernes ont des fréquences de hachage très élevées et une impédance en sortie très faible (similaire à celle d'un transformateur cinq fois plus puissant).

Lorsqu'elles sont confrontées à des charges non linéaires, ces ASI proposent :

des pertes limitées ;

- un fonctionnement avec limitation du courant.
- une distorsion très faible de la tension (THDU < 3 %).

Les ASI sont un excellent moyen pour alimenter les charges non linéaires.

3.6.4. Effets sur d'autres équipements :

Les harmoniques peuvent également perturber le fonctionnement des équipements suivants :

Déclencheurs sans valeur efficace, ce qui cause des déclenchements intempestifs des disjoncteurs

- Centres téléphoniques automatiques.
- Alarmes.
- Équipement électronique sensible.
- Systèmes télécommandés [26].

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré sur les pollutions harmoniques qui peuvent avoir des effets dommageables sur les installations électriques et la qualité de leur fonctionnement.

C'est pourquoi les normes internationales définissent des niveaux de compatibilité avec les harmoniques de plus en plus précis pour les équipements et établissent des limites sur la quantité d'harmoniques sur les réseaux d'alimentation publics.

Dans le chapitre suivant présentation des différentes stratégies d'amélioration de la qualité d'énergie électrique.

Chapitre 4

Amélioration de la QEE

4. Introduction :

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie [26].

Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter, l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau [18].

4.1. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique :**4.1.1. Les Creux de Tension :**

Pour les creux de courte durée, peu profondes, ils peuvent être atténués par l'amélioration des caractéristiques de la tolérance d'équipements, pour les creux de longue durée ils peuvent être évités par le changement et/ou le fonctionnement de la structure de système d'alimentation. [26]

Une autre solution consiste à étendre un convertisseur électronique de puissance, utilisé pour connecter un système de grille de production décentralisée, avec un compensateur série.

Le compensateur série est capable de restaurer la tension au niveau du côté de la charge en cas de chute de tension [27].

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.

1- types d'ASI "on-line" au début, dans les années 70, la terminologie d'ASI "on-line" a été couramment utilisée. Elle se réfère à une topologie comportant principalement (figure 4.1) :

- un redresseur-chargeur en entrée qui prélève et redresse l'énergie du réseau pour charger ou maintenir une batterie et alimenter un onduleur,
- une batterie qui assure une autonomie de fonctionnement en cas de coupure du réseau,
- un onduleur qui fournit une énergie de qualité constante élevée (fréquence, tension... dans des tolérances strictes)
- généralement un contacteur statique (bypass statique) qui peut transférer sans coupure la charge sur le réseau si nécessaire, pour permettre un fonctionnement "dégradé" (sans onduleur) de la charge.

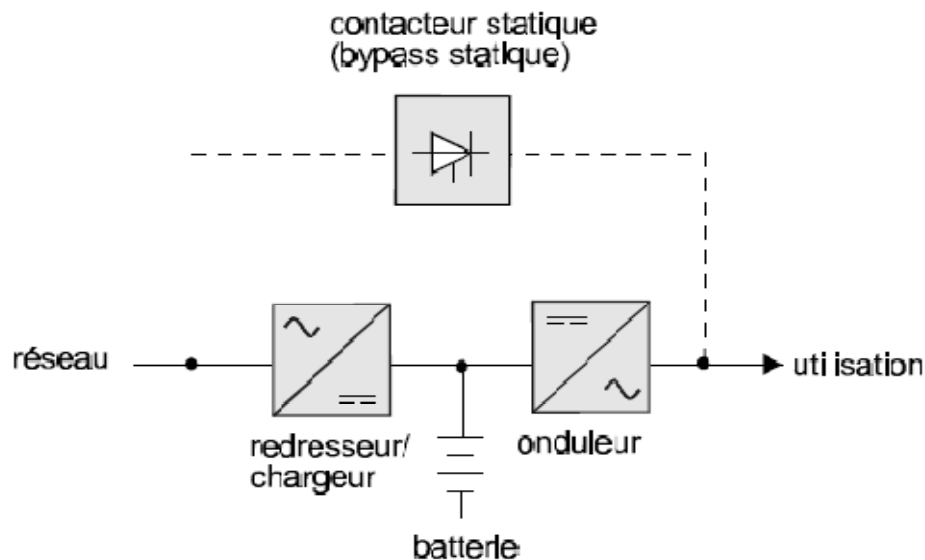


Figure4.1. Schéma de principe d'une ASI dite "on-line".

Les normalisateurs ont constaté que l'appellation "on-line", qui signifie littéralement "sur le réseau", n'était pas satisfaisante en regard de cette topologie. En effet la charge est alimentée par l'onduleur et non pas directement par le réseau. Néanmoins cette dénomination a été assez rapidement assimilée à des ASI dont la charge est alimentée en permanence par un onduleur en série avec le réseau. Elle concernait surtout les ASI de fortes puissances (≥ 10 kVA).

2- Type off-line (VD)

En présence de réseau d'alimentation, la sortie est exactement égale à l'entrée.

L'onduleur intervient seulement quand il manque du courant à l'entrée en alimentant la charge avec l'onduleur, lui-même alimenté par les batteries.

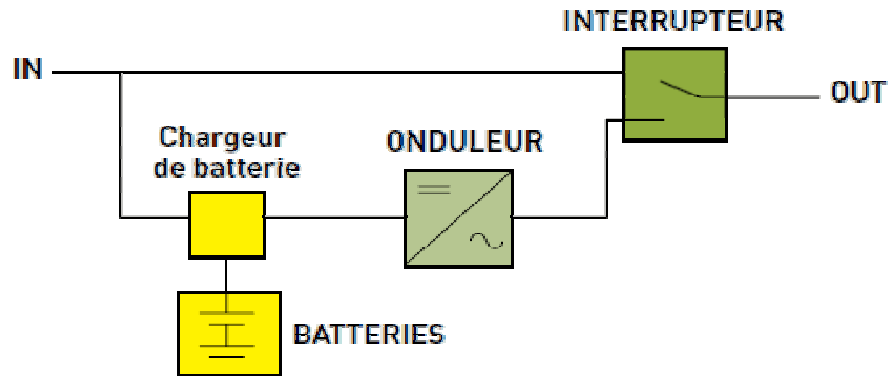


Figure4.2.Schéma de principe d'une ASI dite "off-line".

3- Type Interactive (VI)

En présence de réseau d'alimentation, entrée et sortie sont séparées par un circuit de filtrage et une stabilisation (AVR : Automatic Voltage Regulator) mais une partie des perturbations ou variations de forme d'onde, possibles en entrée, peuvent se retrouver en sortie.

Comme dans l'Off line, au moment du manque de réseau, la sortie est branchée à l'inverseur, lui-même alimenté par les batteries

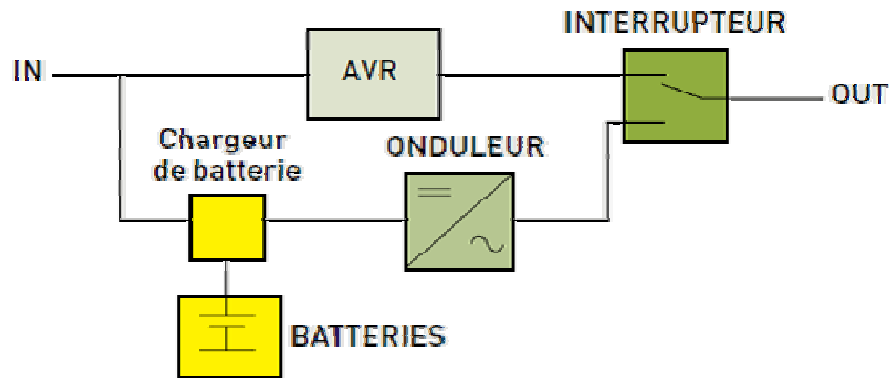


Figure4.3.Schéma de principe d'une ASI dite Interactive

4- Type on-line double conversion (VFI)

Le signal d'entrée est d'abord redressé en courant continu, puis reconverti en courant alternatif par l'intermédiaire d'un pont onduleur. Ainsi, la forme d'onde du courant de sortie est totalement indépendante de l'entrée. Toutes les perturbations potentielles du réseau sont

éliminées. Il n'y a pas de phénomène transitoire ou d'interruption d'alimentation de la charge lors du passage sur batterie car la sortie est toujours alimentée par le pont onduleur.

En cas de surcharges et d'éventuels problèmes internes, ce type ASI d'ASI dispose d'un Bypass automatique qui garantit l'alimentation de la charge en la commutant directement sur le réseau.

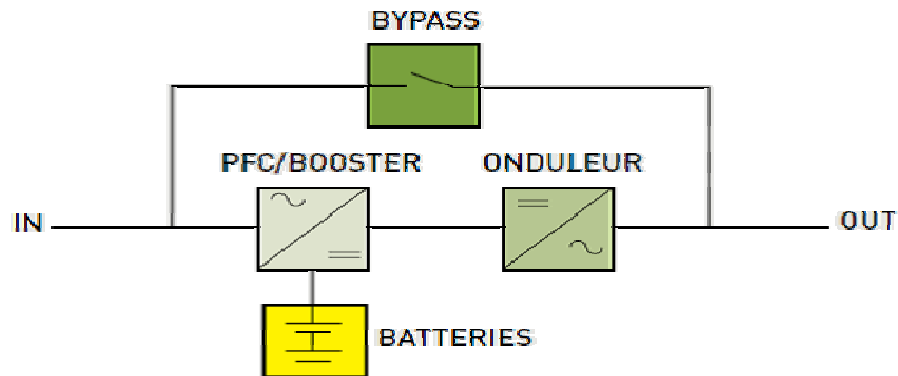
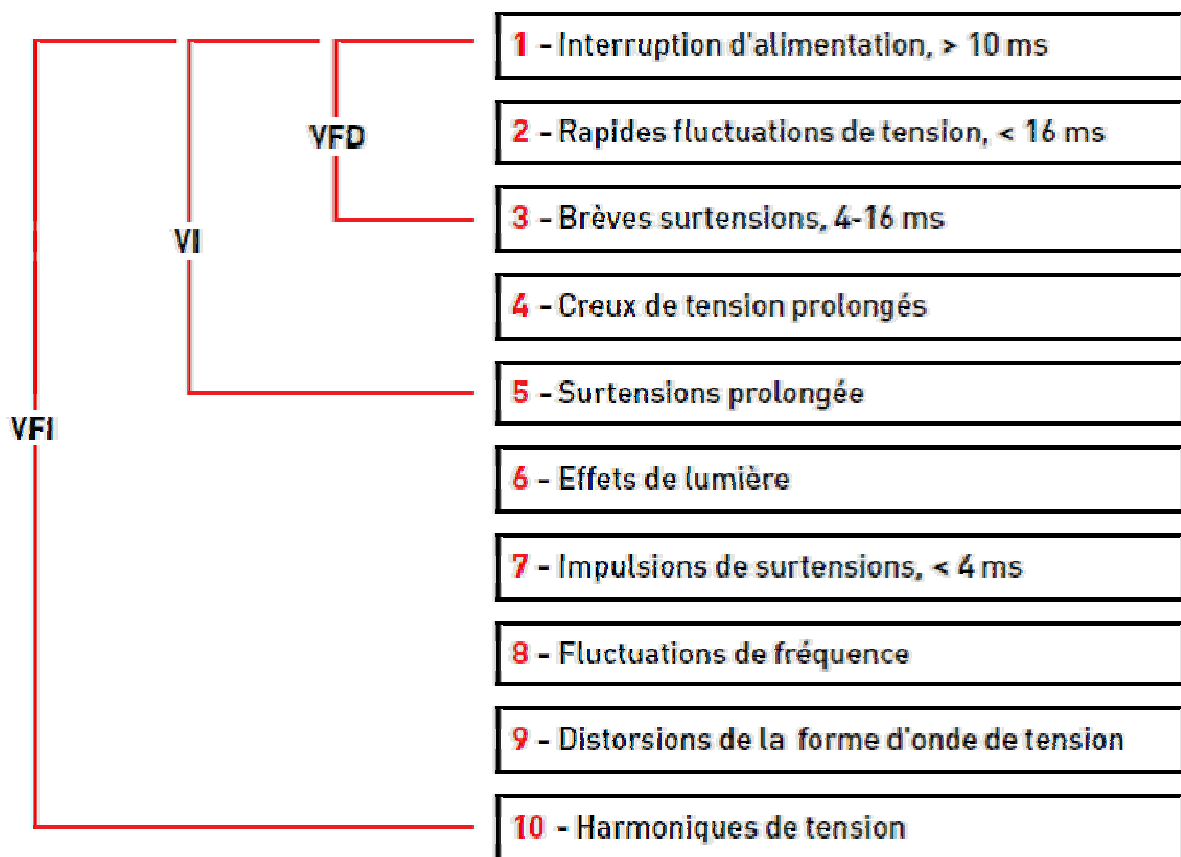


Figure : 4.4. Schéma de principe d'une ASI on-line double conversion (VFI)

Caractéristiques et classifications des onduleurs



4.1.2 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.

4.1.3. 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 ferrorésonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène.

4.1.4. 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

4.1.5. 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.

4.2. Déséquilibre du Système Triphasé :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties [18], le système de distribution électrique peut être équilibré en changeant la configuration du système par des opérations manuelles et automatiques de commutation d'alimentation pour transférer des charges entre les circuits [28].

- 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.
- Augmentation de la puissance de court-circuit,
- Dispositif de rééquilibrage,
- Modification de l'architecture du réseau.
- Compensation de la puissance réactive.

4.2.1. Fluctuations de la Tension (Flicker) :

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 le 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 des 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.

Eloigner « 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.

4.2.2. Dépollution des Harmoniques :

Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Ils travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier [29]. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques [30]. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués: les solutions traditionnelles et les solutions modernes [31].

4.3. Solutions traditionnelles :**a) Action sur la structure de l'installation :**

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible.

Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle.

Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [22].

b) Augmentation de la puissance de court-circuit :

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance [30].

La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement.

En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués [30].

c) Placement d'une inductance de ligne :

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs [33]. Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [34].

d) Rééquilibrage des courants du réseau électrique :

Répartition égale des charges sur les trois phases.

Compensateur passif, par exemple montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de 50HZ avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique [35].

e) Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique :

L'utilisateur ne souhaite pas résoudre les problèmes de pollution mais seulement le souci de la bonne santé de ses équipements. Cette approche, économiquement très contraignante ne s'applique que pour des nouvelles installations [33]. On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur [32].

f) Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance.

Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau, à

proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale [35].

4.3.1. Les filtres passifs :

4.3.1.1 Classification des filtres passifs :

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique [36].

Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classer les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau.

Cela permet de définir deux grands modes de filtres passifs: les filtres séries utilisés pour les charges génératrices de tensions harmoniques et les filtres parallèles utilisés dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques et suivant le modèle choisi,

les harmoniques peuvent être : précisément bloqués par une grande impédance série entre le convertisseur, déviés par une faible impédance en parallèle ou une combinaison des deux.

4.3.1.2. Filtre passif série :

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (**Figure 1.5**), dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non linéaire. Depuis le filtre passif série est accordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. Selon la propriété physique de L et C choisie, il existe généralement une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée [37].

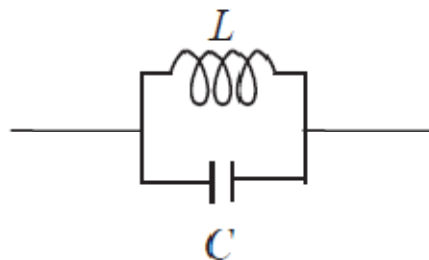


Figure 4.5. Filtre passif série

4.3.1.3 Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la **Figure 4.6**. Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau.

Le filtre passif parallèle a un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance [38].

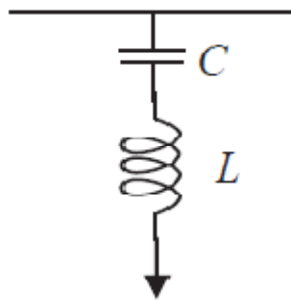


Figure 4.6. Filtre passif parallèle

En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs parallèles : le filtre passif amorti et le filtre passif résonant.

4.3.1.4. Filtre passif amorti :

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées.

Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performants [40].

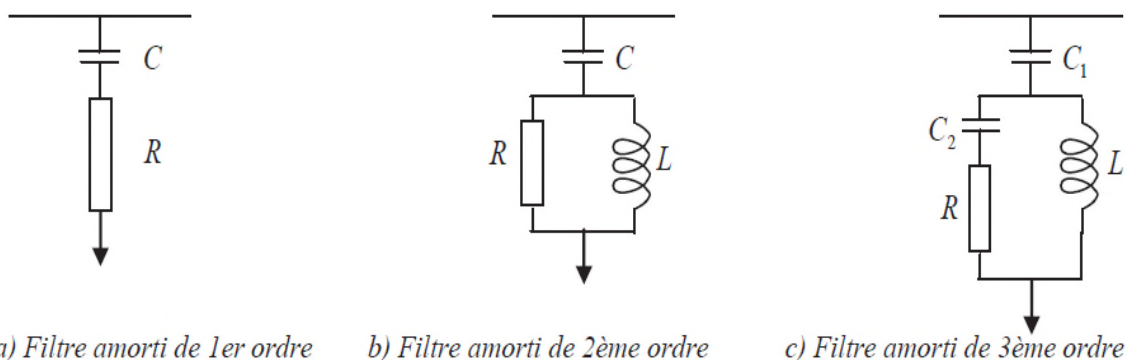


Figure 4.7. Filtre amorti

4.3.1.5. Filtre résonant :

Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer.

Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [41].

Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres ou chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer voir la (figure 4.8)

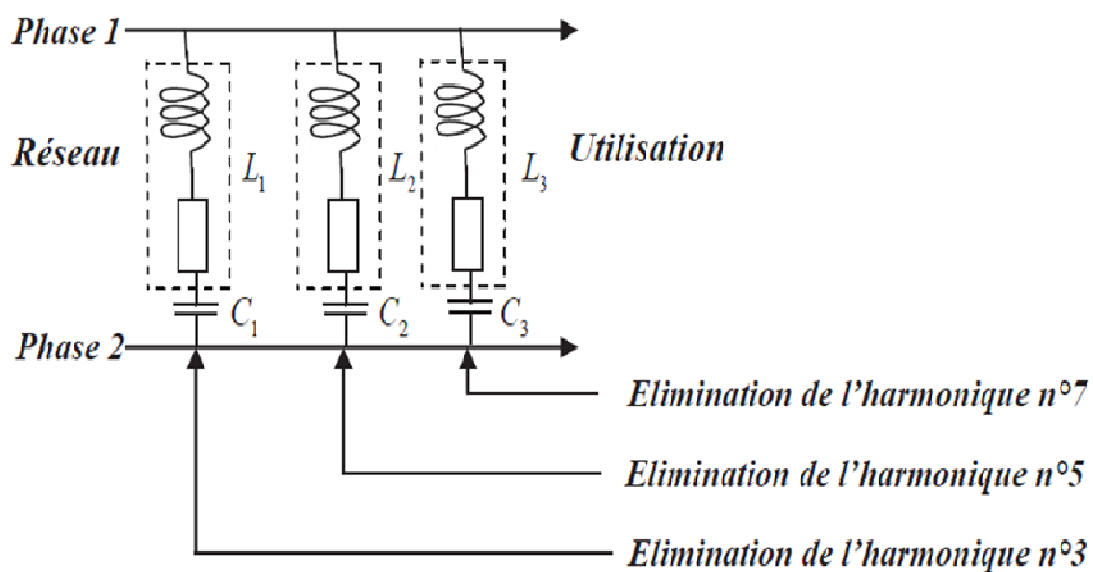


Figure 4.8. Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques

4.3.1.6. Les avantages et les inconvénients des filtres passifs :

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance.

Cependant Il présente les inconvénients suivants:

- L'impédance du réseau en présence des filtres passif peut faire apparaître des résonances.
- Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut

avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.

- La conception des filtres passifs doit considérer la tolérance de fabrication et les dérives paramétriques qui apparaissent à l'usage.

Ainsi, avant d'installer un filtre de ce type, une étude détaillée doit être menée afin d'analyser, cas par cas, les risques de résonance et de surcharge [40].

4.4. Solutions modernes :

4.4.1. Redresseur dodécphasé :

Leur principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles (ou deux transformateurs dont les couplages entre les primaires et les secondaires doivent être couplés différemment (Y/Y et Y/D ou D/D et D/Y).

Chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Grêtz. On obtient ainsi un redresseur dit dodécphasé (pont ayant douze bras) dont les redresseurs sont montés en série (Figure 4.5).

Cette solution permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes). Elle nécessite un transformateur à deux secondaires, l'un en étoile et l'autre en triangle ce qui permet de ne générer que les harmoniques de rang $12k \pm 1$.

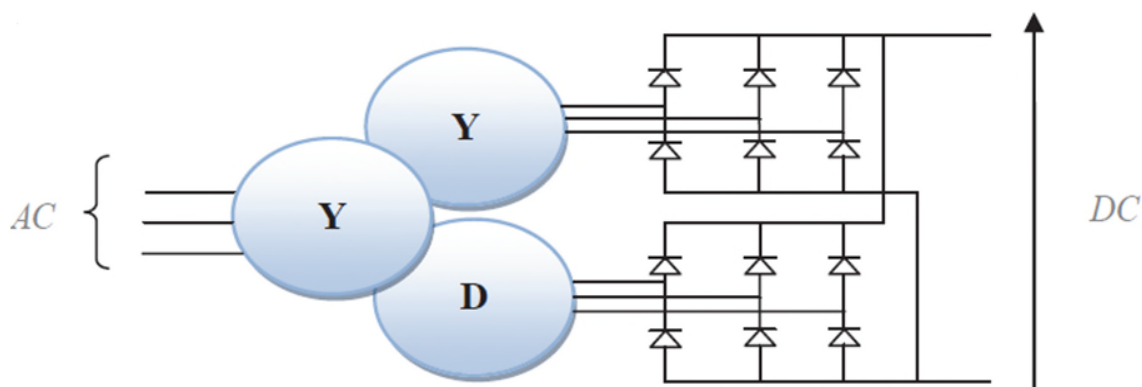


Figure 4.9. Pont dodécphasé

4.4.2. Les filtres actifs :

Traditionnellement, un filtre passif est utilisé pour éliminer les harmoniques, cependant cet équipement de compensation comporte certains inconvénients, pour cela les filtres actifs ont été proposés pour bien améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Une des applications principales de filtres actifs est l'élimination ou la réduction des harmoniques de courant et de tension [42].

Le principe du filtrage actif est de compenser les harmoniques présents sur les réseaux électriques en injectant des harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase [49]. La (Figure 4.10) Présente les composants d'un système typique du filtre actif et de leurs connexions. L'information concernant les courants harmoniques et d'autres variables de système sont transmises à la compensation de (courant/tension) estimateur de signal de référence.

Le signal de référence de compensation de l'estimateur conduit le contrôleur du système dans son ensemble et fournit la commande du générateur de signal de déclenchement. La sortie du générateur de signal de déclenchement commande le circuit d'alimentation par l'intermédiaire d'une interface appropriée.

Enfin, le circuit d'alimentation dans le diagramme généralisé peut être connecté en configuration parallèle, série ou parallèle –série « filtre actif universelle (UPQC) ».

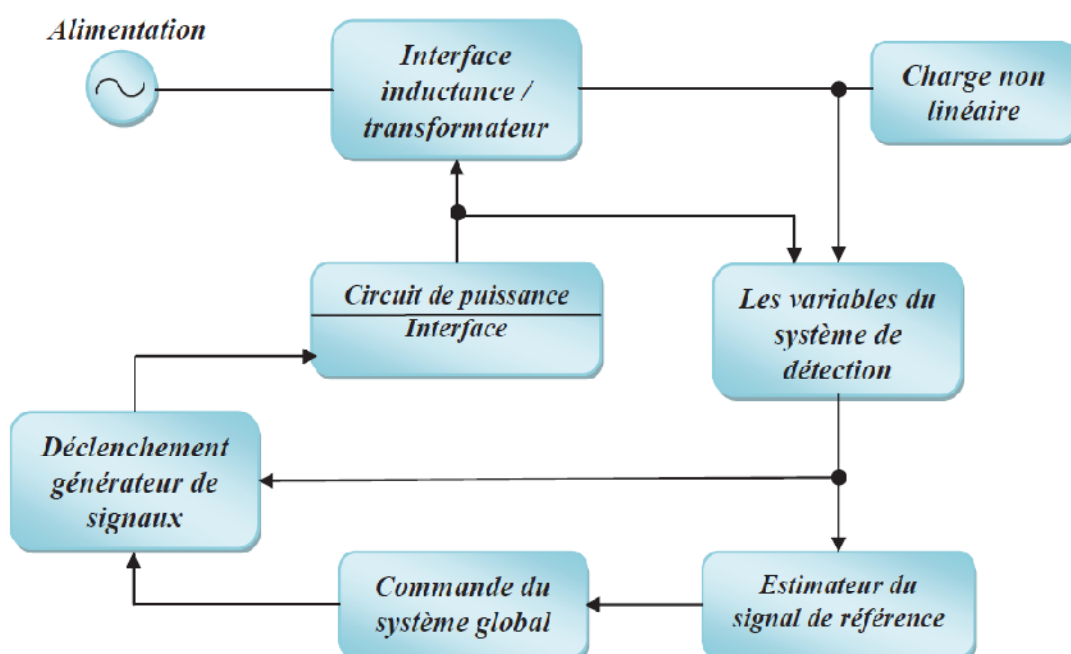


Figure 4.10. Schéma généralisé pour le filtre actif

4.4.3. Classification des filtres actifs :

Dans la littérature il existe une grande variété de types de filtres actifs. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases «monophasés ou triphasés», la technologie de l'onduleur «avec ou sans neutre raccordé», et la topologie «l'onduleur de tension ou de courant».

4.4.4. Filtre actif parallèle :

Les filtres actifs parallèles sont les plus utilisés et les plus traités dans les travaux de recherches depuis plus de 30 ans.

Le système qui est montré dans la (figure 4.11), comprend en balance sources d'alimentation de trois phases de tension, un redresseur triphasé à pont de diodes « charge non linéaire » et charge d'inductance l_c et de résistance R_c .

Le filtre actif parallèle est connecté à la ligne triphasée à travers l'inductance L .

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle [35]. Ceci est réalisé par l'élaboration de la forme d'onde de compensation de courant (i_c), en utilisant les commutateurs de l'onduleur. La forme du courant de compensation est obtenue par la mesure du courant de charge (i_l) et en la soustrayant la référence sinusoïdale. Le but de filtre actif parallèle est d'obtenir une source de courant sinusoïdale (i_s). [37]

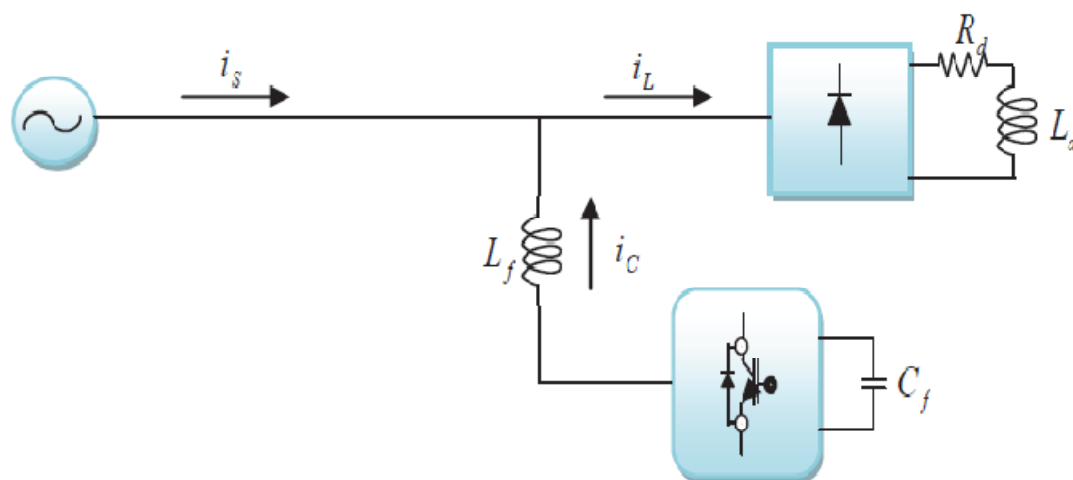


Figure 4.11. Principe de configuration de filtre actif parallèle

4.4.4. Filtre actif série :

Le filtre actif série est connecté en série avec l'alimentation par l'intermédiaire d'un transformateur d'adaptation, de sorte qu'il est applicable à la compensation des harmoniques d'un redresseur à diodes de grande capacité avec un condensateur de liaison à courant continu.

L'approche est basée sur le principe d'isolement harmonique en contrôlant la tension de sortie du filtre actif série. Ceci est obtenu par l'injection de tensions harmoniques (v_c) à travers le transformateur d'interface.

Les tensions injectées harmoniques sont ajoutées / soustraites, à/de la tension de source afin de maintenir une forme d'onde de tension sinusoïdale pure à travers la charge non linéaire. Il est commandé de telle sorte qu'il présente une impédance nulle pour la composante fondamentale, mais apparaît comme une résistance à haute impédance pour les fréquences de composante harmoniques [37].

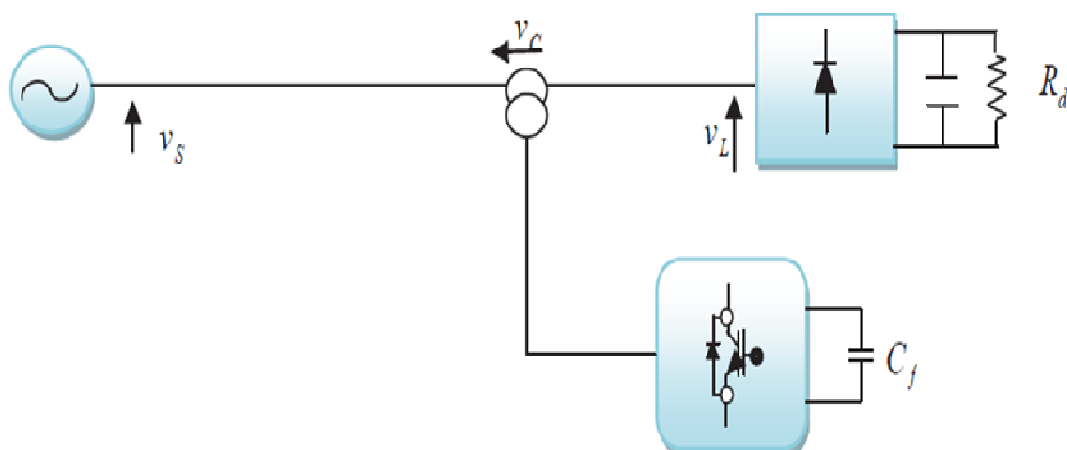


Figure 4.12. Principe de configuration de filtre actif série

4.4.5. Filtre actif universelle (UPQC) :

La figure (4.10) montre la combinaison parallèle série, elle est appelée UPQC (Unified Power Quality Conditioner), elle résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série.

Le but principal du filtre actif série est d'isoler les harmoniques entre un système de sous-transmission et un système de distribution. En outre, le filtre actif série a la capacité de compenser le déséquilibre de tension, ainsi que la régulation de tension et la compensation des harmoniques.

Le but principal du filtre actif parallèle est d'absorber les harmoniques de courant, pour compenser la puissance réactive et le courant inverse, et de régler la tension continue intermédiaire entre les deux filtres actifs [42].

Le filtre actif universel présente de bonnes performances, cependant son coût est élevé et sa commande est complexe. Du fait qu'il y a beaucoup de semi-conducteurs impliqués [39].

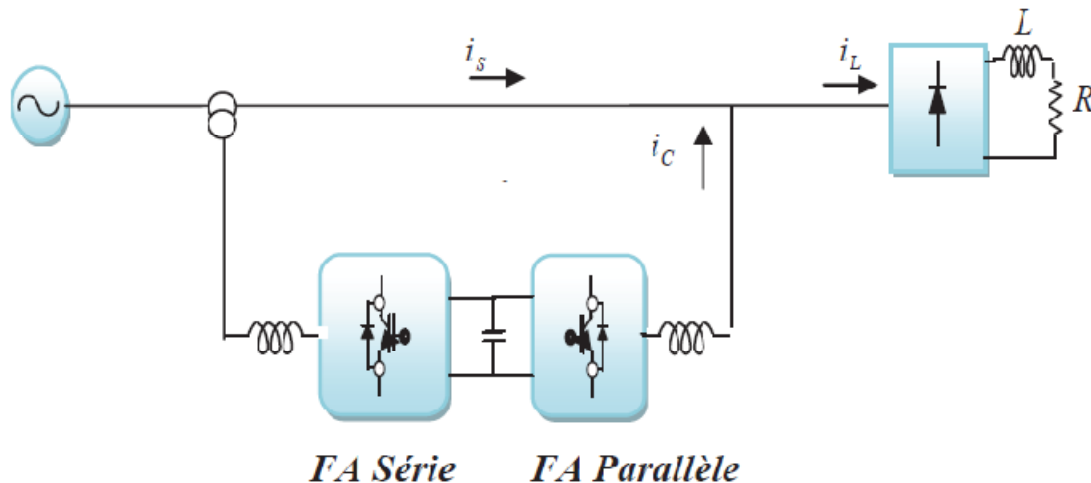


Figure 4.13. Principe de configuration de filtre actif universel «UPQC»

4.4.6. Les avantages et les inconvénients du filtre actif:

Le filtre actif offre de nombreux avantages : [41]

- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante);
 - Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
 - Il est insensible à la variation des caractéristiques du réseau.
 - Il n'y a aucun risque de surcharge lorsque le niveau de pollution harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif, puisque il fonctionne au maximum de ses capacités et tout risque de destruction est écarté;
 - La compensation de la puissance réactive est envisageable.
- Le risque de résonance (amplification des harmoniques) entre filtre et impédance du réseau, qui existe avec un filtre passif est supprimé.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients :

- Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.
- Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif.
- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtre passif.

4.5. Filtre hybride :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas on connectera en parallèle ou en série des filtres passifs pour compenser les harmoniques prépondérants.

Ainsi, les filtres passifs éliminent les harmoniques en basses fréquences, ce qui permet de réduire le dimensionnement du filtre actifs qui ne compense que le reste des perturbations. En conséquence, le filtre hybride est plus petit que pour un filtre actif et la réponse est bien meilleure qu'avec des filtres passifs seuls.

Cette structure permet d'améliorer les caractéristiques de compensation des filtres passifs et de réaliser ainsi une réduction de la valeur nominale du filtre actif [42].

Souvent le filtre passif est formé par deux filtres réglés aux fréquences des harmoniques 5 et 7 et un filtre passe haut réglé autour de la fréquence de l'harmonique 11.

Ainsi dans ce cas, le filtre actif permet d'éviter des résonances entre les éléments passifs et le réseau.

4.5.1. Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle :

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous les deux sont également en parallèle avec la charge.

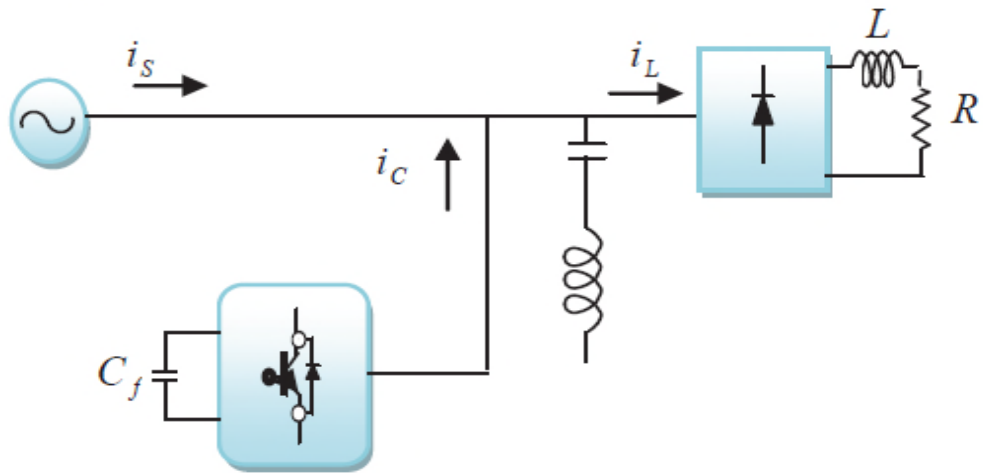


Figure 4.14. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle

Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques de basses fréquences émis par la charge polluante, alors que le filtre passif accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques de hautes fréquences [21].

4.5.2. Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif série :

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme il est présenté dans la **figure 4.12**.

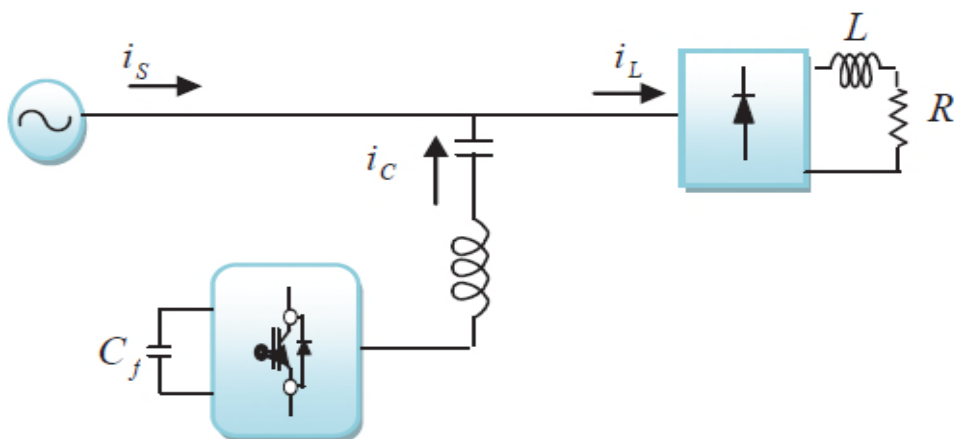


Figure 4.15. Filtre actif parallèle avec filtre passif série

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale.

Ce système présente deux avantages :

le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court circuit de la charge.

4.5.3. Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle :

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.

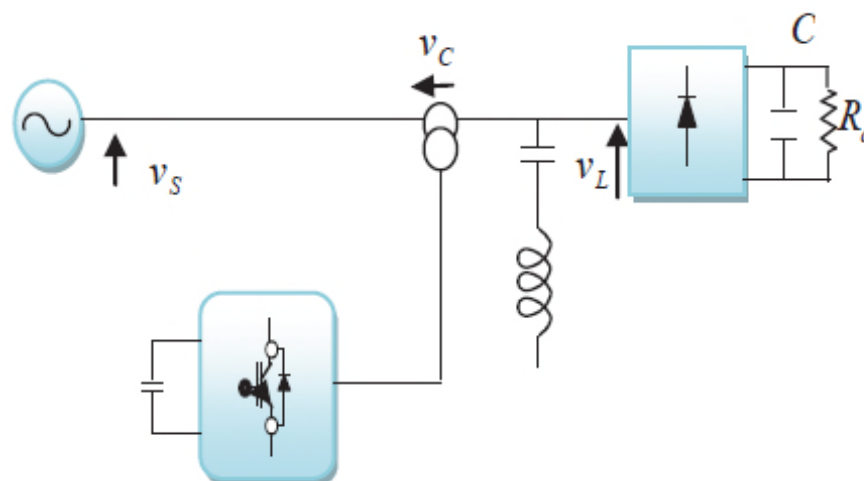


Figure 4.16. Filtre actif série avec filtre passif parallèle

4.5.4. Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle :

Le principe de fonctionnement de cette configuration est le même que le précédent. Il à l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est faible, de plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court circuit de la charge [41].

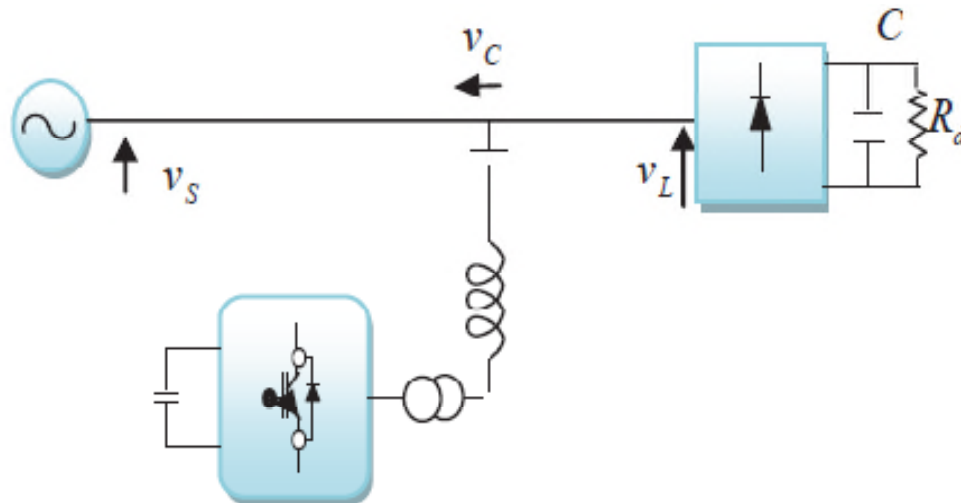


Figure 1.17: Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle

4.6.État de l'art de la qualité d'énergie électrique :

La technologie de filtrage actif est désormais mature pour fournir une compensation des harmoniques et de la puissance réactive, dans les réseaux à courant alternatif, elle a évolué dans le dernier quart du vingtième siècle et le début de ce siècle, avec différentes configurations et stratégies de contrôle. Les filtres actifs sont également utilisés pour éliminer les harmoniques de tension, réguler la tension du secondaire, supprimer le flicker de tension améliorer l'équilibre de tension dans les systèmes triphasés.

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré sur l'amélioration de l'efficacité énergétique d'une installation passe par la mise en place d'une solution de mesure performante et adaptée. Les paramètres électriques mesurés en temps réel (énergies, facteurs de qualité, etc.), tout au long des différentes phases de fonctionnement, sont utilisés pour analyser le fonctionnement de l'installation afin d'identifier précisément les sources d'économie et d'optimisation possibles.

L'amélioration de l'efficacité énergétique se décompose selon trois axes principaux :

- diminution des coûts de l'énergie électrique
- augmentation de la qualité de l'énergie
- amélioration de la disponibilité de l'énergie.

Conclusion générale

A partir du travail élaboré dans ce mémoire, nous pouvons conclure que la qualité de l'énergie électrique ne dépend pas uniquement du distributeur public. Les perturbations peuvent prendre naissance dans l'installation de l'utilisateur voisin comme dans celle de l'utilisateur perturbé.

Les phénomènes observés sont nombreux : creux de tension et coupures, fluctuations rapides et lentes de l'amplitude du fondamentale de la tension (Flicker), variations de la fréquence fondamentale, déséquilibre, harmoniques.....ect.

Les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité car des solutions existent. A chaque type de perturbation, correspond une solution appropriée ;

Les critères de la qualité de l'énergie sont liés directement à l'observation et à la caractérisation des perturbations sur les réseaux électriques. Les techniques et les méthodes permettant de réaliser leur analyse et/ou leur modélisation sont exposées. Une attention particulière est portée aux perturbations les plus gênantes et les plus communément rencontrées, c'est-à-dire les creux de tension, les coupures brèves, les variations de tension et les harmoniques.

Les harmoniques peuvent avoir des effets dommageables sur les installations électriques et la qualité de leur fonctionnement.

C'est pourquoi les normes internationales définissent des niveaux de compatibilité avec les harmoniques de plus en plus précis pour les équipements et établissent des limites sur la quantité d'harmoniques sur les réseaux d'alimentation publics.

L'amélioration de l'efficacité énergétique d'une installation passe par la mise en place d'une solution de mesure performante et adaptée. Les paramètres électriques mesurés en temps réel (énergies, facteurs de qualité, etc.), tout au long des différentes phases de fonctionnement, sont utilisés pour analyser le fonctionnement de l'installation afin d'identifier précisément les sources d'économie et d'optimisation possibles.

L'amélioration de l'efficacité énergétique se décompose selon trois axes principaux :

- ✓ diminution des coûts de l'énergie électrique
- ✓ augmentation de la qualité de l'énergie
- ✓ amélioration de la disponibilité de l'énergie.

Comme perspective, il est envisageable d'analyser par simulation les différentes perturbations sur un réseau électrique avec les techniques proposées.

Bibliographie

- [1]. **G. Benysek** « Improvement in the quality of delivery electrical energy using power Electronics systems»,springer-verlag london limited 2007. <https://www.springer.com/us/book/9781846286483> (Le 04/02/2016 à 16h: 00).
- [2]. **J. Driesen** «IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE, pp.1625-1630, Vol.2, 2002». https://www.academia.edu/1148078/Total_Harmonic_Distortion (Le 04/02/2016 à 18h: 00).
- [3]. **I. El Baaklini** « Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels », Thèse doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2001.
- [4]. **Alain ROBERT**, (Cours ELEC 2595) Troisième Partie (2006) <http://www.iufmrese.cict.fr/liste/Doctidie/2595yIIIyHarmy2006-07.pdf> (Le 10/02/2016 à 18h: 00).
- [5]. **Jean-Louis**,8/12 2010 Séminaire qualité de l'électricité dan le marche libéralise <https://www.worldcat.org/title/improvement-in-the-quality-of-delivery-of-electrical-energy>
- [6]. **Cahier technique n° 199** ; Code <http://www.schneider-electric.com> édition octob2001
- [7].**HAL Id**; <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00170713> Submitted on 1/11/09
- [8].**Thème M. Hamadou Zakaria** ; Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique Juin 2012(Université de setif) <http://www.univ-setif.dz/MAGISTER/images/facultes/TEC/2012/hamadouzakaria.pdf>
- [9]. **P. KUNDUR**, Power System Stability and Control. New York, : McGraw Hill Inc, 19949 <https://scholar.google.com> (Le 15/02/2016 à 19h: 00).
- [10]. **V. VITTAL**, Proceeding of IEEE, Vol.88, N°.2, Issue: 2 pp: 196-207, Febr 2000. <https://duckduckgo.com/?q=A.+GRIFFO%2C+'Novel+Facts+Controllers+for+Power+System>
- [11]. **.A. GRIFFO**, ''Novel Facts Controllers for Power System Stability Enhancement,'' Thèse de Doctorat, Université Degli Studi de Napoli, November 2006. <http://eprints.whiterose.ac.uk/3620/1/griffoa.1.pdf> (Le 23/02/2016 à 19h: 30).
- [12]. **H. ELKHATIB**, "Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode met heuristique," Université de PAUL CEZANNE D'AIX Thèse de Doctorat, 2008. <https://duckduckgo.com> (Le 23/02/2016 à 20h: 00).
- [13]. **.S. DAIBOUN**, ''Renforcement de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS,'' Mémoire de Magistère, Département d'électrotechnique Université de Skikda 2005<http://ftech.univ-skikda.dz/index.php/departements/ge>

- [14]. **HEYDT**, IEEE Computer Applications in Power, vol.11, N°.1, January 1998, pp.15
<https://www.researchgate.net/publication/4302379> Denoising electrical signal via Empirical
- [15]. **B. CHARIER** « La qualité de l'énergie électrique », Revue technologie 200.
<http://www.thierry-lequeu.fr/data/REVUE744.HTM> (Le 03/03/2016 à 15h :00).
- [16]. **Vanya Ignatova** Ingénieur Université Technique de Sofia « Electronique » le 20/10/06
- [17]. **Gattal ***, **K. Chikhi** et **C. Fetha†** Amélioration de la qualité de l'énergie électrique.
 Université Hadj Lakhdar batna (reçu le 14 Février 2014 – accepté 24 Décembre 2014)
http://www.cder.dz/download/Art17-4_14.pdf (Le 03/03/2016 à 15h :00).
- [18]. **B. Metz-Noblat, F. Dumas, C. Poulain**, Cahier Schneider Electric N°.158/sep2005.
<https://www.researchgate.net/publication/30512076> Méthode d'analyse de la qualité d'énergie_
application aux creux de tension et à la pollution harmonique (Le 9/03/2016 à 20h :00)
- [19]. **M. Didden**, IEEE Transactions on power delivery, Vol.20, N°. 2,4/ 2005, pp.1174-1181.
<https://www.researchgate.net/publication/3275170> Frequency-Domain Transient Analysis of
Nonuniform Lines With Incident Field Excitation (Le 11/03/2016 à 18h :00).
- [20]. **M. Bollen**, Understanding Power Quality Problems -IEEE Press, 1999.
- [21]. **A. Arora** , Revue Qualité de L'énergie Electrique ABB 3/1998. <https://library.e.abb.com/public/ece6eeb97e6eb509c1256ddd00346c3d/25-36m462.pdf> (Le 12/03/2016 à 16h :00).
- [22]. **les harmoniques** ; Définition, Mesures, Analyse et Solutions (www.comarcond.com)
- [23]. Elimination des harmoniques dans les installations Schneider Electric Edition 09/2015
www.comarcond.com/wp-content/uploads/2015/10/Th%C3%A9orie-sur-les-Harmoniques.pdf
- [24]. **Geneva, Switzerland** IEC 61000-4-7: General guide on harmonics (2002).
http://www.apcmedia.com/salestools/LARD-8K6K8S/LARD-8K6K8S_R2_FR.pdf?sdirect=true
- [25]. **A. Sannino** « Power -electronic solutions to power quality problem », Electric Power Systems Research 66, Elsevier Science B.V 2003. <https://www.ieee.li/pdf/viewgraphs/harmonics.pdf>
- [26]. **K.J.P. MACKEN**, IEEE Transactions on Industry, pp.1686-1693, Vo.40, N°.6/12/2004.
 26<https://www.sciencedirect.com>
- [27]. **A.V. Jouanne** « Assessment of voltage unbalance », IEEE Transactions on power delivery, pp.782-790, Vol.16, N°.4, October 2001. <https://www.researchgate.net/publication/261047568>
Intelligent voltage dip detection in power networks with distributed generation %28DG%29

- [28]. **S.R Dzone Naoussi** « Implantation de réseaux neuromimétiques sur cible FPGA application a l'intégration d'un système de filtrage actif », Université de Strasbourg 2011. <http://www.sciencepublishinggroup.com>
- [29]. **T. GOURAUD** « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique», Thèse Doctorat. Université de Nantes 1997. https://www.worldcat.org/search?q=su%3AFiltre+actif+paralle%CC%80le&qt=hot_subject .(Le 05/04/2016 à 16h :30)
- [31]. **M.M. Abdusalam** « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2008. <http://www.theses.fr/>
- [32]. **D. Ould Abdeslam** « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », Thèse Doctorat. Université de Haute-Alsace 2005. <http://www.la-glass-vallee.fr/fr/la-glass-vallee/patrimoine/these-de-doctorat>. (Le 07/04/2016 à 18h :30)
- [33]. **M.D. Epanya** « Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique», Québec 2010. https://www.researchgate.net/profile/Djaffar_Ould_Abdeslam (Le 08/04/2016 à 20h :30)
- [34]. **S. Bernard et G. Trochain** « Compensation des courants harmoniques générés par les Ordinateurs grâce à un compensateur actif d'harmoniques révolutionnaire », Publication: 01/2000.
- [35]. **H. Kouara** « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », Mémoire de Magister. Université de Batna 2006. <http://www.elektronique.fr/cours/filtre/filtres.php> (Le 21/04/2016 à 16h :30)
- [36]. **M.A.E. Alali** « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse Doctorat. Université Strasbourg I 2002. https://www.researchgate.net/publication/279254119_Contribution_a_l'etude_des_compensateurs_actifs_des_reseaux_electriques_basse_tension
- [37]. **C. Tan Perng** « A single-phase hybrid active power filters with photovoltaic application» Thèse de Master en Genie Electrique, Université de Technologie Malaysia 2006. http://www.ijates.com/images/short_pdf/1408621696_P343-348.pdf

[38]. **M.M. Swamy** « Passive techniques for reducing input current harmonics », WP.AFD.01

Copyright by Yaskawa Electric America, Inc. 2005. http://www.chemicalprocessing.com/assets/wp_downloads/pdf/yaskawa_current_harmonics.pdf

[39]. **A. Hamadi** « Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution », Université du Québec 2010. http://espace.etsmtl.ca/644/1/HAMADI_Abdelhamid.pdf (Le 07/05/2016 à 16:00)

[40]. **F. Hamoudi** « Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils », Thèse Doctorat. Université de Batna 2012.

[41]. **M. Magraoul** « Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle », Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique 2007. http://espace.etsmtl.ca/226/4/MAGRAOUI_Mohamed-web.pdf

[42]. **S.A. Tadjer** « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque 'GPV' », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2008. manifest.univ-ouargla.dz/documents/Archive

Résumé :

La qualité d'énergie électrique constitue un grand intérêt ces dernières années pour tous les acteurs du système électrique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs ou consommateurs d'électricité. Parmi tous ces acteurs, le gestionnaire de réseau occupe une position centrale lui permettant de veiller sur la qualité de l'énergie électrique au sein des réseaux. Le besoin de répondre à un ensemble de critères et indices de qualité est devenu primordial, notamment avec les perturbations inévitables qu'a connu tous le système électrique ces derniers temps, telles que les courts-circuits, de générateurs ou de transformateur à affecter le réseau à tout instant et l'amener en dehors de sa stabilité.

Mots clés : *Qualité de l'énergie électrique, creux de tension, coupures brèves, harmoniques, stabilité, réseaux ...*

ملخص:

إن نوعية الطاقة الكهربائية تستقطب اهتمام جميع متعاملي الشبكات الكهربائية في السنوات الأخيرة، سواء كانوا مسيرين أو ممولين أو منتجين للطاقة الكهربائية. ومن بين أهم المتعاملين نذكر مسيري الشبكات الذين يحتلون مكانة مهمة لأن وظيفتهم تتمثل في وضع الوسائل اللازمة للحفاظ على نوعية الطاقة.

إن الحاجة للإجابة على مجموعة من خصائص نوعية الطاقة الكهربائية أصبحت أولوية ملحة و عاجلة نتيجة للمؤثرات التي تعرفها شبكات الطاقة الكهربائية، إن هذه العوامل تؤدي إلى التأثير السلبي على الشبكات الكهربائية و تخرجها من وضعية الاستقرار في أي لحظة.

إن أجهزة المراقبة الحديثة و المرتكزة على إلكترونيك الطاقة تسمح بتقديم حلول ناجعة لمشكلة مراقبة نوعية الطاقة و الحد من تذبذبها وتحسين توزيع الطاقة واستقرارها.

في أطروحتنا هذه قمنا بمناقشة مختلف عوائق النوعية الكهربائية ومختلف الحلول الممكنة لتحسينها.

كلمات البحث: جودة الطاقة الكهربائية والانخفاضات الجهد، انقطاع قصيرة، التوافقيات، والاستقرار، والشبكات