



Université de Batna
Faculté de Technologie

MEMOIRE

Préparé au

Département d'Electrotechnique

Présenté par

GATTAL BOULAARES

Pour obtenir le titre de Magister

En Electrotechnique

Option : Réseaux électriques et maîtrises des énergies

**METHODES D'ANALYSE DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES
DANS LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE
EN UTILISANT DES NOUVELLES TECHNIQUES
POUR L'APPLICATION AUX CREUX DE TENSION**

Soutenu le : 30/06/2012

Devant le Jury composé de :

Dr. Dekhinet	Abdelkamel	<i>Maître de Conférences</i>	<i>Univ. Batna</i>	Président
Dr. Fetha	Cherif	<i>Maître de Conférences</i>	<i>Univ. Batna</i>	Rapporteur
Dr. Chikhi	Khaled	<i>Maître de Conférences</i>	<i>Univ. Batna</i>	Co-Rapporteur
Dr. Bensalem	Ahmed	<i>Maître de Conférences</i>	<i>Univ. Batna</i>	Examineur
Dr. Labed	Djamel	<i>Maître de Conférences</i>	<i>Univ. Constantine</i>	Examineur

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chers parents, qui sont ma raison d'être, à mes frères et sœurs, à ma femme et mes enfants, à mes proches et amis, à mes enseignants qui m'ont aidé à trouver le chemin vers la chose la plus précieuse dans la vie "le savoir", et je tiens surtout à leur dire que c'était vraiment un honneur d'être l'un parmi leur étudiant.

A la fin je dois dire que:

Tous ce que parviens aujourd'hui à dire où à accomplir c'est grâce à Allah et en suite à eux.

Avant propre

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein du Laboratoire d'Electrotechnique du Département D'électrotechnique de la Faculté des Sciences de l'ingénieur Université de Batna.

Je tiens à remercier mes encadreurs sans qui cette thèse n'aurait jamais eu lieu, mes Messieurs : **Fetha Cherif** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna et **Chikhi Khaled** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna. Leur encadrement m'a offert la possibilité de réaliser une thèse multidisciplinaire ce qui m'a permis d'élargir mon spectre de connaissances scientifiques et d'ouvrir la voie à des collaborations futures en forme de cotutelles.

Finalement, je remercie spécialement toutes les personnes qui ont participé à ce projet.

Remerciement

J'adresse mes vifs remerciements à mon directeur de recherche **Fetha cherif** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna, d'avoir accepté la direction scientifique de ce travail de recherche. Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, sa compétence multidisciplinaire, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines.

Je tiens à remercier également Monsieur **Khaled Chikhi** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna pour son aide, sa disponibilité, aussi pour la confiance et la compréhension qu'il m'a manifestée.

Je tiens à remercier également Monsieur **Dekhinet Abdelkamel** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

J'adresse mes remerciements aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce mémoire en lui apportant de l'intérêt, Monsieur **Bensalem Ahmed** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Batna et Monsieur **Labeled Djamel** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Constantine.

Mes vifs remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation du primaire à l'université, à ceux qui ont marqués ma formation d'électrotechnique.

Je tiens également à remercier mes amis qui ne cessent de me pousser à reprendre mes études après cette longue période d'éloignement.

Je ne peux conclure cet espace sans penser à ma famille, mes proches et mes amis qui m'ont soutenus et encouragés durant toute cette période. Je pense particulièrement à mes parents, à mes frères et sœur, à ma femme et à mes enfants.

Symboles et abréviations

ASI: Système d'alimentation sans interruption.

SSTS: bien comme interrupteur statique de transfert entre lignes.

THD: Taux de distorsion harmonique.

e_a , e_b et e_c : Tension de phase du réseau.

V_a , V_b , et V_c : Fondamentaux sous forme complexe.

THD: Taux de distorsion harmonique.

V_{eff} : Valeur efficace du signal analysé, et V_k est son harmonique de rang k .

V_{ab} et V_{bc} : Tensions sous forme complexe.

k : Rapport de transformation.

T : Matrice de transformation.

v_{ABC}, v_{abc} : Tensions du côté primaire et secondaire.

S_n : Puissance nominale apparente.

V_n : Tension simple nominale.

u_{cc} : Tension de court circuit.

P_i : Puissance active.

Q_i : Puissance réactive.

d : Profondeur du creux de tension.

Table des matières

Table des matières

Dédicace.....	1
Avant propre.....	2
Remerciement.....	3
Listes des symboles et abréviations.....	4
Table des matières.....	5
<hr/>	
Introduction générale.....	7
Chapitre I : Les principaux perturbations électriques ainsi leurs origines	
I.1. Introduction.....	11
I.2. Qualité de l'énergie électrique	12
I.3. Classification des perturbations électriques	13
I.3.1. Creux de tension et coupures brèves.....	15
I.3.1.1. Définition, origine et conséquences	15
I.3.1.2. Caractérisation des creux de tension	17
I.3.1.3. Représentation dans le plan complexe.	18
I.3.1.4. Paramètres déterminant les types de creux de tension	18
I.3.1.5. Les creux de tension et des coupures brèves sur le réseau du distributeur.....	21
I.3.1.6. Les creux de tension et coupures brèves liés à des phénomènes qui se produisent chez le client.....	23
I.3.1.7. Impact des creux de tension et des coupures brèves sur les équipements Industriels.....	23
I.3.1.8. Effets des creux de tension sur les autres éléments habituels d'une installation industrielle.....	24
I.3.1.9. Solutions face aux creux de tension et aux coupures	25
I.3.2. Surtensions.....	27
I.3.2.1. Définition, origine	27
I.3.2.1.1. Surtensions à fréquence industrielle.....	27
I.3.2.1.2. Surtensions de manœuvre.....	27
I.3.2.2. Conséquences des Surtensions.....	28
I.3.3. Les fluctuations rapides de tension (flickers)	28
I.3.3.1. Définition et origine	28
I.3.3.2. Conséquences	29
I.3.4. variation de la fréquence.....	29
I.3.4.1 Définition, origine et Conséquences.....	29
I.3.5. Les dissymétries du système de tension appelées déséquilibre.....	29
I.3.5.1. Définition, origine et conséquences.....	29
I.3.6. Harmoniques et interharmoniques	30
I.3.6.1 Définition et origine des harmoniques.....	30
I.3.6.2. Interharmoniques.....	31
I.3.7. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.....	32
Conclusion.....	37
Chapitre II : Méthodes d'analyse des perturbations électriques	
II.1. Introduction.....	38
II.2. Analyse de la qualité de l'énergie électrique par la transformation du vecteur d'espace.....	38
II.2.1. Transformation de vecteur d'espace.....	38
II.2.1.1. Un bref historique.....	38
II.2.1.2. Caractéristiques du vecteur d'espace en cas de perturbations.....	39
II.2.2. Analyse des perturbations au niveau du fondamental.....	41
II.2.2.1. Creux de tension.....	41
II.2.2.2. Surtensions / Surintensités.....	41
II.2.2.3. Déséquilibre.....	42
II.2.3. Analyse des perturbations harmoniques.....	43
II.2.3.1. Harmoniques.....	43
II.3. Analyse des creux de tension, coupures brèves et surtensions.....	44
II.3.1. Analyse par l'estimation de l'amplitude	44
II.3.1.1. Valeur efficace.....	45
II.3.1.2. Signal analytique.....	45
II.3.1.3. Composante fondamentale.....	46
II.3.2. Segmentation.....	46

Table des matières

II.3.3. Méthode des 6 tensions.....	47
II.3.4. Méthode des composantes symétriques.....	48
II.4. Méthodes d'analyse des harmoniques et des déséquilibres.....	48
II.4.1. Les harmoniques.....	48
II.4.1.1. Série de Fourier.....	49
II.4.1.2. Transformée de Fourier.....	49
II.4.1.3. Caractérisation.....	50
II.4.2. Les déséquilibres.....	50
II.5. Méthode d'analyse des variations de tension et de fréquence.....	50
2.5.1. Représentation statistique.....	51
II.5.2. Fonction de répartition, densité de probabilité et histogramme.....	51
II.5.3. Moments statistiques : espérance, variance et écart type.....	52
II.6. L'amélioration de la qualité de l'énergie.....	52
II.6.1. Stratégies de prévention des perturbations.....	54
II.6.2. Stratégies de minimisation des effets des perturbations sur la charge.....	55
II.6.3. Le rôle de l'Electronique de Puissance dans l'amélioration de la QdE.....	55
Conclusion.....	57
Chapitre III : Application de la méthode d'analyse des creux de tension	
III.1 introduction.....	58
III.2. Types de creux de tension.....	58
III.3. Les facteurs qui concernent le type de creux de tension.....	61
III.3.1. Types et caractéristiques des défauts.....	61
III.3.1.1. Types des défauts.....	61
III.3.1.2. Caractéristiques des défauts.....	62
III.3.1.2.a. Caractéristiques des défauts monophasés.....	62
III.3.1.2.b. Caractéristiques des défauts polyphasés.....	63
III.3.2. Connexion des enroulements d'un transformateur.....	63
III.4. Propagation des creux de tension dans un réseau industriel.....	64
III.4.1. Schéma de base de l'installation.....	64
III.4.1.1. Les tensions aux nœuds.....	65
III.4.1.2. Les lignes.....	65
III.4.1.3 Les transformateurs de tension.....	65
III.4.1.4. Les charges.....	66
III.4.2. Mise en équation.....	67
III.4.2.1. Equation récurrente entre deux tensions consécutives.....	67
III.4.2.2. Conditions de fonctionnement pour que V_{i+1} existe.....	68
III.4.3. Simplification de l'équation récurrente.....	69
III.4.3.1. Hypothèse sur la chute de tension et conséquences.....	69
III.4.3.2. Formule de récurrence.....	71
III.5. Application de la méthode d'analyse	72
Conclusion	77
Chapitre IV : Présentation et interprétation des résultats obtenus par la méthode d'analyse	
IV.1. Introduction.....	78
IV.2. Simulation en Matlab.....	78
IV.2.1. Le modèle du système simulé.....	78
IV.2 .2. Les différentes perturbations (défauts) provoquées	79
IV.2.2.1. Défaut symétrique	79
IV.2.2.2. Défaut asymétrique.....	80
a) Défaut monophasé.....	80
b) Défaut biphasé.....	82
c) Défauts entre deux phases et la terre.....	83
IV.3. Etude comparative avec un travail publié en IEEE.....	84
Conclusion.....	85
Conclusion générale.....	86
Référence.....	87
Annexe.....	88

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 les suivants, [1]:

- Amplitude: variations, coupures, creux, surtensions.
- Fréquence: variations.
- Forme d'onde: harmoniques, transitoires, courants porteurs.
- Phase: déséquilibre.

Tous les aspects mentionnés auparavant doivent être considérés et analysés sous l'incidence des perturbations (les causes de l'apparition, leurs effets et les mesures pour leur réduction).

L'intérêt de plus en plus marqué pour ce domaine est expliqué par les spécialistes par l'émergence des aspects suivants, [1]:

- Les réseaux électriques sont soumis à de multiples perturbations électromagnétiques.
- Les récepteurs modernes, notamment les appareils électroniques et ceux de contrôle-commande et de protection, sont très sensibles à la qualité de l'énergie les alimentant.

- Les appareils électroniques (démarreur progressif, convertisseurs de fréquence, redresseurs à commande de phase, micro-ordinateurs, TV, appareils électroménagers, ballasts électroniques, etc.) sont de plus en plus nombreux.
- Les équipements modernes engendrent des perturbations dans le système d'alimentation.
- Les exigences de disponibilité du service (pour la production, la gestion ou le commerce) sont de plus en plus élevées.
- Les fournisseurs veulent aussi améliorer la qualité «du produit électricité» pour éviter, d'une part, de payer des pénalités aux clients et les dysfonctionnements, voire la destruction de composants de leurs réseaux électriques, d'autre part. Dans les conditions de l'ouverture du marché d'énergie, la qualité de l'électricité fournie peut représenter un argument décisif pour fidéliser ou attirer les clients.
- La qualité de l'énergie électrique peut être actuellement mesurée.

La qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs dépend de celle de la tension au point de livraison. Elle peut être affectée par certains incidents, soit externes comme la défaillance de la source d'alimentation ou bien inhérents à l'installation. Ces défauts détériorant la qualité de la tension se manifestent sous formes de différentes perturbations: surtension, déséquilibre, fluctuation, harmonique et creux de tension..

Les principales perturbations susceptibles d'altérer le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont les creux de tension, les harmoniques et inter-harmoniques, les fluctuations de tension ou Flicker, les déséquilibres de tension, les surtensions, les surtensions temporaires et les surtensions transitoires. Afin de caractériser et de quantifier ces perturbations, les industriels ont développés des « mesureurs » de la qualité de l'énergie (qualimètre, flickermètre, perturbographe, analyseur de réseau, analyseur de puissance.), [2].

Dans ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement aux mesureurs de creux de tensions. Les creux de tensions sont parmi ces différents types de perturbations, induisent des disfonctionnements importants au sein des Installations industrielles, ils se caractérisent par leur amplitude (40 à 80 % des creux de tension ont des amplitudes comprises entre 10 et 20%) et leur durée (70 à 90 % des creux de tension ont des durées comprises entre 20 et 350ms). Ils sont soit d'origines internes soit d'origines externes à l'installation, [3].

Plusieurs campagnes de mesures ont été effectuées pour fournir des informations concernant ces perturbations, plus particulièrement, l'amplitude et la durée des creux de tension et coupures brèves, qui feront l'objet de notre étude. Néanmoins lorsqu'il est souhaitable d'établir des préventions des phénomènes constatés, il est utile de pouvoir reconstruire les formes d'onde

des coupures brèves et des creux de tension enregistrés. C'est pourquoi, il a été envisagé d'élaborer un outil de pré - diagnostic de ces phénomènes perturbateurs, [4].

Le domaine de la qualité de l'énergie électrique se caractérise par deux grands axes de recherche : les solutions prophylactiques et curatives d'une part, et le monitoring d'autre part, c'est-à-dire la mesure et l'analyse des perturbations électriques, [5].

Le monitoring représente l'étape préliminaire dans la recherche de solutions. Il permet de comprendre l'origine des perturbations, d'évaluer leur impact sur les équipements, et donc de trouver et choisir la solution la plus appropriée économiquement et techniquement, [5].

Cet aspect monitoring est riche en problèmes ouverts du fait de la forte augmentation des capacités d'enregistrement et de traitement de données, ainsi que des besoins croissants en termes de distinction de sources perturbantes et d'amélioration de la planification et de la conception, [5].

Plusieurs méthodes destinées à l'analyse des perturbations électriques ont été déjà proposées. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les méthodes de classification.

Dans le cadre de cette problématique de recherche, une thèse de Magister a été initiée au sein du Département d'électrotechnique de Batna en vue de développer des programmes dans l'environnement Matlab. L'étude consiste à élaborer un outil de pré - diagnostic pour l'étude de la propagation et des effets des creux de tension et coupures brèves dans les réseaux industriels. Ces derniers sont relativement très sensibles à ce type de perturbations du fait des différentes charges qui s'y trouvent.

Ce travail s'inscrit dans le domaine du monitoring de la qualité de l'énergie électrique. Il a pour objectif d'introduire de nouvelles techniques dans l'analyse et le traitement des problèmes de la qualité de l'énergie électrique.

La méthode de classification des creux de tension Elle est très performante dans l'analyse des perturbations au niveau de l'amplitude. Elle permet d'isoler ce type de perturbations, de les classer de manière précise et d'évaluer leur gravité en utilisant un minimum de variables.

Ce rapport de thèse est organisé de la manière suivante:

Le premier chapitre définit le terme « qualité de l'énergie électrique » et présente les principaux types de perturbations ainsi que leurs origines, causes, conséquences et traits caractéristiques.

Le second chapitre de cette thèse constitue un état de l'art des méthodes d'analyse des perturbations électriques. L'accent est mis sur les perturbations les plus importantes et les plus gênantes pour les consommateurs: les creux de tension et la pollution harmonique.

Le troisième chapitre de ce mémoire sera consacré à étudier de l'une des méthodes d'analyse des creux de tension et enfin à proposer et établir sous l'environnement Matlab un modèle d'application.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons et interpréterons les résultats que nous avons obtenus concernant la méthode de classification ABC présentée dans le chapitre 3.

Pour tester, valider et évaluer les performances de notre travail de recherche, nous avons comparé les résultats obtenus avec des travaux publiés en IEEE.

Une conclusion générale vient enfin clore ce mémoire.

Chapitre I

**Les principaux perturbations électriques ainsi
leurs origines**

Les principaux perturbations électriques ainsi leurs origines

I.1. Introduction

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

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants:

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde: Qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde
- Le déséquilibre: La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif, [6].

La qualité d'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations:

- Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz: elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport;

- Les variations de l'amplitude: il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non;

- La modification de la forme d'onde de la tension: cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque;

- La dissymétrie du système triphasé: que l'on appelle déséquilibre. On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois

l'amplitude et la forme d'onde: ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms, [1].

I.2. Qualité de l'énergie électrique

La notion globale de qualité de l'énergie peut être décomposée en deux axes: la continuité de la tension et de la qualité de la tension.

-Continuité de la tension:

La continuité de l'alimentation en tension et en courant relève de la conception des réseaux publics et industriels, de la qualité de leurs matériels et des bonnes pratiques de maintenance et d'exploitation. La continuité dépend à la fois des choix techniques et des investissements réalisés pour assurer l'alimentation d'un point particulier ou d'une zone donnée. C'est donc le résultat d'un compromis « technico-économique », explicite ou implicite. La continuité de l'alimentation est l'un des éléments importants de la qualité de la fourniture perçue par les clients : un client doit pouvoir compter sur son alimentation avec la puissance et aux instants prévus par son contrat.

La continuité de l'alimentation se mesure par le nombre de coupures d'alimentation d'un point donné — on parle simplement de « coupure » — par unité de temps.

Dans les normes, deux types de coupures sont définies: les coupures dites longues, de durée supérieure ou égale à 3 min, et les coupures dites brèves, de durée inférieure à 3 min.

-Qualité de la tension:

Sauf exception, les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50HZ ou de 60 HZ. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants:

- la fréquence,
- l'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations:

-Variations de l'amplitude:

Il ne s'agit pas des variations lentes de la tension qui sont corrigées par les régulateurs en charge des transformateurs, mais des variations rapides isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière (créneaux) ou non.

-Modifications de la forme de l'onde de tension:

L'onde n'est plus sinusoïdale et peut être considérée comme la superposition d'une onde à fréquence fondamentale à 50Hz et de tensions harmoniques dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale et de tensions interharmoniques à des fréquences quelconques.

-Dissymétrie du système triphasé (déséquilibre):

Dans un système triphasé, l'alimentation de charges monophasées (trains, fours électriques de grande puissance) entraîne des dispersions sur les modules des tensions et leurs déphasages ne sont plus égaux.

-Variations de la fréquence fondamentale à 50Hz:

Comme la fréquence est la grandeur d'équilibrage instantané entre la production et la puissance appelée, les variations de fréquence sont, en principe, inévitables. En pratique, elles sont rares et minimales dans les réseaux interconnectés et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple, lors de certains défauts de grande ampleur en réseau ou de production, [7].

I.3. 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:

- les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker),
- les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- les modifications de la forme d'onde (harmoniques, interharmoniques, bruits),
- la dissymétrie du système triphasé: déséquilibre.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée [8]:

- les perturbations transitoires,
- les perturbations de courte durée,
- 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.

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, de 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:

- les défauts au sein des réseaux électriques,
- la présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles:

- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...),
- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

Le tableau I.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 (perunits) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude, [5].

Type de perturbation	Origine	Conséquences	Solutions possibles
Coupure longue	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Alimentation de secours (réseau), alimentation sans interruption (ASI)
Creux de tension et coupure brève	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Conditionneur de réseau, conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption
Fluctuation rapide (flicker)	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série
Harmonique	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)	Filtrage actif ou passif, self anti-harmonique, déclassement d'appareil
Interharmonique	Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Filtrage actif ou passif, amortissement de filtres anti-harmoniques, conception de l'équipement sensible
Déséquilibre	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	Dispositif d'équilibrage, conditionneur de réseau
Surtension	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique, parasurtenseur, enclenchement "synchronisé", résistance de pré-insertion

Tableau. I.1: Vue d'ensemble des principales perturbations électriques

I.3.1. Creux de tension et coupures brèves

I.3.1.1. Définition, origine et conséquences

Un creux de tension (sag ou dip en anglais), [9] est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% par rapport à la tension de référence (U_{ref}), suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (8 ms à 16ms) et une minute. La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée ou avant perturbation pour les réseaux MT et HT (voir figure I.1).

Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90% (IEEE1159) et de durée allant jusqu' à 1 minute.

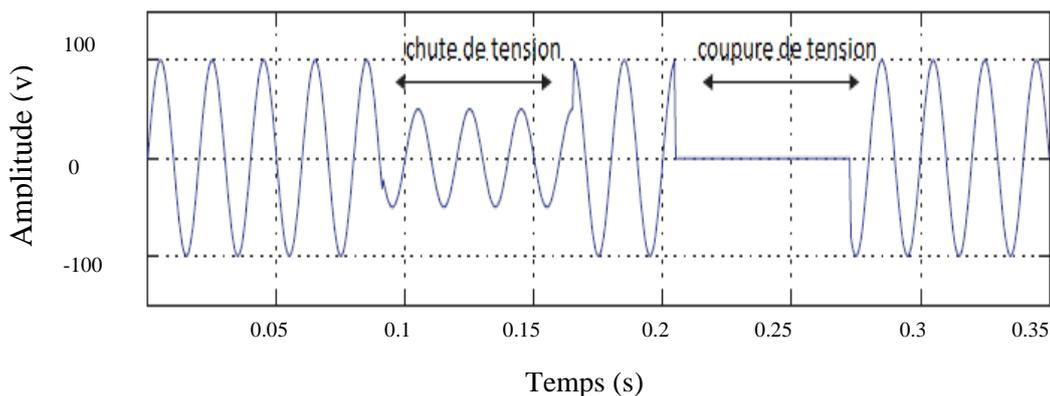


Figure I.1: creux et coupure brève

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 I.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 I.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.

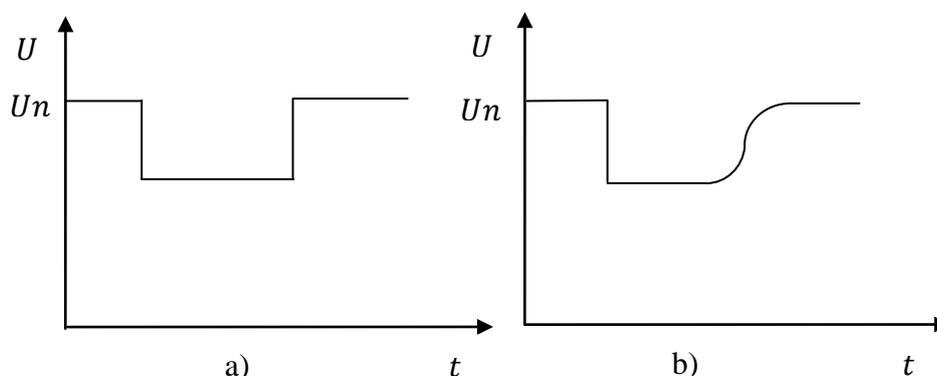


Figure I.2: Amplitude d'un creux de tension provoqué par
 a) un court-circuit
 b) le démarrage d'un moteur de forte puissance

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, [5].

I.3.1.2. Caractérisation des creux de tension

On comprend par caractérisation d'un événement, l'action d'extraire l'information utile des mesures, synthétisée normalement sur un seul chiffre, sans besoin de retenir tous les détails de l'événement. En général, les creux de tension sont caractérisés par leur durée et la valeur efficace moyenne, maximum et/ou minimum de la tension pendant l'événement figure (I.3), [10].

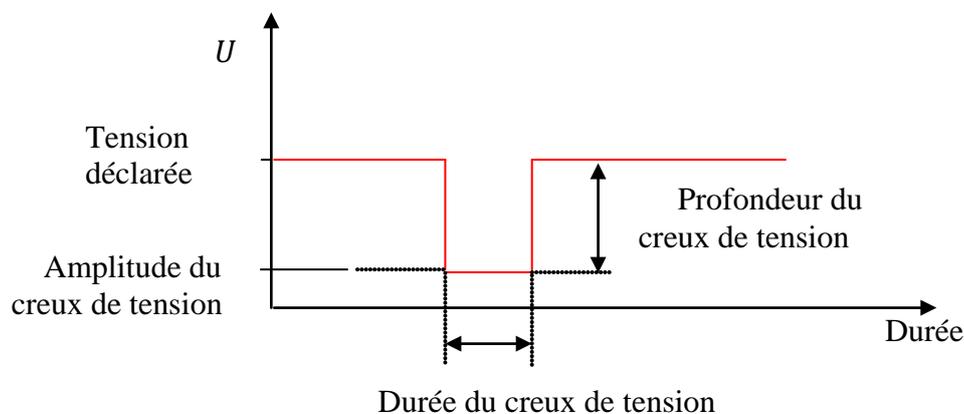
-L'amplitude:

L'amplitude du creux de tension est conditionnée par la structure du réseau, notamment la puissance de court-circuit et par la distances entre le point de défaut et le point où est situé le client sur le réseau. Ainsi, plus la puissance de court-circuit en amont est élevée plus l'amplitude du creux de tension est faible, [11].

-La durée:

La durée du creux de tension est conditionnée par le temps de maintien du défaut. Cette durée dépend du temps de détection et de localisation du défaut, des temporisations éventuelles mises en œuvre avant l'envoi de l'ordre d'ouverture des disjoncteurs et du temps nécessaire à l'ouverture des disjoncteurs, [11].

La propagation du primaire au secondaire des défauts monophasés et biphasés dépend du couplage du transformateur. La transmission se fait sans atténuation pour les défauts triphasés. Par contre les creux de tension subissent une forte atténuation lors du passage du secondaire au primaire, [11].



Variation de la valeur efficace de la tension

Figure I.3: Caractérisation du creux de tension

I.3.1.3. 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 I.4a se caractérise par la signature présentée en figure I.4b, [5].

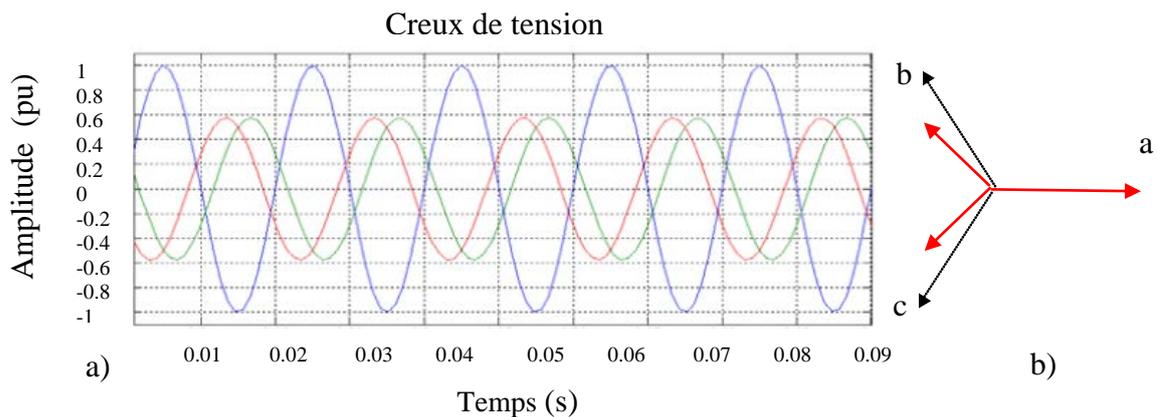


Figure I.4: a) Creux de tension
b) sa signature dans le plan complexe

I.3.1.4. Paramètres déterminant les types de creux de tension

I.3.1.4.1. 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, entre deux phases et terre, biphasés et triphasés (voir figure I.5).

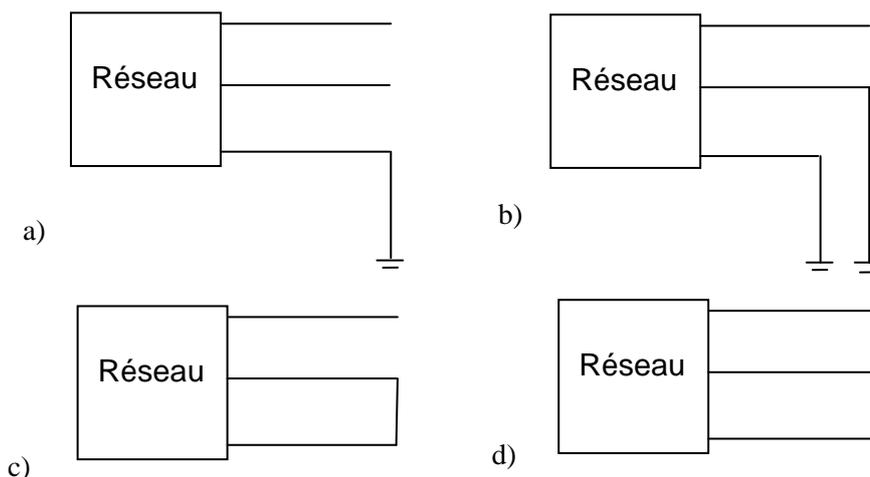


Figure I.5: Types de courts-circuits : monophasé (a), biphassé entre phase et terre (b), biphassé entre deux phases(c) et triphasé (d)

Les courts-circuits monophasés représentent 70% des courts-circuits 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 biphassés entre deux phases viennent en seconde position puisqu'ils représentent 15% des courts-circuits. Ils se caractérisent par des chutes de tensions et déphasages 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 biphassés 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.

Enfin, 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.

I.3.1.4.2. 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 impuident) 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.

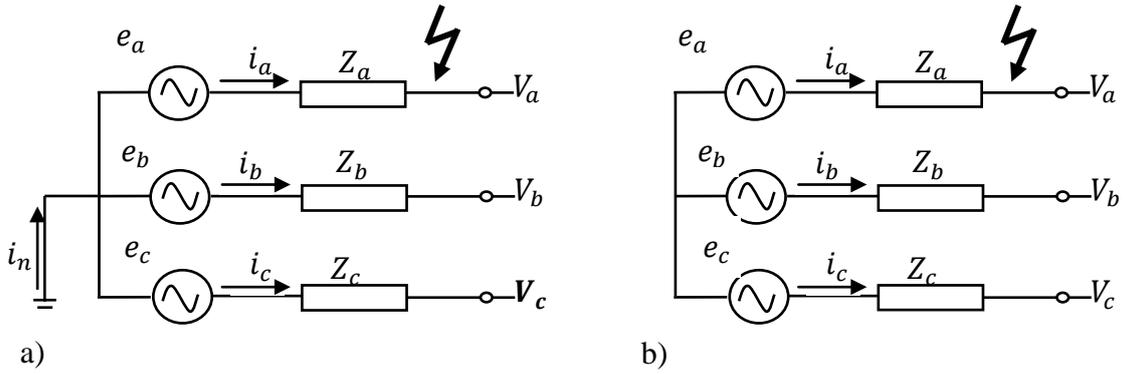


Figure I.6: Régime de neutre: direct (a) et isolé (b)

Le schéma simplifié d'un système avec neutre relié directement à la terre est présenté en figure I.6a. La relation entre les courants des trois phases et le courant du conducteur de neutre est la suivante:

$$i_a + i_b + i_c = i_n \quad (I.1)$$

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 $V_a = e_a - i_a Z_a$. 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 Eq.I.1). 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 I.7a).

Le schéma d'un système avec neutre isolé est présenté en figure 1.6b. La relation entre les courants de phase et le conducteur de neutre est donnée par:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (I.2)$$

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 I.7b). Ce phénomène est d'autant plus accentué que les neutres côté charge et côté source ont des potentiels éloignés.

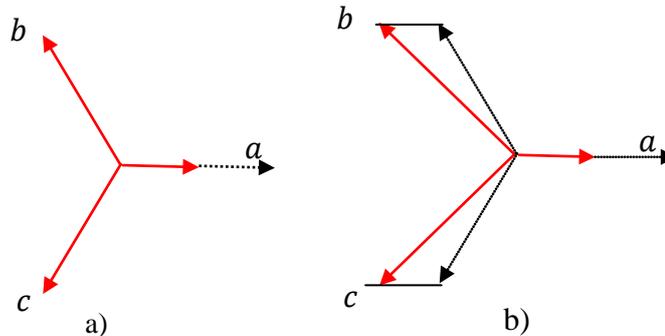


Figure I.7: Signatures des creux de tension dus à un défaut monophasé en régime de neutre relié directement à la terre (a) et à distribution isolée (b)

I.3.1.4.3. 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 verra que les creux de tension se propagent en aval du réseau en modifiant leurs signatures via les transformateurs.

I.3.1.4.4. 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.

I.3.1.5. Les creux de tension et des coupures brèves sur le réseau du distributeur, [11]

Les causes exogènes sont les conditions atmosphériques (dans plus de 70% des cas pour un réseau aérien), les amorçages avec des corps étrangers (végétation, animaux, percussion de véhicules,...) et les actes de malveillances.

Les causes endogènes correspondent principalement à des défaillances de matériels (lignes, câbles, transformateurs...).

Les défauts sont de différents types:

1. monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases atteintes:
 - monophasé quand une seule phase est affectée et sa tension est réduite
 - biphasés quand deux phases sont affectées par un creux la troisième restante sainetriphasés quand les trois phases sont affectées simultanément.
2. auto-extincteurs, fugitifs ou permanents suivant leur durée:
 - auto-extincteurs: défauts qui s'éliminent d'eux-mêmes
 - fugitifs: défauts qui s'éliminent après ouverture des disjoncteurs
 - permanents: défauts durables qui nécessitent une mise hors tension définitive de l'ouvrage et une intervention de maintenance pour remettre l'ouvrage en service.

Clients HTB

Les creux de tension subis par un client raccordé sur le réseau de répartition sont liés à des défauts issus de ce niveau de tension, du réseau de transport et des réseaux internes des clients raccordés à ce niveau de tension. Quelques creux de tension peuvent provenir d'incidents survenus en HTA au niveau du jeu de barres ou au niveau des transformateurs des postes sources.

Le nombre de coupure brèves pour les clients HTB est faible: en moyenne moins de 2 par an. La durée des creux de tension est en général comprise entre 80 et 500 ms.

Clients HTA et BT

Les creux de tension et les coupures subis par un client raccordés en HTA sont liés à des défauts issus du réseau de transport, de répartition et de distribution HTA. Les creux de tension et les coupures subis par un client raccordés en BT sont liés d'une part à des défauts issus du réseau de transport, de répartition, et de distribution HTA et BT, et d'autre part à des défauts générés sur le réseau internes des clients.

A noter que généralement les défauts monophasés générés sur le réseau de distribution HTA ne provoquent pas de creux de tension chez les clients raccordés à proximité, du fait de la nature du couplage de leur transformateur.

Le nombre moyen de creux de tension et de coupures brèves dépend du type de départ sur lequel se situe le client (aérien ou souterrain), de la longueur des lignes, du nombre de départs par poste source raccordés sur le même jeu de barres. Les clients les plus perturbés sont raccordés sur des lignes aériennes, (près de 2 à 5 fois plus que des lignes souterraines), sur des lignes longues ou sur des lignes raccordées sur un jeu de barres comportant beaucoup de départs.

- La durée des coupures brèves est en général inférieure à 30 secondes
- La durée des creux de tension est en général inférieure à 600 ms et leur amplitude est inférieure à 50 %.

I.3.1.6. Les creux de tension et coupures brèves liés à des phénomènes qui se produisent chez le client, [11]

Les creux de tension sont causés également par des phénomènes qui prennent naissance sur le réseau des clients soit dans l'installation d'un client voisin situé sur le même départ ou dépendant du même jeu de barres, ils sont très rarement perceptibles par les clients raccordés au niveau de tension supérieure.

Ils sont dus à des appels de courant importants, provoquant ainsi des à-coups de tension qui sont liés

- au démarrage direct de gros moteurs,
- à l'enclenchement de charges importantes

- à l'enclenchement de charges particulières (comme les transformateurs et les condensateurs)

- à des défauts d'isolement survenant sur une partie de l'installation.

L'amplitude du creux de tension est fonction du rapport entre la puissance de court-circuit disponible à l'endroit où se produit cet impact et la puissance de la charge enclenchée. Plus le rapport est élevé, moins le creux de tension est important.

I.3.1.7. Impact des creux de tension et des coupures brèves sur les équipements industriels, [11]

Les creux de tension et les coupures brèves sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles. Les conséquences techniques dépendent du type de matériel et sont conditionnées par le type de charge du système.

Certains effets sont instantanés ou à court terme. Nous rappelons qu'ils se produisent principalement au niveau:

- Des contacteurs et relais thermiques : les creux de tension provoquent des manœuvres intempestives des contacteurs et relais.

- Des convertisseurs: défauts de commutation des onduleurs.

- Des systèmes électroniques analogiques ou numériques: défauts de fonctionnement ou erreurs d'exécution de calculs informatiques

D'autres effets sont à action différée, principalement au niveau des moteurs. En effet la remontée de tension, constituant l'ultime séquence de tout creux de tension, peut provoquer une surintensité dans les machines tournantes; ceci donne lieu à des sur-échauffements et des efforts électrodynamiques de brèves durées, susceptibles d'engendrer une fatigue du matériel préjudiciable à terme. Les effets cités précédemment se manifestent de façon appréciable à partir d'un certain niveau de profondeur du creux de tension.

Enfin, les conséquences des creux de tension et des coupures brèves sont parfois aussi économiques. Ces perturbations peuvent engendrer: une perte ou une altération de la production, une détérioration de l'outil de production, une perte de temps pour la remise en état et la remise en route de l'outil de production...

I.3.1.8. Effets des creux de tension sur les autres éléments habituels d'une installation industrielle, [11]

- Les machines synchrones:

Les effets des creux de tension sur les machines synchrones, sont analogues à ceux évoqués dans le cas des machines à induction (variation du couple électromagnétique et de la

vitesse mécanique). Toutefois, le couple n'étant pas lié au carré de la tension d'alimentation, et en raison de leur forte valeur d'inertie liée à leur puissance généralement importante, les machines synchrones peuvent supporter des creux de tension plus importants que les machines à induction (de l'ordre de 50% sans décrocher). Cependant, en cas de décrochage, le moteur s'arrête et il faut reprendre tout le processus de démarrage qui est assez complexe.

- Les organes de commande et de protection (contacteurs, disjoncteurs équipés de bobines à manque de tension...):

Ils peuvent être sensibles aux creux de tension dont la profondeur dépasse 25%. En effet, pour un contacteur classique, il existe une valeur minimale (tension de retombée) en dessous de laquelle les pôles se séparent et transforment un creux ou une coupure brève en une coupure de longue durée allant jusqu'à plusieurs heures.

Les équipements informatiques sont sensibles aux creux de tension de profondeurs 10% et plus. Les creux de tension dont les caractéristiques sont en dehors de cette zone de tolérance, peuvent provoquer des pertes et des altérations dans la transmission de l'information et donc induire des dysfonctionnements dans les programmes en cours d'exécution.

- Dispositifs électroniques de régulation:

Ces dispositifs sont conçus pour supporter une plage de variation de leur tension d'alimentation. Cependant au-delà d'une durée, une variation de la tension entraîne une défaillance dans leur fonctionnement.

I.3.1.9. Solutions face aux creux de tension et aux coupures, [11]

I.3.1.9.1. Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures provenant du réseau du distributeur:

Un défaut d'isolement provoque un court-circuit où s'écoule un courant important qui provoque une variation brutale de la tension. Les courants de défauts peuvent atteindre des valeurs élevées, constituant un danger pour les personnes et le matériel.

- Afin de limiter l'impact en durée de ces courants de défauts, une solution souvent adoptée par les distributeurs consiste à mettre hors tension l'ouvrage concerné par le défaut, en déclenchant le ou les disjoncteurs qui le relient au reste du réseau.

- Afin d'assurer la reprise de service le plus rapidement possible, un automatisme de réenclenchement associé au système de détection et d'élimination du défaut est installé pour les réseaux aériens.

Le principe d'élimination des défauts et de reprise de service diffère suivant les niveaux de tension:

- Sur le réseau de distribution BT il y a mise hors tension définitive des ouvrages en défauts par fonctionnement de la protection (disjoncteur ou fusible situé au poste de distribution public).

- Sur le réseau de distribution HTA les départs aériens sont équipés d'un disjoncteur associé à un dispositif de réenclenchement triphasé rapide et lent. En cas de défaut, il y a une séquence d'ouvertures et de fermetures du disjoncteur en tête de départ. Les départs souterrains sont équipés uniquement d'un disjoncteur sans dispositif de réenclenchement. En cas de défaut, le disjoncteur est ouvert définitivement, du fait que les défauts sont généralement permanents.

- Sur les réseaux HTB le principe d'élimination des défauts est basé essentiellement sur l'utilisation de protections de distance, qui permettent d'assurer une sélectivité dans le déclenchement des disjoncteurs, en fonction de la localisation du défaut. Sur les réseaux aériens, afin d'assurer une reprise de service, ce système de protection est associé à un système de réenclenchement automatique.

A ces dispositifs de désensibilisation s'ajoutent les dispositifs de l'électronique de puissance modernes tels les DVR (Direct Voltage Restorer). Ces derniers, par le truchement d'injection de puissances active et réactive au réseau client, permettent de fait une complète insensibilisation au creux ayant une origine amont. Il faut aussi différencier ces systèmes des alimentations sans interruption qui ne protègent qu'une petite partie d'installation.

I.3.1.9.2. Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures générés par l'installation d'un client,

-Actions ponctuelles pour limiter les creux de tension:

Le client doit veiller lui-même à ne pas perturber le réseau et les autres clients. En effet, ses propres installations peuvent provoquer des perturbations sur le réseau y compris chez les autres clients.

Les chutes de tension provoquées par les équipements d'un client sont réduites en augmentant le niveau de puissance de court circuit disponible à leur point de raccordement. Il suffit alors de prévoir une alimentation des charges du client, qui sont à l'origine de la chute de tension, le plus en amont possible sur le réseau du distributeur.

Quelques actions ponctuelles peuvent également être mises en œuvre, en particulier pour se prémunir contre des chutes de tension provoquées par des démarrages de moteurs:

-installer un système de démarrage afin de limiter l'appel de courant.

-installer un compensateur statique d'énergie réactive qui compense l'appel de puissance réactive au moment du démarrage. Cette solution est cependant à court terme coûteuse.

-Solutions efficaces chez les clients pour se protéger contre les creux de tension et les coupures brèves

Les équipements les plus sensibles, dans les secteurs industriels et tertiaires, sont essentiellement le contrôle commande soit par ordre décroissant, les automates, les calculateurs, la commande des entraînements à des vitesses variables, les systèmes du type pont de diode capacitif.

Bien qu'il soit toujours préférable de se préoccuper de l'influence éventuelle des creux de tension et des coupures brèves sur l'installation lors de la conception, le problème se pose le plus souvent en phase opérationnelle. C'est le but de l'action de désensibilisation. Deux types de solutions peuvent être mises en place pour limiter les effets des creux de tension et des coupures brèves:

- La première consiste à comparer le manque d'énergie par un dispositif intercalé entre le réseau et l'installation à désensibiliser. Les dispositifs utilisés sont les alimentations sans interruption (ASI), les groupes à volant d'inertie (GVI)...

- La deuxième à améliorer l'immunité de l'installation. Des actions ponctuelles sont proposées pour les moteurs et les équipements à vitesse variable.

Il y a lieu de distinguer deux fonctions lorsque l'on cherche à désensibiliser une installation industrielle:

- la fonction contrôle-commande et son alimentation.

D'une façon générale, le contrôle-commande doit être désensibilisé pour assurer une bonne continuité d'exploitation. La solution est souvent la mise en place d'une source à réserve d'énergie, qui, du fait des faibles puissances mises en œuvre, est peu coûteuse.

- la fonction de l'alimentation en puissance des équipements.

La partie puissance peut utiliser l'inertie des machines en tant que réserve d'énergie, mais les solutions radicales sont plus coûteuses compte tenu des niveaux de puissance à désensibiliser.

La désensibilisation peut se faire en trois niveaux:

1- procéder à un arrêt propre avec possibilité de redémarrage automatique

2- procéder à une reprise à la volée. Il faut vérifier au préalable que les conditions de reprise sont assurées en particulier pour le procès associé,

3- immuniser toute la force motrice. Il faut alors mettre en place un dispositif à réserve d'énergie.

I.3.2. Surtensions, [1]

I.3.2.1. Définition, origine

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension (voir figure I.8). Les surtensions sont de trois natures:

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

Elles peuvent apparaître:

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

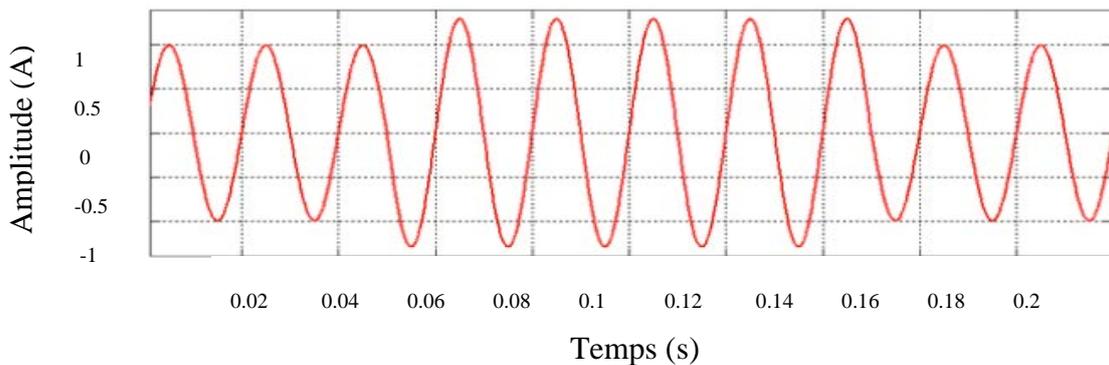


Figure I.8: exemple de surtension

I.3.2.1.1. Surtensions à fréquence industrielle

- Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz).

Elles sont aussi causées par les défauts d'isolement;

- Ferro résonance, Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable;

- Rupture du conducteur de neutre;
- Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur ;
- Surcompensation de l'énergie réactive.

I.3.2.1.2. Surtensions de manœuvre

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

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

I.3.2.2. Conséquences des Surtensions

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

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...);
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées);
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels);
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible;
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par:
 - La foudre essentiellement;
 - Les 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, [1].

I.3.3. Les fluctuations rapides de tension (flickers)

I.3.3.1. Définition et origine

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, [1] comme illustré sur la figure I.9.

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau ;
- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

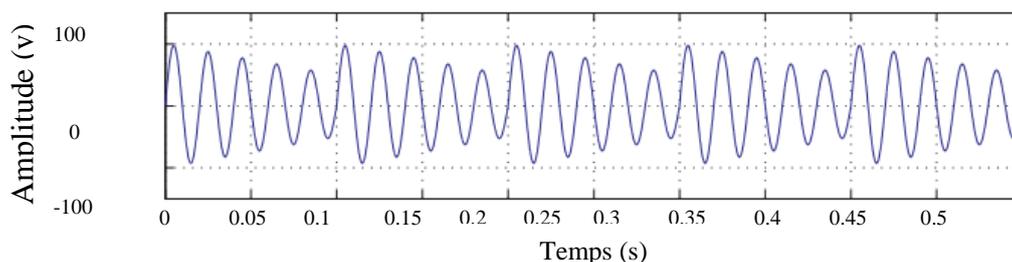


Figure I.9: Fluctuations de tension.

I.3.3.2. Conséquences

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, [1].

I.3.4. variation de la fréquence

I.3.4.1. Définition, origine et conséquences

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.10). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$, [6]

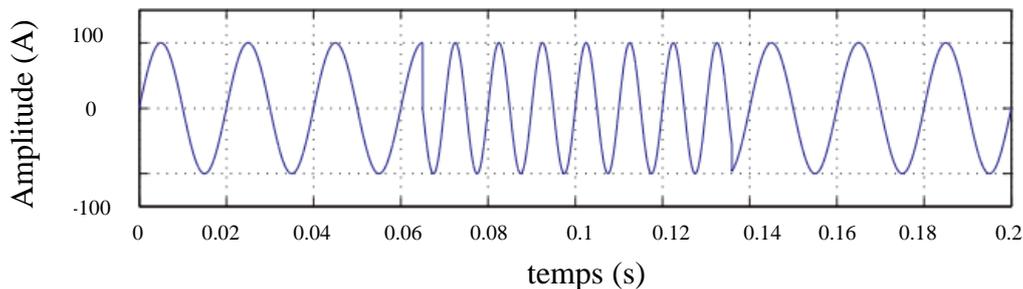


Figure I.10: Variation de fréquence.

I.3.5. Les dissymétries du système de tension appelées déséquilibre

I.3.5.1. Définition, origine et Conséquences

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 I.11).

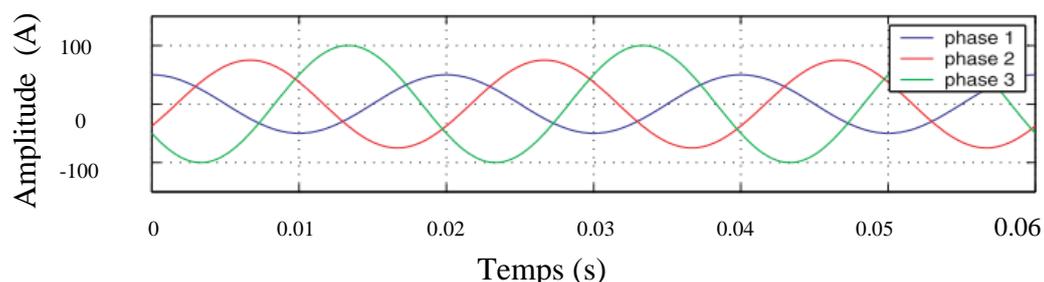


Figure I.11: déséquilibre du système triphasé de tension.

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° . 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.

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.

I.3.6. Harmoniques et interharmoniques

I.3.6.1. Définition et origine des harmoniques

La distorsion harmonique est un phénomène périodique qui désigne la superposition, sur l'onde fondamentale de 60 Hz, des ondes également sinusoïdales et de fréquences multiples de celle de la fondamentale. La décomposition en série de Fourier d'une onde quelconque permet l'obtention de ses composantes harmoniques comme l'illustre la figure I.12. Néanmoins, des inter-harmoniques ayant des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale peuvent parfois exister. Le rang d'une harmonique est défini comme :

$$T = \frac{f_n}{n} \quad (I.3)$$

Où f_n et f désignent la fréquence de l'harmonique et la fréquence fondamentale, respectivement.

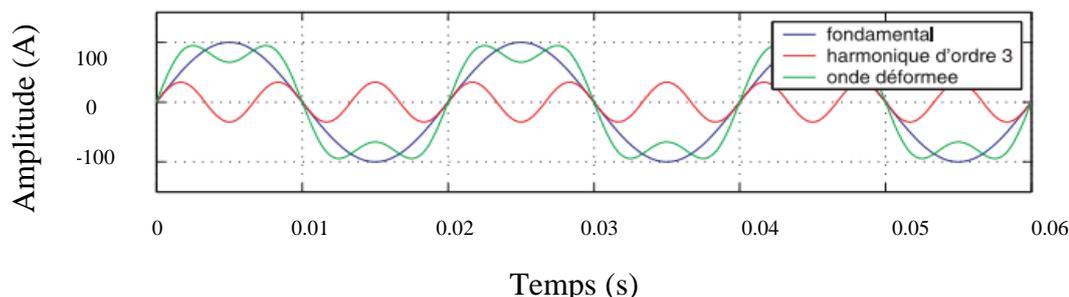


Figure I.12: Les harmoniques

Afin de pouvoir quantifier le contenu harmonique dans un signal $y(t)$ périodique, la Distorsion Harmonique Totale THD est le facteur le plus souvent utilisé. Le THD peut être calculé pour un courant ou une tension comme suit:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} Y_n^2}}{Y_1} \quad (I.4)$$

où Y_n désigne la valeur efficace de l'harmonique de rang n dans le signal $y(t)$ et n_{max} est le rang maximal considéré pour le calcul (généralement $n_{max} = 40$ ou 50).

La valeur efficace Y du signal $y(t)$ est reliée au THD par la relation suivante:

$$Y = \sqrt{\sum_{n=2}^{n_{max}} Y_n^2} = Y_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (I.5)$$

Le taux individuel τ_n de l'harmonique de rang n est défini par:

$$\tau_n = \frac{Y_n}{Y_1} \quad (I.6)$$

Pour une même valeur efficace, les formes d'ondes peuvent être différentes. Par conséquent, un facteur permettant de caractériser la forme d'onde est le facteur de crête, et il est défini comme le rapport de la valeur crête du signal sur sa valeur efficace :

$$F_{cr} = \frac{\hat{y}}{Y} \quad (I.7)$$

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques: appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc. Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par: un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'interharmoniques.

I.3.6.2. Interharmoniques

Les interharmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entier de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande.

1.3.7. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique, [1]

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

Ceci suppose trois éléments:

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

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

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

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

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

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

- Du niveau de performance souhaité:

Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairages et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale...)

- Des conséquences financières du dysfonctionnement:

Tout arrêt non programmé, même très court, de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie...) conduit à une perte ou à une production de mauvaise qualité.

- Du temps de retour sur investissement souhaité:

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

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

I.3.7.1. Non symétrie (Déséquilibres) de la tension

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

- Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases,
- Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles,
- Prévoir une protection adaptée des machines.
- Augmentation de la puissance de court-circuit,
- Dispositif de rééquilibrage,
- Modification de l'architecture du réseau
- Compensation de la puissance réactive,

I.3.7.2. Creux de tension et coupures

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension qui sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces perturbations, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de non symétrie de tension.

Quant à la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique.

Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

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

leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

I.3.7.3. Harmoniques

Trois orientations sont possibles pour les supprimer, ou au moins réduire leur influence:

a- Réduction des courants harmoniques générés:

- Inductance de ligne;
- Utilisation de redresseurs dodécaphasés;
- Appareils à prélèvement sinusoïdal.

Cette méthode consiste à utiliser des convertisseurs statiques dont l'étage redresseur exploite la technique de commutation MLI qui permet d'absorber un courant sinusoïdal.

b- Modification de l'installation:

- Immuniser les charges sensibles à l'aide de filtres;
- Augmenter la puissance de court-circuit de l'installation;
- Déclasser des équipements;
- Confiner les charges polluantes.

En premier, il faut raccorder les équipements sensibles aussi près que possible de leur source d'alimentation. Ensuite, il faut identifier puis séparer les charges polluantes des charges sensibles, par exemple en les alimentant par des sources séparées ou par des transformateurs dédiés. Tout cela en sachant que les solutions qui consistent à agir sur la structure de l'installation sont, en général, lourdes et coûteuses.

- Protections et surdimensionnement des condensateurs.

c- Filtrage:

- Le filtrage passif;
- Le filtrage actif;
- Le filtrage hybride.

-Cas particulier des disjoncteurs:

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

- Le déclassement:

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

I.3.7.4. 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.

I.3.7.4.1. 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.

I.3.7.4.2. 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

I.3.7.4.3. 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.

I.3.7.5. Fluctuations de la tension

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

- Changer de mode d'éclairage: Les lampes fluorescentes ont une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence;

- Installer une alimentation sans interruption: Elle peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés ;

- Modifier le perturbateur: Le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités;

- Modifier le réseau:

Augmenter la puissance de court circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point d'alimentation;

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.

Conclusion

Les problèmes de la qualité de l'énergie 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 pu le constater, les creux de tension, les harmoniques et le non symétrie (déséquilibre) de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application: de l'inconfort à la perte de l'outil de production, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, voire même à la mise en danger des personnes.

En dernière analyse, tout électricien est obligé aujourd'hui à connaître les différentes perturbations de la qualité d'énergie, soit pour prendre les bonnes dispositions lors de l'installation de matériels pollueurs, soit pour concevoir une installation nouvelle en toute connaissance de cause.

Chapitre II

Méthodes d'analyse des perturbations électriques

Méthodes d'analyse des perturbations électriques

II.1. Introduction

L'analyse de la qualité de l'énergie électrique est au cœur des préoccupations des distributeurs et exploitants des réseaux de distribution de l'énergie électrique. Une multitude de paramètres à surveiller pour analyser la qualité du réseau électrique. L'évaluation de la qualité de l'énergie électrique nécessite la mesure et l'analyse de la tension délivrée aux clients. Des paramètres tels que : tension, amplitude, flicker, harmoniques et déséquilibre décrivent la forme d'onde de la tension et donnent d'importantes informations sur l'efficacité de l'installation électrique qui a été analysée. Une mauvaise qualité d'énergie peut affecter les installations électriques de différentes manières et peuvent causer des problèmes significatifs au niveau de l'installation et des équipements électriques qui lui sont connectés. Plusieurs séries de normes internationales existent actuellement. Elles définissent non seulement le niveau minimal de qualité d'énergie requis mais aussi comment mesurer les différents paramètres électriques permettant de l'évaluer.

II.2. Analyse de la qualité de l'énergie électrique par la transformation du vecteur d'espace

II.2.1. Transformation de vecteur d'espace,

II.2.1.1. Un bref historique

La transformation du vecteur d'espace est dérivée de celle en composantes symétriques également appelée transformation de Fortescue, [5].

Les composantes symétriques ont été introduites en 1918 par Fortescue. La transformation de Fortescue, applicable aux phaseurs des fonctions sinusoïdales, permet l'analyse des systèmes triphasés asymétriques sous conditions sinusoïdales. Plus tard, Lyon reprend la transformation de Fortescue et la modifie de manière à être applicable à des grandeurs dépendant du temps, quelles que soient les conditions (sinusoïdales ou non):

$$\begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_i(t) \\ x_0(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Où $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, j étant la racine complexe de -1. Le coefficient de normalisation $\frac{1}{3}$ est choisi de manière à conserver les amplitudes entre les systèmes triphasés avant et après transformation.

Si les grandeurs du système de départ $x_a(t)$, $x_b(t)$ et $x_c(t)$ sont à valeurs réelles, les composantes directe et inverse de la transformation de Lyon $x_d(t)$ et $x_i(t)$ sont complexes conjuguées l'une de l'autre. Ces grandeurs portent alors la même information et sont redondantes. En effet, pour décrire complètement les trois grandeurs scalaires réelles du système triphasé d'origine, seule une grandeur scalaire complexe et une grandeur scalaire réelle suffisent.

Par la suite, la matrice de transformation de Lyon a été modifiée par Clarke pour éviter la redondance précédente:

$$\begin{bmatrix} x_\alpha(t) \\ x_\beta(t) \\ x_0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

La matrice obtenue est cette fois-ci à valeurs réelles, tout comme les trois composantes du système triphasé transformé

$x_\alpha(t)$, $x_\beta(t)$ et $x_0(t)$. Ses deux premières composantes forment le vecteur d'espace:

$\vec{x}(t) = x_\alpha(t) + jx_\beta(t)$, et la troisième représente la composante homopolaire. La transformation du vecteur d'espace peut également être représentée sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \vec{x}(t) \\ x_0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & j\frac{2\pi}{3} & j\frac{4\pi}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

II.2.1.2. Caractéristiques du vecteur d'espace en cas de perturbations

II.2.1.2.1. Perturbations au niveau du fondamental

En ne considérant que le fondamental de pulsation ω , les grandeurs d'un système triphasé sont supposées être de forme sinusoïdale et de pulsation ω . On peut donc représenter chacune de ces grandeurs par la somme de deux phaseurs de pulsation $\pm\omega$ en appliquant la formule d'Euler. Par exemple, on obtient pour la phase a :

$$x_a(t) = X_a \cos(\omega t + \varphi_a) = \left(\frac{X_a}{2} e^{j\varphi_a}\right) e^{j\omega t} + \left(\frac{X_a}{2} e^{-j\varphi_a}\right) e^{-j\omega t} \quad (\text{II.4})$$

Représentés dans le plan complexe, ces phaseurs tournent à la même vitesse angulaire ω , mais dans un sens opposé. Le vecteur d'espace étant une fonction linéaire des trois grandeurs de phase, il peut également être présenté par la somme d'un phaseur tournant dans le sens trigonométrique et d'un autre tournant dans le sens inverse:

$$\vec{x}(t) = x_p(t)e^{j\omega t} + x_n(t)e^{-j\omega t}, \quad (\text{II.5})$$

Où $x_p = |x_p|e^{j\varphi_p}$ et $x_n = |x_n|e^{j\varphi_n}$.

Dans le cas général où les deux phaseurs ont des amplitudes et des phases différentes, le vecteur d'espace prend la forme d'une ellipse dans le plan complexe (voir figure II.1.a) avec paramètre:

$$r_{maj} = |x_p| + |x_n|, \quad r_{min} = \left| |x_p| - |x_n| \right|, \quad \varphi_{inc} = \frac{1}{2}(\varphi_p + \varphi_n); \quad (\text{II.6})$$

Si l'amplitude de l'un des deux phaseurs est nulle, le vecteur d'espace suit alors la forme d'un cercle dans le plan complexe.

Dans la suite, la représentation du vecteur d'espace dans le plan complexe est utilisée pour l'analyse des perturbations au niveau du fondamental. On montre en particulier que les paramètres de la forme parcourue par le vecteur d'espace ainsi que ceux de la composante homopolaire permettent de classifier et de caractériser complètement ce type de perturbations.

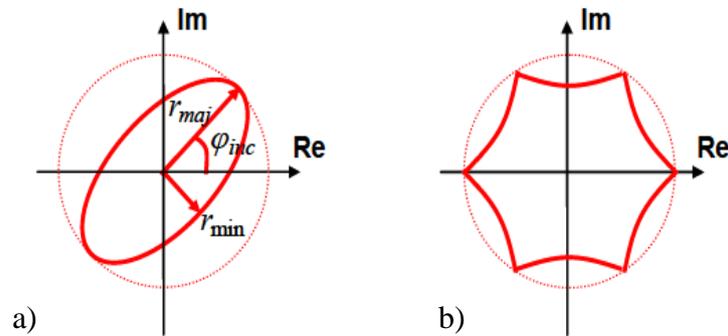


Figure II.1: Vecteur d'espace dans le plan complexe en cas de perturbations au niveau du fondamental (a) et en cas de perturbations harmoniques (b)

II.2.1.2.2. Perturbations harmoniques

Les harmoniques provoquent des déformations caractéristiques de la forme du vecteur d'espace dans le plan complexe (figure II.1.b) et/ou des modifications de la composante homopolaire.

Dans le cas de perturbations harmoniques, le vecteur d'espace peut être exprimé sous la forme d'une somme infinie de phaseurs tournant à la fréquence fondamentale $\pm\omega$ et à ses multiples $\pm k\omega$:

$$\vec{x}(t) = \sum_{k=0}^{+\infty} [x_{pk}(t)e^{jk\omega t} + x_{nk}(t)e^{-jk\omega t}] \quad (\text{II.7})$$

Où k est le rang des harmoniques présents dans les grandeurs de phase.

La composante homopolaire peut quant à elle être représentée sous la forme classique d'une transformée de Fourier.

II.2.2. Analyse des perturbations au niveau du fondamental

II.2.2.1. Creux de tension

Les creux de tension modifient le vecteur d'espace et/ou la composante homopolaire. Ainsi, dans le cas d'un creux de tension triphasé et équilibré, le vecteur d'espace prend la forme d'un cercle de rayon inférieur à la tension nominale. Pour un creux de tension non équilibré, le vecteur d'espace suit la forme d'une ellipse dans le plan complexe. Par exemple, le creux de tension de la figure II.2.a se caractérise par une chute de tension sur la phase a, les deux autres phases n'étant pas modifiées. Le vecteur d'espace correspondant prend la forme d'une ellipse dans le plan complexe (figure II.2.b).

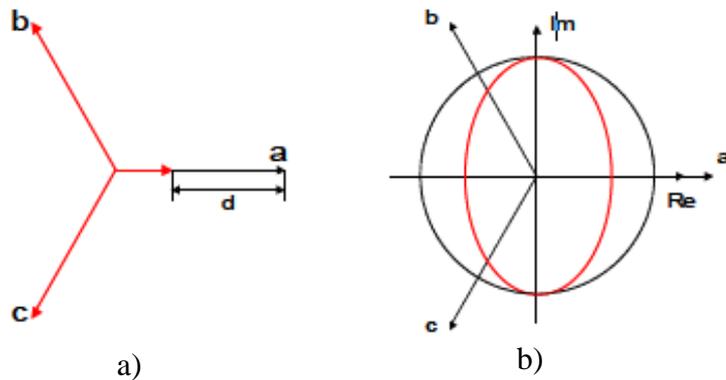


Figure II.2: a) Creux de tension monophasée

b) vecteur d'espace correspondant représenté dans le plan complexe

II.2.2.2. Surtensions / Surintensités

Des surtensions peuvent également être provoquées par déclenchement de charges importantes, mauvais fonctionnement de régulateurs de tensions, résonance et manœuvres. Ces perturbations ne se caractérisent pas par un déplacement du neutre et de ce fait, leur vecteur d'espace modifie sa forme dans le plan complexe.

Lorsque les trois phases sont affectées par une surtension de même amplitude, le vecteur d'espace prend la forme d'un cercle dans le plan complexe dont le rayon devient supérieur à la tension nominale. Si les surtensions n'affectent qu'une ou deux phases, le vecteur d'espace prend la forme d'une ellipse. L'inclinaison et le grand axe de l'ellipse indiquent respectivement les phases en surtension et leur amplitude.

Les surintensités dans les systèmes triphasés doivent principalement leur origine à des courts-circuits. Elles introduisent les mêmes modifications dans le vecteur d'espace et la composante homopolaire que les surtensions et en conséquence, elles peuvent être analysées de manière analogue.

II.2.2.3. Déséquilibre

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. Les déséquilibres sont généralement dus à des charges asymétriques : les charges actives sont la cause principale des amplitudes différentes et les charges réactives entraînent des décalages de phase s'éloignant des 120° idéaux.

Le déséquilibre d'un système triphasé est quantifié par le facteur de déséquilibre, dont la définition pour des mesures entre phase et neutre ou phase et terre est la suivante:

$$V_u = \left| \frac{V_a + a^2 V_b + a V_c}{V_a + a V_b + a^2 V_c} \right| \times 100\% \quad (\text{II.8})$$

Où V_a , V_b , et V_c sont les fondamentaux sous forme complexe des trois grandeurs simples. Ils sont en général estimés par la transformée de Fourier appliquée aux trois grandeurs de phase mesurées pour une durée minimale de 8 périodes.

Le facteur de déséquilibre peut également être exprimé en fonction des composantes du vecteur d'espace à la fréquence fondamentale x_n et x_p . En effet, un déséquilibre au niveau de l'amplitude et/ou de la phase des trois grandeurs mesurées a pour effet de modifier la forme du vecteur d'espace et d'introduire dans son spectre une composante à -50Hz. En exprimant les grandeurs triphasées par la formule d'Euler et en appliquant l'équation (II.3), on peut établir une relation entre les trois grandeurs de phase du système triphasé et les phaseurs du vecteur d'espace à la fréquence fondamentale. En effet, pour des mesures entre phase et neutre ou phase et terre, on obtient:

$$\bar{x}_n = \frac{1}{3}(u_a + a^2 u_b + a u_c) \quad x_p = \frac{1}{3}(u_a + a u_b + a^2 u_c), \quad (\text{II.9})$$

Où \bar{x}_n est le complexe conjugué de x_n

En utilisant (II.8) et (II.9), le facteur de déséquilibre devient :

$$u_u = \left| \frac{\bar{x}_n}{x_p} \right| \times 100\% = \left| \frac{\bar{x}_n}{x_p} \right| 100\% \quad (\text{II.10})$$

Le calcul du facteur de déséquilibre par le vecteur d'espace présente l'avantage d'appliquer la transformée de Fourier une seule fois (sur le vecteur d'espace seulement) au lieu de trois (une sur chaque grandeur de phase) dans le cas classique. De plus, on peut étendre cette méthode pour calculer le facteur de déséquilibre en fonction du temps en utilisant non plus une simple transformée de Fourier mais une analyse temps-fréquence du vecteur d'espace. Ceci permettrait en effet d'évaluer ses composantes fondamentales x_n et x_p en fonction de temps et donc de calculer un facteur de déséquilibre dépendant du temps.

II.2.3. Analyse des perturbations harmoniques

II.2.3.1. Harmoniques

Les harmoniques peuvent être analysés par les spectres du vecteur d'espace et de la composante homopolaire. Le vecteur d'espace est une grandeur complexe et se caractérise par un spectre non symétrique par rapport à l'axe des ordonnées (les composantes harmoniques situées sur les fréquences négatives et positives n'ont pas le même module).

Selon leur rang n et leur répartition sur les trois phases, les harmoniques sont situés dans le spectre de la composante homopolaire et/ou dans le spectre du vecteur d'espace à des fréquences bien particulières.

En effet, lorsque les harmoniques sont repartis de manière uniforme sur les trois phases, ils forment des systèmes triphasés purement directs, inverses ou homopolaires en fonction de leur rang. Ainsi, les harmoniques de rang $3n - 1$ (2, 5, 8, 11, etc.) forment des systèmes inverses et en conséquence apparaissent seulement pour les fréquences négatives du vecteur d'espace. Les harmoniques de rang $3n + 1$ (1, 4, 7, etc.) forment des systèmes directs et apparaissent uniquement pour les fréquences positives du vecteur d'espace. Les harmoniques de rang $3n$ forment des systèmes homopolaires et de ce fait n'apparaissent que sur le spectre de la composante homopolaire. De plus, l'amplitude des harmoniques détectés dans le spectre du vecteur d'espace ou celui de la composante homopolaire est égale à l'amplitude des harmoniques dans les trois grandeurs de phase.

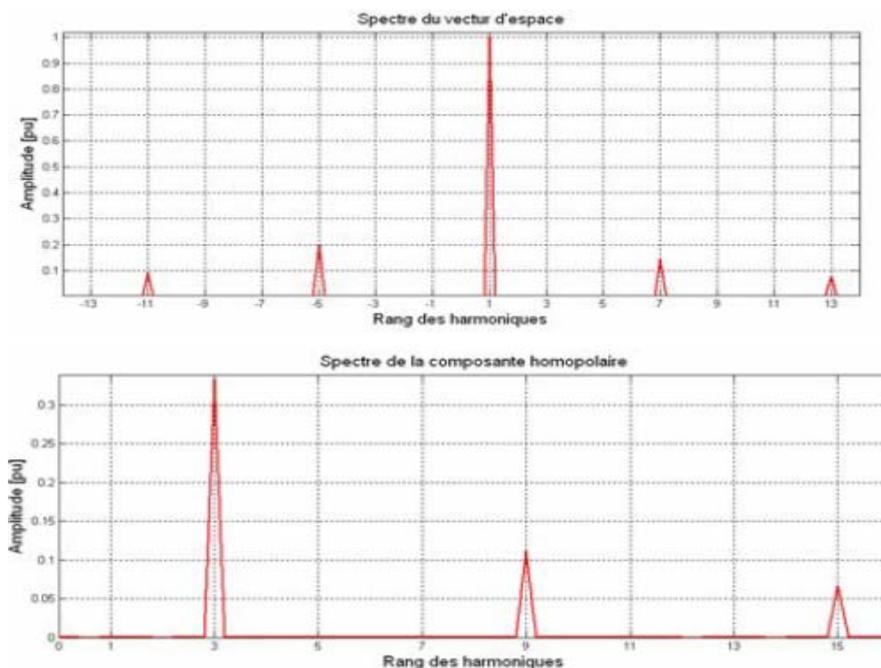


Figure II.3: Spectre du vecteur d'espace et de la composante homopolaire pour un système triphasé équilibré de trois signaux carrés déphasés de $\pm 120^\circ$

Pour illustrer la répartition des harmoniques dans le spectre du vecteur d'espace et celui de la composante homopolaire, l'exemple d'un système triphasé formé par trois signaux carrés de même amplitude et déphasés de $\pm 120^\circ$ est considéré. Le spectre de chaque grandeur de phase se caractérise donc par la présence d'harmoniques impairs, et dont l'amplitude est inversement proportionnelle au rang de l'harmonique considéré. Les harmoniques de rang $3n + 1$ (1, 7, 13, etc.) et de rang $3n - 1$ (5, 11, etc.) sont situés respectivement sur les fréquences positives et négatives du spectre du vecteur d'espace, alors que les harmoniques de rang $3n$ (3, 9, 15, etc.) ne sont présents que dans le spectre de la composante homopolaire (voir figure II.3). De plus, on peut remarquer que les amplitudes des harmoniques sont conservées par la transformation du vecteur d'espace.

Lorsque les harmoniques ne sont plus repartis uniformément sur les trois phases, ils ne forment plus des systèmes purement directs, inverses ou homopolaires. En conséquence, des composantes harmoniques de même rang apparaissent à la fois du côté des fréquences positives et négatives de spectre du vecteur d'espace, ainsi que sur le spectre de la composante homopolaire.

Ainsi, les harmoniques de rang $3n - 1$, lorsqu'ils sont repartis de manière non uniforme sur les trois phases, se caractérisent par l'apparition d'une composante principale et de deux composantes supplémentaires dans les spectres du vecteur d'espace et de la composante homopolaire. La composante principale est située dans les fréquences négatives du vecteur d'espace, et son amplitude est égale à la moyenne des amplitudes des harmoniques des trois phases. Les deux composantes supplémentaires apparaissent sur les fréquences positives du vecteur d'espace et sur le spectre de la composante homopolaire, et se caractérisent par les mêmes amplitudes et phases. Elles dépendent du degré du déséquilibre et peuvent être utilisées pour calculer un facteur de déséquilibre caractéristique à chaque harmonique.

De manière analogue, les harmoniques de rang $3n + 1$ et $3n$ sont représentés par une composante principale qui indique l'amplitude moyenne des harmoniques sur les trois phases, et par deux autres composantes de même rang indiquant le degré de déséquilibre entre les harmoniques des trois phases.

II.3. Analyse des creux de tension, coupures brèves et surtensions

II.3.1. Analyse par l'estimation de l'amplitude

Actuellement, la plupart des appareils de mesure estiment l'amplitude des perturbations électriques par l'intermédiaire de la valeur efficace du signal analysé. Des techniques alternatives

pour quantifier l'amplitude du signal, basées sur l'estimation de son enveloppe ou de son fondamental, sont également présentées dans cette partie.

Volontairement, nous nous limiterons aux signaux sinusoïdaux, dont la période fondamentale sera notée T_n dans la suite du document. Ainsi, chacune de ces techniques cherche à estimer la même amplitude du signal.

II.3.1.1. Valeur efficace

Pour déterminer en temps-réel l'amplitude d'un signal sinusoïdal, la valeur efficace est estimée à chaque échantillon sur une fenêtre glissante. La longueur de cette fenêtre est en général un multiple entier d'une demi-période. Des fenêtres de longueur inférieure ou non multiple d'une demi-période introduisent des oscillations dans l'amplitude estimée.

Pour une fenêtre glissante de longueur kT_0 où k est un rationnel positif, la valeur efficace du signal $x(t)$ est déterminée par:

$$x_{eff}(t) = \sqrt{\frac{1}{kT_0} \int_{t-\frac{kT_0}{2}}^{t+\frac{kT_0}{2}} x(\tau)^2 d\tau} \quad (\text{II.11})$$

L'amplitude estimée du signal supposé sinusoïdal est alors proportionnelle à sa valeur efficace estimée:

$$A_x(t) = \sqrt{2}x_{eff}(t) \quad (\text{II.12})$$

L'estimation de l'amplitude par la valeur efficace est traditionnellement utilisée dans les appareils de mesure car cette technique est facilement réalisable et fiable dans le cas sinusoïdal pur. Cependant, elle n'est pas très performante en cas de présence d'harmoniques ou de bruit qui introduisent des erreurs dans l'amplitude estimée. Elle présente également l'inconvénient de ne pas bien refléter les variations brusques de l'amplitude, qui sont caractéristiques des perturbations dues aux courts-circuits.

En effet, si l'amplitude du signal est estimée sur une fenêtre glissante d'une période, une variation instantanée de l'amplitude réelle du signal se traduit par une transition de durée une période dans la valeur efficace estimée. Si on utilise une longueur de fenêtre d'une demi-période, les variations brusques de l'amplitude réelle sont mieux reflétées, néanmoins l'amplitude estimée présente des oscillations importantes.

II.3.1.2. Signal analytique

Le signal analytique est utilisé pour estimer l'amplitude, la phase et la fréquence instantanées d'un signal sinusoïdal en fonction du temps. Le signal analytique d'un signal $x(t)$

est défini comme un signal à valeurs complexes de partie réelle (t) , et de partie imaginaire la transformée de Hilbert de $x(t)$ [12]:

$$x_a(t) = x(t) + j^* \text{hilbert}(x(t)). \quad (\text{II.13})$$

La transformation de Hilbert du signal $x(t)$ est égale au même signal déphasé de $\frac{\pi}{2}$, ou signal en quadrature. Ainsi par exemple, la transformée de Hilbert d'un cosinus est un sinus.

Le signal analytique d'un signal de forme sinusoïdale $x(t) = A(t) \cos(\omega t + \varphi)$ est donc une exponentielle complexe de même fréquence, même amplitude et même phase:

$$x(t) = A(t)e^{j(\omega t + \varphi)}. \quad (\text{II.14})$$

La valeur absolue du signal analytique constitue finalement une estimée de l'amplitude instantanée du Signal $A(t) = |x_a(t)|$.

Par rapport aux autres techniques d'estimation d'amplitude, le signal analytique présente l'avantage de détecter instantanément les perturbations au niveau de l'amplitude et d'estimer avec une meilleure précision leur durée. Cependant l'amplitude estimée par le signal analytique peut présenter un caractère bruité non négligeable.

Cette technique est intéressante dans le cas de perturbations de très courte durée (moins de deux périodes fondamentales). En effet, ces perturbations ne sont pas détectées ou leur amplitude et leur durée ne sont pas correctement estimées par les autres techniques d'estimation du fait des fenêtres glissantes utilisées.

II.3.1.3. Composante fondamentale

L'amplitude d'un signal peut également être estimée par la composante fondamentale définie par:

$$x_{fond}(t) = \frac{2}{T_0} \left| \int_{t-\frac{T_0}{2}}^{t+\frac{T_0}{2}} x(\tau) e^{-j\frac{2\pi}{T}\tau} d\tau \right| \quad (\text{II.15})$$

Cette technique présente l'avantage d'estimer l'amplitude du signal correctement et sans oscillations, même en cas de présence de perturbations harmoniques. Cependant, les variations instantanées dans l'amplitude du signal sont représentées par des transitions d'une période dans l'amplitude du signal estimée par la composante fondamentale, tout comme la méthode basée sur la valeur efficace.

II.3.2. Segmentation

Afin d'analyser une perturbation, celle-ci doit être détectée et isolée. Le processus de décomposition des signaux mesurés en segments constants ou faiblement variables est appelé «segmentation ». Les problèmes de segmentation sont bien connus dans des domaines comme le

traitement du signal et le traitement de l'image, et sont souvent appliqués dans les applications de diagnostic de défauts.

Les méthodes de segmentation peuvent agir dans le domaine temporel, dans le domaine fréquentiel ou bien être basées sur un modèle du signal.

Les méthodes de segmentation dans le domaine temporel utilisent les outils de la décision statistique tels que les tests d'hypothèses séquentiels pour détecter les changements dans les paramètres du signal, [13,14]. Dans notre application, les algorithmes de segmentation seront appliqués à l'amplitude du signal mesuré. On choisira ici la composante fondamentale ou la valeur efficace, car ces deux techniques n'introduisent que peu de bruit dans l'amplitude du signal estimée, et diminuent ainsi le risque de fausses détections et d'erreurs de segmentation.

Dans le domaine fréquentiel, les algorithmes de segmentation sont appliqués aux formes d'onde enregistrées. Le début et la fin de la perturbation sont détectés par l'analyse des modifications dans le spectre du signal. En effet, les perturbations se caractérisent par des sauts dans l'amplitude et la phase des composantes spectrales du signal, et peuvent également être à l'origine de nouvelles composantes spectrales.

Pour ce qui concerne les techniques de segmentation basées sur des modèles, les changements sont détectés par comparaison du signal mesuré avec des modèles du signal préétablis par l'utilisateur. Leur inconvénient majeur est lié au fait que leurs performances dépendent directement de la validité du modèle utilisé.

II.3.3. Méthode des 6 tensions

La méthode des 6 tensions, [15] consiste à comparer l'amplitude des trois tensions simples et des trois tensions composées normalisées. La tension, dont l'amplitude est la plus faible indique la phase ou les phases dont la chute de tension est la plus importante.

Pour illustrer la méthode des six tensions, l'exemple d'un creux de tension mesuré est présenté en figure II.4.a. Les amplitudes des trois tensions simples et des trois tensions composées sont estimées par la composante fondamentale et sont présentées en « pu » à la figure II.4.b. La tension avec la chute de tension la plus importante est V_c , donc le creux de tension mesuré est monophasé avec chute de tension principale sur la phase c.

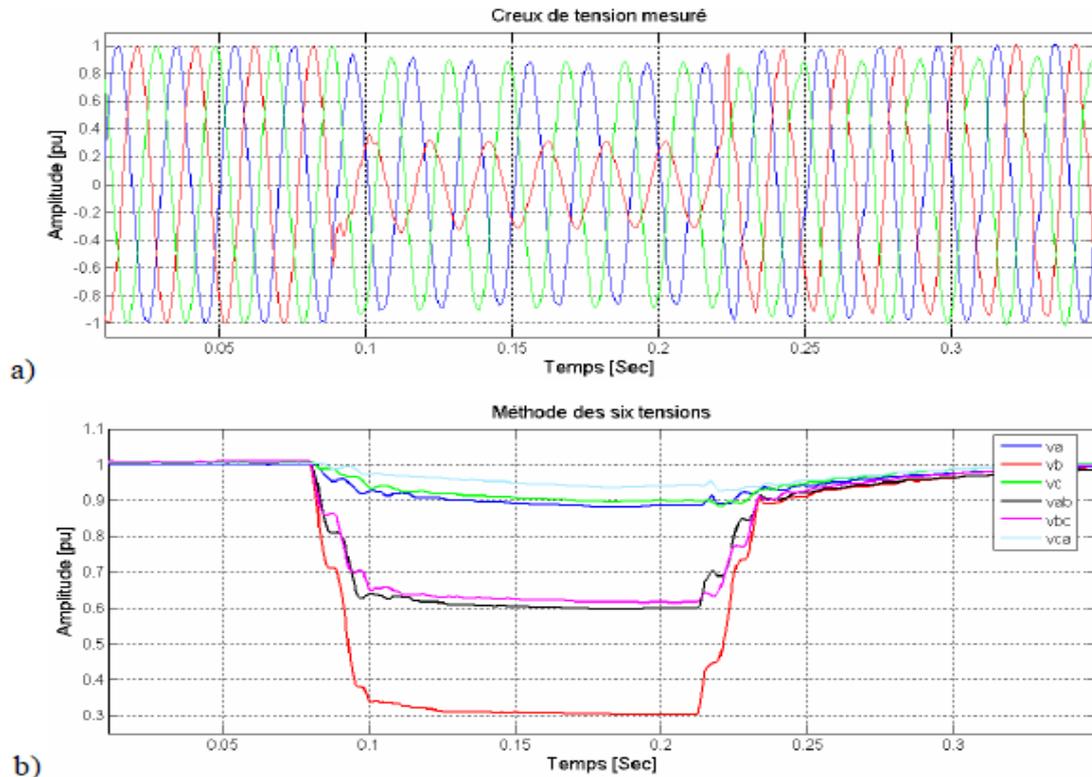


Figure II.4: a) Creux de tension mesurée

b) identification du type de creux par la méthode des six tensions

II.3.4. Méthode des composantes symétriques

La méthode des composantes symétriques détermine [16] le type de creux de tension par une étude dans le plan complexe des tensions directe et inverse. L'impédance directe et inverse sont supposées égales. La tension homopolaire est supposée nulle, car l'objectif de cette méthode est de déterminer la propagation et la conséquence des creux de tension sur les charges et non d'identifier un creux de tension à partir des formes d'ondes enregistrées. Or, la composante homopolaire s'annule à travers la majorité des transformateurs et aux bornes des charges qui sont connectées en triangle ou en étoile non relié à la terre.

Puisque cette méthode analyse les creux de tension tels qu'ils sont subits par les charges, elle est développée et valable seulement pour les creux de tension de type A, C et D.

II.4. Méthodes d'analyse des harmoniques et des déséquilibres

II.4.1. Les harmoniques

L'analyse des signaux non sinusoïdaux et déséquilibrés est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les harmoniques et les composantes symétriques, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés (non sinusoïdaux et déséquilibrés) en composantes idéales et perturbations.

Le concept d'harmonique a été introduit au début du XIX^{ème} siècle par Joseph Fourier, en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquences discrètes. La composante zéro de la série dite de Fourier est la composante continue, tandis que la première composante est appelée composante fondamentale. Dans le cas des systèmes raccordés au réseau, celle-ci est une composante à la fréquence nominale du réseau (50Hz). Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques et sont multiples de la fréquence fondamentale.

II.4.1.1. Série de Fourier

Les séries de Fourier sont un outil de choix pour l'étude des signaux périodiques. Toute fonction périodique peut être écrite comme étant la somme de fonctions élémentaires périodiques.

Un signal $x(t)$ périodique de période fondamentale T_0 peut, sous les conditions de Dirichlet ($x(t)$ borné, continu par morceaux, monotone par morceaux), se décomposer en une série convergente de la forme:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) - b_k \sin(k\omega_0 t)], \quad (\text{II.16})$$

Où $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$ est la pulsation fondamentale du signal. On définit également la fréquence fondamentale du signal par $f_0 = \frac{1}{T_0}$

Ce signal peut de la même manière être représenté par une série de signaux exponentiels complexes:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k e^{jk\omega_0 t}, \quad (\text{II.17})$$

Où $x_k = \langle x \rangle_k e^{jk\omega_0 t}$ est l'harmonique de rang k , de fréquence kf_0 et d'amplitude complexe

$\langle x \rangle_k = |x_k| e^{j\angle x_k}$ Obtenue par l'équation:

$$\langle x \rangle_k = \frac{1}{T_0} \int_{(T_0)} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (\text{II.18})$$

Dans le cas de signaux à valeurs réelles, les coefficients x_k vérifient la propriété:

$x_{-k} = \bar{x}_k$, où \bar{x}_k est le complexe conjugué de x_k . Ceci montre que pour de tels signaux, les harmoniques de fréquence positive ($k > 0$) contiennent la même information que ceux de fréquence négative ($k < 0$) et suffisent pour définir entièrement le signal analysé. Cette propriété n'est plus vraie pour les signaux à valeurs complexes.

II.4.1.2. Transformée de Fourier

Les signaux non périodiques peuvent aussi, sous certaines conditions, se décomposer en une somme d'exponentielles complexes:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \text{ où } X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{II.19})$$

Les conditions suffisantes d'existence de la transformée de Fourier sont également appelées « conditions de Dirichlet » et s'énoncent de la manière suivante:

- le signal est de module intégrable ($\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty$)
- $x(t)$ possède un nombre fini de discontinuités sur tout intervalle fini,
- $x(t)$ possède un nombre fini de maxima et de minima sur tout intervalle fini.

II.4.1.3. Caractérisation

Le taux de distorsion harmonique (THD) est le plus employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal périodique:

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_{eff}} \quad (\text{II.20})$$

Où V_{eff} est la valeur efficace du signal analysé, et V_k est son harmonique de rang k .

II.4.2. Les déséquilibres

L'outil principal pour étudier les déséquilibres sont Les composantes de Fortescue ou composantes symétriques. Le déséquilibre est quantifié par le facteur de déséquilibre:

$$V_u = \left| \frac{V_a + a^2 V_b + a V_c}{V_a + a V_b + a^2 V_c} \right| \times 100\% \quad (\text{II.21})$$

Où V_u est le facteur de déséquilibre mesuré entre phase et neutre ou phase et terre

Et V_a , V_b , et V_c sont les fondamentaux sous forme complexe ou phaseurs des trois grandeurs simples. Ils sont estimés par transformée de Fourier discrète appliquée aux trois formes d'onde enregistrées.

V_u Peut également s'interpréter comme le rapport entre la composante inverse et la composante directe du système triphasé

$$V_u = \left| \frac{V_i}{V_d} \right| \times 100\% . \quad (\text{II.22})$$

En cas de mesures entre phases, le facteur de déséquilibre prend alors la forme:

$$V_u = \left| \frac{V_{ab} - a V_{bc}}{V_{ab} - a^2 V_{bc}} \right| \times 100\% , \quad (\text{II.23})$$

Où V_{ab} et V_{bc} sont les fondamentaux sous forme complexe ou phaseurs des grandeurs composées correspondantes.

II.5. Méthode d'analyse des variations de tension et de fréquence

La fréquence et l'amplitude des signaux électriques évoluent avec le temps, ce qui fait de ces grandeurs des signaux non-stationnaires. Pour analyser ces variations, les outils temps-

fréquence classiques comme le spectrogramme, ou la transformée de Wigner-Ville peuvent donc être utilisés. Ces outils permettent une localisation et une visualisation à la fois temporelle et fréquentielle du signal. Le temps est généralement représenté sur l'axe des abscisses et la fréquence sur l'axe des ordonnées, alors que la puissance du signal est présentée en couleur ou en niveaux de gris dans ce graphique à deux dimensions.

II.5.1. Représentation statistique

Les variations des grandeurs électriques sont le plus souvent aléatoires et de ce fait, elles peuvent être considérées et analysées comme des variables aléatoires. Comme nous allons le voir, plusieurs grandeurs mathématiques ont été définies afin d'étudier et caractériser les variables aléatoires.

II.5.2. Fonction de répartition, densité de probabilité et histogramme

Une grandeur permettant de caractériser totalement une variable aléatoire X est sa fonction de répartition F_X , définie comme la probabilité que X prenne une valeur inférieure ou égale à une valeur réelle x :

$$F_X = Prob(X \leq x) \quad (\text{II.24})$$

De cette fonction de répartition découle directement la définition de la densité de probabilité p_x de la variable aléatoire X :

$$p_X(x) = prob(x < X < x + dx) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (\text{II.25})$$

De plus, on montre que p_X est à valeurs positives ou nulles sur P et vérifie la relation $\int p_X(x) dx = 1$.

Les deux grandeurs précédentes contiennent toute l'information disponible sur la variable aléatoire X , et permettent de la caractériser parfaitement. Il est donc très intéressant de chercher à les estimer simplement. Un moyen simple d'estimer la densité de probabilité p_X d'une variable aléatoire est de mesurer son histogramme et de le normaliser pour que son intégrale soit égale à 1. Un estimateur de la fonction de répartition F_X en découle alors directement, en calculant les sommes cumulées (ou l'intégrale numérique) de cet histogramme normalisé.

On est donc sûr de caractériser complètement une variable aléatoire en utilisant son histogramme, mais il est alors nécessaire de stocker les données numériques sous forme vectorielle.

II.5.3. Moments statistiques: espérance, variance et écart type

On préfère parfois utiliser des grandeurs scalaires permettant d'isoler certaines caractéristiques bien particulières des variables aléatoires: les moments statistiques. Le moment statistique d'ordre n d'une variable aléatoire X est défini par:

$$E(X^n) = \int x^n p_x(x) dx \quad (\text{II.26})$$

Il faut noter que cette intégrale devient une somme discrète dans le cas d'une variable aléatoire discrète.

Les moments les plus utilisés sont ceux d'ordre 1 et 2, surtout dans le cas gaussien où les moments d'ordre supérieur à 2 n'apportent aucune information supplémentaire.

La valeur moyenne de la variable aléatoire analysée est caractérisée par son moment d'ordre 1, obtenu en prenant $n = 1$ dans l'équation (II.26).

Afin de caractériser ses fluctuations ou sa dispersion autour de sa valeur moyenne, on utilise un moment d'ordre 2 particulier, la variance. Celle-ci est la valeur moyenne des carrés des écarts à la moyenne, où le moment d'ordre 2 auquel on a enlevé la contribution de la moyenne :

$$Var(X) = E \left[(X - E(X))^2 \right] = E(X^2) - E^2(X) \quad (\text{II.27})$$

Enfin, afin de disposer d'une grandeur caractérisant les fluctuations, et homogène à une amplitude, on définit l'écart-type, qui est la racine de la variance:

$$\sigma_X = \sqrt{Var(X)} \quad (\text{II.28})$$

Les estimateurs des grandeurs précédentes, appelés moyenne et variance empirique, sont donnés par les équations suivantes dans le cas de N réalisations $x_i (i = 1, \dots, n)$ d'une variable aléatoire X .

Moyenne empirique:

$$\mu_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{II.29})$$

Variance empirique:

$$\sigma_{X^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_X)^2 \quad (\text{II.30})$$

Ces différentes grandeurs scalaires permettent donc également de caractériser la variable aléatoire étudiée, mais d'une manière moins complète que les grandeurs vectorielles définies au paragraphe II.3.2.1.

II.6. L'amélioration de la qualité de l'énergie, [11]

Autres aspects importants pour l'analyse de la qualité de l'énergie. Dans ce paragraphe, les techniques d'amélioration de la qualité sont analysées.

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

La nécessité d'amélioration de la qualité dans nos réseaux est aujourd'hui un aspect très localisé qui concerne des zones et des charges très spécifiques. Néanmoins, elle peut devenir plus fréquente dans l'avenir à cause de l'évolution des charges (charges plus polluantes, plus sensibles, charges actives ou générateurs intermittents, etc.). Ceci n'est pas applicable aux pays en voie de développement où non seulement la qualité de la fourniture est très inférieure à celle de nos réseaux, mais aussi l'exigence de qualité est aussi beaucoup plus petite, car il n'y a pas autant de procédés sensibles ; par ailleurs, les utilisateurs se sont adaptés aux perturbations

Donc l'objectif de l'amélioration de la qualité est l'élimination ou la minimisation des perturbations agissant sur les charges, là où le niveau de qualité n'est pas suffisamment élevé pour une charge donnée, donc quand les coûts et les inconvénients de son dysfonctionnement sont inacceptables.

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

En ce qui concerne la partie technique de l'étude, il est nécessaire d'identifier la nature des perturbations, leurs caractéristiques et leur origine, pour ensuite pouvoir proposer différentes méthodes d'amélioration. Il n'y a pas une solution standard pour tous les problèmes de fourniture et il faut choisir les mieux adaptées pour chaque application, en prenant en compte certains critères techniques et économiques.

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

- Stratégies de prévention des perturbations.
- Stratégies de minimisation des effets des perturbations sur la charge.

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

II.6.1. Stratégies de prévention des perturbations

Dans le cas des courts-circuits, il est impossible de les éliminer complètement, mais on peut essayer de réduire leur quantité et leur durée au maximum:

- Remplacer les lignes aériennes par des lignes souterraines, qui ont une incidence inférieure mais un temps de réparation supérieure.
- Utiliser des conducteurs isolés pour les lignes aériennes.
- Augmenter le niveau d'isolation pour éviter les courts-circuits produits par les surtensions et la dégradation des isolants.
- Augmenter la fréquence et l'intensité des inspections et de l'entretien, comme par exemple la taille des arbres qui sont aux environs des lignes.
- Réduction du temps d'élimination de défaut (qui tient compte du temps de détection et d'ouverture du circuit), pour ainsi réduire la durée des perturbations, tout en évitant une dégradation de la sélectivité du système de protection.

En ce qui concerne les perturbations provoquées par les courants absorbés par les charges, pour pouvoir prévenir leurs effets, il faut éviter l'injection de courants perturbants. Ainsi on peut éviter leur circulation par le réseau en modifiant les caractéristiques du courant absorbé ou en compensant la composante perturbatrice de ce courant:

- Dans quelques cas on peut modifier les caractéristiques du courant absorbé pour ainsi éviter l'injection des courants perturbateurs au réseau. Ainsi dans le cas du démarrage des moteurs, on peut appliquer une tension d'alimentation qui augmente graduellement jusqu'à arriver à la tension nominale, (avec un gradateur, un dispositif de variation de vitesse etc.) et éviter la surintensité au démarrage. Dans le cas des systèmes qui absorbent des harmoniques, on peut modifier la topologie de connexion au réseau de façon à modifier les caractéristiques du

courant absorbé sans dégrader les performances de la charge (par exemple en remplaçant les redresseurs non contrôlés par de systèmes à prélèvement sinusoïdal).

- Quand il n'est pas possible de changer les caractéristiques du courant de charge, on peut compenser sa composante perturbatrice pour ainsi éviter son injection au réseau. Ceci peut être réalisé en ajoutant un élément shunt à la charge qui pourra avoir une double fonctionnalité: offrir une voie d'impédance minimum pour les perturbations (de façon à les faire circuler par cette voie alternative et non par le réseau) et/ou générer localement les composantes perturbatrices que nécessite la charge (ainsi cette source alternative remplace le réseau comme source des composantes perturbatrices).

II.6.2. Stratégies de minimisation des effets des perturbations sur la charge

Dans quelques cas, il n'est pas possible ou il est trop onéreux d'éviter la génération et l'injection sur le réseau des grandeurs perturbatrices. Une solution plus intéressante est alors la minimisation de leurs effets sur la charge. Ceci peut être interprété par un double point de vue, car on peut augmenter le niveau d'immunité de la charge ou bien éviter que les perturbations réseau arrivent jusqu'à la charge.

Une manière d'optimiser les coûts est de faire la séparation entre les charges ou procédés qui sont vraiment sensibles aux perturbations des parties qui ne le sont pas.

On peut protéger la charge en utilisant deux approches différentes, le remplacement ou la compensation:

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

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

II.6.3. Le rôle de l'Electronique de Puissance dans l'amélioration de la QdE

L'électronique de puissance (EP) peut jouer un rôle très important dans la plupart des actions d'amélioration de la QdE. Ainsi, elle peut être présente dans toutes les techniques d'amélioration basées sur des actions sur la charge (modification des caractéristiques et

compensation des perturbations) et de minimisation des effets des perturbations (remplacement et compensation des perturbations).

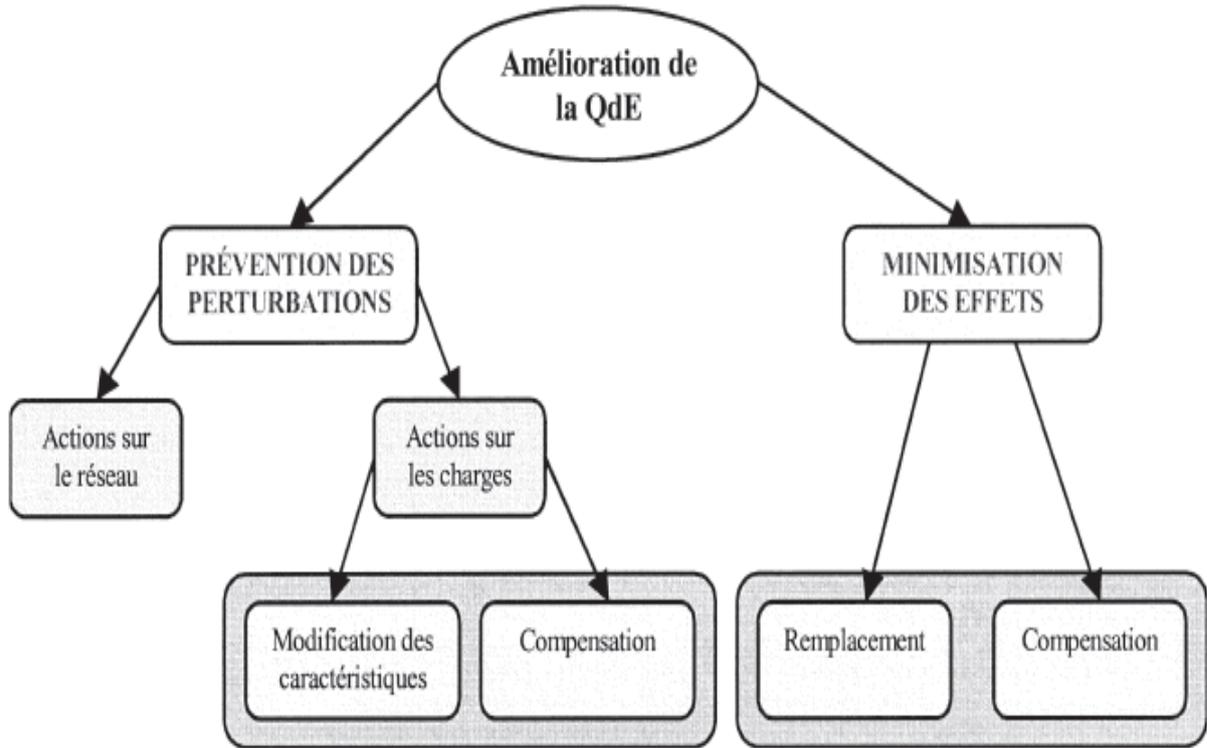


Figure 5: Application de l'EP pour l'amélioration de la qualité d'énergie.

Ainsi dans le cas de la modification des caractéristiques de la charge, l'EP permet une alimentation graduelle des moteurs par exemple, de façon à éviter les surintensités au démarrage ou même de modifier la façon d'absorber de l'énergie du réseau, en remplaçant une source d'harmoniques importante comme un redresseur à diodes par une autre topologie à prélèvement sinusoïdal. En ce qui concerne la minimisation des effets par remplacement des sources défaillantes, l'EP peut agir de deux façons : comme système d'alimentation sans interruption (ASI) ou bien comme interrupteur statique de transfert entre lignes (SSTS).

CONCLUSION

Les divers types de perturbations sont en général analysés et quantifiés par des méthodes spécifiques, nécessitant souvent l'utilisation de plusieurs grandeurs différentes. Pour ce qui concerne les perturbations importantes au niveau de l'amplitude (creux de tension, coupures et surtensions), les méthodes d'estimation d'amplitude, de détection, de classification et de caractérisation sont envisagées. Pour ce qui concerne les perturbations au niveau de la forme d'onde (harmoniques), les outils d'estimation (série de Fourier, transformée de Fourier), ainsi que la modélisation des principales sources d'harmoniques dans le domaine fréquentiel sont décrits. Enfin, les techniques d'estimation et de représentation statistique pour les variations de tension et de fréquence sont également présentées.

Lorsque les indices de qualité sont définis et que l'on dispose des méthodes d'analyse et d'évaluation, il est possible de définir des objectifs de qualité et de vérifier leur satisfaction.

Chapitre III

Application de la méthode d'analyse des creux de tension

Application de la méthode d'analyse des creux de tension

III.1. Introduction

Les creux de tension sont normalement provoqués par des courts-circuits (sur une ligne de distribution ou sur le réseau de transport), ou aussi par l'enclenchement d'un grand moteur.

Ce chapitre présente l'application de l'une des méthodes d'analyse des creux de tension qui se caractérisent toutes par des variations importantes de tension. Les coupures et les surtensions se caractérisent par les mêmes méthodes d'analyse que les creux de tension et sont donc rangées dans la même catégorie dans un but de clarté du document. La classification ABC représente le processus d'identification du type de creux de tension à partir des formes d'onde enregistrées. Le type de creux de tension est une caractéristique importante, car elle permet l'identification et la localisation du défaut produit.

Ce chapitre est organisé de la manière suivante: tout d'abord, la méthode de classifications des creux de tension est définit. En suite, les facteurs qui concernent les creux de tension suivie par la mise en équation de la propagation des creux de tension dans les réseaux électrique. Enfin, l'application de la méthode d'analyse de ce type de perturbations.

III.2. Types de creux de tension

D'après la classification des creux de tension universellement reconnue, [17] on distingue 7 principaux types de creux de tension dénotés par les lettres de A à G présentées en figure III.1, 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. Cependant, pour des chutes de tension peu importantes, d peut être considéré identique à la profondeur du creux de tension.

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 III.1.a et le tableau I.2 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.

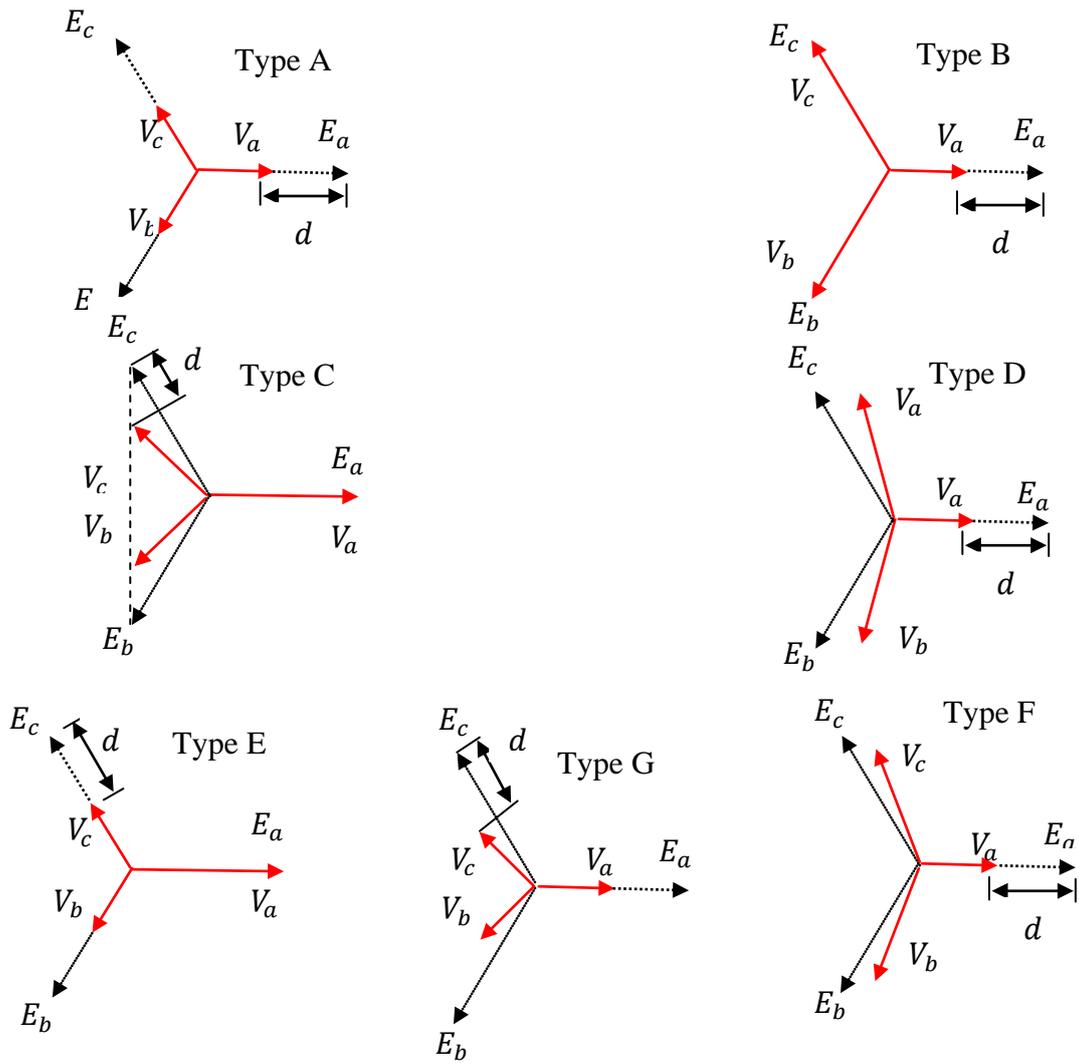


Figure III.1: Les différents types de creux de tension

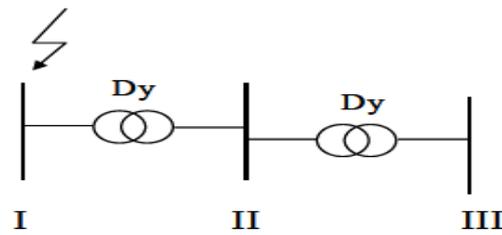


Figure III.1.a : Transformation des types de creux de tension

TABLEAU III.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

Les expressions des tensions pour chaque cas:

Type A:

$$V_a = V \quad , \quad V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad , \quad V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad (\text{III.1})$$

Type B:

$$V_a = V \quad , \quad V_b = -\frac{1}{2}E - \frac{\sqrt{3}}{2}JE \quad , \quad V_c = -\frac{1}{2}E + \frac{\sqrt{3}}{2}JE \quad (\text{III.2})$$

Type C:

$$V_a = E \quad , \quad V_b = -\frac{1}{2}E - \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad , \quad V_c = -\frac{1}{2}E + \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad (\text{III.3})$$

Type D:

$$V_a = V \quad , \quad V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}JE \quad , \quad V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}JE \quad (\text{III.4})$$

Type E:

$$V_a = E \quad , \quad V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad , \quad V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad (\text{III.5})$$

Type F:

$$V_a = V \quad , \quad V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad , \quad V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad (\text{III.6})$$

Type G:

$$V_a = \frac{1}{2}E + \frac{1}{3} \quad , \quad V_b = -\frac{1}{3}E - \frac{1}{6}V - \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad , \quad V_c = -\frac{1}{3}E - \frac{1}{6}V + \frac{\sqrt{3}}{2}JV \quad (\text{III.7})$$

Les tensions avant la défaillance sont indiquées par les lettres E. Les tensions dans les phases en défaut ou entre les phases sont indiquées par les lettres V.

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. 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.

III.3. Les facteurs qui concernent le type de creux de tension

Les facteurs qui influent sur les types de creux de tension:

III.3.1. Types et caractéristiques des défauts

Les creux de tension sont principalement causés par les défauts du système. Chaque type de défaut a un effet différent sur les tensions au point de défaut, qui a ensuite défini les types de creux de tension, [18].

III.3.1.1. Types des défauts

L'existence de défauts multiples, en particulier les défauts monophasés, engendre des phénomènes ou d'autres types de défaut en fonction de la localisation et du temps.

- Défaut double: Ce sont deux défauts d'isolement phase terre simultanés entre deux phases différentes d'un même réseau alimenté par un même transformateur HTB/HTA sur des terres différentes éloignées géographiquement. Les deux défauts peuvent se trouver sur le même

départ HTA ou sur deux départs HTA différents. Les défauts doubles font circuler dans les terres, à l'endroit des deux défauts, des courants élevés, provoquant par la même des montées en potentiel importantes, [18].

- Défaut évolutif: C'est un défaut d'un type donné qui évolue vers un nouveau type dans un temps variable de quelques millisecondes à plusieurs centaines de millisecondes. Les plus fréquents sont:

- Un défaut monophasé qui évolue en défaut polyphasé (bi ou triphasé)
- Un défaut monophasé qui évolue en défaut double.

Les différents types des défauts sont représentés par la figure (III.2)

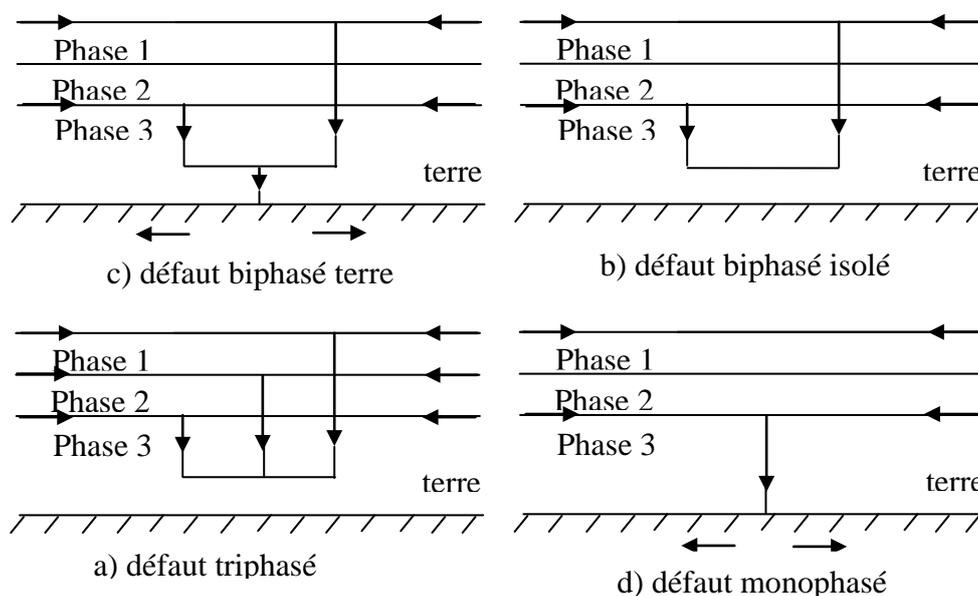


Figure III.2: Différents types de défauts

III.3.1.2. Caractéristiques des défauts

III.3.1.2.a. Caractéristiques des défauts monophasés

- Défaut auto-extincteur: Un défaut auto-extincteur monophasé est un défaut qui s'élimine seul, sans coupure de l'alimentation ou fermeture du disjoncteur shunt.

- Défaut réamorçant: Un défaut réamorçant est un défaut monophasé auto-extincteur, qui réapparaît périodiquement (dans environ 90% de cas, le défaut monophasé auto-extincteur est constitué d'un seul amorçage). Le temps entre deux réamorçages peut varier de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes. Si le temps entre deux réamorçages successifs est inférieur à 200 ms, on considère cette succession de défauts comme le même défaut, [18].

- Défaut en régime établi à 50Hz: Un défaut en régime établi 50Hz comporte un courant ayant essentiellement une composante à 50Hz après son apparition.

III.3.1.2.b. Caractéristiques des défauts polyphasés

Les défauts polyphasés sont la plupart du temps des défauts en régime établi 50Hz. Ils sont, dans leur très grande majorité, éliminés par l'ouverture d'un disjoncteur en réseau. Ils entraînent toujours lors de leur apparition, un creux de tension, plus ou moins important en fonction de la puissance de court circuit. Le creux de tension provoqué par un défaut polyphasé est généralement ressenti par la clientèle, bien au-delà du seul départ HTA concerné par le défaut. Les défauts polyphasés peuvent être, dans de très rares cas, des défauts auto- extincteurs, [18].

III.3.2. Connexion des enroulements d'un transformateur

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 III.3 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, [11].

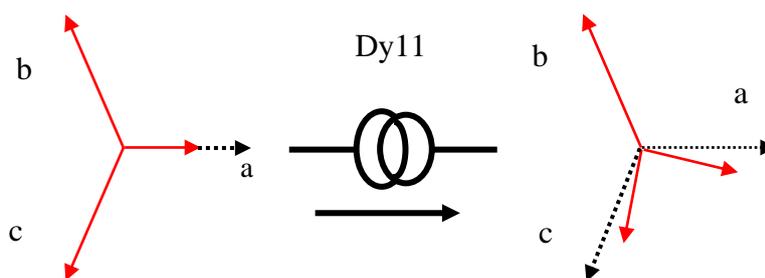


Figure III.3: Modification du type de creux de tension via un transformateur Dy11

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 [19]:

- 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:

$$v_{abc} = kT v_{ABC} , \quad (III.8)$$

Où 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, c'est à dire:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

- La composante homopolaire est enlevée:

Les tensions du côté secondaire sont obtenues en enlevant la composante homopolaire des tensions du côté primaire. Dans cette famille, on distingue les transformateurs de type Dd,Dz, $Y_n y, Y y_n$.

Leur matrice de transformation est définie par:

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

- 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 :

$$T_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

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.

III.4. Propagation des creux de tension dans un réseau industriel, [11]

III.4.1. Schéma de base de l'installation

La structure de base qui servira de brique élémentaire à la modélisation est représentée à la figure III.4: Le système étant ici supposé équilibré, cette représentation est équivalente monophasée.

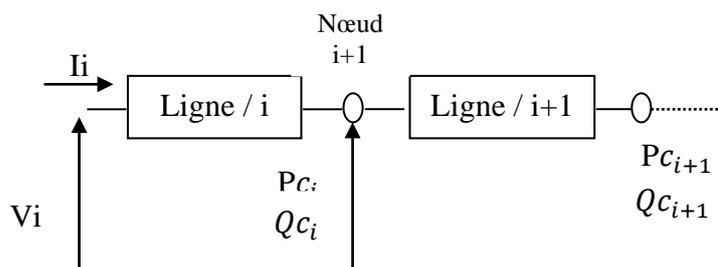


Figure III.4 : Schéma de la structure de base

Ce choix est motivé par le fait que le réseau industriel est de type radial ou arborescent, cette manière de modéliser les structures de base facilitera ultérieurement leur assemblage en vue d'une modélisation globale qui comprendra:

- Les tensions aux différents nœuds y compris au nœud source
- Les lignes
- Les transformateurs de tension
- Les charges

III.4.1.1. Les tensions aux nœuds

Les V_i représentent les valeurs efficaces de la tension simple aux différents nœuds (grandeurs à déterminer). Nous rappelons à cet effet que nous considérons un réseau équilibré.

Pour $i = 1$, la tension U_1 représente la valeur efficace de la tension d'alimentation de l'installation. Seule cette dernière valeur est a priori connue.

III.4.1.2. Les lignes

La ligne entre les nœuds i et $i + 1$ est la ligne i

La ligne i est représentée par la résistance de ligne R_i modélisant les pertes joules dans la ligne et l'inductance de ligne L_i modélisant les pertes réactives.

La première ligne représente non seulement l'impédance de ligne Z_i mais aussi l'impédance image de la puissance de court circuit au nœud source.

III.4.1.3 Les transformateurs de tension

Le modèle de transformateur envisagé est le modèle classique décrit ci dessous

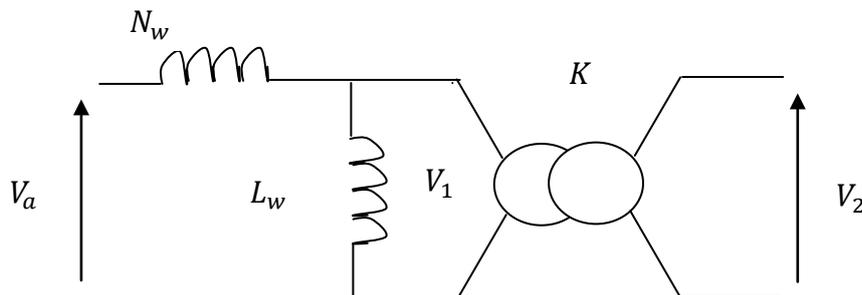


Figure III.5: Modèle simplifié de transformateur

N_w : représente l'inductance de fuite ramenée au primaire du transformateur.

L_w : L'inductance de magnétisation.

La résistance du transformateur ramenée au primaire n'est pas représentée, car sa valeur est négligeable par rapport à l'inductance de fuite; nous sommes bien sûr dans le cas de

transformateurs de distribution. De même, la saturation dans le transformateur n'est pas prise en compte. D'où le schéma simplifié précédent.

Les données nécessaires pour déterminer les paramètres du transformateur sont les suivantes

V_n : Tension simple nominale

K : Rapport de transformation

u_{cc} : Tension de court circuit réduite (en%)

S_n : Puissance nominale apparente

$$U_{CC} = u_{cc} * V_{1n} = N_W * I_{1n} \quad (III.11)$$

$$N_W = \frac{U_{CC}}{I_{1n}} = \frac{u_{cc} * V_{1n}}{\frac{S_n}{3V_{1n}}} = \frac{u_{cc} * 3V_{1n}^2}{S_n} \quad (III.12)$$

Où $N_W = u_{cc} * \frac{U_n^2}{S_n}$

III.4.1.4. Les charges

Les charges sont modélisées par leur puissance active P_{ci} et réactive Q_{ci} absorbées.

Au nœud $i + 1$, se trouve la $i^{ème}$ charge qui présente une puissance apparente $S_{ci} = \sqrt{P_{ci}^2 + Q_{ci}^2}$. Les puissances des différentes charges peuvent évoluer en fonction de la tension qui leur est appliquée. . C'est le cas typique d'un moteur asynchrone qui constitue la principale charge des réseaux industriels. Par exemple, pour un moteur asynchrone la variation de sa puissance active et réactive absorbée en fonction de la tension à ses bornes est de la forme suivante (Figures III.6 et III.7)

Par ailleurs, L'appel de puissance est l'une des causes les plus importantes dans la génération de creux. D'où l'intérêt de mettre en évidence l'appel de puissance des différentes charges connectées au réseau.

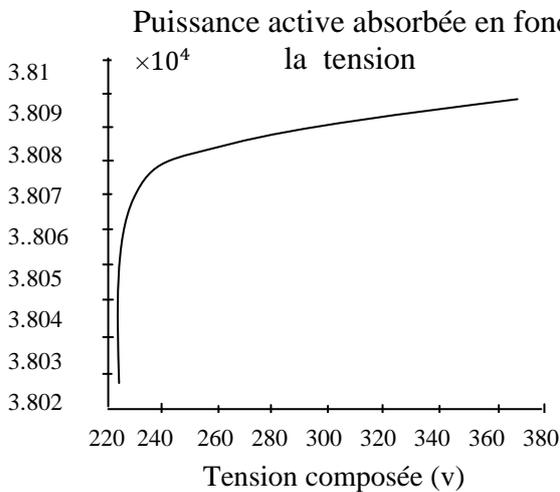


Figure III.6 : Puissance active absorbée en fonction de la tension

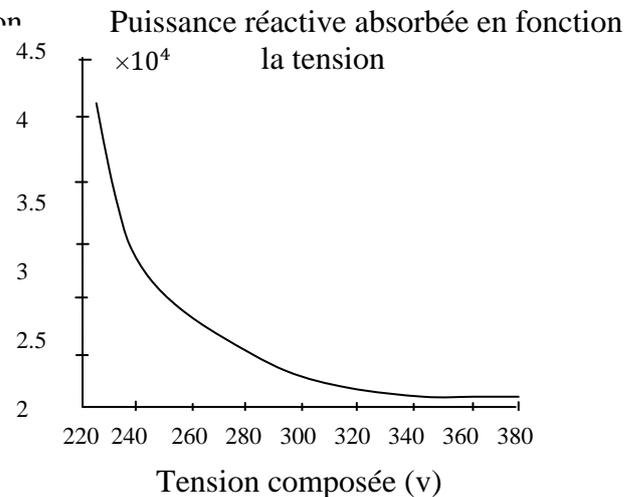


Figure III.7 : Puissance réactive absorbée en fonction de la tension

III.4.2. Mise en équation

En considérant le réseau triphasé équilibré, le schéma de la structure de base de la figure III.1 correspond à la représentation monophasée étoile équivalente dont le diagramme vectoriel est donné ci dessous.

Le diagramme vectoriel est donné à la figure III.8, en s'appuyant sur cette figure et après un calcul élémentaire, on établira une relation de récurrence entre les tensions de deux nœuds successifs.

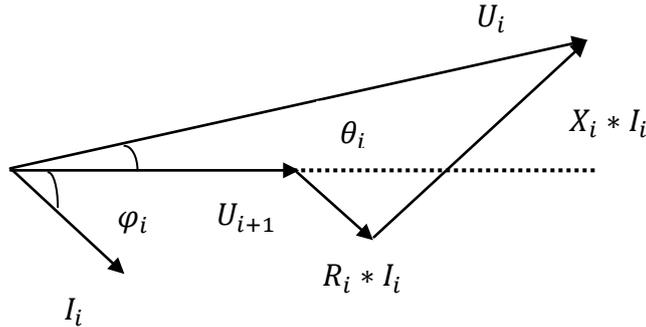


Figure III.8: Diagramme vectoriel correspondant à la structure élémentaire de la figure 1

III.4.2.1. Equation récurrente entre deux tensions consécutives

La récurrence citée ci dessus s'exprime pour les modules par la relation de (III.13)

$$U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + \sqrt{B_i}}{2}} \quad (\text{III.13})$$

Avec

$$A_i = U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i)$$

Et

$$B_i = \left(U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i) \right)^2 - 4(Z_i S_i)^2$$

\$P_i\$ et \$Q_i\$ représentent les puissances totales active et réactive absorbées au nœud (\$i + 1\$), d'où la sommation suivante:

$$P_i = \sum_{k=i}^{N-1} P_{ck}$$

$$Q_i = \sum_{k=i}^{N-1} Q_{ck} \sum_{k=i}^{N-1} Q_{ck}$$

Où \$N\$ est le nombre total de nœuds.

En ce qui concerne les déphasages, ils sont donnés par la relation (III.14)

$$\cos(\theta_{i+1}) = \frac{U_i^2 + R_i P_i + X_i Q_i}{U_i U_{i+1}} \quad (\text{III.14})$$

Où θ_i est l'angle de déphasage entre les tensions V_i et V_{i+1}

(N.B. dans ce calcul $P_i = V_i I_i \cos(\varphi_i)$ et $Q_i = V_i I_i \sin(\varphi_i)$)

Avec

$$Z_i = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}$$

Et

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + Q_i^2}$$

III.4.2.2. Conditions de fonctionnement pour que V_{i+1} existe

Le fait que l'expression du module de la tension V_{i+1} ne soit pas réelle implique la non existence de solution au calcul de répartition de charges ce qui peut s'interpréter comme une impossibilité au poste source de fournir la puissance exigée par les différentes charges.

D'après le calcul précédent: Pour que V_{i+1} existe il faut et il suffit que B_i et $A_i + \sqrt{B_i}$ soient positifs.

$$\text{Condition: } B_i = \left(V_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i) \right)^2 - 4(Z_i S_i)^2 > 0$$

$$\Rightarrow \left(V_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i) \right)^2 > 4(Z_i S_i)^2$$

$$|V_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i)| > 2(Z_i S_i)$$

$$\text{Si } A_i > 0 \Rightarrow V_i^2 > 2(R_i P_i + X_i Q_i)$$

$$\Rightarrow V_i = \sqrt{2(R_i P_i + X_i Q_i) + 2(Z_i S_i)}$$

$$\text{Si } A_i < 0 \Rightarrow V_i^2 < 2(R_i P_i + X_i Q_i)$$

$$2(R_i P_i + X_i Q_i) - V_i^2 > 2(Z_i S_i)$$

$$\Rightarrow V_i^2 < 2(R_i P_i + X_i Q_i) - 2(Z_i S_i)$$

Le cas où $A_i > 0$ est le cas le plus réaliste, l'autre cas ($A_i < 0$) correspondrait à des valeurs faibles de la tension.

Donc on définit:

$$V_{i \min} = \sqrt{2(R_i P_i + X_i Q_i) + 2(Z_i S_i)} \quad (\text{III.15})$$

Le calcul précédent nous amène à conclure que le calcul de load flow n'est possible que lorsque le réseau permet le transit de puissance donné.

III.4.2.3. Interprétation de l'équation (III.13)

L'expression de la tension à un nœud donnée (III.13), que nous redonnons ci dessous, amène à des remarques plus ou moins triviales mais qui ont le mérite d'en montrer la pertinence.

$$U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + \sqrt{B_i}}{2}}$$

- Influence de l'appel de puissance :

Pour une tension réseau et des impédances de ligne données, on vérifie que la tension en un nœud du réseau évolue en inverse des puissances consommées,

- Influence des pertes lignes :

Pour une tension réseau et une puissance consommée données, on vérifie que la tension évolue en inverse des impédances de ligne.

- Sens de propagation de la variation de tension du nœud source :

On vérifie aisément par la récurrence que la propagation d'un creux sur la tension source se fait d'amont vers l'aval.

III.4.3. Simplification de l'équation récurrente

Nous proposons ici une simplification de l'expression (III.13) afin de pouvoir en tirer quelques conclusions directement interprétables pour la loi de propagation des creux.

Rappelons les deux relations

$$U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + \sqrt{B_i}}{2}} \quad (\text{III.16})$$

$$\cos(\theta_{i+1}) = \frac{U_i^2 + R_i P_i + X_i Q_i}{U_i U_{i+1}} \quad (\text{III.17})$$

Avec

$$A_i = U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i)$$

Et

$$B_i = \left(U_i^2 - 2(R_i P_i + X_i Q_i) \right)^2 - (2Z_i S_i)^2$$

Les grandeurs utilisées dans ces formules sont des grandeurs efficaces.

III.4.3.1. Hypothèse sur la chute de tension et conséquences

Supposons que le terme $4(Z_i S_i)^2$ soit négligeable devant U_i^2 .

$$R_i P_i + X_i Q_i < 2Z_i S_i \ll U_i^2$$

$$\Rightarrow 2(R_i P_i + X_i Q_i) < 4Z_i S_i \ll U_i^2$$

En mettant U_i^2 en facteur dans B_i devient:

$$B_i = U_i^4 \left[\left(1 - \frac{2(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} \right)^2 - \left(\frac{2Z_i S_i}{U_i^2} \right)^2 \right]$$

En regardant le terme entre crochet:

$$\frac{2(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} \text{ et } \left(\frac{2Z_i S_i}{U_i^2} \right)^2 \ll 1$$

$$\text{Or } (1 - \varepsilon)^2 \approx 1 - 2\varepsilon$$

Donc

$$\left(1 - \frac{2(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} \right)^2 = A_i^2 \approx 1 - \frac{4(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2}$$

Et $\left(\frac{2Z_i S_i}{U_i^2} \right)^2$ est négligeable car c'est un infiniment petit du second ordre (élevé au carré).

En tenant compte de ces simplifications l'expression de B_i devient:

$$B_i = U_i^2 \left(1 - \frac{4(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} \right) = A_i^2$$

$$\text{Or } U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + \sqrt{B_i}}{2}}$$

$$\Rightarrow U_{i+1} = \sqrt{\frac{A_i + A_i}{2}} = \sqrt{A_i}$$

$$U_{i+1} = U_i \left(1 - 2 \frac{(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow U_{i+1} = U_i \left(1 - \frac{R_i P_i + X_i Q_i}{U_i^2} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{U_i - U_{i+1}}{U_i} = \frac{(R_i P_i + X_i Q_i)}{U_i^2} = \frac{\Delta U_{i+1}}{U_i} \quad (\text{III.18})$$

Cette forme (III.18) rappelle l'expression la plus courante dans la littérature. Comme par exemple dans le Guide de l'ingénierie électrique où la variation de puissance et la variation de tension s'écrit dans le cas monophasé $\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{(R\Delta P + X\Delta Q)}{V^2}$ lorsque les phénomènes transitoires sont éliminés. Et en triphasé équilibré, la même relation est utilisable en désignant par P et Q les puissances actives et réactives triphasés:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta U}{U} \approx \frac{(R\Delta P + X\Delta Q)}{U_n^2}.$$

Et cette formule est applicable néanmoins dans la quasi-totalité des chutes de tension dans les réseaux industriels. On peut estimer sa précision à quelques pour cent :

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{(\Delta Q + \frac{1}{\tan \varphi} \Delta P)}{V^2/X} \quad \text{Avec}$$

$\frac{\Delta V}{V}$: Variation relative de tension en %

V^2 : Carré de la tension au point où l'on calcule la variation de tension.

ΔP : Variation de puissance active

ΔQ : Variation de puissance réactive

$\tan \varphi = \frac{X}{R}$: Coefficient de qualité du réseau à 50 Hz

De ce calcul on peut également affirmer que la diminution du rapport $\frac{\Delta V}{V}$ vise donc :

-Soit à diminuer R et X , c'est à dire augmenter la puissance de court circuit au niveau du point de mesure.

-Soit à diminuer ΔP et ΔQ ; dans la plupart des cas, cela revient à atténuer la variation de la puissance réactive, car dans un réseau de bonne qualité, $\tan \varphi$ étant grand, le terme $\frac{\Delta V}{\tan \varphi}$ est négligeable, ce qui permet une simplification supplémentaire: $\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta Q}{S_{CC}}$ où S_{CC} est la puissance de court-circuit du réseau d'alimentation.

III.4.3.2. Formule de récurrence

En revenant à la forme initiale de (III.18), il est possible de formuler une récurrence entre les tensions des différents nœuds U_i et la tension du nœud source $U_{réseau} = U_1$

$$U_{i+1}^2 = A_i \quad (III.19)$$

$$A_1 = U_1^2 - 2(R_1 P_1 + X_1 Q_1)$$

$$A_2 = U_2^2 - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) = A_1 - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) = U_1^2 - 2(R_1 P_1 + X_1 Q_1) - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2)$$

$$U_{n+1}^2 = A_n = U_1^2 - 2(R_1 P_1 + X_1 Q_1) - 2(R_2 P_2 + X_2 Q_2) - 2(R_3 P_3 + X_3 Q_3) - \dots - 2(R_n P_n + X_n Q_n) \quad (III.20)$$

Les P_i et Q_i représentent toute la puissance absorbée à partir du nœud $i+1$, essayons de reformuler la récurrence en faisant intervenir les puissances des différentes charges séparément:

Pour un réseau de N nœuds:

$$P_i = \sum_{k=i+1}^{N-1} P_{ck}$$

Et

$$Q_i = \sum_{k=i+1}^{N-1} Q_{ck} \quad (III.21)$$

En plaçant (III.21) dans (III.20) et en mettant les P_{ck} et Q_{ck} en facteur, l'équation (III.8) devient:

$$U_{n+1}^2 = U_1^2 - 2\{[R_1 P_{c1} + (R_1 + R_2)P_{c2} + \dots + (R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{n-1})P_{c(n-1)} + (R_1 + R_2 + \dots + R_n)(P_{c(n)} + P_{c(n+1)} + \dots + P_{c(N-1)})] + X1Qc1+X1+X2Qc2+\dots+X1+X2+X3+\dots+Xn-1Qcn-1+X1+X2+\dots+XnQcn+Qcn+1+\dots+QcN-1 \quad (III.22)$$

C'est le terme entre accolades { } qui contribue à la chute de tension. Ce terme dépend uniquement des puissances des charges et des impédances de ligne.

En observant les coefficients qui multiplient les puissances absorbées par les différentes charges, les charges les plus en amont ont leur puissance multipliée par un facteur inférieur à celles des charges situées en aval.

La puissance de court circuit au nœud i étant définie comme suit: $P_{cc(i)} = \frac{U_r^2}{\sum_{k=1}^{i-1} Z_k}$

Où les Z_i sont les impédances de la branche reliant le nœud considéré au nœud source.

Une charge située au nœud i :

-affecte les tensions avales proportionnellement au terme $\frac{U_r^2}{P_{cc(i)}}$ et aux puissances absorbées par la charge.

-la tension à ses bornes est affectée par le reste du réseau proportionnellement au $\frac{U_r^2}{P_{cc(i)}}$

III.5. Application de la méthode d'analyse

Dans cette partie, la méthode d'analyse des creux de tension qui était proposée en détails dans le paragraphe III.2 sera appliquée, en utilisant le Power System dans l'environnement Matlab.

- Simulation en Matlab

Le modèle du système simulé est représenté par bloc (Figure III-20 voire l'annexe). Les caractéristiques de ce réseau sont données dans l'annexe A.

Pour chaque défaut appliqué au niveau de la barre 1 (Figure III.8), on simulera les résultats au niveau de la barre 1, 2 et 3 qui seront illustrés sur les figures III. 9, 10, 11, 12, 13, 14,15.

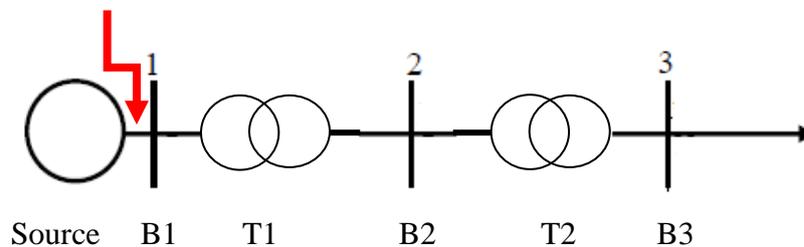


Figure III.8: Schéma unifilaire

a) Défauts dans la barre 1

1^{er} cas: défaut triphasé

Les résultats de la simulation dans les jeux de barres 1, 2 et 3 à la suite d'un défaut triphasé produit au niveau de jeu de barres 1 sont montrés sur la figure III.9. Trois phases en défaillances : Creux de tension identiques dans les trois phases. On remarque des chutes de tension de la même profondeur sur les trois phases sans déphasages supplémentaires. Ce type de creux de tension d'après la méthode de classification s'appelle Type A.

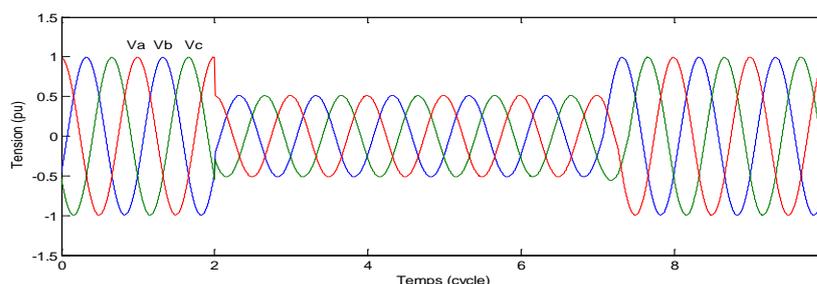


Figure III.9: Creux de tension type A

2^{ème} cas: défaut monophasé

Si un défaut monophasé se produit au niveau de jeu de barres 1, on obtiendra les résultants suivants:

- Simulation au niveau de jeu de barres 1:

La figure III.10 présente la simulation prise au niveau de jeu de barres 1 en cas d'une phase à la terre: elle provoque une baisse de la tension de ligne tandis que les deux autres tensions demeurent inchangées, c'est-à-dire une chute de tension sur une des phases et les phases non affectées par le défaut n'étant pas modifiées. Il s'agit d'un creux de tension de type B.

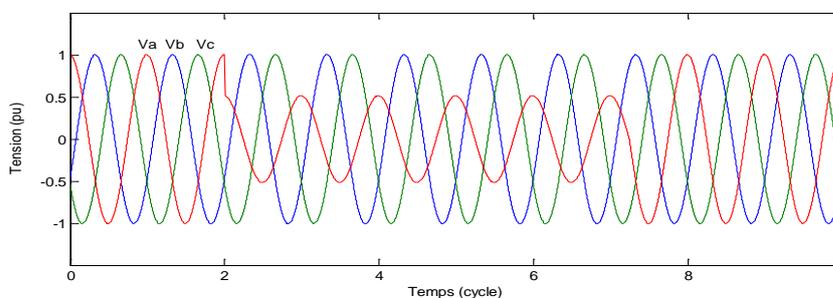


Figure III.10: Creux de tension type B

- Simulation au niveau de jeu de barres 2:

La figure III.11 montre la simulation au niveau du jeu de barres 2. Ce résultat était obtenu à la suite d'un défaut phase-phase au niveau du jeu de barres 1 et aussi après un transformateur couplé en triangle/étoile (Dy). On observe un déplacement de deux phases alors que la troisième phase ne change pas du tout c'est-à-dire des chutes de tensions avec déphasages supplémentaires pour deux des phases et la troisième n'étant pas modifiée. Et d'après la méthode d'analyse appliquée c'est le cas d'un creux de tension de type C.

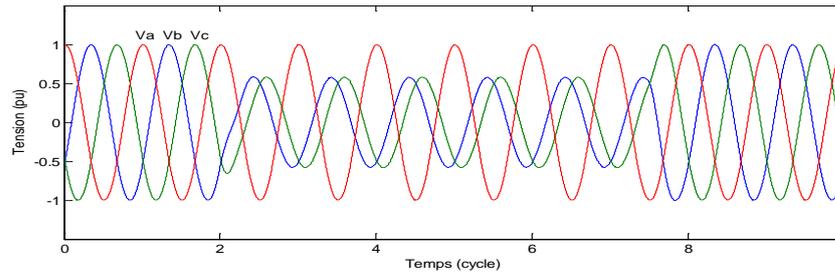


Figure III.11: Creux de tension type C

- Simulation au niveau de jeu de barres 3:

La figure III.12 montre les creux de tension de type D. Ce type des perturbations est le résultat d'un défaut monophasé produit au niveau du jeu de barres 1 et après deux transformateurs couplés en triangle/étoile (Dy). On observe une importante chute sur une phase et pour les deux autres phases, il y a des faibles chutes avec un déphasage supplémentaire.

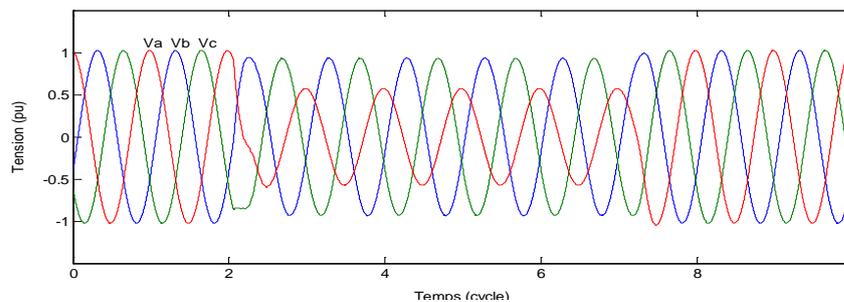


Figure III.12: Creux de tension type D

3^{ème} cas: défaut biphasé

Lorsque on procède à l'application d'un défaut biphasé au niveau du jeu de barres 1, nous distinguons donc les cas des simulations suivants:

- Simulation au niveau de jeu de barres 1:

Le résultant obtenu pour ce cas est identique à celui de la simulation au niveau de jeu de barres 2 dans le cas d'un défaut monophasé provoqué dans le jeu de barres 1 (voire figure III.11).

- Simulation au niveau de jeu de barres 2:

On remarque que les résultants de la simulation relevés pour ce cas sont les mêmes que ceux du cas des simulations au niveau de jeu de barres 3 dans le cas d'un défaut monophasé (voire figure III.12). Donc pour ce cas de simulation, la méthode d'analyse nous conduit au creux de tension de type D. On peut dire que ce type est un résultat d'un défaut biphasé en passant par un transformateur couplé en triangle/étoile, ou le résultat d'un défaut monophasé en passant par deux transformateurs couplés en triangle/étoile.

- Simulation au niveau de jeu de barres 3:

Les résultants obtenus donnent le creux de tension de type C (voire figure III.11) Comme conclusion pour le creux de tension de type C, la méthode de classification ABC nous permet de dire que l'origine des creux de type C soit un défaut biphasé, ou un défaut monophasé en passant par un transformateur couplé en triangle/étoile, ou soit un défaut biphasé en passant par deux transformateurs couplés en étoile/triangle. Les caractéristiques de ce type sont déjà mentionnées dans le cas précédent.

4^{ème} cas: défauts entre deux phases et la terre

Maintenant on provoque un défaut (phase-phase-terre) au niveau du jeu de barres, et on aura en suite les résultats suivants:

- Simulation au niveau de jeu de barres 1:

Le résultat est montré sur la figure III.13. On observe des chutes de tension sans déphasage sur deux des phases alors que la troisième phase n'est pas change. La méthode d'analyse montre que le défaut deux phases à la terre provoque un creux de tension de type E qu'est caractérisé d'une défaillance deux phases alors que la troisième n'est pas affectée.

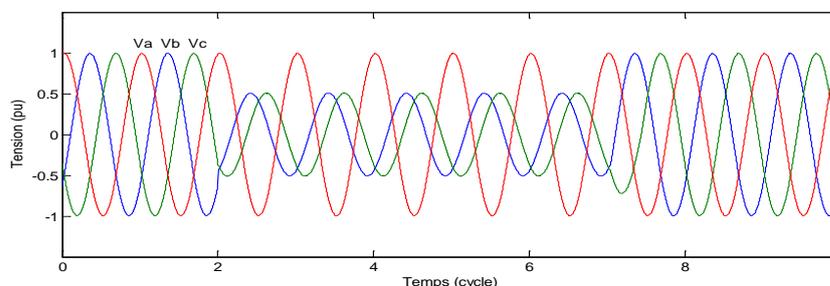


Figure III.13: Creux de tension type E

- Simulation au niveau de jeu de barres 2:

Les résultats montrés sur la figure III.14 sont relevés au niveau de jeu de barres 2. On observe des faibles chutes de tension sur deux phases avec un déphasage supplémentaire et une chute principale sur la troisième phase. D'après la méthode d'analyse, il s'agit de ceux de tension de type F.

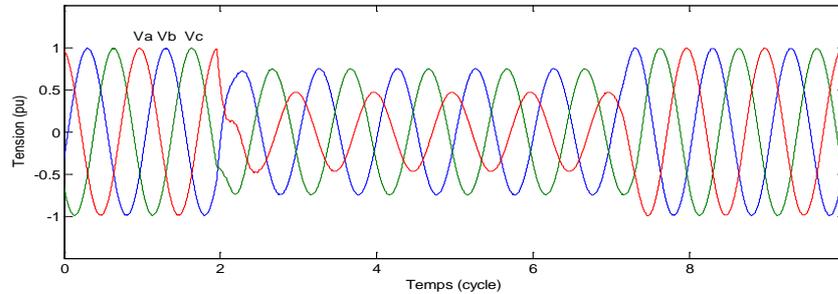


Figure III.14: Creux de tension type F

- Simulation au niveau de jeu de barre 3:

La figure III.15 montre la simulation obtenue au niveau de jeu de barres 2 en cas d'un défaut (phase-phase-terre) dans le jeu de barres 1. On observe une faible chute de tension sur l'une des phases alors que les deux autres subissent des chutes importantes avec un déphasage supplémentaires. Donc d'après la méthode de classification appliquée, on peut dire que le type G est le résultat de la propagation d'un défaut biphasé et terre à travers deux transformateurs couplés en triangle/étoile.

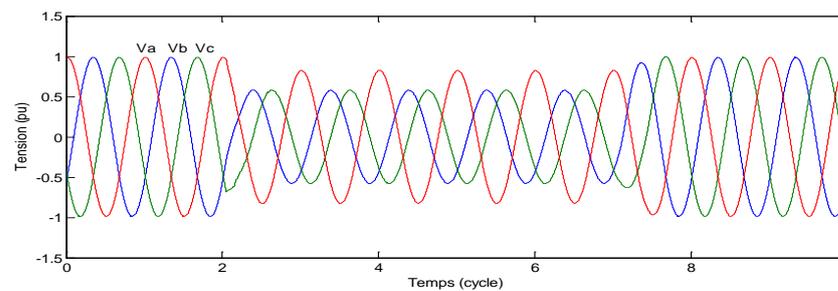


Figure III.15: Creux de tension type G

Conclusion

Ce chapitre présente une approche efficace de l'analyse des creux de tensions dues à des défauts dans les systèmes triphasés. L'approche classification ABC sont généralement basées sur les tensions individuelles pour chacune des trois phases. Cette méthode est plus appropriée en tant que base pour les essais de l'équipement et à l'interprétation de la propagation des creux dans le système. Cette méthodologie permet d'extraire les caractéristiques du creux de tension et de déterminer son type et sa gravité. En outre, la classification ABC a été développée lorsque la perturbation se propage à travers un transformateur. La méthode d'analyse que nous avons appliquée montre que les creux de tension sont principalement causés par les défauts du système. Chaque type de défaut a un effet différent sur les tensions au point de défaut, qui a ensuite défini les types de chute de tension.

Chapitre IV

**Présentation et interprétation des résultats
obtenus par la méthode d'analyse**

Présentation et interprétation des résultats obtenus par la méthode d'analyse

IV.1. Introduction

Les creux de tension dus à des courts circuits sont à l'origine de la plupart des défaillances et sont donc les plus intéressants à étudier. Les défaillances sont autant symétriques (défauts sur trois phases) qu'asymétriques (deux phases mises à la terre, deux phases connectées, une phase à la terre). Selon le type de défaillances, les amplitudes des creux de tension peuvent être égales (cas symétrique) ou non (cas asymétrique). Chaque type de défaut a un effet différent sur les tensions au point de défaut, qui a ensuite défini les types de chute de tension. Donc les creux de tension en un point du réseau dépendent principalement du type de défaillance. Afin de réaliser l'objectif de notre recherche l'étude effectuée dans les chapitres précédents est étayée dans cette partie.

IV.2. Simulation en Matlab

Le réseau à simuler est représenté par bloc fonctionnel (figure IV-1). Les caractéristiques de ce réseau sont données dans l'annexe A.

IV.2.1. Le modèle du système simulé

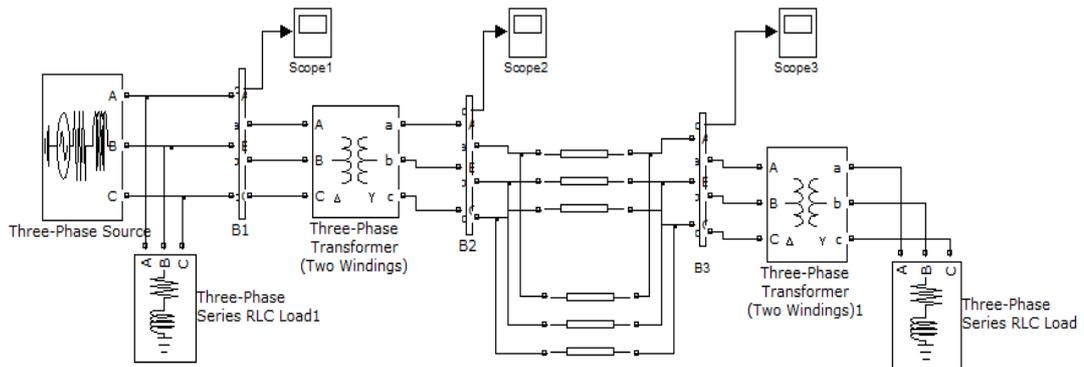


Figure IV.1: Le modèle du système simulé

Afin de discuter adéquatement les résultats de simulations de l'ensemble constitué du réseau, nous allons présenter nos résultats de simulation en plusieurs étapes selon le type de défaut et la position où nous avons effectué la simulation.

IV.2 .2. Les différentes perturbations (défauts) provoquées

IV.2.2.1. Défaut symétrique (défaut sur trois phases) dans la barre 1

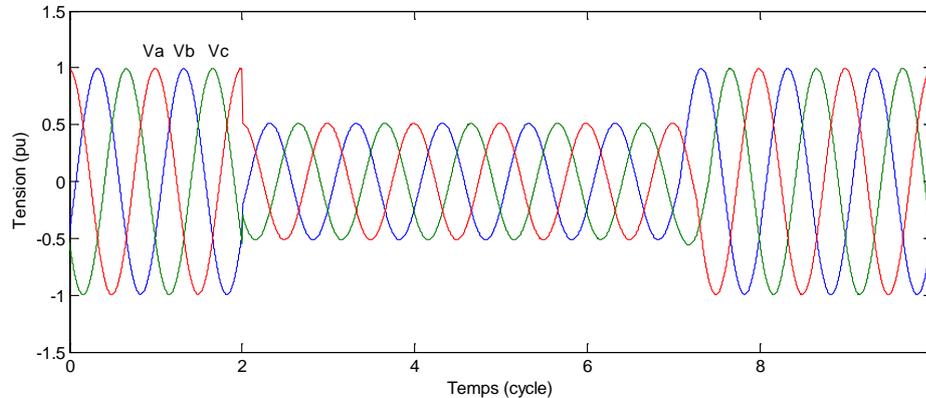


Figure IV.2: Tensions dans la barre 1

Creux de tension type A:

Les creux de tension type A (Figure IV.2) dus à des défauts triphasés, présentent des chutes de tension de la même profondeur sur les trois phases sans déphasages supplémentaires.

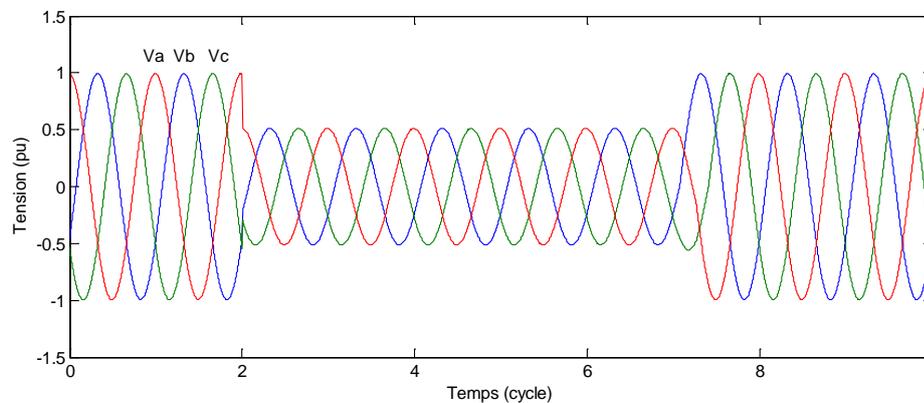


Figure IV.3: Tensions dans la barre 2

Creux de tension type A:

Dans ce cas, les creux de tension type A (Figure IV. 3) sont produits par la propagation des creux de tension du même type (Figure IV. 3) via les transformateurs. Les Résultats montrent que ce type se propage en aval du réseau sans modifier sa signature.

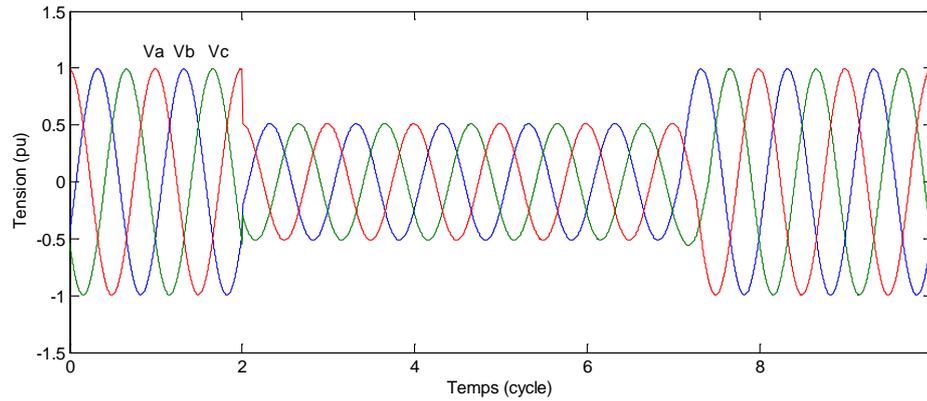


Figure IV.4: Tensions dans la barre 3

Creux de tension type A:

Les creux de tension type A (Figure IV.4) sont dus à la propagation des creux de tension type A (Figure IV. 3) via les transformateurs. Les Résultats montrent que ce type se propage en aval du réseau sans modifier sa signature.

IV.2.2.2. Défaut asymétrique dans la barre 1

a) Défaut monophasé

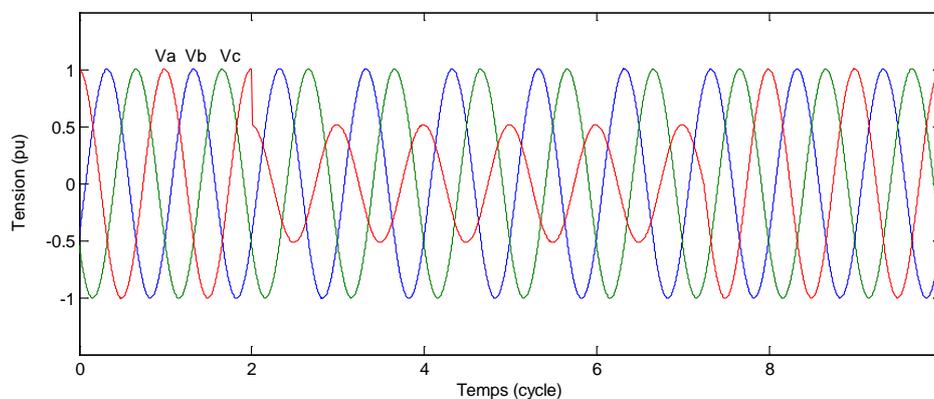


Figure IV.5: Tensions dans la barre 1

Creux de tension type B:

Dans le cas d'un creux de tension de type B (Figure IV.5). Il est du à un défaut monophasé. Seule la tension d'une des phases est affectée par le défaut.

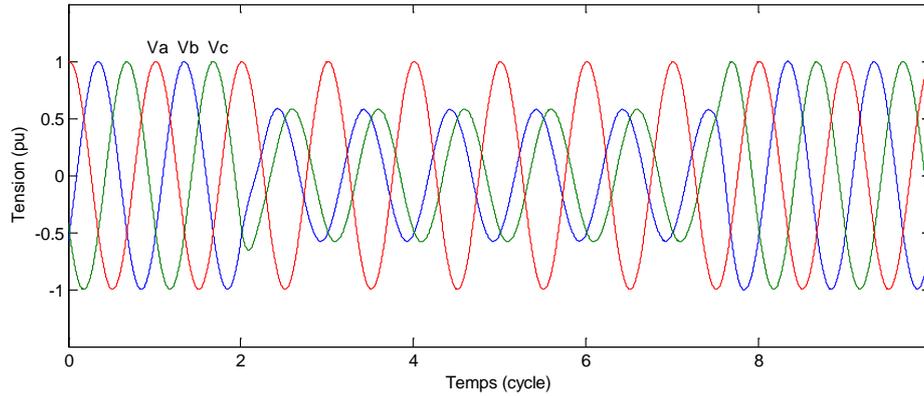


Figure IV.6: Tensions dans la barre 2

Creux de tension type C:

Les creux de tension de types C sont produits par la propagation des creux de tension de type B (Figure IV.6) via les transformateurs. Ils se caractérisent par des chutes de tensions avec déphasages supplémentaires pour deux des phases, la troisième n'étant pas modifiée.

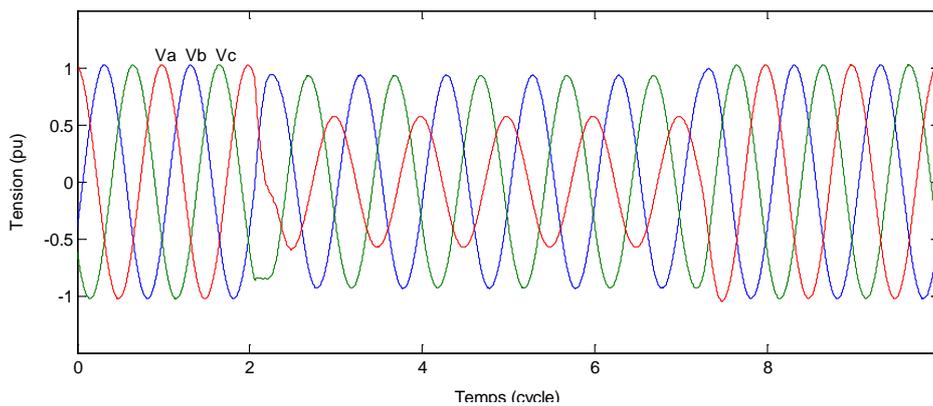


Figure IV.7: Tensions dans la barre 3

Creux de tension type D:

Les creux de tension de type D sont dus à la propagation des creux de tension de type C via les transformateurs (Figure IV.7). 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.

b) Défaut biphasé

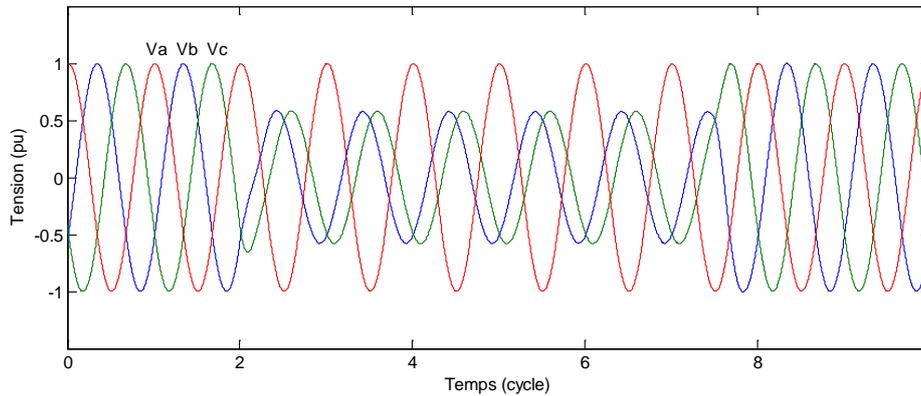


Figure IV.8: Tensions dans la barre 1

Creux de tension type C:

Dans ce cas, le type C est un résultat d'un défaut biphasé (Figure IV.8). Ils se caractérisent par des chutes de tensions avec déphasages supplémentaires pour deux des phases, la troisième n'étant pas modifiée.

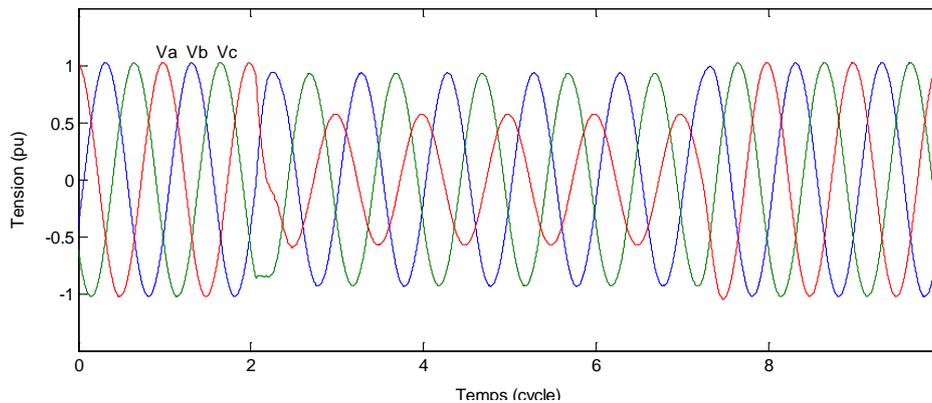


Figure IV.9: Tensions dans la barre 2

Creux de tension type D:

Dans ce cas, les creux de tension de type D sont dus à la propagation des creux de tension de type C via les transformateurs (Figure IV.9). 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

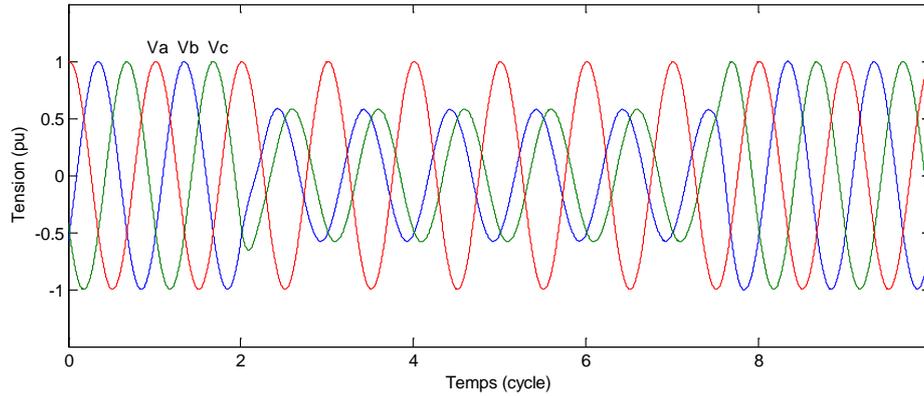


Figure IV.10: Tensions dans la barre 3

Creux de tension type C:

Les résultats nous donnent les creux de tension de types C. Ils sont produits par la propagation des creux de tension de type D (Figure IV.10) via les transformateurs. Ils se caractérisent par des chutes de tensions avec déphasages supplémentaires pour deux des phases, la troisième n'étant pas modifiée.

c) Défaits entre deux phases et la terre

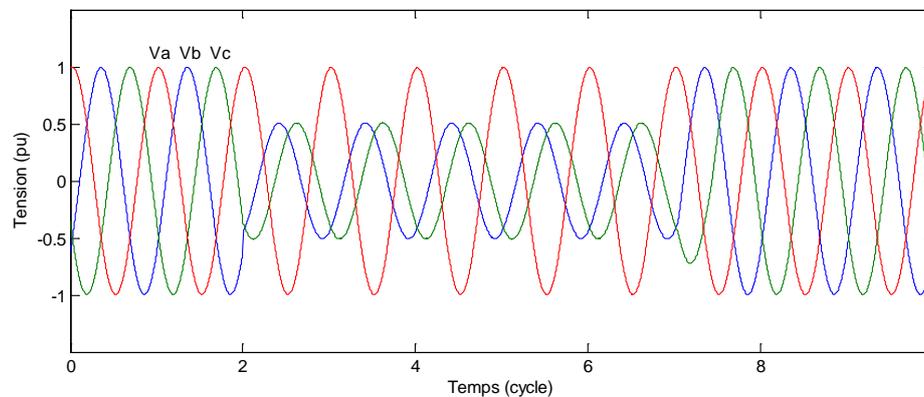


Figure IV.11: Tensions dans la barre 1

Creux de tension type E:

Les creux de tension de type E sont dus à un défaut entre deux phases et la terre (Figure IV.11). Ils se caractérisent par des chutes de tension sans déphasage sur deux des phases.

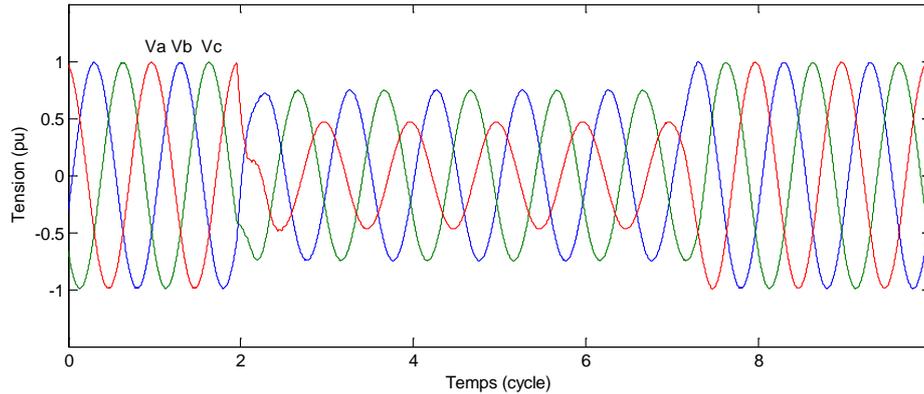


Figure IV.12: Tensions dans la barre 2

Creux de tension type F:

Les creux de tension de type F sont dus à de la propagation des creux de type E via les transformateurs (Figure IV.12). 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.

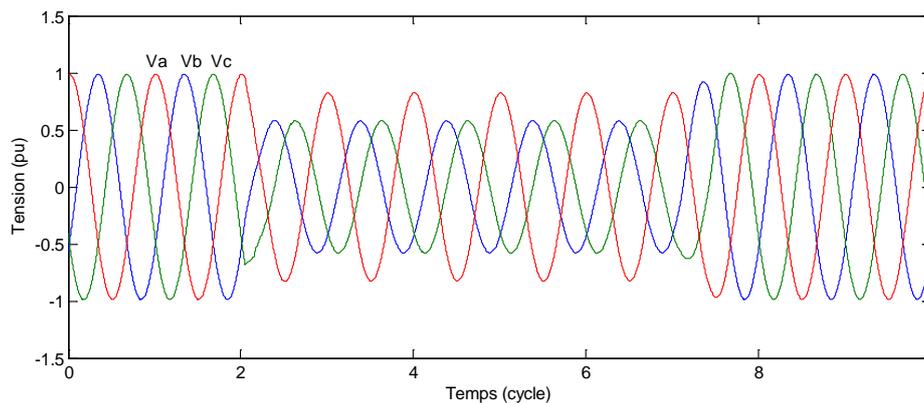


Figure IV.13: Tensions dans la barre 3

Creux de tension type G:

Les creux de tension de type G sont dus à de la propagation d'un défaut biphasé et terre à travers deux transformateurs couplés en triangle/étoile (Figure IV.13), présentent des chutes de tension avec déphasages supplémentaires pour deux des phases et une faible baisse de tension pour la troisième phase.

VI.3. Etude comparative avec un travail publié en IEEE

En première conclusion, nous pouvons affirmer que l'ensemble des objectifs de notre travail est atteint grâce au résultat obtenu. Ces résultats sont comparables avec le travail présenté par le document [20].

Conclusion

À cause des défauts qui se produisent dans notre réseau, des problèmes de la qualité d'énergie se produisent. Ces défauts engendrent des creux de tension qui se propagent dans le réseau électrique. Les résultats montrent que la classification peut effectivement classer les différents creux de tension. Sept types de creux sont définis qui correspondent à des courts-circuits possibles dans le réseau triphasé et à la propagation à travers les transformateurs. Le nombre de phases affectées ainsi que la sévérité de ces creux de tension dépend du type de défaut et du couplage du transformateur.

Conclusion générale

Le travail effectué dans cette thèse a pour objet d'identifier les problèmes majeurs affectant la qualité de l'énergie électrique, et d'analyser les creux de tension au sein d'un réseau électrique.

Dans le cas des creux de tension, une méthode basée sur la classification des creux de tension a été développée. Cette méthode permet de déterminer le type des creux de tension, et d'estimer leur sévérité. Elle est facilement implantable et très performante pour l'analyse automatique des creux de tension. Les résultats obtenus sont très satisfaisants.

La classification des creux de tension dans les systèmes triphasés reste un point de discussion. Elle est basée sur les différents types de défauts qui peuvent se produire dans un système triphasé.

La méthode d'analyse appliquée pour la classification des creux de tension est très utile lorsqu'on analyse la propagation des creux à travers les transformateurs.

Cette méthodologie permet d'extraire les caractéristiques du creux de tension et de déterminer son type et sa gravité. En outre, la classification ABC a été développée lorsque la perturbation se propage à travers un transformateur. La méthode d'analyse que nous avons appliquée montre que les creux de tension sont principalement causés par les défauts du système. Chaque type de défaut a un effet différent sur les tensions au point de défaut, qui a ensuite défini les types de chute de tension.

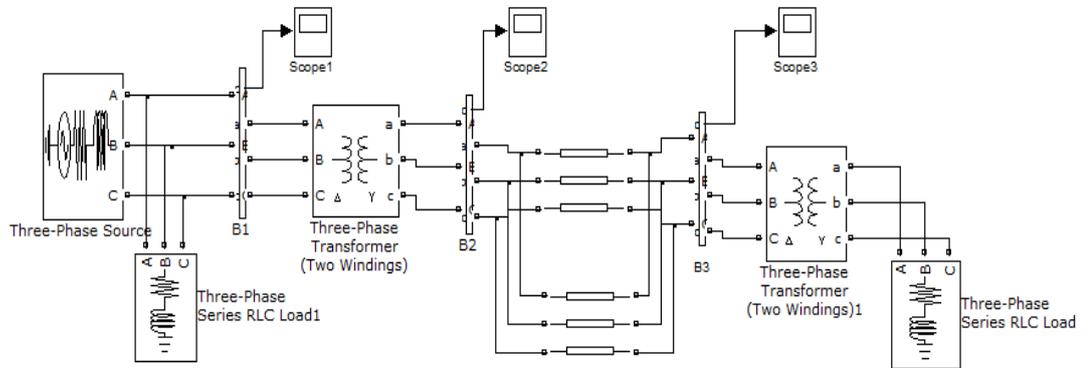
Il ya sept types de base de creux de tension, selon la classification ABC. Un creux de tension triphasé équilibré se traduira par un type A. Un défaut phase-terre se traduira le type B, et le défaut biphasé se traduira par le type C. Les creux de tension de type E, F et G sont dues à un défaut de deux phases à la terre.

De manière générale, les méthodes développées et présentées dans ce rapport de thèse doivent être appliquées à un nombre plus important de cas réels afin de mieux estimer leurs limitations et évaluer avec plus de précision leurs performances.

Références

- [1] Analyse des indices de la qualité d'énergie électrique et les phénomènes transitoires dans les réseaux électrique. Thèse de doctorat, CHERIF FETHA.
- [2] Analyse de la qualité de l'énergie électrique : mesure du Flicker. Patrick Espel.
- [3] La CEM: la compatibilité électromagnétique, Chapitre n° 9, Schneider Electric.
- [4] Perturbations BF: la qualité de la tension se mesure. Contact, Revue d'informations techniques.
- [5] Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique. Thèse de doctorat, Vanya Ignatova.
- [6] Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension. Thèse de doctorat, Djaffar Ould Abdeslam.
- [7] Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension. Thèse de doctorat, Mohamad Alaa Eddin Alali.
- [8] Heydt, Electric Power Quality: A Tutorial Introduction, IEEE Computer Applications in Power, vol.11, no.1, January 1998, pp.15-19.
- [9] Normes IEEE Std 519-1992; IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems; 12 April 1993, Page(s):15- 99.
- [10] Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique –application à la qualité d'énergie, thèse de doctorat, Ion ETXEBERRIA-OTADUI
- [11] OUTIL DE SIMULATION DE PROPAGATION DES CREUX DE TENSION DANS LES RESEAUX INDUSTRIELS. Thèse de doctorat, Isabelle EL BAAKLINI
- [12] J. Ville, Théorie et applications de la notion de signal analytique, Câbles et Transmission, vol.2A, 1948, pp.61-74.
- [13] M. Basseville, Detecting Changes in Signals and Systems – A Survey, Automatica, vol.24, no.3, 1988, pp.309-326
- [14] M. Basseville, I. Nikiforov, Detection of Abrupt Changes. - Theory and Application, Prentice-Hall, April 1993
- [15] M. Bollen, L. Zhang, Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults, Electric power systems research, vol.66, no.1, July 2003, pp.59 69
- [16] [Zha-98] L. Zhang, M. Bollen, A method for characterizing unbalanced voltage dips (sags) with symmetrical components, IEEE Power Engineering Letters, July 1998
- [17] M. Bollen, Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions, Wiley-IEEE Press, 1999.
- [18] Cong Duc PHAM « Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée » Thèse de doctorat INPG, 2005
- [19] L. Zhang, Three-phase unbalance of voltage dips, Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, Dept Electric Power Engineering, Gothenburg, Sweden, November 1999.
- [20] A Detailed Comparative Study of ABC and Symmetrical Component Classification for Fault Analysis. Muhammad Saufi Kamarudin, Shamsul Aizam Zulkifli, Erwan Sulaiman, Nur Hidayah Mokhtar

Annexe



Le modèle simulie

Tableau 1: Les paramètres de la source

Tension (KV)	$X_1(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_0(\Omega)$
132	4,9833	0,082	4,792	0 ,157

Tableau 2: Les paramètres des transformateurs

Transformateur	S (MVA)	Tensions (KV)	X (pu)
T ₁	90	132/33	0.1
T ₂	23	33/11	0.08

Tableau 3: Les paramètres des transformateurs

Tensions (KV)	$X_1(\Omega/Km)$	$R_1(\Omega/Km)$	$X_0(\Omega/Km)$	$R_0(\Omega/Km)$
132 KV	0.4478	0.176	1.133	0.4
33 KV	0.338	0.156	1.661	0.304
11 KV	0.315	0.117	1.355	0.223