

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

**L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En Réseaux électriques

Présenté par

**MESAI MED Nasr Eddinne**

**MAHDIA Ayoub**

**ZOUARI FERHAT Amara**

## **Thème**

**Analyse et amélioration de la  
qualité de l'énergie électrique**

Soutenu le Juin/2022. Devant le jury composé de :

Mr.Khachekhoche Ali	Maitre de conférences	Président
Mr.Mida Dris	Maitre de conférences	Rapporteur
Mr.Guia talal	Maitre de conférences	Examineur

**Année Universitaire 2021/2022**

## **Remerciements**

*Louange A Dieu Qui Nous A Donne La Foi, Le  
Courage, La Patience Et La Volonté Pour  
Réaliser Ce Modeste Travail Dans Des  
Meilleures Circonstances Et En Bon Etat*

*Nos premiers remerciements iront au Mr. MIDA DRIS pour  
nous avoir encadrés durant  
toute la période d'étude.*

*Nous remercions aussi les membres du Jury d'avoir accepté  
de juger notre travail.*

*Nos vifs remerciements vont également à tous nos amis pour  
leur soutien moral tout au  
long de la préparation de ce mémoire.*

*Nous ne pouvons pas clôturer nos remerciements sans se  
Retourner vers les personnes les plus chers à nous ; nos  
parents*

*qui ont eu un rôle essentiel et continu dans notre réussite.*

## **Dédicace**

*Avant tout l'éloge a dieu tout puissant pour tout ce qu'il  
ma donné et*

*Accorder la force, le courage et la santé à fin de pouvoir  
accomplir ce travail.*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Ma source de tendresse, à la femme la plus patiente, ma  
très chère mère ainsi qu'à l'être  
idéal, et pour tous leurs sacrifices, d'être à coté de mois  
tout le temps, et pour leur prière  
et mon père qui m'a toujours  
Soutenu avec ses encouragements.*

*A mes chères sœurs.*

*A mes chères frères.*

*A Toute ma famille.*

*A tous qui m'ont encouragé lors de ma préparation.*

*A mes meilleurs amies: MAHDI, AYMEN,*

*YOUSEF, ABDELKADER ,*

*A tous la promotion de master 2 science RESEAUX  
ELECTRIQUES*

*A tous qui ont contribué de près ou de loin à la  
réalisation de ce travail.*

**NASR EDDINE**

## **Dédicace**

*Dieu soit loué, qui nous a permis d'apprécier cette étape  
de notre cheminement  
académique avec notre mémoire,  
fruit de l'effort et de la réussite, par sa grâce,  
est dédié aux honorables parents,  
que Dieu les préserve et les perpétue comme une lumière  
pour mon chemin,  
à tous les membres  
de l'honorable famille qui m'ont soutenu et qui sont  
toujours  
frères et sœurs,  
et à mes compagnons de l'étude,  
Que Dieu les protège et les bénisse :  
Abdel kader, Nasr eddîn,  
Aymen, Amara, Marwan, Mouad  
et à tout le département de génie électrique,  
et à tous ceux qui ont eu un impact sur ma vie,  
et à tous ceux que mon cœur a aimés et a oublié ma  
plume,  
et à chaque étudiant qui cherche à acquérir des  
connaissances et à apporter ses connaissances  
scientifiques.*

**AYOUB**

## **Dédicace**

*Je dédie ce travail vaillant à,  
Le propriétaire d'une biographie parfumée et d'une  
pensée éclairée,*

*Il a eu le premier crédit pour ma réussite dans  
l'enseignement supérieur.*

*(Mon père bien-aimé) Que Dieu prolonge sa vie.*

*A celui qui m'a mis sur le chemin de la vie et m'a calmé,  
Elle s'est occupée de moi jusqu'à ce que je devienne vieux,*

*(Ma chère mère) Que Dieu la bénisse.*

*à mes frères mes soeurs,*

*à mes chers amis,*

*Et tous ceux qui ont eu un grand impact sur de  
nombreux obstacles et difficultés,*

*A tous mes chers professeurs,*

*Qui n'a pas hésité à m'aider.*

**AMARA**

## ملخص

يؤدي تطوير استخدامات الكهرباء في الصناعة إلى متطلبات في جودة الطاقة المراد توفيرها. تعتمد جودة الطاقة المزودة للمستخدمين على الجهد الكهربائي عند نقطة التسليم. يمكن أن يتأثر بحوادث معينة ، سواء خارجية مثل فشل مصدر الطاقة أو ملازمة للشبكات. تتجلى هذه العيوب التي تؤدي إلى تدهور جودة الجهد في شكل اضطرابات مختلفة: الجهد الزائد ، وعدم التوازن ، والتقلبات ، والتناسق ، وانخفاض الجهد. تحقيقا لهذه الغاية ، يقترح هذا العمل تحليل وتحسين جودة الطاقة الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية :** -الاضطرابات الكهربائية - جودة الطاقة الكهربائية - انخفاض الجهد - الانتشار.

## Résumé

Le développement des usages de l'électricité dans l'industrie induit des exigences dans la qualité de l'énergie à fournir. 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 forme de différentes perturbations : surtension, déséquilibre, fluctuation, harmonique, creux de tension. A cet effet le présent travail propose l'analyse et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

### Mots clés:

- Perturbations électriques - Qualité de l'énergie électrique - Creux de tension - Propagation

## Abstract

The development of the uses of electricity in industry induces requirements in the quality of the energy to be supplied. The quality of the energy supplied to users depends on that of the voltage at the point of delivery. It can be affected by certain incidents, either external such as the failure of the power source or inherent to the installation. These faults deteriorating the quality of the voltage manifest themselves in the form of various disturbances: overvoltage, imbalance, fluctuation, harmonic, voltage sag. To this end, this work proposes the analysis and improvement of the quality of electrical energy.

### Key words:

- Electrical disturbances - Quality of electrical energy - Voltage dips - Propagation

# **Sommaire**

# Sommaire

Liste des figures.....	VI
Liste des tableau .....	VIII
Symboles et abréviations .....	IX
Introduction générale.....	1
Introduction générale.....	2

## Chapitre I: Qualité de l'énergie électrique

I. 1. Introduction .....	6
I. 2. Qualité de l'énergie électrique .....	6
I.2.1. Qualité de la tension.....	6
I.2.1.1. Amplitude.....	7
I.2.1.2. Fréquence .....	7
I.2.1.3. Forme d'onde .....	7
I.2.1.4. Symétrie .....	8
I.2.2. Qualité du courant .....	8
I.2.3. Critères Qualité de l'énergie .....	8
I.2.4. Évaluation de la qualité d'énergie .....	8
I. 3. Les perturbations électriques et leurs origines .....	9
I.3.1. Classification des perturbations électriques .....	9
I.3.2. Perturbations liés aux fluctuations de la fréquence.....	10
I.3.3. Perturbations transitoires.....	10
I.3.4. Propagation .....	13
I.3.4.1. Propagation en amont et en aval du réseau .....	13
I.3.4.2. Propagation via les transformateurs .....	14
I. 4. Creux de tension et coupures brèves .....	15
I.4.1. Définition, origine et conséquences .....	15
I.4.2. Caractérisation des creux de tension .....	17
I.4.3. Paramètres déterminant les types de creux de tension .....	18
I.4.3.1. Types de courts-circuits .....	18
I.4.3.2. Régime de neutre.....	19
I. 5. Solutions de désensibilisations face aux creux et aux coupures générés par l'installation d'un client.....	20
I. 6. Surtensions et surintensités, .....	22

I.6.1. Définition, origine et surintensités .....	22
I.6.2. Surtensions à fréquence industrielle.....	23
I.6.3. Conséquences des Surtensions .....	23
I.6.4. Variations de tension.....	23
I.6.5. Déséquilibre .....	24
I. 7. les harmoniques.....	25
I.7.1. Définition Les harmoniques et Les interharmoniques .....	25
I.7.2. caractéristiques des harmoniques .....	26
I.7.3. Les principales sources d'harmoniques .....	28
I.7.4. Les effets d'harmoniques .....	29
I. 8. Les solutions pour atténuer les harmoniques .....	30
I. 9. Conclusion.....	30

## **Chapitre II: Méthodes d'analyse des perturbations électriques**

II. 1. Introduction.....	32
II. 2. Analyse de la qualité de l'énergie électrique par la transformation du vecteur d'espace .....	32
II.2.1. Transformation de vecteur d'espace .....	32
II.2.1.1. Un bref historique .....	32
II.2.1.2. Caractéristiques du vecteur d'espace en cas de perturbations .....	34
II.2.1.2.a. Perturbations au niveau du fondamental .....	34
II.2.1.2.b. Perturbations harmoniques .....	35
II.2.2. Analyse des perturbations au niveau du fondamental .....	35
II.2.2.1. Creux de tension .....	35
II.2.2.2. Creux de tension avec surtensions .....	37
II.2.2.3. Surtensions / Surintensités .....	37
II.2.2.4. Déséquilibre .....	38
II.2.3. Analyse des perturbations harmoniques .....	39
II.2.3.1. Harmoniques .....	39
II.2.3.2. Outils d'analyse .....	42
II.2.3.2.a. Série de Fourier .....	42
II.2.3.2.b. Transformée de Fourier .....	43
II.2.3.3. Caractérisation .....	43
II.2.3.4. Propagation Des Harmoniques .....	43

II.2.4. Analyse par l'estimation de l'amplitude .....	44
II.2.4.1. Valeur efficace .....	44
II.2.4.2. Signal analytique.....	45
II.2.4.3. Composante Fondamentale.....	45
II.2.5. Segmentation .....	46
II.2.6. Méthodes de classification.....	47
II.2.6.1. Méthode des 6 tensions.....	47
II.2.6.2. Méthode des composantes symétriques.....	49
II.2.7. Caractérisation .....	52
II. 3. Variations de tension et de fréquence .....	53
II.3.1. Outils d'analyse .....	53
II.3.2. Représentation statistique .....	54
II.3.2.1. Fonction de répartition, densité de probabilité et histogramme.....	54
II.3.2.2. Moments statistiques : espérance, variance et écart type.....	54
II. 4. Applications .....	55
II. 5. Conclusion .....	58

## **Chapitre III: Application de la méthode d'analyse des creux de tension**

III. 1. Introduction .....	60
III. 2. Types de creux de tension .....	60
III. 3. Les facteurs qui concernent le type de creux de tension .....	64
III.3.1. Types et caractéristiques des défauts.....	64
III.3.1.1. Types des défauts .....	64
III.3.1.2. Caractéristiques des défauts .....	65
III.3.1.2.a. Caractéristiques des défauts monophasés.....	65
III.3.1.2.b. Caractéristiques des défauts polyphasés.....	65
III.3.2. Simulation en Matlab .....	65
III.3.2.1. Le modèle du système simulé.....	66
III.3.2.2. Défaut symétrique dans la barre 1 .....	70
III. 4. Conclusion.....	75
Conclusion générale .....	76
Conclusion générale .....	77
Références Bibliographique .....	78
Références Bibliographique .....	79



Figure II.3: Creux de tension monophasé (a) et vecteur d'espace correspondant représenté dans le plan complexe (b) .....37

Figure II.4: Phase(s) affectée par la chute de tension en fonction de la phase de la composante homopolaire .....37

Figure II.5 Spectre du vecteur d'espace et de la composante homopolaire pour un système triphasé équilibré de trois signaux carrés déphasés de  $\pm 120^\circ$  .....40

Figure II.6: Spectre du vecteur d'espace et de la composante homopolaire pour un système de trois signaux carrés dont l'harmonique 5 n'est pas réparti uniformément sur les trois phases.41

Figure II.7: Tensions efficaces d'un creux de tension triphasé mesuré.....47

Figure II.8: Creux de tension mesuré (a) identification du type de creux par la méthode des six tensions (b) .....48

Figure II.9: Algorithme de classification amélioré des creux de tension basé sur la méthode des six tensions .....49

Figure II.10: Algorithme de classification des creux de tension basé sur les composantes symétriques .....50

Figure II.11: Courbes de sensibilité et creux de tensions représentés dans le diagramme amplitude/durée .....52

Figure II.12: Tensions mesurées (a), forme du vecteur d'espace dans le plan complexe (b,) ..56

Figure II.13: Courants mesurés (a), forme du vecteur d'espace dans le plan complexe (b) spectre du vecteur d'espace (c).....58

Figure III.1: Les différents types de creux de tension. ....61

Figure III.2: Transformation des types de creux de tension .....62

Figure III.3: Différents types de defaults.....65

Figure III.4: Modèle de simulation de défaut à deux lignes.....66

Figure III.5: Affaissement et gonflement de la tension dans la forme d'onde RMS.....67

Figure III.6: Affaissement et gonflement de la tension causés par un défaut de ligne à ligne à 11 kV. ....	67
Figure III.7: Forme d'onde de creux de tension à plusieurs étapes générée par un double défaut ligne-terre à 11 kV. ....	68
Figure III.8 Modèle de simulation d'erreur à une ligne. ....	69
Figure III.9: Forme d'onde de creux de tension à plusieurs étapes générée par un seul défaut ligne-terre à 11 kV. ....	69
Figure III.10: Affaissement et gonflement de la tension dans la forme d'onde RMS. ....	70
Figure III.11: Creux de tension type A. ....	70
Figure III.12: Creux de tension type B. ....	71
Figure III.13: Creux de tension type C. ....	72
Figure III.14: Creux de tension type D. ....	72
Figure III.15: Creux de tension type E. ....	73
Figure III.16: Creux de tension type F. ....	73
Figure III.17: Creux de tension type G. ....	74

## **Liste des tableau**

Tableau I.1: Vue d'ensemble des principales perturbations électriques. ....	13
Tableau I.2: caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques,[3]. ....	28
Tableau I.3: effets des harmoniques[3]. ....	30
Tableau II.1: type de creux de tension en fonction de l'indice k. ....	51
Tableau III.1: propagation des creux de tension. ....	62

## **Symboles et abréviations**

QEE: Qualité Energie Electrique.

ASI: Système d'alimentation sans interruption.

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

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

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

THD: Taux de distorsion harmonique.

MT: Moyenne Tension.

$V_{eff}$ : Valeur efficace du signal analysé, et  $V_K$  est son harmonique de rang  $K$ .

$f_n$ : fréquence de l'harmonique.

$f_1$ : fréquence du fondamental.

$Y_0$ : amplitude de la composante continue généralement nulle en distribution électrique en régime permanent.

$Y_n$ : valeur efficace de la composante de rang  $n$ .

$\varphi_n$ : déphasage de la composante harmonique au temps initial.



# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité. Elle est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années, essentiellement pour les raisons suivantes :

- Des impératifs économiques : les perturbations électriques ont un coût élevé pour les industriels car elles engendrent des arrêts de production, des pertes de matières premières, une baisse de la qualité de la production, un vieillissement prématuré des équipements, etc. - La généralisation des équipements sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations : du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement, performances élevées) on constate le développement et la généralisation des équipements d'électronique de puissance. Ces équipements ont la particularité d'être à la fois sensibles aux perturbations de tension, et générateurs de perturbations.

- L'ouverture du marché de l'électricité : la libéralisation du marché de l'électricité fait que la qualité de l'énergie électrique est devenue un des critères de choix d'un fournisseur d'énergie plutôt qu'un autre de la part des consommateurs. Les fournisseurs se doivent donc de fournir à leurs clients une énergie avec une qualité maximale. 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. 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. 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. La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité. Elle est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années, essentiellement pour les raisons suivantes :

- Des impératifs économiques : les perturbations électriques ont un coût élevé pour les industriels car elles engendrent des arrêts de production, des pertes de matières premières, une baisse de la qualité de la production, un vieillissement prématuré des équipements, etc.

- La généralisation des équipements sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations : du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent

rendement, performances élevées) on constate le développement et la généralisation des équipements d'électronique de puissance. Ces équipements ont la particularité d'être à la fois sensibles aux perturbations de tension, et générateurs de perturbations.

- L'ouverture du marché de l'électricité : la libéralisation du marché de l'électricité fait que la qualité de l'énergie électrique est devenue un des critères de choix d'un fournisseur d'énergie plutôt qu'un autre de la part des consommateurs. Les fournisseurs se doivent donc de fournir à leurs clients une énergie avec une qualité maximale. 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. 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. 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.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire de MASTER 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. Trois méthodes différentes destinées à l'analyse des perturbations électriques ont été développées et testées :

- La méthode du vecteur d'espace permet d'analyser de manière automatique les perturbations mesurées. 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. Actuellement, c'est la méthode la plus complète et exhaustive pour l'analyse des perturbations au niveau de l'amplitude. D'autres types de perturbations peuvent également être analysées de manière efficace par cette méthode, telles que la présence d'harmoniques et de déséquilibre.

- La méthode basée sur les propriétés des systèmes linéaires variant périodiquement dans le temps permet d'étudier théoriquement la création et la propagation des perturbations harmoniques au sein d'un réseau électrique. Cette méthode est naturellement applicable aux structures d'électronique de puissance comportant des éléments commutant de manière périodique.

- Enfin, la méthode statistique matricielle a pour objectif de représenter statistiquement des signaux électriques sans perte importante d'information à l'aide de matrices statistiques.

Ces grandeurs statistiques peuvent également être utilisées pour reconstruire le signal et prédire son comportement futur. Ce rapport de thèse est organisé de la manière suivante : Le Chapitre I 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 Chapitre II 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 Chapitre III Application de la méthode d'analyse des creux de tension. Ces modifications sont ensuite utilisées pour identifier le type et évaluer la sévérité des perturbations considérées. L'application de la transformation du vecteur d'espace pour l'analyse d'autres types de perturbations est également envisagée. Une conclusion générale vient enfin Clore ce mémoire.

# **Chapitre I: Qualité de l'énergie électrique**

## I. 1. Introduction

L'énergie électrique est produite sous forme de système de tensions triphasées, sinusoïdales et équilibrées, et dont la fréquence est de 60 Hz. Cependant, la qualité de l'onde de ces tensions se retrouve dégradée dans les réseaux électriques à cause de différentes perturbations. La source des perturbations est, soit une anomalie du côté du réseau électrique, soit la nature de fonctionnement des charges non-linéaires. Ces perturbations ont des effets néfastes sur le fonctionnement et la durée de vie des équipements électriques. D'ailleurs, le développement dans les applications en électronique a mené à la prolifération d'équipements modernes plus sensibles aux perturbations de la tension. Par conséquent, afin d'éviter le dysfonctionnement des équipements, des moyens de compensation sont appliqués tels que les compensateurs passifs, actifs ou hybrides.

D'une part, il est vrai que la qualité de l'onde a un impact économique direct sur les usagers de l'énergie électrique. Par exemple, une perturbation advenant dans une usine automatisée forçant ainsi l'arrêt de la chaîne de production, nécessite des heures pour la remise en marche et cause des pertes financières considérables. D'autre part, le fournisseur d'électricité est également soucieux de la qualité de l'onde autant pour des raisons commerciales que pour maintenir la confiance et éviter ainsi les plaintes parfois coûteuses de la clientèle. D'ailleurs, l'origine d'un nombre de perturbations est attribuée à la nature de fonctionnement des charges non-linéaires, et d'autres perturbations sont dues à des accidents et des pannes survenant sur le réseau électrique[1].

Ce chapitre définit le terme « qualité de l'énergie électrique », et présente les principales perturbations électriques ainsi que leurs origines, caractéristiques et conséquences. Volontairement, nous prenons systématiquement comme base le système triphasé, le monophasé étant considéré comme un cas particulier.

## I. 2. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe.

### I.2.1. Qualité de la tension

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

### I.2.1.1. Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.
- Les variations de tension. Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

### I.2.1.2. Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge[2]. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle  $50\text{HZ} \pm 1\%$  pendant 99,5% de l'année, et  $-6\% \div 4\%$  durant 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.

### I.2.1.3. Forme d'onde

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

#### I.2.1.4. Symétrie

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

#### I.2.2. Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de  $(2\pi)/3$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale. Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement lié à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension.

#### I.2.3. Critères Qualité de l'énergie

Les critères de qualité de l'électricité sont directement issus de l'observation des perturbations électromagnétiques des réseaux électriques. On parle de Compatibilité Electromagnétique (C. E. M.) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs. La (C.E.M) classe ces perturbations selon deux groupes :

- ❖ basses fréquences (< 9 kHz).
- ❖ hautes fréquences (> 9 kHz).

De manière générale, les perturbations en électrotechnique appartiennent à la basse fréquence. Les phénomènes observés sont nombreux : creux de tension et coupures, surtensions, fluctuations de la tension (flicker), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et interharmoniques.

#### I.2.4. Évaluation de la qualité d'énergie

La qualité de l'énergie électrique intéresse à la fois le fournisseur et le consommateur. Le fournisseur d'énergie électrique à l'obligation de transport et de distribution, qu'il gère, à certains paramètres de qualité. La valeur de la fréquence avec les limites de variations admises en différents régimes du fonctionnement et la continuité de l'alimentation des

consommateurs avec de l'énergie électrique. Le consommateur d'énergie, à son tour, est intéressé d'avoir une qualité adéquate de l'énergie mais, en même temps, il est impliqué dans le maintien de la qualité par le type de récepteur utilisé et par l'exploitation judicieuse de ceux-ci. Les principales influences négatives produites par les récepteurs des consommateurs concernent la production d'harmoniques de courant et de tension, tout comme le fonctionnement en régies non symétriques, déséquilibrés. La qualité de l'énergie électrique aux bornes des récepteurs est évaluée principalement, conformément aux normatifs d'écarts admissibles de la valeur réelle des paramètres des valeurs nominales[3].

### **I. 3. Les perturbations électriques et leurs origines**

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par la déformation de la fondamentale, affectent ainsi l'amplitude des grandeurs d'intérêt (tension ou courant), à savoir, un creux de tension, une coupure ou une surtension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé. Elles se manifestent aussi par l'apparition des courants harmoniques à des fréquences multiples de la fréquence fondamentale, en s'ajoutant à la composante fondamentale, provoquant ainsi la distorsion des formes d'onde des grandeurs d'intérêt[4].

#### **I.3.1. Classification des perturbations électriques**

Les perturbations électriques sont classifiées selon plusieurs critères :

- **Selon les paramètres caractérisant de tension :**

Elles peuvent être groupées en quatre catégories qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension :

- variations de l'amplitude.
- modifications de la forme de l'onde de tension.
- dissymétrie du système triphasé (déséquilibre).
- variations de la fréquence fondamentale à 50 Hz.

- **Selon leurs durée on distingue :**

- perturbations transitoires (moins d'une demi-période fondamentale).
- perturbations de courte durée (quelques minutes).
- perturbation permanent.

- **Selon les critères de compatibilité électromagnétique :**

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées :

- basse fréquence (< 9 kHz).
- haute fréquence (> 9 kHz).
- de décharges électrostatiques.

La mesure de QEE consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) :

- Creux de tension ;
- Coupures ;
- Surtensions ;
- Harmoniques et inter-harmoniques ;
- Fluctuations de tension ;
- Déséquilibres de tension[5].

### I.3.2. Perturbations liés aux fluctuations de la fréquence

En réalité la pulsation de la tension chez les consommateurs doit être la même que ce soit au niveau de la production ou du transport de l'énergie électrique. Etant donné que la fréquence dépend étroitement de la vitesse angulaire, imposée à la machine synchrone dans les postes de production. Donc il est clair que ce type de perturbation sont rares a observées que lors des circonstances exceptionnelles, tel que certains défauts, au niveau de la production ou du transport d'énergie. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle 50 Hz  $\pm$ 1% ou 60Hz  $\pm$ 1[5].

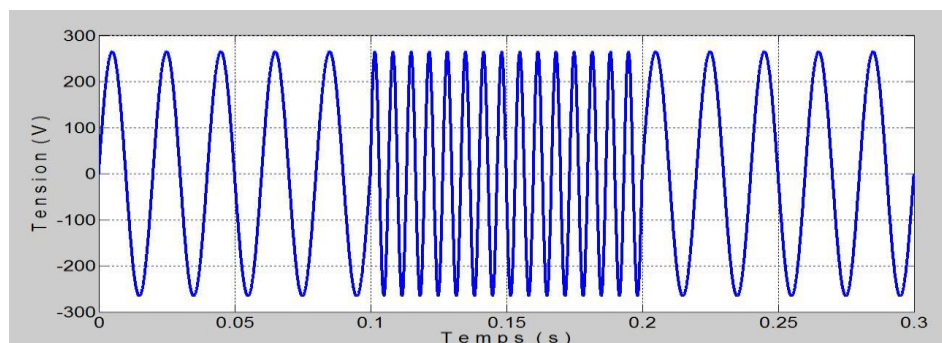


Figure I.1: Perturbations liés aux fluctuations de la fréquence.

### I.3.3. Perturbations transitoires

Les surtensions transitoires représentent le type de perturbations transitoires les plus communes. Elles sont généralement dues à l'une ou l'autre des deux causes suivantes: la commutation des bancs de condensateurs et les coups de foudre. La commutation des condensateurs pour la correction du facteur de puissance est une manœuvre indispensable

dans les réseaux électriques pour réduire les pertes et soutenir la tension. Le démerite des condensateurs est l'interaction avec l'inductance du système en produisant des oscillations transitoires à chaque commutation.

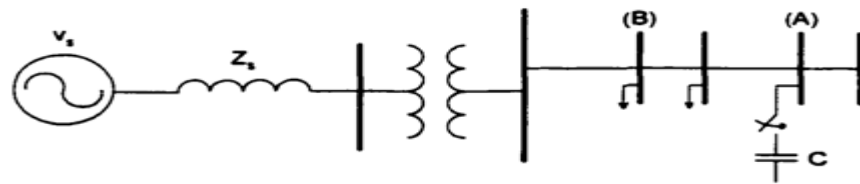


Figure I.2: Schéma unifilaire représentant un condensateur  $C$  à commuter.

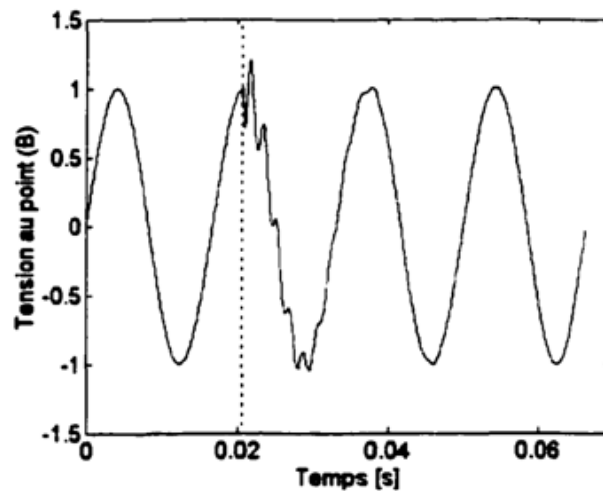


Figure I.3: Perturbation transitoire typique de la tension à la commutation d'un condensateur.

La (Figure I.2) montre le diagramme unifilaire d'un système avec un condensateur à commuter au point (A) et la tension sera observée au point (B). Les deux points se trouvent sur la même ligne mais à une certaine distance l'un de l'autre. La (Figure I.3) montre l'onde de tension au point (B) sachant que le condensateur  $C$  a été branché à l'instant  $t = 0.02$ s. Nous constatons que la commutation du condensateur crée une oscillation transitoire de la tension dont la valeur initiale n'est pas nulle à cause de l'impédance du tronçon de ligne séparant le condensateur du point d'observation. Ces oscillations se propagent dans le réseau d'alimentation locale et peuvent s'amplifier à cause de la présence de condensateurs aux secondaires des transformateurs de distribution. Les surtensions transitoires peuvent entraîner le dysfonctionnement des équipements de l'électronique de puissance. Ces surtensions altèrent la synchronisation du circuit d'attaque de la gâchette des thyristors et provoquent la détection d'anomalie par les relais de protection des entraînements à vitesse variable[1].

<i>Type de perturbation</i>	<i>Origine</i>	<i>Conséquences</i>	<i>Solutions possibles</i>
<b>Coupure longue</b>	<b>Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)</b>	<b>Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts</b>	<b>Alimentation de secours (réseau), alimentation sans interruption (ASI)</b>
<b>Creux de tension et coupure brève</b>	<b>Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)</b>	<b>Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts</b>	<b>Conditionneur de réseau, conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption</b>
<b>Fluctuation rapide (flicker)</b>	<b>Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)</b>	<b>Papillotement de l'éclairage</b>	<b>Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série</b>
<b>Harmonique</b>	<b>Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)</b>	<b>Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillissement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)</b>	<b>Filtrage actif ou passif, self anti harmonique, déclassement d'appareil</b>
<b>Interharmonique</b>	<b>Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée</b>	<b>Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes</b>	<b>Filtrage actif ou passif, amortissement de filtres anti harmoniques, conception de l'équipement sensible</b>

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.3.4. Propagation

#### I.3.4.1. Propagation en amont et en aval du réseau

Les creux de tension se propagent en amont et en aval du réseau, et leur sévérité dépend de l'endroit de mesure du creux de tension par rapport à l'événement qui l'a engendré. La propagation des creux de tension en amont dépend de deux paramètres : la puissance de court-circuit et la distance entre l'endroit de défaut et l'endroit de mesure. Plus la puissance de court-circuit est élevée et le défaut éloigné, plus le creux de tension est atténué. Pour mieux illustrer la propagation des creux de tension, l'exemple d'un diviseur de tension monophasé affecté par un court-circuit franc au point D est présenté en (Figure I.4).

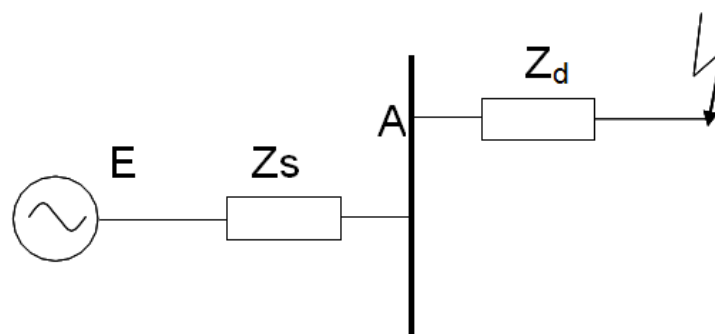


Figure I.4: Diviseur de tension pour l'étude de la propagation des creux de tension.

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

$$V_A = \frac{Z_d}{Z_d + Z_s} E$$

Si la distance électrique entre l'endroit de défaut et le point de mesure A est importante, l'impédance de ligne  $Z_d$  se caractérise par une valeur importante. En conséquence, l'amplitude de la tension  $V_A$  est proche à celle de la source E, c'est à dire que le creux de tension mesuré au point A est atténué par rapport au creux de tension mesuré au point D. Si la puissance de court-circuit au niveau de la source est importante, l'impédance de la source  $Z_s$  est faible. En conséquence, la tension  $V_a$  est proche de la tension de la source et le creux de tension à l'endroit de la mesure se caractérise par une profondeur moins importante que le creux de tension à l'endroit de défaut. Le diviseur de tension de (Figure I.4) montre que les creux de tension sont atténués lorsqu'ils se propagent en amont dans le réseau. En revanche, les creux de tension se propagent en aval sans s'atténuer. En effet, si on reprend l'exemple de (Figure I.4) en supposant que le court-circuit franc est produit avant le point de mesure A, la tension à l'endroit de mesure est nulle et par conséquent, le potentiel du point aval D est également nul.

### I.3.4.2. Propagation via les transformateurs

La signature des creux de tension peut être modifiée par les transformateurs situés au sein du réseau. Par exemple, le creux de tension présenté à gauche de la (Figure I.5) se caractérise par une chute de tension sur la phase a uniquement. Lors de son passage par le transformateur Dy11, il se transforme en creux de tension biphasé, avec des chutes de tension principales sur les phases b et c.

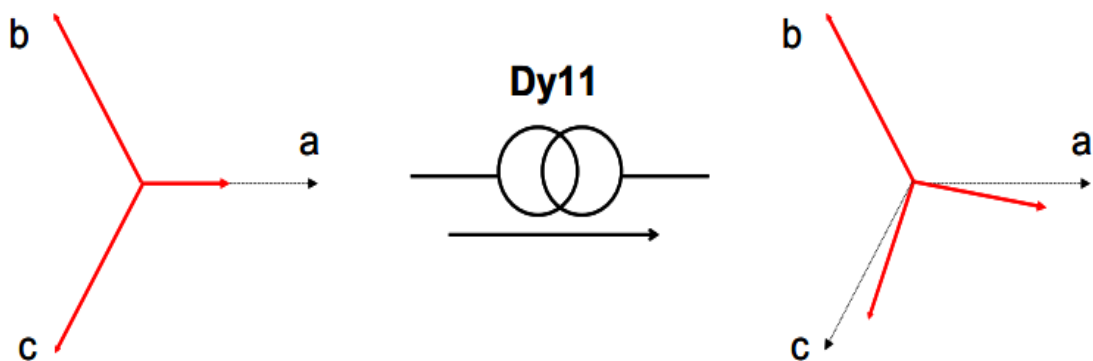


Figure I.5: Modification du type de creux de tension via un transformateur Dy11.

En effet, un creux de tension peut se caractériser par des signatures différentes du côté primaire et du côté secondaire d'un transformateur en fonction de son type et de sa connexion. En fonction des modifications introduites dans les signatures des creux de tension, on distingue trois familles de transformateurs[6]:

- 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 :

$$V_{abc} = kTV_{ABC}, \quad (I.1)$$

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 :

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

- 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<sub>n</sub>y, Y<sub>y</sub>n. Leur matrice de transformation est définie par :

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

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

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

$$T_3 = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (I.4)$$

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[7].

## I. 4. Creux de tension et coupures brèves

### I.4.1. Définition, origine et conséquences

Un creux de tension (sag ou dip en anglais) [8], 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. 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.

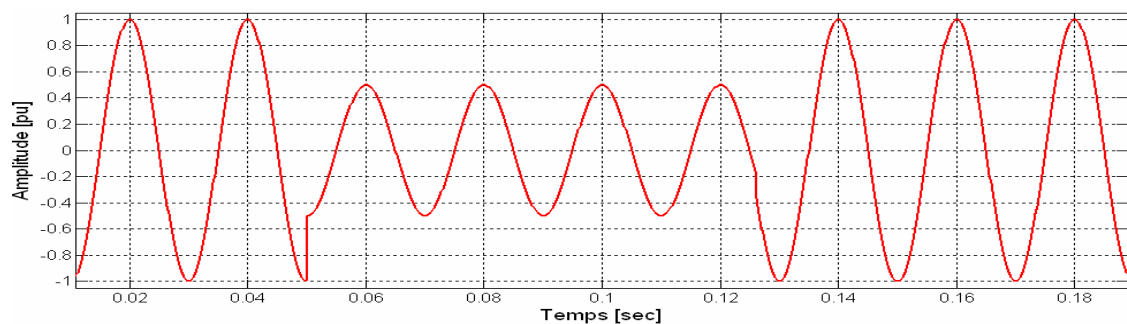


Figure I.6: Creux de tension.

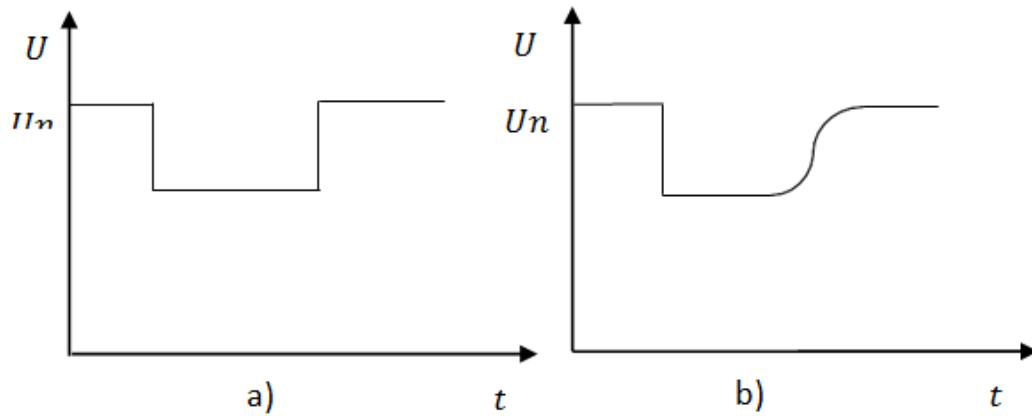


Figure I.7: Amplitude d'un creux de tension provoqué par

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[9].

#### I.4.2. 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 (FigureI.8) [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].

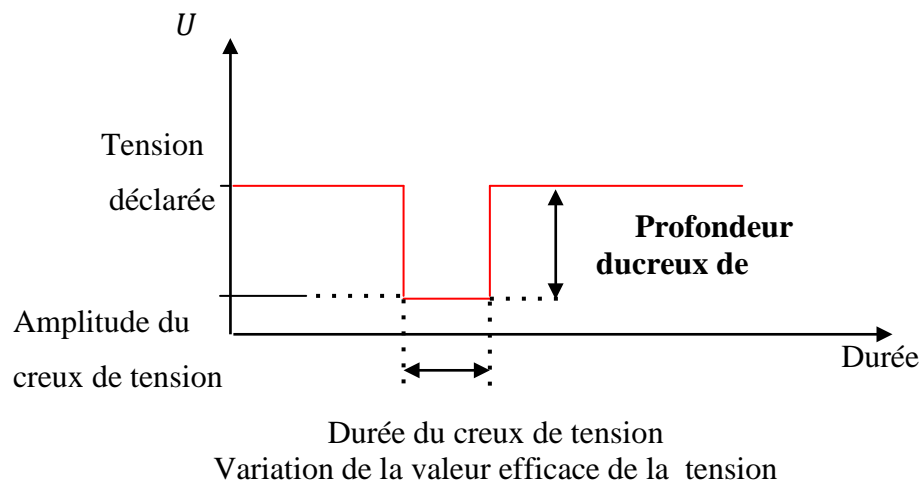


Figure I.8: Caractérisation du creux de tension.

### I.4.3. Paramètres déterminant les types de creux de tension

#### I.4.3.1. Types de courts-circuits

Les courts-circuits sont la cause principale des creux de tension. Si on excepte les différentes variantes de courts-circuits entre phases et neutre, on distingue alors quatre types de courts-circuits: monophasés, entre deux phases et terre, biphasés et triphasés (voir Figure I.9).

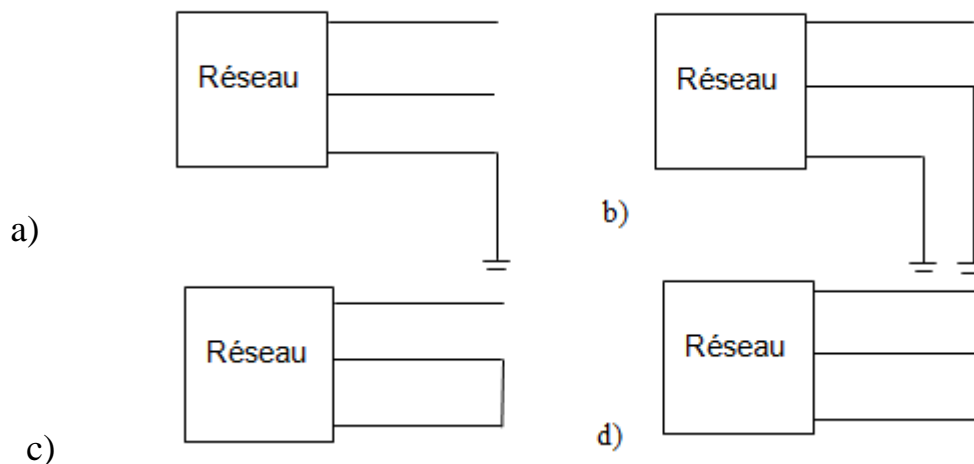


Figure I.9: Types de courts-circuits : monophasé (a), biphasé entre phase et terre (b), biphasé entre deux phases(c) et triphasé (d).

Les courts-circuits monophasés représentent 70% des courts-circuits et sont donc les plus fréquents. Ils se caractérisent par une chute de tension sur une des trois phases à l'endroit du court-circuit. En fonction du régime de neutre, les deux autres phases restent les mêmes ou se caractérisent par des surtensions avec déphasages.

Les creux de tension biphasés entre deux phases viennent en seconde position puisqu'ils représentent 15% des courts-circuits. Ils se caractérisent par des chutes de 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 biphasés entre phase et terre représentent 10% des courts-circuits. Ils sont à l'origine des chutes de tension sur deux phases à l'endroit du court-circuit avec ou sans déphasage supplémentaire. En fonction du régime de neutre, la phase saine peut rester la même ou se caractériser par une surtension.

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.4.3.2. Régime de neutre

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

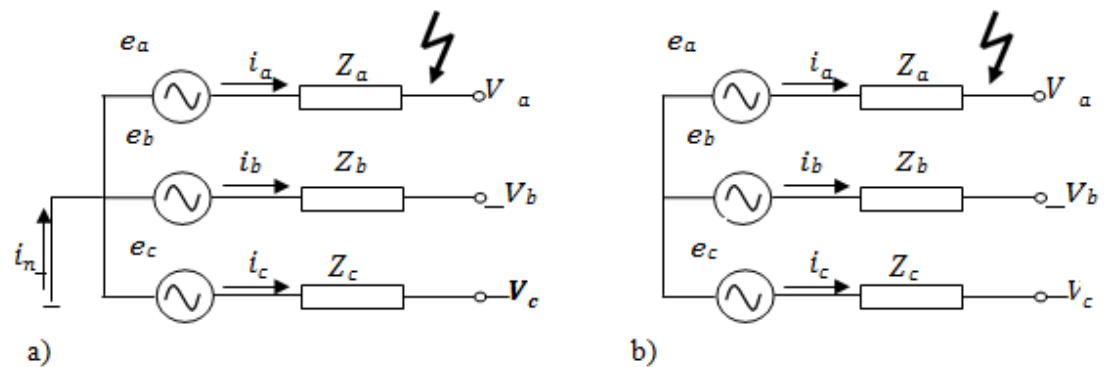


Figure I.10: Régime de neutre: direct (a) et isolé (b).

Le schéma simplifié d'un système avec neutre relié directement à la terre est présenté en (Figure I.10a). La relation entre les courants des trois phases et le courant du conducteur de neutre est la suivante:

$$i_a + i_b + i_c = i_n \quad (I.5)$$

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.5). 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.11a). Le schéma d'un système avec neutre isolé est présenté en (Figure I.10b) à. La relation entre les courants de phase et le conducteur de neutre est donnée par:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (I.6)$$

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 ..... 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.11b). Ce phénomène est d'autant plus accentué que les neutres côté charge et côté source ont des potentiels éloignés.

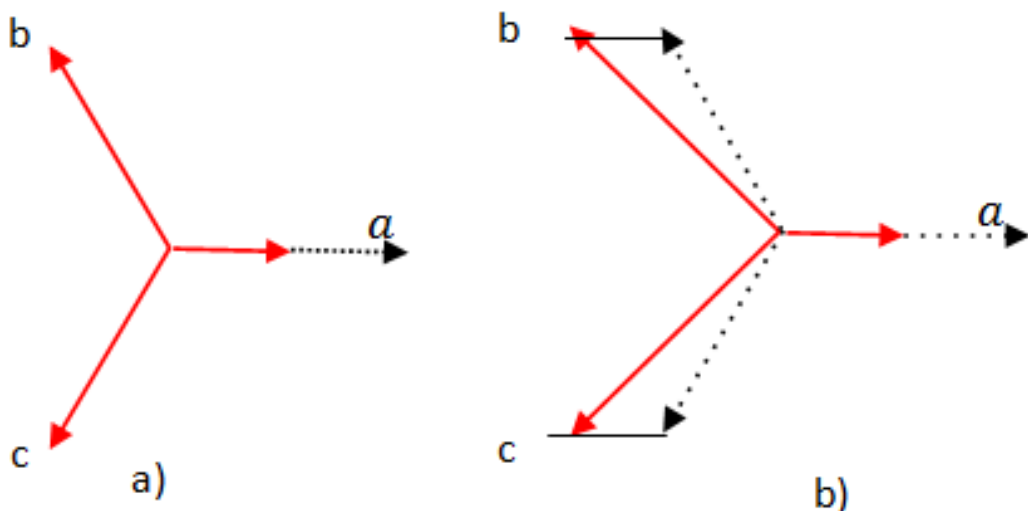


Figure I.11: Signatures des creux de tension dus à un défaut monophasé en régime de neutre relié directement à la terre (a) et à distribution isolée (b)

## I. 5. 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:

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'énerg,[11].

## I. 6. Surtensions et surintensités,

### I.6.1. Définition, origine et surintensités

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1,1 pu à 1,8 pu. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courtcircuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1,73 pu, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1,5 pu[7].

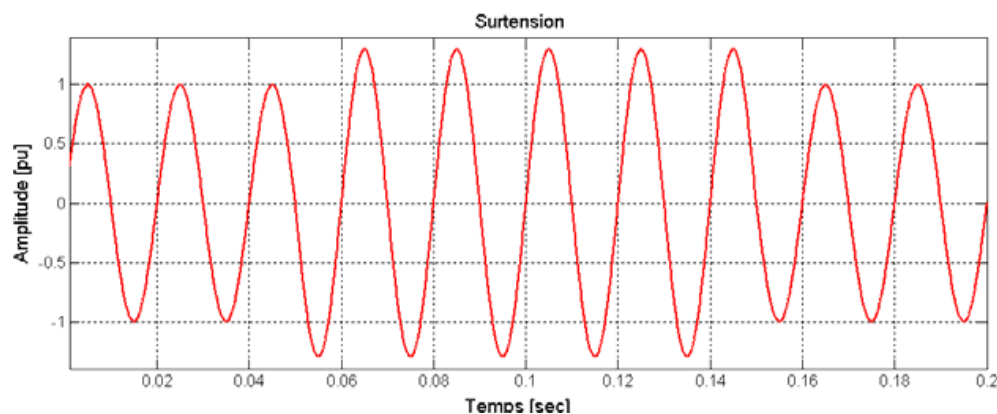


Figure I.12: exemple de surtension

### **I.6.2. 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[9].

### **I.6.3. 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[7].

### **I.6.4. Variations de tension**

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

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

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

- Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25.

Ces variations sont dues aux charges dont Hz la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs[7].

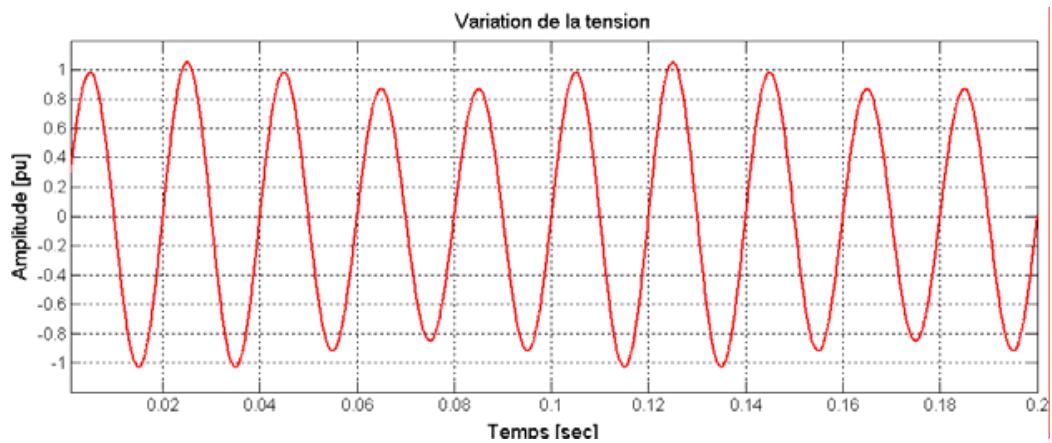


Figure I.13: Exemple de variation de tension

### I.6.5. 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 (Figure I.14).

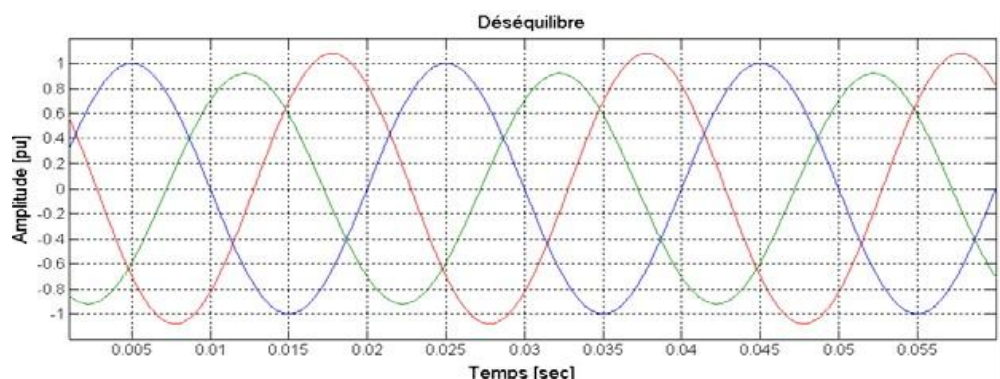


Figure I.14: Exemple de déséquilibre des amplitudes et des phases

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  $120^\circ$ . 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[7].

## I. 7. les harmoniques

### I.7.1. Définition Les harmoniques et Les interharmoniques

Les **harmoniques** sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension. Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples à celle du fondamental.

Les **interharmoniques** sont des signaux non multiples de la fréquence industrielle. Les variateurs de vitesses pour machines asynchrones, les fours à arcs sont les principaux générateurs d'interharmoniques[12].

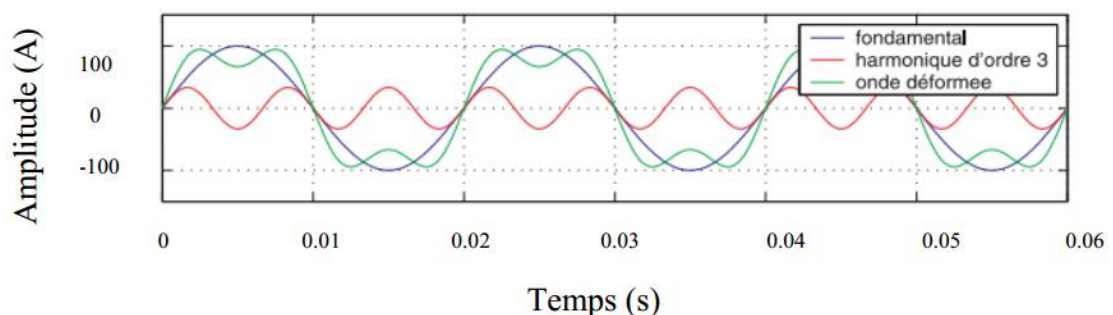


Figure I.15: Représentation d'une onde déformée

## I.7.2. caractéristiques des harmoniques

### a) Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (I.7)$$

$f_n$  : fréquence de l'harmonique.

$f_1$  : fréquence du fondamental.

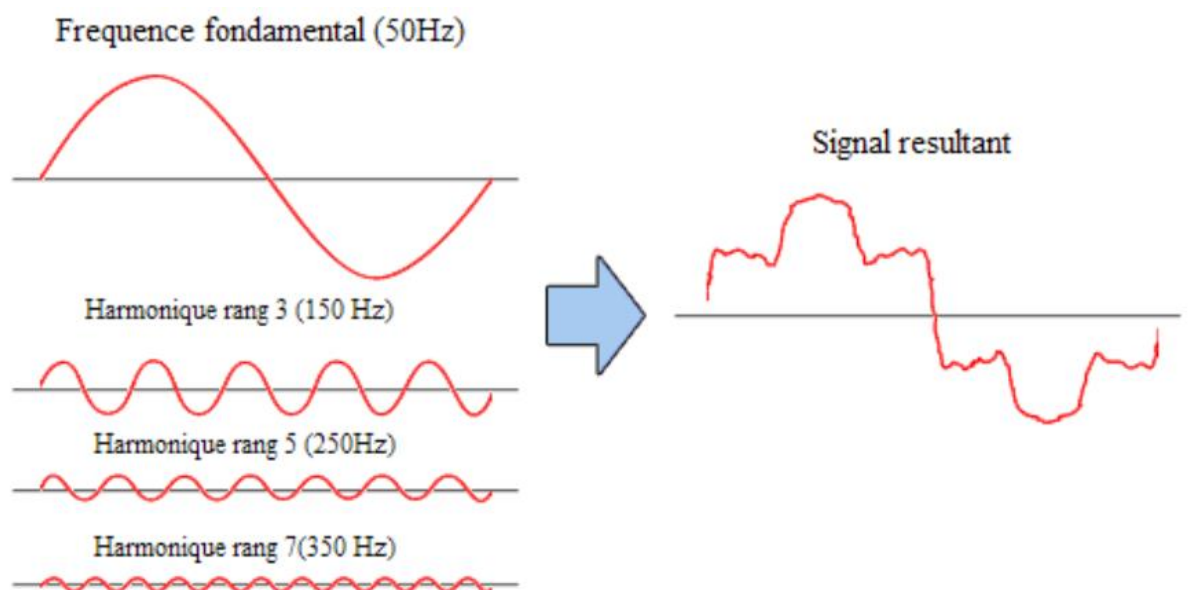


Figure I.16: signal sinusoïdale affecté par des harmoniques

### b) Expression de la grandeur déformée

Le développement en série de **FOURIER** de tout phénomène périodique est de la forme :

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (I.8)$$

- $Y_0$  : amplitude de la composante continue généralement nulle en distribution électrique en régime permanent.
- $Y_n$  : valeur efficace de la composante de rang n,
- $\varphi_n$  : déphasage de la composante harmonique au temps initial.

L'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

**c) Valeur efficace d'une grandeur déformée**

La valeur efficace de la grandeur déformée conditionne les échauffements, donc habituellement les grandeurs harmoniques sont exprimées en valeur efficace. Pour une grandeur sinusoïdale, la valeur efficace est la valeur maximale divisée par racine de deux. Pour une grandeur déformée et en régime permanent, l'énergie dissipée par effet JOULE est la somme des énergies dissipées par chacune des composantes harmoniques soit :

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \tag{I.9}$$

Dans la mesure où la résistance est considérée comme une constante. La mesure de la valeur efficace de la grandeur déformée s'effectue soit directement par des appareils dits à vraie valeur efficace ou thermiques ou à l'aide d'analyseurs de spectre.

**d) le taux de distorsion harmonique**

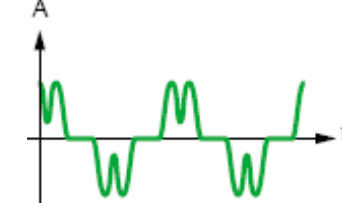
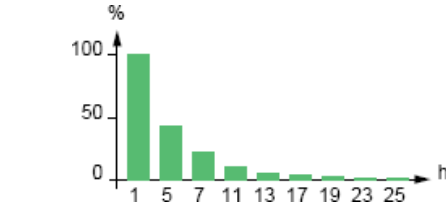
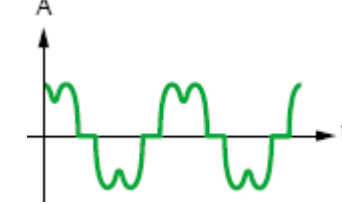

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant C'est le rapport exprimé en pourcent, entre la valeur efficace des composantes harmoniques et l'amplitude du fondamental.

Le **THDi** ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche.

Le **THDu** est en fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau[13].

$$THDu = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \tag{I.10}$$

$$THDi = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \tag{I.11}$$

Charges non Linéaires	Forme d'onde de courant	Spectrse	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur/ chargeur			28 %


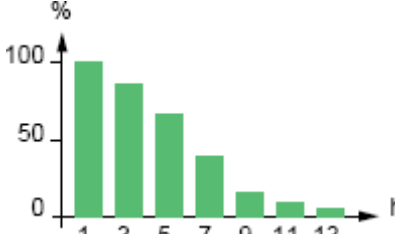
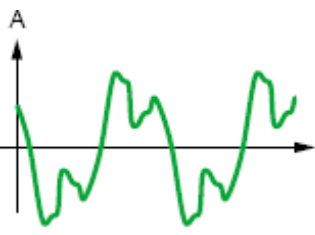
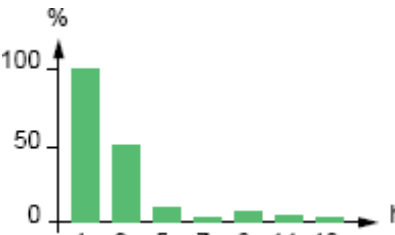
<p><b>Charge informatique</b></p>			<p>115 %</p>
<p><b>Eclairage fluorescent</b></p>			<p>53 %</p>

Tableau I.2: caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques,[3].

### I.7.3. Les principales sources d'harmoniques

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

Ce sont des charges, qu'il est possible de distinguer selon leurs domaines, industrielles ou domestiques.

#### a. Les charges industrielles

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

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

#### b. Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage :

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

De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes[3].

### I.7.4. Les effets d'harmoniques

Les effets qu'ils produisent se conjuguent et apparaissent différemment selon les récepteurs. On peut considérer deux types d'effets mesurables :

#### a). Les Effets Instantanés

Altérer le bon fonctionnement de systèmes comportant des composants électroniques du fait de la distorsion en tension qu'ils occasionnent.

#### b). les Effets à terme

- Échauffement des condensateurs ;
- Échauffement des machines tournantes et des transformateurs ;
- Échauffement des câbles ;
- Augmentation de la valeur efficace du courant pour une même puissance active consommée.

#### c). L'impact économique

- Le vieillissement prématuré du matériel conduit à le remplacer plus tôt, à moins de l'avoir initialement surdimensionné,
- Les surcharges du réseau obligent à augmenter la puissance souscrite, et impliquent, à moins d'un surdimensionnement des installations des pertes supplémentaires,
- Les déformations du courant provoquant des déclenchements intempestifs et l'arrêt des installations de production[5].

Matériels	Effets
Condensateurs de puissance	<b>Echauffement ; vieillissement (claquage), résonance.</b>
Moteurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Pertes et échauffement supplémentaires.</b></li> <li>- <b>Réduction des possibilités d'utilisation a plein charge.</b></li> <li>- <b>Couple pulsatoires (vibration, fatigue mécanique).</b></li> <li>- <b>Nuisances sonores.</b></li> </ul>
Transformateurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Pertes (ohmique) et échauffements supplémentaires.</b></li> <li>- <b>Vibrations mécaniques.</b></li> <li>- <b>Nuisances sonores.</b></li> </ul>
Disjoncteurs	<b>Déclenchement intempestif (dépassements des valeurs crête de la tension).</b>
Câbles	<b>Pertes diélectriques et ohmique supplémentaires (particulièrement dans le</b>

	<b>neutre en cas de présence d'harmonique 3).</b>
Ordinateurs	<b>Troubles fonctionnels.</b>
Electronique de puissance	<b>Troubles lies a la forme d'onde (commutation, synchronisation).</b>

Tableau I.3: effets des harmoniques[3].

## I. 8. Les solutions pour atténuer les harmoniques

- Adaptations de l'installation,
- Utilisation de dispositifs particuliers dans l'alimentation,
- Filtrage :
  - Le filtre passif ;
  - Le filtre actif ;
  - Le filtre hybride.

## I. 9. Conclusion

Les problèmes de la qualité de l'onde électrique sont multiples et de natures différentes. Plus que jamais la question de la qualité de l'onde représente un domaine séparé. Depuis les lignes de transmission de la haute tension jusqu'aux appareils domestiques, des problèmes reliés aux phénomènes naturels et aux interférences causées par des récepteurs polluants font appel à des solutions dynamiques très variées. Ces solutions deviennent de plus en plus réalisables grâce au développement rapide dans la technologie des interrupteurs à base de semi-conducteurs.

Les équipements de mitigation commencent à être présents sur les lignes de transport et de distribution des réseaux électriques. Us sont aussi parfois présents à l'intérieur des usines près des charges polluantes. La commande et les topologies de ces équipements demeurent toutefois des sujets d'étude très intéressants dont le but est d'arriver à en optimiser l'exploitation. Le deuxième chapitre traite des méthodes d'analyse des perturbations électriques.

**Chapitre II: Méthodes  
d'analyse des perturbations  
électriques**

## II. 1. Introduction

Durant les dernières décennies, on a pu observer une forte augmentation de l'utilisation de charges non linéaires constituées de convertisseurs d'électroniques de puissance dans les réseaux électriques. L'emploi de tels systèmes peut induire une forte pollution au sein du réseau, et mener ainsi au dysfonctionnement des équipements et des matériels. Ce phénomène implique donc la construction d'outils performants pour l'analyse et la caractérisation des perturbations affectant les formes d'ondes des courants et des tensions parcourant les réseaux. Selon leur fréquence, les perturbations sont classées en deux groupes : perturbations au niveau du fondamental et perturbations harmoniques. Les perturbations au niveau du fondamental[14], affectent l'amplitude des grandeurs d'intérêt (tension ou courant). Ce sont par exemple les creux de tension, les coupures, les surtensions et les déséquilibres. Les perturbations dites « harmoniques » sont caractérisées par l'apparition de nouvelles composantes à des fréquences multiples de la fréquence fondamentale. En s'ajoutant à la composante fondamentale, elles provoquent donc la distorsion des formes d'onde des grandeurs d'intérêt. Les divers types de perturbations sont en général analysés et quantifiés par des méthodes spécifiques, nécessitant souvent l'utilisation de plusieurs grandeurs différentes[15], Par exemple, les creux de tension et les surtensions sont analysées par les valeurs efficaces des grandeurs de phase mesurées ou bien par des méthodes basées sur les composantes symétriques ; les déséquilibres et les harmoniques sont analysés à partir des spectres des grandeurs de phase enregistrées, etc. Cet chapitre a pour objectif d'introduire une nouvelle méthode pour l'analyse des problèmes de la qualité de l'énergie, applicable aux deux types de perturbations précédemment définis. Cette méthode est basée sur la transformation du vecteur d'espace, qui représente de manière concise les grandeurs triphasées. Elle présente l'avantage d'être applicable à tous les types de perturbations envisagés plus haut, et d'utiliser seulement deux grandeurs pour leur analyse.

## 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. Un bref historique sur les transformations des composantes symétriques et leur lien avec la transformation du vecteur d'espace est présenté

dans ce paragraphe. Les composantes symétriques ont été introduites en 1918 par Fortescue[16] , 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) :

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

où  $a=e^{j 2\pi/3}$  , j étant la racine complexe de -1. Le coefficient de normalization  $\frac{1}{3}$  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 :

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

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 :

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

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

#### II.2.1.2.a. Perturbations au niveau du fondamental

En ne considérant que le fondamental de pulsation  $\omega$ , les grandeurs d'un système triphasé sont supposées être de forme sinusoïdale et de pulsation  $\omega$ . 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  $a$ :

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

Représentés dans le plan complexe, ces phaseurs tournent à la même vitesse angulaire  $\omega$ , 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:

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

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

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[17] :

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

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 classer et de caractériser complètement ce type de perturbations.

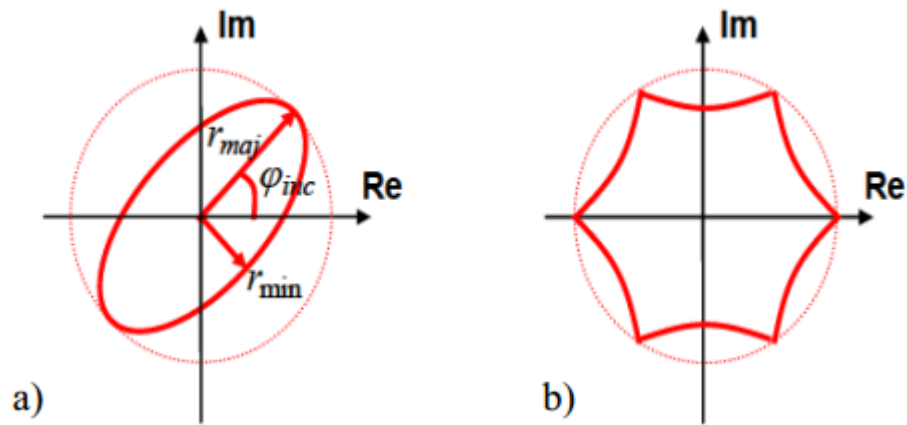


Figure II.1: Vecteur d'espace dans le plan complexe en cas de perturbations au niveau du fondamental (a) et en cas de perturbations harmoniques (b)

### II.2.1.2.b. 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  $\pm k\omega$  :

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

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

Parmi les problèmes de variation d'amplitude, les creux de tension sont les phénomènes les plus fréquents et par conséquent, les plus gênants pour l'industrie. En effet, ils peuvent engendrer des pertes de production et des dégradations de la qualité des produits. Dans la plupart des cas, les creux de tension doivent leur origine aux courts-circuits. En fonction du type et de la localisation du court-circuit, ainsi que du régime de neutre des transformateurs et de la méthode de mesure (entre phases ou entre phases et terre), on distingue différents types (signatures) de creux de tension[18].

En fonction du nombre de phases affectées par les chutes de tension, on distingue creux de tension monophasés, biphasés et triphasés. Les creux de tension monophasés et biphasés sont également appelés non équilibrés et dépendent des déphasages et des amplitudes des phases non affectées par la chute de tension.

Les creux de tension modifient le vecteur d'espace et/ou la composante homopolaire [19]. 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. Les paramètres de l'ellipse et les modifications introduites dans la composante homopolaire permettent de déterminer le type exact du creux de tension. L'inclinaison de l'ellipse indique la ou les phases affecté(es) par la chute

comme montré à la (Figure II.2) où on a désigné par Mono les creux monophasés et par Bi les creux biphasés. La valeur du petit axe de l'ellipse permet d'estimer la profondeur du creux car elle lui est directement proportionnelle. La composante homopolaire, quant à elle, permet la localisation du court-circuit. En effet, son amplitude est nulle lorsque le creux de tension est mesuré à un niveau de tension différent de celui où le court-circuit est produit et non nulle dans le cas contraire.

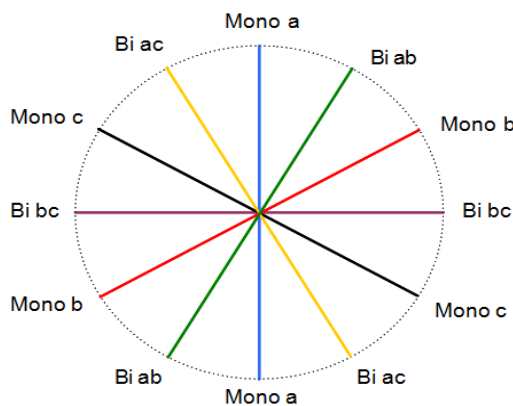


Figure II.2: Type de creux en fonction de l'inclinaison de l'ellipse formée par le vecteur d'espace dans le plan complexe

Par exemple, le creux de tension de la (Figure II.3a) 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.3b). L'angle fait par le grand axe de l'ellipse par rapport à l'axe réel indique que le creux de tension est monophasé avec une chute de tension sur la phase a (voir Figure II.2). Le petit axe de l'ellipse est proportionnel à la profondeur du creux  $d$ . La composante homopolaire est d'une amplitude non nulle, ce qui indique que le creux de tension est mesuré au niveau de tension où le court-circuit s'est produit.

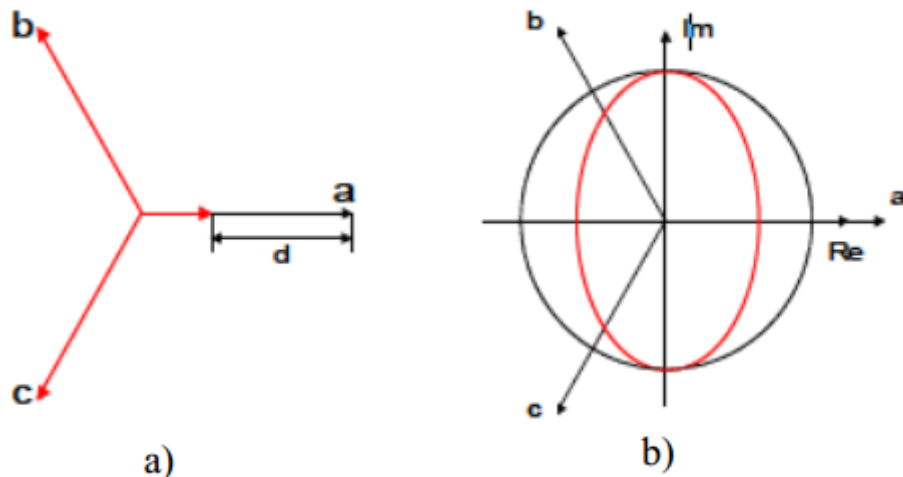


Figure II.3: Creux de tension monophasé (a) et vecteur d'espace correspondant représenté dans le plan complexe (b)

### II.2.2.2. Creux de tension avec surtensions

Des perturbations de ce type sont généralement provoquées par des courts-circuits dans des systèmes à neutre isolé ou fortement impédant, et sont typiques pour le niveau MT[20] . Elles se caractérisent par des chutes de tension sur une ou deux phases et des surtensions sur les autres phases. De ce fait, elles peuvent être considérées à la fois comme surtensions et creux de tension.

Le vecteur d'espace correspondant ne modifie pas sa forme dans le plan complexe du fait du déplacement du neutre. Cependant, l'amplitude et la phase de la composante homopolaire sont modifiées. Sa phase indique la/les phase(s) en chute comme indiqué à la (Figure II.4) et son amplitude est proportionnelle à la chute de tension.

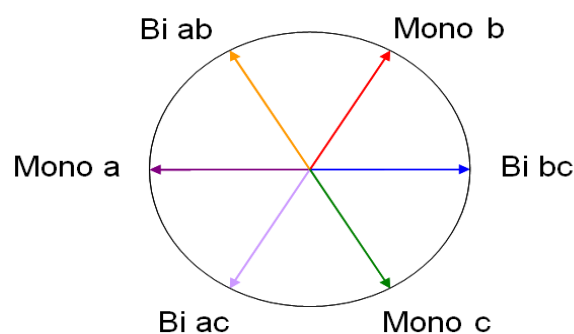


Figure II.4: Phase(s) affectée par la chute de tension en fonction de la phase de la composante homopolaire

### II.2.2.3. 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.2.2.4. 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  $120^\circ$  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:

$$u_u = \left| \frac{u_a + a^2 u_b + a u_c}{u_a + a u_b + a^2 u_c} \right| \times 100\% \quad (II.8)$$

Où  $u_a$ ,  $u_b$ , et  $u_c$  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[21].

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:

$$\bar{X}_n = \frac{1}{3}(u_a + a^2 u_b + a u_c) \quad X_p = \frac{1}{3}(u_a + a u_b + a^2 u_c) \quad (II.9)$$

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

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

$$u_u = \left| \frac{\overline{X_n}}{X_p} \right| \times 100\% = \left| \frac{X_n}{X_p} \right| \times 100\% \quad (II.10)$$

Cette équation montre que le facteur de déséquilibre est égal au rapport entre le module du phaseur de fréquence négative et celui du phaseur de fréquence positive du vecteur d'espace.

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 perturbations harmoniques sont dues à l'insertion au réseau de charges non linéaires comme les équipements intégrant de l'électronique de puissance (variateurs, onduleurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, etc.). Les harmoniques provoquent des échauffements qui, à terme, diminuent la durée de vie des équipements. Ils peuvent également être à l'origine de troubles fonctionnels (synchronisation, commutation) et d'erreurs de mesure.

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 répartis 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.

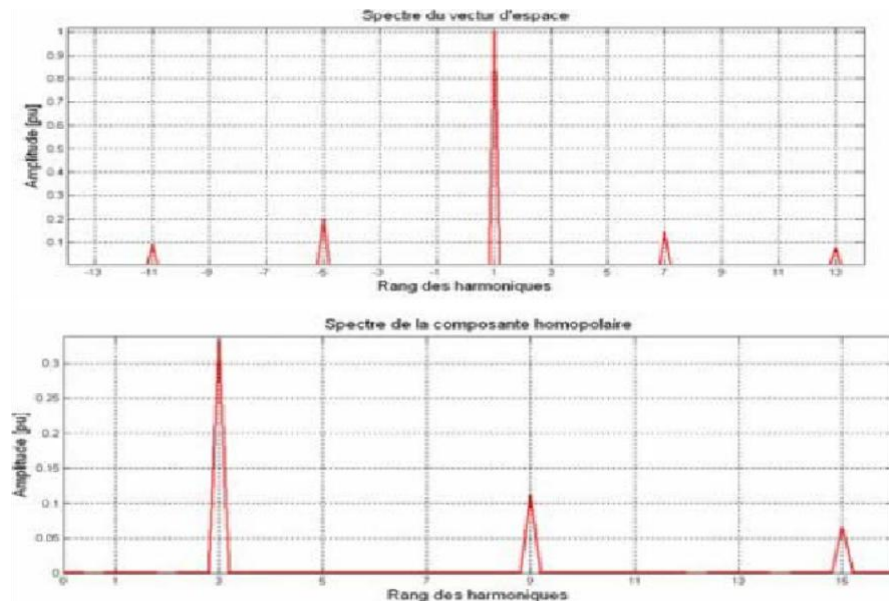


Figure II.5 Spectre du vecteur d'espace et de la composante homopolaire pour un système triphasé équilibré de trois signaux carrés déphasés de  $\pm 120^\circ$

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.5) De plus, on peut remarquer que les amplitudes des harmoniques sont conservées par la transformation du vecteur d'espace et dans la composante homopolaire.

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 même 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.

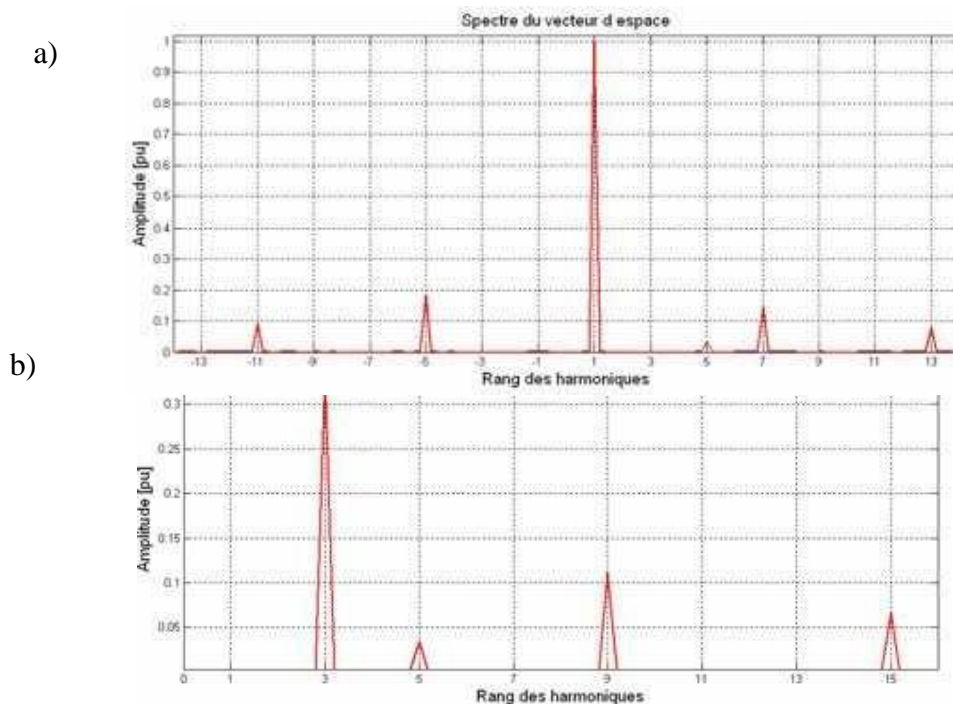


Figure II.6: Spectre du vecteur d'espace et de la composante homopolaire pour un système de trois signaux carrés dont l'harmonique  $5n$  n'est pas réparti uniformément sur les trois phases

Pour illustrer les modifications introduites par une répartition non uniforme des harmoniques sur les phases du système triphasé, on reprend l'exemple précédent (système triphasé formé par trois signaux carrés) où on introduit un déséquilibre au niveau de

l'harmonique de rang 5. Son amplitude a été fixée à 0.1pu pour une des phases, et n'a pas été modifiée pour les deux autres phases (0.2pu).

Le spectre du vecteur d'espace correspondant se caractérise par une composante principale de rang 5 située sur les fréquences négatives du vecteur d'espace. Son amplitude est égale à l'amplitude moyenne des harmoniques sur les trois phases, c'est à dire 0.166pu.

Deux composantes supplémentaires correspondant au même rang d'harmonique apparaissent sur les spectres du vecteur d'espace et de la tension homopolaire. Elles se caractérisent par la même amplitude de 0.0333pu, correspondant à l'écart moyen de l'amplitude des harmoniques des trois phases.

Cet exemple montre que l'analyse des harmoniques contenus dans un système triphasé par la transformation du vecteur d'espace permet d'obtenir directement l'amplitude moyenne et le niveau de déséquilibre de chaque harmonique[22].

### II.2.3.2. Outils d'analyse

#### II.2.3.2.a. Série de Fourier

Par définition, une fonction  $f(t)$  est dite périodique si elle vérifie la relation  $f(t) = f(t + T_0)$ , où  $T_0$  est sa période fondamentale.

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 :

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) - b_k \sin(k\omega_0 t)], \quad (II.11)$$

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 :

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_k = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \langle x \rangle_k e^{jk\omega_0 t} \quad (II.12)$$

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

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

$$\langle x \rangle_k = \frac{1}{T_0} \int_{(T_0)} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (II.13)$$

Dans le cas de signaux à valeurs réelles, les coefficients  $x_k$  vérifient la propriété  $x_{-k} = x_k^*$ , où  $x_k^*$  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.2.3.2.b. Transformée de Fourier

L'outil série de Fourier se rapporte aux signaux purement périodiques. Les signaux non périodiques peuvent aussi, sous certaines conditions, se décomposer en une somme d'exponentielles complexes :

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad \text{où} \quad X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (II.14)$$

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.2.3.3. Caractérisation

Différents critères sont définis pour caractériser les perturbations harmoniques. Le taux de distorsion harmonique (THD) est le plus employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal périodique :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_{eff}},$$

où  $V_{eff}$  est la valeur efficace du signal analysé, et  $V_k$  est son harmonique de rang  $k$  [7].

### II.2.3.4. Propagation Des Harmoniques

Les courants harmoniques sont injectés par les charges non linéaires raccordés à un réseau. Ils rencontrent les impédances des éléments qu'ils traversent en créant des tensions harmoniques aux bornes des de ces éléments  $V_h = Z_h I_h$ , on cherche à connaître la valeur des tensions harmoniques en chaque point de réseau afin de vérifier le respect des niveaux de compatibilité ainsi que les courants traversant chaque élément du réseau afin de déterminer le dimensionnement ou de déceler la présence d'une surcharge.

Les courants harmoniques se propagent avec peu d'atténuation des réseaux basse tension vers les réseaux de tension supérieure (sauf les multiples de 3), alors que les tensions harmoniques se propagent bien des niveaux de tension élevés vers les niveaux de tensions inférieures. Néanmoins ce processus peut être largement modifié par la présence de

résonnances sur le réseau liées à la présence des condensateurs ou de capacités parasites[23].

Analyse des creux de tension, coupures brèves et surtensions

## II.2.4. 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.2.4.1. 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:

$$x_{eff}(t) = \sqrt{\frac{1}{kT_0} \int_{t-\frac{kT_0}{2}}^{t+\frac{kT_0}{2}} x(\tau)^2 d\tau} \quad (II.15)$$

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

$$A_x(t) = \sqrt{2}x_{eff}(t) \quad (II.16)$$

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.2.4.2. 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  $x(t)$ , et de partie imaginaire la transformée de Hilbert de  $x(t)$  [24] :

$$x_a(t) = x(t) + j * \text{hilbert}(x(t)) \quad (II.17)$$

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:

$$x(t) = A(t)e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (II.18)$$

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.2.4.3. Composante Fondamentale

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

$$x_{f\text{ond}}(t) = \frac{2}{T_0} \left| \int_{t-\frac{T_0}{2}}^{t+\frac{T_0}{2}} x(\tau) e^{-j\frac{2\pi}{T_0}\tau} d\tau \right| \quad (II.19)$$

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[9].

### II.2.5. 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[25].

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,[26, 27]. Dans notre application, les algorithmes de segmentation seront appliqués à l'amplitude du signal mesuré, estimée par une des techniques présentées au paragraphe II.1.1. 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[28]. 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 pré-établis par l'utilisateur. Leur inconvénient majeur est lié au fait que leurs performances dépendent directement de la validité du modèle utilisé.

Les algorithmes utilisés dans la suite pour détecter et isoler les perturbations considérées agissent dans le domaine temporel, et portent sur l'amplitude du signal estimée par la composante fondamentale. Afin de détecter un creux de tension, l'algorithme de segmentation choisi est appliqué à chacune des trois tensions, car les phases caractérisées par des chutes de tension ne sont pas connues a priori. Ensuite, les résultats pour chaque phase sont comparés et une décision de segmentation commune pour les trois tensions est prise. Ceci est généralement fait par des algorithmes de comparaison des segments prenant en

compte le fait qu'un creux de tension peut affecter une, deux ou trois phases, et que les chutes de tension provoquées par le même événement ne sont pas forcément détectées au même instant sur les trois phases.

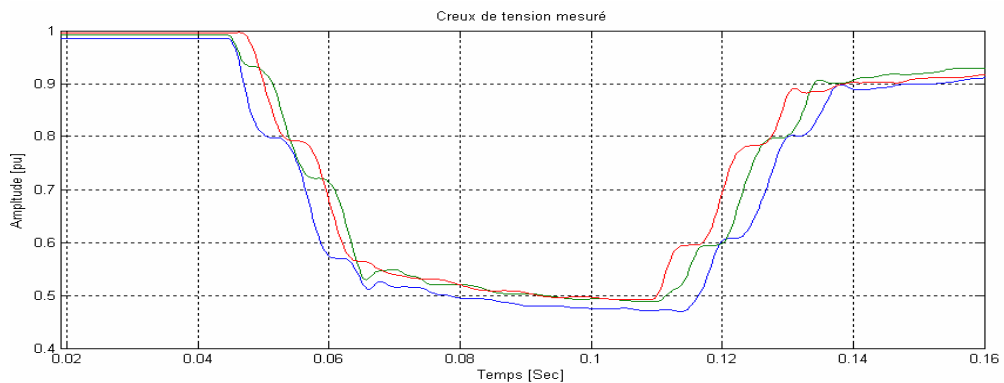


Figure II.7: Tensions efficaces d'un creux de tension triphasé mesuré

Par exemple, le creux de tension représenté à la ( Figure II.7) est provoqué par un défaut triphasé et se caractérise par une chute de tension sur les trois phases. Même si ces chutes ont la même origine, les changements dans les tensions efficaces des trois phases ne sont pas effectués au même moment. Ce phénomène est visible à la fois au début et à la fin du creux. L'algorithme de segmentation appliqué à chacune des phases détecte donc des changements d'amplitude à des instants différents. Par la suite, ces instants sont comparés et ceux qui sont proches dans le temps sont considérés comme provoqués par le même événement. L'instant de cet événement est alors déterminé par la moyenne des instants correspondants sur les trois phases.

La segmentation de chacune des phases et l'analyse des segments peuvent introduire des erreurs de segmentation surtout dans le cas de creux de tension de courte durée ou à plusieurs niveaux.

## II.2.6. Méthodes de classification

La classification 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.

### II.2.6.1. Méthode des 6 tensions

La méthode des 6 tensions[29], 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.8a). 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.8b). 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 .

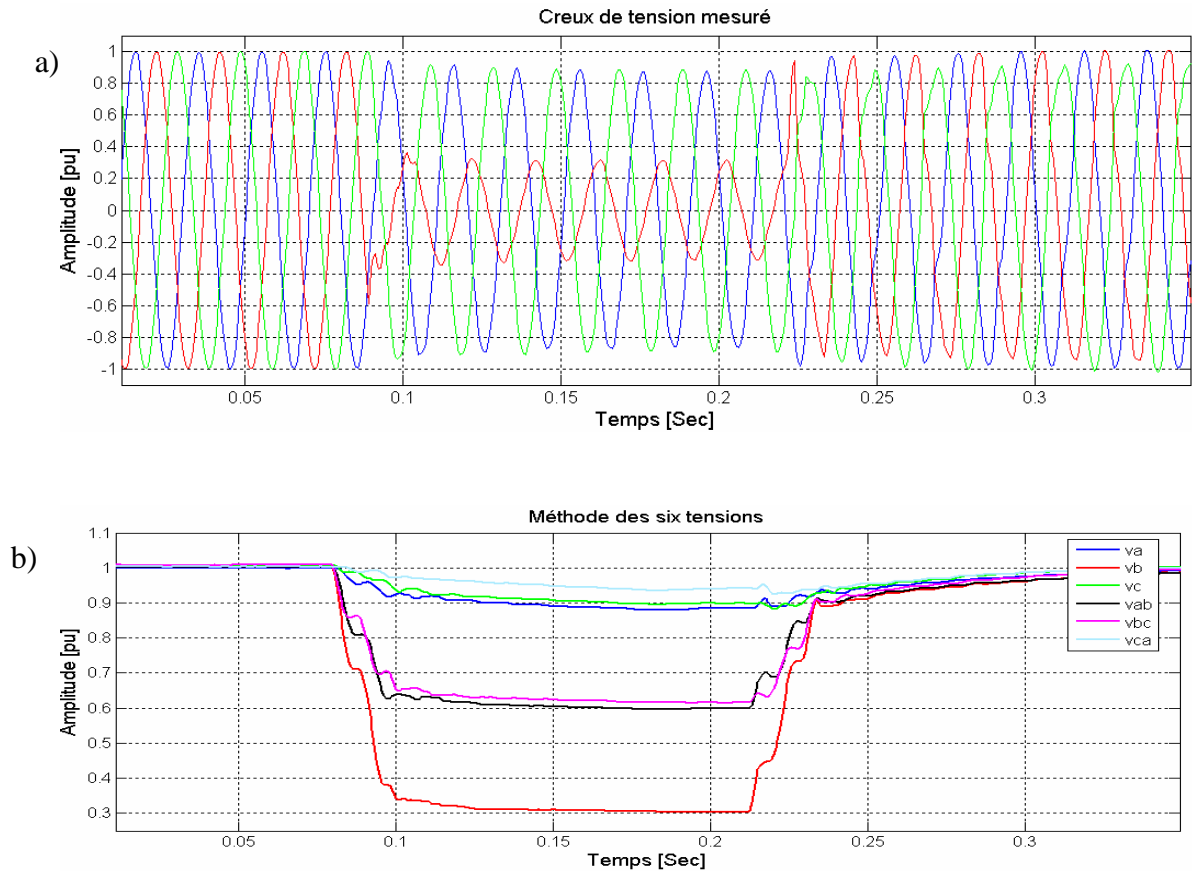


Figure II.8: Creux de tension mesuré (a) identification du type de creux par la méthode des six tensions (b)

La méthode des six tensions permet de différencier les creux de tension monophasés, biphasés et triphasés. Cependant, il faut prévoir des cas particuliers dans l’algorithme afin d’analyser les creux de tension triphasés et les creux de tension biphasés de type E. En effet, les creux de tension de type E se caractérisent par trois tensions minimales : deux tensions simples et une tension composée. Dans le cas des creux de tension triphasés, les six tensions se caractérisent par la même amplitude.

La méthode a été reprise et modifiée durant ce travail de recherche de telle sorte qu’elle puisse classifier correctement les creux de tension triphasés et les creux de tension de type E,[7]. L’algorithme utilisé est présenté en (Figure II.4). Dans un premier temps, les amplitudes des six tensions sont estimées et les tensions maximale  $V_{max}$  et minimale  $V_{min}$  sont identifiées.

$$V_{min} = \min \left\{ V_a, V_b, V_c, \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}, \frac{V_{bc}}{\sqrt{3}}, \frac{V_{ca}}{\sqrt{3}} \right\} \quad V_{max} = \max \left\{ V_a, V_b, V_c, \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}, \frac{V_{bc}}{\sqrt{3}}, \frac{V_{ca}}{\sqrt{3}} \right\} \quad (II.20)$$

Si l'écart entre la tension maximale et la tension minimale est au dessus d'un certain seuil, le creux de tension est classifié comme non équilibré. Dans ce cas la tension minimale ou le nombre des tensions minimales déterminent le type du creux de tension. Si la différence entre la tension maximale et la tension minimale est au dessous de ce seuil, les signaux mesurés sont équilibrés. L'amplitude de la tension minimale détermine s'il s'agit d'un creux de tension ou si les signaux enregistrés ne se caractérisent pas par une perturbation au niveau de l'amplitude.

La méthode des 6 tensions est simple et efficace. Elle permet de déterminer si un creux de tension est monophasé, biphasé ou triphasé, ainsi que de déterminer la (les) phase(s) en chute. Cependant, elle utilise 6 variables pour la classification des creux de tension et ne permet pas la différenciation des différents types de creux de tension monophasés et biphasés.

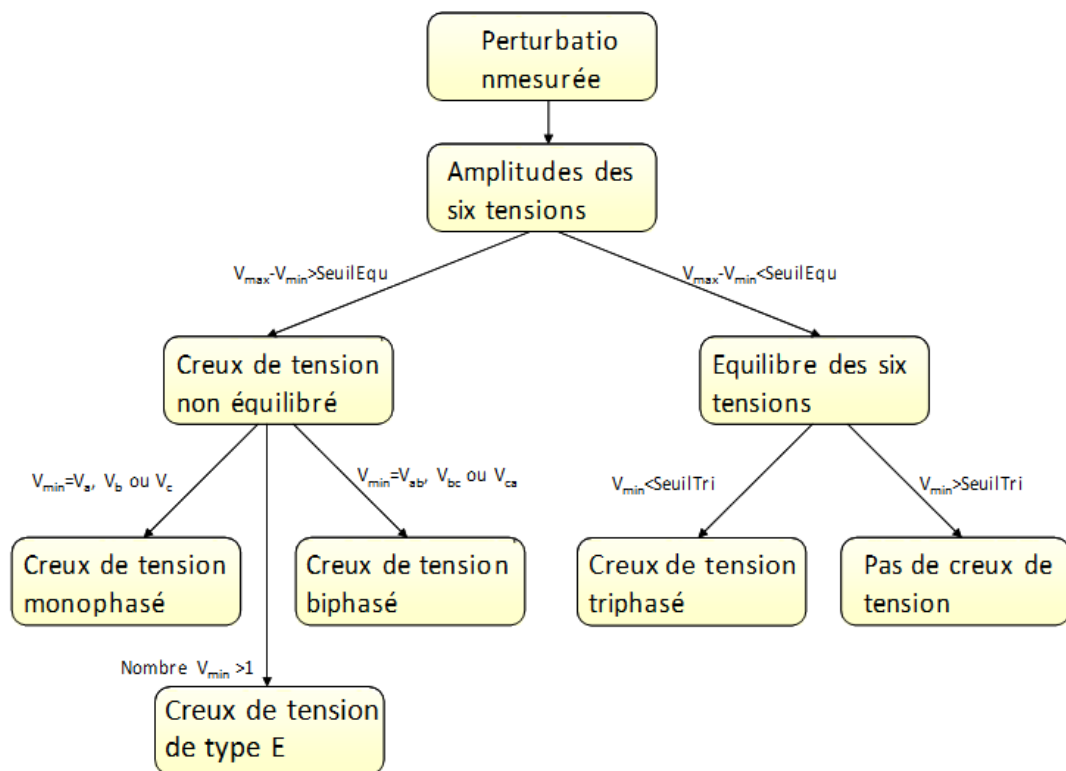


Figure II.9: Algorithme de classification amélioré des creux de tension basé sur la méthode des six tensions

### II.2.6.2. Méthode des composantes symétriques

La méthode des composantes symétriques[30] , détermine 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.

L'algorithme de classification est présenté en (Figure II.10). Il est constitué des étapes suivantes :

1. Les tensions directe  $V_d$  , inverse  $V_i$  et homopolaire  $V_0$  sont déterminées par la transformée de Fortescue :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{II.21}$$

où  $V_a$  ,  $V_b$  et  $V_c$  sont les phaseurs des trois tensions obtenus par la Transformée de Fourier Discrète.

2. Le creux de tension est défini comme équilibré (type A) ou non équilibré (type C ou D) par une comparaison entre la tension directe et la tension inverse. Pour  $V_i \ll |1-V_d|$ (en pu), le creux de tension est considéré comme équilibré. Si cette condition n'est pas remplie, le creux de tension est considéré comme non équilibré.

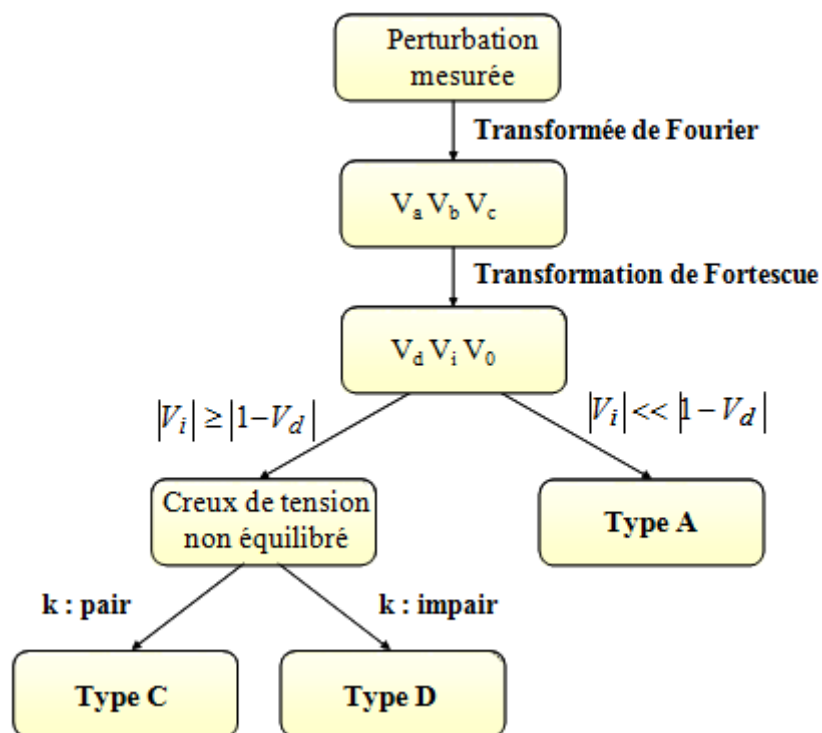


Figure II.10: Algorithme de classification des creux de tension basé sur les composantes symétriques

3. Si le creux de tension est non équilibré, son type est déterminé par la grandeur  $k$  ci dessous, qui est une fonction de l'angle entre la tension directe  $V_d$  et l'image de la tension inverse  $1-V_i$  :

$$k = \text{round} \left( \frac{\text{angle}(V_d, 1-V_i)}{60^\circ} \right) \quad (II.22)$$

où l'arrondi « round » représente la valeur entière la plus proche A partir de la valeur de  $k$ , le type de creux de tension est déterminé comme montré au Tableau II.1, et les phases en chute sont indiquées en indice.

$k$	0	1	2	3	4	5
Type de creux	Cbc	Db	Cab	Dc	Cac	Da

Tableau II.1: type de creux de tension en fonction de l'indice  $k$

Une fois que le type de creux de tension est déterminé, le tension inverse  $V_i$  subit une rotation :

$$V_i^{\wedge} = V_i e^{jk \frac{\pi}{3}}$$

Deux variables permettant de caractériser les creux de tensions sont alors calculées :

$$V_{ch} = V_d - V_i^{\wedge}; \quad F = V_d + V_i^{\wedge}; \quad (II.23)$$

La grandeur  $V_{ch}$ , appelée tension caractéristique, est liée à la profondeur des creux de tension. La grandeur  $F$ , appelée facteur PN dépend du nombre et de la puissance des moteurs connectés au réseau et indique le déséquilibre entre l'impédance directe et inverse. Cette grandeur permet de déterminer si l'identification des creux de tension par la tension caractéristique est fiable ou non. Lorsque le facteur PN est proche d'unité, l'hypothèse d'égalité entre l'impédance directe et l'impédance inverse est remplie et les creux de tension peuvent être correctement analysés par la tension caractéristique.

Lorsque le facteur PN est inférieur à unité (présence importante des moteurs asynchrones et inégalité entre les impédances directe et inverse), l'analyse des creux de tension par la tension caractéristique n'est plus fiable.

L'avantage principal de la méthode des composantes symétriques est l'utilisation d'une seule grandeur complexe (la tension caractéristique) pour la classification des creux de tension. Cependant, cette méthode est basée sur des suppositions qui ne sont pas toujours remplies (égalité entre les impédances directe et inverse et composante homopolaire nulle). De plus, cette méthode ne permet pas une classification exhaustive des creux de tension.

### II.2.7. Caractérisation

Dans ce paragraphe sont présentés des indices et des méthodes utilisés pour déterminer la sévérité des creux de tension et leur impact sur les équipements électriques.

L'impact des creux de tension sur les différents appareils dépend principalement de leur amplitude et de leur durée. Les creux de tension peuvent donc être représentés par un point dans un repère contenant en abscisse la durée du creux de tension et en ordonnée l'amplitude du signal. Dans ce même repère, des courbes de sensibilité sont définies délimitant les zones de tolérance des appareils aux creux de tension. Les conséquences des creux de tension sont évaluées par leur position par rapport aux courbes de référence.

La (Figure II.11) présente trois creux de tensions dans le diagramme amplitude/durée notés par des indices de 1 à 3 et deux courbes de sensibilité : la courbe ITIC, qui est une courbe de référence pour la sensibilité à la microélectronique et une deuxième courbe de sensibilité d'un type de moteur. A l'aide de cette figure, on peut remarquer que :

- les appareils à base de microélectronique sont sensibles aux creux 1 et 2
- les moteurs sont sensibles uniquement au creux 1
- le creux de tension 3 n'a pas de conséquences importantes sur le fonctionnement des équipements électriques précédents.

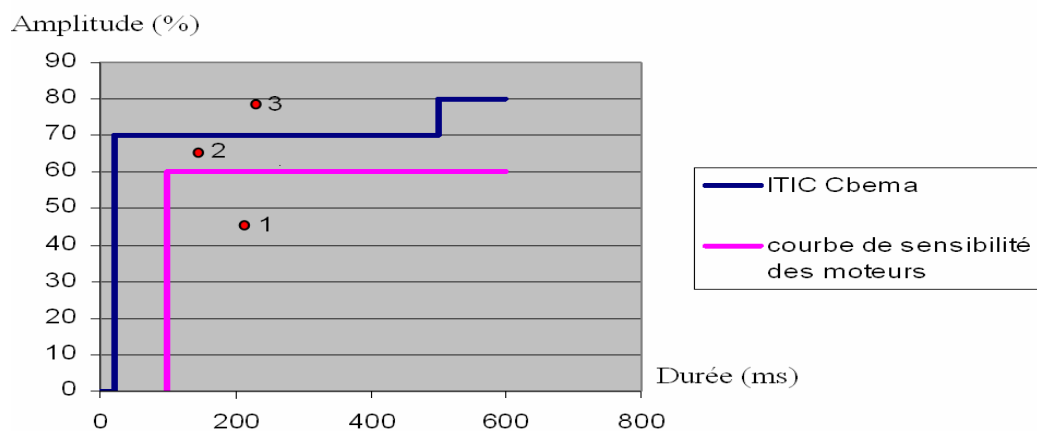


Figure II.11: Courbes de sensibilité et creux de tensions représentés dans le diagramme amplitude/durée

Comme dit plus haut, les creux de tension nécessitent deux grandeurs pour être caractérisés: l'amplitude et la durée. Différents indices permettant de caractériser les creux de tension par une seule grandeur ont été définis, parmi lesquels on distingue :

- la perte de tension

La perte de tension est définie comme l'intégrale de la tension dans l'intervalle du creux de tension :

$$L_V = \int (1 - V(t)) dt \quad (II.24)$$

où  $V(t)$  est l'amplitude du signal en fonction du temps donnée en pu.

- la perte d'énergie

La perte de l'énergie est définie comme l'intégrale de l'énergie dans l'intervalle du creux de tension :

$$L_E = \int (1 - V(t))^2 dt \quad (II.25)$$

Les indices « perte de tension » et « perte d'énergie » sont définis pour les systèmes monophasés.

Dans le cas triphasé, ces indices sont calculés pour chacune des phases. Pour caractériser l'impact des creux de tension triphasés, d'autres indices ont également été introduits, dont :

- le score du creux ou « sag score » [31] :

$$V = 1 - \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (II.26)$$

où  $V_a$ ,  $V_b$  et  $V_c$  sont les tensions efficaces données en pu.

Cet indice présente l'avantage d'être simple et facile à calculer. Cependant, il ne prend pas en compte la durée du creux de tension qui est un paramètre important pour l'évaluation de l'impact des creux de tension. Un deuxième indice équivalent à la perte de l'énergie est introduit par [32]. Dans le cas triphasé, il est défini par :

$$W = \sum_{i=1}^3 (1 - V_i)^{3.14} T_i \quad (II.27)$$

où  $W$  représente la perte de l'énergie due au creux de tension ;  $V_i$  et  $T_i$  sont respectivement l'amplitude et la durée de la chute de tension sur la phase  $i$ .

## II. 3. Variations de tension et de fréquence

### II.3.1. Outils d'analyse

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 [33, 34], 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.3.2. 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.3.2.1. 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  $x$  :

$$F_X(x) = Prob(X \leq x) \quad (II.28)$$

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

$$P_X(x) = Prob(x < X < x + dx) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (II.29)$$

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.3.2.2. 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 :

$$E(X^n) = \int x^n P_X(x) dx \quad (II.30)$$

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.30).

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 :

$$\text{Var}(X) = E[(X - E(X))^2] = E(X^2) - E^2(X) \quad (\text{II.31})$$

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 :

$$\sigma_X = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (\text{II.32})$$

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  $X$ , [35] :

$$\text{Moyenne empirique : } \mu_X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{II.33})$$

$$\text{Variance empirique : } \sigma_X^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_X)^2 \quad (\text{II.34})$$

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 [7] . II.4.2.1.

## II. 4. Applications

Des exemples d'application de la transformation du vecteur d'espace pour l'analyse de la qualité de l'énergie sont présentés dans ce paragraphe. Les formes d'ondes traitées ont été enregistrées au niveau MT avec une fréquence d'échantillonnage de 1,6kHz. Toutes les grandeurs sont données en pu.

Le premier exemple concerne l'analyse d'un creux de tension, pour lequel les résultats obtenus sont représentés à la (Figure II.12). Cette perturbation se caractérise par une chute de

tension sur deux phases et une baisse de tension sur la troisième, comme on peut le voir sur la forme d'onde de la (Figure II.12a).

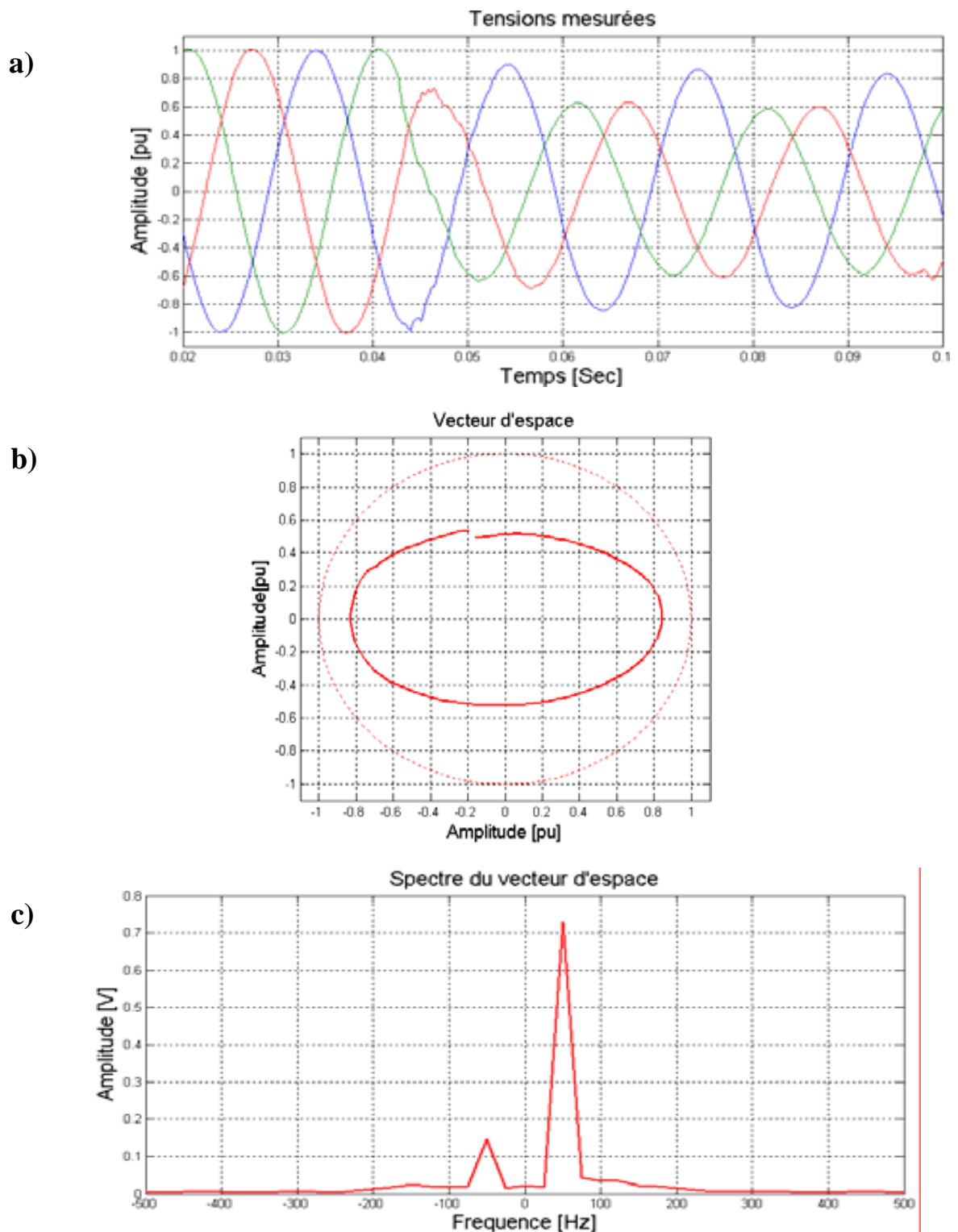


Figure II.12: Tensions mesurées (a), forme du vecteur d'espace dans le plan complexe (b,) spectre du vecteur d'espace (c)

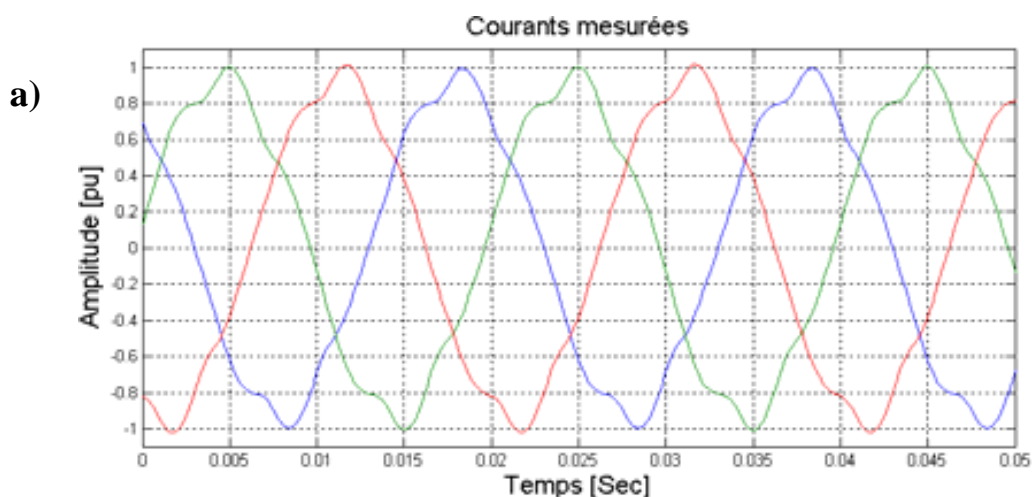
Le vecteur d'espace correspondant, représenté à la (Figure II.12b) sur une période de 20ms pendant la perturbation, suit une forme ellipsoïdale dans le plan complexe. Son spectre (Figure II.12c) se caractérise alors par la présence de deux composantes principales :

$$x_p = 0.73e^{j106^\circ} ; \text{ à } +50\text{Hz}, \text{ et } x_n = 0.15e^{-j107^\circ}; \quad (\text{II.35})$$

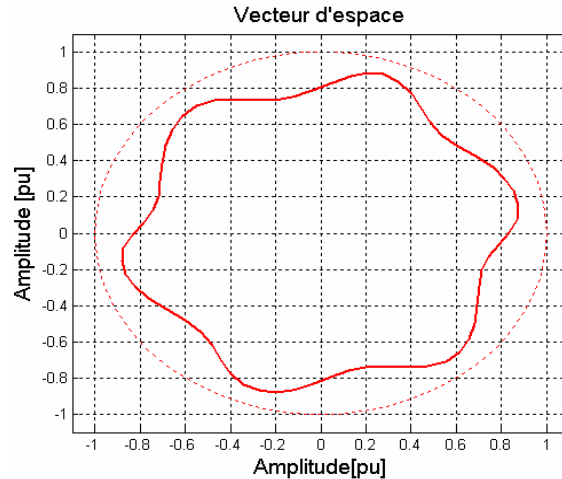
à  $-50\text{Hz}$ , dont les valeurs ont été estimées par transformée de Fourier. Les paramètres du vecteur d'espace (axes et inclinaison) sont estimés à partir de ces valeurs numériques et de l'équation (II.6), et non directement de la forme du vecteur d'espace afin d'éviter l'impact négatif du bruit et des harmoniques. L'inclinaison de l'ellipse  $\varphi_{inc} = -1^\circ$  indique que le creux de tension considéré est biphasé et sur les phases b et c. La valeur du petit axe  $r_{\min} = 0.58 pu$  est proportionnelle à la profondeur du creux. La composante homopolaire  $x_0 = 0.02 pu$  est proche de 0, ce qui indique que le creux de tension n'a pas été mesuré au même niveau de tension que celui où le court-circuit s'est produit.

Un deuxième exemple concerne des courants contenant des perturbations harmoniques basse fréquence. Les résultats sont représentés à la (Figure 8). Le vecteur d'espace prend dans le plan complexe une forme quasiment circulaire avec des déformations haute fréquence dues à la présence de perturbations harmoniques (Figure 8b). Son spectre (Figure 8c) confirme la présence d'harmoniques de rang 5 et 7 dans les formes d'onde enregistrées. De plus, ce spectre permet de mettre en évidence un léger déséquilibre dans les courants, de par la présence d'un harmonique de fréquence  $-50\text{Hz}$  (composante inverse du fondamental).

L'harmonique de rang 5 est situé dans les fréquences négatives du spectre du vecteur d'espace et l'harmonique de rang 7 est du côté fréquences positives. Ces deux harmoniques sont répartis de manière uniforme sur les trois phases puisqu'on n'observe aucun harmonique supplémentaire à ces fréquences. Les harmoniques de rang  $3n$  étant en phase, ils ne peuvent pas circuler sur le réseau en amont des transformateurs et la composante homopolaire reste nulle dans ce cas.



b)



c)

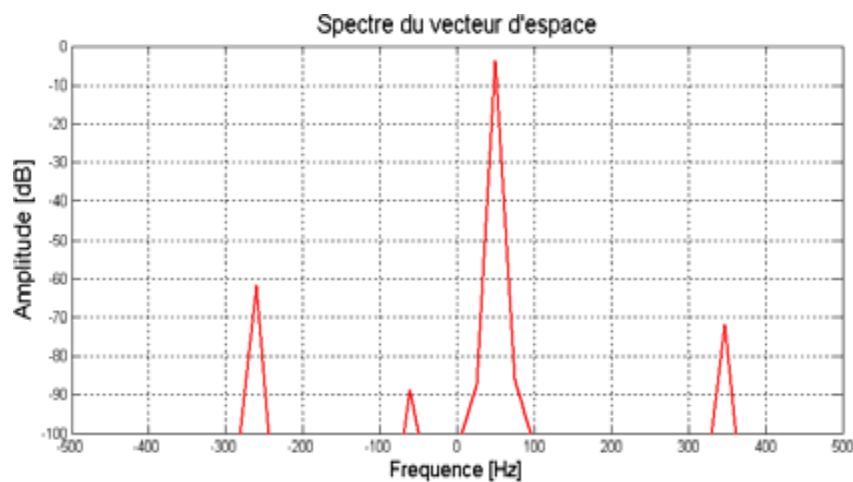


Figure II.13: Courants mesurés (a), forme du vecteur d'espace dans le plan complexe (b) spectre du vecteur d'espace (c)

## II. 5. 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 sursensions), 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,[9]. Chapitre troisième Application de la méthode d'analyse des creux de tension.

# **Chapitre III: Application de la méthode d'analyse des creux de tension**

### III. 1. Introduction

La qualité de l'électricité est un aspect important de l'ingénierie des systèmes d'alimentation. Elle joue un rôle important assurant la qualité de l'électricité livrée au client de l'industrie. L'émergence de la qualité de l'énergie. Une seule qualité d'énergie Un fléchissement de la tension causé par une défaillance du niveau de transmission ou de distribution peut coûter aux industries touchées jusqu'à des millions de pertes monétaires[36]. Les perturbations de la qualité de l'alimentation sont classées en sag de tension, houle de tension, transitoire, harmonique, encoche de tension et scintillement .

La recherche sur la qualité de l'énergie est l'étude de divers phénomènes qui perturbent la qualité de l'énergie et l'élaboration d'une stratégie d'atténuation stratégie pour le problème de la qualité de l'énergie, le phénomène de perturbation de la qualité de l'énergie et son la cause fondamentale doit être bien comprise. Avec l'avancement de la technologie informatique et développement de logiciels, la simulation de perturbation de la qualité de l'énergie est rendue possible. Il permet la le chercheur pour modéliser et simuler un système de puissance donné pour tracer, analyser et comprendre cause fondamentale de perturbation de la qualité de l'énergie[37]. Il permet également au chercheur de scénarios en modifiant le modèle ou les paramètres de simulation pour tester leur hypothèse[38]. fournit un aperçu de la façon dont la perturbation de la qualité de l'énergie se propage à partir de la source et à travers l'ensemble du réseau électrique. Dans cette optique, la modélisation et la simulation est devenue l'une des méthode de recherche largement utilisée pour modéliser et simuler diverses qualités d'énergie.

Il existe de nombreux outils de simulation de systèmes électriques[39] , et chaque simulation outil a ses propres mérites. Cependant, les outils largement utilisés dans le milieu de la recherche universitaire[40].

### III. 2. Types de creux de tension

D'après la classification des creux de tension universellement reconnue[18], 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.2) et le (Tableau III.1) présentent la transformation des creux de tension A, B, C et E, lorsqu'ils se propagent en aval du réseau, via les transformateurs les plus souvent utilisés : Dy.

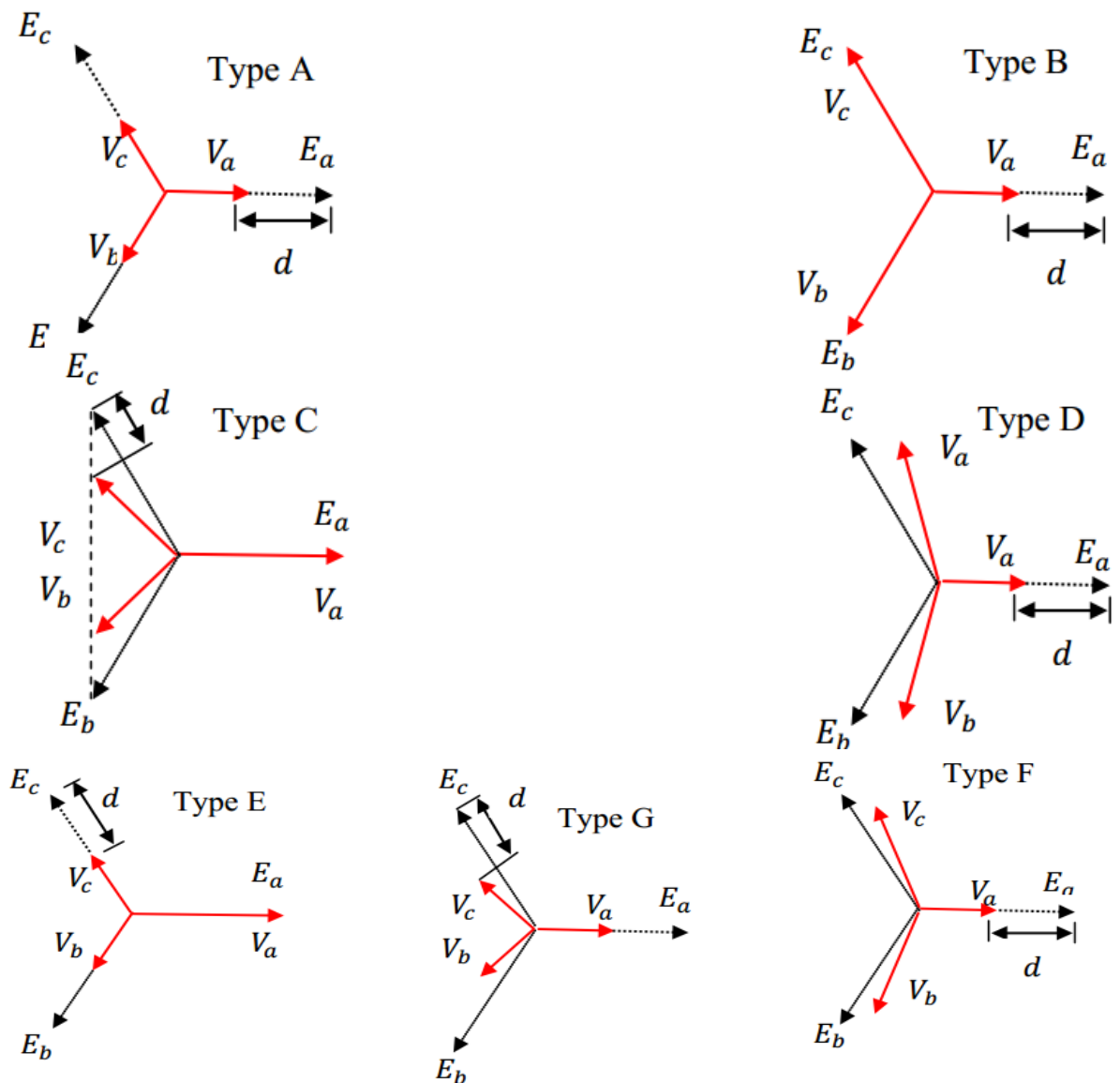


Figure III.1: Les différents types de creux de tension.

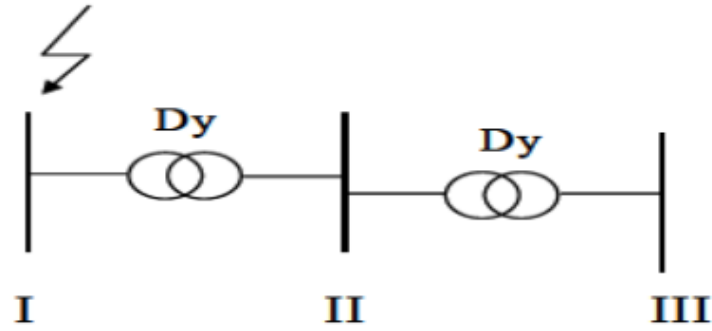


Figure III.2: Transformation des types de creux de tension

Niveau de tension	I	II	III
Types de creux De tension	A	B	C
	B	C	D
	C	D	C
	E	F	G

Tableau III.1: propagation des creux de tension

Les expressions des tensions pour chaque cas:

Type A:

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

Type B:

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

Type C:

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

Type D:

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

Type E:

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

Type F:

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

Type G:

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

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

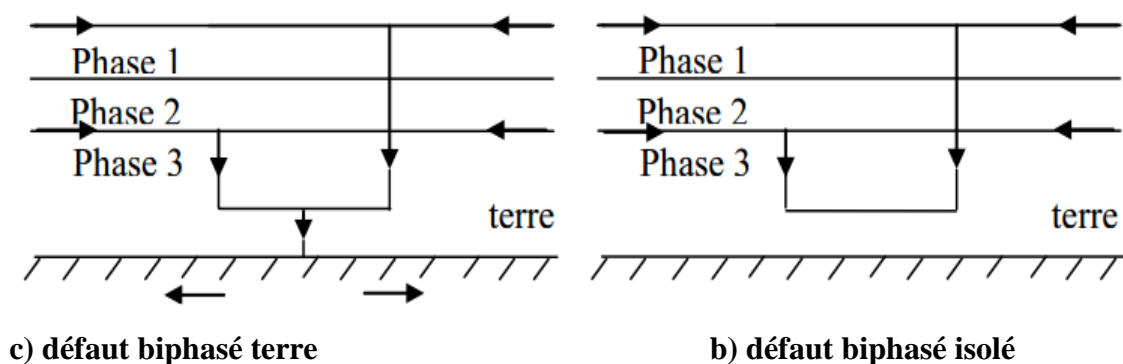
Les creux de tension sont principalement causés par les défauts du système. Chaque type de défaut a un effet différent sur les tensions au point de défaut, qui a ensuite défini les types de creux de tension[41].

##### 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[41].
- 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.3).



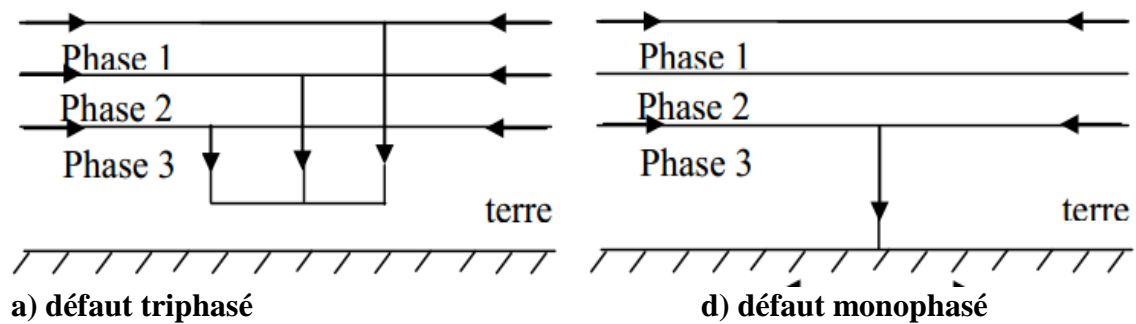


Figure III.3: Différents types de défauts

### 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[41].
  - 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 [41].

### III.3.2. Simulation en Matlab

Le réseau à simuler est représenté par bloc fonctionnel (Figure III.4). Les caractéristiques de ce réseau sont données dans l'annexe A.

### III.3.2.1. Le modèle du système simulé

Le modèle de défaut de ligne élaboré dans Simulink est présenté à la (Figure III.4). Le modèle de défaut de ligne est utilisé pour simuler l'affaissement de tension causé par un défaut de ligne. Le modèle de défaut de ligne se compose de 11 kV, 30 MVA .

Bloc source triphasé 50 Hz alimentant les transformateurs 11 kV/0,4 kV, 1 MVA delta/ye à une résistance de 10 kW et une charge inductive 100VAR. Il existe une forme d'onde instantanée et RMS de mesure situés à 11 kV et 0,4 kV. Il y a deux blocs d'erreur situés à le bus de 11 kV pour simuler le défaut de ligne et le défaut à plusieurs étages. Un temps de simulation de 0,4 seconde est défini et le solveur ode23tb est sélectionné pour lancer la simulation .

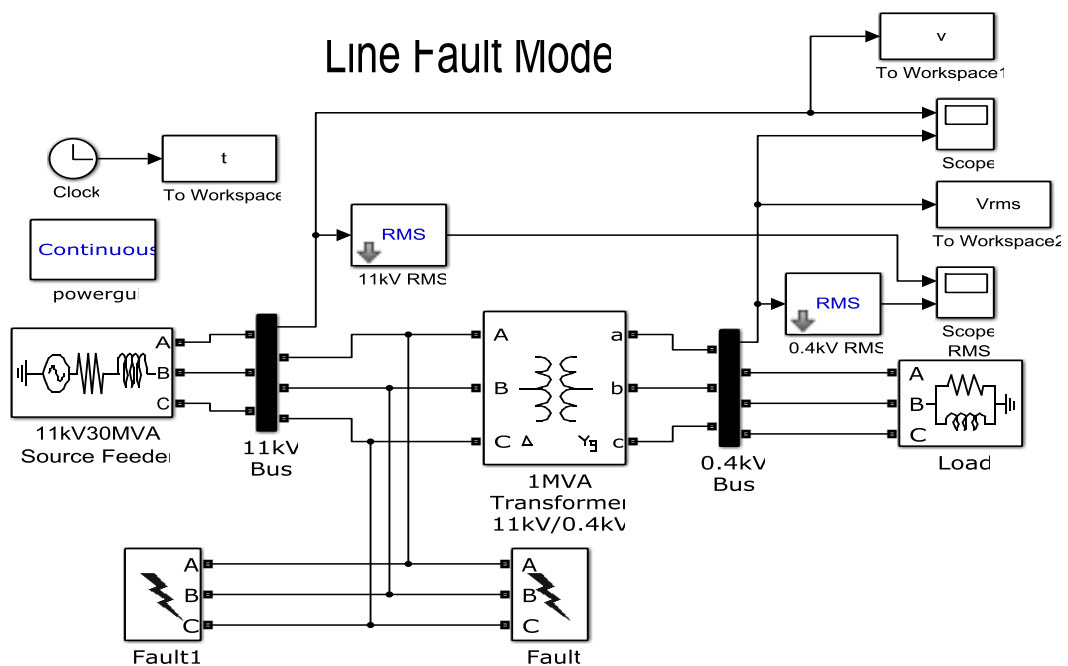


Figure III.4: Modèle de simulation de défaut à deux lignes.

Ce modèle de défaut de ligne est capable de simuler divers défauts de ligne, y compris une seule ligne au sol double ligne à terre, ligne à ligne, défaut triphasé et multi-étapes. La figure 2 montre la tension formes d'onde d'affaissement causées par un défaut de ligne à ligne entre la phase A et la phase B à l'alimentation 11 KV lignes à 0,1 à 0,168 seconde. On peut observer que le bus de 11 kV subit deux baisses de tension à la phase A et à la phase B avec une amplitude d'affaissement différente. Ceci est dû à une résistance élevée aux pannes de 8  $\Omega$  entre les deux lignes défectueuses.

Comme l'affaissement de la tension se propage en aval par le 11kV/0,4 kV, 1 transformateur MVA à la charge et le type d'erreur[29], est modifié par le delta/wy configuration du transformateur. La phase C non réglée à 0,4 kV une houle de tension due à l'absence de point de terre dans la faille de ligne à ligne et une résistance élevée à la faille.

Dans les études de qualité de puissance, l'amplitude de la forme d'onde sag de la tension est généralement présentée dans RMS forme d'onde et normalisée pour une meilleure visualisation. La (Figure III.6) montre l'analyse RMS des courbes d'affaissement de tension de ligne à ligne dans la (Figure III.5). L'amplitude d'affaissement pour chaque phase peut être clairement visualisé. La légère oscillation se produit au pré- et post-sag et la houle est due à la décalage de phase en cas d'erreur[42].

Le modèle de défaut de ligne est également capable de simuler des défauts de ligne en plusieurs étapes. La tension en plusieurs étapes L'affaissement est généralement dû à de multiples mécanismes de compensation de relais de protection des défauts qui ne sont pas.

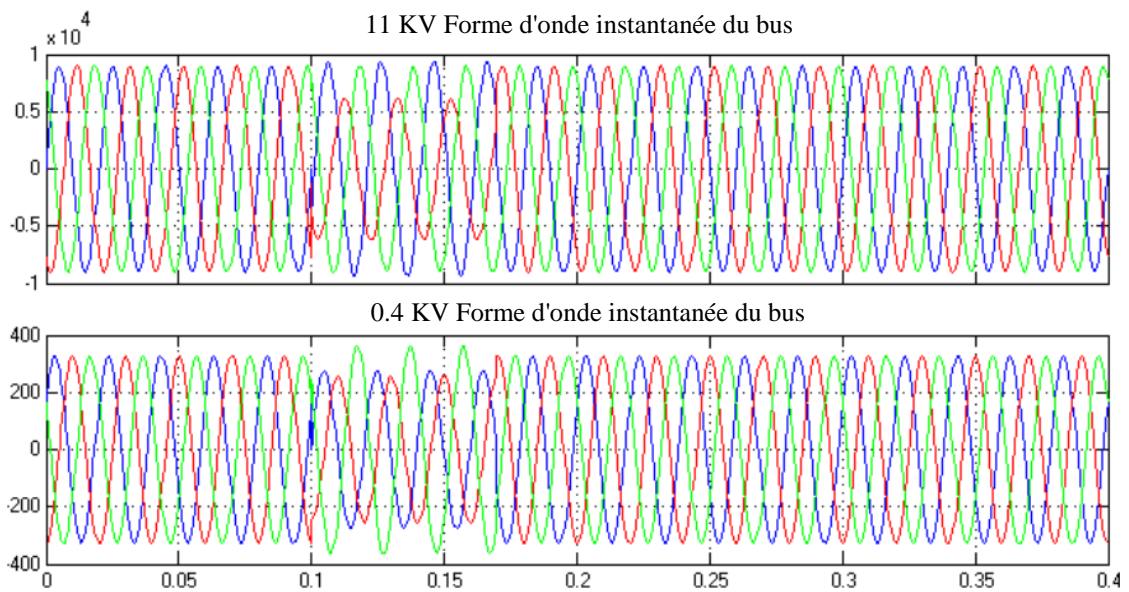


Figure III.6: Affaissement et gonflement de la tension causés par un défaut de ligne à ligne à 11 kV.

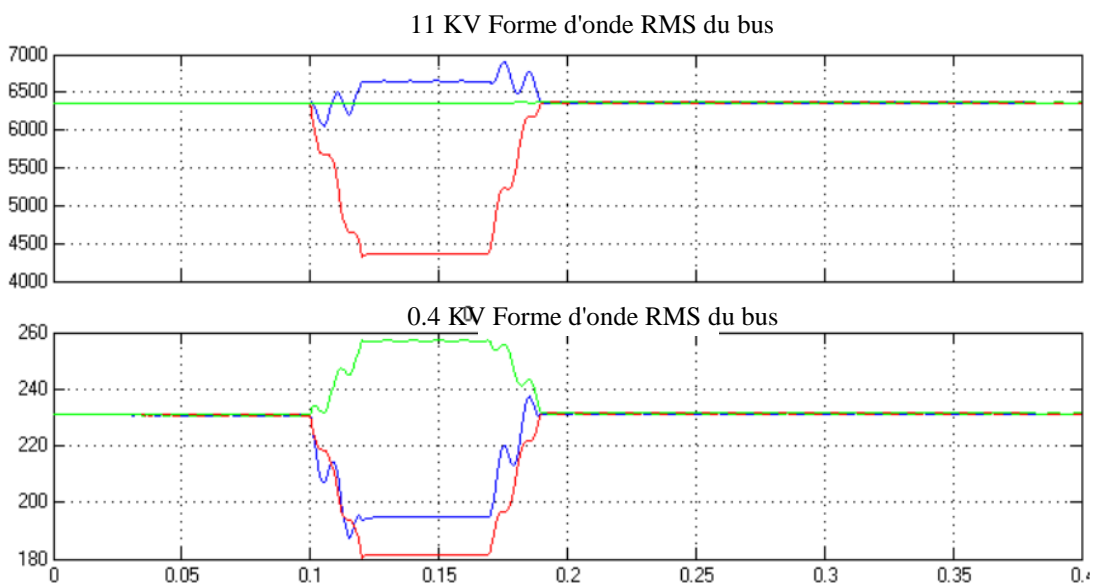


Figure III.5: Affaissement et gonflement de la tension dans la forme d'onde RMS.

Synchrones les unes avec les autres, modifiant ainsi l'impédance du système de puissance et le réseau configuration conduisant à de multiples étapes d'affaissement de la tension avant de récupérer complètement à sa valeur nominale niveau[43], ou les changements de défaut ou d'impédance au sol pendant la faute. Il est parfois aussi définis comme des défauts multiples qui se produisent consécutivement dans un court intervalle de temps et capturés dans un seul enregistrement comme un seul événement. La figure 4 montre la tension multi-étape sag instantanée formes d'onde causées par un défaut de mise à la terre à double ligne. Le bloc à 0,168 seconde avec impédance de défaut de  $1 \Omega$  et le bloc de défaut à plusieurs étages est réglé pour 0.1 simuler défaut de 0,168 à 0,3 seconde avec impédance de défaut de  $0,1 \Omega$ . Les changements d'impédance de défaut lors d'une défaillance, créer une perturbation de la qualité de la tension en plusieurs étapes.

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 ou nous avons effectué la simulation.

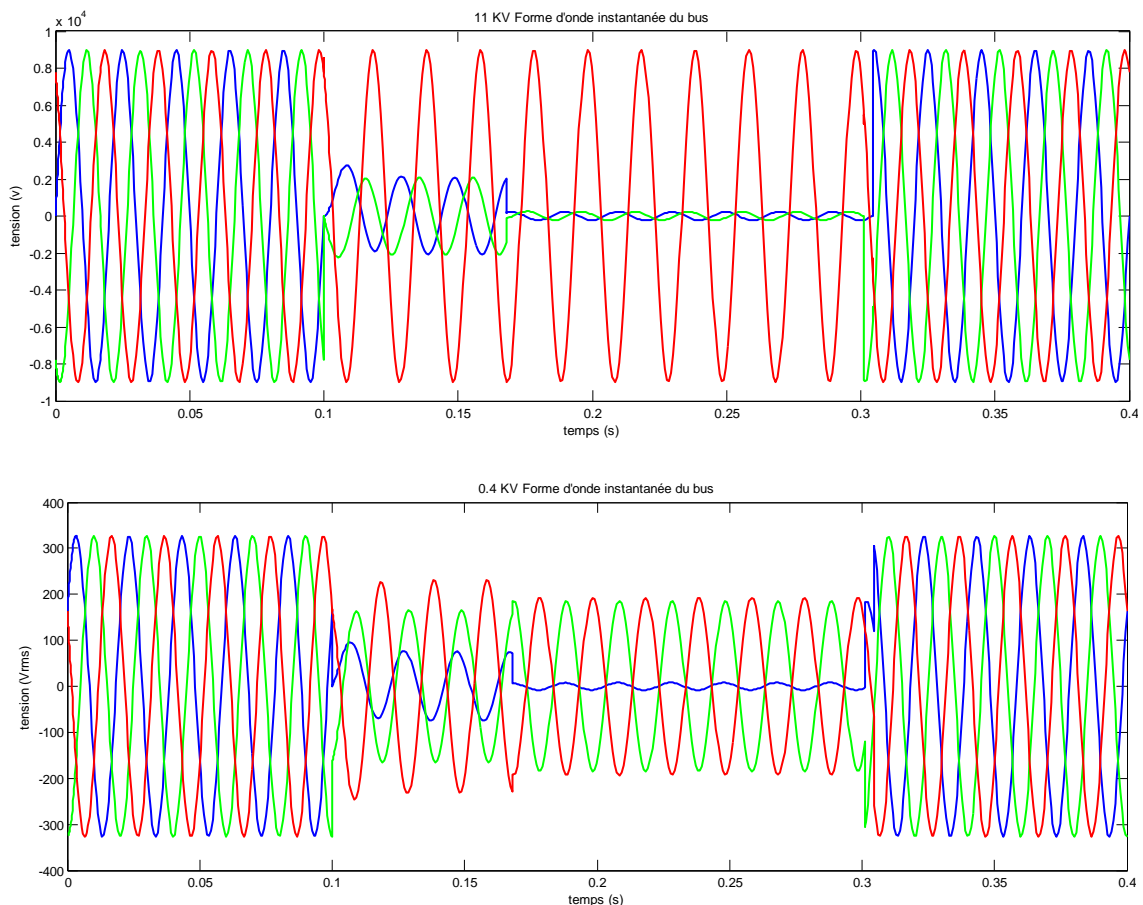


Figure III.7: Forme d'onde de creux de tension à plusieurs étapes générée par un double défaut ligne-terre à 11 kV.

Simulation d'un seul défaut sur la ligne.

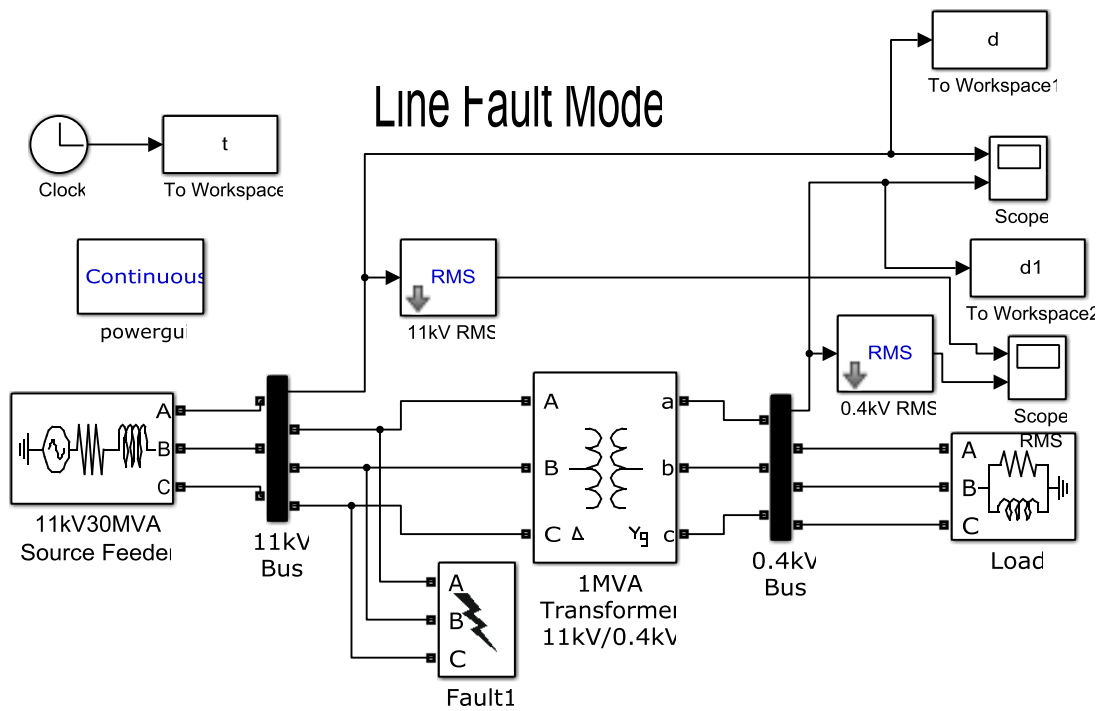


Figure III.8 Modèle de simulation d'erreur à une ligne.

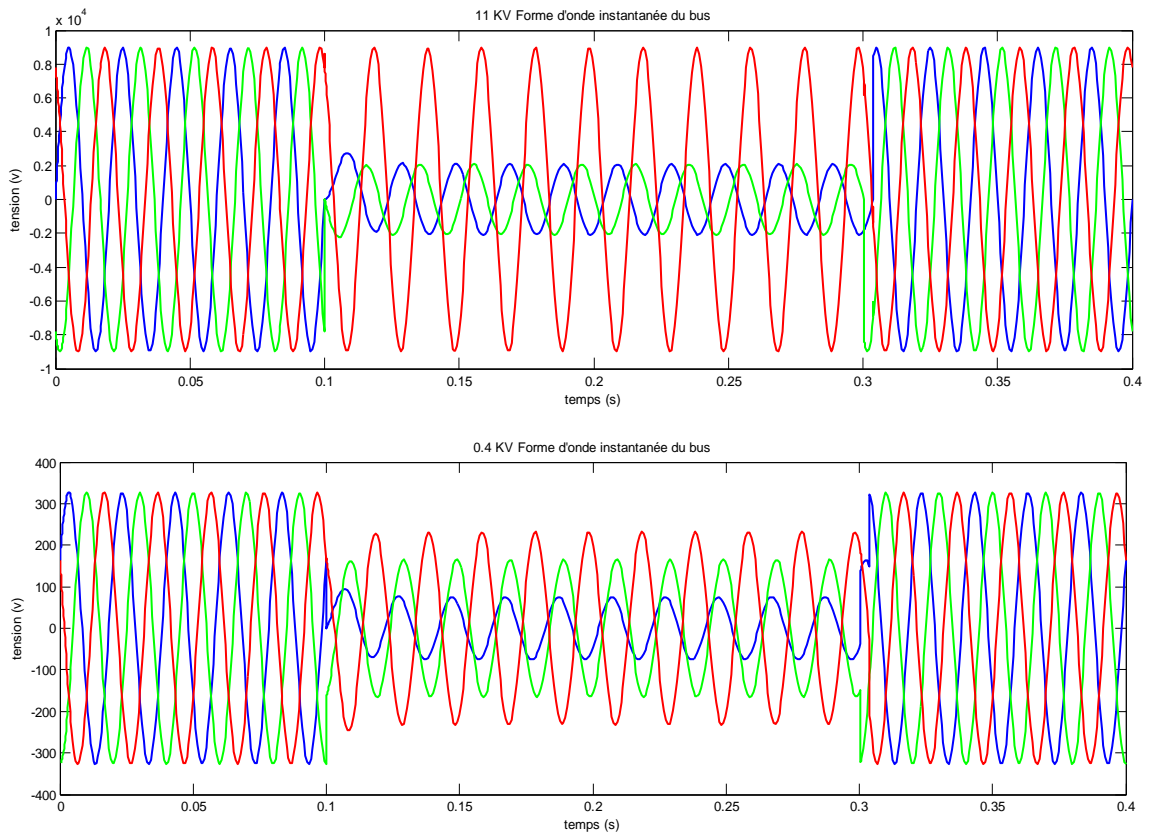


Figure III.9: Forme d'onde de creux de tension à plusieurs étapes générée par un seul défaut ligne-terre à 11 kV.

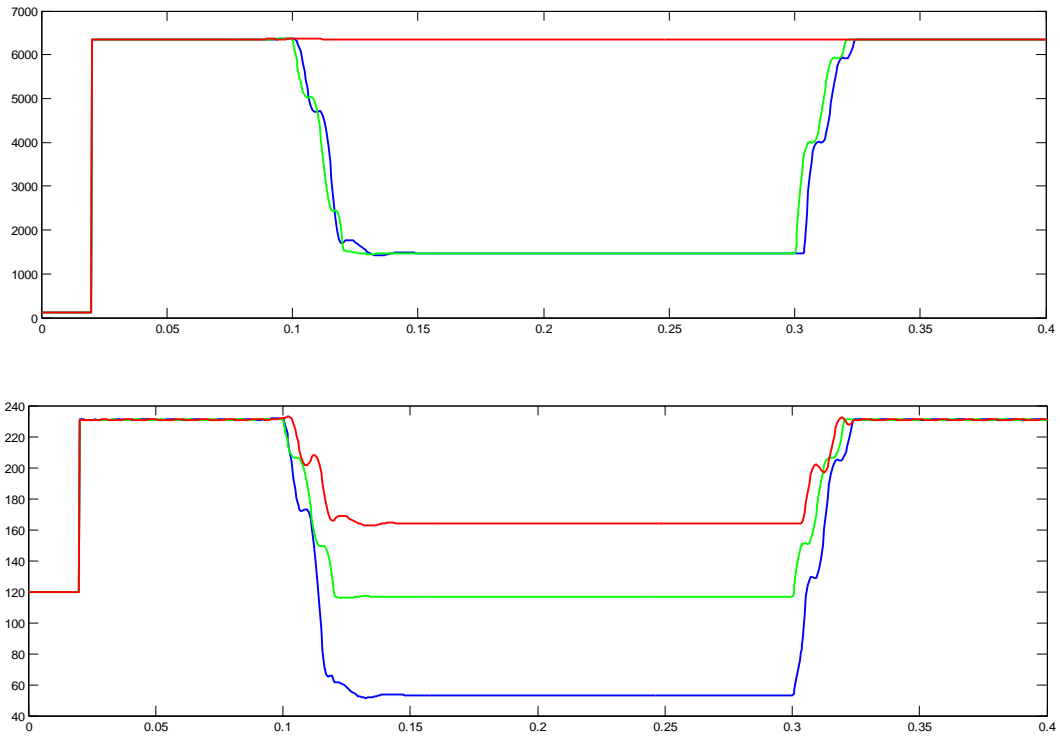


Figure III.10: Affaissement et gonflement de la tension dans la forme d'onde RMS.

**III.3.2.2. Défaut symétrique dans la barre 1**

**a) défaut triphasé**

Les résultats de la simulation dans les jeux de barres 1et 2 à la suite d'un défaut triphasé produit au niveau de jeu de barres 1 sont montrés sur la (Figure III.11). 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.

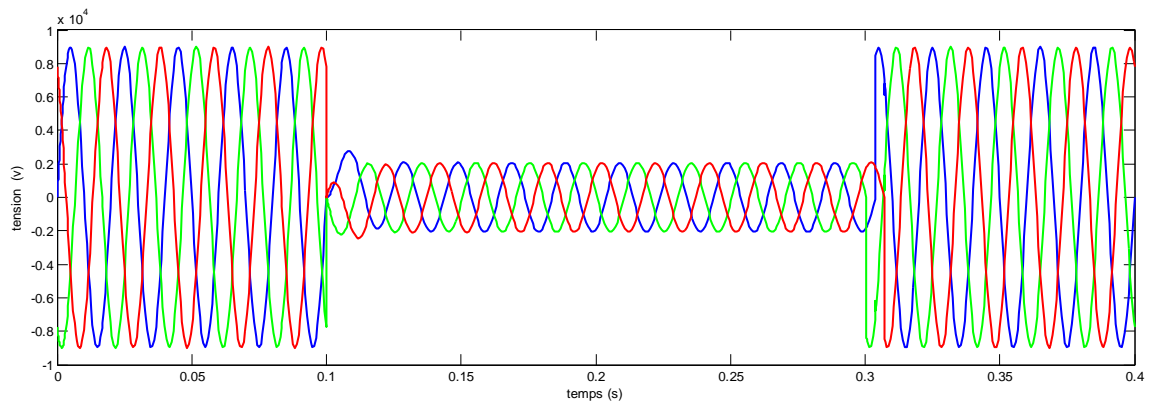


Figure III.11: Creux de tension type A

Creux de tension type A:

Les creux de tension type A (Figure III.11) dus à des défauts triphasés, présentent des chutes de tension de la même profondeur sur les trois phases sans déphasages supplémentaires.

### b) 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.12) 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.

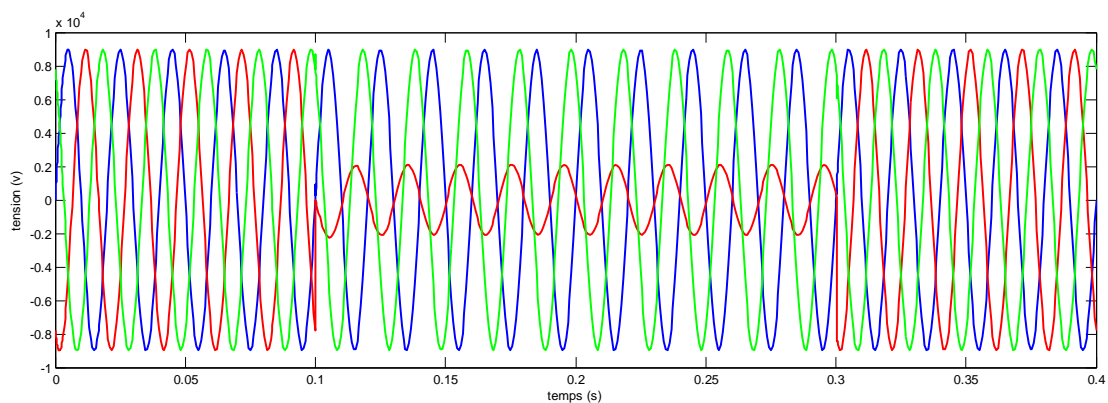


Figure III.12: Creux de tension type B

Creux de tension type B:

Dans le cas d'un creux de tension de type B (Figure III.12). Il est du à un défaut monophasé. Seule la tension d'une des phases est affectée par le défaut.

- Simulation au niveau de jeu de barres 2:

La (Figure III.13) 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.

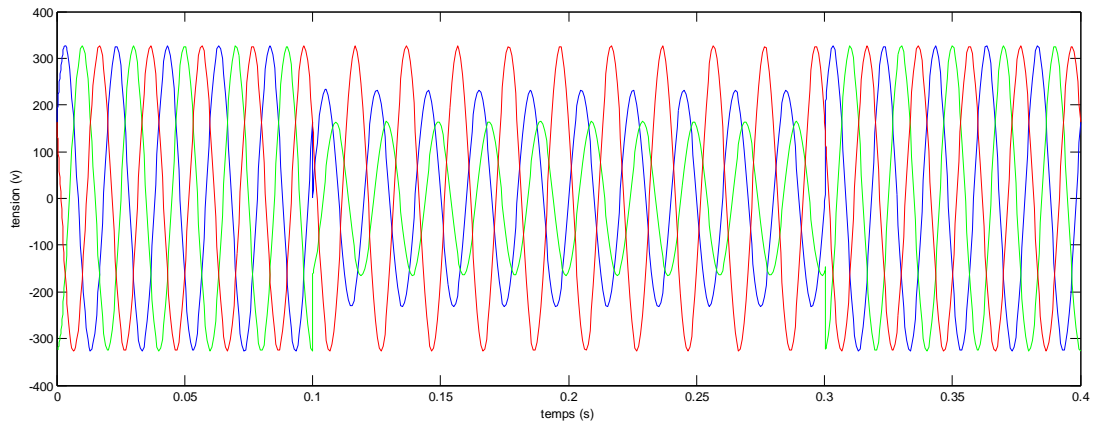


Figure III.13: Creux de tension type C

Creux de tension type C:

Dans ce cas, le type C est un résultat d'un défaut biphasé (Figure III.13). Ils se caractérisent par des chutes de tensions avec déphasages supplémentaires pour deux des phases, la troisième n'étant pas modifiée.

**c) 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:

La (Figure III.14 montre la simulation au niveau du jeu de barres 1. 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 D.

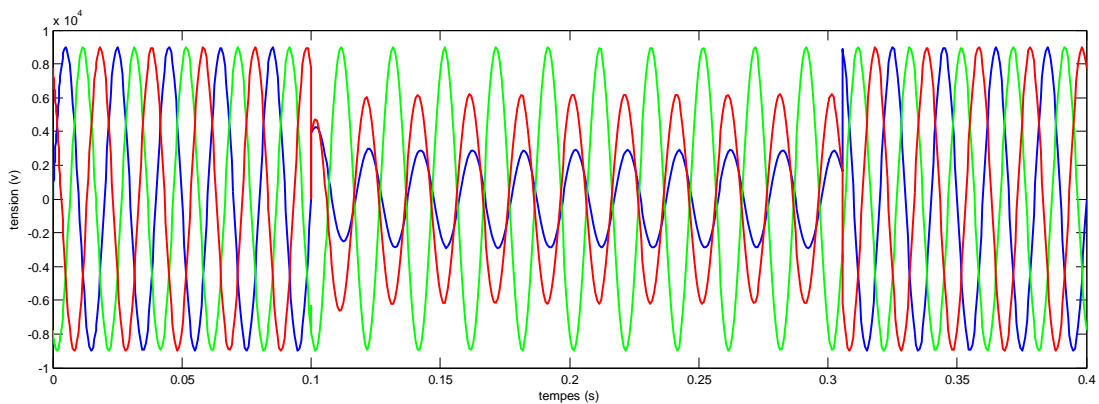


Figure III.14: Creux de tension type D

- Simulation au niveau de jeu de barres 2:

La (Figure III.15) montre les creux de tension de type E. Ce type des perturbations est le résultat d'un défaut monophasé produit au niveau du jeu de barres 2 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.

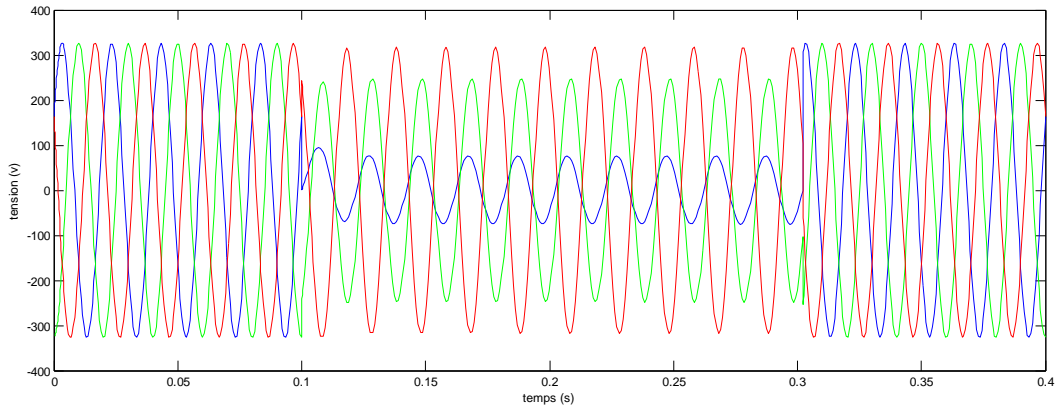


Figure III.15: Creux de tension type E.

#### d) 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.16). 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 F qu'est caractérisé d'une défaillance deux phases alors que la troisième n'est pas affectée.

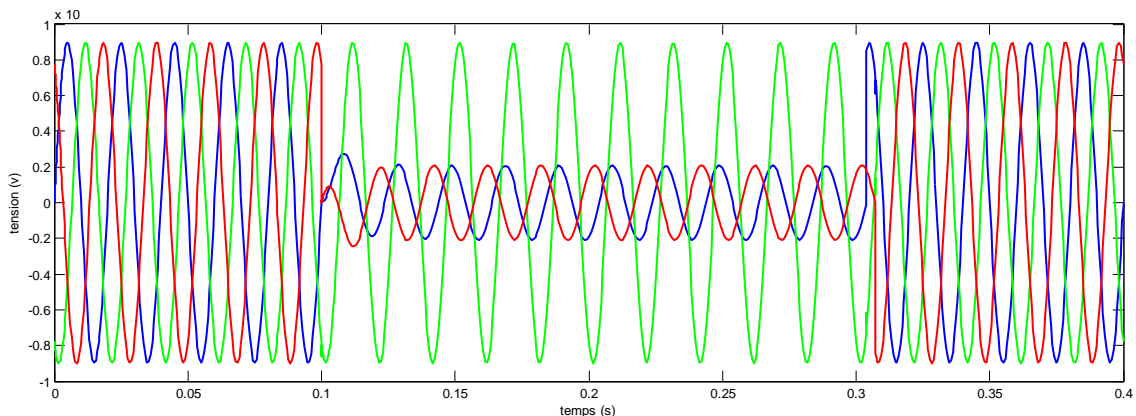


Figure III.16: Creux de tension type F.

#### Creux de tension type F:

Les creux de tension de type F sont dus à un défaut entre deux phases et la terre (Figure III.16). Ils se caractérisent par des chutes de tension sans déphasage sur deux des phases.

- Simulation au niveau de jeu de barres 2:

Les résultats montrés sur la (Figure III.17) 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 G.

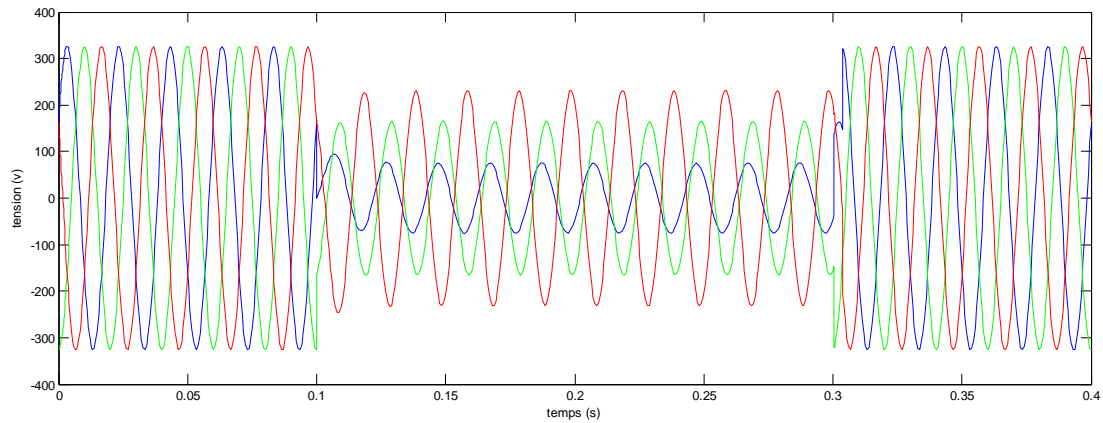


Figure III.17: Creux de tension type G.

Creux de tension type G:

Les creux de tension de type G sont dus à de la propagation des creux de type F via les transformateurs (Figure III.17). 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.

### **III. 4. Conclusion**

L'analyse des problèmes de la qualité de l'énergie électrique par la transformation du vecteur d'espace est présentée dans cet mémoire. Des approches spécifiques pour les différents types de perturbations (creux de tension, surtension, déséquilibre et présence d'harmoniques) ont été développées. La transformation du vecteur d'espace présente l'avantage de faciliter l'analyse des perturbations en utilisant moins de variables. De plus, elle est applicable à tous les types de perturbations et atteint des performances très convenables pour l'analyse automatique de la qualité de l'énergie électrique.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Nous nous sommes confrontés, dans ce travail de recherche, à deux problèmes majeurs affectant la qualité de l'énergie électrique, à savoir l'analyse des creux de tension et de la pollution harmonique au sein d'un réseau électrique. Dans le cas des creux de tension, une méthode basée sur la transformation du vecteur d'espace a été développée. Cette méthode permet de déterminer le type des creux de tension mesurés, et d'estimer leur sévérité. Elle est facilement implantable et très performante pour l'analyse automatique des creux de tension. De plus, cette méthode peut être appliquée à l'analyse d'autres perturbations électriques et peut être étendue à l'analyse complète de la qualité de l'énergie électrique. Les résultats obtenus sont très satisfaisants. Cette méthode peut donc être utilisée pour la création d'un logiciel dédié à l'analyse de la qualité de l'énergie électrique, car elle représente un outil puissant dans l'analyse et l'évaluation de la plupart des perturbations électriques. Dans le cas de la pollution harmonique, une méthode analytique spécialement destinée aux harmoniques générés par les structures d'électronique de puissance a été développée. Elle est basée sur les propriétés des systèmes linéaires variant périodiquement dans le temps et permet d'évaluer les harmoniques générés, ainsi que leur propagation et leurs interactions. Cette méthode est facilement implantable et fournit des résultats très satisfaisants pour l'étude théorique du transfert harmonique et l'analyse des convertisseurs statiques. Les résultats obtenus par cette méthode ont été confirmés à l'aide de données mesurées. Elle peut donc trouver son application dans l'étude de la propagation harmonique et la discrimination des sources polluantes.

# **Références Bibliographique**

## **Références Bibliographique**

- [1] N. Mendalek, "Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation," École de technologie supérieure, 2003.
- [2] P. Bornard and M. Pavard, "Réseaux d'interconnexion et de transport: réglage et fonctionnement," *Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique D*, vol. 4090, 1993.
- [3] F. Bouacida and M. Zebiri, "Qualité de l'énergie électrique et norme IEEE-519," 2009.
- [4] M. S. Djebbar and H. Benalla, "Etude des convertisseurs statiques dédiés à la qualité de l'énergie électrique," *جامعة الإخوة منتوري قسنطينة*.
- [5] F. Boudellioua and M. E. Melit, "Caractérisation des perturbations affectant la qualité d'énergie électrique: cas des creux de tension," Université de Jijel, 2021.
- [6] M. Bollen and L. Zhang, "A method for characterization of three phase unbalanced dips from recorded voltage waveshapes," *Harmonics and Transients Tech Notes*, p. 25, 1999.
- [7] V. Ignatova, "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique," Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2006.
- [8] I. F. II, "IEEE STD519-1992, IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems," *New York, NY, USA*, 1993.
- [9] B. GATTAL, "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," Université de Batna 2, 2012.
- [10] I. Etxeberria-Otadui, "Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique—Application à la qualité de l'énergie," Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2003.
- [11] I. El Baaklini, "Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels," Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2001.
- [12] D. O. Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension," Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2005.
- [13] C. Collombet, J. Lupin, and J. Schonek, "Harmonic disturbances in networks, and their treatment," *Cahier Technique Merlin Gerin*, vol. 1, pp. 1-31, 1999.

- [14] G. T. Heydt, "Electric power quality: a tutorial introduction," *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 11, pp. 15-19, 1998.
- [15] C. J. Melhorn and M. F. McGranaghan, "Interpretation and analysis of power quality measurements," in *1995 IEEE Annual Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*, 1995, pp. 1-9.
- [16] G. C. Paap, "Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 15, pp. 522-528, 2000.
- [17] N. Bachschmid, P. Pennacchi, and A. Vania, "Diagnostic significance of orbit shape analysis and its application to improve machine fault detection," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 26, pp. 200-208, 2004.
- [18] M. H. Bollen, "Understanding power quality problems," in *Voltage sags and Interruptions*, ed: IEEE press Piscataway, NJ, USA, 2000.
- [19] V. Ignatova, P. Granjon, S. Bacha, and F. Dumas, "Classification and characterization of three phase voltage dips by space vector methodology," in *2005 International Conference on Future Power Systems*, 2005, pp. 6 pp.-6.
- [20] P. Heine and M. Lehtonen, "Measured faults in an unearthed medium voltage network," in *NORDAC 2004, Nordic Distribution and Asset Management Conference 2004*, 2004, p. 9.
- [21] I. W. Group, "Tutorial on voltage imbalance assessment requirements," ed.
- [22] V. Ignatova, P. Granjon, and S. Bacha, "Analyse de la qualité de l'énergie électrique par la transformation du vecteur d'espace," *a a*, vol. 2, p. 2, 2006.
- [23] E. H. Djeflal, "Propagation des harmoniques dans un réseau électrique doté de compensation statique," 2016.
- [24] J. Ville, "Theorie et application dela notion de signal analytique," *Câbles et transmissions*, vol. 2, pp. 61-74, 1948.
- [25] F. Gustafsson and F. Gustafsson, *Adaptive filtering and change detection* vol. 1: Citeseer, 2000.
- [26] M. Basseville, "Detecting changes in signals and systems—a survey," *Automatica*, vol. 24, pp. 309-326, 1988.
- [27] M. Basseville and I. V. Nikiforov, *Detection of abrupt changes: theory and application* vol. 104: prentice Hall Englewood Cliffs, 1993.
- [28] H. Laurent and C. Doncarli, "Stationarity index for abrupt changes detection in the time-frequency plane," *IEEE Signal processing letters*, vol. 5, pp. 43-45, 1998.

- [29] M. H. Bollen and L. Zhang, "Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults," *Electric power systems research*, vol. 66, pp. 59-69, 2003.
- [30] M. B. L. Zhang, "A method for characterizing unbalanced voltage dips (sags) with symmetrical components," 1998.
- [31] D. S. A. Dettloff, F. Goodman, "Power Quality Performance as a component for Special Manufacturing Contracts between Power Provider and Customer," Proceedings of the, Power Systems World'99.
- [32] Y.-J. Shin, E. J. Powers, M. Grady, and A. Arapostathis, "Power quality indices for transient disturbances," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 253-261, 2005.
- [33] P. Flandrin, "Temps-fréquence," *Hermès, Paris*, 1993.
- [34] L. Cohen, "Time-frequency distributions-a review,," *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, pp. 941 – 981, 1989.
- [35] G. Saporta, "Probabilités, Analyse des données et Statistique," *Technip*, 1990.
- [36] M. McGranaghan and B. Roettger, "Economic evaluation of power quality," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 22, pp. 8-12, 2002.
- [37] M. F. McGranaghan and S. Santoso, "Challenges and trends in analyses of electric power quality measurement data," *EURASIP Journal on Advances in Signal processing*, vol. 2007, pp. 1-5, 2007.
- [38] A. McEachern, "A free simulator program for teaching power quality concepts," in *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, pp. 1-4.
- [39] L. Bam and W. Jewell, "Power system analysis software tools," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 2005, pp. 139-144.
- [40] N. R. Patne and K. L. Thakre, "Stochastic estimation of voltage sag due to faults in the power system by using pscad/emtdc software as a tool for simulation," *Electrical Power Quality and Utilisation. Journal*, vol. 13, pp. 59-63, 2007.
- [41] C. D. Pham, "Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée," Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2005.
- [42] S. Djokic and J. Milanovic, "Advanced voltage sag characterisation. Part I: Phase shift," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, pp. 423-430, 2006.
- [43] E. Styvaktakis and M. H. Bollen, "Signatures of voltage dips: transformer saturation and multistage dips," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 18, pp. 265-270, 2003.

