



## Mémoire de Master

### Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

### Réalisé par :

RAI Belkacem

Et

HAMDANI Hakim

## Thème

### *Etude des perturbations internes dans les réseaux électriques*

Soutenu le: 30/10/2021

Devant la commission composée de :

|     |                |        |              |            |
|-----|----------------|--------|--------------|------------|
| Mr. | AMEZIAN Sadek  | M.A.A. | Univ. Bouira | Présidente |
| Mr. | GRICHE Issam   | M.A.A  | Univ. Bouira | Rapporteur |
| Mr. | MOUASSA Souhil | M.A.A  | Univ. Bouira | Examineur  |

## *Dédicaces*

*« Nous dédions ce travail à toutes nos familles, nos amis et en particulier à nos parents ».*



# Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Département GE des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Nous adressons nos sincères remerciements à :

En premier lieu, Monsieur GRICHE Issam, Directeur de ce mémoire d'avoir eu la bonne volonté de nous bénéficier de sa compétence et qui a bien voulu consacrer beaucoup de temps pour nous encadrer malgré ses fonctions.

Egalement tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

|     |                |       |              |            |
|-----|----------------|-------|--------------|------------|
| Mr. | AMEZIAN Sadek  | M.A.A | Univ. Bouira | Présidente |
| Mr. | GRICHE Issam   | M.A.A | Univ. Bouira | Rapporteur |
| Mr. | MOUASSA Souhil | M.A.A | Univ. Bouira | Examineur  |

Tous les enseignants, en particulier ceux de la filière Electrotechnique, et personnels administratifs de l'Université de Bouira.

Toute nos familles qui nos toujours encouragé et soutenu durant notre études et tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, n'associons à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.

**A tous, merci**

## Résumé

Les réseaux électriques sont affectés au cours de leurs fonctionnements par un ensemble des phénomènes qui entravent leurs fonctionnements et conduisent à des perturbations différentes selon les diverses sources de ces perturbations si bien qu'on peut les répartir selon leurs sources, où l'on retrouve des perturbations avec des sources externes et d'autres avec sources internes.

Dans ce travail, nous avons étudié les perturbations internes qui sont liées au fonctionnement du réseau électrique. En plus, dans cette étude nous avons choisi des modèles hypothétiques avec des exemples plus importants qui conduisent à l'apparition de chaque type de ces perturbations internes. On utilisant le programme de simulation MATLAB-SIMULINK.

L'utilisation de logiciel MATLAB-SIMULINK nous a donné les bons résultats qui nous permettent de savoir comment et dans quelle mesure chaque exemple affecte le fonctionnement du réseau et de ses équipements.

**Mots clés :** Surintensité, Harmoniques, Fluctuations de tension, Déséquilibre des phases, Creux de tension, Surtension.

# Table des Matières

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| Remerciements .....                    | I    |
| Résumé .....                           | II   |
| Table des Matières .....               | III  |
| Liste des Figures.....                 | VIII |
| Liste des Tableaux.....                | X    |
| Listes des Acronymes et Symboles ..... | XI   |

## **Introduction Générale** **1**

### **Chapitre 1 : Généralités sur les sources des perturbations**

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 1.1. Introduction .....                          | 3  |
| 1.2. Qualité de l'énergie électrique .....       | 3  |
| 1.3. Classification des perturbations .....      | 4  |
| 1.4. Perturbations d'origine externes.....       | 5  |
| 1.4.1. Décharges électrostatiques (DES) .....    | 5  |
| 1.4.2. Impulsions électromagnétiques (IEM) ..... | 7  |
| 1.4.3. Coup de foudre .....                      | 8  |
| 1.4.4. L'effet couronne .....                    | 9  |
| 1.5. Perturbations d'origine internes .....      | 10 |
| 1.5.1. Harmoniques et inter-harmonique .....     | 10 |
| 1.5.2. Fluctuations de tension .....             | 11 |
| 1.5.3. Déséquilibre des phases.....              | 12 |
| 1.5.4. Creux de tension et coupure brève .....   | 13 |
| 1.5.5. Surtension .....                          | 14 |
| 1.5.6. Surintensités.....                        | 15 |
| 1.5.6.1. Surcharges .....                        | 15 |
| 1.5.6.2. Courts-circuits .....                   | 15 |
| Conclusion.....                                  | 16 |

### **Chapitre 2 : Conséquences, et Protection contre les perturbations d'origine interne**

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Introduction .....                                             | 17 |
| 2.2. Conséquences, effets des perturbations d'origine interne ..... | 17 |
| 2.2.1. Surtension .....                                             | 17 |
| 2.2.2. Creux et coupures brèves de tension .....                    | 17 |
| 2.2.2.1. Contacteurs .....                                          | 17 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.2.2. Machines.....                                                             | 18 |
| 2.2.2.3. Convertisseur permettant un fonctionnement en récupération d'énergie..... | 18 |
| 2.2.2.4. Appareils d'éclairage.....                                                | 18 |
| 2.2.2.5. Equipements de type informatique.....                                     | 18 |
| 2.2.3. Surintensité.....                                                           | 19 |
| 2.2.3.1. Effet thermique.....                                                      | 19 |
| 2.2.3.2. Effet électrodynamique.....                                               | 19 |
| 2.2.4. Fluctuation de tension.....                                                 | 19 |
| 2.2.5. Déséquilibre.....                                                           | 19 |
| 2.2.6. Harmoniques.....                                                            | 19 |
| 2.2.6.1. Effets à court terme.....                                                 | 19 |
| 2.2.6.2. Effets à long terme.....                                                  | 20 |
| 2.3. Protection contre les perturbations d'origine interne.....                    | 20 |
| 2.3.1. Surtension.....                                                             | 20 |
| 2.3.1.1. Eclateur à gaz.....                                                       | 20 |
| 2.3.1.2. Varistances à oxyde métallique (MOV).....                                 | 21 |
| 2.3.1.3. Diodes à avalanche.....                                                   | 21 |
| 2.3.1.4. Diode Transils (TVS).....                                                 | 21 |
| 2.3.2. Creux de tension et coupures brèves.....                                    | 22 |
| 2.3.2.1. Réduction du nombre de creux de tensions et de coupures.....              | 22 |
| 2.3.2.2. Réduction de la durée et de la profondeur des creux de tension.....       | 22 |
| 2.3.2.3. Insensibilisation des installations industrielles et tertiaires.....      | 22 |
| 2.3.2.4. Insensibilisation du contrôle-commande.....                               | 22 |
| 2.3.2.5. Insensibilisation de l'alimentation en puissance des équipements.....     | 23 |
| 2.3.2.5.1. Alimentation statique sans interruption (ASI).....                      | 23 |
| 2.3.2.5.1.1. La technologie On-line.....                                           | 23 |
| 2.3.2.5.1.2. La technologie Offline.....                                           | 24 |
| 2.3.2.5.2. La permutation des sources.....                                         | 24 |
| 2.3.2.5.3. Groupe à temps zéro.....                                                | 24 |
| 2.3.2.5.4. Compensateurs électroniques.....                                        | 24 |
| 2.3.2.6. L'arrêt propre.....                                                       | 24 |
| 2.3.3. Surintensité.....                                                           | 25 |
| 2.3.3.1. Protection par fusible.....                                               | 25 |
| 2.3.3.2. Protection par disjoncteur.....                                           | 25 |
| 2.3.3.3. Protections intégrées aux variateurs.....                                 | 25 |
| 2.3.3.3.1. Protection de surcharge moteur.....                                     | 25 |
| 2.3.3.3.2. Protection contre les courts-circuits moteurs en aval du variateur..... | 25 |
| 2.3.4. Fluctuations de tension.....                                                | 26 |
| 2.3.4.1. Changer de mode d'éclairage.....                                          | 26 |
| 2.3.4.2. Installer une alimentation sans interruption.....                         | 26 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| 2.3.4.3. Modifier le perturbateur.....                    | 26 |
| 2.3.4.4. Modifier le réseau .....                         | 26 |
| 2.3.4.5. Utiliser un compensateur automatique .....       | 26 |
| 2.3.4.6. Placer une réactance série.....                  | 26 |
| 2.3.5. Déséquilibres .....                                | 27 |
| 2.3.6. Harmoniques .....                                  | 27 |
| 2.3.6.1. Réduction des courants harmoniques générés ..... | 27 |
| 2.3.6.1.1. Inductance de ligne.....                       | 27 |
| 2.3.6.1.2. Utilisation de redresseurs dodécaphasés .....  | 27 |
| 2.3.6.1.3. Appareils à prélèvement sinusoïdal.....        | 27 |
| 2.3.6.2. Modification de l'installation .....             | 27 |
| 2.3.6.3. Filtrage.....                                    | 28 |
| Conclusion.....                                           | 29 |

### Chapitre 3 : Analyse des sources des perturbations d'origine interne.

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Introduction .....                                                                                   | 30 |
| 3.2. Surtension à fréquence industrielle .....                                                            | 30 |
| 3.2.1. Surtension .....                                                                                   | 30 |
| 3.2.1.1. Surtension provoquée par un défaut d'isolement .....                                             | 30 |
| 3.2.1.2. Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti ) .....                                   | 31 |
| 3.2.1.3. Surtension par ferorésonance .....                                                               | 31 |
| 3.2.1.4. Surtension due à l'alimentation d'une charge capacitive au travers d'une inductance élevée ..... | 31 |
| 3.2.1.5. Surtension due à un déclenchement brusque.....                                                   | 31 |
| 3.2.1.5.1. Déclenchement d'un alternateur.....                                                            | 31 |
| 3.2.1.5.2. Déclenchement d'une machine asynchrone .....                                                   | 32 |
| 3.2.2. Surtension de manœuvre .....                                                                       | 32 |
| 3.2.2.1. Surtension de commutation en charge normale.....                                                 | 32 |
| 3.2.2.2. Surtension provoquée par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs.....     | 32 |
| 3.2.2.2.1. Surtension associée à une coupure idéale.....                                                  | 33 |
| 3.2.2.2.2. Arrachement du courant .....                                                                   | 33 |
| 3.2.2.2.3. Phénomènes transitoires de réamorçage.....                                                     | 34 |
| 3.2.2.2.4. préamorçage .....                                                                              | 34 |
| 3.2.2.3. Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs.....                          | 34 |
| 3.2.2.3.1. Surtension provoquée par l'enclenchement d'une batterie de condensateur .....                  | 34 |
| 3.2.2.3.2. Surtension due à l'enclenchement ou au ré-enclenchement d'une ligne à vide.....                | 36 |
| 3.3. Creux de tension et coupures brèves .....                                                            | 36 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.1. Réseau d'alimentation public .....                                                     | 37 |
| 3.3.2. Installation de l'utilisateur perturbé (Cas d'enclenchement d'un transformateur) ..... | 37 |
| 3.4. Surintensité.....                                                                        | 38 |
| 3.4.1. Surcharge .....                                                                        | 38 |
| 3.4.2. Court-circuit.....                                                                     | 38 |
| 3.4.2.1. Courants de court-circuit .....                                                      | 39 |
| 3.4.2.2. Etablissement du court-circuit aux bornes d'un transformateur.....                   | 39 |
| 3.5. Fluctuations de tension.....                                                             | 41 |
| 3.5.1. Fluctuations de tension à l'origine du Flicker .....                                   | 41 |
| 3.5.1.1. Variations de tension rapides et périodiques .....                                   | 41 |
| 3.5.1.2. Variations de tension par à-coups.....                                               | 41 |
| 3.5.2. Explication mathématique de l'origine du Flicker .....                                 | 41 |
| 3.6. Déséquilibres .....                                                                      | 42 |
| 3.6.1. Analyse de circuit déséquilibré dans le cas d'un circuit sans neutre.....              | 42 |
| 3.6.2. Analyse de circuit déséquilibré dans le cas d'un circuit avec neutre .....             | 43 |
| 3.7. Harmoniques .....                                                                        | 44 |
| 3.7.1. Dégradation de la tension .....                                                        | 44 |
| 3.7.2. Analyse de Fourier.....                                                                | 45 |
| 3.7.3. Grandeurs utilisées pour chiffrer les harmoniques .....                                | 46 |
| 3.7.3.1. Grandeur harmonique .....                                                            | 46 |
| 3.7.3.2. Rang de l'harmonique .....                                                           | 46 |
| 3.7.3.3. Expression de la grandeur déformée .....                                             | 46 |
| 3.7.3.4. Taux de distorsion (THD) .....                                                       | 47 |
| 3.7.3.5. Facteur de puissance (FP).....                                                       | 47 |
| 3.7.4. Les principales sources d'harmoniques .....                                            | 47 |
| 3.7.4.1. Emission en tension.....                                                             | 47 |
| 3.7.4.2. Emission en courant .....                                                            | 48 |
| Conclusion.....                                                                               | 50 |

## **Chapitre 4 : Simulation des sources des perturbations d'origine interne.**

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1. Introduction .....                                                                                         | 51 |
| 4.2. Surtension due à l'enclenchement d'une batterie de condensateur.....                                       | 51 |
| 4.2.1. Description de modèle de simulation .....                                                                | 51 |
| 4.2.2. Résultats et interprétations.....                                                                        | 52 |
| 4.2.3. Effet de la valeur de condensateur sur l'amplitude, la durée et la fréquence de tension transitoire..... | 53 |
| 4.3. Creux de tension due à la mise sous tension du transformateur.....                                         | 53 |
| 4.3.1. Description de modèle de simulation .....                                                                | 53 |

|                                                                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.2. Résultats et interprétations.....                                                                    | 54        |
| 4.3.3. Les facteurs qui affectent l'amplitude de creux.....                                                 | 56        |
| 4.3.3.1. Remarques .....                                                                                    | 57        |
| 4.3.3.2. Conclusions .....                                                                                  | 57        |
| 4.4. Surintensité dues au court-circuit au secondaire d'un transformateur .....                             | 57        |
| 4.4.1. Description de model de simulation .....                                                             | 57        |
| 4.4.2. Résultats et interprétations.....                                                                    | 58        |
| 4.5. Déséquilibre de tension provoque par une mauvaise répartition des charges au niveau de récepteur ..... | 60        |
| 4.5.1. Description de model de simulation .....                                                             | 60        |
| 4.5.2. Résultats et interprétations.....                                                                    | 61        |
| 4.5.3. Conclusions .....                                                                                    | 62        |
| 4.6. Harmonique dues à la charge non-linéaire (redresseur).....                                             | 63        |
| 4.6.1. Description de model de simulation .....                                                             | 63        |
| 4.6.2. Résultats et interprétations avant branchement de charge non linéaire.....                           | 63        |
| 4.6.3. Résultats et interprétations après branchement de charge non linéaire .....                          | 64        |
| 4.6.3.1. Courants et tensions primaires .....                                                               | 64        |
| 4.6.3.2. Courants et tensions secondaires .....                                                             | 65        |
| 4.6.4. Analyse de Fourier (FFT).....                                                                        | 66        |
| 4.6.5. Conclusions .....                                                                                    | 67        |
| Conclusion.....                                                                                             | 68        |
| <b>Conclusion Générale</b>                                                                                  | <b>69</b> |
| <b>Références</b>                                                                                           | <b>70</b> |

# Liste des Figures

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1.1.Principe d'une décharge électrostatique entre deux conducteurs .....                         | 6  |
| Fig. 1.2.Modélisation du circuit de charge électrostatique d'une personne.....                        | 6  |
| Fig. 1.3.Les charge dans les nuages orageux du type cumulo-nimbus. ....                               | 8  |
| Fig. 1.4.Classification des coups de foudre.....                                                      | 9  |
| Fig. 1.5.Image d'anneaux (Anti-effluve). ....                                                         | 10 |
| Fig. 1.6.Distorsions harmoniques.....                                                                 | 11 |
| Fig. 1.7.Exemple de fluctuation d'amplitude de la tension.....                                        | 12 |
| Fig. 1.8.Exemple d'un déséquilibre des tensions triphasés.....                                        | 12 |
| Fig. 1.9.Schéma d'un réseau triphasé équilibré alimente des récepteurs déséquilibrés.....             | 13 |
| Fig. 1.10.Forme d'onde d'un exemple de creux de tension. ....                                         | 13 |
| Fig. 1.11.Forme d'onde de surtension.....                                                             | 14 |
| Fig. 2.1.Diode transil (TVS).....                                                                     | 21 |
| Fig. 2.2. Schéma de principe d'une alimentation sans interruption (ASI) on-line.....                  | 23 |
| Fig. 2.3.Court-circuit en aval du variateur .....                                                     | 26 |
| Fig. 3.1. Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé, avec un défaut d'isolement.....         | 30 |
| Fig. 3.2. Circuit équivalent pour l'étude d'interruption de courants inductifs. ....                  | 32 |
| Fig. 3.3. Superposition d'un courant à fréquence élevée au courant à fréquence industrielle. ....     | 33 |
| Fig. 3.4. Courant et tensions du couplage au réseau d'une batterie en gradins (A), fixe (B)... ..     | 36 |
| Fig. 3.5. Caractéristiques des creux, et profil de tension.....                                       | 38 |
| Fig. 3.6. Forme d'onde de courant de court-circuit.....                                               | 39 |
| Fig. 3.7. Courant de court-circuit brusque de transformateur avec $u=0$ à $t=0$ , ( $\alpha=0$ )..... | 41 |
| Fig. 3.8. Les variations du courant $I$ parcourant l'impédance du réseau ( $R, X$ ).....              | 41 |
| Fig. 3.9. Circuit triphasée en connexion (étoile – étoile) sans neutre .....                          | 42 |
| Fig. 3.10.Circuit triphasée en connexion (étoile – étoile) avec le neutre. ....                       | 43 |
| Fig. 3.11.Dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire. ....                       | 45 |
| Fig. 3.12.Représentation du circuit étudié au rang harmonique $h$ .....                               | 48 |
| Fig. 4.1. Modèle d'alimentation de batterie de condensateurs développé dans Simulink.....             | 51 |
| Fig. 4.2.Tensions ( $V_{abc}$ ) coté 11kV .....                                                       | 52 |
| Fig. 4.3. Tensions ( $V_{abc}$ ) coté 400V.....                                                       | 52 |
| Fig. 4.4. Tensions ( $V_{abc}$ ) coté 400V, (Cas batterie de 100kVAR).....                            | 53 |

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 4.5. Model Simulink pour simulation d'enclenchement du transformateur.....                        | 54 |
| Fig. 4.6. Courant d'appelle de transformateur des phases avant et après l'enclenchement. ....          | 54 |
| Fig. 4.7. Forme d'onde des tensions de réseaux avant et après l'enclenchement. ....                    | 55 |
| Fig. 4.8. Courbes RMS des tensions de réseau. ....                                                     | 55 |
| Fig. 4.9. Courbes RMS des tensions de réseau (Cas d'un transformateur de 3MVA).....                    | 56 |
| Fig. 4.10. Courbes RMS des tensions de réseau (Cas d'une source de 35MVA). ....                        | 57 |
| Fig. 4.11. Model de simulation d'un court-circuit au secondaire d'un transformateur.....               | 58 |
| Fig. 4.12. Tensions simple des phases au primaire de transformateur. ....                              | 58 |
| Fig. 4.13. Courants $I_{abc}$ au primaire de transformateur.....                                       | 59 |
| Fig. 4.14. Courants $I_a$ au primaire de transformateur. ....                                          | 59 |
| Fig. 4.15. Model sous Simulink pour simulation de déséquilibre de la charge. ....                      | 60 |
| Fig. 4.16. Courants de source ( $I_{abc}$ ), avant et après l'ouverture de contacteur. ....            | 61 |
| Fig. 4.17. Tension simple de source ( $V_{abc}$ ) avant après l'ouverture de contacteur. ....          | 61 |
| Fig. 4.18. Tension simple de charge ( $V_{ch_{abc}}$ ), avant et après l'ouverture de contacteur. .... | 62 |
| Fig. 4.19. Model Simulink de simulation de l'effet de la charge non linéaire .....                     | 63 |
| Fig. 4.20. Courants des phases au secondaire (Sans charge non linéaire). ....                          | 63 |
| Fig. 4.21. Tensions des phases au secondaire (Sans charge non linéaire). ....                          | 64 |
| Fig. 4.22. Courants des phases au primaire (Charge non linéaire branchée).. ....                       | 64 |
| Fig. 4.23. Tensions simples des phases au primaire (Charge non linéaire branchée) .....                | 65 |
| Fig. 4.24. Courants des phases au secondaire (Charge non linéaire branchée).....                       | 65 |
| Fig. 4.25. Tensions des phases au secondaire (Charge non linéaire branchée).....                       | 66 |
| Fig. 4.26. Zoom des tensions au secondaire (Charge non linéaire branchée). ....                        | 66 |
| Fig. 4.27. Analyse de Fourier (FFT) de courant pour la phase A au secondaire.....                      | 67 |

## Liste des Tableaux

|          |                                                                                                     |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab.1.1. | Table de principaux phénomènes perturbateurs. ....                                                  | 5  |
| Tab.1.2. | Table de différents types et caractéristiques de surtension. ....                                   | 15 |
| Tab.2.1. | Table de principes et caractéristiques du filtrage passif, actif, hybride.....                      | 29 |
| Tab.3.1. | Table de définitions, schéma équivalent et valeur crête maximale du courant<br>d'enclenchement..... | 35 |
| Tab.3.2. | Table de différents types de charges polluantes .....                                               | 49 |

# Listes des Acronymes et Symboles

## • Acronymes

|      |                                                                          |
|------|--------------------------------------------------------------------------|
| DES  | Décharge électrostatique                                                 |
| IEM  | Impulsion électromagnétique                                              |
| CEI  | Commission électrotechnique internationale                               |
| MOV  | Varistances à oxyde métallique (metal oxyde varistor)                    |
| TVS  | Les diodes Transils (transient-voltage-suppression)                      |
| ASI  | Alimentation statique sans interruption                                  |
| IGBT | Transistor bipolaire à grille isolée ( InsulatedGateBipolar Transistor ) |
| MLI  | Modulation de largeur d'impulsions (Pulse Width Modulation)              |
| THT  | Très haute tension                                                       |
| HT   | Haute tension                                                            |
| MT   | Moyen tension                                                            |
| BT   | Basse tension                                                            |
| KCL  | Loi des nœuds (Kirchhoff's Current Law)                                  |
| KVL  | Loi des mailles (Kirchhoff's Voltage Law)                                |
| THD  | Taux de distorsion (Total Harmonic Distortion)                           |
| FP   | Facteur de puissance                                                     |
| RMS  | Valeur efficace (Root Mean Square)                                       |
| FFT  | Transformation de Fourier rapide (Fast Fourier transform)                |

## • Symboles

|                  |                                                                             | Unité |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-------|
| $S_d$            | facteur de défaut à la terre                                                |       |
| $X_d$            | la réactance directe du réseau vu du point de défaut                        | Ohm   |
| $X_0$            | la réactance homopolaire                                                    | Ohm   |
| $U_s, U_e$       | les tensions à l'extrémité ouverte et à l'entrée de la ligne respectivement | V     |
| $L$              | Inductance                                                                  | H     |
| $C$              | Capacité                                                                    | F     |
| $\omega$         | Pulsation ( $2\pi \times 50$ )                                              | Rad/s |
| $C_{p1}, L_{p1}$ | sont respectivement capacité et inductance du disjoncteur                   | F , H |
| $C_1, L_1$       | sont respectivement capacité et inductance de source de tension             | F, H  |
| $L_2, C_2$       | représenté respectivement la partie inductive et capacitif de la charge     | H, F  |

|                |                                                                                         |       |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| $L_0$          | inductance de ligne généralement négligeable                                            | H     |
| $L_a$          | Inductance pure du réseau amont                                                         | H     |
| $U_n$          | Tension composée nominale                                                               | V     |
| $S_{cc}$       | Puissance de court-circuit                                                              | VA    |
| $I_{cc}$       | Courant de court-circuit                                                                | A     |
| $S_A, S_B$     | Surtensions amont et aval respectivement                                                | V     |
| $\hat{I}_e$    | Valeur crête maximale de courant d'enclenchement                                        | A     |
| $V_{max}$      | Amplitude d'onde de tension avant le creux                                              | V     |
| $V_{creu.max}$ | Amplitude d'onde de tension durant le creux                                             | V     |
| $\emptyset$    | Saut d'angle de phase                                                                   | Degré |
| $V_{rms}$      | La valeur efficace                                                                      | V     |
| $V_i$          | Tensions échantillonnées dans le domaine temporel                                       | V     |
| $N$            | Le nombre d'échantillons par cycle                                                      |       |
| $I_a$          | Composante symétrique ou périodique de $i_{cc}$                                         | A     |
| $I_c$          | Composante asymétrique apériodique de $i_c$                                             | A     |
| $I_{max}$      | Valeur maximale de $i_{cc}$                                                             | A     |
| $q$            | l'angle de décalage entre l'instant initial du défaut et l'origine de l'onde de courant |       |
| $R$            | Resistance                                                                              | Ohm   |
| $Z_{cc}$       | Module de l'Impédance de court-circuit                                                  | Ohm   |
| $R_{cc}$       | Resistance de court-circuit                                                             | Ohm   |
| $X_{cc}$       | Réactance de court-circuit                                                              | Ohm   |
| $u_1$          | Tension primaire de transformateur lors d'un court-circuit                              | V     |
| $\varphi_{cc}$ | Argument de l'impédance de court-circuit                                                |       |
| $U_1$          | Tension maximale de transformateur lors d'un court-circuit                              | V     |
| $\alpha$       | Angle de déphasage de tension primaire par rapport au courant                           | Degré |
| $i_{ccperm}$   | composante permanente de $i_{cc}$                                                       | A     |
| $i_{cctrans}$  | composante transitoire $c_c$                                                            | A     |
| $LCD$          | Inductance de court-circuit                                                             | H     |
| $i_{ccmax}$    | Valeur maximale de courant de court-circuit                                             | A     |
| $\tau_{cc}$    | la constante de temps en court-circuit                                                  | s     |
| $X$            | Réactance                                                                               | Ohm   |
| $\Delta U$     | variations de tension                                                                   | V     |

|                       |                                                                                                         |        |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| $E$ et $U$            | Tension de source et charge respectivement                                                              | V      |
| $I$                   | Courant                                                                                                 | A      |
| $P, Q$                | Puissance active et réactive respectivement                                                             | W, VAR |
| $V_n, V_N$            | Tension de coté générateur et cote charge                                                               | V      |
| $I_a, I_b$ et $I_c$   | Les courants de phases                                                                                  | A      |
| $Z_a, Z_b$ et $Z_c$   | Les impédances des phases                                                                               | Ohm    |
| $V_a, V_b$ , et $V_c$ | Les tensions simples des phases                                                                         | V      |
| $I_{ch}$              | Signale périodique non sinusoïdale                                                                      |        |
| $T$                   | Période                                                                                                 | s      |
| $f$                   | Fréquence                                                                                               | Hz     |
| $Im_n, \varphi_n$     | Amplitude et déphasage de l'harmonique de range n respectivement                                        |        |
| $a_0$                 | la moyenne de signal $I_{ch}$                                                                           |        |
| $f_n, f_0$            | Fréquence de l'harmonique de range n et de fondamentale respectivement                                  | Hz     |
| $Y_0$                 | Amplitude de la composante continue, généralement nulle en distribution électrique en régime permanent. |        |
| $Y_n$                 | Valeur efficace de la composante de rang n.                                                             |        |
| $Y_1$                 | Valeur efficace de fondamental                                                                          |        |
| $D$                   | Puissance déformante                                                                                    | VAR    |
| $V_f$                 | tension efficace sous fréquence fondamentale                                                            | V      |
| $I_n$                 | courant sous fréquence harmonique                                                                       | A      |

# Introduction Générale

L'électricité générée par les centrales de production de l'énergie électrique alimente les consommateurs par des systèmes qui englobent principalement deux parties, appelées transport et distribution. Un système d'alimentation électrique a trois principaux composants (les centrales, les réseaux de transport et les réseaux de distribution), ces systèmes d'alimentation électrique sont aujourd'hui pollués dans le monde industrialisé avec des variations indésirables de tension et de courant, dues à des problèmes de sources croissantes de perturbations qui se produisent dans les réseaux électriques, qui sont exposés à des perturbations environnementales comme la foudre, la décharge électrostatique et les impulsions électromagnétiques. Alors que le nombre d'équipements sensibles augmente dans les systèmes de distribution, la qualité de la tension deviendra plus en plus importante. Le problème de qualité de l'alimentation le plus courant dans les systèmes de distributions industrielles et les perturbations de tension englobe principalement les creux de tension, les surtensions, harmoniques, déséquilibres et fluctuation de tension.

Dans le contexte de l'ouverture de concurrence dans le domaine de production d'électricité ainsi de libéralisation du marché de l'énergie, la compétitivité des compagnes de l'électricité est liée aussi à la qualité de l'énergie fournie qui est devenue un facteur différenciateur [1]. Pour un industriel notamment, la qualité de l'énergie devenue un critère de choix d'un fournisseur d'énergie, car une mauvaise qualité de l'énergie électrique peut entraîner un dysfonctionnement ou même l'arrêt des outils de production. Le coût des perturbations peut donc être très élevé car il doit tenir compte du manque à produire, de la remise en marche de l'outil de production, des retards de livraison...etc [1].

Dans ce mémoire fin d'étude on s'intéresse à l'analyse et la simulation des différentes sources de perturbation avec un plan de travail qui compose de quatre chapitres.

On a consacré le premier chapitre à la présentation des sources des perturbations par la définition des différentes sources des perturbations dans les réseaux électriques, puis on passe par la définition de la qualité d'énergie électrique pour pouvoir comprendre la différente manière et critère qui influence le fonctionnement des réseaux électriques, après le classement des ces sources selon différents critères (duré, origine) et nécessaire pour la dispersion entre les perturbations dans notre étude. Aussi on a basé sur le choix de la classification selon l'origine (interne, externe) des ces source des perturbations dans notre mémoire.

Dans le deuxième chapitre, on a basé sur les perturbations les plus gênantes dans les réseaux électriques qui sont les perturbations d'origine interne dans la présentation de différentes conséquences et les solutions techniques pour chaque type de perturbation.

Le troisième chapitre, on a pris pour analyser chaque type de perturbation des cas les plus fréquentes dans les réseaux électriques par la présentation des méthodes de calcul de chaque perturbation d'origine interne pour pouvoir évaluer les réseaux par des facteurs analytiques.

Dans le quatrième chapitre et le dernier, on a utilisé la méthode numérique de la simulation de ces perturbations internes par l'utilisation de logiciel MATHLAB/SIMULINK, qui nous a donné facilement des résultats par rapport à la méthode analytique, ces résultats sont plus économiques dans le temps et plus précis.

Enfin, une conclusion générale qui clôture notre travail.

# Chapitre 1 : Généralités sur les sources des perturbations

## 1.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter la définition des différents types des sources des perturbations dans les réseaux électriques en générale. Premièrement on va classer ces sources de perturbation en deux types, selon leurs origines (interne et externe), puis on fait la définition de la qualité de l'énergie électrique et ses paramètres caractéristiques.

## 1.2. Qualité de l'énergie électrique

Les consommateurs finaux ont besoin d'une haute qualité d'énergie électrique, comme une alimentation en tension continue et sûre avec le courant requis à des valeurs efficaces constantes et fréquence constante, puis une forme d'onde de tension sinusoïdale pure.

En général, les réseaux électriques constituent un système de tension alternatif triphasé, sa fréquence de base est de 50 Hz ou de 60 Hz. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

- La fréquence fondamentale ;
- L'amplitude des trois ondes tensions ;
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde ;
- La symétrie du système triphasé, (l'égalité des modules des trois ondes de tensions et de leur déphasage relatif).

La qualité de la tension peut être affectée par deux manières :

- Le fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau ;
- Le fait de certains récepteurs.

L'effet sur les quatre paramètres précédemment définis, se manifeste sous forme des différentes perturbations selon quatre possibilités distinctes [2] :

- Fluctuations de la fréquence à 50 Hz : se manifeste comme certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport ;
- Les variations de l'amplitude : variations rapides de tension ou de creux de tension ;
- La modification de la forme d'onde de la tension : se manifeste comme harmonique et inter-harmonique ;

- La dissymétrie du système triphasé : appelée déséquilibre de phase.

### 1.3. Classification des perturbations

En se basant sur leur durée, les perturbations électriques peuvent être classées en trois types :

- Les perturbations électriques transitoires ;
- Les perturbations électriques de courte durée ;
- Les perturbations électriques permanentes.

**Les perturbations électriques transitoires :** les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution présentent leurs principales origines, ainsi les phénomènes naturels tels que la foudre. Elles se caractérisent par leurs durées de moins d'une demi-période fondamentale.

**Les perturbations de courte durée :** les courts-circuits sont la principale origine de ce type de perturbations qui manifestent comme des creux de tension, des coupures brèves, ou les surtensions. Elles se caractérisent par ses conséquences coûteuses sur les équipements électriques car la variation de l'amplitude de tension dans ce cas est importante.

**Les perturbations permanentes :** les charges non linéaires et fluctuantes raccordées au réseau électrique sont des origines majeures de ces perturbations, qui apparaissent sous la forme, des harmoniques, de bruit, de déséquilibre et des variations de tension et de fréquence. Elles se caractérisent contrairement au cas précédent par les faibles variations de l'amplitude de tension, qui va provoquer l'échauffement, les pertes supplémentaires, le vieillissement prématuré des équipements électriques et les dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande.

Le tableau (Table. 1.1) suivant récapitule les remarques précédentes en présentant les principales perturbations, leur origine, leur conséquences, ainsi que leur Dégâts [3].

On peut remarquer également que les perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories selon leur origine :

- **Perturbations externes :** Ce sont des phénomènes indépendants du réseau, dont l'origine est mécanique, telle que la rupture d'un support, d'un conducteur ou d'un isolateur sur une ligne aérienne. Ou d'origine atmosphérique qui est le cas de la foudre.

- **Perturbations internes :** Ce sont des phénomènes propres au réseau car ils prennent naissance à l'intérieur du réseau sans être justifiés par aucune autre cause extérieure.

**Table. 1.1 :** Les principaux phénomènes perturbateurs [3].

| <b>Perturbations</b>              | <b>Cause</b>                                                                                                                  | <b>Conséquences</b>                                                                                                   | <b>Dégâts</b>                                                            |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Creux de tension et coupure brève | Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)                                                                                 | Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts                                                                    | Pertes de données informatiques.                                         |
| Fluctuations rapides (Flicker)    | Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne ...etc.).                              | Papillotement de l'éclairage, moins de luminosité                                                                     | Extinction et rallumage des équipements                                  |
| Harmonique                        | Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques ...)                                                 | Effets thermiques (moteurs, condensateurs,...), vieillissement d'isolant automatismes                                 | Mise en péril du processus de production et ralentissement de la machine |
| Inter-harmonique                  | Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée | Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes | Mise en péril du processus de production et ralentissement de la machine |
| Déséquilibre                      | Installations déséquilibrées (traction ferroviaire ...)                                                                       | Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections                                     | Ouverture des contacteurs                                                |
| Surtension                        | Court-circuit, commutations, foudre                                                                                           | Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels                                                       | Claquage d'un filament de lampe et destruction des protections           |

## **1.4. Perturbations d'origine externes**

### **1.4.1. Décharges électrostatiques (DES)**

La décharge électrostatique DES, en anglais ESD (ElectroStaticDischarge) est le transfert de charge entre deux objets ou personnes ayant acquis une quantité extrême de charge électrique entrent en contact, par exemple deux conducteurs ont des potentiels électriques différents suffisamment proches pour amorcer un arc électrique (Fig. 1.1). L'amorçage dépend du champ

électrique entre les conducteurs et du diélectrique qui les sépare. Ce champ n'est pas évident à calculer car il dépend de la distance, mais aussi de la géométrie des deux électrodes. Pour une distance donnée, la tension disruptive (tension à partir de laquelle l'arc est amorcé). Exprimé en  $\text{kV.mm}^{-1}$ , le champ critique est aussi appelé rigidité diélectrique (grandeur caractéristiques des matériaux peut influencer par de nombreux facteurs tels que la pression, la température ou la distance des électrodes). Lorsqu'il est dépassé, la déformation des molécules due au phénomène de polarisation dans le diélectrique est si importante que des électrons sont arrachés aux noyaux. Le diélectrique devient conducteur et laisse passer un courant intense. On dit qu'il est percé [4], [5].

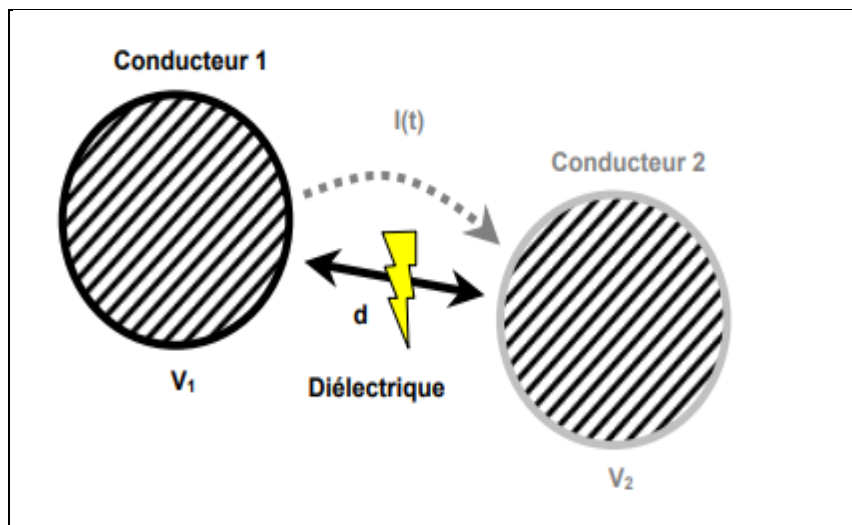


**Fig. 1.1 :** Principe d'une décharge électrostatique entre deux conducteurs [5].

L'effet de ce type de perturbation peut aller jusqu'à la destruction des appareillages électroniques mais n'agresse pas les réseaux électriques. Cette distinction exprime par la sensibilité électronique ces décharges électrostatiques car elle utilise des composants d'un niveau bas, à faible consommation et haute impédance aussi l'accessibilité de ces appareillages au toucher tel que les voyants, potentiomètres ...etc. Or, une personne selon le type de chaussures qu'elle porte et du sol sur lequel elle se déplace, ainsi que de l'humidité de l'air, peut se charger à un potentiel atteignant 15 kV, ce phénomène modélisé est représenté sur la (Fig. 1.2), dans ce cas le courant de décharge peut atteindre plusieurs dizaines d'ampères. Immuniser et tester l'appareillage électronique à cette contrainte est devenu une nécessité [6].

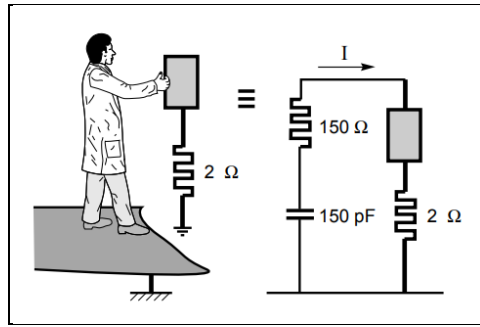


**Fig. 1.2 :** Modélisation du circuit de charge électrostatique d'une personne [6].

### 1.4.2. Impulsions électromagnétiques (IEM)

Une impulsion électromagnétique (IEM), en anglais EMP (ElectroMagnetic Pulse) est une émission d'ondes électromagnétiques qui dure peu de temps et de très forte amplitude qui peut détruire de nombreux appareils électriques et électroniques (non protégés) et brouiller les télécommunications.

Les conséquences d'une telle impulsion sur une zone habitée pourraient être dévastatrices, surtout dans les pays industrialisés. Ce type d'impulsion a été apparu en 1945 lors premiers essais d'armes nucléaires américains, qui eurent notamment pour conséquence ce type d'impulsion, en tant qu'effet secondaire d'une bombe atomique. Depuis c'est devenu une arme à part entière, cette phénomène ne fut véritablement compris que dans les années 1960.

L'IEM peut créer par la transformation de l'énergie magnétique par un flot asymétrique de courant crée par la présence du champ magnétique terrestre dans la région sous la source. L'impulsion électromagnétique induit des surtensions et des surintensités dans les câbles, les antennes, les structures mécaniques, les réseaux télécom ... etc. Par la destruction des isolants, elle permet la circulation de courants éminemment destructeurs dans les appareillages en fonctionnement [6].

L'effet principal de l'IEM est d'endommagé les systèmes électriques, notamment les réseaux d'électricité, les équipements électroniques et les systèmes d'information, sans aucun effet connu sur les organismes vivants. L'IEM est un engin « explosif » en ce sens qu'il y a une émission d'énergie et que le motif de son utilisation peut être analogue à celui d'autres types d'engins explosifs.

On peut distinguer deux types d'IEM selon leur origine en tant qu'armes, ce sont :

- **Impulsions électromagnétiques d'origine nucléaire (IEMN) :** C'est une conséquence d'une explosion nucléaire. Une variante de cela est l'IEM d'origine nucléaire à haute altitude (IEMNHA), peut détruire les matériels électroniques d'une vaste région.
- **Armes à impulsion électromagnétique non nucléaires (IEMNN) :** Ce sont des armes de portée limitée, mais peuvent être utilisées pour cibler des objectifs spécifiques, comme les l'infrastructure essentielle [7].

### 1.4.3. Coup de foudre

L'origine des coups de foudre se situe dans les nuages orageux du type cumulo-nimbus (nuage d'orage). La partie supérieure de ces nuages (située entre 10 et 16 Km d'altitude) est constituée de cristaux de givre qui portent des charges positives alors que la base du même nuage est faite de gouttelettes d'eau qu'elles sont chargées négativement (Fig. 1.3). Lorsque la limite disruptive de la séparation des charges créée par les turbulences atmosphériques est atteinte des décharges électriques provenant de cette limite, sont produites soit entre nuages (éclairs), soit entre le nuage et la surface du sol (Foudres) [8].

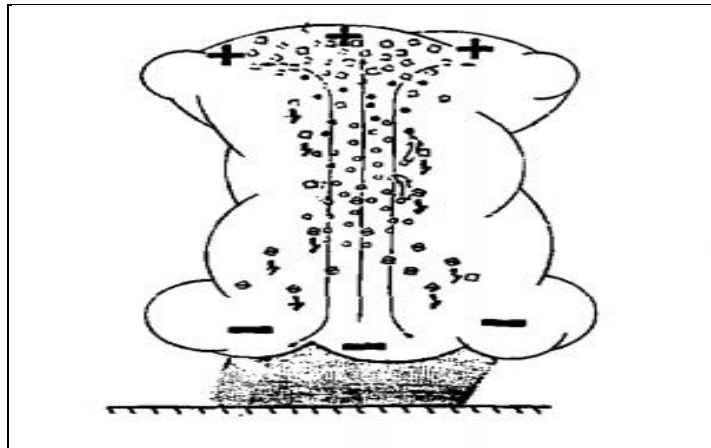


**Fig. 1.3 :** La charge dans les nuages orageux du type cumulo-nimbus [8].

La différence de potentiel entre le nuage et le sol est de plusieurs dizaines de mégavolts. Une pré-décharge appelée traceur s'est échappée du fond du nuage orageux; peu lumineuse, sa progression vers le sol s'effectue par bande de plusieurs dizaines de mètres [8].

On classe généralement les coups de foudre selon le sens de développement (décroissant ou montant) du traceur principal et la polarité de la charge écoulee, ce qui nous mène à distinguer quatre types de coups de foudres [9], [8] :

- Foudre ascendante positive (canal ionisé +, courant de foudre -) (Fig. 1.4.a) ;

- Foudre ascendante négative (canal ionisé -, courant de foudre +) (Fig. 1.4.b) ;
- Foudre descendante positive (canal ionisé +, courant de foudre +) (Fig. 1.4.c) ;
- Foudre descendante négative (canal ionisé -, courant de foudre -) (Fig. 1.4.d).

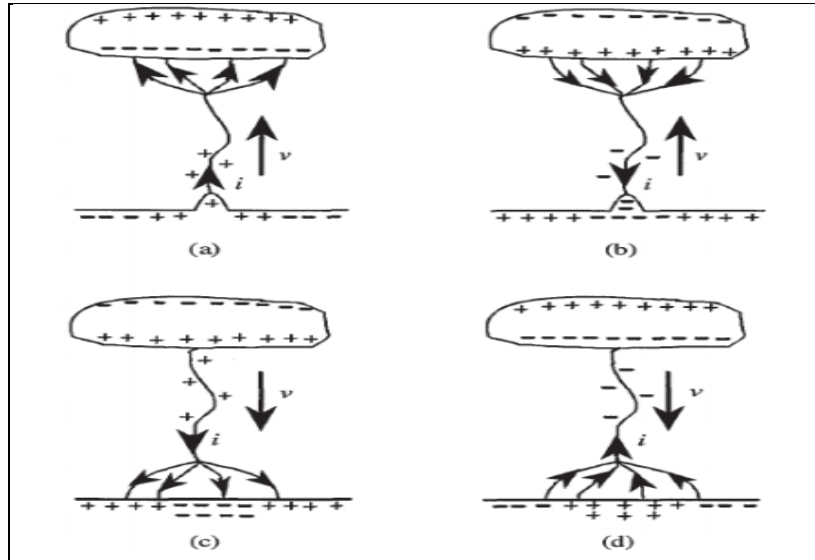


**Fig. 1.4 :** Classification des coups de foudre [9].

### 1.4.4. L'effet couronne

L'effet couronne ou décharge couronne, aussi appelées (Corona) est une type de décharge électrique crée au voisinage d'un conducteur dans un milieu ionisé, elle se produit lorsque le potentiel électrique dépasse une valeur critique mais les conditions ne permettent pas la formation d'un arc. Une décharge couronne se produit lorsqu'un courant, se crée entre deux électrodes portées en potentiel élevé et séparé par un gaz neutre, en générale l'air, l'ionisation de ce gaz va créer un plasma et par la suite la propagation des charges électriques. Lorsque le champ électrique en un point du fluide est suffisamment grand, à partir d'une certaine valeur de la tension de seuil d'apparition de la décharge couronne l'ionisation de l'intervalle d'air inter électrodes va commencer [10].

Les décharges par effet couronne libèrent tout de même de l'ozone, du monoxyde d'azote et des gaz acides, qui peuvent détériorer encore plus l'isolant et finir par provoquer un défaut d'isolement. Elles peuvent aussi entraîner des grandes pertes d'énergie [11].

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure, les couronnes en polarité positive ont été beaucoup plus étudiées que celles en polarité négative [12].

De nombreux facteurs peuvent provoquer ou augmenter les décharges couronne, par exemple :

- Isolateurs fissurés ou extrêmement sales ;
- Conducteurs endommagés ;
- Quincaillerie rouillée ;
- Pointes ou arêtes vives sur un conducteur ;
- Conception ou installation inadéquate.

La détection de la décharge couronne à l'air libre est plus facile qu'il n'y paraît. De nos jours, elles peuvent servir d'avertissement ayant une défaillance majeure d'équipement électrique essentiel, par la prévention de cet effet grâce aux dispositifs appelés (anti-effluves), montrés dans la figure (Fig. 1.5) [11].



**Fig. 1.5 :** Image d'anneaux anti-effluve [11].

### 1.5. Perturbations internes

#### 1.5.1. Harmoniques et inter-harmonique

L'utilisation croissante des équipements informatiques et de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la dégradation de la tension d'alimentation. En effet, des récepteurs tels que les moteurs asynchrones et les transformateurs participent à la distorsion de l'onde sinusoïdale de la tension, mais ne sont pas les principaux responsables.

L'électronique de puissance, présente aujourd'hui au sein de nombreux matériels d'électrotechniques, ainsi que l'électronique des équipements informatiques contribue essentiellement à la prolifération de ces perturbations électriques. Les nouvelles applications de l'électronique de puissance peuvent parfois avoir des effets négatifs. Elles sont souvent plus

sensibles aux imperfections de l'onde de tension, et elles sont dans la plupart des cas elles-mêmes génératrices d'imperfections [13].

La prolifération des équipements électriques utilisent des convertisseurs statiques entraîné ces dernières années une augmentation sensible au niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale ce qui appelé « harmonique », ou parfois à des fréquences non multiple de fréquence fondamentale nommé « les inter-harmonique ». Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamentale. Par contre les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. Ils sont aussi responsables de distorsions harmoniques, et leurs apparitions sont aujourd'hui en augmentation. Les principales sources des inter-harmoniques sont les convertisseurs statiques de fréquence, les fours à induction, les fours d'arc. On appelle distorsion harmonique (Fig. 1.6). Toute déviation en régime permanent, de la forme sinusoïdale idéale de l'onde de tension ou de courant, l'origine de distorsion harmonique c'est la superposition des ondes sinusoïdales (de tensions ou de courant) des harmoniques sur l'onde fondamentale [14].

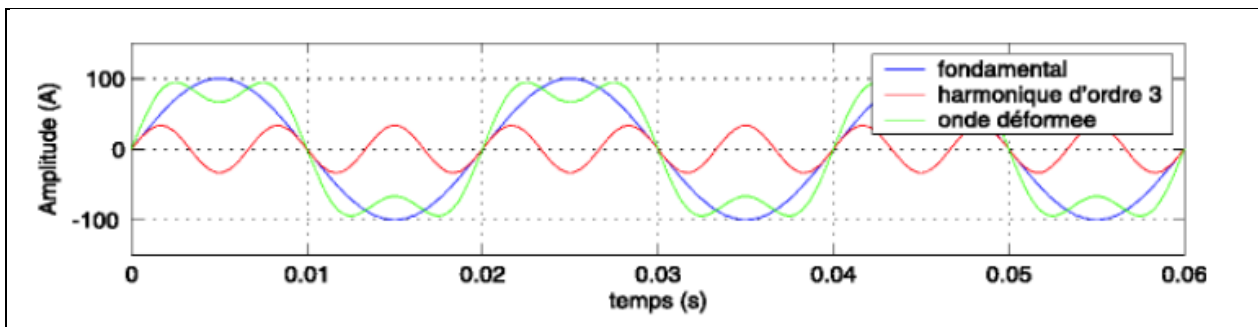


**Fig. 1.6 :** Distorsions harmoniques [14].

La nature de forme d'onde des signaux harmoniques est non sinusoïdale, l'analyse de Fourier permet la décomposition de ces formes en somme de signaux sinusoïdaux, avec différentes fréquences et amplitudes [15].

### 1.5.2. Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des changements périodiques ou instables dans l'enveloppe de tension. Ce sont des changements soudains de l'amplitude de tension de l'ordre de 10% et se

produisent à des intervalles de quelques centièmes de seconde. Elles sont notamment dues à la propagation de courants d'appel importants sur les lignes du réseau. La principale source de ces courants est le fonctionnement d'équipements dont la consommation d'énergie évolue rapidement, tels que les fours à arc électrique et les machines à souder.

Ces fluctuations se manifestent comme des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage produit un gêne visuel observable pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé « Flicker ». Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la (Fig. 1.7) [14]. Les autres applications de l'électricité ne sont pas normalement affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10% [16].

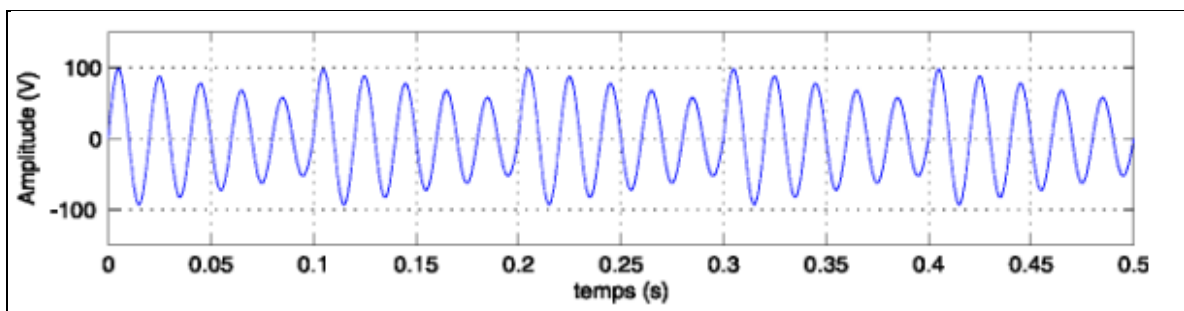


**Fig. 1.7 :** Exemple de fluctuation d'amplitude de la tension [14].

### 1.5.3. Déséquilibre des phases

Pour que le système triphasé soit équilibré il faut que les trois tensions sont identiques en amplitude et sont décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, si ces deux conditions ne sont pas accomplies on parlera de déséquilibre du système triphasé comme l'exemple de la (Fig. 1.8). Cette déséquilibre de tension peut être une conséquence d'une alimentation d'un récepteur électrique triphasé non équilibré par un réseau électrique triphasé équilibré comme la montre dans la (Fig. 1.9) qui va provoquer une circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [14], [17].

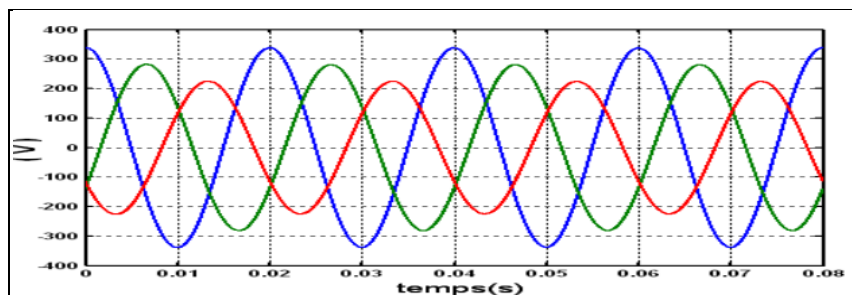


**Fig. 1.8 :** Exemple d'un déséquilibre de tensions triphasées [15].

Le problème de déséquilibre de phase peut manifester sur les équipements triphasés branchés sur un réseau électrique, comme toute charge triphasée doit appeler un courant identique sur chaque phase. Et quant aux charges monophasées branchées sur un réseau triphasé, on doit les répartir le plus uniformément possible entre les trois phases [17].

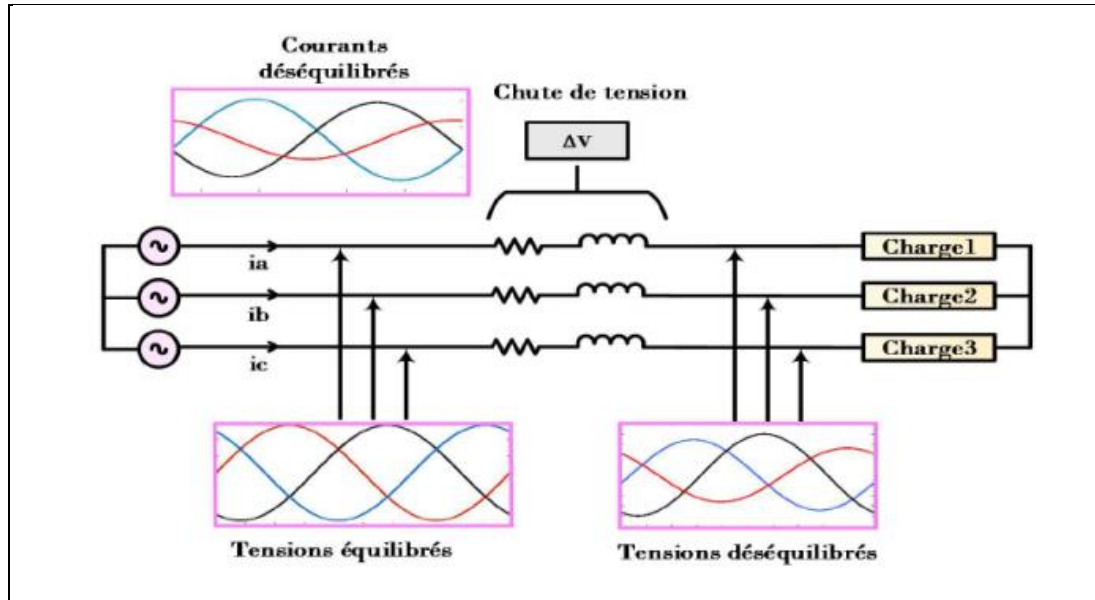


**Fig. 1.9 :** Schéma d'un réseau triphasé équilibré alimente des récepteurs déséquilibré [17].

### 1.5.4. Creux de tension et coupure brève

Les creux de tension c'est la diminution brusque de 10% à 90% de l'amplitude de la tension nominale durant un intervalle de temps de 2ms à 3mn [18]. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non [2]. La figure (Fig. 1.10) montre un exemple de creux de tension.

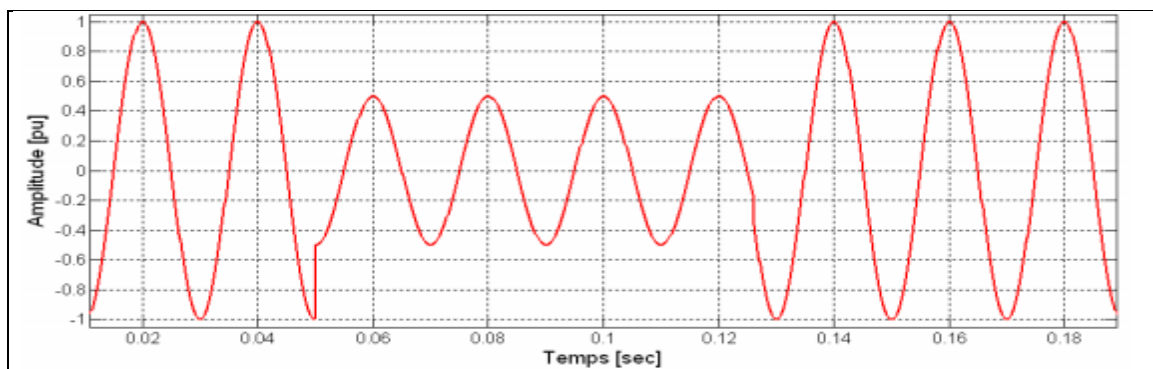


**Fig. 1.10 :** Forme d'onde d'un exemple de creux de tension [3].

La coupure brève se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue au moins de 0.1p.u. Elle est caractérisée par l'absence complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de demi cycle jusqu'à 3s, pour une période de temps ne de passe pas 1mn. Par convention de langue une coupure brève est un creux de tension de 100% de l'amplitude de tension [18], [16].

L'origine des creux de tension et les coupures brevet c'est le phénomène aléatoire aux niveaux des réseaux de distribution ou des récepteurs. La cause principale de ce défaut est le dégagement de défaut par protection et l'intervention incorrecte de protection [18], notamment dans le cas de circuits imputables aux incidents naturels du réseau l'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau peut conduire à la coupure brève [16].

### 1.5.5. Surtension

Toute tension qui dépasse la tension crête dans la valeur sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension [19]. On définit aussi une surtension comme une onde de tension qui se superpose à la tension nominale du réseau, la figure (Fig.1.11) montre une forme d'onde de surtension.

Il y a deux modes d'apparition de surtension :

- Mode différentiel : peuvent apparaître entre phases ou entre circuits différents ;
- Mode commun : peuvent apparaître entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre.

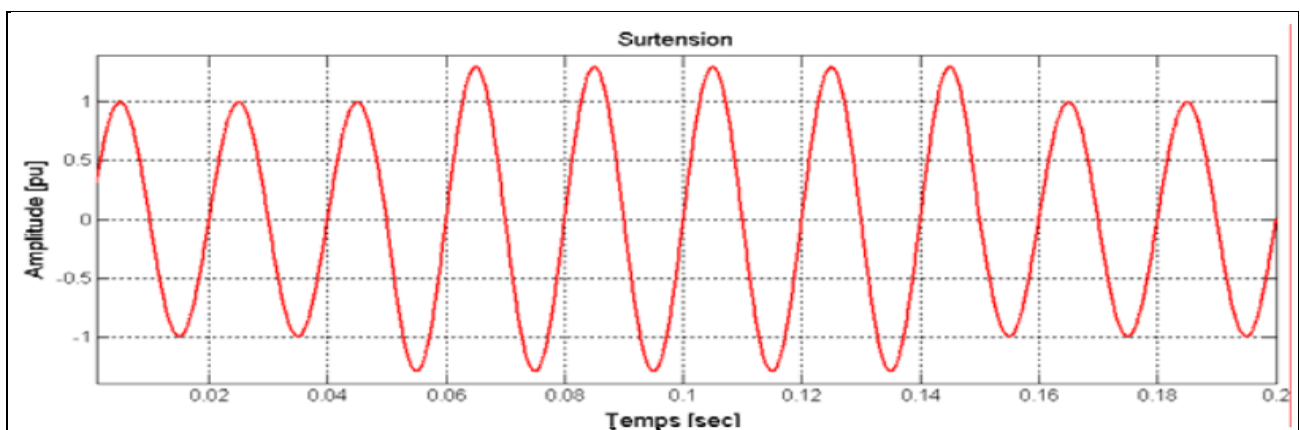


**Fig. 1.11 :** Forme d'onde d'un exemple de surtension [3].

Le tableau (Table. 1.2) représenté les différent types et caractéristiques de surtension.

**Table. 1.2 :** Différents types et caractéristiques de surtension [20].

| Types                    | Principale cause              | Durée       | Coefficient     | fréquence              | Amortissement |
|--------------------------|-------------------------------|-------------|-----------------|------------------------|---------------|
| A fréquence industrielle | Défaut d'isolement            | Longue > 1s | $\geq \sqrt{3}$ | Fréquence industrielle | Faible        |
| De manœuvre              | interruption de court-circuit | Courte 1 ms | 2 à 4           | Moyenne 1 à 200 kHz    | Moyenne       |

### 1.5.6. Surintensités

Habituellement les surintensités, sont dues aux surcharges et aux courts-circuits.

#### 1.5.6.1. Surcharges

Le terme (Surcharge) est utilisé pour un courant excessif circulant dans un circuit en bon état électriquement. Les courants des surcharges sont en général inférieurs à 10 fois le courant nominal du circuit. L'exemple type en est le circuit alimentant des prises de courant sur lesquelles on a raccordé un trop grand nombre d'appareil.

Les surcharges présentent généralement une faible surintensité se produisant dans un circuit électrique sain.

#### 1.5.6.2. Courts-circuits

Les surintensités dans les systèmes triphasés doivent principalement leur origine à des courts-circuits [3].

Le court-circuit provoque en général une forte intensité produite par un défaut de résistance négligeable entre des points présentant une différence de potentiel en état de fonctionnement normal. Il est souvent dû à une défaillance électrique importante comme la dégradation de l'isolation entre phase ou entre phase et neutre, fausse manœuvre (par exemple la chute d'un objet métallique sur des barres) ou la défaillance d'un semi conducteur. Il provoque un courant dont la valeur efficace est très élevée (typiquement supérieure à 10 fois la valeur du courant nominal de l'installation) d'où les risques d'accidents.

### Conclusion

Ce chapitre a pour objet d'étude des généralités sur les sources des perturbations qui affectent la qualité de l'énergie des réseaux électriques, donc il est important de passer par la définition de la qualité de l'énergie, avant de classer les perturbations en deux grand classes selon leurs origine externe, et interne.

Dans chaque classe on a énuméré les différents phénomènes de perturbation et leurs définitions.

Avec cette étude on a remarqué que les phénomènes qui a un grand influence sur les réseaux électriques ce sont des phénomènes de l'origine interne telle que surtension, creux et coupures brèves de tension, surintensité, fluctuation de tension, déséquilibre des phases, et les harmoniques.

Cette remarque conduite à la nécessité de comprendre mieux les conséquences des ces perturbations d'origine interne ainsi la protection contre les différents types d'anomalies, ce qui sera le sujet de prochain chapitre.

# Chapitre 2 : Conséquences et Protection contre les perturbations d'origine interne

## 2.1.Introduction

On s'intéresse dans ce chapitre et dans tous les chapitres qui nous restent aux perturbations d'origine interne car ces perturbations dues à la variation des grandeurs internes qui sont liées au fonctionnement des réseaux, d'où ils sont capables d'étudier facilement et d'éliminer par la protection.

On a dédié ce chapitre à la présentation des différents effets de toutes les perturbations internes et leurs solutions techniques (protection contre ces effets) dans ce contexte on a partagé ce chapitre en deux parties :

- Conséquences, effets des perturbations d'origine interne ;
- Protection contre les perturbations d'origine interne.

## 2.2. Conséquences, effets des perturbations d'origine interne

### 2.2.1. Surtension

Dans les réseaux électriques, les surtensions représentent une perturbation majeure vu qu'elles provoquent des dégradations du matériel, une baisse de la continuité de service et un danger pour la sécurité des personnes. On peut citer diverses conséquences sont [21] :

- Claquage du diélectrique isolant des équipements ;
- Dégradation du matériel par vieillissement, causé par les surtensions répétées ;
- Perte de l'alimentation suite aux coupures longues causées par la destruction du matériel ;
- Perturbation des circuits de contrôle-commande et de communication aux courants faibles par conduction ou rayonnement électromagnétique ;
- Danger pour les humains et les animaux suite aux élévations de potentiel.

### 2.2.2. Creux et coupures brèves de tension

La conséquence de creux de tension est la dégradation de fonctionnement des équipements électriques et peut aller jusqu'à la destruction totale de ces derniers, par la suite peut causer des pertes de l'énergie et perturber les fonctionnements d'une installation électrique [18].

#### 2.2.2.1. Contacteurs

Cet appareil de commande subit des creux de tension lors d'un seuil déterminé (25% de tension nominale) [1], ce qui peut entraîner le déclenchement et l'ouverture de ces contacteurs [2].

#### **2.2.2.2. Machines**

##### **➤ Cas du moteur synchrone**

Dans le moteur synchrone, les creux de tensions provoquent généralement la perte de synchronisme, et aussi le décrochage et l'arrêt du moteur [2].

##### **➤ Cas du moteur asynchrone**

Le couple d'un moteur asynchrone est proportionnellement lié au carré de la tension, ce qui fait lors d'un creux de tension ce couple est directement touché, et par conséquent le ralentissement et le décrochage du moteur [2].

##### **➤ Machines à vitesse variable**

Les variateurs de vitesse subissent des défauts lors que la chute de tension dépasse 15%, et on peut résumer ces défauts par [1] :

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

#### **2.2.2.3. Convertisseur statiques permettant un fonctionnement en récupération d'énergie**

Pour les variateurs de vitesse des moteurs à courant continu on cite les défauts suivants :

- En mode onduleur : destruction des protections ;
- En mode redresseur : ralentissement de la machine.

Quant aux Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone, les principaux défauts sont : le Ralentissement, le décrochage, la surintensité au retour de la tension, la destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur [2].

#### **2.2.2.4. Appareils d'éclairage**

Les creux de tensions touchent aussi aux appareils d'éclairage, notamment les lampes à incandescence et les tubes fluorescents par le vieillissement prématuré de ces dernières.

#### **2.2.2.5. Equipements de type informatique**

Ces équipements deviennent sensibles lors d'une chute de tension supérieure à 10 %, ainsi un creux de tension peut conduire à des pertes de données, commandes erronées, et même l'arrêt ou la panne des appareils [1].

### **2.2.3. Surintensité**

#### **2.2.3.1. Effet thermique**

La conséquence principale des surintensités se situe au niveau des moteurs par leurs réchauffements, mais aussi elles surviennent sur les autres équipements tels que les contacteurs comme l'usure ou soudure des contacts.

#### **2.2.3.2. Effet électrodynamique**

Les surintensités dans les matériels et liaisons (lignes, câbles) entraînent une forte contrainte mécanique, ainsi pour les moteurs ces effets peuvent se traduire par des efforts électrodynamiques dans les bobines en causant des ruptures d'isolation et des à-coups sur le couple [1].

### **2.2.3. Fluctuation de tension**

A part la fluctuation de la luminosité des lampes, L'effet de la fluctuation de tension reste négligeable sur la plupart des autres appareils, car l'amplitude de ces fluctuations n'excède pas  $\pm 10\%$ . Les gênes physiologiques (fatigue visuelle et nerveuse) dépendent de l'amplitude de ces fluctuations. De ce fait Il existe toutefois un seuil de perceptibilité défini par la CEI en dessous duquel le Flicker n'est pas visible [22].

### **2.2.5. Déséquilibre**

Les déséquilibres provoquent le sur échauffement des machines asynchrones triphasées. En effet pendant le démarrage des machines, la réactance inverse est équivalente à sa réactance, ce qui introduira un taux de déséquilibre du courant important entre les trois phases. Ainsi la ou les phases parcourues par ce courant vont s'échauffer et par la suite la réduction de leur durée de vie.

En pratique :

- Le taux 1% est acceptable pendant une longue période ;
- Le taux 1,5% est acceptable de moins de quelques minutes [1].

### **2.2.6. Harmoniques**

On distingue essentiellement deux sortes d'effets [22] :

#### **2.2.6.1. Effets à court terme**

Ce sont les effets qui apparaissent immédiatement sur les équipements, elles peuvent être :

- Systèmes électroniques et électromécaniques : le dérangement des commutations des thyristors, l'augmentation de la marge d'erreur des appareils de mesures et le déclenchement intempestif des relais de protection ;
- Effets électrodynamiques : elles se traduisent par les vibrations et les bruits au niveau des appareils électromagnétiques, notamment dans les machines tournantes suite à l'apparition d'un couple mécanique parasite provoqué par le champ tournant harmonique ;

- Télécommunication : les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et du son.

#### **2.2.6.2. Effets à long terme**

L'exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique entraîne des effets de nature thermique, qui se traduit par l'échauffement et la fatigue prématurée des matériels et des lignes. Ces effets se résument comme suit :

- Echauffements des câbles et des équipements : ils sont soit à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures), ou à long terme (de quelques heures à quelques années), ces effets se manifestent au niveau des câbles par le sur-échauffement du neutre et aussi dans les machines et les transformateurs ;
- Echauffement des condensateurs : la présence d'harmoniques provoque l'hystérésis dans le diélectrique, de ce fait le condensateur est très sensible aux surcharges ce qui entrainera son échauffement et par conséquent des dysfonctionnements ;
- Echauffements dus aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs : la grande différence de vitesse entre le champ d'induction harmonique tournant et le rotor provoquent une surchauffe Par effet Joule dans le bobinage, ce qui représente des pertes supplémentaires avec les pertes dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.

### **2.3. Protection contre les perturbations d'origine interne**

#### **2.3.1. Surtension**

Dans la pratique, il existe plusieurs dispositifs chargés de réduire ou de supprimer les effets des surtensions pour assurer la continuité de service ainsi la protection des personnes et du matériel. Parmi ces moyens on distingue :

- L'éclateur à gaz ;
- Les varistances à oxyde métallique (MOV) ;
- Les diodes à avalanche ;
- Les diodes Transils (TVS).

##### **2.3.1.1. Eclateur à gaz**

Les éclateurs à gaz sont des composants électriques passifs constitués de deux ou trois électrodes dans une enceinte remplie de gaz rare (non-radioactif) à pression contrôlée. On trouve dans cette enceinte un tube en céramique fermé aux extrémités par des coupelles métalliques faisant office d'électrodes. Ce dispositif est conçu pour supporter plusieurs ondes de choc sans qu'il y'aura une destruction ou dispersion des caractéristiques initiales, mais il risque de se mettre en mise hors service définitive lorsqu'il est traversé par des courants de forte intensité [23].

### **2.3.1.2. Varistances à oxyde métallique (MOV)**

Ces dispositifs assurent la protection contre la foudre et les surtensions de commutation des transformateurs, des câbles, de l'équipement et des autres composantes. Ils sont intégrés habituellement aux réseaux de distribution électrique souterrains. Dans les années 50, les varistances à base de carbure de silicium ont été conçues et développées pour la protection et l'adaptation de circuits téléphoniques. Mais au cours des années 60 l'apparition des varistances constituées d'une céramique à base d'oxyde de zinc sont utilisées pour la protection des circuits électroniques. Les avantages de ces composants sont :

- Un coefficient de non-linéarité important ;
- Une capacité d'absorption de l'énergie élevée ;
- Un temps de réponse des varistances ZnO très court [24].

### **2.3.1.3. Diodes à avalanche**

La fabrication de ces diodes est à la base de la meilleure qualité de silicium, ce qui permet une meilleure homogénéité du cristal et la limitation des courants de fuite. Elles sont utilisées dans les milieux parasités ou des surtensions brèves (quelques  $\mu\text{s}$ ) d'une amplitude très supérieure à la tension de la diode peuvent apparaître. Ces diodes vont limiter ces surtensions en partant en avalanche. Ce phénomène ne sera pas destructif car la diode offre une double fonction, d'une part elle n'est pas détruite et d'autre part elle permet l'écrtage de la surtension [25].

### **2.3.1.4. Diode Transils (TVS)**

Une diode Transils (Fig. 2.1) est comme une diode Zener mais optimisé pour une grande rapidité et une énergie absorbée en point très élevée. On le trouve soit unidirectionnel ou bidirectionnel, mais sa capacité d'absorption reste limitée ce qui le rend fragile. Pour cela et pour un fonctionnement idéal on complète ce dispositif d'une MOV ou éclateur en amont, pour protéger au plus près le matériel sensible. Ainsi lors d'une surtension la diode se mettre en court-circuit en interdisant toute tension, et donc un disjoncteur ou fusible doit être obligatoirement placé en amont [26].

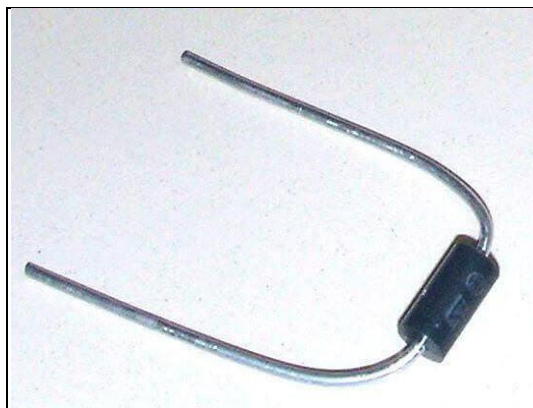


**Fig. 2.1** : Diode Transils TVS [26].

### **2.3.2. Creux de tension et coupures brèves**

#### **2.3.2.1. Réduction du nombre de creux de tensions et de coupures**

Ce sont des dispositions que les distributeurs peuvent prendre pour réduire au maximum les creux de la tension et les coupures dont on peut citer la fiabilisation des ouvrages (maintenance préventive ciblée, renouvellement, mise en souterrain), la restructuration des réseaux (raccourcissement de la longueur des départs). Aussi on trouve l'insertion des disjoncteurs shunt au niveau des réseaux à neutre impudent au lieu des disjoncteurs déclencheurs-réenclencher ce qui offre un gros avantage de ne pas provoquer de coupures sur le départ avarié en cas de défaut à la terre. Ces disjoncteurs annulent la tension aux bornes du défaut par la mise à terre de la seule phase en défaut au niveau du jeu de barres du poste source pendant au moins 300 ms et donc l'extinction des défauts fugitifs ce qui maintiendra la tension entre les phases stables [1].

#### **2.3.2.2. Réduction de la durée et de la profondeur des creux de tension**

##### **➤ Au niveau du réseau**

- Création de nouveaux postes source, interrupteurs de bouclage pour augmenter les possibilités de bouclage ;
- Amélioration du niveau de performance des protections électriques (sélectivité, organes télécommandés en réseau, tél éconduite,...etc.) ;
- Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau [1].

##### **➤ Au niveau des équipements**

L'installation des compensateurs automatiques en temps réel et des démarreurs progressifs qui limitent les pointes de courant permet la réduction de la puissance absorbée par les charges de fortes puissances lors de leur enclenchement.

#### **2.3.2.3. Insensibilisation des installations industrielles et tertiaires**

Pour que les installations industrielles et tertiaires soient insensibles aux creux de tension et aux coupures, un dispositif à réserver l'énergie intercalée entre le réseau et l'installation assure la compensation de manque d'énergie. Cette réserve doit avoir une autonomie supérieure à la durée du défaut de tension dont on veut se protéger. Pour un choix optimal ce dispositif on doit savoir :

- La qualité de la source (niveau maximal de perturbations présent) ;
- Les exigences des récepteurs (sensibilité dans le plan durée-profondeur).

#### **2.3.2.4. Insensibilisation du contrôle-commande**

L'insensibilisation d'un processus est généralement basée sur l'insensibilisation du contrôle-commande. Le contrôle-commande des équipements est en général peu consommer d'énergie et sensible aux perturbations. Il est donc souvent plus économique de désensibiliser uniquement le contrôle-commande et non pas l'alimentation en puissance des équipements [1].

Les solutions consistent à alimenter toutes les bobines des contacteurs par une source auxiliaire sûre comme (batterie, redresseur et d'un condensateur branché en parallèle avec la bobine, relais temporisé à la retombée.etc.) [1].

### 2.3.2.5. Insensibilisation de l'alimentation en puissance des équipements

Certains récepteurs n'acceptent pas les niveaux de perturbations attendus, voire ni creux de tension ni coupures. C'est le cas des ordinateurs, éclairages et systèmes de sécurité et les chaînes de fabrication continue (fabrication de semi-conducteurs, centres de calcul, cimenterie, ... etc.).

En fonction de la puissance nécessaire à l'installation et de la durée du creux ou de la coupure de tension, le choix se fait entre les différentes solutions techniques suivantes [1].

#### 2.3.2.5.1. Alimentation statique sans interruption (ASI)

Une ASI est constitué de trois éléments principaux [1]:

- Un redresseur-chargeur alimenté par le réseau, transforme la tension alternative en continue.
- Une batterie, qui fournit l'énergie à la charge par l'onduleur lors d'une coupure.
- Un onduleur qui transforme la tension continue en tension alternative.

Deux technologies sont couramment utilisées : On-line ou Offline.

##### 2.3.2.5.1.1. La technologie On-line

En fonctionnement normal, l'alimentation est délivrée en permanence par l'onduleur sans solliciter la batterie. C'est par exemple le cas des onduleurs Comet, Galaxy. Ils assurent la continuité (pas de délais de commutation) et la qualité (régulation de tension et de fréquence) de l'alimentation pour des charges sensibles de quelques centaines à plusieurs milliers de kVA [1].

En cas de surcharges, l'utilisation est alimentée par le contacteur statique (Fig. 2.2) à partir du réseau 2 (qui peut être confondu avec le réseau 1) [1].

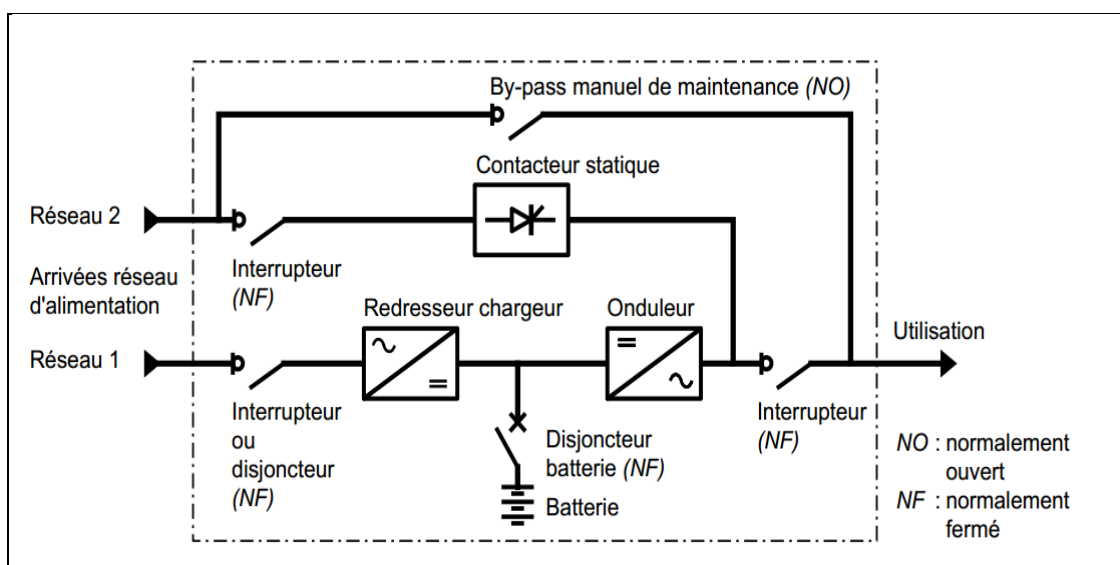


**Fig. 2.2** : Schéma de principe d'une alimentation sans interruption (ASI) On-line [1].

#### **2.3.2.5.1.2. La technologie Offline**

Elle est employée pour des applications qui ne dépassent pas quelques kVA. En fonctionnement normal, l'utilisation est alimentée par le réseau. En cas de perte du réseau ou lorsque la tension sort des tolérances prévues, l'utilisation est transférée sur l'onduleur. Cette commutation provoque une coupure de 2 à 10ms [1].

#### **2.3.2.5.2. La permutation de sources**

Un dispositif élabore les ordres de permutation de la source principale à une source de remplacement (et inversement) pour l'alimentation décharges prioritaires et si nécessaire d'émettre les ordres de délestage des charges non prioritaires.

Trois types de permutation existent selon la durée de transfert :

- A temps mort, si la durée de transfert est entre 0,2s à 30s ;
- Pseudo-synchrone, si la durée de transfert est entre 0,1s à 0,3 ;
- Synchrone, si la durée de transfert est nul.

Ces dispositifs imposent des considérations particulières, Par exemple lorsque l'installation se composer de plusieurs moteurs, leurs ré-accélérations simultanées conduits à une chute de tension qui peut empêcher le redémarrage ou conduire à des redémarrages trop longs avec des risques d'échauffement. Il est alors préférable de prévoir un automate qui réalise un redémarrage échelonné des moteurs prioritaires, particulièrement avec une source de remplacement de faible puissance de court-circuit [1].

#### **2.3.2.5.3. Groupe à temps zéro**

Dans certaines installations l'autonomie nécessaire en cas de coupure est telle qu'un groupe électrogène est installé (des batteries conduiraient à des coûts exagérée à des problèmes d'installation ou de réalisation technique). Cette solution permet, en cas de perte de l'alimentation, d'exécuter grâce à l'autonomie de la batterie, le démarrage du groupe électrogène, sa mise en vitesse, un éventuel délestage et un couplage sans coupure au moyen d'un inverseur de source automatique [1].

#### **2.3.2.5.4. Compensateurs électroniques**

Ces dispositifs électroniques évolué compensent dans une certaine mesure les creux de tension et les coupures avec un faible temps de réponse, par exemple le compensateur automatique en temps réel applique une compensation de la puissance réactive, il est spécialement adapté au cas des charges variant brièvement et de manière importante (soudeuses, presses, démarrages moteur...etc.) [1].

#### **2.3.2.6. L'arrêt propre**

Si un arrêt est admissible, l'impossibilité d'une remise en marche non contrôlée est particulièrement indiquée lorsqu'un redémarrage intempestif produire un risque pour l'opérateur sur

machine ou pour l'application nécessite de contrôler le redémarrage de la fabrication. Un redémarrage automatique du procédé peut être ensuite assuré par un automate selon une séquence de redémarrage préétablie quand les conditions sont redevenues normales [1].

### **2.3.3. Surintensité**

#### **2.3.3.1. Protection par fusible**

Le courant d'enclenchement, même limité, peut entraîner la détérioration des fusibles. Pour déterminer le calibre du fusible, il faut calculer la valeur crête du courant d'enclenchement, comme indiqué précédemment, et déterminer la constante de temps de ce courant transitoire. La méthode est assez compliquée. Elle est nécessaire de connaître la résistance du réseau amont et la résistance des fusibles. Il existe des logiciels permettant de déterminer le calibre des fusibles. En pratique, le calibre des fusibles est de 1,8 à 2,5 fois le courant nominal. La protection par fusible est efficace contre les courts-circuits sur le circuit de branchement de la batterie au réseau [27].

#### **2.3.3.2. Protection par disjoncteur**

Pour les industriels les conséquences des surintensités, conduit à des pannes qui provoquant par la suite une augmentation de coûts de production. L'installation de disjoncteur permet d'éviter ces coûts, aussi garantit la disponibilité de l'installation car le disjoncteur ne coupe que le courant de circuit concerné pour assurer la protection du circuit et de ses appareils contre tout dommage provient par le court circuit ou les surcharge.

#### **2.3.3.3. Protections intégrées aux variateurs**

##### **2.3.3.3.1. Protection de surcharge motrice**

Les variateurs modernes assurent la protection du moteur contre les surcharges, par une limitation instantanée du courant efficace à 1,5 fois le courant nominal environ. Cette protection assure simultanément la protection de surcharge de l'ensemble appareillage et câblage lorsqu'un départ n'alimente qu'un moteur et son variateur [28].

##### **2.3.3.3.2. Protection contre les courts-circuits moteurs ou ligne en aval du variateur**

En cas de court-circuit entre phases en sortie de variateur, la surintensité est détectée au sein du variateur et un ordre de blocage est envoyé très rapidement aux IGBT. Le courant de court-circuit (Fig. 2.3) est interrompu en quelques microsecondes, ce qui assure la protection du variateur. Ce courant très bref est essentiellement fourni par le condensateur de filtrage associé au redresseur, donc indiscernable dans la ligne d'alimentation [28].

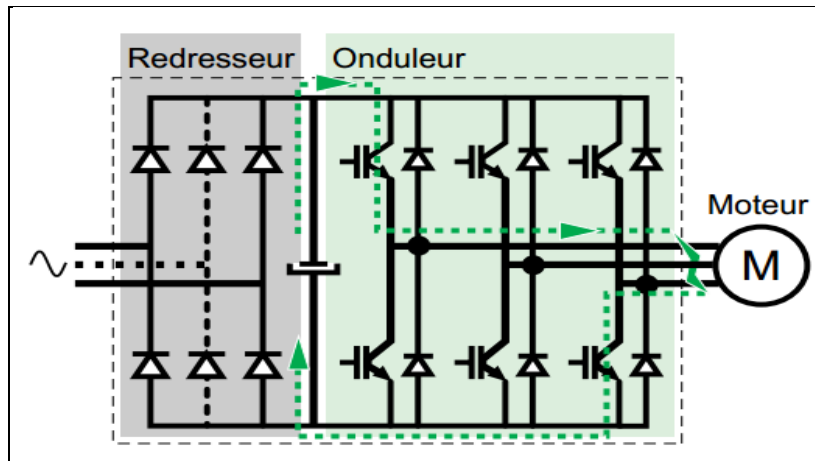


Fig. 2.3 : Court-circuit en aval du variateur [28].

### 2.3.4. Fluctuations de tension

Les solutions contre cette perturbation consistent à [29], [1] :

#### 2.3.4.1. Changer de mode d'éclairage

En choisissant les lampes fluorescentes ayant une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence.

#### 2.3.4.2. Installer une alimentation sans interruption

Cette alternative peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés.

#### 2.3.4.3. Modifier le perturbateur

Le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités.

#### 2.3.4.4. Modifier le réseau

- Augmenter la puissance de court circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point de l'alimentation ;
- Eloigner électriquement la charge perturbatrice des circuits d'éclairage en alimentant la charge perturbatrice par un transformateur indépendant.

#### 2.3.4.5. Utiliser un compensateur automatique

Cet équipement réalise une compensation en temps réel phase par phase de la puissance réactive. Le Flicker peut être réduit de 25% à 75%.

#### 2.3.4.6. Placer une réactance série

En réduisant le courant appelé, une réactance en aval du point de raccordement d'un four à arc peut réduire de 30% le taux de Flicker.

### **2.3.5. Déséquilibres**

Les solutions consistent à [1] :

- Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases ;
- Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles ;
- Prévoir une protection adaptée des machines ;
- Utiliser des réactances judicieusement raccordées (montage de Steinmetz).

### **2.3.6. Harmoniques**

Pour réduire les influences des harmonique, trois orientations sont possibles [1] :

#### **2.3.6.1. Réduction des courants harmoniques générés**

##### **2.3.6.1.1. Inductance de ligne**

Une inductance triphasée est placée en série avec l'alimentation (ou intégrée dans le bus continu pour les convertisseurs de fréquence). Elle réduit les harmoniques de courant de ligne (en particulier ceux de rang élevés) donc la valeur efficace du courant absorbé ainsi que la distorsion au point de raccordement du convertisseur. Il est possible de l'installer sans intervenir sur le générateur d'harmoniques et d'utiliser des inductances communes à plusieurs variateurs.

##### **2.3.6.1.2. Utilisation de redresseurs dodécaphasés**

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

##### **2.3.6.1.3. Appareils à prélèvement sinusoïdal**

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

#### **2.3.6.2. Modification de l'installation**

Les actions principales de modification sont:

- Utiliser des filtres pour immuniser les charges sensibles ;
- Augmenter la puissance de court-circuit de l'installation ;
- Déclasser les équipements ;
- Confiner les charges polluantes ;
- Protection et surdimensionnement des condensateurs.

Le raccordement des équipements sensibles aussi près que possible de leur source d'alimentation, c'est la première solution de procédure modification de l'installation contre les harmoniques. L'alimentation par des sources séparées ou par des transformateurs dédiés, sont aussi des solutions pour la séparation entre les charges polluantes et les charges sensibles, car cette séparation augmente la possibilité d'éviter l'effet des harmoniques.

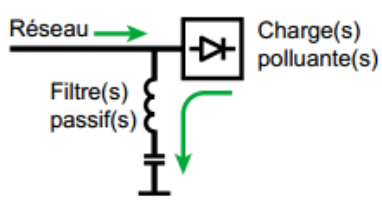
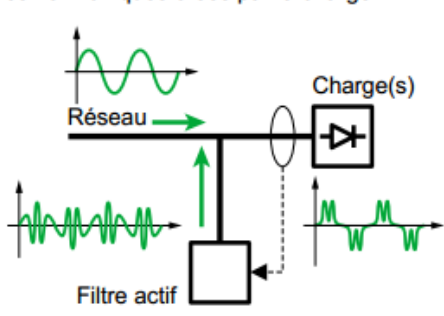
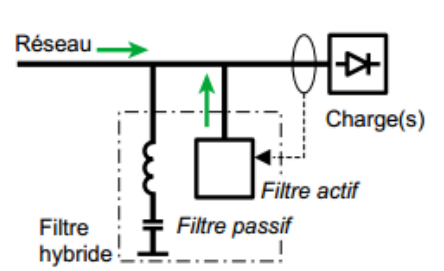
#### **2.3.6.3. Filtrage**

Parmi les solutions proposées comme des solutions efficaces de dépollution sont les filtres anciens (passifs) et modernes (actifs), aussi le filtre hybride ;

- Filtres passifs : Il consiste à réaliser grâce à l'agencement des composants passifs. Cet ensemble est placé en dérivation sur le réseau. Plusieurs filtres passifs en parallèle peuvent être nécessaires pour filtrer plusieurs composantes.
- Filtres actifs : Ils sont réalisés par des composants semi-conducteurs, comme les thyristors et les transistors. Il est possible de mettre en parallèle plusieurs filtres actifs.
- Le filtrage hybride : C'est l'association d'un filtre actif et d'un filtre passif accordé sur le rang de l'harmonique prépondérant et qui fournit l'énergie réactive nécessaire.

Le tableau (Table. 2.1) montre les principales caractéristiques de chaque'un de ces filtres :

**Table.2.1** : Principes et caractéristiques du filtrage passif, actif, hybride [1].

| Filtre         | Principe                                                                                                                                                                  | Caractéristiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Passif</b>  | <p>Dérivation par un circuit LC accordé sur chaque fréquence harmonique à éliminer.</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Pas de limites en courant harmonique.</li> <li>■ Compensation d'énergie réactive assurée.</li> <li>■ Elimination d'un ou plusieurs rangs harmoniques (habituellement : 5, 7, 11). Un filtre pour un ou deux rangs à compenser.</li> <li>■ Risque d'amplification des harmoniques en cas de modification du réseau.</li> <li>■ Risque de surcharge par pollution extérieure.</li> <li>■ Filtre « réseau » (global).</li> <li>■ Etude au cas par cas.</li> </ul>                       |
| <b>Actif</b>   | <p>Génération d'un courant annulant tous les harmoniques créés par la charge.</p>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Solution bien adaptée au filtrage « machine » (local)</li> <li>■ Filtrage sur une large bande de fréquence (élimination des harmoniques des rangs 2 à 25).</li> <li>■ Auto-adaptatif : <ul style="list-style-type: none"> <li>□ modification du réseau sans influence,</li> <li>□ s'adapte à toutes variations de charge et de spectre harmonique,</li> <li>□ solution évolutive et souple en fonction de chaque type de charge.</li> </ul> </li> <li>■ Etude simplifiée.</li> </ul> |
| <b>Hybride</b> |                                                                                        | <p>Cumule les avantages des solutions filtrage passif et actif et couvre un large domaine de puissance et de performances :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Filtrage sur une large bande de fréquences (élimination des harmoniques de rangs 2 à 25).</li> <li>■ Compensation d'énergie réactive.</li> <li>■ Grande capacité de filtrage en courant.</li> <li>■ Bonne solution technico-économique pour un filtrage « réseau ».</li> </ul>                                                                       |

## 2.4. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la présentation des effets des perturbations précédemment définis et les solutions techniques des ces perturbations interne qui peut entraver le fonctionnement normale des réseaux électriques, et cela se présente dans deux parties :

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté les conséquences des perturbations d'origine interne qu'on a définie dans le premier chapitre.

Dans la deuxième partie nous avons présenté les technologies de protection pour chaque genre de perturbation pour une meilleure sécurité des personnes et des biens.

# Chapitre 3 : Analyse des sources des perturbations d'origine interne.

## 3.1. Introduction

Afin de limiter le degré d'influence des perturbations sur les réseaux électriques il faut connaître toutes les phénomènes qui sont à l'origine de ces perturbations, ainsi les techniques d'analyse de chacune de ces perturbations.

Ce chapitre a pour but d'introduire, les notions élémentaires des phénomènes ou des défauts qui ont à l'origine de naissance des ces perturbations internes des réseaux électriques et pour voir comment ces phénomènes engendrent des défaillances sur les réseaux électriques en plus l'analyse de certaines des sources de ces perturbations internes.

## 3.2. Surtension

On peut classer les surtensions d'origine interne à deux types selon leur origine :

- Surtensions à fréquence industrielle ;
- Surtension de manœuvre.

### 3.2.1. Surtensions à fréquence industrielle

Les surtensions à fréquence industrielle sont regroupées les surtensions ayant des fréquences industrielles inférieures à 500 Hz, généralement 50, 60 et 400 Hz.

#### 3.2.1.1. Surtension provoquée par un défaut d'isolement

Ce défaut apparaît dans les réseaux triphasé si le neutre est isolé ou lié à la terre avec impédance (Fig. 3.1). On appelle facteur de défaut à la terre ( $S_d$ ) le rapport entre la tension efficace la plus élevée entre les phases saines et la terre en présence du défaut et la tension efficace entre phase et terre en l'absence de défaut à l'emplacement considéré.

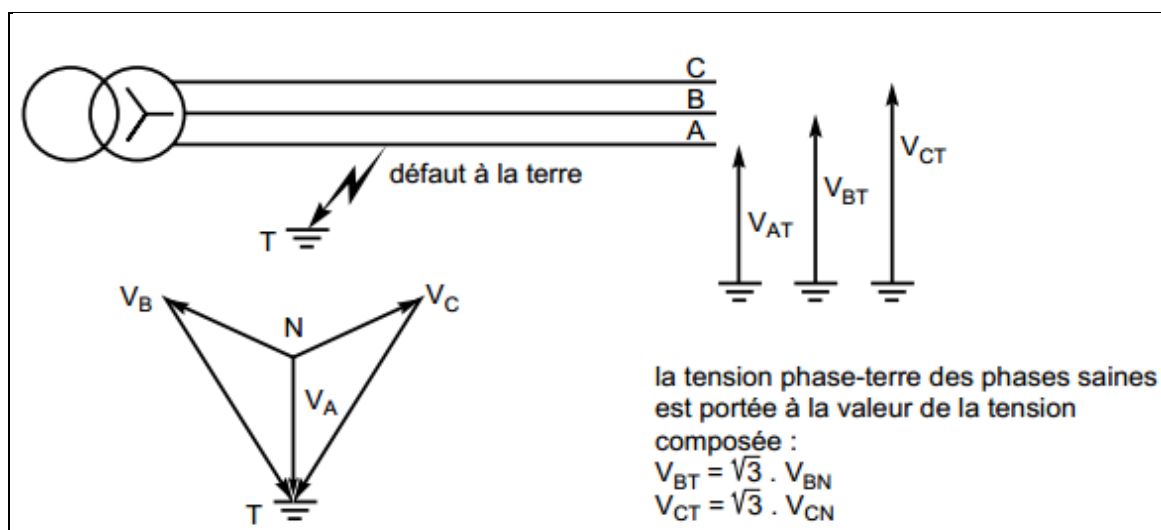


**Fig. 3.1 :** Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé, avec un défaut d'isolement [20].

Lors d'un défaut d'isolement sur la phase A, le facteur  $S_{DD}$  de défaut à la terre est indiqué par le rapport de la tension des phases B et C par rapport à la terre, à la tension simple du réseau [20].

$$S_d = \frac{\sqrt{3(K^2 + K + 1)}}{K + 2} \quad (3.1)$$

Avec :  $K = X_0/X_d$

$X_d$  est la réactance directe du réseau vu du point de défaut, et  $X_0$  est la réactance homopolaire.

En générale :  $X_0 \leq 3X_d$  ;  $S_d \leq 1.25$

#### **3.2.1.2. Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti)**

Une surtension peut se produire lorsqu'une ligne longue est alimentée à l'une de ses extrémités et non chargée à l'autre. Elle est due à un phénomène de résonance qui se manifeste par une onde de tension à croissance linéaire le long de la ligne. Le facteur de surtension est égal à:

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - \frac{1 \cdot L \cdot C \cdot \omega^2}{2}} \quad (3.2)$$

Avec :

- L et C représentant respectivement l'inductance et la capacité totale de la ligne.
- $U_s$  et  $U_e$  étant les tensions à l'extrémité ouverte et à l'entrée de la ligne respectivement.

Ce facteur est de l'ordre de 1,05 pour une ligne de 300km et de 1,16 pour une ligne de 500km [20].

#### **3.2.1.3. Surtension par ferorésonance**

La surtension peut être le résultat d'une résonance particulière qui se produit lorsqu'un circuit comporte tout à la fois un condensateur volontaire ou parasite et une self avec circuit magnétique saturable comme un transformateur. Cette résonance peut apparaître surtout lorsqu'une manœuvre est réalisée sur le réseau avec un appareil dont les pôles sont séparés ou à fonctionnement non simultané. Ces surtensions font apparaître un risque de claquage diélectrique, ainsi qu'un danger pour les éventuels récepteurs. Généralement n'endommager que les matériels fragiles [20].

#### **3.2.1.4. Surtension due à l'alimentation d'une charge capacitive au travers d'une inductance élevée**

C'est le cas, par exemple, d'une ligne aérienne alimenté par un ensemble des centrales de puissance limitée au encore l'enclenchement de transformateurs ayant une forte charge capacitive, comme une capacité shunt. Ce phénomène surtout sensible réseaux THT.

#### **3.2.1.5. Surtension due à un déclenchement brusque**

##### **3.2.1.5.1. Déclenchement d'un alternateur**

Dans ce cas, la chute de tension interne des alternateurs et de leurs transformateurs disparaît, et la tension fixée se rapproche de la force électromotrice interne des alternateurs. Or, en raison de la

grande valeur de la réactance synchrone de ces derniers, cette force électromotrice est notablement plus élevée que la tension aux bornes en régime normal.

L'élévation de vitesse des alternateurs ainsi à vide peut amplifier la surélévation de tension. Celle-ci disparaît souvent plus ou moins rapidement, en fonction de l'action des régulateurs de tension et de vitesse des alternateurs. La surélévation de tension peut facilement excéder un facteur de 1,4.

### 3.2.1.5.2. Déclenchement d'une machine asynchrone

L'énergie magnétique emmagasinée principalement dans l'entrefer d'une machine asynchrone, doit se dissiper sous une forme ou sous une autre lors d'un déclenchement, cette dernière peut conduire à des surtensions dangereuses si le rotor est ouvert ou fermé sur une grande résistance additionnelle.

### 3.2.2. Surtension de manœuvre

La manœuvre dans les réseaux électriques peut conduire à l'apparition des phénomènes transitoires, tels que des surtensions qui sont agressives si le courant interrompu est inductif ou capacitif.

#### 3.2.2.1. Surtension de commutation en charge normale

Une charge normale est principalement résistive, c-à-d que son facteur de puissance est supérieur à 0,7. Dans ce cas, la commutation des courants de charge ne dérange pas. Le rapport de l'amplitude de la tension transitoire et de la tension de service fluctue entre 1,2 et 1,5 [20].

#### 3.2.2.2. Surtension provoquée par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs

Ce type a trois phénomènes engendrés : L'arrachement du courant, réamorçage et le préamorçage [20].

La figure (Fig. 3.2) montre un réseau alimentant une charge à travers un disjoncteur. C'est un circuit équivalent pour l'étude d'interruption de courants inductifs tel que :

- $C_{p1}$  et  $L_{p1}$  sont respectivement capacité et inductance du disjoncteur  $D$  ;
- $L_1$  et  $C_1$  sont respectivement capacité et inductance de source de tension ;
- $L_2$  est représenté la partie inductive de la charge et  $C_2$  c'est la capacité de cette charge ;
- $L_0$  est une inductance de ligne généralement négligeable.

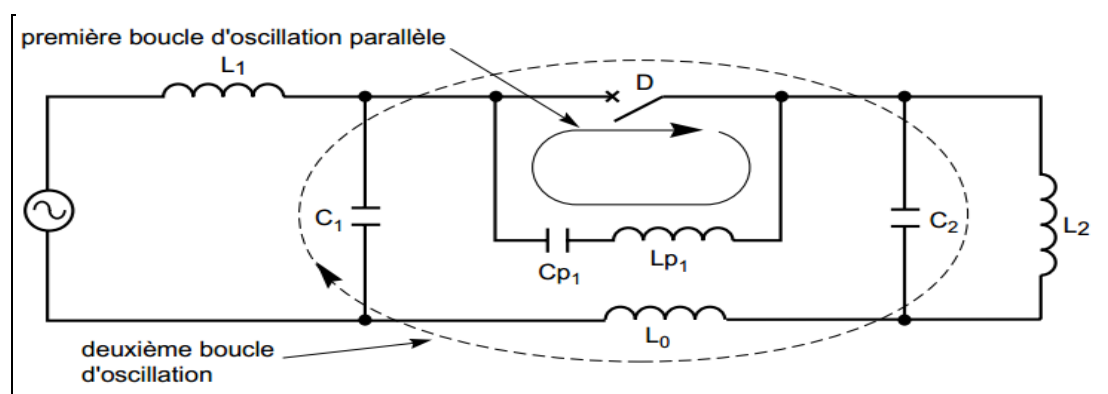


Fig. 3.2 : Circuit équivalent pour l'étude d'interruption de courants inductifs [20].

### 3.2.2.2.1. Surtension associée à une coupure idéale

Même dans la coupure parfaite d'un circuit inductif par un disjoncteur idéal, un certain niveau de surtension est inhérent à l'interruption du courant. En effet, les valeurs de tension aux bornes des différents éléments du circuit doivent atteindre un nouvel état d'équilibre correspondant à l'état ouvert. Cette transition d'état entraîne des oscillations autour du nouvel équilibre et produit des surtensions par rapport à la tension maximale normale du réseau.

Un régime transitoire générateur de surtensions en plus mis en jeu si la coupure est réalisée dans un circuit triphasé, car la coupure ne soit pas simultanée sur les trois phases.

### 3.2.2.2.2. Arrachement du courant

Lors de la coupure de courants de faibles valeurs, l'arc qui apparaît occupe un faible volume. Il est soumis à un refroidissement important lié à la capacité du disjoncteur à interrompre des courants très supérieurs. De ce fait, il devient instable et sa tension peut présenter des variations importantes, alors que sa valeur absolue reste très inférieure à la tension du réseau (cas du SF<sub>6</sub> ou du vide). Ces variations de f.é.m. peuvent générer dans les capacités proches, parasites ou volontaires, des courants oscillatoires (Fig. 3.2) dont la fréquence est élevée, l'amplitude de ces courants peut devenir non négligeable devant le courant 50 Hz et atteindre 10 % de sa valeur. La superposition du courant 50 Hz et de cette courante haute fréquence dans le disjoncteur va entraîner l'existence de plusieurs passages à zéro du courant, au voisinage du zéro de l'onde fondamentale (Fig. 3.3).

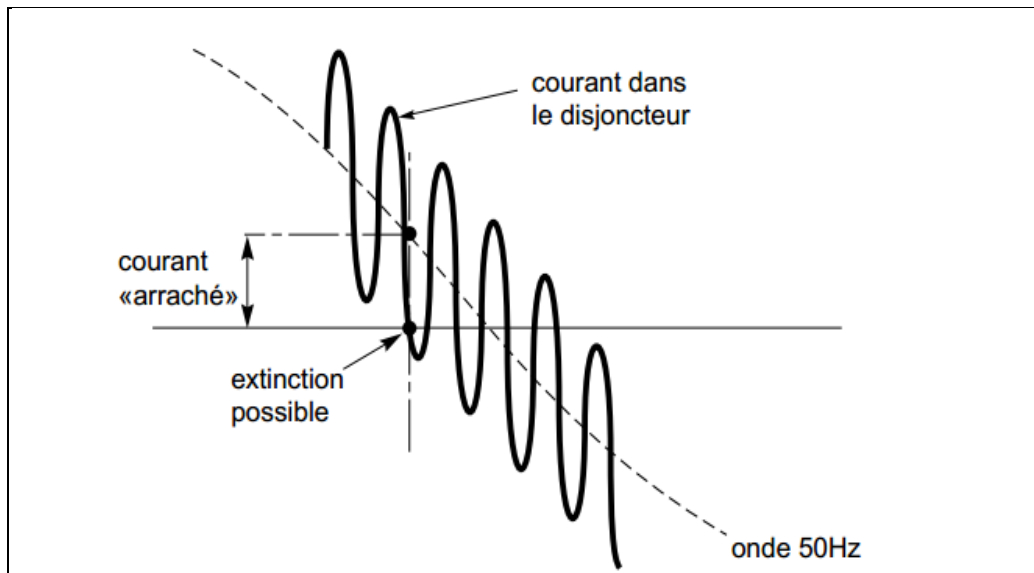


**Fig. 3.3 :** Superposition d'un courant à fréquence élevée au courant à fréquence industrielle [20].

Le disjoncteur, peu sollicité par ces courants de faibles valeurs, est souvent capable de couper au premier zéro de courant. A cet instant, les courants dans les circuits du générateur et de la charge ne sont pas nuls. La valeur instantanée courant de 50 Hz lors de l'extinction de l'arc est dite courant arraché. Selon la nature des impédances mises en jeu, l'énergie piégée dans le circuit diffère [30].

### **3.2.2.2.3. Phénomènes transitoires de réamorçage**

Il survient lorsque le phénomène d'arrachement a fait apparaître aux bornes du disjoncteur une surtension différentielle que celui-ci n'a pas pu supporter, un arc se produit alors. Cette explication grossière est compliquée par la présence des éléments parasites. Apparaissent alors des réamorçages multiples (Hachage), jusqu'à ce que l'écartement des contacts, qui va croissant, les rende impossibles. Ils sont caractérisés par des trains d'onde haute fréquence d'amplitude croissante. Ces trains des surtensions en amont et en aval du disjoncteur peuvent donc être très dangereux pour les matériels comportant des bobinages. Il convient de ne pas confondre avec ce qui est appelé le rallumage qui correspond à la réapparition d'une onde de courant à fréquence industrielle et donc à un échec de la coupure sur le zéro de l'onde de courant. [20], [30].

### **3.2.2.2.4. Préamorçage**

Lors de la fermeture d'un appareil de commutation il arrive un instant où la tenue diélectrique entre contacts devient inférieure à la tension appliquée. Pour les appareils à fermeture rapide, par rapport au 50 Hz, le comportement est fonction de l'angle de phase lors de la manœuvre. Un arc s'établit alors entre les contacts et le circuit voit une impulsion de tension correspondant à l'annulation brutale de la tension aux bornes de l'appareil. Cette impulsion peut entraîner l'oscillation des circuits parallèles existants (décharge oscillante des capacités parasites) ainsi que des réflexions sur des ruptures d'impédance, et donc l'apparition de courants de fréquence élevée, par rapport au 50 Hz à travers l'arc. Les surtensions de préamorçage affectent particulièrement, en HT ou MT, les transformateurs à vide lors de leur mise sous tension, et les moteurs au démarrage.

### **3.2.2.3. Surtension provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs**

Les circuits capacitifs, sont des circuits constitués des batteries de condensateurs ou des lignes à vide.

#### **3.2.2.3.1. Surtension provoquée par l'enclenchement d'une batterie de condensateur**

L'enclenchement de batteries de condensateurs provoque un courant transitoire élevé. Son amplitude et sa fréquence dépendent de nombre de batterie de condensateurs et des caractéristiques du réseau amont qui considéré comme une inductance pure  $L_a$  telle que :

$$L_a \omega = \frac{U_n^2}{S_{cc}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{cc}} \quad (3.3)$$

- $S_C$  : Puissance de court-circuit au point de raccordement du condensateur ;
- $U_n$  : Tension composée nominale ;
- $C_c$  : Courant de court-circuit triphasé symétrique au point de raccordement du condensateur ;
- $\omega$  : Pulsation du réseau ( $2\pi \times 50$ ).

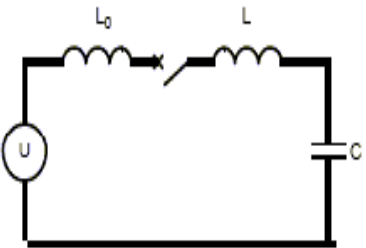
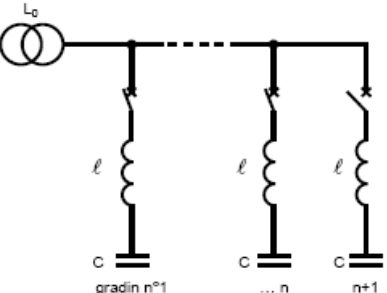
La liaison reliant l'appareil de coupure à la batterie de condensateurs est considérée comme une inductance pure, généralement de valeur 0.5µH/m. Notons que négliger les résistances devant les inductances est justifié par la valeur très élevée de la fréquence des courants transitoires.

Le tableau (Table. 3.1) montre les valeurs des surtensions, le schéma équivalent et la valeur crête maximale du courant d'enclenchement, dans les cas de batterie fixe et le cas de batterie en gradins.

Avec :

- C : Capacité de batterie de condensateur (Capacité équivalent en cas de batterie en gradins) ;
- $S_A$  et  $S_B$  : Surtensions amont et aval respectivement ;
- L : Inductance de la liaison reliant l'appareil de coupure à la batterie de condensateurs (Inductance équivalent en cas de batterie en gradins) ;
- $\hat{I}_e$  : Valeur crête maximale de courant d'enclenchement.

**Table. 3.1** : Définitions, schéma équivalent et valeur crête maximale du courant d'enclenchement.

| Type de batterie    | Définitions                                                                                          | Schéma équivalent                                                                   | La valeur crête maximale du courant d'enclenchement                   | Surtensions amont et aval                             |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Batterie fixe       | Ensemble condensateurs unitaire raccordés de façon à être commandes par un même appareil de coupure. |   | $\hat{I}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} U_n \sqrt{\frac{C}{L_a + L}}$         | $S_A = S_B = 2$ pu.                                   |
| Batterie en gradins | Association de plusieurs batteries, chaque gradin est commandé séparément.                           |  | $\hat{I}_e = \sqrt{\frac{2}{3}} U_n \frac{n}{n+1} \sqrt{\frac{C}{L}}$ | $S_A = n+2$ / $n+1$ pu.<br><br>$S_B = 2n$ / $n+1$ pu. |

La forme d'onde de tension des deux coté et le courant de condensateur dans le cas de batterie fixe ainsi dans le cas de batterie en gradins sont illustrés dans la figure (Fig. 3.4) :

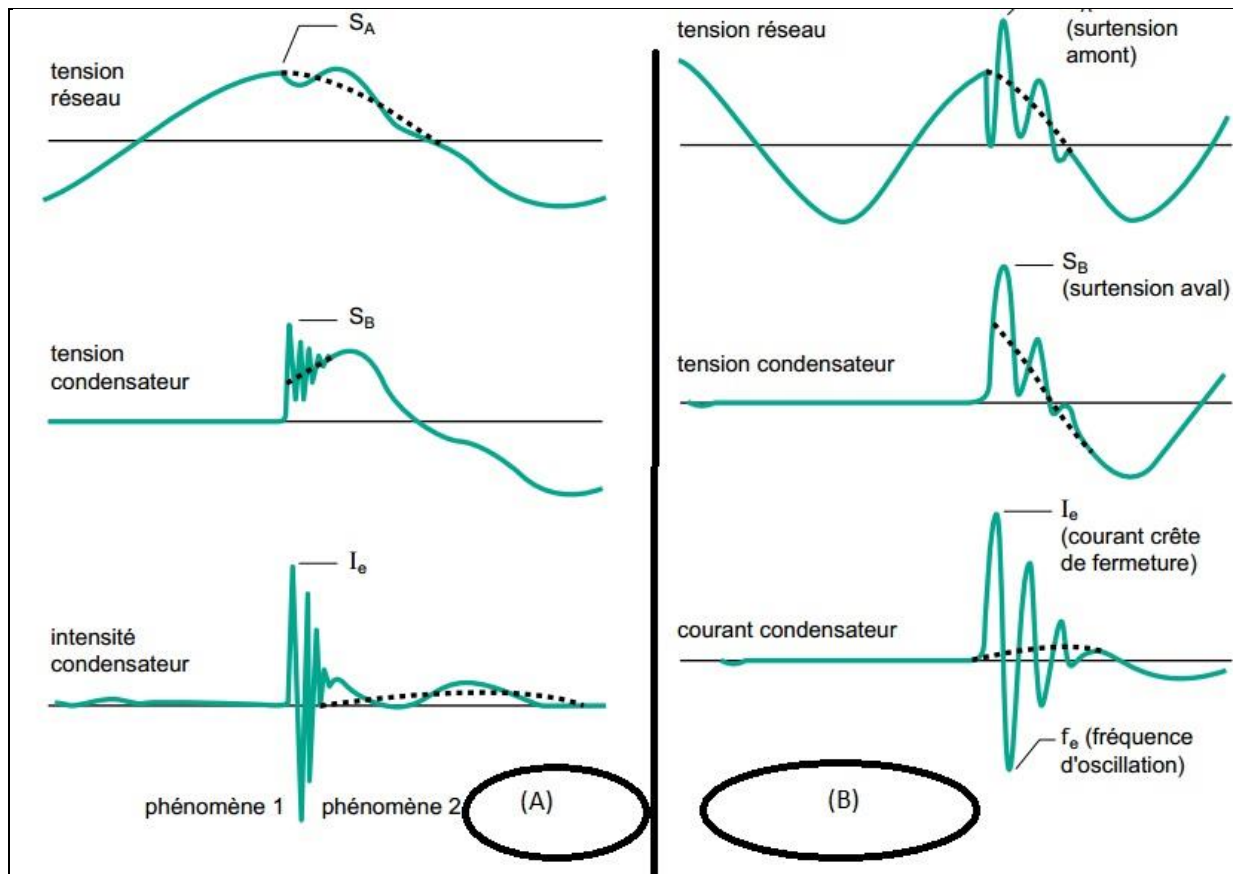


**Fig. 3.4 :** Courant et tensions du couplage au réseau d'une batterie en gradins (A), fixe (B) [27].

Ces surtensions, habituellement ne posent pas de problèmes, tous les composants étant capables de tenir ce niveau (deux fois la valeur crête de tension de réseau). Par contre les surintensités nécessitent couramment de définir des moyens appropriés pour éviter d'endommager les dispositifs.

### 3.2.2.3.2. Surtension due à l'enclenchement ou au ré-enclenchement d'une ligne à vide

Ce type de surtension apparaît lors de :

- L'enclenchement d'une ligne : Dans ce cas les surtensions de manœuvre sont principalement dues aux phénomènes de réflexion d'onde ;
- La ré-enclenchement de la ligne à la suite d'une ouverture sur défaut : Dans ce cas des phénomènes dus aux charges résiduelles de la ligne peuvent augmenter ces phénomènes de réflexion.

Les surtensions dues à l'enclenchement présentent une grande importance pour le choix de l'isolement du réseau THT, pour les autres réseaux (HT et MT), sauf cas particulier, ces surtensions présente moins d'importance [30].

### 3.3. Creux de tension et coupures brèves

Le creux de tension est défini comme une diminution de la tension efficace de 0,1 à 0,9 par unité (pu), pour une durée de 0,5 cycle à 1 minute. Le creux de tension est causé par des défauts sur le système, la mise sous tension du transformateur ou la commutation de charges lourdes.

Les réseaux publics et les installations de l'usage perturbé sont les sièges de ces phénomènes.

### 3.3.1. Réseau d'alimentation public

Les causes des creux de tension dans ce cas sont de nature accidentelle elles résultent de court-circuit. Il se produit des chutes de tension, autour du point origine du défaut, avant la mise hors services de l'élément défectueux par les protections, celles-ci ont des comportements différents, dans le cas des lignes aériens, les arcs peuvent souvent, être éliminés par des coupures de tension de faible durée, par des automatismes tels que des réenclenchement limitant la durée de la coupure.

L'exploitation de réseaux utilise des systèmes de protection, associés à des automatismes, pour atténuer, les répercussions des défauts sur le réseau aérien et sur les installations des usages.

### 3.3.2. Installation de l'utilisateur perturbé (Cas d'enclenchement d'un transformateur)

Un usager peut être créé des creux de tension dans sa propre installation, en l'absence de toute perturbation en provenance du réseau. Ces creux de tension proviennent soit de court-circuit internes avant la mise hors tension des éléments concernés par ces défauts, soit du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante, soit encore d'utilisation d'appareils à courant élevé au démarrage. On s'intéresse dans cette dernière et on prend le cas de la mise sous tension du transformateur.

La principale raison de l'activation du transformateur est le sur-fluxage du circuit magnétique du transformateur qui provoque la saturation. Parfois, pour des creux de tension de longue durée, plus de transformateurs sont entraînés dans la saturation. C'est ce qu'on appelle l'interaction sympathique.

Les causes des creux de tension dus à la mise sous tension du transformateur sont [31] :

- Fonctionnement normal du système, qui comprend l'alimentation manuellement d'un transformateur ;
- Actions de ré-enclenchement.

Les creux de tension sont de nature asymétrique, souvent représentés comme une chute soudaine de la tension du système suivie d'une lente récupération.

Le creux de tension peut être représenté par fonction sinusoïdale et profil de tension efficace comme montre dans la figure (Fig. 3.5).

Un creux de tension peut être représenté à l'aide d'une fonction définie par parties, basée sur son plus important caractéristiques comme :

$$V(t) = \begin{cases} V_{max} \times \sin(\omega t) & ; sit < t_1 \\ V_{creu.max} \times \sin(\omega t + \phi) & ; sit_1 < t < t_2 \\ V_{max} \times \sin(\omega t) & ; sit > t_2 \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec :

- $V_{MAX}$  : Amplitude d'onde de tension avant le creux ;

- $\omega$  : Pulsation de tension ;
- $V_{creu.max}$  : Amplitude d'onde de tension durant le creux ;
- $\emptyset$  : Saut d'angle de phase ;
- $t_1$  : Moment de l'initiation de creux ;
- $t_2$  : Temps de récupération de tension.

La valeur efficace  $V_{rms}$  est calculée à partir de la tension d'onde sinusoïdale avec [32] :

$$V_{rms} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (V_i^2) \quad (3.5)$$

Avec :

- $N$  : Le nombre d'échantillons par cycle.
- $V_i$  : Tensions échantillonnées dans le domaine temporel.

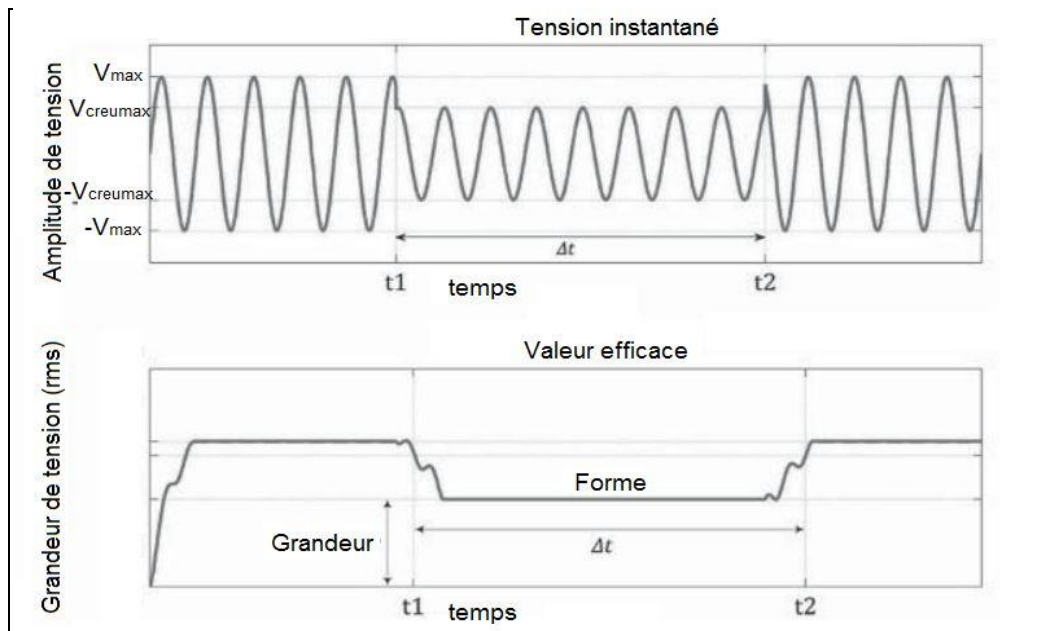


Fig. 3.5 :Caractéristiques des creux, et profil de tension.

### 3.4. Surintensité

Il existe deux causes principales de surintensité qui sont les surcharges et les courts-circuits.

#### 3.4.1. Surcharge

Elles peuvent se produire en particulier lors de la mise sous tension des moteurs, transformateurs et appareils divers. La pointe de courant caractérisée par une courte durée et n'est généralement pas dangereuse, sauf quand le travail demandé aux machines est exagéré. Et si ces surcharges sont prolongées elle déterminent un échauffement dangereux des équipements.

#### 3.4.2. Courts-circuits

L'origine des courts-circuits peut être mécanique, par exemple (une liaison électrique entre deux conducteurs par un corps étranger), électrique, suite à la dégradation de l'isolement entre phase ou

entre phase et la masse ou la terre, suite à des surtensions d'origine interne ou atmosphérique. Les courts-circuits peuvent être aussi à l'origine d'une erreur d'exploitation.

### 3.4.2.1. Courants de court-circuit

Dans le cas d'un court-circuit, lorsque le courant passe par zéro, la tension du réseau est à son maximum ou presque à cause de déphasage important entre la tension et le courant.

L'intensité du courant d'une période transitoire est la somme de deux composantes (Fig. 3.6) :

- Composante symétrique ou périodique  $I_a$  : Créée par la source alternative d'alimentation.
- Composante asymétrique apériodique  $I_c$  : Créée par l'énergie emmagasinée dans l'inductance au moment du court-circuit. Sa valeur à cet instant égal et opposée à celle de la composante symétrique, elle décroît avec une constante de temps ( $L/R$ ).

On a les expressions suivantes :

$$I_a = I_{max} * \sin(w * t + q) \quad (3.6)$$

$$I_c = - I_{max} * \sin(q) * e^{\frac{-t}{L/R}} \quad (3.7)$$

Avec :  $q$  est l'angle de décalage entre l'instant initial du défaut et l'origine de l'onde de courant.

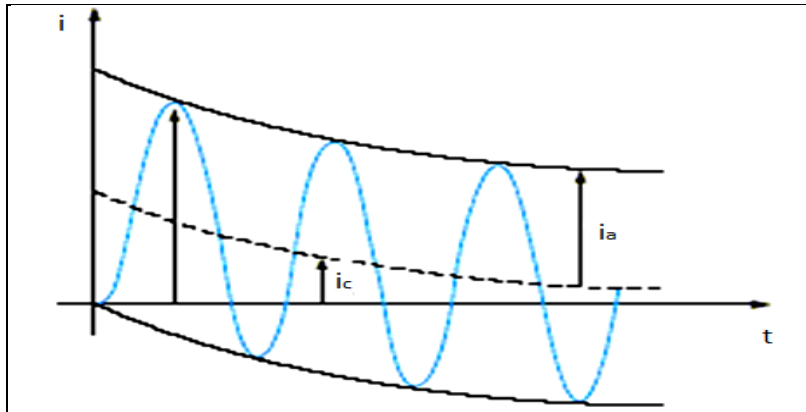


Fig. 3.6 : Forme d'onde de courant de court-circuit.

Nous allons étudier le cas de court-circuit aux bornes d'un transformateur:

### 3.4.2.2. Etablissement du court-circuit aux bornes d'un transformateur

Lors d'un court-circuit survenant directement aux bornes, le transformateur se comporte comme une impédance de module [33] :  $Z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}$  ; Et d'argument :  $\varphi_{cc} = \arctg X_{cc}/R_{cc}$ .

En l'absence de saturation des circuits de fuite, l'inductance de court-circuit  $L_{CD}$  est constante et l'équation du régime transitoire, lors d'un court-circuit brusque au secondaire, s'écrit [33] :

$$u_1(t) = \sqrt{2}U_1 \sin(\omega t + \alpha) = R_{cc}i_{cc} + L_{cc} \frac{di_{cc}}{dt} \quad (3.8)$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$i_{cc} = i_{ccperm} + i_{cctrans} \quad (3.9)$$

Où :  $i_{ccperm}$  est la composante permanente et  $i_{cctrans}$  est la composante transitoire,  $i_{cc}$  correspondent à la solution de l'équation sans second membre, s'écrit par [33] :

$$i_{cc}(t) = \frac{\sqrt{2}U_1}{Z_{cc}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) + C \exp\left(-\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t\right) \quad (3.10)$$

Compte tenu des conditions initiales, on obtient pour C la valeur :

$$C = -\frac{\sqrt{2}U_1}{Z_{cc}} \sin(\alpha - \varphi_{cc}) \quad (3.11)$$

De sorte que l'équation du courant de court-circuit instantané s'écrit :

$$i_{cc} = \frac{\sqrt{2}U_1}{Z_{cc}} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{cc}) - \sin(\alpha - \varphi_{cc}) \exp\left(-\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t\right) \right] \quad (3.12)$$

L'instant d'enclenchement le plus défavorable correspond à  $\alpha=0$ , c-a-d où passage par zéro de tension  $u_1$ . On a dans ce cas :

$$i_{cc(\alpha=0)} = \frac{\sqrt{2}U_1}{Z_{cc}} \left[ \sin(\omega t - \varphi_{cc}) + \sin(\varphi_{cc}) \exp\left(-\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t\right) \right] \quad (3.13)$$

Dans les transformateur de très grand puissance,  $\varphi_{cc}$  est voisin de  $\pi/2$  ( $R_{cc} \ll X_{cc}$ ), de sorte que la relation précédente devient :

$$i_{cc(\alpha=0)} = -\frac{\sqrt{2}U_1}{Z_{cc}} \left[ \cos \omega t - \exp\left(-\frac{R_{cc}}{L_{cc}} t\right) \right] \quad (3.14)$$

Si  $R_{cc}$  est négligeable devant  $L_{cc}\omega$ , le terme exponentielle de l'équation (3.14), après un demi période, reste voisin de l'unité, de sorte que :

$$i_{ccmax} \cong \frac{2\sqrt{2}U_1}{Z_{cc}} = \frac{2\sqrt{2}I_n}{u_{cc}} \cdot 100 \quad (3.15)$$

Dans la réalité, le court-circuit brusque s'amortit avec la constante de temps en court-circuit  $\tau_{cc}$  :

$$\tau_{cc} = \frac{L_{cc}}{R_{cc}} \quad (3.16)$$

La figure (Fig. 3.7) montre le courant de court-circuit brusque pour un enclenchement à l'instant la plus défavorable ( $\alpha=0$ ).

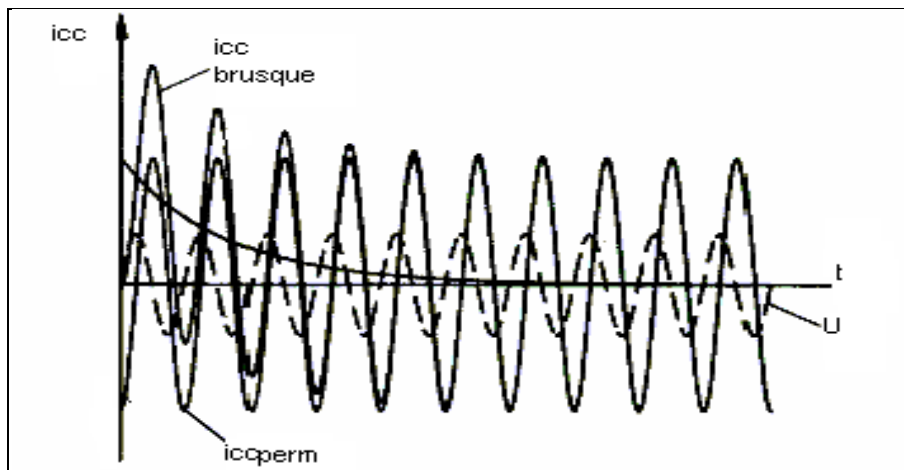


**Fig. 3.7 :** Courant de court-circuit brusque de transformateur avec  $u=0$  à  $t=0$ , ( $\alpha=0$ ) [33].

### 3.5. Fluctuations de tension

#### 3.5.1. Fluctuations de tension à l'origine du Flicker

On distingue deux cas de fluctuation de tension suivants [35] :

##### 3.5.1.1. Variations de tension rapides et périodiques

Ces variations périodiques ou erratiques permanentes ont une décomposition spectrale dans une bande de 0,5 Hz à 25 Hz. Elles sont dues à des charges dont l'utilisation se caractérise par une variation permanente d'appel de puissance par exemple les fours à arc, machines à souder, ...etc.

##### 3.5.1.2. Variations de tension par à-coups

Il s'agit ici des à-coups de tension se produisant de façon systématique ou erratique c-a-d intervalles entre à-coups supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues à des mises en service de charges importantes par exemple démarrage moteur, manœuvre de batterie de compensation, ...etc.

#### 3.5.2. Explication mathématique de l'origine du Flicker

Les sources de ces fluctuations sont les équipements électriques dont le fonctionnement nécessite d'importantes variations cycliques de courant qui, parcourant l'impédance du réseau ( $R, X$ ), provoquent les variations de tension  $\Delta U$  (Fig. 3.8).

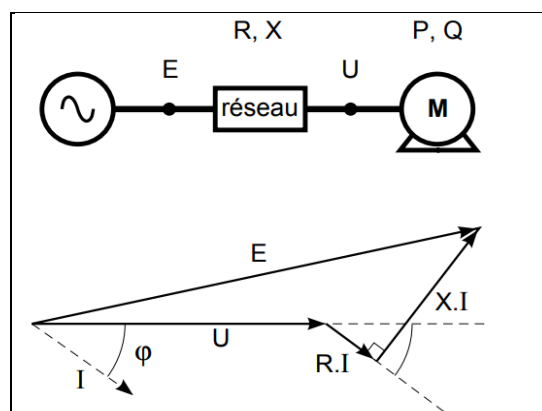


**Fig. 3.8 :** Les variations du courant  $I$  parcourant l'impédance du réseau ( $R, X$ ) [35].

Si on considère que l'angle entre E et U est faible [35] :

$$\Delta U = E - U \approx R.I.\cos \varphi + X.I.\sin \varphi \quad (3.17)$$

Alors :

$$\Delta U = \frac{RP + XQ}{U} \quad (3.18)$$

En HT, la résistance R est négligeable par rapport à l'impédance X, l'équation se transforme en :

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{XQ}{U^2} = \frac{Q}{S_{cc}} \quad (3.19)$$

C'est la variation de la puissance réactive qui est prépondérante et doit donc être contrôlée, contrairement en BT, R n'est pas négligeable, il faut alors agir sur les puissances active et réactive [35].

### 3.6. Déséquilibres

Le déséquilibre du circuit triphasé se fait par trois manières :

- Circuit triphasé déséquilibré par court-circuit aux niveaux de la charge, ou une répartition défavorable des charges monophasées sur les réseaux triphasés (Charges déséquilibré).
- Circuit triphasé déséquilibré par court-circuit à la source ou dans un transformateur (Source déséquilibré).
- Combinaison de source et charge déséquilibré.

Il existe deux méthodes pour résoudre les circuits déséquilibrés:

- Utilisation des lois relatives aux circuits électriques comme les lois de Kirchhoff (KCL/KVL).
- Méthodes des composantes symétriques.

On va étudier la première méthode qui est la méthode de calcul des régimes déséquilibrés par l'utilisation des lois Kirchhoff.

#### 3.6.1. Analyse de circuit déséquilibré dans le cas d'un circuit sans neutre

Pour cette méthode de calcul des régimes déséquilibrés on utilise un simple circuit triphasé sans neutre, montré dans la figure (Fig. 3.9). Dans ce cas,  $V_N - V_n \neq 0$ .

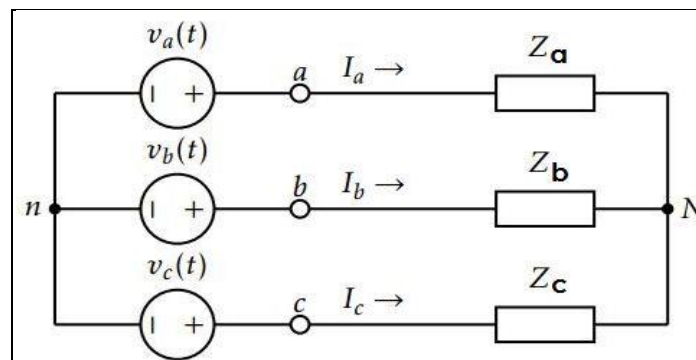


Fig. 3.9 : Circuit triphasé en connexion (étoile – étoile) sans neutre.

Habituellement, les tensions  $V_a$ ,  $V_b$ , et  $V_c$  ainsi que les impédances  $Z_a$ ,  $Z_b$ , et  $Z_c$ , sont connait. Il faut trois équations pour calculer les trois inconnues des courants  $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$ .

On utilise la loi des mailles (KVL) dans la maille supérieure, on trouve :

$$-V_a = Z_a \times I_a - Z_b \times I_b + V_b = 0 \quad (3.20)$$

$$Z_a \times I_a - Z_b \times I_b = V_a - V_b \quad (3.21)$$

On applique (KVL) dans la maille inférieure :

$$-V_b + Z_b \times I_b - Z_c \times I_c + V_c = 0 \quad (3.22)$$

$$Z_b \times I_b - Z_c \times I_c = V_b - V_c = 0 \quad (3.23)$$

On applique ensuite la loi du nœud (KLC) au nœud N, on trouve :

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (3.24)$$

Ensuite, on combinant entre les équations(3.20), (3.21) et (3.22) pour obtenir  $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$  :

$$I_a = \frac{Z_c \times (V_a - V_b) + Z_b \times (V_a - V_c)}{Z_a \times Z_b + Z_c \times Z_b + Z_c \times Z_a} \quad (3.25)$$

$$I_b = \frac{Z_a \times (V_a - V_c) - (Z_a + Z_c) \times (V_a - V_b)}{Z_a \times Z_b + Z_c \times Z_b + Z_c \times Z_a} \quad (3.26)$$

$$I_c = -(I_a + I_b) \quad (3.27)$$

Donc, on peut trouver dans ce cas les courants à l'aide de la méthode des lois de Kirchhoff.

### 3.6.2. Analyse de circuit déséquilibré dans le cas d'un circuit avec neutre

On utilise dans ce cas un circuit triphasé avec le neutre, montré dans la figure (Fig. 3.10), dans ce cas,  $I_n = I_a + I_b + I_c \neq 0$ .

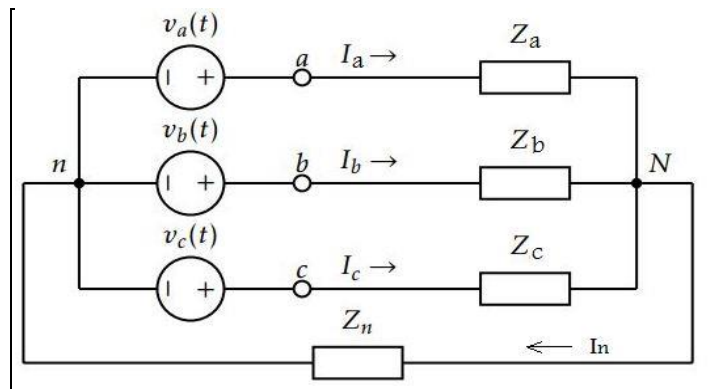


**Fig. 3.10 :** Circuit triphasé en connexion (étoile – étoile) avec le neutre.

Pour calculer  $I_a$ . On prend la maille (n-a-N) on trouve :

$$V_a = Z_a \times I_a + V_{nN} \quad (3.28)$$

Alors :

$$I_a = \frac{V_a - V_{nN}}{Z_a} \quad (3.29)$$

Pour calculer  $I_a$ . On prend la maille (n-b-N) on trouve :

$$V_b = Z_b \times I_b + V_{nN} \quad (3.30)$$

Alors :

$$I_b = \frac{V_b - V_{nN}}{Z_b} \quad (3.31)$$

Pour calculer  $I_a$ . On prend la maille (n-c-N) on trouve :

$$V_c = Z_c \times I_c + V_{nN} \quad (3.32)$$

Alors :

$$I_c = \frac{V_c - V_{nN}}{Z_c} \quad (3.33)$$

On applique ensuite la loi du nœud (KLC) au nœud N, on trouve :

$$I_n = I_N = I_a \times I_b + I_c \quad (3.34)$$

Ensuite, on combine entre les équations (3.28), (3.29) et (3.31). On obtient :

$$\frac{V_{nN}}{Z_n} = \frac{V_a - V_{nN}}{Z_a} = \frac{V_b - V_{nN}}{Z_b} = \frac{V_c - V_{nN}}{Z_c} \quad (3.35)$$

Ce qui donne :

$$V_{nN} = \left( \frac{V_a}{Z_a} + \frac{V_b}{Z_b} + \frac{V_c}{Z_c} \right) \times \left( \frac{1}{Z_a} + \frac{1}{Z_b} + \frac{1}{Z_c} + \frac{1}{Z_n} \right)^{-1} \quad (3.36)$$

Alors, On peut calculer ce genre de circuits par l'utilisation de la méthode de lois de Kirchhoff.

### 3.7. Harmoniques

#### 3.7.1. Dégradation de la tension

L'origine principale des harmoniques c'est les charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente (Fig. 3.11). Ce courant est riche en composantes harmoniques dont le spectre sera fonction de la nature de la charge. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau créent des tensions harmoniques qui peuvent perturber les autres récepteurs raccordés à la même source. L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques a donc un rôle fondamental dans la sévérité de la distorsion en tension. A remarquer que si l'impédance de la source est faible ( $P_{cc}$  élevée) la distorsion en tension est faible [27].

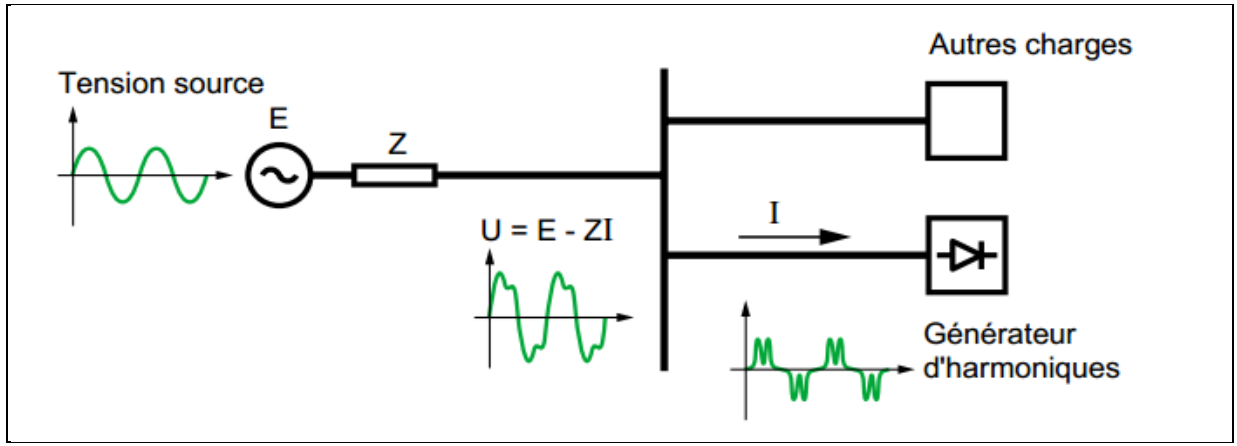


**Fig.3.11** : Dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire [1].

### 3.7.2. Analyse de Fourier

Tout signal périodique de période  $T=1/f$ , peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de  $f$ .

L'expression de série de Fourier d'un signal  $I_{ch}(t)$  périodique de période  $T=1/f$ , est :

$$I_{ch}(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t) + I_1 \cos(\omega t) + I_2 \sin(2\omega t) + I_2 \cos(2\omega t) + \dots I_n \sin(n\omega t) + I_n \cos(n\omega t) \quad (3.37)$$

Aussi peut être écrit :

$$I_{ch}(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (3.38)$$

Où :  $n$  est un entier naturel et  $\omega = 2\pi/T$  ;  $a_0$  est une constante qui représente la moyenne de la fonction. On calcule les coefficients  $a_n$  et  $b_n$  avec les formules suivantes (On prend  $I_{ch}(t)=f(t)$ ) :

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt \end{cases} \quad (3.39)$$

Avec :  $\omega = 2\pi f_0$  où  $f_0$  est la fréquence fondamentale.

Le calcul des coefficients de la décomposition en série de Fourier d'une fonction  $f(t)$  se simplifie lorsque la fonction à décomposer est paire ou impair [36].

Pour les fonctions paire où  $f(t)=f(-t)$ , il en résulte que :

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt = 0 \end{cases} \quad (3.40)$$

La décomposition en série de Fourier d'une fonction paire ne contient que des termes en cosinus avec éventuellement la moyenne  $a_0$ .

Pour le cas des fonctions impaires  $f(-t)=-f(t)$ , il en résulte que :

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = 0 \\ a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt = 0 \\ b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt \end{cases} \quad (3.41)$$

La décomposition en série de Fourier d'une fonction impaire ne contient que des termes en sinus. De plus, elle ne possède pas la constante  $a_0$ .

L'amplitude ( $I_{mn}$ ) et le déphasage ( $\varphi_n$ ) de l'harmonique de rang  $n$  est donnent par :

$$\begin{cases} I_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \varphi_n = \tan^{-1}(b_n/a_n) \end{cases} \quad (3.42)$$

D'après les expressions ci-dessus, le courant de la charge non-linéaire est donne par :

$$I_{ch}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (I_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_n)) \quad (3.43)$$

Ce courant peut être subdivise en une composante fondamentale et des composantes harmoniques :

$$I_{ch}(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} (I_{mn} \sin(n\omega t + \varphi_n)) \quad (3.44)$$

Avec :  $I_{ch}(t)$  est le courant de la charge ; et  $I_1$  est la valeur maximale du courant fondamental.

### 3.7.3. Grandeurs utilisé pour chiffrer les harmoniques

Parmi les plus employés le THD (Taux global de Distorsion Harmonique) et le facteur de puissance (FP) sont pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de la puissance réactive [37].

#### 3.7.3.1. Grandeur harmonique

C'est une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pourcent de celle du fondamental.

#### 3.7.3.2. Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental donne par :

$$n = \frac{f_n}{f_0} \quad (3.45)$$

Par principe, le fondamental  $f_0$  a le rang 1.

#### 3.7.3.3. Expression de la grandeur déformée

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

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(2\pi n f t + \varphi_n) \quad (3.46)$$

$Y_0$ : 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. Selon les normes, on prend en considération les harmoniques jusqu'au rang 40, la valeur efficace est:

$$Y_{eff} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + Y_n^2 + ....} \quad (3.47)$$

#### 3.7.3.4. Taux de distorsion (THD)

Le taux de distorsion harmonique THD en anglais (Total Harmonic Distorsion) donne une mesure de la déformation du signal son expression est :

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{Y_n}{Y_1} \right)^2} \quad (3.48)$$

Avec :  $Y_n$  : La valeur efficace de composante harmonique  $n$  ; et  $Y_1$  : la valeur efficace de fondamental.

#### 3.7.3.5. Facteur de puissance (FP)

Il est défini par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ , rapport qui tient compte des harmoniques:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3.49)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.50)$$

Le terme  $D$ , pour la puissance appelée puissance déformante telle que :

$$D = 3 \times V_f \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (3.51)$$

Où :  $V_f$  est la tension efficace sous fréquence fondamentale ;  $I_n$  est le courant sous fréquence harmonique.

### 3.7.4. Les principales sources d'harmoniques

#### 3.7.4.1. Emission en tension

L'émission harmonique en tension due aux matériels de réseaux ne génère pas un grand distorsion. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation...etc.) des bobinages des machines tournantes, des moteurs, des alternateurs et des transformateurs [38].

- **Alternateur** : Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde.
- **Transformateur** : Dans le cas de fonctionnement en régime saturé des transformateurs, son taux de distorsion harmonique en tension reste toujours faible.

### 3.7.4.2. Emission en courant

Les charges non linéaires représentent le principal générateur d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

On peut représenter pour chaque rang harmonique la charge réelle par une source de courant  $I_h$  déterminée, en parallèle avec une impédance linéaire, comme dans la figure suivante (Fig.3.12).

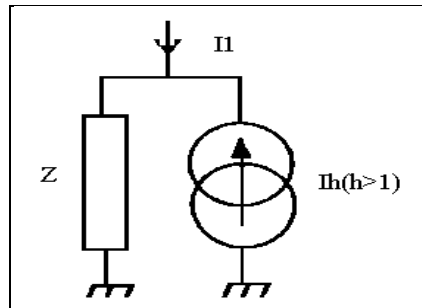


**Fig.3.12 :** Représentation du circuit étudié au rang harmonique  $h$ .

Dans de nombreux cas, l'impédance  $Z$  de cette charge linéaire peut être considérée comme infinie en régime harmonique. Cette représentation a ses limites. En particulier, lorsque l'impédance du réseau amont est faible, par exemple dans le cas d'une charge alimentée par un groupe électrogène de faible puissance, la charge se comporte plus comme une source de tension harmonique.

On peut distinguer sept différents types de charge perturbatrices élémentaires chez l'utilisateur, dont quatre constitués de montages électroniques [38] :

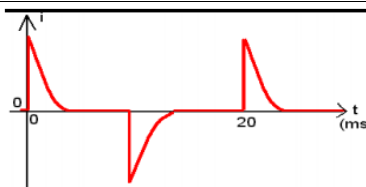
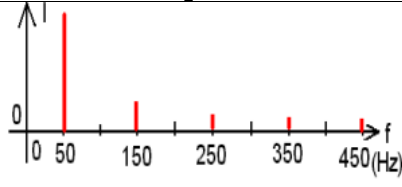
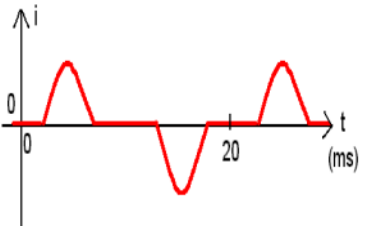
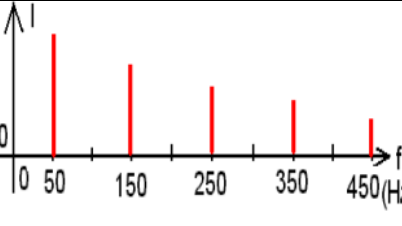
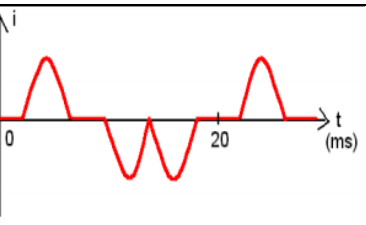
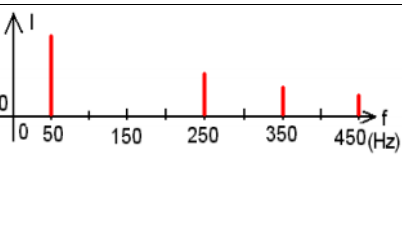
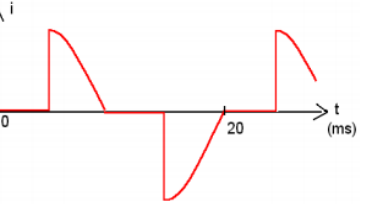
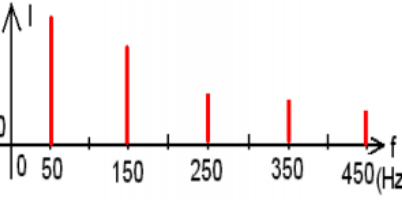
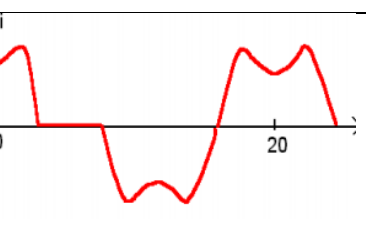
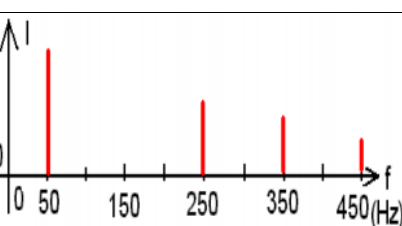
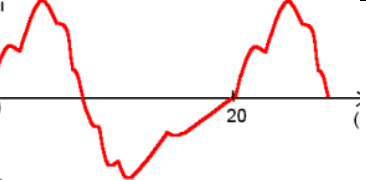
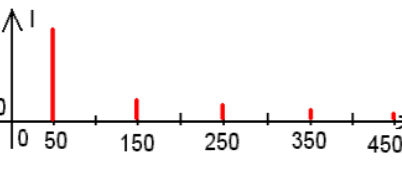
- Le redresseur monophasé à filtre capacitif ;
- Le gradateur monophasé ;
- Le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif ;
- Le redresseur triphasé à thyristors.

Et trois autres ne comportent pas d'électronique, que l'on nomme charges passives.

- Les moteurs asynchrones ;
- Les lampes ;
- Les appareils à arc électrique.

On peut représenter les principales caractéristiques des ces charges dans le tableau (Table. 3.2).

Table. 3.2 : Différentes types de charges polluantes [39].

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

### 3.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté en détail les sources des perturbations des réseaux électriques d'origine interne aussi les principales techniques d'analyse des certaines sources des ces perturbations qui diminuée la qualité d'énergie électrique.

Ces techniques est fournissent une mesure globale des perturbations d'origine interne qui affectent plus la qualité de l'énergie, et peuvent nous facilité le calcul d'indices de la qualité de l'énergie électrique.

L'avantage des connaissances des déférentes sources des ces perturbation ainsi les technique d'analyse des ces anomalie permis de faire la protection nécessaire contre ceux-ci.

En fin pour comprendre mieux les perturbation et ces phénomène d'origine en va présenter un chapitre de simulation des déférents phénomènes qui est le chapitre suivant.

# Chapitre 4 : Simulation des sources des perturbations d'origine interne.

## 4.1. Introduction

La méthode analytique de calcul des perturbations est une méthode relative mais demande un temps de calcul important. Par contre, l'utilisation de logiciel MATLAB/SIMULINK a l'avantage d'être rapide et facile. A cet effet nous allons utiliser dans ce chapitre ce logiciel de simulation pour simuler les principales sources des perturbations internes. On a choisi pour simulation une source de perturbation pour chaque type de perturbation interne, pour voir comment ces perturbations être nuisibles sur les paramètres de la qualité d'énergie électrique, telle que pour :

- Surtension : On a sélectionné l'enclenchement d'une batterie de condensateur.
- Surintensité : On a choisi l'exemple de Court-circuit au secondaire d'un transformateur.
- Déséquilibre : On a choisi le déséquilibre due à la mauvaise répartition des charges.
- Creux de tension : Dans la simulation on a sélectionné l'enclenchement d'un transformateur.
- Harmonique : Dans la simulation on a choisi charge non-linéaire (redresseur).

## 4.2. Surtension due a l'enclenchement d'une batterie de condensateur

### 4.2.1. Description de model de simulation

On l'utilise pour simuler une surtension provoquée par l'enclenchement d'une batterie de condensateurs, un modèle qui se compose d'une source triphasée de 11kV, 30MVA, 50Hz alimente un transformateur de 11kV/400kV, 1MAV avec une charge de 100kW résistive et de 100 kVAR inductive. Le modèle d'alimentation de batterie de condensateurs développé dans Simulink et illustré à la figure (Fig. 4.1). Un temps de simulation de 0,1 seconde est défini.

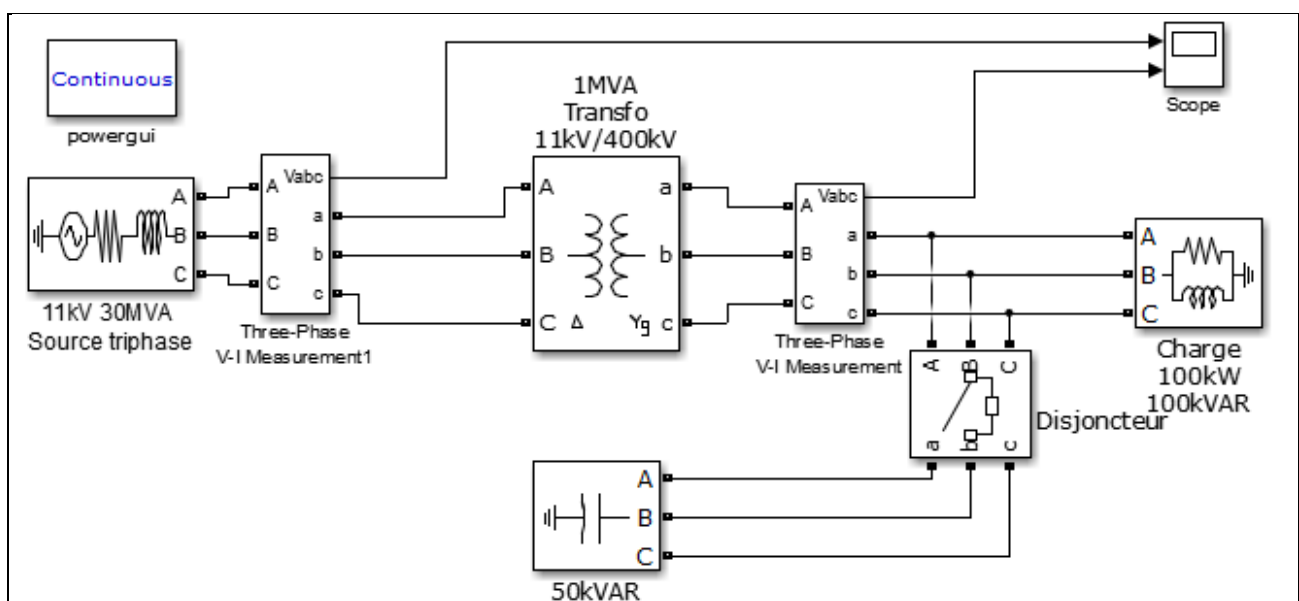


**Fig. 4.1 :** Modèle d'alimentation de batterie de condensateurs développé dans Simulink

La batterie de condensateur à la côté basse tension (400V) a une capacité de 50 kVAR. Alimente par un disjoncteur initialement ouvert qui ferme à l' instant 0.05s.

#### 4.2.2. Résultats et interprétations

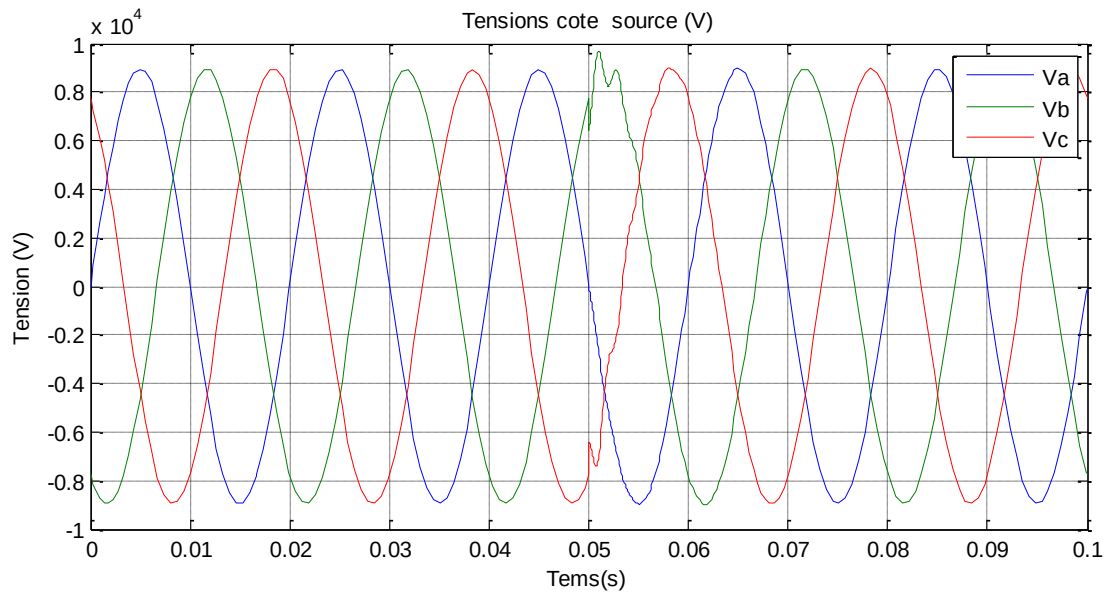


**Fig. 4.2 :** Tensions (Vabc) coté 11kV.

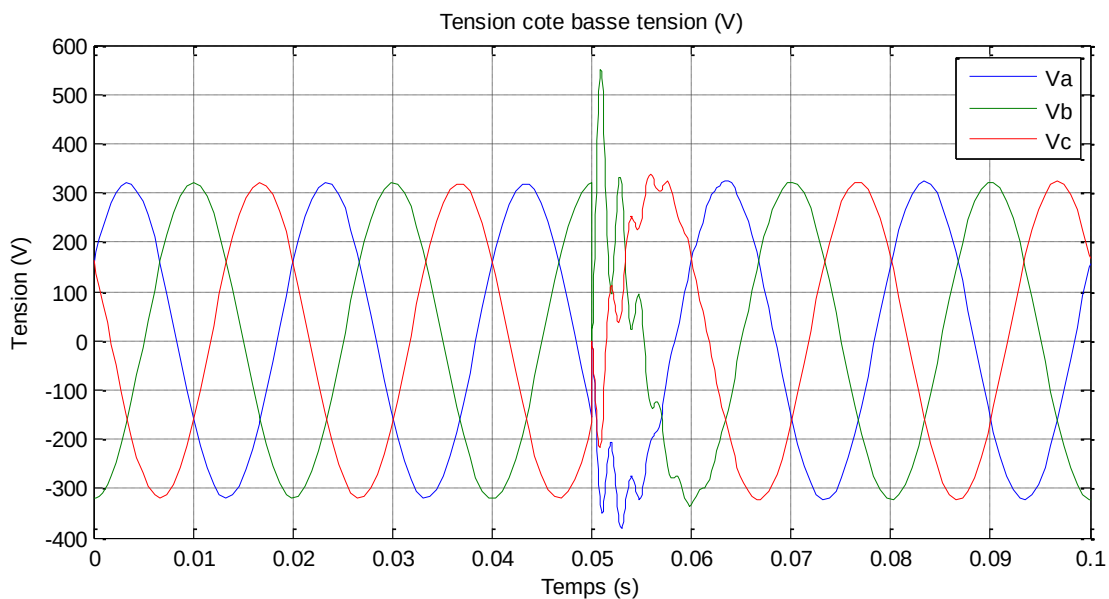


**Fig. 4.3 :** Tensions (Vabc) coté 400V.

La mise sous tension de la batterie de condensateurs lors de la fermeture du disjoncteur triphasé provoque une régime transitoire de tension dans les deux côté basse et moyen tension, avec une amplitude allant jusqu'à 548V côté 400V et de 9800V côté 11kV. Une augmentation de l'amplitude de tension transitoire par rapport tension de service de la côté 400V plus que côté 11kV.

Ce qui permet de nous dire que l'amplitude de tension transitoire diminue considérablement au fur et à mesure qu'elle se propage vers le départ du réseaux.

### 4.2.3. Effet de la valeur de condensateur sur l'amplitude, la durée et la fréquence de tension transitoire

Cette fois on augmente la valeur de batterie vers 100kVAR et on observe la forme d'onde côté basse tension (Fig. 4.4).

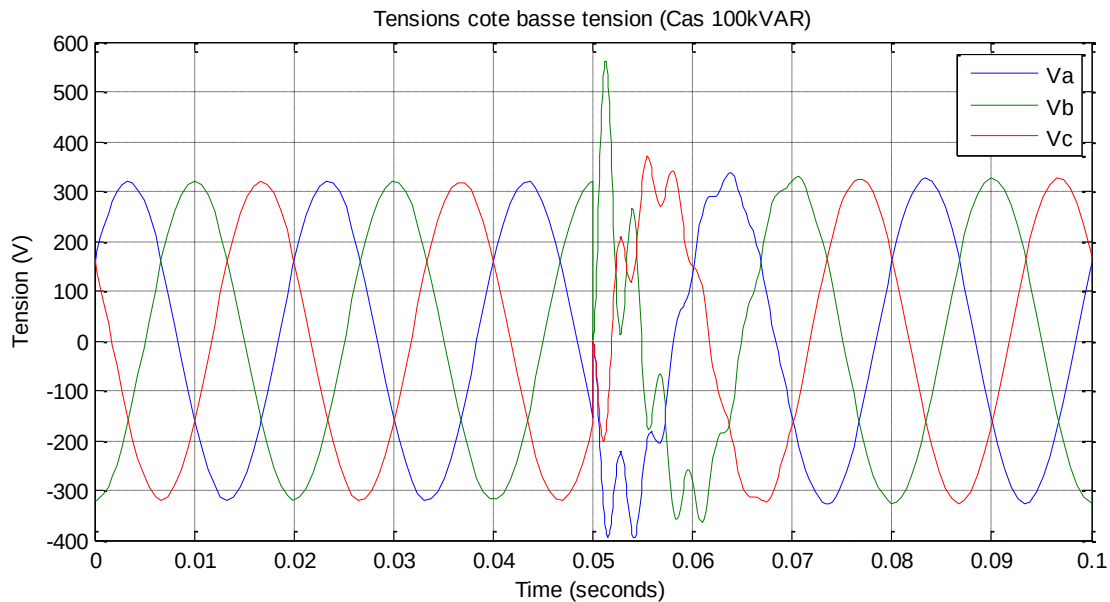


**Fig. 4.4 :** Tensions (Vabc) cote 400V, (Cas batterie de 100kVAR).

- L'amplitude de tension transitoire par rapport au cas précédente est élevée à 560V ;
- La fréquence transitoire de la tension oscillatoire est augmentée ;
- La durée de régime transitoire de la tension oscillatoire est augmentée.

## 4.3. Creux de tension due à la mise sous tension du transformateur

### 4.3.1. Description de model de simulation

Pour simuler les creux de tension dus à la mise sous tension du transformateur, on a utilisé un simple réseau constitué d'une source de 11kV, 30MVA, 50Hz, lié par disjoncteur avec un transformateur saturable de 11kV/400V, 1MVA, alimente une charge de 10kW, 100VAR indicatif, (Fig. 4.5). Le temps de simulation est 1s. L'état initial de disjoncteur est ouverte et programmer à la fermeture dans l'instant 0.06s. Les mesures de la forme d'onde instantanée et les valeurs RMS sont situés au primaire coté source.

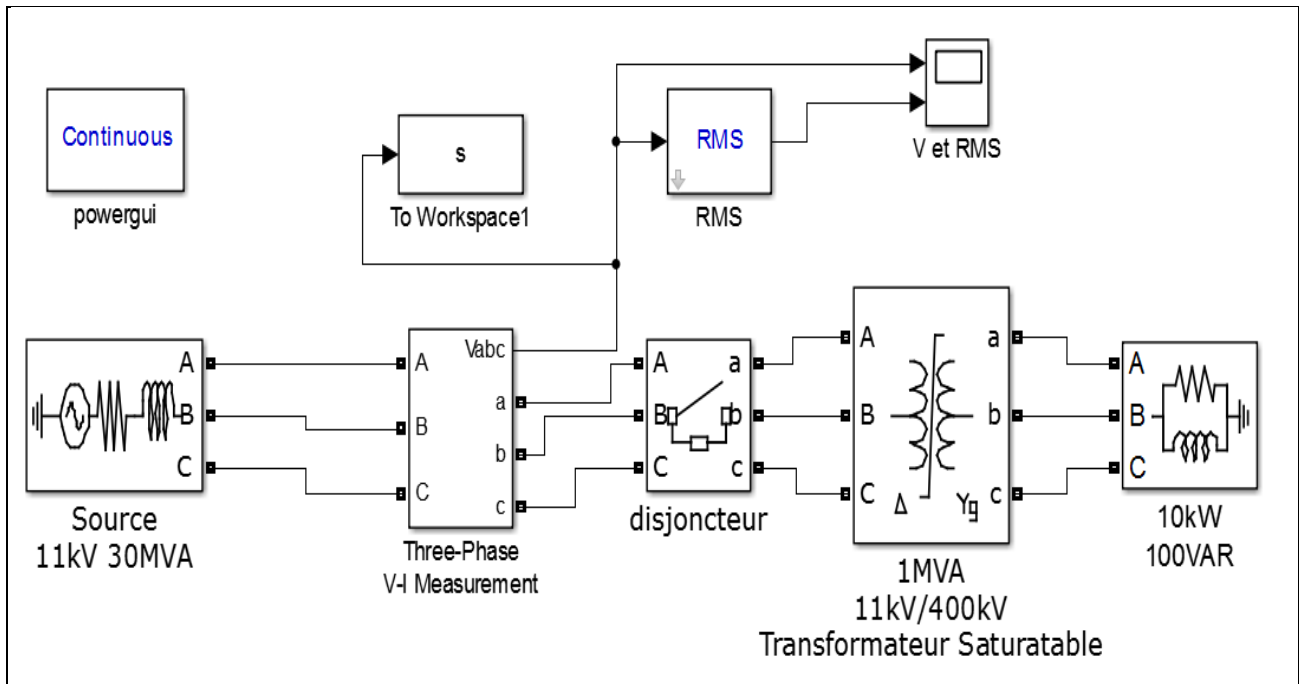


Fig. 4.5 : Model Simulink pour simulation d'enclenchement du transformateur.

#### 4.3.2. Résultats et interprétations

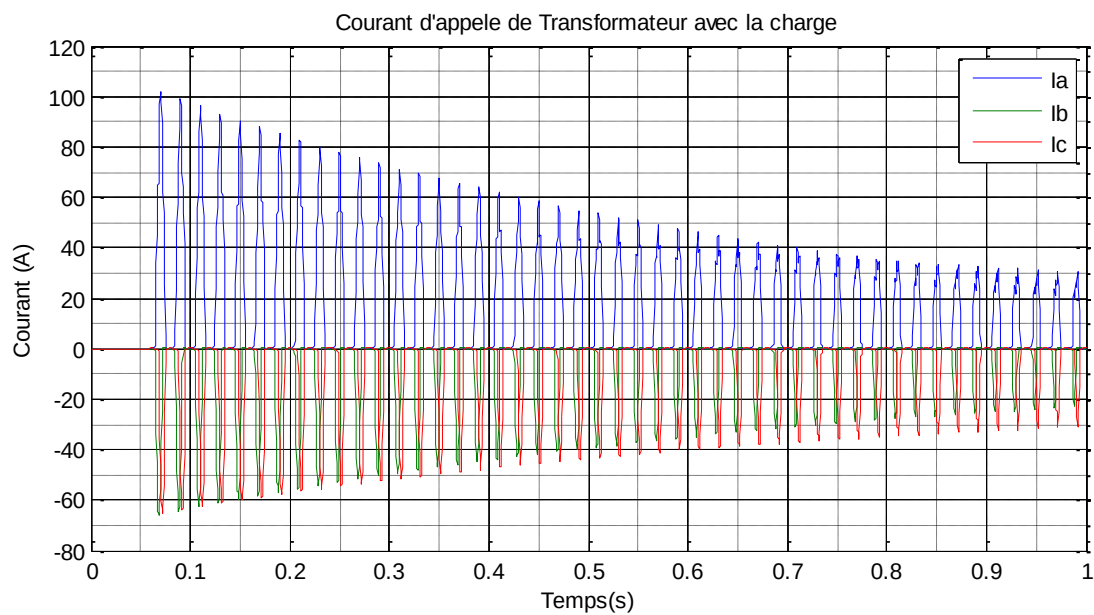


Fig. 4.6 : Courant d'appelle de transformateur des phases avant et après l'enclenchement.

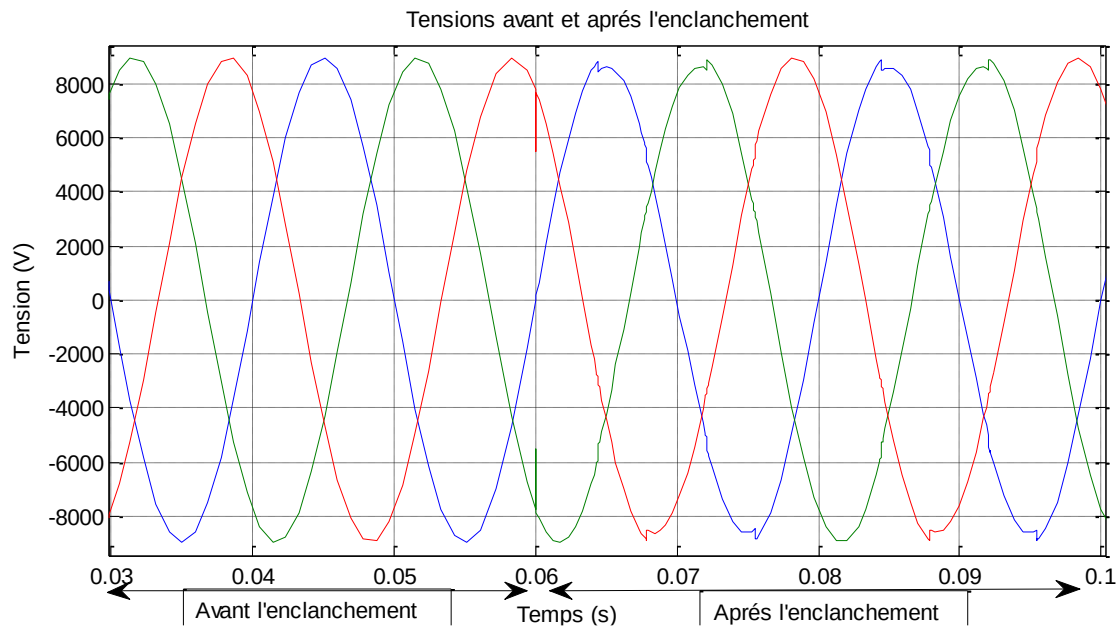


**Fig. 4.7 :** Forme d'onde des tensions de réseaux avant et après l'enclenchement.

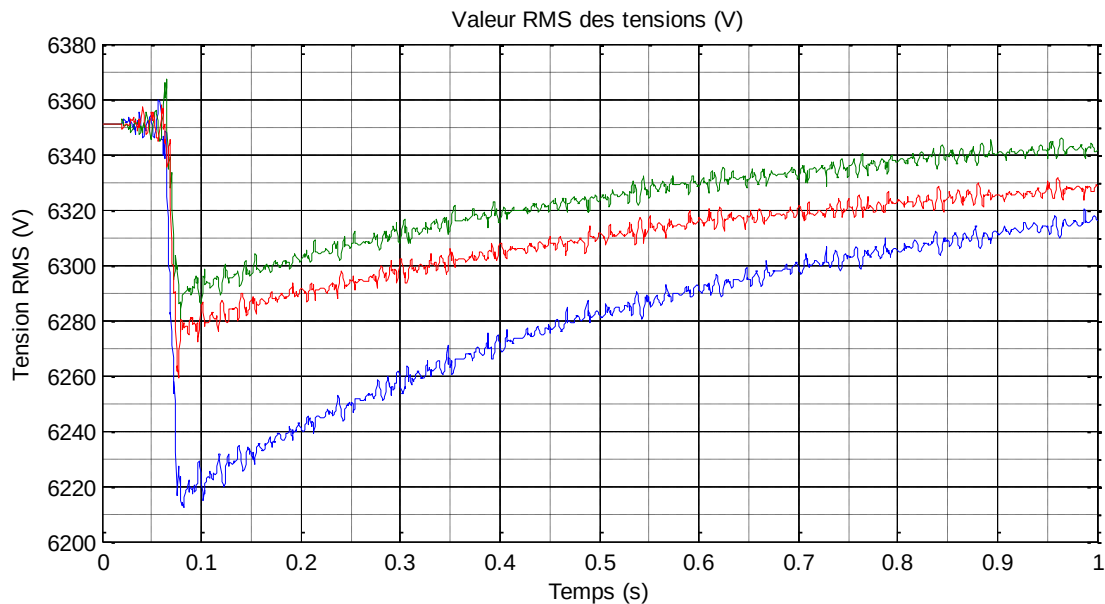


**Fig. 4.8 :** Courbes RMS des tensions de réseau.

Avant l'instant d'enclenchement de transformateur, les tensions de réseaux sont purement sinusoïdales. Après cette instant la forme de tension reste sinusoïdale, une petite déformation de l'onde de tension a remarqué juste après l'instant de fermeture de disjoncteur.

La courbe d'évolution des valeurs efficaces des tensions RMS présente une grande diminution à l'instant d'enclenchement après cette diminution la valeur d'évolution de tension efficace (RMS) augmente vers la valeur efficace des réseaux avant l'enclenchement.

Cela permis de nos dire qu'il y a un creux de tension du à la mise sous tension d'un transformateur. Aussi que les trois phases subissent un creux de tension déséquilibré et monter progressivement jusqu'à son niveau de tension nominale.

Dans la courbe de courant d'appel (Fig. 4.6). On remarque qu'il y a un grand appel de courant à l'instant de l'enclenchement, cette courant d'appel diminue après certain temps vers le courant de régime normale de fonctionnement.

D'après les figure de valeur RMS (Fig. 4.8) et la figure de courant d'appel de transformateur (Fig. 4.6) : la diminution de courant d'appel vers la courant de régime permanent provoque une augmentation de la valeur efficace de la tension (RMS) vers la valeur efficace de tension des réseaux. Donc on peut dire que le courant d'appel de transformateur provoque un creux de tension dans les réseaux.

- ❖ Lorsqu'un transformateur est mis en service, en raison de l'effet de saturation du noyau, le courant d'appel sera produire jusqu'à 8 à 10 fois le courant nominal. C'est-à-dire que des creux de tension peuvent apparaître à au moins deux phases. Pour un transformateur de grande capacité, qui a une petite résistance et une grande réactance.

#### 4.3.3. Les facteurs qui affectent l'amplitude de creux

Pour vérifier les facteurs qui affectent l'amplitude de creux, on fait deux simulations avec un changement de puissance nominale de transformateur et de source d'alimentation :

- Dans le premier cas d'essai on change la puissance nominale de transformateur à 3MVA. La figure (Fig. 4.9) montre la courbe (RMS) correspond de ce cas ;
- Dans le deuxième essai on change la puissance nominale de source d'alimentation à 35MVA (la puissance nominale de transformateur reste 1MVA). La figure (Fig. 4.10) montre la courbe (RMS) correspond de cet essai.

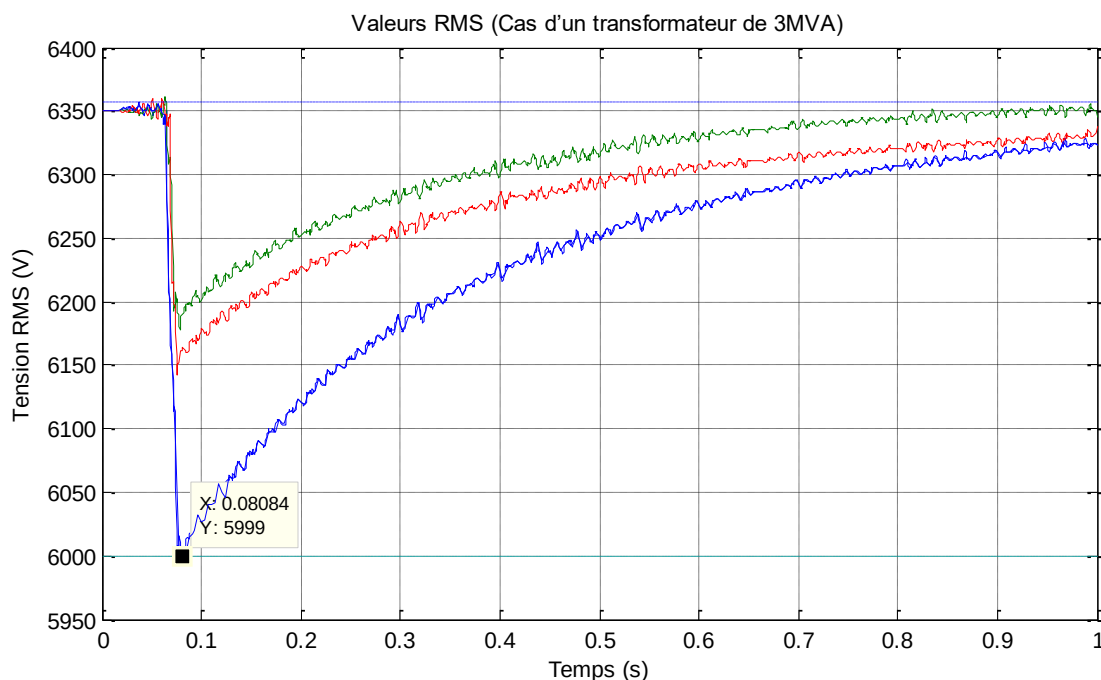


**Fig. 4.9 :** Courbes RMS des tensions de réseau (Cas d'un transformateur de 3MVA).

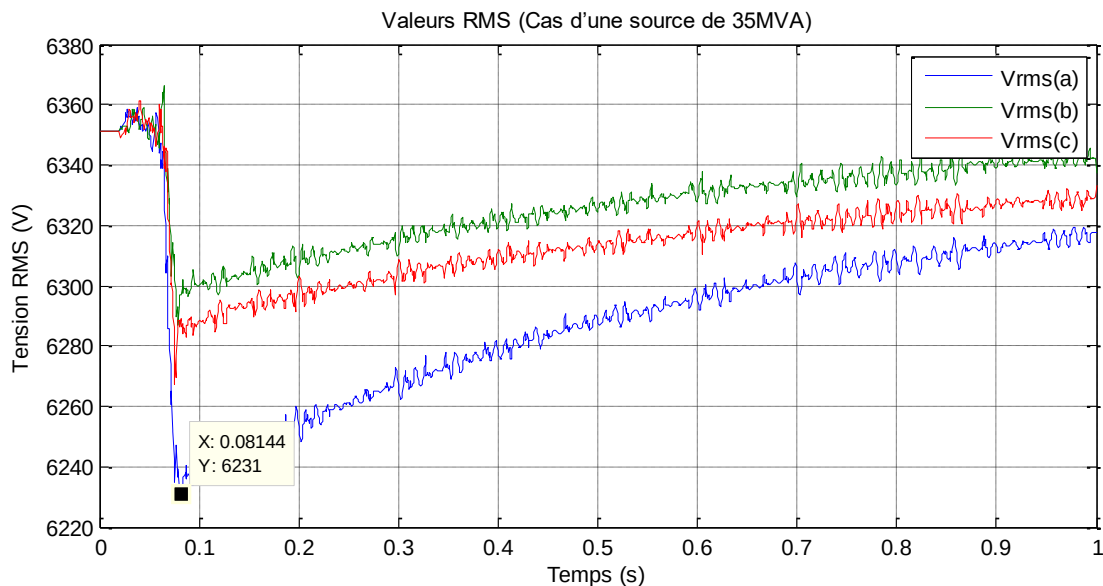


**Fig. 4.10 :** Courbes RMS des tensions de réseau (Cas d'une source de 35MVA).

#### 4.3.3.1. Remarques

- ✓ L'augmentation de puissance nominale de transformateur fait augmenter l'amplitude des creux de tension.
- ✓ L'augmentation de puissance nominale de source d'alimentation fait diminuer l'amplitude des creux de tension d'enclenchement.

#### 4.3.3.2. Conclusions

En comparant ces deux essais de simulation avec la simulation précédente, nous concluons que l'amplitude de creux de la tension d'enclenchement du transformateur dépend de la puissance nominale de source l'alimentation et de la puissance nominale du transformateur.

### 4.4. Surintensité dues au court-circuit au secondaire d'un transformateur

#### 4.4.1. Description de model de simulation

Pour simuler un défaut de court-circuit au secondaire d'un transformateur, on utilise un modèle d'un réseau triphasé simple, constitue d'une source de 25Kv, 30MW, lié avec charge de 20MW et 100VAR inductive, par un transformateur 25Kv/400v de 250MW, et on observe les formes de courant et de tension des phases au primaire de transformateur (au niveau de réseaux d'alimentation) durant un temps de simulation de 0.3s. La figure (Fig. 4.11) montre le modèle utilisé pour cette simulation sur le logiciel Matlab/Simulink. On prend le cas d'un défaut monophasé à la terre apparu entre 0.1s et 0.2s.

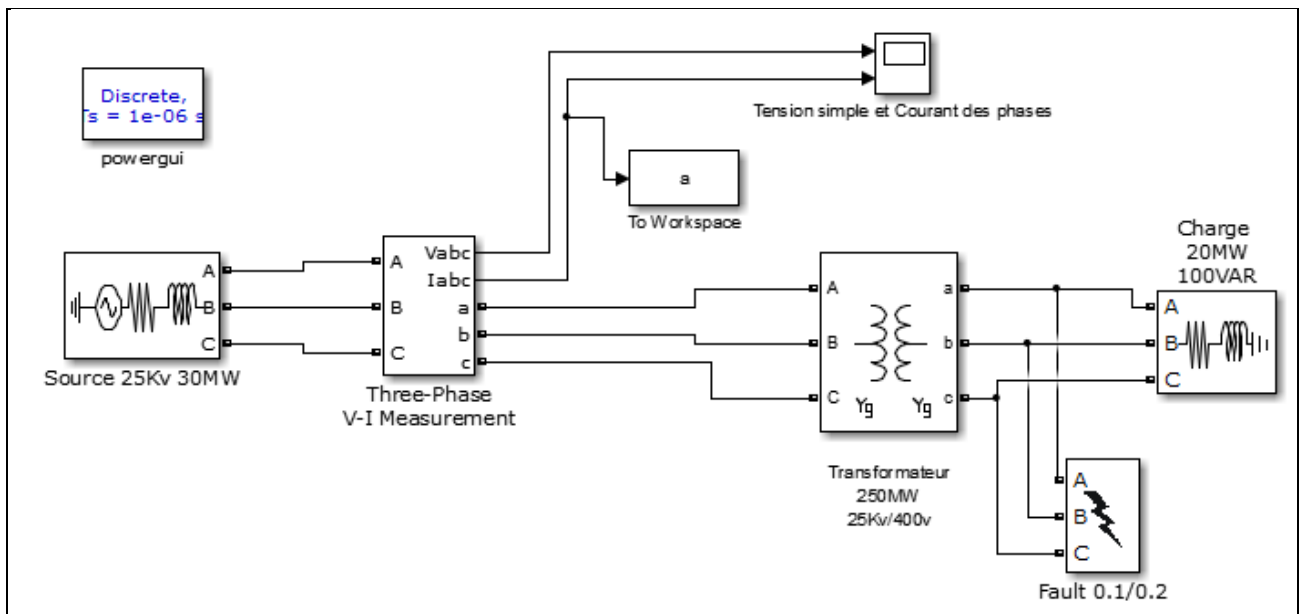


Fig. 4.11 : Model de simulation d'un court-circuit au secondaire d'un transformateur.

#### 4.4.2. Résultats et interprétations

##### ➤ Tensions Vabc :

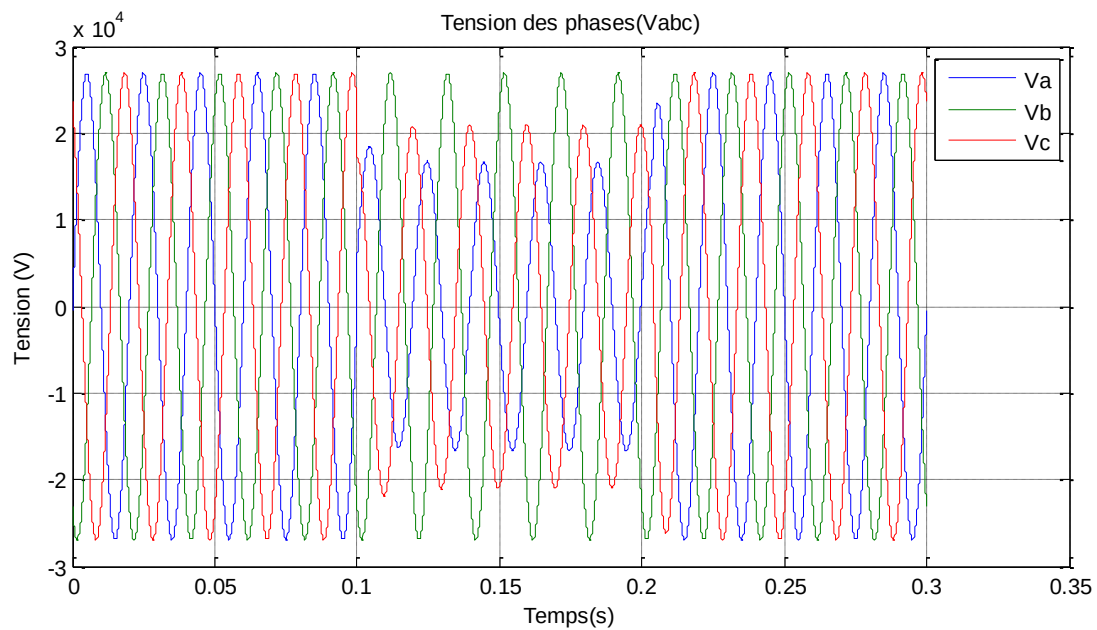


Fig. 4.12 : Tensions simple des phases au primaire de transformateur.

➤ **Courants Iabc :**

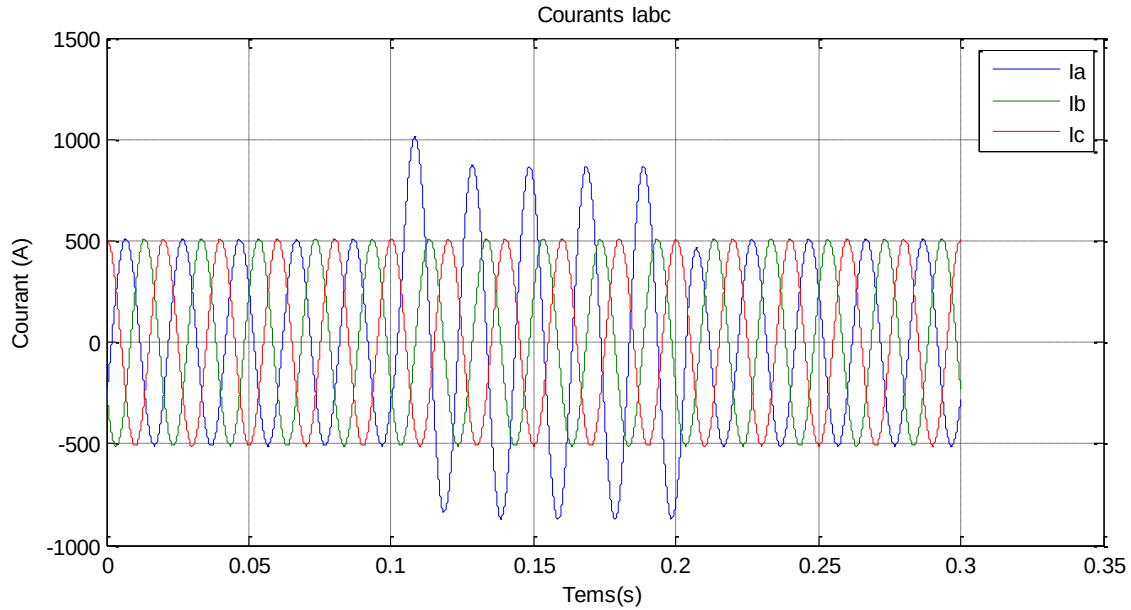


**Fig. 4.13 :** Courants Iabc au primaire de transformateur.

➤ **Courants de la phase en défaut (phase A) :**

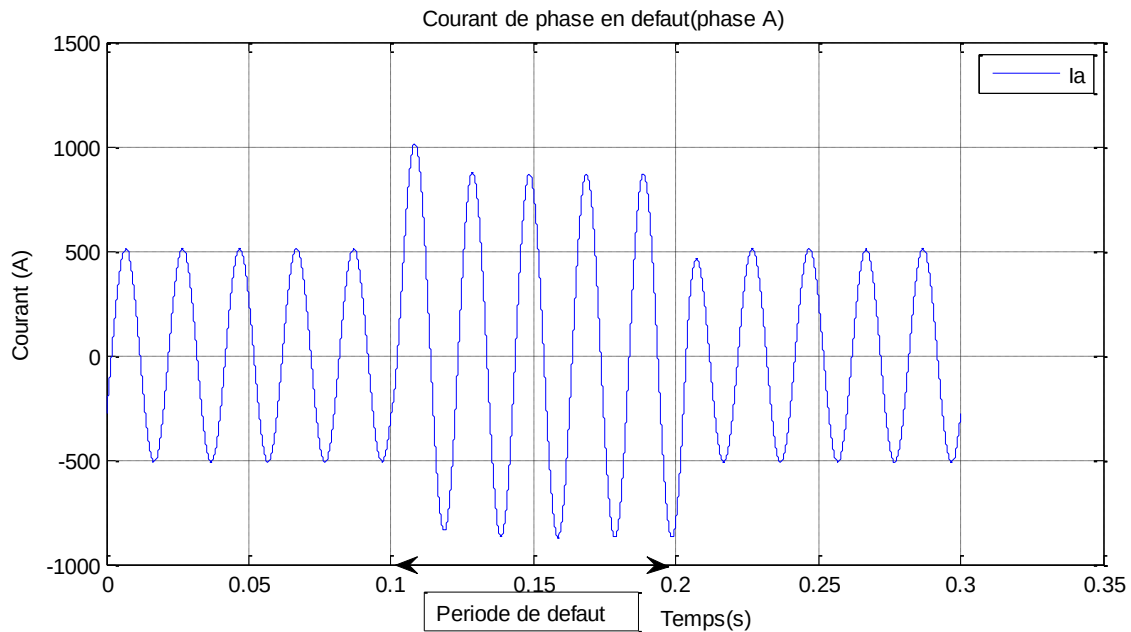


**Fig. 4.14 :** Courants Ia au primaire de transformateur.

On a remarqué que la valeur maximale de courant dans la phase en défaut dans la période de défaut a atteint 1000A , qui est le double de la valeur maximale de courant en régime normal (sans défaut).

D'après la figure (Fig. 4.13), une diminution importante de la tension est apparue. Cette diminution peut perturber le fonctionnement des récepteurs électriques connectés sur le même réseau d'alimentation.

#### 4.5. Déséquilibre de tension provoque par une mauvaise répartition des charges au niveau de récepteur

Pour pouvoir simuler l'effet de déséquilibre au niveau de la charge on a utilisé un réseau compose d'une source triphasé de 220V et des charges équilibrés montent une étoile de même puissance 100W et un contacteur Idéale (switch) qui programme à l'ouverture dans l'instant 0.5s. L'ouverture de contacteur provoque une augmentation de charge au niveau de la phase (A), on a choisi un temps de simulation de 1s, on observe les graphes de tension simple et de courant des phases ( $V_{abc}$ ) et ( $I_{abc}$ ) au niveau de la source, aussi que les tensions ( $V_{chabc}$ ) au niveau de la charge. Le model de simulation sous Simulink est montre dans la figure (Fig. 4.15).

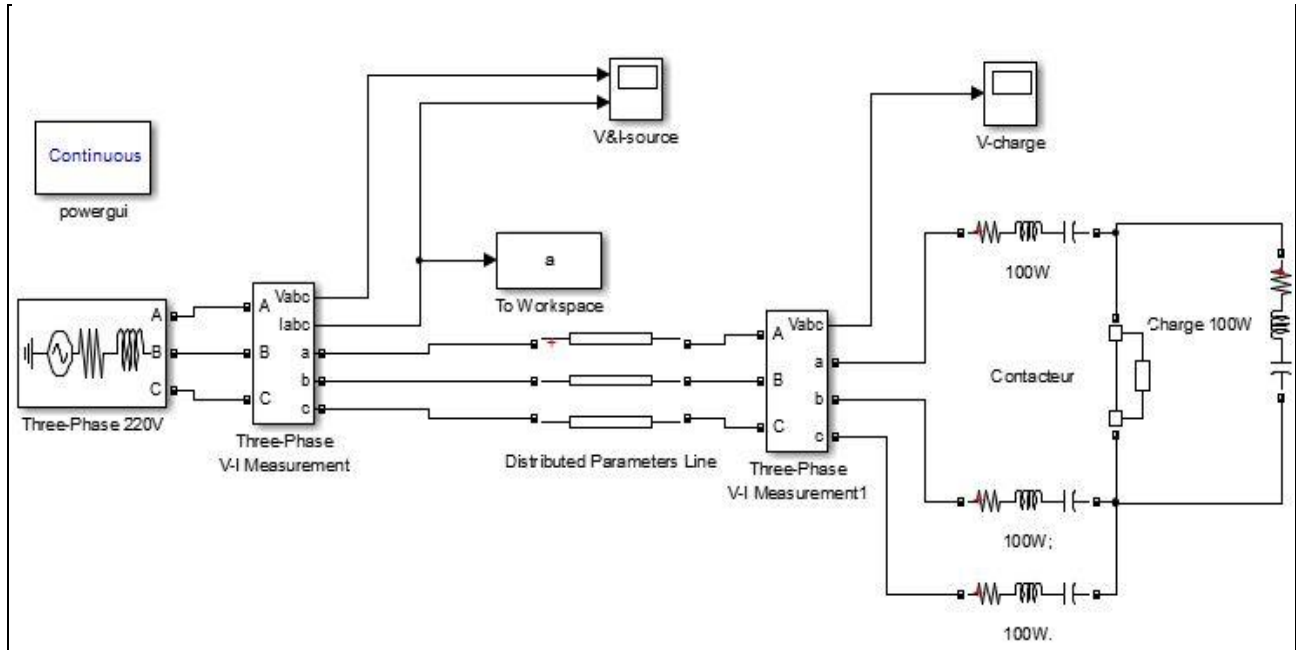


**Fig. 4.15 :** Model sous Simulink pour simulation de déséquilibre de la charge.

#### 4.5.2. Résultats et interprétations

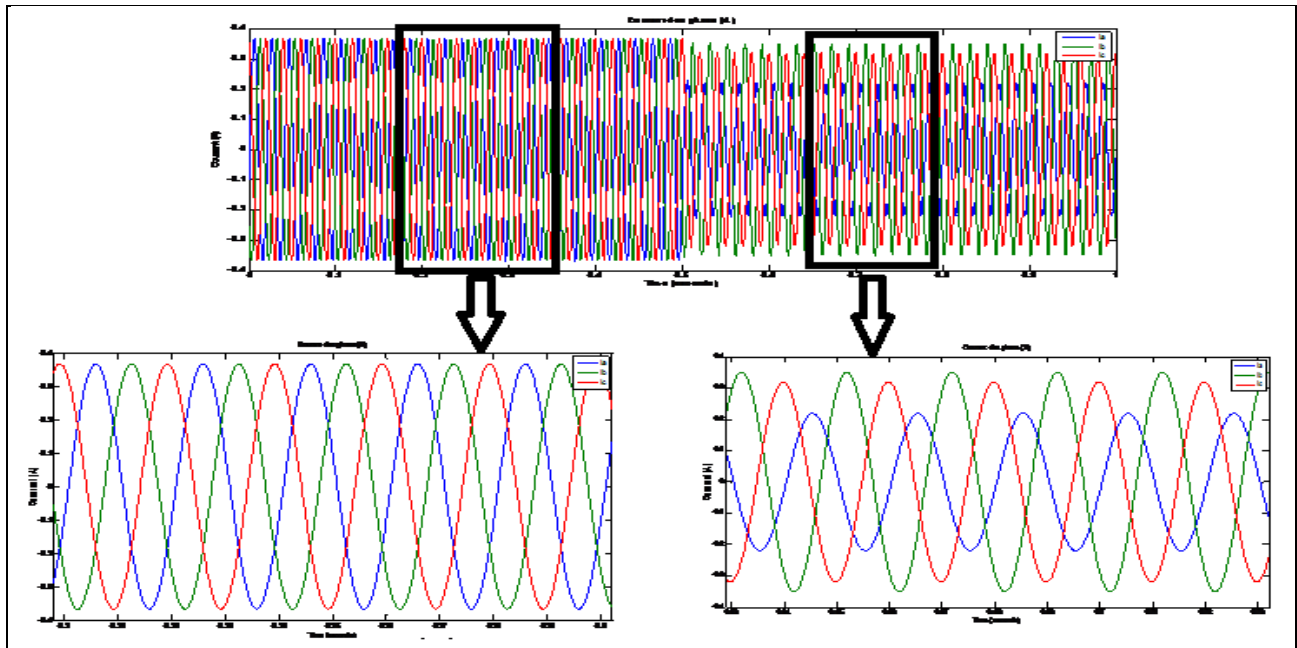


Fig. 4.16 : Courants de source ( $I_{abc}$ ), avant et après l'ouverture de contacteur.

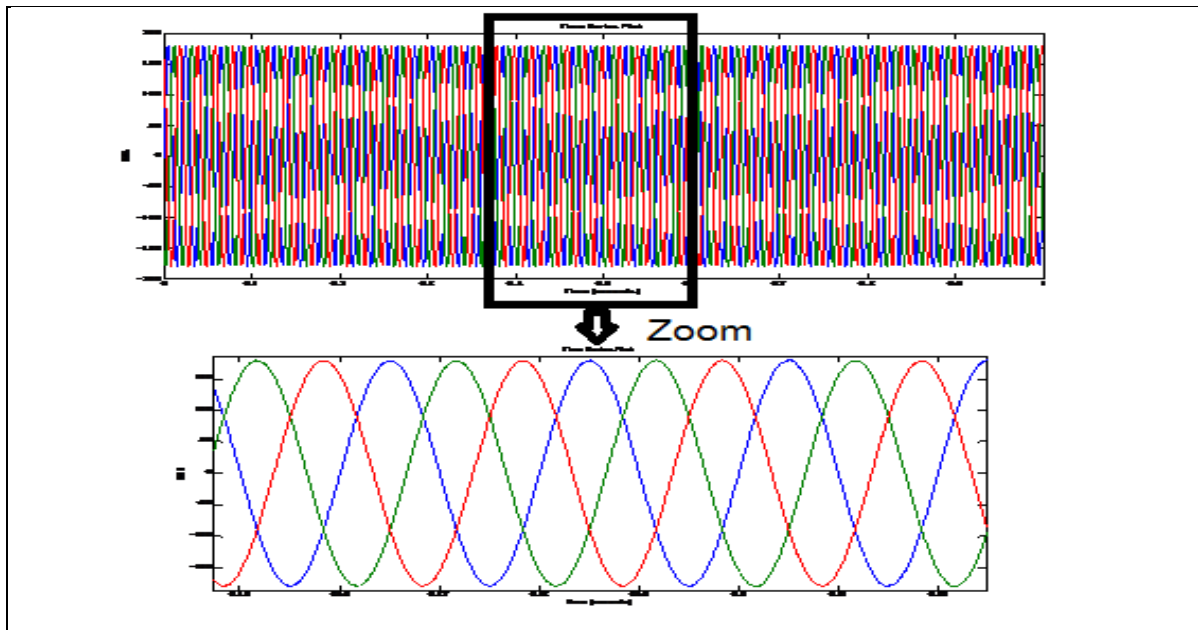


Fig. 4.17 : Tension simple de source ( $V_{abc}$ ), avant après l'ouverture de contacteur.

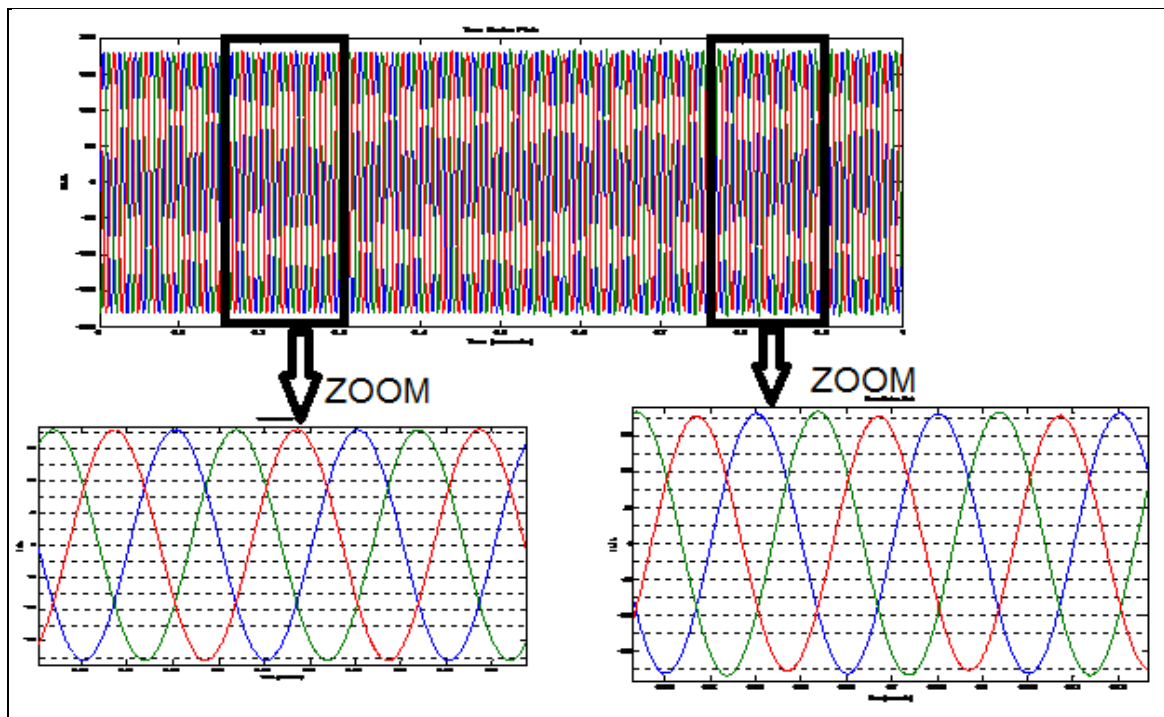


**Fig. 4.18 :** Tension simple de charge ( $V_{chabc}$ ), avant et après l'ouverture de contacteur.

D'après la figure (Fig. 4.16), les formes des courants des phases au niveau de la source sont partagés en deux régimes ; un régime avant l'augmentation de charge au niveau de la phase A et un régime qui suit l'ouverture de contacteur. Dans le premier régime les formes d'ondes des courants de source d'alimentation est sinusoïdale pure qui correspond à l'alimentation des charges équilibrées avec une source équilibre. Dans le deuxième régime c-a-d, après l'instant de l'ouverture de contacteur une charge sera ajoutée à la phase A, dans ce cas la forme d'onde exprime un régime déséquilibré, car l'amplitude de courant de la phase A est diminuée par rapport aux autres phases.

D'après la figure (Fig. 4.17), les tensions des phases au côté de la source reste la même après l'augmentation de la charge dans phase A. Car l'augmentation de charge appelé une courant déferent à la source pour les trois phases et n'affecte pas la forme de tension de source.

D'après la figure (Fig. 4.18), les tensions des trois phases aux niveaux de la charge et purement sinusoïdales avant l'ouverture de contacteur, contrairement après l'ouverture leurs formes deviennent déséquilibrés.

#### 4.5.3. Conclusions

On conclure que avant l'ouverture de contacteur, les charge appelons le même courant dans les trois phases, après l'ouverture l'appel de courant des récepteurs n'est pas le même, et une diminution de courant d'appel au niveau de source dans la phase A, provoquée par l'augmentation de charge. Aussi on peut dire que la variation de forme de courant de la phase A au niveau de source provoque la variation de chute de tension dans la ligne qui conduit à la variation de tension de phase A au niveau de la charge.

## 4.6. Harmonique dues au charge non-linéaire (Redresseur)

### 4.6.1. Description de model de simulation

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments de commutation (les convertisseurs statiques). Pour simuler l'effet d'une source d'harmonique dans un réseau électrique et pour voir les formes d'onde de courant et de tension et leurs facteurs de distorsion, on utilise le modèle dans la figure (Fig. 4.19). Ce modèle constitue d'une Source triphasé de 25kV, 50Hz, 100MVA, un Transformateur de 25kV/400V, alimentant un charge de 10kW, 5MVAR (inductif). On branche un redresseur alimente une charge de 5kW au secondaire de transformateur. Un temps de simulation de 0.1s est choisi.

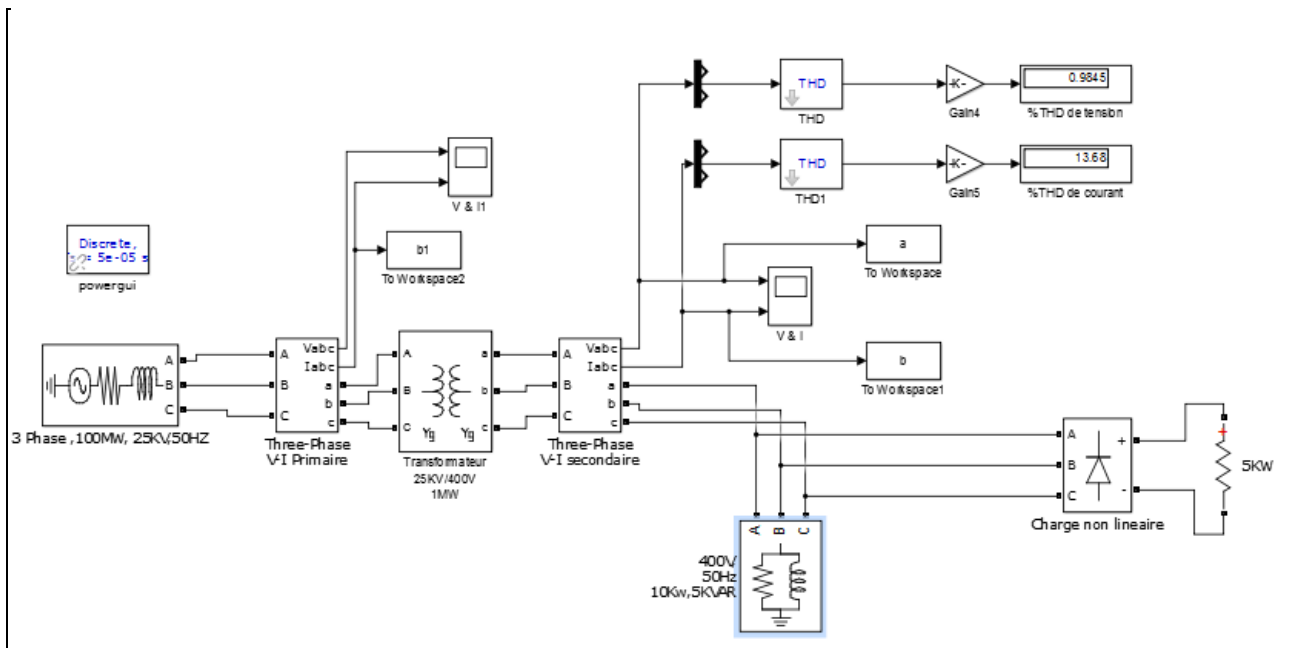


Fig. 4.19 :Model Simulink de simulation de l'effet de la charge non linéaire.

### 4.6.2. Résultats et interprétations avant branchement de charge non linéaire

On déconnecte la charge non linéaire, après on observe les formes des tensions (Fig. 4.21) et des courants (Fig. 4.20) au secondaire de transformateur.

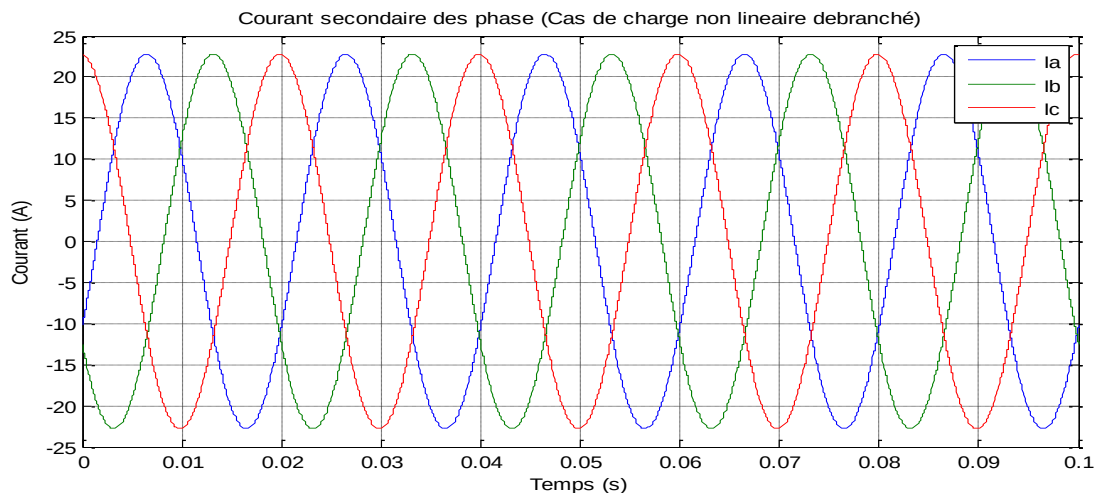


Fig. 4.20 : Courants des phases au secondaire (Sans charge non linéaire).

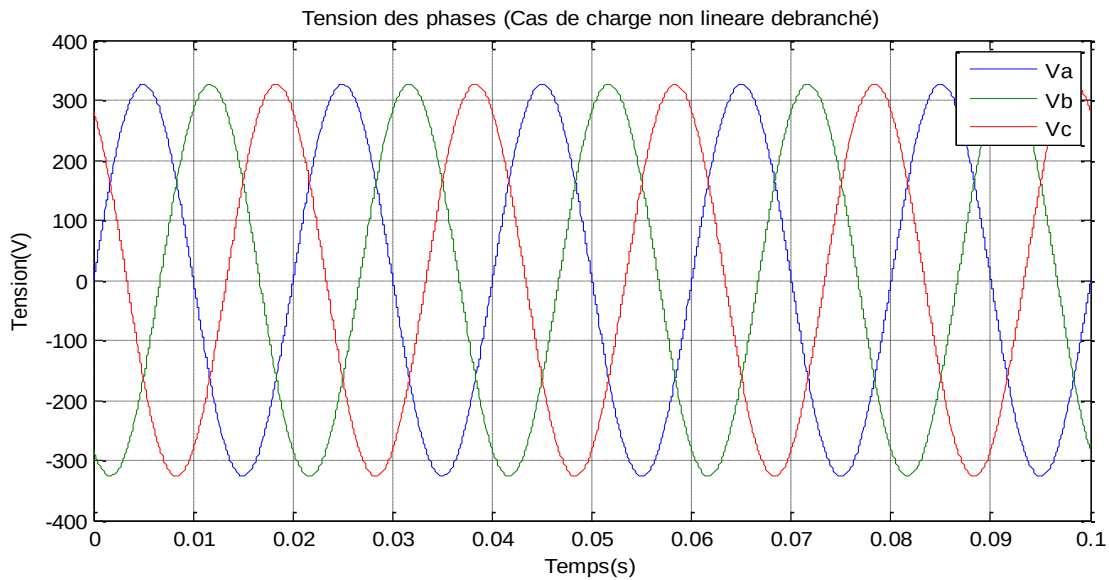


**Fig. 4.21 :** Tensions des phases au secondaire (Sans charge non linéaire).

D'après ces résultats, on vu que les formes de tension et de courant sont sinusoïdales avec une petite distorsion  $THD=0.63$  pour le courant de phase A, et  $THD=0.63$  pour la tension simple de la phase A. Donc on peut dire que cette distorsion est négligeable et non ne pose aucun problème pour le fonctionnement de réseau.

#### 4.6.3. Résultats et interprétations après branchement de charge non linéaire

Dans ce cas on branche une charge non linéaire qui est un redresseur alimente une charge de 5kW, et on observe les formes des courants et les tensions, au primaire et au secondaire de transformateur.

##### 4.6.3.1. Courants et tensions primaires

###### ➤ Courants primaires :

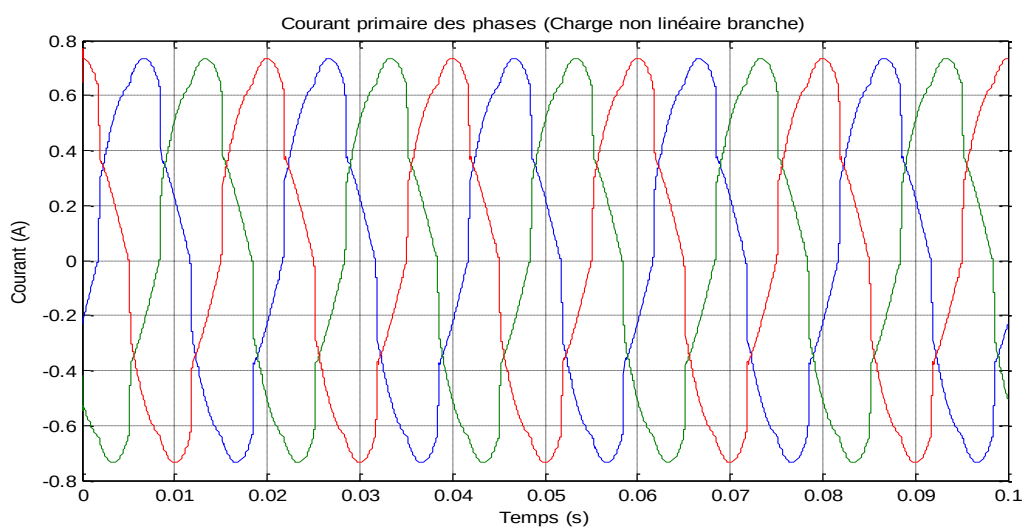


**Fig. 4.22 :** Courants des phases au primaire (Charge non linéaire branchée).

➤ Tensions primaires :

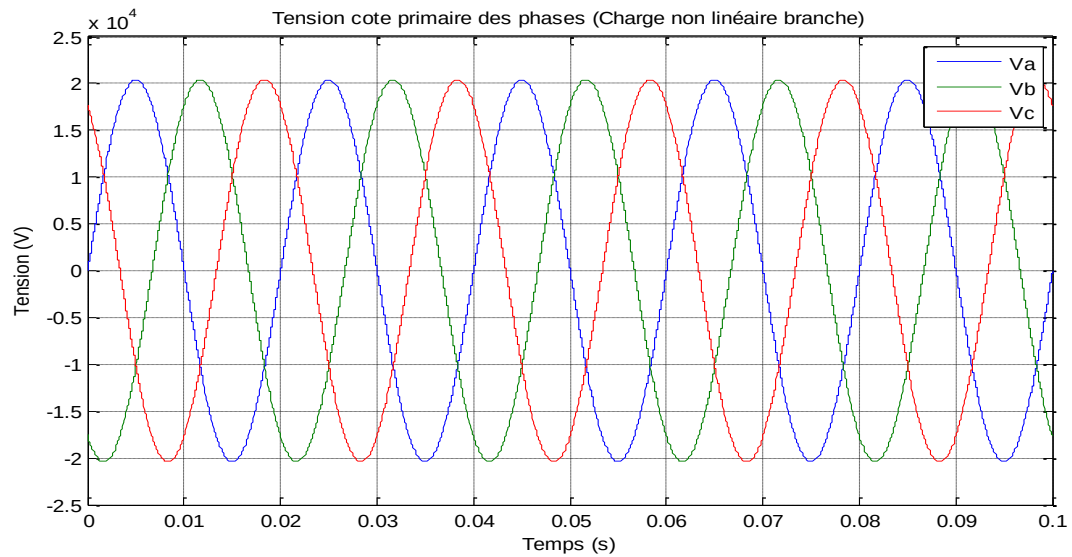


**Fig. 4.23 :** Tensions simples des phases au primaire (Charge non linéaire branchée).

4.6.3.2. Courants et tensions secondaires

➤ Courants secondaires :

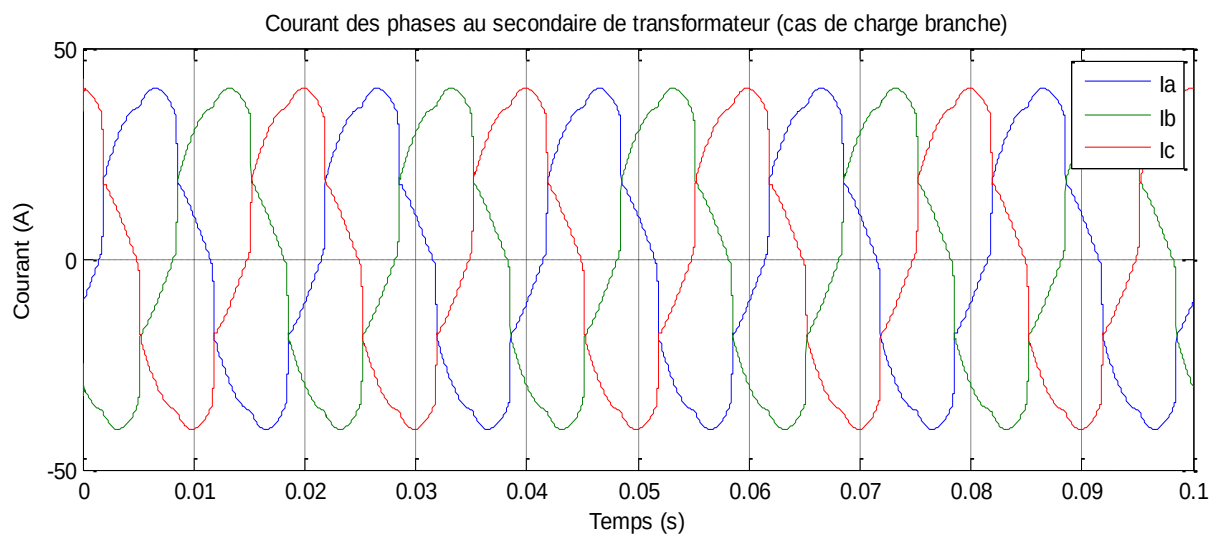


**Fig. 4.24 :** Courants des phases au secondaire (Charge non linéaire branchée).

➤ Tensions secondaires :

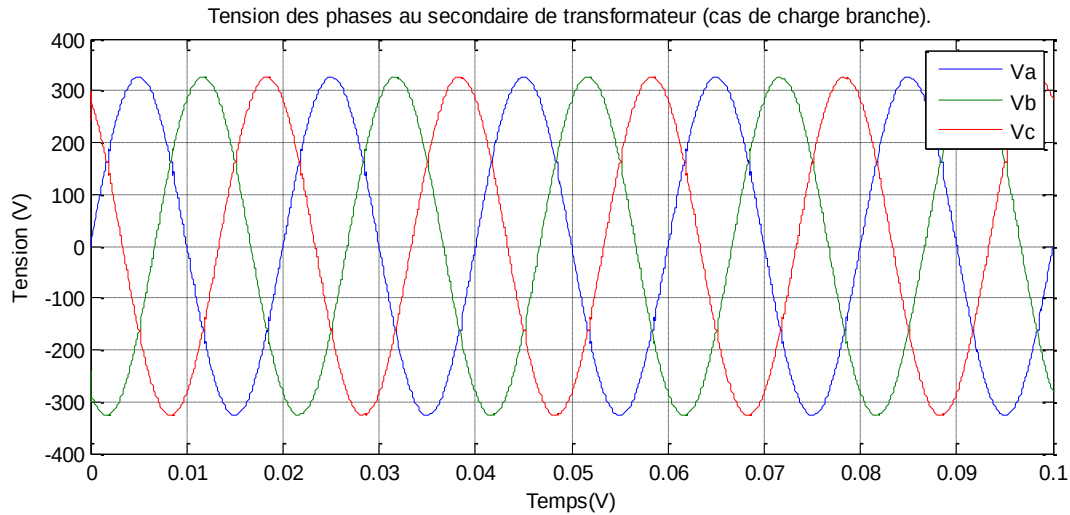


Fig. 4.25 : Tensions des phases au secondaire (Charge non linéaire branchée).

➤ Zoom de forme des tensions secondaires entre (0.01s et 0.03s) :

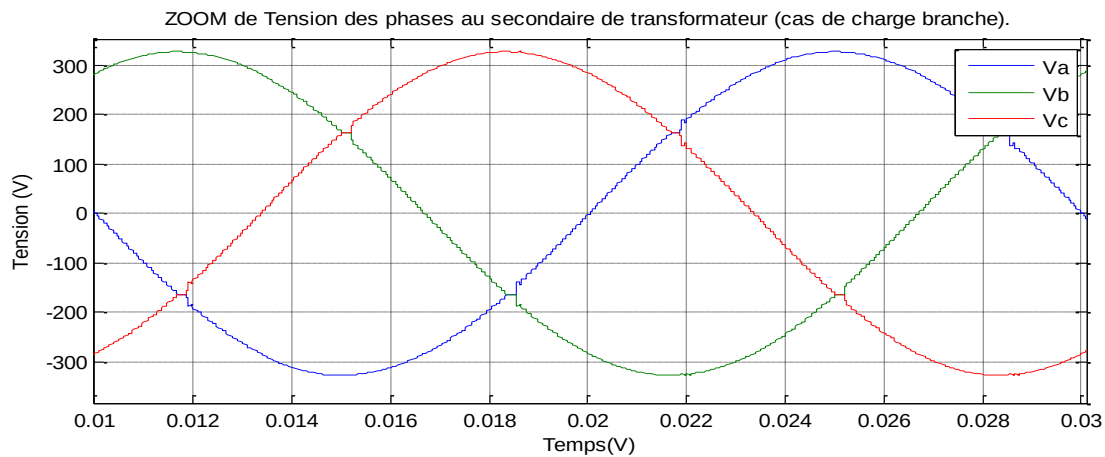


Fig. 4.26 : Zoom des tensions au secondaire (Charge non linéaire branchée).

D'après ces résultats on remarque que :

- Les formes d'ondes des tensions primaire restent sinusoïdale ;
- Des harmonique sont apparus au l'onde de courant dans les côtés (primaire et secondaire) ;
- Une distorsion des formes d'ondes des tensions secondaire ;
- Un THD=0.98 pour l'onde de tension d'une phase côté secondaire ;
- Un THD=13.68 pour l'onde de courant d'une phase côté secondaire.

#### 4.6.4. Analyse de Fourier (FFT)

Le bloc (powergui) est utilisé pour analyser le contenu harmonique avec le réglage jusqu'à 1000Hz et une fenêtre de 2 cycles. Il peut analyser jusqu'à 20 ordres d'harmoniques. L'analyse commence à 0,01 seconde jusqu'à 0,05 seconde.

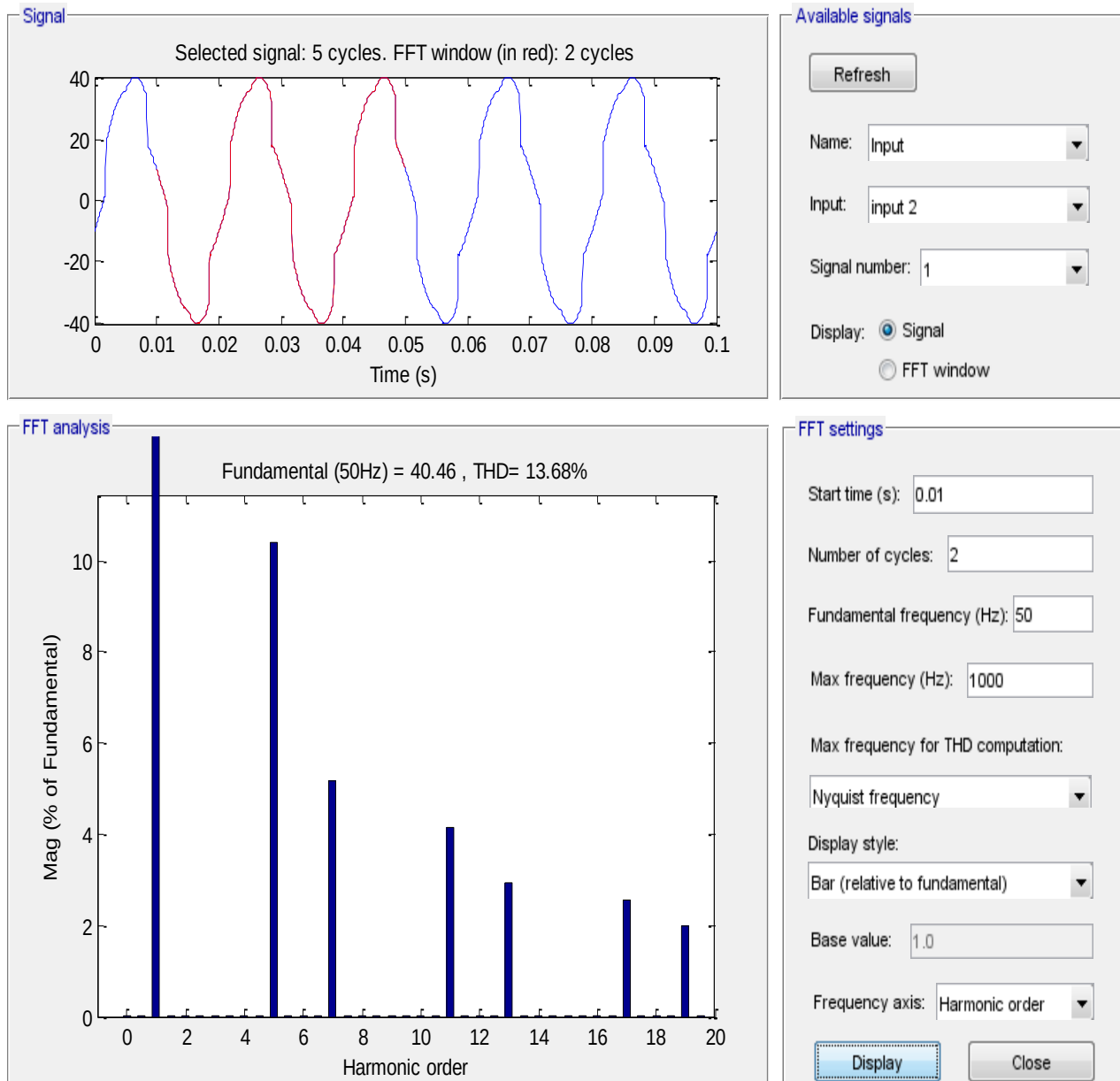


**Fig. 4.27 :** Analyse de Fourier (FFT) de courant pour la phase A au secondaire.

- **Remarque :** D'après la figure (Fig. 4.27), montre clairement le courant de la phase A composé d'un 5eme, 7eme, 11eme, 17eme et 19eme ordre inhabituel d'harmonique impair, qui est le caractéristique unique de branchement de charge non linéaire de type (redresseur triphasé).

#### 4.6.5. Conclusions

On peut dire que le branchement de la charge non lineaire appelle des courant non sinusoïdale au source d'alimentation. Le passage de ce courant a travers l'impédance de transformateur va déformer la forme de l'onde de tension cote secondaire. Ces harmoniques peuvent diminuent la durée de vie des équipements. Ils peuvent également provoquer par le troubles fonctionnels (synchronisation, commutation).

### 3.7. Conclusion

A travers cette simulation, des différents perturbations on a vu que l'utilisation de logiciel Matlab/Simulink nous a permis de voir toutes les perturbations dans les réseaux qui sont réellement difficile à remarquer, aussi la précision des résultats et un facteur caractéristique de ce logiciel.

Donc le logiciel Matlab/Simulink est un outil de simulation puissante et appropriée dans le domaine de simulation des perturbations dans les réseaux électriques.

## Conclusion Générale

Dans ce travail on a classé les perturbations en deux types selon leur origines : la première interne qui est liée à des grandeurs internes des réseaux, et l'autre externe qui est liée au milieu extérieure de réseaux. Pour objet ; d'étudier les différentes perturbations interne affectant la qualité de l'énergie électrique, d'analyser et simuler ces perturbations.

- Pour les surtensions, on a classe sur deux types, qui sont les surtensions a fréquence industrielle et les surtensions de manœuvre, le première type engendre les surtensions provoque par (un défaut d'isolement, ferorésonance ...) en plus les surtensions sur une longue ligne à vide. Dans la deuxième type on trouve les surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption des petits courants inductifs et les surtensions provoquée par les manœuvres sur des circuits capacitifs.
- Dans le cas des creux de tension, on trouve que l'origine principales des creux c'est les réseaux d'alimentation public et l'installation de l'utilisateur perturbé.
- Les surintensités, principalement provoque soit par les surcharges ou par les courts-circuits.
- Dans le cas des fluctuations de tension, on a distingué deux origines des variations de tension (rapides et périodiques, par à-coups).
- Dans le cas de déséquilibre des phases, on a vu que le déséquilibre est peut provoque par deux manière soit par (charges déséquilibré ou source déséquilibré) soit par une combinaison entre les deux.
- Pour les harmonique, on a vu que l'expression de Fourier permet de décomposer en une somme infinie des termes sinus et cosinus avec des fréquences multiples de fréquence de fondamentale tout signal périodique. Aussi on a identifie de tous les facteurs et grandeur liée a l'harmonique et exprimant le degré de distorsion d'un signal, les principales facteurs sont le facteur de distorsion harmonique THD, le facteur de puissance (FP).

En fin, on a effectué des simulations par l'utilisation de logiciel Matlab-Simulink pour voir comment les différentes perturbations interne affectant le réseau électrique, et cela ce fait par le choix de quelques exemples de simulation pour chaque type dans des réseaux virtuels et on observe les résultats pour chaque exemple. Comme résultat final de ces exemples de simulation, on remarque que chaque source de perturbation a un effet spéciale sur la qualité de tension ou de courant, y des sources qui influencent par déformation l'onde de tension ou de courant de façon permanant (Déséquilibres des charges, Harmoniques dus au branchement des charge non-linéaire). Par contre y des sources qui ont une influence transitoire (Creux de l'enclenchement des transformateur ,Surtension provoqués par l'enclenchement des batteries de condensateur).

## Références bibliographiques

- [1] Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (199).
- [2] Mohamad AlaaEddinAlali : «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension», Thèse de doctorat, Génie électrique. Université Louis Pasteur–Strasbourg, Septembre 2002.
- [3] VanyaIgnatova : «Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique». Thèse de doctorat, Genie electrique. université JOSEPH FOURIER, Octobre 2006.
- [4] Nicolas MONNEREAU : «Développement d'une méthodologie de caractérisation et de modélisation de l'impact des décharges électrostatiques sur les systèmes électroniques». Thèse de doctorat. Génie Electrique, UNIVERSITE Toulouse, décembre 2011.
- [5] Cédric Goëau : «Etude de la décharge électrostatique définie par le modèle du composant chargé CDM sur les circuits intégrés CMOS» thèse de doctorat en sciences option : école doctorale (EEA), 5 décembre 2005.
- [6] Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (141).
- [7] Rapport sur l'identification des dangers 2019 Section F : Sécurité publique.
- [8] Jacques UROUBME : «Conception assistée par ordinateur d'un système de protection de unes d'alimentation basse tension contre la foudre et L'IEM.N/H ». Thèse de doctorat, electronique physique, UNIVERSITE Paris-sud, France.
- [9] A.Bazine et T.Guia : « Mesure du champ électrique par la méthode de la sonde captive », projet de fin d'étude ENP Alger 2003.
- [10] Bastien François Olivier : «Contribution à l'étude de la transition vers la déchargeCouronne», Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, (1977).
- [11]<https://www.bba.ca/fr/publication/leffet-couronne-un-probleme-quil-ne-faut-pas-negligier/>,consulte le : 14 juillet 202.

- [12] J. Koller, V. Kriha, J. Pichal, L. Aubrecht : «Corona discharge light emission et electric field intensity comparison». Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54, 2004.
- [13] M.OUEIDAT, H.WARKOZEK, «Les Perturbations Electromagnétiques dans le Secteur Industriel Libanais et Syrien», 5th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, TUNISIA, March 22-26, 2009.
- [14] OMEIRI AMAR, «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant». Thèse de doctorat, Commande électrique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2007.
- [15] LAHMADI OUARDA «Contribution à l'identification et la commande d'un filtre actif parallèle par des techniques neuromimétiques» thèse de doctorat en sciences option : réseaux électriques, université de batna 2, 2017.
- [16] BOUTABA SAMIA : «Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC» mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef 09/06/2009.
- [17] O.Malaoui : «Elimination du déséquilibre dans les reseaux électrique», mémoire magister, reseaux électrique, ESTI, Annaba, October 2020.
- [18] Hanene Kouara : «Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [19] Norms IEEE Std 519-1992; IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems; 12 April 1993, Page(s):15- 99.
- [20] Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (151).
- [21] Christophe Prévé et Robert Jeannot : Guide de conception des réseaux électriques industriels.
- [22] Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (119).
- [23] <https://citel.fr/fr/les-eclateurs-a-gaz>, consulte-le : 25-07-2021.

- [24] BOUCHEKHLAL Ahmed, «Etude, conception et réalisation de capteurs à base de matériaux céramiques».thèse doctorat, Electronique, Université-Constantine, le 08/11/2018.
- [25] <http://www.bedwani.ch/electro/ch12/index.htm>, consulte le 27 juillet 202.
- [26]<https://www.tecnipass.com/cours-electronique.cem-cem.perturbations-cem.solutions?page=4#zoom45>, consulte le 28 juillet 2021.
- [27] Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (189).
- [28] Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (204).
- [29] Hakim Sakkou : «conception d'un compensateur actif multifonctions corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et les fours à arc», mémoire maîtrise en génie électrique Montréal, 09 janvier 2007.
- [30] MEGHEZZI Arezki, SIDI SAID.Abdenour : «Étude des surtensions dues à la ferorrésonance en phases incomplètes» , PFE, option : Réseaux Électriques, UMMTO,2013.
- [31] Sainz, L, Corcoles, F, Pedra, J,Guasch, L &Herraiz, S 2004, «Study of voltage sag effects on three-phase transformers», Harmonics and quality of power 2004, 11th International conference, 12-15 September 2004, IEEE, pp. 142-147.
- [32] M. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press on Power Engineering, 2000, pp. 139-251.
- [33] J. Koller, V. Kriha, J. Pichal, L. Aubrecht : «Corona discharge light emission et electric field intensity comparison». Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54, 2004.
- [34] Jean. Chatelain : «Machines électriques Volume 10 de Traité d'électricité» PPUR Presses polytechnique, ISBN : 2880740509, 9782880740504,Volume 10 de Traité d'électricité 623page 1 janvier 1989.
- [35] Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (176).
- [36] HARICI.Otmane :«étude d'un filtre actif à commande intelligente » doctoral de génie électrique, option : réseaux électriques, université des sciences et de la technologie d'Oran, 2012.

[37] Theodore Wildi : «électrotechnique» d'hydro Québec 3eme édition, page739.

[38] ZELLOUMA. Laid : «Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé», mémoire magister. Option : Commande des machines électriques, Annaba, 2006.

[39] S.Rabahallah : «Etude et calcul des pertes de puissance dues aux harmoniques dans un réseau électrique». Mémoire master, option : réseaux électrique Tizi-Ouzou, 2008.

## ملخص

تتأثر الشبكات الكهربائية أثناء عملها بمجموعة من الظواهر تعرقل وظيفتها و تؤدي إلى اضطرابات مختلفة باختلاف مصادر هذه الاضطرابات بحيث يمكن تقسيمها حسب مصادر ها حيث نجد اضطرابات ذات مصادر خارجية و أخرى ذات مصادر داخلية.

ركزنا في هذا العمل على دراسة الاضطرابات ذات المصادر الداخلية لأن مصادر ها متعلقة بعمل الشبكة و بالتالي يمكن التحكم بها و تسهل دراستها حيث يمكن إيجاد عوامل مميزة لدرجة تأثيرها في الشبكة الكهربائية, إضافة إلى هذه الدراسة قمنا باختيار نماذج افتراضية لأهم الأمثلة التي تؤدي إلى كل نوع من هذه الاضطرابات الداخلية باستعمال برنامج المحاكاة MATLAB-SIMULINK.

لقد أعطانا استخدام برنامج MATLAB-SIMULINK النتائج الصحيحة التي سمحت لنا بمعرفة كيف وإلى أي مدى يؤثر كل مثال على تشغيل الشبكة ومعداتها.

الكلمات المفتاحية : التيار الزائد، التوافقيات، تقلبات الجهد، عدم توازن الطور، انخفاضات الجهد، الجهد الزائد.

## Résumé

Les réseaux électriques sont affectés au cours de leurs fonctionnements par un ensemble des phénomènes qui entravent leurs fonctionnements et conduisent à des perturbations différentes selon les diverses sources de ces perturbations si bien qu'on peut les répartir selon leurs sources, où l'on retrouve des perturbations avec des sources externes et d'autres avec sources internes.

Dans ce travail, nous avons étudié les perturbations avec des sources internes, ces dernières sont liées au travail du réseau et peuvent donc être contrôlées et la facilité de leur étude. On peut trouver des facteurs distincts au degré de leur impact sur le réseau électrique, en plus, dans cette étude nous avons choisi des modèles hypothétiques avec des exemples plus importants qui conduisent à chaque type de ces perturbations internes en utilisant le programme de simulation MATLAB-SIMULINK,

L'utilisation de logiciel MATLAB-SIMULINK nous a donné les bons résultats qui nous permettent de savoir comment et dans quelle mesure chaque exemple affecte le fonctionnement du réseau et de ses équipements.

**Mots clés :** Surintensité, Harmoniques, Fluctuations de tension, Déséquilibre des phases, Creux de tension, Surtension.

## Abstract

Electrical networks are affected during their work by a number of phenomena that hinder their function and lead to different disturbances according to the different sources of these disturbances so that they can be divided according to their sources, where we find disturbances with external sources and others with internal sources.

In this work, we have studied the disturbances with internal sources, the latter are related to the work of the network and can therefore be controlled and the ease of their study. We can find distinct factors in the degree of their impact on the power grid, in addition, in this study we have chosen hypothetical models with larger examples that lead to each type of these internal disturbances using the simulation program MATLAB- SIMULINK.

Using MATLAB-SIMULINK software has given us the right results that let us know how and to what extent each example affects the operation of the network and its equipment.

**Keywords :** Overcurrent, Harmonics, Voltage fluctuations, Phase imbalance, Voltage dips, Overvoltage.