

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريش

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département électromécanique

## MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Électrotechnique

**Spécialité** : Commande électrique

**Par** : - ZEBIRI Bouzid

- ZARGOUNE Hamza

## Sujet

Étude et développement d'un suiveur résistant aux défauts d'un réseau  
d'énergie électrique

Soutenu publiquement, le : 01 / 07/2023 devant le jury composé de :

Dr. SAKHARA Saadi	MCB	Univ-BBA	Président
Dr. TALHAOUI Hicham	MCA	Univ-BBA	Examineur
Dr. IRATNI Abdelhamid	MCA	Univ-BBA	Encadrant
Dr. SIMHAMED Yamina		Univ-BBA	Co-Encadrant

Année Universitaire 2022/2023

## *Remerciements*

---

---

Nous remercions Allah, le Tout-Puissant, le Miséricordieux, de nous avoir enseigné ce que nous ignorions et de nous avoir accordé la santé et tout ce dont nous avons besoin pour mener à bien cette mémoire. Nous tenons à remercier en deuxième position nos chers parents et tous les membres de notre famille.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude envers nos superviseurs, la docteure Yamina SIMHAMED et le Professeur Abdelhamid IRATNI, pour leur orientation, leurs conseils et leur disponibilité. Nous les remercions également pour leur encouragement, leur tolérance et leur soutien tout au long de cette période de travail.

Nous voudrions également remercier et exprimer notre gratitude envers Dr. Saadi SAKHARA d'avoir présidé le jury de soutenance, Nous remercions Dr. Hicham TALHAOUI, docteur en département électromécanique, d'avoir accepté de participer au jury de soutenance et pour la pertinence de ses observations constructives, qui contribueront à améliorer la qualité de cette mémoire.

Nous ne pouvons pas oublier de remercier tous nos amis, collègues et enseignants qui ont contribué à la réalisation de cette mémoire, et qui n'ont jamais hésité à apporter leur aide et à répondre à nos questions et préoccupations fréquentes.

Enfin, nous demandons à Allah de bénir nos efforts et de les rendre le début d'une carrière dans la recherche scientifique.

BBA, le 21/06/2023

## *Dédicaces*

---

---

### *Dédicace 01*

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de  
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail : A ma mère et mon père*

*À mes très chers frères et ma sœur.*

*À toute ma famille A mes chers amis*

*À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*À tous ceux qui connaissent la famille zebiri*

*À tous les amis d'études.*

### *Dédicacé 02*

*Je dédie ce travail à mes chers parents, qui sont la raison de mon existence, à mes frères et sœurs, à mes proches et à tous mes amis, à mes professeurs qui m'ont aidé à trouver le chemin vers la chose la plus précieuse de la vie "la connaissance", et je veux surtout leur dire que c'est un grand honneur d'être l'un de leurs étudiants.*

*Au final je dois dire*

*Tout ce que j'ai pu dire ou accomplir aujourd'hui est par la grâce et la grâce de Dieu Tout.*

# *Listes des Acronymes et Symboles*

## **Symboles**

$I_n$  : courant nominal

$U_n$  : tension nominale

RNA : Réseau Neuronal Artificiel

GPS : Global Positioning System

T.O : La transformée en ondelettes

TOC : La Transformée en Ondelettes Continue

T.O.D : La Transformée en Ondelettes Discrète

TOP : Transformée par Ondelette Paquette

db : Daubechies

Sym : Familles d'ondelette Symlet

nLs : Le nombre approprié de niveaux de la décomposition

IEEE: Institution of Electrical & Electronic Engineers.

## **Acronymes**

$\Psi_0$  : Ondelette mère

$a_0$  : Facteur de dilatation

$b_0$ : Facteur de translation.

A : Ampère

I : Courant

KV : Kilovolts

S : Source

T : Tension

$V_{abc}$  : Tension à la phase A ou B ou C.

# Table des matières

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	1
Chapitre 01 : .....	2
Les Types des Défauts de Réseau Électrique.....	2
Causes Et Conséquences .....	2
<b>1.1 . Introduction</b> .....	3
1.2. Généralité sur les réseaux électriques .....	3
1.2.1. Définition de réseaux électrique : .....	3
1.2.2. Architecture globale d'un réseau électrique.....	3
1.3. Définition d'un défaut .....	5
1.4. Différents des défauts électriques .....	5
1.4.1 Défaut liées au courant .....	5
<b>1.4.1.1 Le court-circuit</b> .....	5
<b>1.4.1.2 La surcharge (Sous-intensité)</b> .....	6
<b>1.4.1.2 Surintensité</b> .....	6
<b>1.4.1.3 Le déséquilibre</b> .....	6
1.4.2 Défauts liées à la tension.....	6
<b>1.4.2.1 Surtension</b> .....	6
<b>1.4.2.2. Sous-tension</b> .....	7
<b>1.4.2.3. Creux de tension</b> .....	7
<b>1.4.2.4. Les Harmoniques</b> .....	7
1.5. Nature des défauts électriques .....	9
1.5.1. Fugitif.....	9
1.5.2. Permanent .....	9
1.5.3. Auto-extincteur .....	9
1.5.4. Semi-permanent.....	9
1.6. Les causes des défauts dans les lignes de transport [5].....	9
1.6.1 Le court-circuit .....	9
1.6.2. Les surtensions .....	10
1.6.3. Les surcharges .....	10
1.6.4 Les déséquilibres .....	10
<b>1.7 Les conséquences des défauts [5]</b> .....	10
1.7.1 Le court-circuit .....	10
1.7.2 Les surtensions .....	10
1.7.3 Les surcharges .....	10
1.7.4 Les déséquilibres .....	11

1.8 Les types des défauts de court-circuit.....	11
1.9 Caractéristiques des défauts de court-circuit .....	12
1.9.1 Durée des courts–circuits.....	12
1.9.2 Intensité du courant de court- circuit .....	12
1.10. Conclusion .....	12
Chapitre 02 :      Méthodes d’analyse des défauts d’un réseau électrique.....	13
2.1 Introduction.....	14
2.2 Méthodes de détection des défauts de réseau électriques.....	14
2.2.1. Logique floue .....	14
2.2.2. Filtre de Kalman.....	14
2.2.3 Techniques de Réseau de Neurones Artificiels (RNA).....	15
2.2.4 Techniques de Transformée en ondelettes (T.O).....	15
<b>2.2.4.1 Définition mathématique</b> .....	17
2.5. Principales Transformées en ondelettes.....	17
2.5.1 Transformée en ondelettes continue (TOC).....	18
2.5.2 Transformée en ondelettes discrète (TOD).....	19
2.5.3 Transformation par Paquets d'Ondelettes (TOP).....	20
2.6. Types d'ondelettes mères .....	20
2.6.1 Ondelettes de Haar .....	20
2.6.2 Ondelettes de Daubechies .....	20
2.6.3 Ondelettes de Morlet .....	21
2.6.4 Ondelettes de Symlets .....	21
2.6.5 Ondelettes de Coiflets .....	21
2.7 Le choix de l’ondelette mère.....	21
2.8. Application de la transformée en ondelette dans les réseaux électriques [20] .....	22
2.9 Avantages et Inconvénients des méthodes d'ondelettes .....	23
2.9.1 Avantages .....	23
2.9.2. Inconvénients .....	23
2.10 Critère du choix de niveau de décomposition et l’ondelette mère .....	24
2.10.1 Niveau de décomposition .....	24
2.11. Conclusion .....	25
Chapitre 03 : Résultats et Discussion .....	26
3.1 Introduction.....	27
3.2 Modélisation du système de lignes de transport propose.....	27
3.3 Mise en œuvre de la transformée en ondelettes.....	29
3.4 Comment appliquer la transformation en ondelettes sous Matlab .....	30

3.4.1 Syntaxe de transformation en ondelettes à appliquer au signal .....	30
3.4.2 Syntaxe de transformation en ondelettes pour les coefficients détaillés du signal .....	31
3.5 Démarches pour la détection des défauts .....	31
3.6 Différents types de défauts .....	32
3.6.1 Défaut monophasé à la terre (phase - terre).....	32
3.6.3 Défaut biphasé sans terre.....	33
3.6.4 Défaut triphasé .....	34
3.7 Implémentation de la transformé en l'ondelettes .....	34
3.8 Stratégie de détection par TOD .....	35
3.9 Conclusion.....	37
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	39
Références .....	40

## Liste des figures

---

---

### **Chapitre 01 : Les types des défauts de réseau électrique cause et conséquence**

Figure 1.1 : architecture générale de réseau électrique

Figure 1.2 : déséquilibré

Figure 1.3 : surtension

Figure 1.4 : Creux de tension (Chute de tension)

Figure 1.5 : Exemple d'un courant harmonique contenant l'harmonique d'ordre 3

Figure 1.6 : Exemple d'un courant harmonique contenant l'harmonique d'ordre 3

Figure 1.7 : Différents types de défaut

### **Chapitre 02 : Méthodes d'analyse des défauts de réseaux électriques**

Figure 2.1 : Exemples d'ondelette Mère.

Figure 2.2 : Décomposition d'un signal sinusoïdale par l'ondelette db2 au niveau 5

Figure 2.3 : Décomposition par TOD a 3 niveaux

Figure 2.5 : Pourcentage d'utilisation des ondelettes dans les différents domaines des réseaux électriques

Figure 2.4 : Bloc diagramme le processus de filtrage par TOD

### **Chapitre 03 : résultat et discussion**

Figure 3.1 : Schéma de simulation MATLAB du réseau électrique

Figure 3.2 : Formes d'onde de tension et de courant, cas de non-défaut

Figure 3.3 : Décomposition d'un signal sinusoïdale par l'ondelette db4 au niveau 6

Figure 3.4 : Formes d'onde de courant pour un défaut entre la phase A et terre

Figure 3.5 : Formes d'onde de courant pour un défaut deux phases (AC) et la terre

Figure 3.6 : Formes d'onde de courant pour un défaut deux phases (AB) Sans terre

Figure 3.7 : Montrant un défaut triphasé en utilisant du programme Matlab



## *Liste des tableaux*

---

---

### **Chapitre 01 : Les types des défauts de réseau électrique cause et conséquence**

Tableau 1.1 : récapitule quelques perturbations électriques, son origine, conséquences, et les solutions possibles

### **Chapitre 03 : résultat et discussion**

Tableau 3.1 : étapes pour l'implémentation de la transformation en ondelettes

Tableau 3.2 : Coefficients détaillés de courant de toutes les phases et du courant de terre pour différents types de défauts.

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'électricité est l'une des formes d'énergie les plus essentielles dans notre monde moderne. Elle alimente une large gamme d'appareils et de systèmes, allant des dispositifs électroniques personnels aux grandes infrastructures industrielles. Cependant, malgré les nombreux avantages qu'elle offre, l'électricité n'est pas exempte de problèmes et des défauts qui peuvent provoquer des interruptions de courant, des dysfonctionnements des équipements et des pertes financières importantes pour les industries et les consommateurs.

Ces problèmes majeurs soulignent l'importance de la recherche dans ce domaine pour assurer la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques, assurant ainsi la qualité de l'énergie et la continuité de l'alimentation. À cet effet, de nombreuses techniques de traitement du signal ont été utilisées dans la littérature, parmi lesquelles, la technique de la transformée en ondelettes a retenu notre attention pour ses nombreux avantages.

Dans cette étude, nous examinerons en détail la méthode de transformée en ondelettes pour l'analyse et la détection des défauts dans les réseaux électriques. Nous avons exploré l'application et l'implémentation de la technique proposée dans Matlab. En comprenant et en utilisant ces méthodes, il est possible d'améliorer la fiabilité et la qualité de l'électricité, garantissant ainsi une alimentation stable et sûre pour les utilisateurs et les industries.

Ce travail de mémoire se compose de trois chapitres. Chaque chapitre est présenté comme suit :

- Le premier chapitre aborde des généralités sur les réseaux électriques, les différents types des défauts électriques, ainsi leurs origines et leurs conséquences.
- Le deuxième chapitre présente les différentes méthodes utilisées pour la détection des défauts électriques dans littérature, telles que la logique floue, les réseaux de neurones, etc. il est également basé sur la transformé en ondelettes, ses formules mathématiques, familles et types, avantages et inconvénients. Il met également en évidence l'utilisation de la transformée en ondelettes dans le domaine électrique.
- Le troisième chapitre discute les résultats obtenus en appliquant la méthode de la transformé en ondelette pour détecter les défauts de court-circuit dans les lignes de transmission.

L'étude se termine par une conclusion qui fournit un résumé général et les principales contributions.

**Chapitre 01 :**

**Les Types des Défauts de  
Réseau Électrique**

**Causes Et Conséquences**

## 1.1. Introduction

Les réseaux électriques jouent un rôle crucial dans la fourniture d'énergie électrique à nos vies modernes. Ils sont responsables de la transmission et de la distribution de l'électricité depuis les centrales de production jusqu'aux consommateurs finaux. Cependant, ces réseaux ne sont pas à l'abri des erreurs et des défauts qui peuvent survenir à différents niveaux de leur fonctionnement.

Les perturbations ou les défauts dans les réseaux électriques peuvent avoir des conséquences significatives, allant de perturbations mineures à des pannes généralisées. Ils peuvent entraîner des interruptions de service, des pertes de production, des dommages matériels et même des risques pour la sécurité des personnes. Par conséquent, la détection, la localisation et la correction rapide de ces erreurs sont essentielles pour assurer un fonctionnement fiable et efficace du réseau électrique.

Les défauts électriques peuvent être divisés en erreurs liées à la tension (Surtension, Sous-tension, Fluctuations de tension, Creux de tension...etc.) et outre liées au courant Sous-intensité, Surintensité, Court-circuit, Défaut d'isolement, perturbation harmonique ...etc.). Ces défauts de tension ou de courant peuvent avoir un impact sur la stabilité du réseau électrique, la qualité de l'énergie fournie aux consommateurs, et la durée de vie des équipements électriques.

## 1.2. Généralité sur les réseaux électriques

### 1.2.1. Définition de réseaux électrique :

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter et distribuer l'énergie électrique pour l'acheminer de la source (générateur) vers la charge (consommateur). Cet ensemble comporte des générateurs, des transformateurs, des lignes, des appareils de mesures et de contrôles, des appareils de protections contre tous les types de défauts en veillant sur la qualité de l'énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension.

### 1.2.2. Architecture globale d'un réseau électrique

Le réseau électrique comprend plusieurs éléments interconnectés qui permettent de transporter et de distribuer l'énergie électrique de manière efficace et sûre. La figure 1-1 présente une architecture générale avec les différents composants d'un réseau électrique. Cependant, la description des composants de cette architecture est :

- **Centrales de production :** Ce sont les installations où l'énergie électrique est générée. Il peut s'agir de centrales thermiques, hydrauliques, nucléaires, éoliennes, solaires, etc. Ces

centrales produisent de l'électricité en convertissant différentes sources d'énergie en énergie électrique.

- **Réseaux de transport** : Une fois produite, l'électricité est acheminée à travers des réseaux de transport à haute tension. Ces réseaux sont composés de lignes à haute tension qui permettent de transporter l'énergie sur de longues distances, parfois à travers plusieurs régions ou pays. Les lignes à haute tension minimisent les pertes d'énergie lors du transport.
- **Postes de transformation** : Les postes de transformation sont des installations où la tension de l'électricité est modifiée pour s'adapter aux besoins de distribution. Les transformateurs sont utilisés pour augmenter ou diminuer la tension de l'électricité en fonction des différentes tensions requises par les consommateurs.
- **Réseaux de distribution** : Les réseaux de distribution acheminent l'électricité des postes de transformation vers les consommateurs finaux tels que les résidences, les entreprises, les industries, etc. Ces réseaux sont composés de lignes à moyenne tension et à basse tension qui sont connectées aux installations des utilisateurs.
- **Points de livraison** : Les points de livraison sont les endroits spécifiques où l'électricité est fournie aux utilisateurs. Il peut s'agir de compteurs individuels dans les maisons ou les locaux commerciaux, où la consommation d'électricité est mesurée pour des raisons de facturation.

L'architecture globale du réseau électrique est conçue pour assurer un approvisionnement fiable en énergie électrique à grande échelle. Elle nécessite une planification minutieuse, une coordination entre les différents acteurs du secteur de l'énergie et des dispositifs de contrôle et de protection pour assurer la stabilité et la sécurité du réseau.

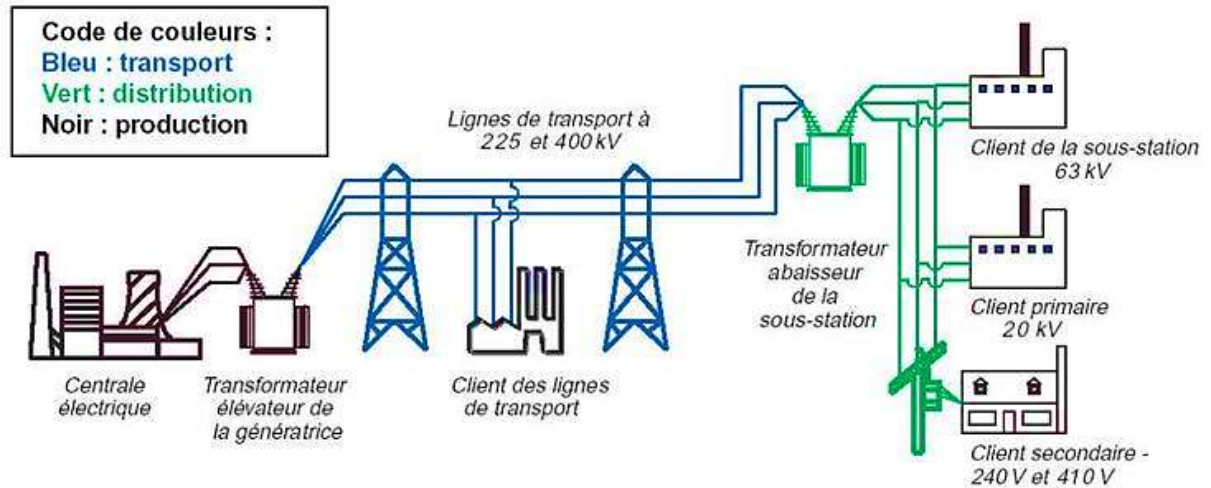


Figure 1.1 : architecture générale de réseau électrique

### 1.3. Définition d'un défaut

Un défaut est caractérisé par un phénomène non conforme au fonctionnement normal du réseau et pouvant, dans certain cas, conduire à un effondrement électrique de celui-ci et à la mise en danger de son environnement [2].

Le défaut peut être causé par des facteurs externes (naturels) ou internes (par l'action humaine ou par un mauvais équipement).

### 1.4. Différents des défauts électriques

Nous pouvons les classer en deux catégories principales liée au courant et au tension, ainsi des défauts selon leurs types, leurs natures, leurs origines et même leurs durées. En fait, les défauts les plus fréquents sont des surtensions, la plupart se produisent temporairement résultant un court-circuit, généralement due à des facteurs d'environnementaux tels que les éclairs (foudre). Ils peuvent aussi se produire par un défaut dans l'isolation due à la détérioration du matériel d'isolation en lui-même. En ce que suit, nous avons mentionné les défauts les plus courants :

#### 1.4.1 Défaut liées au courant

##### 1.4.1.1 Le court-circuit

Est une élévation brutale de l'intensité  $I > (10 \text{ a } 1000)$  dans un circuit due à une liaison accidentelle de deux points de potentiel différents alimentés par la même source ou des

sources en parallèles. Les courts-circuits peuvent provoquer des dégâts économiques importants s'ils ne sont pas éliminés rapidement par les systèmes de protection [3].

#### 1.4.1.2 La surcharge (Sous-intensité)

Cela se produit lorsque le courant dans un circuit est inférieur à la valeur nominale attendue, ce qui peut entraîner un fonctionnement insuffisant des appareils électriques.

#### 1.4.1.2 Surintensité

Il s'agit d'une augmentation du courant par rapport à la valeur nominale, ce qui peut provoquer des surchauffes, des dommages aux appareils et des risques d'incendie.

#### 1.4.1.3 Le déséquilibre

Un système électrique triphasé est déséquilibré lorsque les trois courants de phases et les trois tensions ont des valeurs différentes. Figure 1-6 montre un déséquilibré.

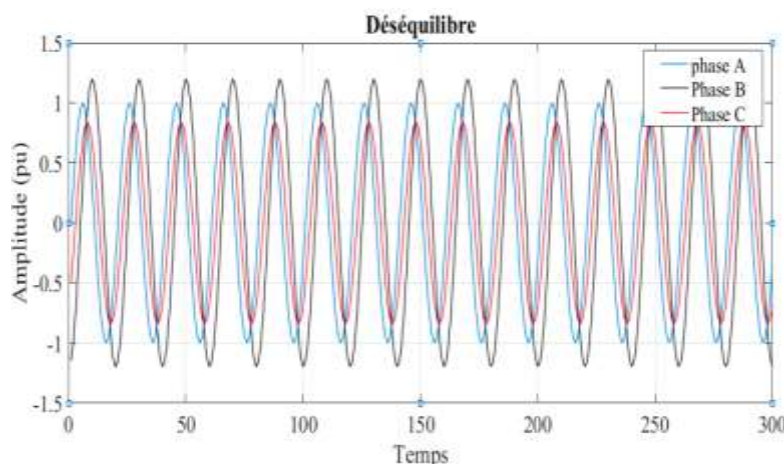


Figure 1.2 : déséquilibré

### 1.4.2 Défauts liés à la tension

#### 1.4.2.1 Surtension

Cela se produit lorsque la tension dépasse la valeur nominale prévue, ce qui peut endommager les équipements électriques sensibles.

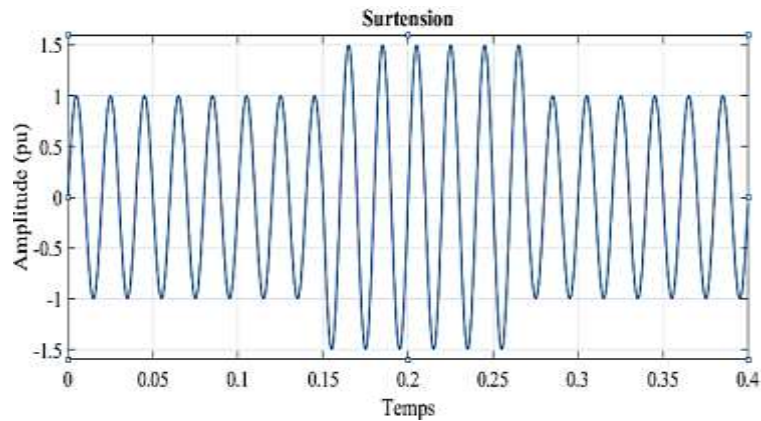


Figure 1.3 : surtension

#### 1.4.2.2. Sous-tension

Il s'agit d'une diminution de la tension par rapport à la valeur nominale, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des appareils électriques et une baisse de performance.

#### 1.4.2.3. Creux de tension

Il s'agit d'une chute brève de la tension en dessous de la valeur nominale, ce qui peut provoquer des dysfonctionnements temporaires des équipements

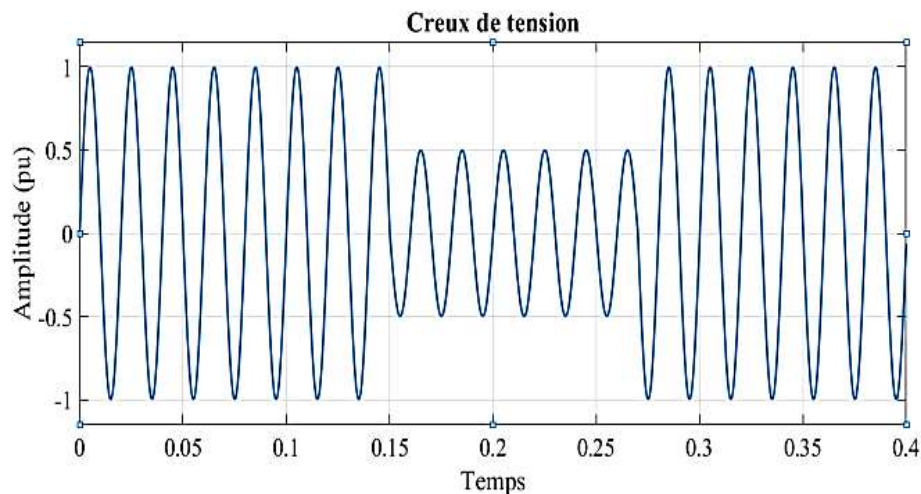


Figure 1.4 : Creux de tension (Chute de tension)

#### 1.4.2.4. Les Harmoniques

Ce sont des composantes de tension ou de courant qui se produisent à des fréquences multiples de la fréquence fondamentale du système, ce qui peut entraîner des distorsions du signal et des problèmes de qualité de l'énergie électrique.



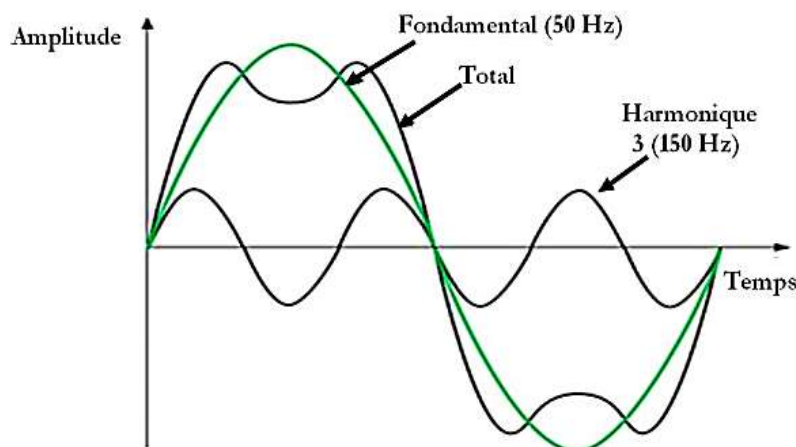


Figure 1.5: Exemple d'un courant harmonique contenant l'harmonique d'ordre 3

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

Tableau 1.1: récapitule quelques perturbations électriques, son origine, conséquences, et les solutions possibles [6].

## 1.5. Nature des défauts électriques

### 1.5.1. Fugitif

Ce défaut nécessite une coupure très brève du réseau d'alimentation de l'ordre de quelques dixièmes de seconde [3]. Par exemple : balancement des conducteurs sous l'effet du vent, objets divers charriés par le vent, brouillard givrant, pluie en zone polluée, branche d'arbre proche d'une ligne...etc.

### 1.5.2. Permanent

Ce défaut provoque un déclenchement définitif de l'élément de protection. Il nécessite l'intervention du personnel d'exploitation [3]. Par exemple : Rupture d'un câble, ou de sa pince d'ancrage, et chute sur le sol, chute d'un arbre sur la ligne, acte de malveillance conduisant, par exemple, à la ruine d'un pylône, détoronage d'un brin de conducteur, qui s'approche d'une autre masse métallique.

### 1.5.3. Auto-extincteur

C'est le défaut qui disparaît spontanément en des temps très courts sans qu'il provoque le fonctionnement de la protection ou la coupure de l'alimentation [3],[4].

### 1.5.4. Semi-permanent

Ce défaut exige une ou plusieurs coupures relativement longues de l'ordre de quelques dizaines de secondes pour disparaître. Il ne nécessite plus l'intervention du personnel d'exploitation.

Au niveau des réseaux aériens de transport de SONELGAZ, les défauts sont [3] :

- De 70 à 90% fugitifs.
- De 5 à 15% semi permanents
- De 5 à 15% permanents

## 1.6. Les causes des défauts dans les lignes de transport [5]

### 1.6.1 Le court-circuit

- Origine électrique : altération d'un isolant, arcs...
- Origine mécanique : rupture d'un conducteur, chute d'un corps étranger...
- Origine atmosphérique : foudre, tempête...
- Origine humaine : fausse manœuvre

### 1.6.2. Les surtensions

- Contact avec une ligne de plus forte tension.
- Coupure brutale d'une ligne.
- Capacité des longues lignes à vide.
- Coups de foudre directs ou indirects.

### 1.6.3. Les surcharges

- Courts-circuits résistants.
- Couplage difficiles, démarrage de moteur.
- Report de charge sur une ligne ou une machine, lors de la coupure de la parallèle.

### 1.6.4 Les déséquilibres

- Coupure d'une bretelle sans mis à la terre.
- Pôles de sectionneurs ou de disjoncteurs laissés ouverts.

## 1.7 Les conséquences des défauts [5]

### 1.7.1 Le court-circuit

- Détérioration des isolants.
- Fusion des conducteurs.
- Incendie et danger pour les personnes.
- Les efforts électrodynamiques, avec : déformation des jeux de barres.
- Arrachement des câbles.
- Sur-échauffement par augmentation des pertes joules.
- Les creux de tension pendant la durée d'élimination du défaut, de quelques
- Millisecondes à quelques centaines de millisecondes.
- La mise hors service d'une plus ou moins grande partie du réseau.

### 1.7.2 Les surtensions

- Vieillissement des isolants et claquage.
- Surcharge des lignes en cas de durée prolongée.
- Amorçage de court-circuit en cas de claquage des isolants.

### 1.7.3 Les surcharges

- Effets calorifiques.
- Effets déjà exposés pour les surintensités dues au court-circuit.

### 1.7.4 Les déséquilibres

- Dans les réseaux HT ne comportant que 3 fils, la somme des courants n'est plus nulle.
- Un courant de retour passe dans le sol par le neutre des transformateurs et induit des tensions dangereuses dans les câbles de télécommunication voisins.
- En outre ce courant de retour produit dans l'appareillage, des courants de circulation engendrant des échauffements anormaux.

### 1.8 Les types des défauts de court-circuit

Il existe quatre types :

- Défaut monophasé à la terre : correspond à un défaut entre une phase et la terre, c'est le court-circuit le plus fréquent [3].
- Défaut biphasé à la terre : Il correspond à un défaut entre deux phases de la ligne de transport et la terre.
- Défaut biphasé isolé : Il correspond à un défaut entre deux phases de la ligne de transport. Le courant résultant est plus faible que dans le cas du défaut triphasé, sauf lorsqu'il se situe à proximité immédiate d'un générateur.
- Défaut triphasé : Il correspond à la réunion des trois phases de la ligne de transport. Il est peu fréquent [6]. Mais c'est le courant de CC le plus élevé.

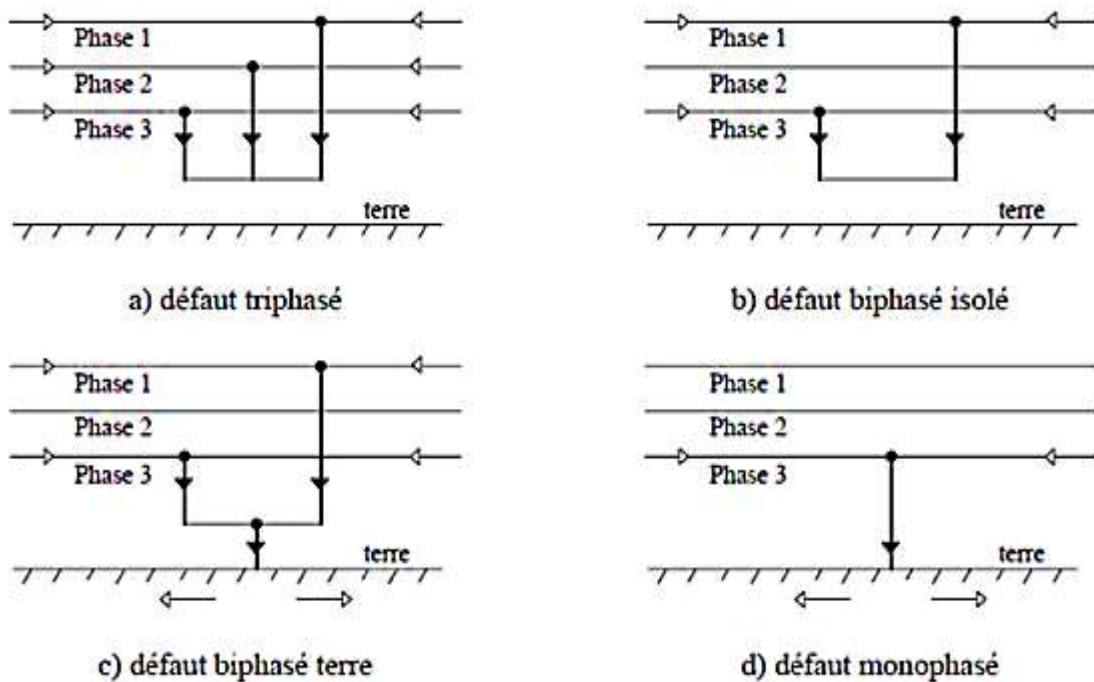


Figure 1. 6 : Différents types de défaut [6]

## 1.9 Caractéristiques des défauts de court-circuit

Les courts-circuits sont caractérisés par leur forme, leur durée et l'intensité du courant. Les ingénieurs en réseaux électriques utilisent souvent le terme « défaut » [7].

### 1.9.1 Durée des courts-circuits

Un défaut est toujours le résultat d'un manque d'isolement ; Si ce manque d'isolement est durable, le court-circuit est dit permanent dans le cas contraire est appelé fugitif [7].

### 1.9.2 Intensité du courant de court- circuit

L'intensité du courant de court-circuit est une caractéristique importante, elle détermine la sévérité de la contrainte appliquée au réseau et au matériel en défaut. Elle dépend de la forme de court-circuit et, pour ceux impliquant la terre, du mode de mise à la terre des points neutres [8].

## 1.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de défauts dans le réseau électrique soit de coté de courant ou de la tension. Le chapitre introduit les causes, les conséquences de chaque défaut, encore l'impact de ces défauts sur la qualité d'énergie électrique. D'après ce que nous avons introduit, on remarque que le défaut de court-circuit est directement lié à tous les autres types de perturbation électrique. Par conséquent, nous en avons fait l'objet de notre étude dans ce qui suit.

**Chapitre 02 :**  
**Méthodes d'analyse des**  
**défauts d'un réseau**  
**électrique**

## 2.1 Introduction

La détection des défauts est une tâche nécessaire pour la surveillance et la protection de réseau électrique. Ou, la détection précise des défauts améliore les fonctionnements de système électrique et protège contre des éventualités indésirables. Pour cette raison, différentes techniques de traitement de signal ont été utilisées pour la détection des défauts. Notamment, des approches basées sur les ondes progressives, le filtrage de Kalman adaptatif, la logique floue, les réseaux neuronaux et la fusion de différentes techniques d'intelligence artificielle. Plusieurs chercheurs ont proposé différentes techniques de détections des défauts des lignes de transmission en utilisant différents types de réseaux neuronaux et leur combinaison avec différentes transformées, telles que les ondelettes et les transformées hyperboliques.

Dans ce chapitre, nous avons abordé certain nombre d'approches proposées dans la littérature pour la détection des défauts. Avantages et inconvénients de chaque technique sont introduit. De plus, le chapitre s'est concentré sur la transformée en ondelettes qu'est l'objectif du chapitre suivant.

## 2.2 Méthodes de détection des défauts de réseau électriques

### 2.2.1. Logique floue

logique floue est une extension de la logique booléenne qui a été introduite par Lotfi Zadeh en 1965, en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous. Au cours des 15 dernières années, les techniques de traitement des signaux flous ont attiré une attention considérable, et de nombreuses études ont été menées dans des centres de recherche pour explorer leur application dans les domaines de la protection et du contrôle des systèmes électriques

Les systèmes de logique floue sont bien adaptés à la résolution de divers problèmes de prise de décision, en particulier lorsque le modèle analytique n'est pas connu ou est très compliqué (c'est-à-dire non linéaire) [9].

### 2.2.2. Filtre de Kalman

En 1960, Kalman a introduit le filtre de Kalman comme une alternative au filtre de Wiener [10][11]. Ce filtre est une méthode statistique d'assimilation de données qui se base sur un modèle d'état linéaire. Son principe consiste à corriger la trajectoire du modèle en combinant les observations avec les informations fournies par le

modèle, afin de minimiser l'erreur entre l'état réel et l'état estimé. Pour cela, il utilise un critère d'optimisation qui exploite toutes les observations depuis le temps initial jusqu'au temps courant. Le filtre de Kalman est un observateur récursif qui repose sur plusieurs hypothèses, notamment en ce qui concerne les bruits. Il suppose que les bruits affectant le modèle sont centrés, blancs et non corrélés avec les états estimés. De plus, les bruits d'état doivent être non corrélés avec les bruits de mesure [12][13].

La réponse du filtre à chaque instant dépend uniquement du signal observé à son entrée et de sa réponse à l'itération précédente. Ainsi, le filtre de Kalman n'a pas besoin de toutes les données passées pour produire une estimation à l'instant courant. Cela élimine la nécessité de stocker ou de retraiter les données, ce qui permet d'implémenter le filtre de Kalman dans des applications en temps réel [14]. Il est utilisé pour modéliser les systèmes qui peuvent être décrits par des équations différentielles linéaires stochastiques.

### **2.2.3 Techniques de Réseau de Neurones Artificiels (RNA)**

Le Réseau de Neurones est un outil puissant utilisé dans divers domaines, y compris la détection des défauts de réseau électrique. Il utilise des modèles mathématiques inspirés des réseaux de neurones biologiques. La technique RNA est capable de traiter des données complexes et d'apprendre à reconnaître des schémas et des anomalies. Il s'agit d'un système adaptatif dont la structure change en fonction de la phase d'apprentissage et qui réagit aux nouveaux événements de la manière la plus appropriée sur la base des expériences acquises lors de l'entraînement [15].

La méthode RNA peut être formé pour analyser les données de mesure telles que la tension, le courant et la fréquence, afin de détecter les anomalies qui pourraient indiquer un défaut dans le réseau. En s'entraînant sur un ensemble de données comprenant des exemples de défauts connus et de conditions normales, le RNA peut apprendre à distinguer les schémas caractéristiques des défauts électriques et à les détecter avec précision [16].

### **2.2.4 Techniques de Transformée en ondelettes (T.O)**

La transformée en ondelettes est l'un des outils les plus puissants utilisés en traitement du signal. Elle permet d'analyser les signaux à différentes résolutions grâce à la décomposition multi-échelle qu'elle induit.



La transformée en ondelettes repose sur l'utilisation d'une famille de fonctions appelées "ondelettes", qui sont des oscillations localisées dans le temps et possédant une certaine bande passante fréquentielle. Ces ondelettes sont utilisées pour analyser le signal en le décomposant en différentes composantes à différentes échelles, basée sur l'analyse du signal en utilisant différentes échelles dans le domaine temporel et fréquentiel. Le terme ondelettes a été introduit par le géophysicien français Jean Morlet [17].

Dans la figure 2.1, plusieurs exemples d'ondelette mère sont présentés. Les ondelettes peuvent être considérées comme une classe de fonctions qui permettent de localiser un signal donné à la fois dans les domaines temporel et fréquentiel. Ces ondelettes sont construites à partir d'une ondelette mère, qui peut être dilatée ou déplacée pour ajuster la taille de la fenêtre.

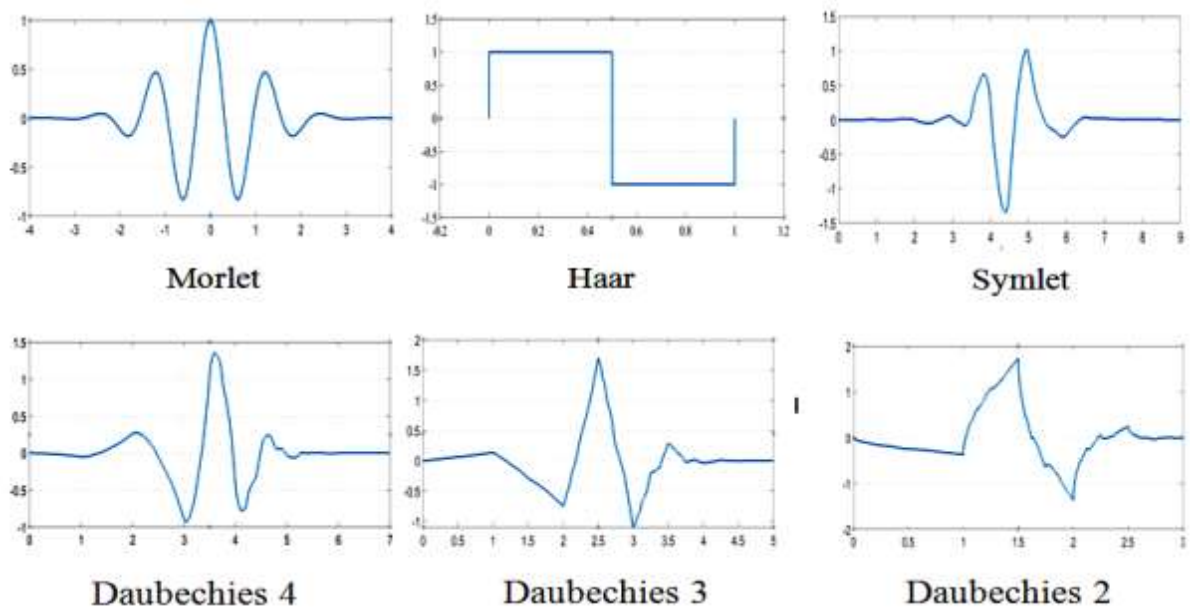


Figure 2.1 : Exemples d'ondelette Mère.

Cela implique qu'une ondelette translatée donne plus d'informations sur le temps et une version dilatée de celle-ci examine les informations de fréquence. Ainsi, les ondelettes s'adaptent automatiquement aux composants de haute fréquence ou de basse fréquence en utilisant différentes tailles de fenêtre.

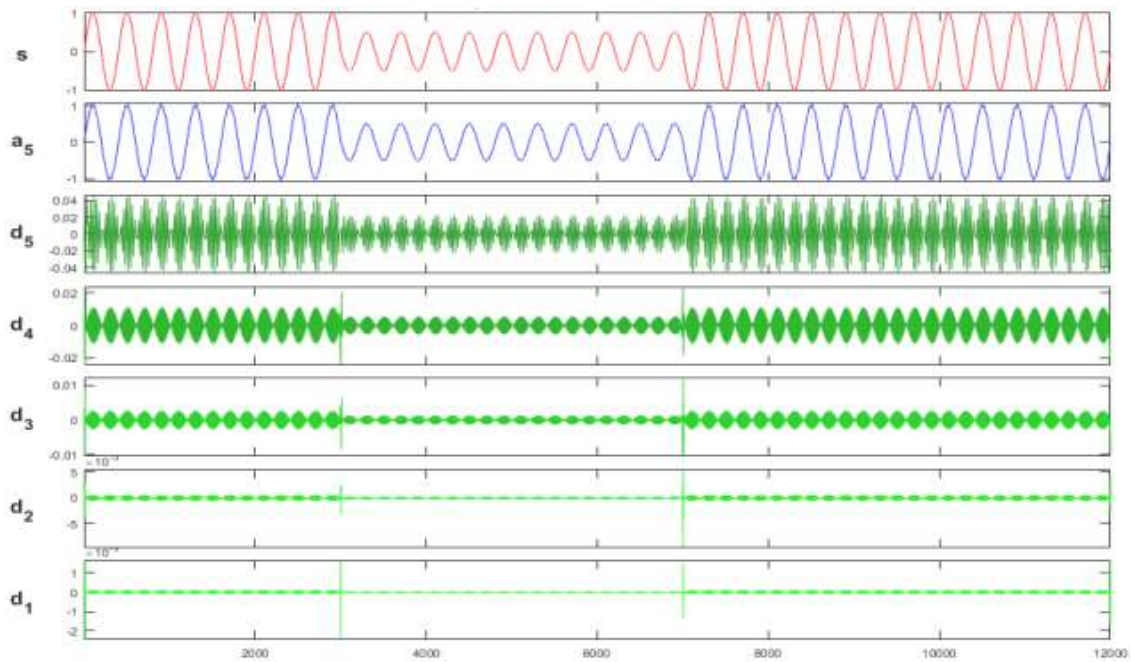


Figure 2.2 : Décomposition d'un signal sinusoïdale par l'ondelette db2 au niveau 5

### 2.2.4.1 Définition mathématique

Les ondelettes qui sont générées à partir d'une ondelette mère en utilisant des dilatations (domaine fréquentiel) et des translations (décalées dans le temps) peuvent être exprimées avec l'équation suivante [18] :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0 \left( \frac{t-b}{a} \right) \tag{2.1}$$

Où  $\psi_0$  est l'ondelette mère qui doit satisfaire  $\int \psi_0(x) dx = 0$

'a' facteur de dilatation et 'b' le facteur de translation.

Les ondelettes sont de forme constante mais de taille variable, proportionnelle au paramètre de dilatation « a » (variable d'échelle). La transformation en ondelettes est aussi interprétée comme étant un processus de filtrage du signal analysé par un filtre passe-bande de bande passante variable, c'est le paramètre « a » qui fixe la valeur de cette bande [19].

### Exemple

Dans la figure 2-2, on a appliqué l'ondelette mère db2 à 5 niveaux pour un signal sinusoïdal de fréquence  $f=50$  Hz et qui est représenté par la relation suivante :

$$y = (1 - \alpha((u(t - t_1) - u(t - t_2)))) * \sin(\omega t) \tag{2.2}$$

## 2.5. Principales Transformées en ondelettes

On distingue principalement deux types de transformée en ondelettes :

### 2.5.1 Transformée en ondelettes continue (TOC)

La transformée en ondelettes continue (Continuous Wavelet Transform - CWT) est une technique d'analyse de signal utilisée pour étudier les propriétés locales d'un signal à différentes échelles. Contrairement à la transformée de Fourier, la TOC permet d'analyser les signaux non stationnaires et de détecter les changements de fréquence au fil du temps.

La TOC utilise une fonction d'ondelette pour analyser le signal. Une ondelette est une petite fonction qui est déplacée et dilatée à différentes échelles pour représenter différentes fréquences.

L'ondelette continue (TOC) est défini par un signal continu  $x(t)$  qui est multiplié par les conjugués complexes de dilatation et translation de l'ondelette mère.

Le TOC est défini comme suit : est l'ondelette mère décalée par un facteur ( $b$ ), mis à l'échelle par un facteur ( $a$ ), les grandes et les basses échelles sont respectivement correspondantes aux fréquences élevées et les basses fréquences [19].

Mathématiquement, la TOC d'un signal  $x(t)$  par rapport à une ondelette mère  $\psi$  ( $a, b$ ) est définie comme suit :

$$\text{TOC}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a,b}^* dt \quad (2.3)$$

Où  $x(t)$  est le signal à analyser :  $\psi_{a,b}$  est l'ondelette mère décalée par un facteur ( $b$ ), mise à l'échelle par un facteur ( $a$ ), les grandes échelles et basses sont respectivement correspondantes avec les fréquences élevées et basses, et  $*$  désigne une conjugaison complexe. [20]

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad a > 0 \text{ et } -\infty < b < +\infty \quad (3.4)$$

où  $a$  représenté l'échelle (ou la fréquence) et  $b$  représente le décalage temporel.

La TOC produit une représentation 2D du signal, où l'axe horizontal représente le temps et l'axe vertical représente l'échelle ou la fréquence. Les valeurs de la TOC correspondent à l'amplitude du signal à chaque position temporelle et échelle.

La TOC est utilisée dans de nombreux domaines, y compris le traitement du signal, l'analyse des images, la détection de motifs et la compression de données. Elle permet de détecter des caractéristiques locales, des changements de fréquence et des structures transitoires dans les signaux, ce qui en fait un outil puissant pour l'analyse de divers types de signaux.

### 2.5.2 Transformée en ondelettes discrète (TOD)

L'outil TOD est utilisé pour décomposer un signal discret en différents niveaux de résolution (figure 2.3). Le TOD est un cas spécial de la transformée en ondelette qui fournit un outil de base pour l'extraction de fonctionnalités des signaux discrets et donne une représentation compacte de ce signal en temps et en fréquence [19].

La transformation en ondelettes continué génère une grande quantité de données sous la forme de coefficients d'ondelettes, en fonction de l'échelle et de la position. Cela entraîne une charge de calcul importante. Pour surmonter cette limitation, la TOD est utilisée. En d'autres termes, dans la pratique, l'application de la transformation en ondelettes est réalisée sur des ordinateurs numériques en appliquant la TOD sur des échantillons discrets.

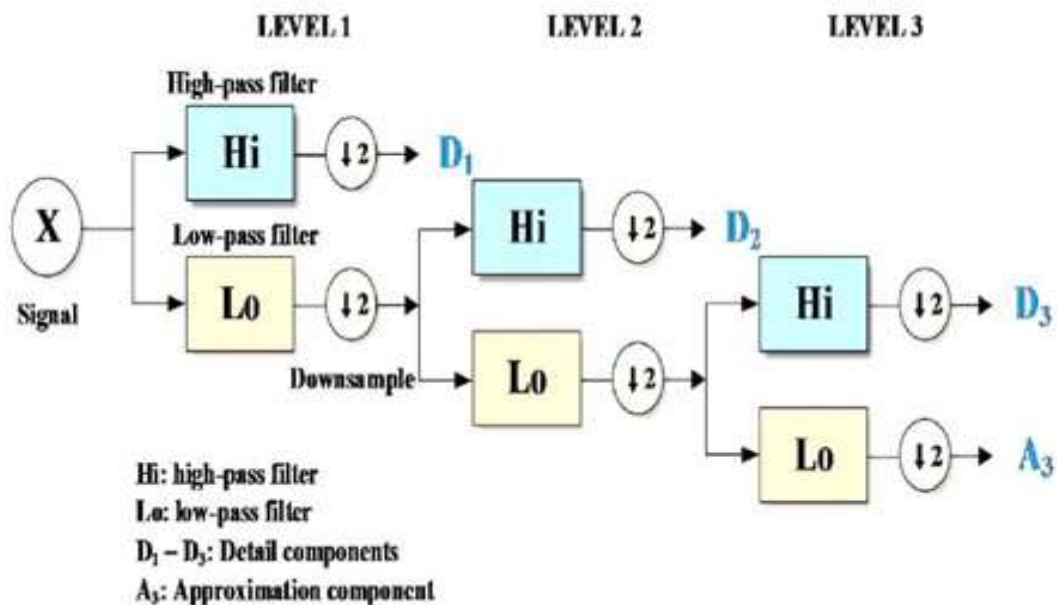


Figure 2.3 : Décomposition par TOD a 3 niveaux

La TOD est définie comme suit :

$$TOD(m, n) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi_{m,n}^* dt \quad (.35)$$

$$\psi_{m,a}(t) = a_0^{-m/2} \psi((t - a_0^m b_0)/a_0) \quad (.36)$$

$a = a_0^m$  et  $b = nb_0 a_0^m$ , où  $a_0 > 1$ ,  $b_0 > 0$ , et  $m, n$  sont des nombres entiers.

Dans l'analyse multi résolution (MRA), le contenu basse fréquence (sortie du filtre LP) "Lo" low pass filter est appelé le coefficient d'approximation (A) et le contenu haute fréquence (sortie du filtre HP) "Hi" high-pass filtre et appelé coefficient de détail (D).

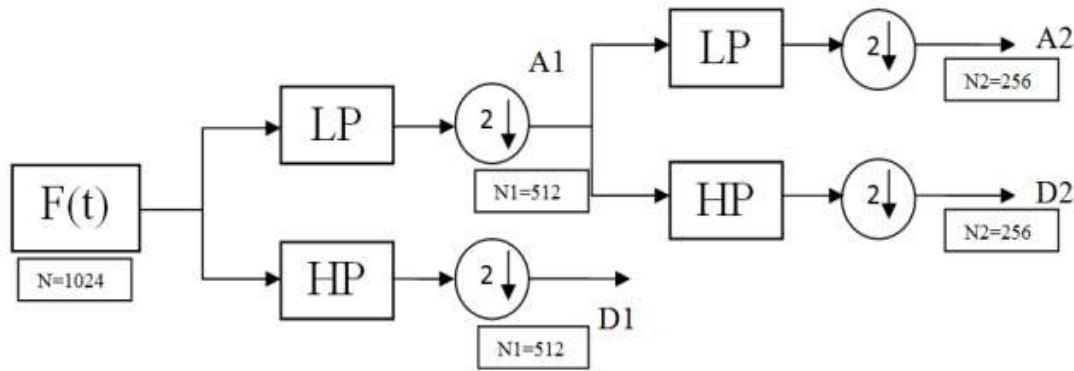


Figure 2.4 : Bloque diagramme le processus de filtrage par TOD

Les coefficients résultants du processus de filtrage passe-bas qui est l'approximation, peuvent être traités à nouveau comme données d'entrée pour une banque de filtres subséquente, générant un autre groupe de coefficients d'approximation et de détails. Dans une approche pratique, une TOD dépend du signal d'origine, du filtre passe-bas et du filtre passe-haut utilisés. La mise en œuvre de MRA par TOD est illustrée dans la figure 2.4 [20].

### 2.5.3 Transformation par Paquets d'Ondelettes (TOP)

Les détails ainsi que l'approximation du TOP peuvent être divisés comme indiqué sur la figure 2.4. Cela signifie que la TOP est une généralisation de la décomposition en ondelettes discrète ou bien une généralisation de la méthode de la décomposition multi-résolution [19].

L'avantage de la transformation par paquets d'ondelettes par rapport à la transformée en ondelettes discrète est l'offre d'une gamme d'information plus riche dans l'analyse du signal fuite plus faible. De plus, l'avantage de TOP par rapport à la transformée standard, ce que la technique des paquets d'ondelettes effectue une partition adaptative dans la bande de fréquence [20].

## 2.6. Types d'ondelettes mères

Il existe plusieurs types d'ondelettes mères utilisées dans l'analyse en ondelettes. Voici quelques exemples courants :

**2.6.1 Ondelettes de Haar :** Il s'agit de la première famille d'ondelettes utilisée par la transformée en ondelettes. Les ondelettes de Haar sont des fonctions simples et discontinues, qui permettent une détection efficace des discontinuités dans les signaux.

**2.6.2 Ondelettes de Daubechies :** Cette famille d'ondelettes est largement utilisée en raison de sa précision et de sa compacité. Les ondelettes de Daubechies sont bien localisées dans le

temps et en fréquence, ce qui les rend adaptées à l'analyse de signaux présentant des variations rapides.

**2.6.3 Ondelettes de Morlet** : Ces ondelettes sont basées sur une fonction sinusoïdale modulée par une gaussienne. Elles sont souvent utilisées dans l'analyse de signaux périodiques ou dans le domaine de la transformation de Fourier continue.

**2.6.4 Ondelettes de Symlets** : Ces ondelettes sont similaires aux ondelettes de Daubechies, mais elles offrent une meilleure approximation des signaux non lisses. Elles sont adaptées à l'analyse de signaux présentant des variations plus complexes.

**2.6.5 Ondelettes de Coiflets** : Cette famille d'ondelettes est basée sur des fonctions polynomiales. Elles sont utiles dans l'analyse de signaux présentant des caractéristiques non régulières ou discontinues.

Nom des familles d'ondelettes	Abréviations
Ondelettes de Daubechies	db
Ondelette de Haar	Haar
Ondelette de Haar	Sym
Ondelettes Coiflets	Bior
Ondelettes biorthogonales	Bior
Ondelette de Meyer	Meyr
Ondelettes gaussiennes	Gaus
Ondelettes gaussiennes complexes	Cgau
Chapeau mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl
Ondelette de Morlet complexe	Cmor
Ondelettes de Shannon complexes	Shan

Le Tableau 2.1 : présente quelque famille d'ondelettes mère et leurs abréviations.

## 2.7 Le choix de l'ondelette mère

Le choix de l'ondelette mère est une étape importante dans l'analyse des signaux. Il s'agit de sélectionner le type et l'ordre appropriés de l'ondelette pour atteindre l'objectif souhaité. Ce choix n'est pas une tâche facile car il dépend de la nature de l'application et de l'optimisation recherchée. Par exemple, dans l'analyse des harmoniques, la famille Daubechies est souvent recommandée. Cependant, chaque famille d'ondelettes a ses propres caractéristiques et

avantages, et le choix final dépendra de l'objectif de l'analyse et des caractéristiques du signal étudié.

Pour détecter des signaux de faible amplitude, de courte durée, à décroissance rapide et oscillants, les familles d'ondelettes les plus populaires sont les familles Daubechies et Symlets. Ces familles ont montré des performances élevées dans la détection de perturbations simulées. La famille Daubechies en particulier est reconnue pour sa précision dans l'analyse des perturbations liées à la qualité de l'énergie.

## 2.8. Application de la transformée en ondelette dans les réseaux électriques [20]

Les ondelettes ont d'abord été appliquées dans le système de réseaux électrique en 1994 par Robertson et Ribeiro. Depuis cette année, le nombre de publications dans ce domaine a augmenté.

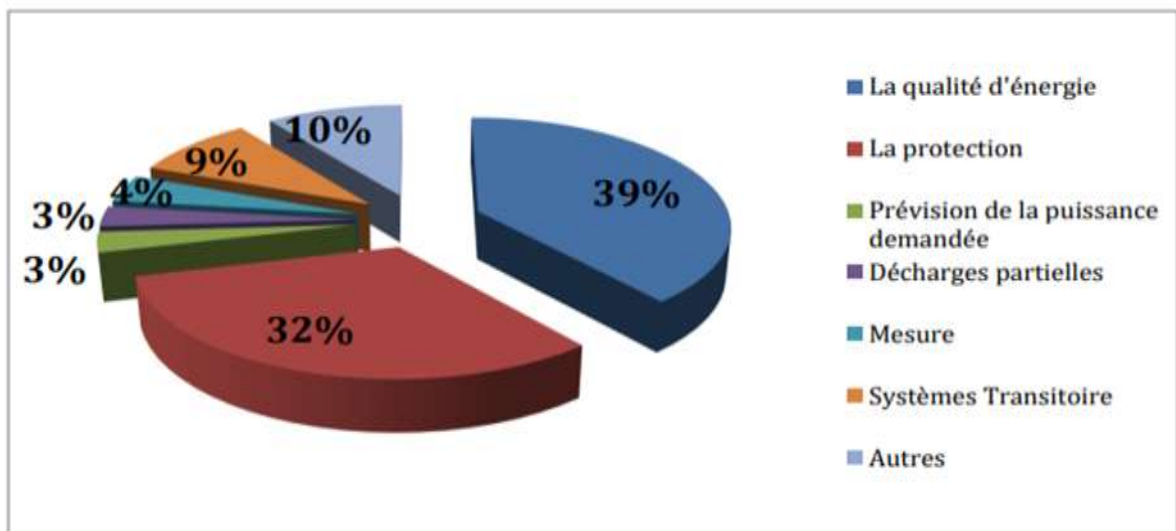


Figure 3.5 : Pourcentage d'utilisation des ondelettes dans les différents domaines des réseaux électriques [20]

L'analyse par ondelettes peut être utilisée dans l'analyse des réseaux de transport et dans les réseaux de distribution de l'énergie électrique. Ces applications Ils comprennent :

- La qualité d'énergie
- La protection
- Prévision de la puissance demandée
- Décharges partielles
- Mesure

- Systèmes Transitoire

## 2.9 Avantages et Inconvénients des méthodes d'ondelettes

Les méthodes d'ondelettes présentent plusieurs avantages et inconvénients, voici une liste des principaux avantages :

### 2.9.1 Avantages

- Représentation multi-échelle : Les ondelettes permettent de représenter un signal ou une image à différentes échelles, ce qui permet une analyse plus détaillée des caractéristiques locales.
- Localisation précise : Les ondelettes offrent une localisation précise dans le domaine des fréquences et du temps, ce qui permet d'identifier précisément les changements et les transitions dans le signal.
- Compression efficace : Les ondelettes sont largement utilisées dans la compression de données, car elles permettent de représenter les signaux de manière plus compacte en éliminant les détails non essentiels.
- Détection des anomalies : Les méthodes d'ondelettes sont efficaces pour détecter les anomalies ou les erreurs dans les signaux, car elles mettent en évidence les variations et les différences significatives.
- Adaptabilité aux structures complexes : Les ondelettes sont capables de traiter des signaux présentant des structures complexes, telles que des signaux non stationnaires ou des signaux avec des discontinuités.

### 2.9.2. Inconvénients

- Choix de la fonction d'ondelette : Le choix de la fonction d'ondelette appropriée peut être délicat et dépend du type de signal étudié.
- Paramètres de décomposition : Les méthodes d'ondelettes nécessitent de choisir les paramètres de décomposition, tels que le niveau de décomposition et les seuils de compression, ce qui peut être un processus itératif et subjectif.
- Complexité computationnelle : Les calculs nécessaires pour effectuer la transformation par ondelettes peuvent être intensifs en termes de temps de calcul et de ressources informatiques.



- Interprétation des coefficients : L'interprétation des coefficients d'ondelettes peut être complexe, car ils peuvent représenter à la fois des caractéristiques significatives et du bruit, nécessitant une analyse et une interprétation minutieuses.
- Il est important de noter que les avantages et les inconvénients peuvent varier en fonction du contexte d'application et des spécificités du problème à résoudre. Par conséquent, il est essentiel de considérer ces facteurs lors du choix et de l'utilisation des méthodes d'ondelettes.

## 2.10 Critère du choix de niveau de décomposition et l'ondelette mère

L'extraction des informations des signaux transitoires ou permanents nécessite des choix judicieux pour certains paramètres tels que, le niveau de décomposition, le type de l'ondelette mère et l'ordre de l'ondelette.

### 2.10.1 Niveau de décomposition

En général, la transformée en ondelettes discrète est calculé théoriquement pour les échelles  $s=2^j$ , pour tout  $j$ . Cependant, nous pouvons limiter le paramètre d'échelles qui est nécessaires pour le calcul de la transformée en ondelette discrète à  $j = 1, \dots, J$  sur la base de la nature du signal étudié. Le nombre approprié de niveaux de la décomposition ( $nL_s$ ) dépend de la fréquence d'échantillonnage ( $f_s$ ) du signal à analyser. Pour chacune des approches de diagnostic basées sur la décomposition en ondelettes, le nombre de niveau doit être choisi judicieusement afin de permettre aux signaux à niveau élevé (approximation et détails) de couvrir toute la gamme des fréquences, à partir de la condition suivante, on peut calculer le nombre minimum de niveaux de décomposition nécessaire pour obtenir un signal d'approximation de sorte que la limite supérieure de sa bande de fréquence associée soit sous ou au voisinage de la fréquence fondamentale [21] :

$$2^{-(nL_s+1)} f_s < f$$

En effet, le niveau de décomposition du signal d'approximation qui inclut les harmoniques autour du fondamental, est le nombre entier ( $NLS = nL_s+2$ ) exprimé par :

$$nL_s = \text{int} \left( \frac{\log(f_s/f)}{\log(2)} \right)$$

Donc le nombre de décomposition recommandé est de :

$$NLS = \text{int} \left( \frac{\log(f_s/f)}{\log(2)} \right) + 2$$

### 2.11. Conclusion

Les ondelettes sont des outils puissants utilisés dans l'analyse et le traitement de signaux. Elles permettent une représentation efficace des signaux dans le domaine temps-fréquence, en capturant à la fois les variations temporelles et les caractéristiques fréquentielles. Les propriétés des ondelettes, telles que leur localisation en temps et en fréquence, leur adaptabilité à différents types de signaux et leur capacité à détecter des variations rapides, en font des choix populaires dans de nombreuses applications.

Le choix de l'ondelette mère est crucial pour obtenir des résultats précis et significatifs dans l'analyse en ondelettes. Différents types d'ondelettes mères existent, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages. Le choix de l'ondelette dépendra de la nature du signal à analyser, des objectifs spécifiques de l'analyse et des contraintes du système.

# **Chapitre 03 :**

## **Résultats et**

### **Discussion**

### 3.1 Introduction

Comme discuté dans le chapitre précédent, plusieurs techniques ont été proposés et utilisés pour la détection des défauts des lignes de transmission de réseau électrique. Parmi celles-ci, la technique de transformée en ondelettes qui a été trouvée comme un outil puissant pour détecter les défauts électriques.

Ce chapitre présente une technique basée sur la transformée en ondelettes pour la détection des défauts de court-circuit dans un réseau électrique triphasé standard. Afin d'atteindre cet objectif, un modèle standard de réseau électrique triphasé a été simulé et modélisé sous l'environnement Matlab. Ensuite, l'analyse des défauts de court-circuit ont été réalisés à l'aide d'un outil de traitement par la technique des ondelettes sous MATLAB (wavedec " La fonction "wavedec" est utilisée pour transformer un signal ondelette du domaine temporel au domaine fréquentiel en utilisant une analyse de transformation ondelette", detcoef (La fonction "detcoef" est utilisée pour extraire les coefficients de détail (aussi appelés les détails) à partir de la transformation en ondelettes. Elle est appliquée à la matrice générée par la fonction "wavedec" pour extraire les coefficients de détail d'un niveau spécifique) ... etc.), ces instructions nous ont permettre de réaliser les différentes applications.

### 3.2 Modélisation du système de lignes de transport propose

Le modèle de simulation de réseau électrique triphasé a été développé en utilisant MATLAB/Simulink avec l'environnement Sim Power Systems. Le modèle a été implémenté en gardant à l'esprit un nombre minimum de blocs et en utilisant leurs paramètres par défaut dans la mesure du possible afin de conserver leur simplicité. Il sert également de blocs de construction de base pour un système d'alimentation plus vaste. Il s'agit d'un système électrique avec les caractéristiques suivantes de 220kV, 60 HZ, 40 km. Il se compose d'une source de tension triphasée, deux jeux de barres, bloc de mesure triphasé, Branche RLC série triphasée, et un bloc de charge RLC, et un simulateur de défaut triphasé, comme montré dans la figure suivante.

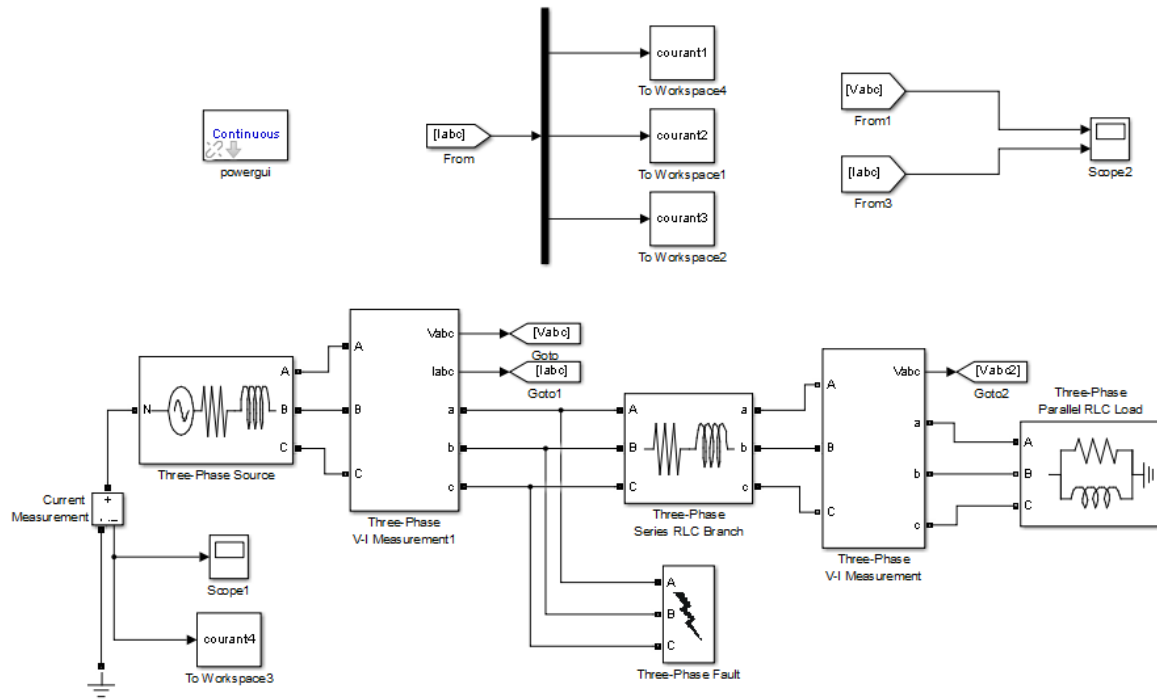


Figure 3. 1 : Schéma de simulation MATLAB du réseau électrique

L'alimentation électrique est générée par la source de tensions triphasées de 250kV, 60 Hz, 40km, qui est transmise à la charge par la ligne de transmission. Le bloc de mesure triphasé « bus 1 » sert à mesurer les valeurs triphasées du courant et tension par rapport la source triphasée. Le bloc de mesure triphasé « bus 2 » est un jeu de barres charge. Le simulateur de défaut triphasé est utilisé pour simuler différents types de défauts sur les lignes de transmission entre les trois-phases et terre. la branche RLC série triphasée est de type RL, elle présente les lignes de transmissions courte. Enfin, le bloc de charge RLC série triphasé est vaut (220KV, 60 Hz) a pour l'objet de représenter la charge.

Ce modèle de système électrique a été utilisé pour créer l'ensemble de base des données de défauts pour la conception d'un suiveur pour la détection des défauts, cette base se constitue des informations extraites de la forme d'onde des courants mesurées au niveau du bus de mesure triphasé pour les conditions avant et pendant le défaut. En effet, les informations importantes et pertinentes présentes dans les formes d'onde des signaux de courants peuvent être utilisées efficacement. Ces formes d'onde des courants triphasés sont introduites dans la transformé en ondelettes comme entrées. La figure 3.2 présente les formes d'ondes de tensions et courants des lignes de transmissions dans le cas du non-défaut.

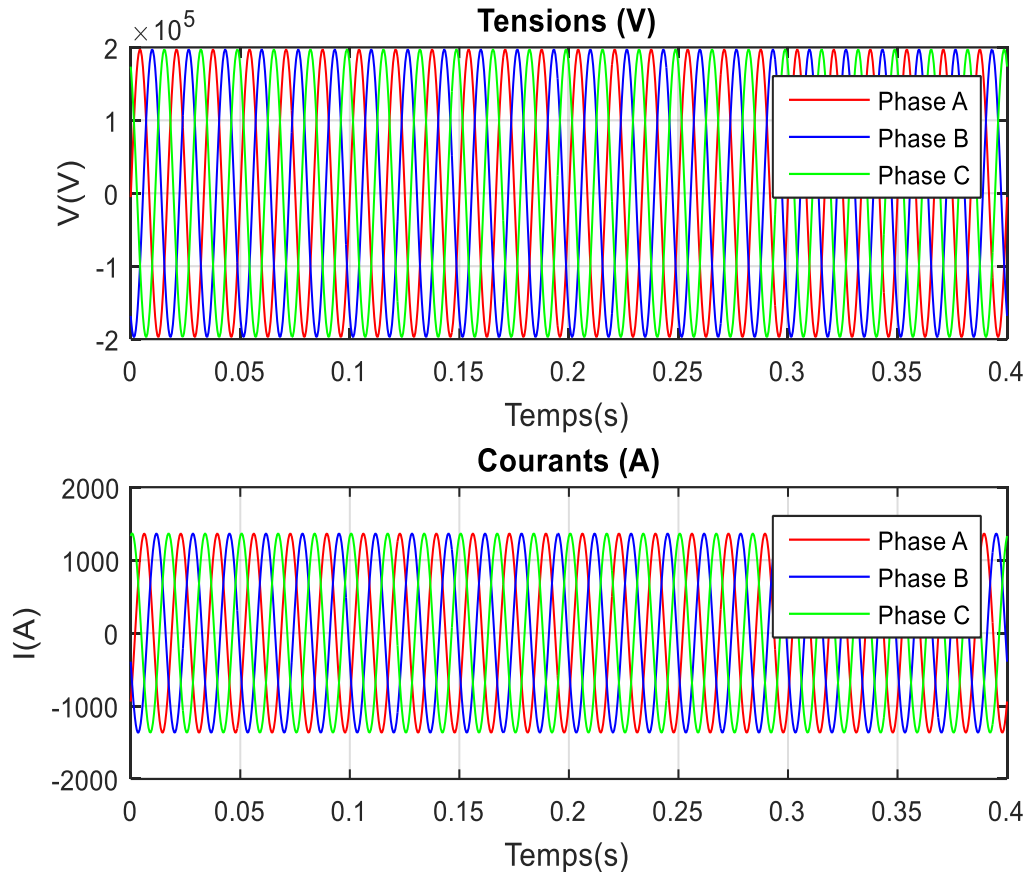


Figure 3. 2 : Formes d'onde de tension et de courant, cas de non-défaut.

### 3.3 Mise en œuvre de la transformée en ondelettes

Afin d'analyser les signaux perturbés, la transformée en ondelettes discret a été implémenté. Cette forme de la transformée en ondelettes est beaucoup mieux adaptée pour le traitement des signaux discrets. Ou, sur les ordinateurs numériques en appliquant la TOD sur des échantillons discrets.

Pour cela l'ondelette mère retenue pour l'analyse des perturbations était l'ondelette de Daubechies du quatrième ordre (db4). Le db4 a été sélectionné car il est considéré comme le plus similaire aux signaux électriques [22].

Ensuite, chaque forme d'onde de signal de courant de court-circuit a été décomposée en six différents niveaux de résolution. Ainsi, les six niveaux de coefficients de détails (Dc1, Dc2, Dc3, Dc4, Dc5, Dc6,) ont été obtenus comme indique la figure suivante.

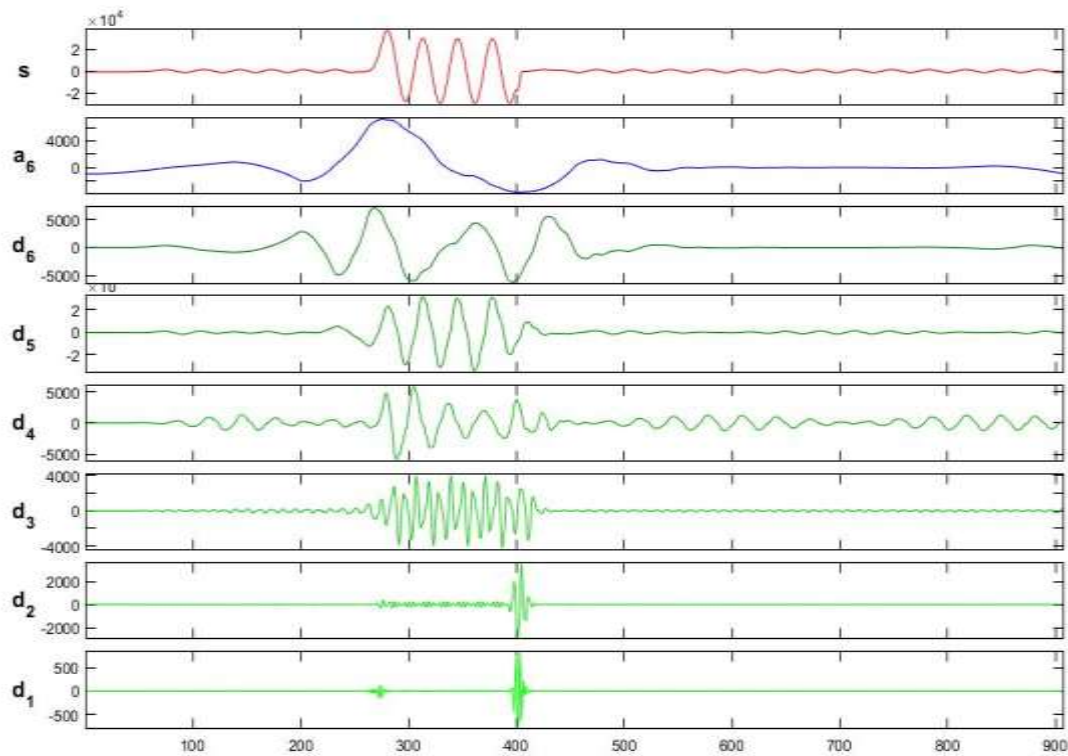


Figure 3.3 : Décomposition d'un signal de courant avec défaut de court-circuit par l'ondelette db4 au niveau 6

L'idée de base de ce travail est de comparé le maximum de coefficients des détails d'ondelettes à la magnitude de signal de courant sans défaut. À cet effet, après avoir analysé les signaux perturbés à l'aide de TOD, le maximum de coefficients des détails d'ondelettes ont été extrait des six coefficients de détails d'ondelettes obtenus à partir d'un seul signal de perturbation de courant simulé. En comparant le maximum des coefficients des six détails avec la magnitude de signal de courant sans défaut, on a trouvé le même résultat pour les six détails (Max coefs > seuil du signal). À cet fin, L'ensemble de données de courant perturbé est construit en utilisant seulement le premier coefficient de détail.

### 3.4 Comment appliquer la transformation en ondelettes sous Matlab

#### 3.4.1 Syntaxe de transformation en ondelettes à appliquer au signal

$[C,L] = \text{wavedec}(X,N,wname)$  ;

Ou, wavedec = fonction qui décompose le signal.

X = signal,

N = niveau d'ondelettes (default = 1)

wname = nom du type d'ondelettes (Daubechies 4 'db4').

C = Vecteur de décomposition en ondelettes de sortie

l = nombre de coefficients par niveau.

### 3.4.2 Syntaxe de transformation en ondelettes pour les coefficients détaillés du signal

Lorsque la transformation en ondelettes est appliquée au signal et que son nombre de coefficients est obtenue, ensuite, une autre commande est utilisée pour extraire ses coefficients détaillés afin de connaître les informations supplémentaires. La formule est la suivante :

$D = \text{detcoef}(C, L, N)$  ;

Ou,  $\text{detcoef}$  = fonction qui obtient les coefficients de détails du signal.

$C$  = Vecteur de décomposition en ondelettes de sortie.

$L$  = nombre de coefficients par niveau.

$N$  = niveau d'ondelettes (default = 1).

$D$  = Extrait les coefficients de détail à l'échelle la plus grossière à partir de la structure de décomposition en ondelettes  $[C, L]$ .

### 3.5 Démarches pour la détection des défauts

Le modèle de défaut de ligne développé dans Simulink est illustré à la Figure 1. Il est utilisé pour simuler le court-circuit causé par un défaut de ligne. On peut noter que pour l'identification des défauts nous avons besoin des mesures de courant triphasé ainsi que de la mesure du courant neutre. Par conséquent, un démultiplexeur a été introduit dans le modèle au niveau du bus 1 ()séparer les courants du trois phases. Ce modèle de défaut de ligne est capable de simuler divers défauts de ligne, y compris une seule ligne à la terre, double ligne à terre, ligne à ligne, et défaut triphasé. Le temps de simulation de 0,4 seconde est défini pour exécuter la simulation. Le bloc de défaut est réglé pour simuler les défauts à partir de 0,1 à 0,168 seconde avec une impédance de défaut de  $0.001 \Omega$ .

Après avoir validé et tester le modèle de défaut de ligne de transmission. Les mesures de courant actuelles de Simulink doivent être transférer vers l'espace de travail afin de les utiliser dans la transformation en ondelettes pour détecter tout type de défaut.

Bus : un démultiplexeur est introduit au niveau du "bus 1" pour séparer les courants des trois phases. Il s'agit donc d'un point spécifique du système où les courants triphasés sont séparés et traités individuellement. Le "bus 1" peut être considéré comme un point de distribution des courants dans le modèle de défaut de ligne, permettant ainsi de gérer les mesures de courant triphasé et de courant neutre nécessaires pour l'identification des défauts.



### 3.6 Différents types de défauts

#### 3.6.1 Défaut monophasé à la terre (phase - terre)

Un défaut monophasé est créé par un court-circuit entre la phase et la terre. Dans ce cas, on observe une perturbation au niveau dans la forme d'onde de tension (chute de tension), sous la forme d'une chute d'amplitude dans la période de temps 0,1s à 0,168s. D'autre part, on voit une augmentation de la forme d'onde du courant le long du temps de défaut. La figure 3.4 présente le cas du défaut de type phase B- Terre

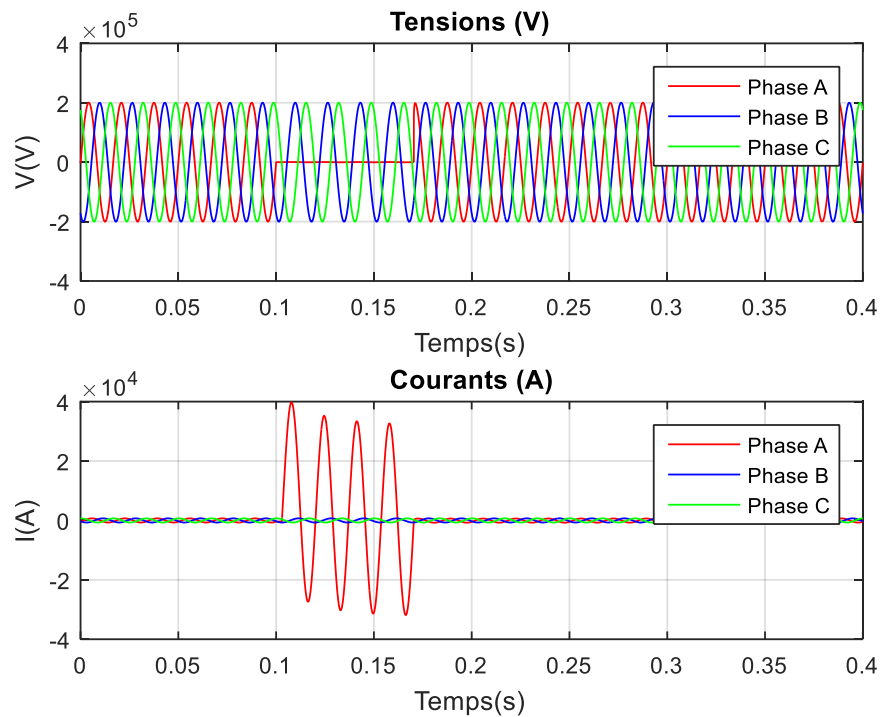


Figure 3. 4 : Formes d'onde de courant pour un défaut entre la phase A et terre.

#### 3.6.2 Défaut biphasé à la terre

Un défaut biphasé à la terre se produit entre deux phases et la terre, Dans les deux formes d'onde, on remarque une augmentation dans le courant électrique et une diminution de l'amplitude de la tension des deux phases le long du temps de défaut.

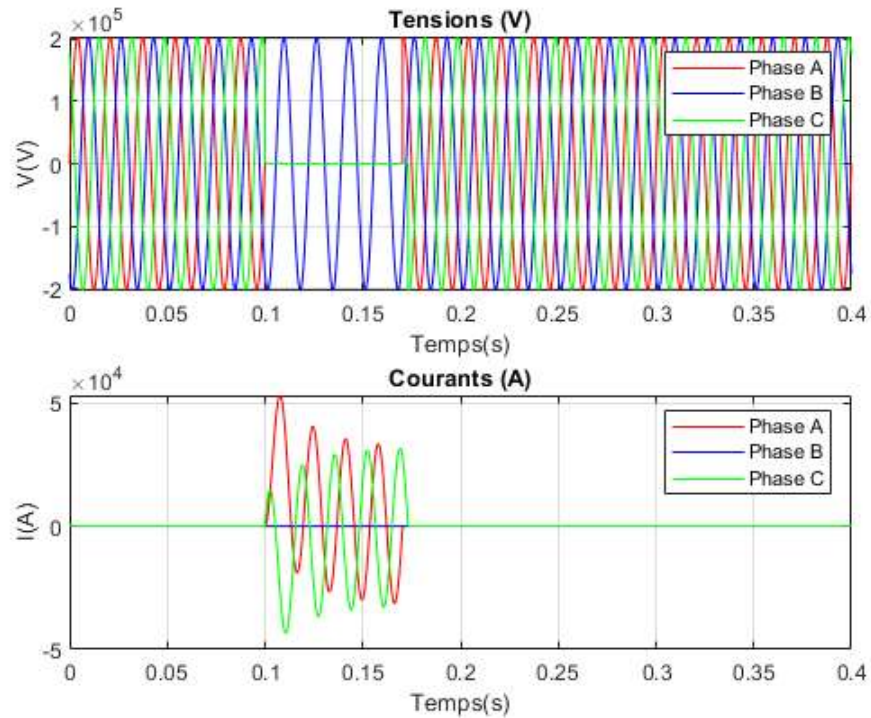


Figure 3. 5 : Formes d’onde de courant pour un défaut deux phases (AC) et la terre

### 3.6.3 Défaut biphasé sans terre :

C’est un court-circuit entre deux phases. Les deux formes d’onde montrent une perturbation au niveau de la tension et une élévation au niveau de courant des deux phases dans la période de temps 0,1s à 0,168s.

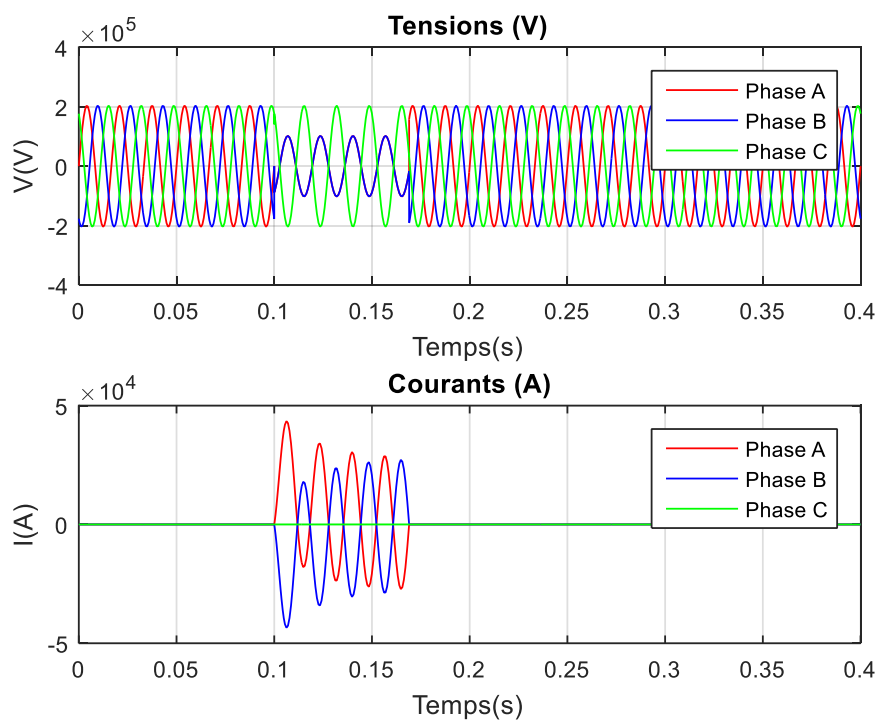


Figure 3. 6 : Formes d’onde de courant pour un défaut deux phases (AB) Sans terre

### 3.6.4 Défaut triphasé

Il est constitué par la mise en court-circuit des trois phases A, B et C. on remarque une perturbation au niveau de la forme d'onde des tensions et une augmentation dans la forme d'onde des courants.

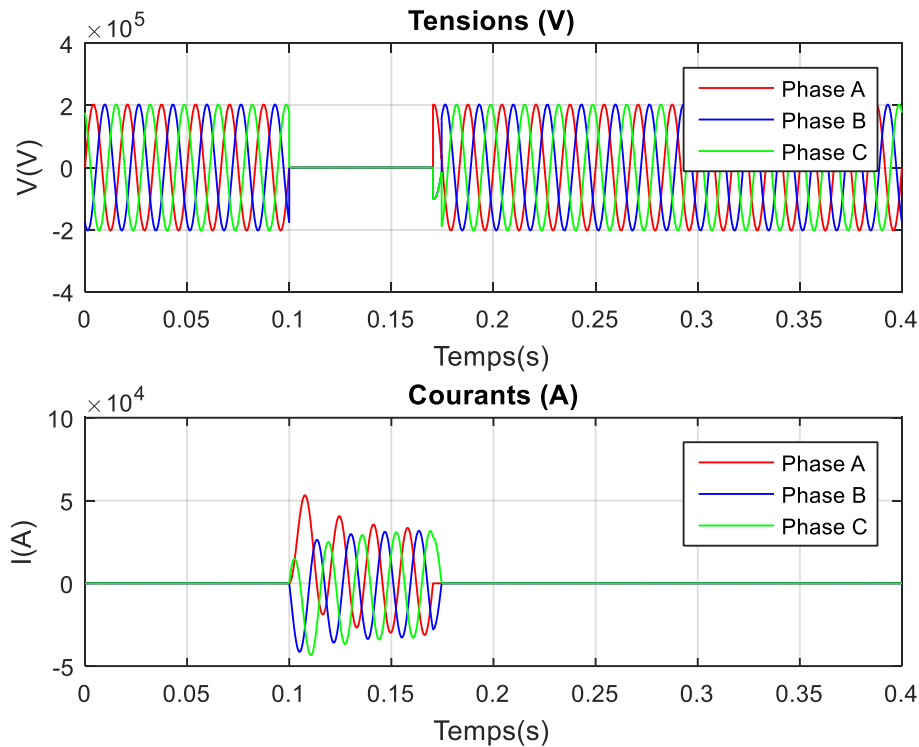


Figure 3. 7 : Formes d'onde de courant pour un défaut triphasé.

On peut constater que si un défaut est appliqué sur une ligne, une changement accidentelle affectant le fonctionnement normal du système électrique. En effet, une augmentation ou une diminution des grandeurs nominales de la tension et de courant. Le plus souvent, les variations anormales se caractérise par son amplitude et durée.

### 3.7 Implémentation de la transformé en l'ondelettes

L'algorithme suivant décrit les différentes étapes pour l'implémentation de la transformation en ondelettes afin de détecter tout type de défaut :

Étapes	Discussions des étapes
Entrée	Mesure de courant triphasés (IA, IB, IC) à la borne du Source
Sortie	Détection et identification du défaut.
Étape 1	Attribuer la commande de chargement de la simulation.
Étape 2	Simulation du bloc de simulation correspondant.
Étape 3	Charger les courants de phase et le courant neutre
Étape 4	Appliquer la commande suivante de décomposition en ondelettes pour chaque phase et courant neutre $[c, l] = \text{wavedec}(x, n, \text{wname}) ;$
Étape 5	Obtenir les coefficients détaillés des courants de phase et du courant neutre en utilisant la syntaxe suivante $D = \text{detcoef}(C, L, N) ;$
Étape 6	Obtention de la valeur maximale de chaque coefficient afin de distinguer les différents types de défauts.
Étape 7	Compare la valeur maximale de coefficient avec la valeur seuil du signal

Tableau 3.1 : étapes pour l'implémentation de la transformation en ondelettes

### 3.8 Stratégie de détection par TOD

Le concept principal derrière cette stratégie est que lorsqu'un défaut est présent dans n'importe quelle phase, alors les coefficients de cette phase auront une magnitude très élevée et les coefficients des autres phases auront une magnitude nulle ou très petit. Cela signifie que s'il n'y a pas de défaut dans le système d'alimentation. Alors les coefficients de toutes les phases seront nuls ou peuvent avoir une très petite valeur. De cette façon, nous pouvons facilement distinguer les différents types de défauts. La valeur maximale des coefficients détaillés de courant de toutes les phases et du courant de terre pour les différents types de défauts est résumée dans le Tableau 2.

Type de défaut	Coefficient maximal du courant de la phase A	Coefficient maximal du courant de la phase B	Coefficient maximal du courant de la phase C	Coefficient maximal de courant de terre
Défaut triphasé à la terre.	1.6097e+07	4.0725e+07	1.6097e+07	7.1824e+05
Défaut triphasé.	1.6097e+07	4.0725e+07	1.6097e+07	0.0081
Défaut double ligne à la terre (AB-G)	1.0796e+07	2.1332e+07	103.9772	7.7574e+05
Défaut double ligne à la terre (AC-G)	1.9807e+07	103.9772	8.6730e+06	1.9393e+06
Double défaut de ligne à la terre (BC-G)	103.9784	4.0725e+07	8.1478e+06	9.7619e+05
Défaut ligne à ligne (A-B)	1.0794e+07	2.0363e+07	103.9772	0.0087
Défaut Ligne à ligne (A-C)	2.0363e+07	103.9772	8.6153e+06	0.0204
Défaut ligne à ligne (B-C)	103.9784	4.0725e+07	7.2573e+06	0.0100
Défaut simple de ligne à terre (A-G)	1.3523e+06	103.9772	103.9772	1.6087e+06
Défaut simple de ligne à terre (B-G)	103.9784	3.7024e+06	134.3960	1.1253e+06
Défaut simple de ligne à terre (C-G)	103.9784	103.9772	1.4099e+06	3.7023e+06
Système sans défaut	103.9784	103.9772	103.9772	7.1737e-10

Tableau 3.2 : Coefficients détaillés de courant de toutes les phases et du courant de terre pour différents types de défauts.

Le tableau 2 montre que tous les types de défauts dans les phases ont des valeurs de coefficient plus élevées alors que les courants de phase qui n'ont pas de défaut ont des valeurs très faibles. La valeur maximale du courant de phase sans défaut est égale à 134.39 A. On observe que les défauts peuvent être distingués à l'aide de la valeur de référence standard du courant, qui peut être comparée à tous les courants de phase. Le défaut existe dans ces phases

et il est facile de distinguer les défauts. La condition ci-dessus peut être mise en œuvre dans le programme MATLAB qui permet d'identifier et de classer les différents types de défauts.

La détection basée sur la transformée en ondelettes dépend de la valeur seuil du système électrique. Dans ce travail, la valeur seuil du système électrique est fixée à 200. Mais cette valeur n'est pas généralisée et n'est pas applicable à un même réseau électrique ayant des tensions, des distances de lignes de transmission, des capacités de puissance et des résistances aux défauts différentes. Cela signifie que pour chaque nouveau réseau électrique, cette valeur seuil doit être déterminée à nouveau afin de réussir la classification et l'identification des défauts. Cette limitation peut être surmontée en utilisant des méthodes de calcul intelligentes.

La figure 3.8 montre une capture d'écran du programme Matlab, qui comprend une figure montrant un défaut triphasé. Par conséquent, le détecteur des défauts affiche un message indiquant la nature de défaut. On peut voir dans la fenêtre de commande, plus précisément, le champ encerclé en rouge « un défaut triphasé est détecté ». Par le même raisonnement tous les autres défauts ont été détecté.

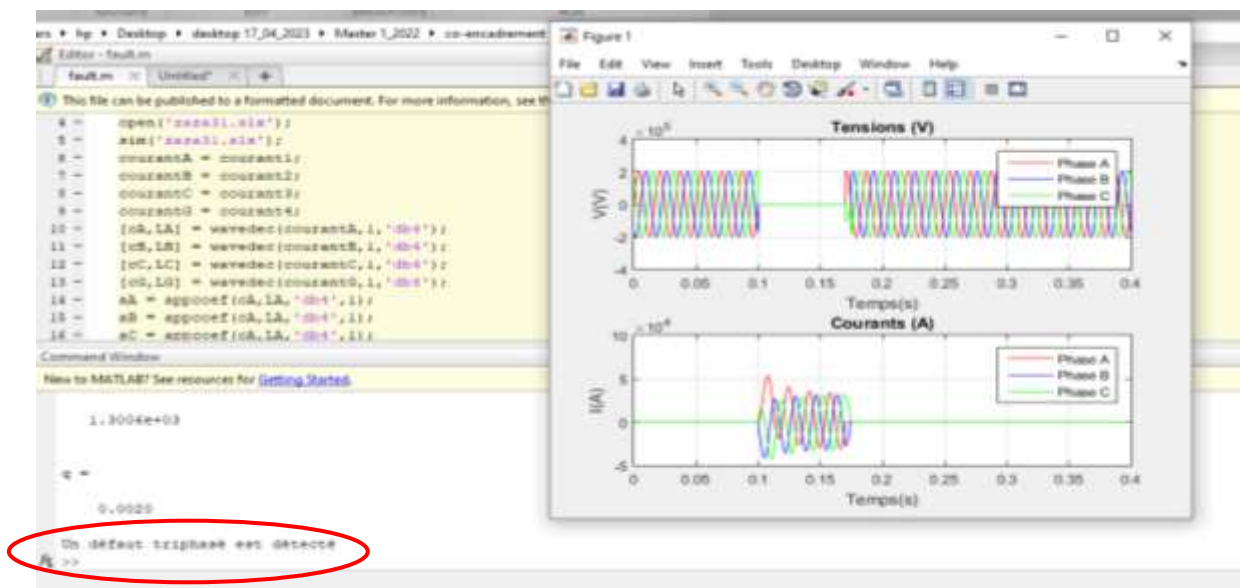


Figure 3.8 : Montrant un défaut triphasé en utilisant du programme Matlab

### 3.9 Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré aux résultats et aux discussions, ou un réseau électrique avec des lignes de transmission courte est considéré pour bien tester l'efficacité de la méthode proposée. La transformé en ondelettes a été appliqué pour détecter tous types des défauts de court-circuit dans les de transmission à l'aide d'un programme implémenter sous MATLAB. Les résultats de simulation ont montré la bonne attitude de la transformé en ondelettes pour

détecter tous les types de défauts y compris une seule ligne à la terre, double ligne à terre, ligne à ligne, et le défaut triphasé. L'ondelettes est un excellent outil d'analyse des signaux, ou, la décomposition en détails du signal de courant fourni plus d'information sur les caractéristiques de signal. Il nous a permis d'obtenir une identification précise sur les défauts.

### CONCLUSION GÉNÉRALE

Récemment, la demande croissante de l'énergie électrique, le réchauffement climatique, l'augmentation de la production décentralisée et renouvelable, l'épuisement des ressources actuellement utilisées pour la production d'énergie, ont fait de la qualité de l'énergie électrique un enjeu crucial pour la communauté des systèmes d'énergie électrique : producteur et consommateurs. Par conséquent, la surveillance de la qualité de l'énergie est considérée comme la stratégie la plus efficace utilisée pour assurer la disponibilité, la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques. Afin d'améliorer et de garantir la qualité de l'énergie électrique, et la continuité d'alimentation, il est essentiel de détecter les défauts, si possible, d'identifier leur origine. L'une des solutions les plus efficaces pour prévenir ces perturbations consiste à utiliser des méthodes puissantes et efficaces axées sur la détection automatique de ces perturbations, en particulier le traitement des signaux électriques.

Cette mémoire s'est donc intéressée à l'étude de différents types de perturbations présentes dans les réseaux électriques, qui impactent la qualité de l'énergie électrique. Nous avons également examiné certaines des méthodes couramment utilisées, y compris la technique de la transformée en ondelettes, l'une des techniques utilisées à cet effet. Nous avons examiné le comportement des ondelettes pour détecter différents types de défauts de court-circuit affectant la qualité de l'énergie. Cette approche nous a permis d'extraire des informations précieuses liées à ces perturbations et de mieux identifier leur type et origine.

En résumé, cette mémoire a mis en évidence l'importance cruciale de la détection précoce des perturbations dans les réseaux électriques afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique. L'utilisation de la transformée en ondelettes s'est révélée être une méthode puissante pour analyser les signaux électriques et identifier les différentes perturbations. Les résultats obtenus dans cette étude contribuent à l'avancement des connaissances dans le domaine de la qualité de l'énergie électrique et ouvrent la voie à de nouvelles perspectives de recherche et d'application.

Il est à noter que ce mémoire a été réalisé en utilisant le logiciel MATLAB SIMULINK, qui s'est avéré être un outil précieux pour la mise en œuvre et l'analyse des méthodes basées sur la transformée en ondelettes. Enfin, nous recommandons la poursuite des recherches dans ce domaine passionnant afin de continuer à améliorer la stabilité, la fiabilité et la qualité de l'énergie électrique pour les utilisateurs et les industries.



## Références

- [1] AOUABED FATIHA, « Architectures des postes électriques » chapitre 1, Polycopie de cours, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi of Bordj Bou Arreridj, année 2017.
- [2] Michel Aguet et Jean-Jacques Morf, Energie Électrique, Traite d'électricité, Volume XII, presses polytechniques et universitaires romandes, 2008.
- [3] M. Boughezala. « Étude et simulation d'un coupleur de signaux HF pour réseaux d'énergie électrique » chapitre 1, thèse de doctorat, Univ Biskra, 2001, Adresse URL : <http://thesis.univ-biskra.dz/1873/3/chapitre%2001.pdf>
- [4] Jean-Michel DELBARRE, Postes à haute et très haute tension, Technique de l'Ingénieur (D4 570).
- [5] J. C. Sabonnadière, N. Hadjsaid, « Lignes et réseaux électriques 2 » Hermès science, Paris, 2007
- [6] Cong Duc Pham, « Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée », thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble. Le 19 septembre 2005.
- [7] NOUIOUA Mabrouk, ADOUI Merwan « Protection Des Réseaux Électriques HTB En Utilisant De Relais De Distance », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Année 2016 /2017.
- [8] ZOUZOU Abderrahmane, KANOUNE Mohammed Yakhlef « Analyse Par Simulation Des Courants De Court-Circuit Survenant Dans Les Réseaux Électriques » Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Juin 2017.
- [9] W. W. L. Keerthipala, W. Huisheng, and W. Chan Tat, "On-line testing of a fuzzy-neuro based protective relay using a real-time digital simulator," in 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077), 23-27 Jan. 2000 2000, vol. 3, pp. 1917-1922 vol.3.
- [10] Thangarajan, K., &Soundarrajan, A. (2020). Performance Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Drive with Delay Compensated Predictive Controllers. *Microprocessors and Microsystems*, 103081. doi: 10.1016/j.micpro.2020.103081
- [11] Tondpoor, K., Saghaiannezhad, S. M., & Rashidi, A. (2020). Sensorless Control of PMSM Using Simplified Model Based on Extended Kalman Filter. 2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PEDSTC). doi:10.1109/pedstc49159.2020.9088400.
- [12] Nicola, M., Nicola, C.-I., & SacerdoTianu, D. (2020). Sensorless Control of PMSM using DTC Strategy Based on PI-ILC Law and MRAS Observer. 2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS). doi:10.1109/das49615.2020.9108974.

- [13] Mouna Ghanai, Ali Medjghou, Kheireddine Chafaa, "Extended Kalman Filter Based States Estimation of Unmanned Quadrotors for Altitude-Attitude Tracking Control", doi: 10.15598/aece.v16i4.2911
- [14] Akin. B, "State Estimation Techniques for speed sensor less field oriented control of Induction motors". Thesis of Master, the Middle East technical University, Ankara, Turkey, 2003.
- [15] T. S. Dillon and D. Niebur, "Neural networks applications in power systems," 1996.
- [16] Raghda Alilouch « Détection, Classification Et Localisation Des Défauts Dans Les Lignes De Transmission Par Les Réseaux De Neurones Artificiels », Mémoire de magister, Université Du Québec En Abitibi-Témiscamingue, Novembre 2022.
- [17] M.O. Oliveira, J.H. Reversat, L.A. Reynoso, "Wavelet Transform Analysis to Applications in Electric Power Systems", Wavelet Transform and Complexity, chap 5, pp 1-18, Mai 2019.
- [18] R. Shariatinasab, M. Akbari, R. Bijan, " Application of Wavelet Analysis in Power Systems ", chap 11 in " Advances in wavelet Theory and their applications in engineering, physics and technology application of wavelet analysis in power systems ", Edited by Dr. Dumitru Baleanu, 2012.
- [19] L. Lau, "Wavelet packets based denoising method for measurement domain repeat-time multipath filtering in GPS static high-precision positioning", GPS Solut, volume 21, pp 461–474, Avril 2017.
- [20] R. Bhavani; N. R. Prabha, "A hybrid classifier for power quality (PQ) problems using wavelets packet transform (WPT) and artificial neural networks (ANN)" IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), Srivilliputhur, India, pp 1-7, 2017.
- [21] J. A. Daviu, et al. « Application and Optimization of the Discrete Wavelet Transform for the Detection of Broken Rotor Bars in Induction Machines », Applied and Computational Harmonics Analysis 21, pp 268–279, 2006.
- [22] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ondelette\\_de\\_Daubechies](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ondelette_de_Daubechies).

## Résumé :

Avec la demande croissante en énergie électrique, les réseaux électriques deviennent de plus en plus complexes, ce qui entraîne davantage de perturbations et de dysfonctionnements des systèmes électrique nécessitant des outils plus avancés pour leur surveillance. La transformée en ondelettes est l'un des outils puissants utilisés pour l'analyse des signaux dans plusieurs domaines, y compris les systèmes électriques pour améliorer la qualité de l'énergie. L'objectif de ce travail est d'appliquer la technique de transformée en ondelettes pour la détection des défauts de court-circuit des lignes de transmissions. La méthode a été implémenté avec succès dans Matlab. Où, les résultats de simulation ont montré que la méthode proposée est efficace, précise, et fiable pour détecter tous les types de défauts de court-circuit.

Mots Clés : Réseaux électriques, Qualité de l'énergie, Détection des défauts, Transformée en ondelette, défauts de court-circuit.

## Abstract :

Recently, the increasing demand of power electric lead to electrical grid complexity, which result to more disturbances and disoperation in electrical systems. thus, the network monitoring requires more advanced tools. The wavelet transform is a powerful tool. It has been used for signal analysis in several fields, including electrical power systems to improve power quality. Actually, the aim of this work is to apply the wavelet transform technique for the detection of short-circuit faults in transmission lines. The method has been successfully implemented in Matlab. Where, the simulation results showed the efficiency, accuracy, and reliability of the proposed technique for the detection of all types of short-circuit faults.

Keywords : Electrical networks, Power quality, Fault detection, Wavelet transform, Short-circuit fault.

## ملخص

مع تزايد الطلب على الطاقة الكهربائية، أصبحت الشبكات الكهربائية أكثر تعقيداً، مما أدى إلى المزيد من الاضطرابات والأعطال في الأنظمة الكهربائية التي تتطلب أدوات أكثر تقدماً لمراقبتها. يعد التحويل المويجي من الأدوات القوية المستخدمة لتحليل الإشارات في العديد من المجالات، بما في ذلك الأنظمة الكهربائية لتحسين جودة الطاقة. الهدف من هذا العمل هو تطبيق تقنية التحويل المويجي للكشف عن أعطال قصر الدوائر الكهربائية في خطوط النقل. تم تنفيذ الطريقة بنجاح في ماتلاب. حيث أظهرت نتائج المحاكاة أن الطريقة المقترحة فعالة ودقيقة وموثوقة للكشف عن جميع أنواع أعطال قصر الدوائر الكهربائية.

كلمات مفتاحية: الشبكات الكهربائية، جودة الطاقة، كشف الأعطال، التحويل المويجي، أعطال قصر الدوائر الكهربائية.