

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Option : Réseaux électriques

Thème

Détection et localisation des défauts sur un réseau
électrique de distribution

Préparé par :

BALIT KENZA

DERRADJI HAZEM

Encadré par :

Aouchenni Ounissa

Année Universitaire : 2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom :	Derradji
Prénom :	Hazem
Matricule :	181833008154
Spécialité et/ou Option :	Réseaux Electrique
Département:	Génie Electrique
Faculté:	Sciences et Technologies
Année universitaire :	2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de : Master

Intitulé: Détection et localisation des défauts sur un réseau électrique de distribution

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
07/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes règlementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 ()*
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom :	Balit
Prénom :	Kenza
Matricule :	191933009447
Spécialité et/ou Option :	Réseaux Electrique
Département:	Génie Electrique
Faculté:	Sciences et Technologies
Année universitaire :	2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de : Master

Intitulé: Détection et localisation des défauts sur un réseau électrique de distribution

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
07/07/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes réglementaires)

REMERCIEMENT

*Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu le plus Puissant
qui a bien*

*Voulu nous donner la force et le courage Pour effectuer Le
présent travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitudes à nos parents pour
Leurs*

*Encouragements, leur soutien et pour les sacrifices
Qu'ils ont en duré.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur
'Mlle. AOUCHENNI' pour ses sérieux, ses compétences et
ses orientations.*

*Nos sincères remerciements aux messieurs les membres du
jury pour*

*L'honneur qu'ils nous font en participant
Au jugement de ce travail.*

*Nous remercions vont aussi à tous les enseignants du
département de Génie Electrique qui a contribué à notre
formation.*

*Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos
Amis et*

Collèges pour tout le soutien moral et matériel...

Dédicace 01

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.

Dédicace 02

*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.

*À toute ma famille A mes chers amis À tous ceux que j'aime et
qui m'aiment.*

À tous les amis d'études.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1	2
1-Introduction.....	2
2- Généralités sur les réseaux électriques.....	2
2-1 Réseaux de transport et d'interconnexion	3
2-2 Réseaux de répartition	3
2-3 Réseaux de distribution	3
2-4 Domaines de Tension	4
3- Structure des réseaux électriques	4
3-1 Structure radial	4
3-2 Structure bouclé	5
3-3 Structure maillé	5
3-4 Structure arborescente	6
4-Composants principaux du réseau électrique	6
4-1 Centrales de production	6
4-2 Appareils de manœuvre HTA	6
4-3 Lignes électriques	7
5-2 Détection de défaut	8
5-3 Localisation de défauts	9
5-4 Différentes perturbations touchant les réseaux électriques	9
6-Effets des défauts	15
6-1 Bon fonctionnement des réseaux	15
6-2 Tenue diélectrique des matériels	16
6-3 Qualité de fourniture d'énergie	16
6-4 Circuits de télécommunication	16
6-5 Impact sécuritaires	16
7-Protection de Réseaux Electrique.....	16
7-1 Qualité principale d'un Système de Protection	16
Conclusion	20
Chapitre 2	21
1-Introduction.....	22
2- Techniques d'analyse des défauts	22
2-1 Filtrage	22

2-2 Echantillonnage	22
3- Méthodes de détection des défauts dans le réseau électrique.....	23
3-1 Logique floue	23
3-2 Filtre de Kalman	25
4- Notions générales sur la transformée en ondelettes	29
5-Localisation de défaut	36
5-1-1 Méthode basée sur la mesure de l'impédance	37
5-1-2 Méthodes basées sur les ondes progressives (Travelling-Wave)	41
Conclusion	45
Chapitre 3	46
1-Introduction.....	46
2- Présentation du réseau d'étude.....	46
3- Démarches pour la détection des défauts	47
4-Résultats de simulation	48
4-1 Défaut monophasé à la terre (phase - terre)	49
4-2 Défaut biphasé à la terre	49
4-3 Défaut biphasé isolé	50
4-4 Défaut triphasé a la terre	51
Conclusion	60
Conclusion générale	61
Référence bibliographique	62
Résumé	84

Figure 1-1 : Structure d'un réseau électrique.

Figure 1-2 : Exemple d'un réseau radial.

Figure 1-3 : Exemple d'un réseau boucle.

Figure 1-4 : Exemple d'un réseau maillé.

Figure 1-5 : Exemple d'un réseau arborescent.

Figure 1-6 : Lignes électriques.

Figure 1-7 : Exemple d'un court-circuit.

Figure 1-8 : Surtension.

Figure 1-9 : Exemple d'un Creux de tension.

Figure 1-10 : Exemple de distorsion Harmoniques.

Figure 1-11 : Fonctionnement d'une sélectivité ampérométrique.

Figure 1-12 : Principe de la sélectivité chronométrique.

Figure 1-13 : Principe de la sélectivité logique.

Figure 1-14 : Fiabilité d'une protection.

Figure 1-15 : Association de protection.

Figure 2-16 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou.

Figure 2-17 : Schéma fonctionnel du contrôleur à logique floue.

Figure 2-18 : Structure d'un réseau de neurones non bouclé.

Figure 2-19 : Réseau neurone bouclé (récurrent).

Figure 2-20 : Différence entre une onde sinusoïdale et une ondelette.

Figure 2-21 : Transformée en ondelettes.

Figure 2-22 : Quelques familles d'ondelettes.

Figure 2-23 : Fonction Boite $I(t)$.

Figure 2-24 : Ondelette Chapeau Mexicain et module de sa transformée de Fourier.

Figure 2-25 : Ondelette de Daubechies.

Figure 2-26 : Schéma unifilaire et la représentation des circuits de défaut de ligne.

Figure 2-27 : Schéma de la localisation synchronisée des défauts aux deux extrémités avec utilisation du GPS.

Figure 2-28 : Schéma de localisation des défauts non synchronisés aux deux extrémités.

Figure 2-29 : Courant primaire lors du filtrage de fréquence du système électrique.

Figure 2-30 : Même onde que la Figure 2-29 avec filtre de 10 kHz à 600 kHz.

Figure 2-31 : Détection d'ondes progressives à double extrémité.

Figure 2-32 : Illustration de la méthode Traveling-Waves.

Figure 3-32 : Schéma de simulation MATLAB du réseau électrique.

Figure 3-33 : Forme d'onde de courant, cas de non défaut.

Figure 3-34 : Réponse de système de détection dans le cas de non défaut.

Figure 3-35 : Formes d'onde de courant pour un défaut entre la phase A-terre.

Figure 3-36 : Réponse de système de détection dans le cas de défaut A-terre.

Figure 3-37 : Formes d'onde de courant pour un défaut deux phases (AB) et la terre.

Figure 3-38 : Réponse de système de détection dans le cas de défaut AB et la terre.

Figure 3-39 : Formes d'onde de courant pour un défaut AB sans terre.

Figure 3-40 : Réponse de système de détection dans le cas de défaut AB sans terre.

Figure 3-41 : Formes d'onde de courant pour un défaut triphasé.

Figure 3-42 : Réponse de système de détection dans le cas de défaut triphasé.

Figure 3-43 : Wavelet toolbox main menu.

Figure 3-44 : Analyse ondelettes (1-D).

Figure 3-45 : Schéma explicatif sur la méthode d'un seul côté.

Figure 3-46 : Schéma explicatif sur la méthode de deux côtes.

Figure 3-47 : Décomposition de du signal et la prise des instants d'impact par la méthode d'une seul côté à (20km).

Figure 3-48 : Décomposition du signal et la prise des instants d'impact par la méthode d'un seul côté à (20km).

Figure 3-49 : Décomposition du signal et la prise des instants d'impact par la méthode d'un seul côté à (40km).

Figure 3-50 : Décomposition du signal et la prise de l'instant d'impact par la méthode de deux côtés à (40km).

Tableau 1-1 : Définition des niveaux de tension

BT : Basse tension.

MT : Moyenne tension.

HT : Haute tension.

TC : Transformateurs de courant.

TV : Transformateurs de Tension.

TCT : Transformateur de tension capacitif.

V_p : Vitesse de phase.

BTA : Basse Tension A.

BTB : Basse Tension en B.

HTA : Haute Tension A.

HTB : Haute Tension B.

TBT : Très basse tension.

THT : Très haute tension.

RNA : Réseau Neuronal Artificiel.

GPS : Global Positioning System.

PMC : Le Perceptron Multicouche.

nLs : Le nombre approprié de niveaux de la décomposition.

db : Daubechies.

WT : Transformée en ondelettes.

CWT : Transformée en ondelettes continue.

DWT : Transformée en ondelettes discrète.

DEI : Dispositifs électroniques intelligents.

V_s : La tension à la borne S.

V_r : La tension à la borne R.

m : La distance entre défaut et source par unité.

Z_{1L} : L'impédance de la ligne de séquence positive.

Z_{0L} : L'impédance homopolaire de la ligne.

I_s : Courant sortant de la source S.

I_0 : Courant homopolaire.

R_f : Résistance de défaut.

I_f : Courant du défaut.

s_0^j : Facteur d'échelle.

τ_0 : Facteur de translation.

k et j : Des entiers.

τ : Facteur de translation.

s : Facteur de dilatation (Echelle).

(τ, s) : Ondelette mère.

Ψ : Ondelette enfants.

$\frac{1}{\sqrt{s}}$: Facteur de normalisation de l'énergie afin que le signal transformé ait la même énergie à toutes les échelles.

KV : Kilovolts.

L' : Longueur.

C' : Impédance.

$X_{one\ end}$: Distance au défaut [km]

v : Vitesse de propagation de l'onde [km / s].

t_1 : Instant d'arrivée d'onde incidente au point de mesure située à l'extrémité 1 de la ligne.

t_2 : Instant d'arrivée de l'onde rétrograde au point de mesure située à l'extrémité 1 de la ligne

L : Longueur totale de la ligne

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 [1] [2], [3] [4], 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.
- ❖ 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, 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 et localisation des 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 1

Généralités sur les
réseaux électriques

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 liés à la tension (Surtension, Creux de tension...etc.) et outre liées au courant (Court-circuit...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.

Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les réseaux électriques, ces composants et ces structures ainsi les différents défauts qui peuvent affecter le réseau.

2- Généralités sur les réseaux électriques

La fonction générale d'un réseau électrique est d'acheminer l'énergie électrique des centres de production jusque chez les consommateurs et, l'électricité n'étant pas stockable en grande quantité, d'assurer à tout instant l'équilibre production-consommation. La distribution de l'énergie électrique doit satisfaire des critères de sécurité des biens et des personnes, de qualité de la tension (la norme EN 50 160 relative à la qualité de la tension) et de disponibilité de l'énergie. [5]

Le réseau électrique est structuré en plusieurs niveaux comme le montre la (figure 1-1), assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions.

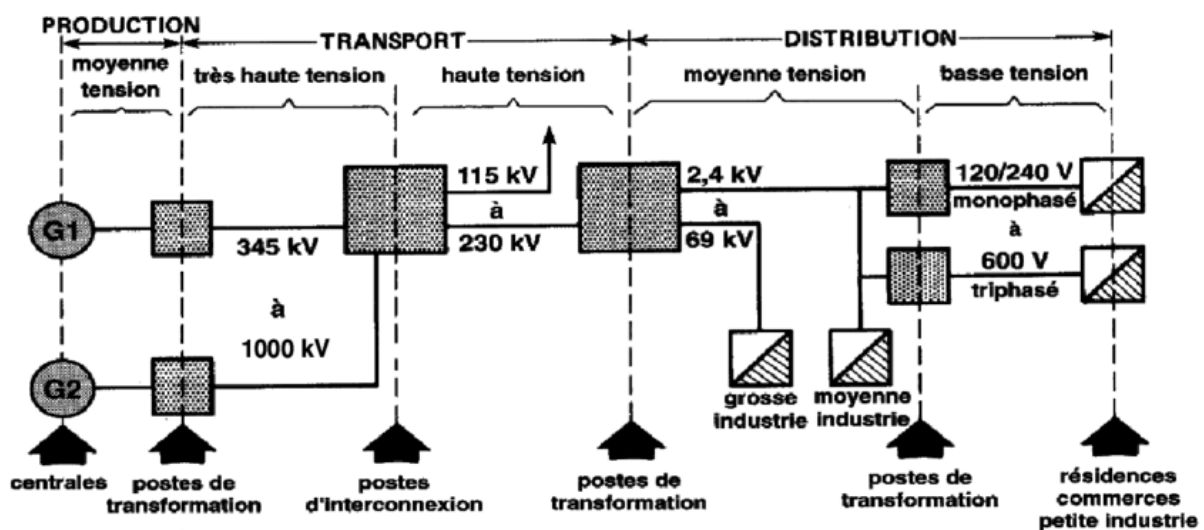


Figure 1-1 : Structure d'un réseau électrique

2-1 Réseaux de transport et d'interconnexion

Les réseaux de transport à très haute tension (THT) transportent l'énergie des gros centres de production vers les régions consommatrices (400 et 225 kV). Ces réseaux sont souvent interconnectés, réalisant la mise en commun de l'ensemble des moyens de production à disposition de tous les consommateurs.

Le transport de fortes puissances a nécessité l'adoption d'un réseau haute tension afin de réduire les pertes Joule. L'interconnexion permet ainsi de consommer l'énergie là où elle n'est pas produite et d'optimiser les moyens de production (nucléaire, thermique, hydraulique), garantissant un meilleur équilibre entre l'offre et la demande. Le fonctionnement du réseau de transport doit :

- Respecter les normes concernant la qualité de la tension (amplitude et fréquence).
- Garantir la sécurité du réseau en respectant les contraintes (conduite du réseau performante) et en réagissant de manière efficace aux grandes perturbations (plans de défense et procédures de reconstitution du réseau performants). [6]

2-2 Réseaux de répartition

Les réseaux de répartition ou réseaux haute tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport. Leur tension est supérieure à 63 kV selon les régions. Ces réseaux sont, en grande part, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut transiter plus de 60 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres. Leur structure est soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation.

En zone urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres.

2-3 Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution commencent à partir des tensions inférieures à 63 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension Jusqu'aux postes de distribution HTA/BTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique [7].

Les réseaux de distribution ont pour mission d'acheminer l'énergie d'un poste de transformation aux consommateurs. La distribution de l'énergie électrique doit satisfaire des critères de sécurité des biens et des personnes, de qualité de la tension (la norme européenne EN 50 160 relative à la qualité de la tension), de disponibilité de l'énergie et de rentabilité.

2-3-1 Réseaux de distribution à moyenne tension

Le réseau de distribution à moyenne tension est caractérisé par :

- HTA (30 et 10 kV le plus répandu),
- Neutre à la terre par une résistance,
- Limitation à 300 A pour les réseaux aériens,
- Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains,
- Réseaux sans terrains en boucle ouverte.

2-3-2 Réseaux de distribution à basse tension

Le réseau de distribution à basse tension est caractérisé par :

- BTA (230 / 400 V),
- Neutre directement à la terre,
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés.

2-4 Domaines de Tension

Dans les dernières années les électriciens donnent des nouvelles classifications de la tension, comme montre le Tableau 1, la basse tension est divisée en 03 classes la TBT ($\leq 50V$), la BTA (de 51 à 500 V inclus) et la BTB (de 501 à 1000V inclus).

Et enfin la haute tension garde ces deux domaines, la HTA qui va de 1001 volts à 50 000 volts inclus. La HTB supérieure à 50 000 volts (Tableau 1-1) [8].

Domaine haute tension (HT)	Domaine basse tension (BT)
HTB : $U_n > 50.000 \text{ (V)}$	BTB : $500 < U_n \leq 1000 \text{ (V)}$
HTA : $1000 < U_n \leq 50.000 \text{ (V)}$	BTA : $50 < U_n \leq 500 \text{ (V)}$
	TBT : $U_n \leq 50 \text{ (V)}$ – très basse tension

Tableau 1-1 : Définition des niveaux de tension

3- Structure des réseaux électriques

On distingue trois architectures de réseaux électriques : réseau radial, réseau maillé, et le réseau bouclé.

3-1 Structure radial

La structure radiale est la plus répandue dans les réseaux électriques de distribution. Les lignes se développent en antenne en partant des postes de transformation. Le flux d'énergie sur les lignes à un sens unique. La protection de ce type de réseau n'est pas coûteuse, grâce à sa structure simple. La sécurité par contre est rudimentaire, puisqu'un défaut sur une ligne et l'ouverture du disjoncteur entraînent une interruption de service pour tous les consommateurs en aval [9]. Un exemple d'un réseau radial est illustré sur la (figure 1-2).

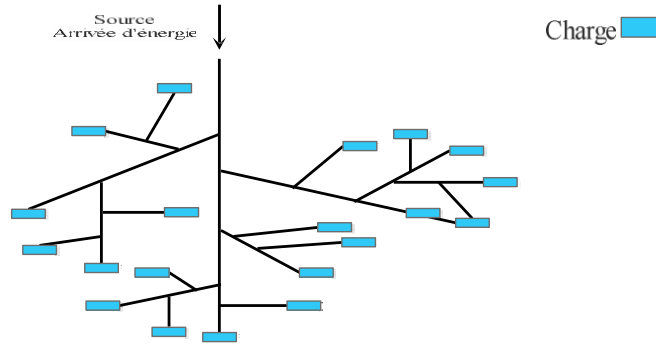


Figure 1-2 : Exemple d'un réseau radial

3-2 Structure bouclé

Lorsque la densité de charge augmente, on tend, surtout dans les réseaux à moyenne tension mais aussi dans les réseaux à basse tension, vers un maillage partiel par la formation de boucles. Tous les accès de la boucle sont alors alimentés par deux lignes, ce qui augmente fortement la sécurité du service. Un exemple d'un réseau boucle est illustré sur la (figure 1-3).

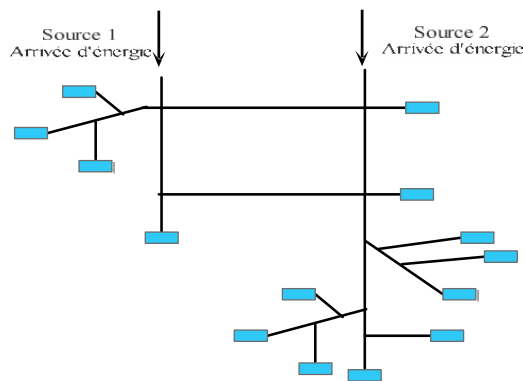


Figure 1-3 : Exemple d'un réseau boucle

3-3 Structure maillé

Permet la réalimentation en cas d'indisponibilité d'un tronçon ou d'un poste HTA/BT après l'élimination de l'élément défectueux (figure 1-4). Il présente l'inconvénient de n'utiliser les câbles que partiellement par rapport à leur capacité. Elle exige, de plus, un point commun par paire de câble et demande une surveillance continue du réseau en fonction de l'accroissement de la charge [10].

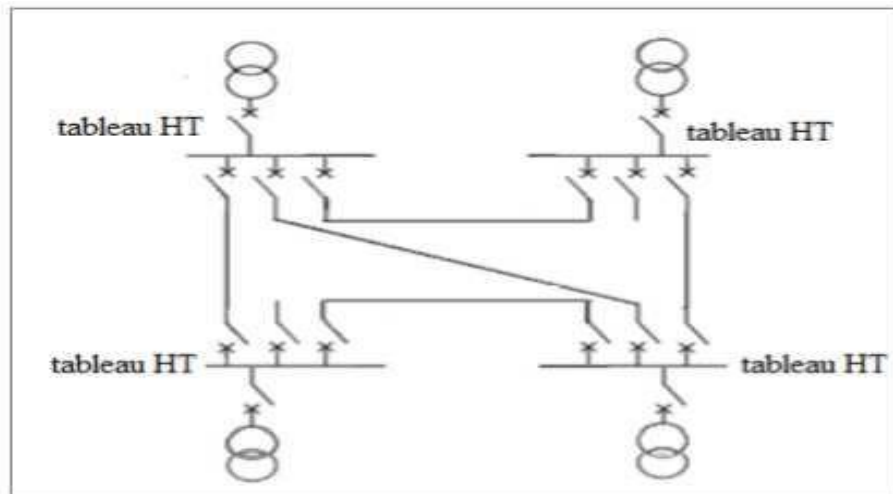


Figure 1-4 : Exemple d'un réseau maillé

3-4 Structure arborescente

La sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste rouge qui représente l'apport d'énergie (figure 1-5) coupe l'ensemble des clients en aval. Cette structure est plus utilisée pour les réseaux de distribution ruraux.

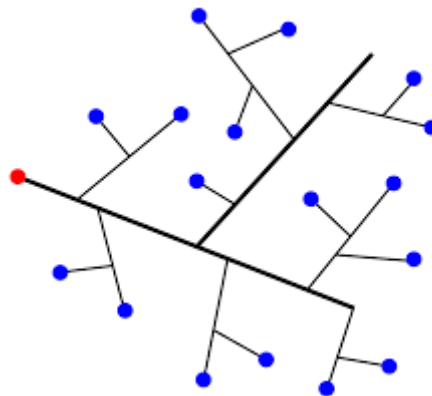


Figure 1-5 : Exemple d'un réseau arborescent

4-Composants principaux du réseau électrique

Le réseau électrique comprend plusieurs éléments interconnectés qui permettent de transporter et de distribuer l'énergie électrique de manière efficace et sûre :

4-1 Centrales de production

La source ou le générateur est un élément de base du réseau électrique ; sa fonction est de convertir l'énergie d'origine non électrique (hydraulique, thermique, solaire ...) en énergie électrique. Ils sont insérés en divers points du réseau et sont destinés à fournir une puissance assignée sous une tension fixée à l'avance.

4-2 Appareils de manœuvre HTA

L'appareillage HTA permet de réaliser les trois fonctions de base :

- **Le sectionnement** qui consiste à isoler une partie d'un réseau pour y travailler en toute sécurité

- **La coupure** qui consiste à ouvrir ou à fermer un circuit dans ses conditions normales d'exploitation
- **La protection** qui consiste à isoler une partie d'un réseau en situation anormale quand il y a un dépassement d'un seuil limite sur une variable surveillée (le courant généralement).

Parmi tous les appareils existants, deux sont plus particulièrement utilisés dans réseau **HTA**, ce sont le disjoncteur et l'interrupteur. Ils sont presque toujours complétés par d'autres appareils (unités de protection et contrôle-commande, capteurs de mesure,) qui composent leurs équipements associés.

➤ **Disjoncteurs HTA**

La fonction principale du disjoncteur est la protection. Il peut également assurer la fonction d'interrupteur. Les disjoncteurs sont souvent utilisés dans réseau **HTA**. Ils peuvent fonctionner sous ou hors tension, en mode manuel ou télécommandé.

➤ **Interrupteurs HTA**

Cet appareil, dont la fonction principale est la coupure, peut aussi assurer la fonction de Sectionnement. Il est opéré à distance ou en manuel. Deux types d'interrupteur sont employés dans les réseaux :

- Les interrupteurs sans pouvoir de coupure sont utilisés afin de sectionner ou d'acheminer entre des sections dans des départs. Ce type d'interrupteur peut être seulement manœuvré hors tension,
- Les interrupteurs avec pouvoir de coupure (interrupteur – sectionneur), ils peuvent être manœuvrés sous tension. Ils sont utilisés comme des dispositifs de coupure de secours. Ces interrupteurs sont des disjoncteurs sans fonction de protection.

4-3 Lignes électriques

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électriques du producteur (centrale électrique) au consommateur (ville, quartier, maison, ensemble industriel) (figure 1-6). Les conducteurs sont, en général, à base d'aluminium, de cuivre ou de bronze. Les isolants sont une partie solide (porcelaine, verre papier, matière plastique) combinée avec un gaz (air) ou un liquide (huile).

On distingue quatre types de lignes sont [11] :

- Lignes de distribution basse tension (BT)
- Lignes de distribution moyenne tension (MT)
- Lignes de transport haute tension (HT)
- Lignes de transport très haute tension (THT)



Figure 1-6 : Lignes électriques

5- Défauts dans les réseaux

5-1 Définition d'un défaut

On appelle un défaut toute perturbation qui engendre des modifications des paramètres électriques d'un circuit. Il peut apparaître sur une phase (défaut monophasé) ou sur plusieurs phases (défaut polyphasé) d'une ligne (départs, arrivées, liaisons) ou d'un demi-jeu de barres.

Un défaut est caractérisé par la modification de la valeur du courant sur une ligne et /ou de la tension (entre le demi-jeu de barre et le neutre) par rapport à une valeur nominale (dépassement d'un seuil). [12]

5-2 Détection de défaut

L'objectif, est d'attirer l'attention de l'opérateur de supervision sur l'apparition d'un ou plusieurs événements susceptibles d'affecter le bon fonctionnement de l'installation. Le principe de base de cette étape, est la vérification de la cohérence des diverses informations disponibles sur le système. Elle s'articule sur la redondance analytique, i.e. modèle mathématique du système. Ce dernier, est une représentation mathématique, compactés, d'une connaissance profonde sur le fonctionnement d'un système.

En effet, elle consiste en une comparaison entre les différentes mesures disponibles sur le système et leurs estimations via un modèle [13]. Les défauts détectés peuvent gravement affecter la stabilité et la qualité du réseau. Par exemple, un court-circuit entraîne une chute brutale de tension, tandis qu'une surcharge prolongée provoque un échauffement des équipements et une baisse de rendement, pouvant aller jusqu'à la panne. De plus, les déséquilibres de tension et les surtensions peuvent perturber le fonctionnement des appareils sensibles et altérer la qualité de l'alimentation électrique, entraînant des coupures ou des fluctuations gênantes pour les utilisateurs. Les défauts présentent également des risques

importants pour les équipements et les utilisateurs. Une surintensité excessive peut causer des dommages irréversibles aux transformateurs et aux lignes électriques, augmentant les coûts de maintenance et réduisant la durée de vie des infrastructures. Pour les utilisateurs, ces défauts peuvent engendrer des coupures d'électricité soudaines, des surtensions dangereuses pouvant endommager les appareils électroniques, et même des risques d'incendie ou d'électrocution en cas de défaillance grave du réseau.

5-3 Localisation de défauts

La localisation ou l'isolation d'une défaillance consiste à remonter les symptômes pour retrouver l'ensemble des éléments défaillants. Ce problème est difficile à résoudre. Il est possible de déterminer une défaillance, ou une panne résultant d'un défaut. Par contre, le problème inverse est plus difficile à résoudre, puisqu'une panne peut résulter d'un ou plusieurs défauts [13]. Une localisation rapide et efficace des défauts est essentielle pour réduire l'instabilité du réseau et limiter les pertes d'énergie. Un défaut non identifié ou mal localisé peut entraîner une propagation des perturbations, causant des coupures en cascade ou une surcharge sur d'autres parties du réseau. Cela peut aussi ralentir les interventions et prolonger les interruptions de service, affectant les utilisateurs et augmentant les coûts d'exploitation.

5-4 Différentes perturbations touchant les réseaux électriques

Les différents défauts qu'on rencontre dans un réseau électrique sont [12] :

- Les courts circuits
- Les surtensions
- Les surcharges
- Les creux de tension
- Le déséquilibre
- Les oscillations
- Les harmoniques

5-4-1 Courts-circuits

Un court-circuit est un contact entre conducteurs, il se caractérise par une diminution de l'impédance entre les Phases ou entre la Phase et la Terre à une faible valeur, ce qui engendre une augmentation importante de l'intensité du courant.

Un court-circuit se produit généralement lors de la fermeture d'un circuit électrique quelconque sur une impédance nulle ou de faible valeur, c'est une mise à la terre accidentelle d'une ou de plusieurs phases d'un réseau ou d'un matériel électrique, menant à un fonctionnement anormal du système et de ces équipements (figure 1-7).

Ces courts-circuits sont causés par des agents de nature extérieure ou de nature intérieure [12].

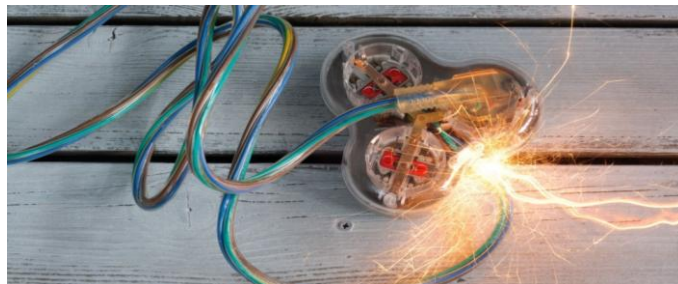


Figure 1-7 : Exemple d'un court-circuit

Ce type de défaut peut être causé par :

➤ **Contact entre conducteurs (direct ou par objet interposé)**

Les courts-circuits peuvent être causés par un contact direct entre conducteurs, que ce soit par un objet extérieur (branche d'arbre, animal, outil métallique) ou par un défaut interne (mauvaise connexion, fixation défaillante). Les conditions météorologiques jouent un rôle important dans ce type de défaut. Par exemple, les vents violents ou les tempêtes peuvent faire tomber des branches sur les lignes électriques, tandis que la neige et le givre peuvent alourdir les câbles jusqu'à provoquer leur rupture et leur contact accidentel.

➤ **Claquage des isolants solides**

Le vieillissement des équipements est l'une des principales causes de détérioration des isolants. Avec le temps, les matériaux isolants se dégradent en raison de facteurs environnementaux comme l'humidité, la chaleur excessive ou la pollution (poussières, sel marin, gaz industriels). Cette dégradation peut entraîner des fissures ou une perte de résistance électrique, provoquant un claquage de l'isolant. Une surcharge électrique ou une surtension due à un coup de foudre peut également accélérer cette défaillance, augmentant ainsi le risque de court-circuit.

➤ **Amorçage par arc dans l'air ou un liquide isolant (surtension ou réduction d'isolement)**

Les surtensions sont souvent causées par des phénomènes atmosphériques, comme les coups de foudre directs ou indirects, qui augmentent brutalement la tension dans le réseau. Si l'isolement est affaibli (par l'humidité, la pollution ou l'usure du matériel), un arc électrique peut se produire entre les conducteurs. De plus, dans les transformateurs ou les interrupteurs à huile, la dégradation du liquide isolant sous l'effet du temps ou de la contamination (eau, impuretés) peut réduire ses propriétés isolantes, facilitant ainsi l'amorçage d'un arc et le déclenchement d'un court-circuit.

5-4-2 Surtensions

On qualifie de surtension tout passage de tension à une valeur supérieure à la valeur nominale (Figure 1-8). Les surtensions peuvent être d'origine externe ou interne [12].

➤ **Surtensions d'origine externe**

Elles sont causées par des phénomènes atmosphériques, dues à des coups de foudres directes sur une ligne, sur un pylône ou bien à des coups de foudre indirect (électromagnétique, électrostatique).

➤ **Surtension d'origine interne**

Toute perturbation dans un circuit provoqué par induction d'une variation rapide et momentanée de la tension. Par exemple ouverture et fermeture d'un circuit, claquage d'un isolant.

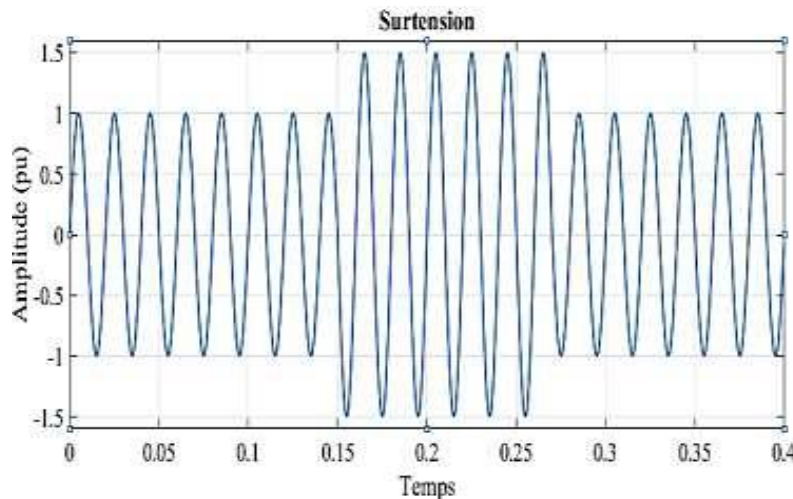


Figure 1-8 : Surtension

Ce type de défaut peut être causée par :

➤ **Coupe ou enclenchement des circuits, dites surtensions de manœuvre ou surtensions de commutations**

Lorsqu'un circuit électrique est ouvert ou fermé, cela entraîne une variation soudaine du courant, générant des surtensions transitoires. Ce phénomène est particulièrement fréquent lors de la mise en marche ou de l'arrêt des gros équipements industriels. Le vieillissement des équipements peut aggraver cette situation, car des contacts usés ou encrassés augmentent la probabilité d'arcs électriques et de surtensions [12].

➤ **Arcs à la terre**

Un arc à la terre se produit lorsque l'isolation d'un conducteur est défectueuse, permettant un passage du courant vers la terre. Les conditions météorologiques comme l'humidité, la pluie ou la pollution atmosphérique (poussières, sel marin) accélèrent la détérioration des isolants, augmentant ainsi le risque d'arc électrique. De plus, le vieillissement des équipements peut provoquer des fissures ou une dégradation de l'isolation, facilitant la formation de surtensions.

➤ **Défaillance du régulateur de tension**

Les régulateurs de tension maintiennent une tension stable dans le réseau. Une panne de ces dispositifs peut entraîner des fluctuations importantes, causant des surtensions prolongées. Le vieillissement des composants électroniques du régulateur peut provoquer ces défaillances. De plus, les orages et les surtensions induites par la foudre peuvent endommager ces dispositifs, rendant leur fonctionnement instable.

➤ **Amorçage entre canalisations qui se croisent ou sont fixées sur les mêmes supports, alimentées par des tensions différentes**

Lorsque des lignes électriques de tensions différentes sont trop proches, un amorçage (décharge électrique) peut survenir en raison de la différence de potentiel. Les conditions météorologiques, comme le vent violent, la neige ou l'accumulation de glace, peuvent causer un déplacement des câbles et favoriser ces amorçages. Le vieillissement des équipements joue aussi un rôle, car les supports affaiblis ou rouillés peuvent laisser les lignes se rapprocher dangereusement.

5-4-3 Surcharges

La surcharge est caractérisée par l'augmentation de la valeur de la puissance demandée, elles se produisent lorsque les appareils d'utilisations demandent un courant très puissant pour la ligne d'alimentation [12]. Ce type de défaut peut être coursée par :

➤ **Courts-circuits résistants**

Un court-circuit résistif se produit lorsque la résistance entre les conducteurs reste élevée, limitant le courant mais entraînant une surcharge prolongée. Ce type de défaut peut être causé par le vieillissement des équipements, des connexions mal serrées ou des dépôts de saleté et d'humidité sur les isolants, réduisant leur efficacité [14].

➤ **Couplage difficiles, démarrage de moteur**

Lorsqu'un moteur électrique démarre, il absorbe une forte pointe de courant pour atteindre sa vitesse nominale. Si le couplage entre la charge et le moteur est mal ajusté ou si le moteur est trop sollicité, il peut fonctionner en surcharge. De plus, une alimentation instable due à des fluctuations de tension ou à des conditions météorologiques extrêmes (orages, tempêtes, etc.) peut aggraver ce phénomène, augmentant le risque de panne et d'échauffement des circuits.

➤ **Report de charge sur une ligne ou une machine, lors de la coupure du la parallèle Mauvais fonctionnement**

Lorsque l'une des lignes ou machines d'un réseau électrique est mise hors service (volontairement pour maintenance ou involontairement à cause d'un défaut), la charge qu'elle supportait est automatiquement transférée vers d'autres lignes ou équipements encore en service. Si ces derniers ne sont pas conçus pour supporter cet excès de charge, cela entraîne une surcharge qui peut provoquer une surchauffe des câbles, des transformateurs et des appareils électriques. De plus, un mauvais fonctionnement des dispositifs de régulation ou des disjoncteurs peut aggraver la situation en empêchant une répartition équilibrée de la charge, ce qui augmente le risque d'endommagement des équipements et de coupure générale du réseau.

5-4-4 Creux de tension

Un creux de tension est une baisse soudaine de la tension en un point du réseau électrique, à une valeur comprise entre 90 % et 10 % de la tension de référence, suivie de son rétablissement après un laps de temps, compris entre la demi-période fondamentale du réseau 10 ms à 50 Hz et une minute. Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombreux appareillages présents dans les réseaux industriels (figure 1-9) [15].

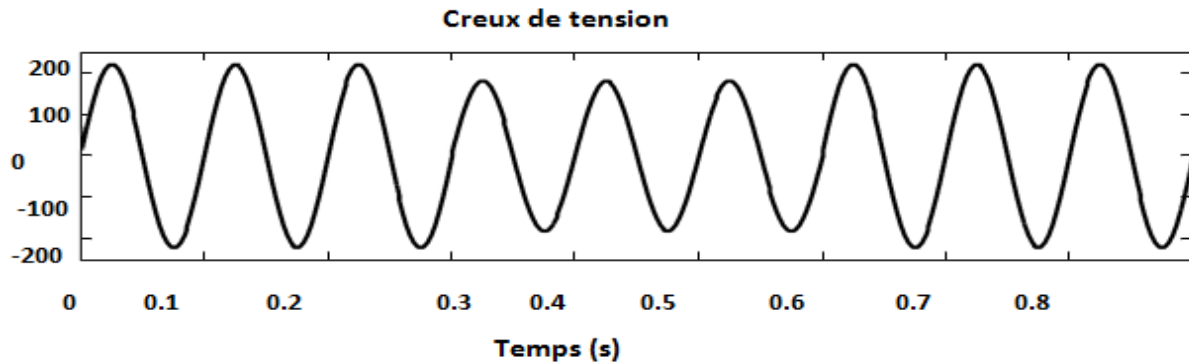


Figure 1-9 : Exemple d'un Creux de tension

Les creux de tension ont pour principale origine : les courts circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage de moteurs électriques à forte puissance. Car, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois la valeur nominale, et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette surintensité produit une chute de tension qui se rétablit après la diminution du courant. Les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou par des modifications dans la structure du réseau [15].

5-4-5 Déséquilibres

On appelle déséquilibre sur une ligne ou dans une installation triphasée la différence entre les trois courants des phases. Généralement, il est limité au réseau BT à cause des clients alimentés en deux fils. Le taux de déséquilibre ne doit pas dépasser 15%. Ce déséquilibre crée un champ inverse au champ tournant au niveau de l'alternateur, ce qui nécessite de surveiller le déséquilibre à cause du couple freinant qu'il peut engendrer. Ce déséquilibre est causé par :

➤ **Enclenchement ou déclenchement d'un sectionneur ou d'un disjoncteur**

L'ouverture ou la fermeture d'un sectionneur ou d'un disjoncteur peut provoquer un déséquilibre temporaire dans un réseau électrique. Ce phénomène peut être accentué par un mauvais entretien de ces équipements, un vieillissement des composants ou encore des manœuvres incorrectes réalisées par des opérateurs.

➤ **Coupe de conducteur sans court-circuit**

Une coupe de conducteur peut être causée par des conditions météorologiques extrêmes telles que des vents violents, des tempêtes ou du givre qui fragilisent les câbles électriques. De plus, le vieillissement des installations électriques peut entraîner des ruptures dues à l'usure des matériaux. Une coupe sans court-circuit entraîne un déséquilibre dans la répartition des charges électriques entre les phases.

➤ **Le courant de court-circuit**

Lorsqu'un court-circuit survient, il peut engendrer une répartition inégale du courant entre les phases, créant ainsi un déséquilibre. Les causes de ces courts-circuits peuvent être variées : détérioration des isolants due au vieillissement, surcharge électrique, ou encore des phénomènes climatiques tels que la foudre. L'apparition de courants de court-circuit perturbe fortement la stabilité du réseau et peut endommager les équipements connectés [12].

5-4-6 Oscillations

Les oscillations de la tension et du courant sont dues aux variations plus ou moins rapides de la charge qui agit directement sur la vitesse de rotation (fréquence) des machines de production de l'énergie électrique. Elles sont liées directement à la mécanique des machines électriques, c'est la raison pour laquelle on les appelle phénomènes transitoires électromécaniques, il est causé par :

➤ **Manœuvres ou déclenchements sur les réseaux de distribution**

Les oscillations électriques peuvent être causées par des manœuvres telles que l'ouverture ou la fermeture de disjoncteurs et de sectionneurs. Ces opérations, nécessaires pour la maintenance ou la gestion du réseau, entraînent des fluctuations soudaines du courant et de la tension. Les conditions météorologiques extrêmes, comme les tempêtes ou les orages, peuvent provoquer des déclenchements intempestifs des protections, amplifiant ces oscillations [12]

➤ **Variations brutales de charge sur les alternateurs**

Lorsque la charge d'un alternateur varie brusquement, le rotor met du temps à retrouver une stabilité, ce qui entraîne des oscillations avant qu'un nouvel équilibre ne soit atteint. Ce phénomène est aggravé par le vieillissement des équipements, qui réduit leur capacité d'adaptation aux fluctuations de charge. Les installations électriques anciennes ou mal entretenues sont plus sujettes à ce type de problème, augmentant ainsi le risque de perturbations sur le réseau

➤ **Un faux couplage produit des effets analogues**

Un mauvais couplage entre plusieurs générateurs ou entre un alternateur et le réseau peut engendrer des déséquilibres, provoquant des oscillations électriques. Ce problème peut être dû à des erreurs humaines lors de l'intégration d'un nouvel équipement ou à une défaillance mécanique. De plus, des conditions climatiques défavorables, comme des températures extrêmes, peuvent affecter la synchronisation des machines et amplifier ces oscillations.

5-4-7 Harmoniques

La pollution harmonique est une perturbation permanente, qui provoque une distorsion de l'onde de la tension. Elle résulte de la superposition, d'ondes sinusoïdales mais de fréquence égale au multiple entier de la fréquence fondamentale. Les harmoniques les plus importants étant les harmoniques de rangs 5, 7, et 11. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. [16] La figure suivante (figure 1-10) montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur une tension fondamentale de fréquence 50 Hz.

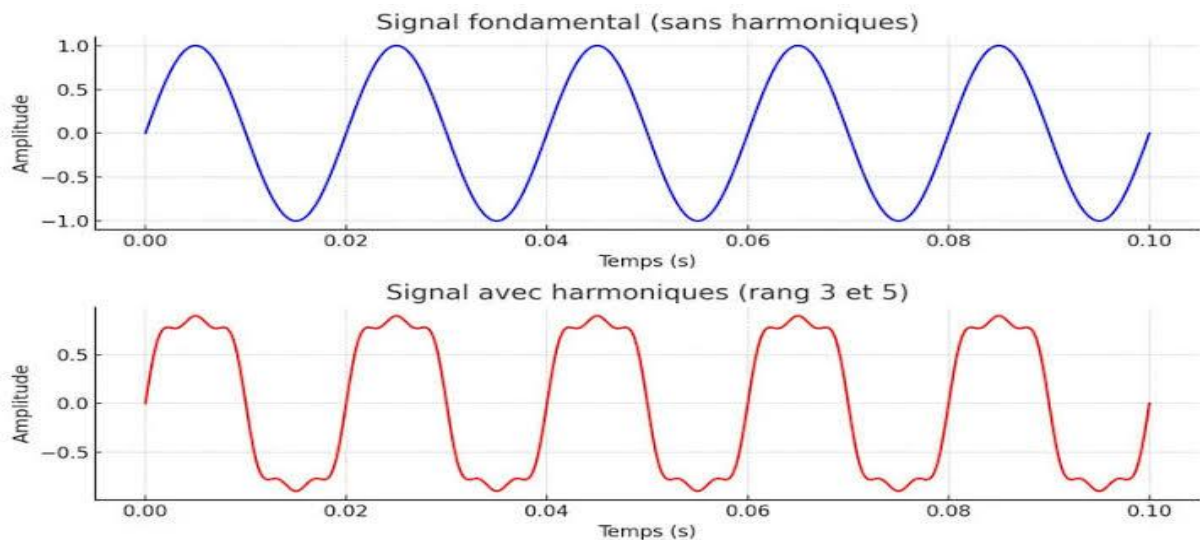


Figure 1-10 : Exemple de distorsion Harmoniques

La pollution harmonique provient essentiellement de charges non linéaires, dont la caractéristique est d'absorber des courants non sinusoïdaux riches en composantes harmoniques, qui circulent à travers les impédances du réseau et créent des tensions harmoniques selon $U = Z * I$, ces tensions harmoniques peuvent perturber le fonctionnement des autres charges raccordés à la même source.

Les principales sources d'harmoniques sont les charges industrielles et les équipements électroniques munis de convertisseurs statiques ou d'alimentation à découpage : téléviseurs, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière et lampes fluorescentes. De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes, en font des sources de distorsion harmonique importantes. À noter que l'utilisation de ce type d'appareils croît en nombre, et parfois en puissance unitaire [17].

6-Effets des défauts

Les effets des défauts sont surtout à redouter sur les réseaux à haute et très haute tension (HT, THT). Les défauts ont des effets sur :

- Le bon fonctionnement des réseaux.
- La tenue diélectrique des matériels.
- La qualité de fourniture d'énergie.
- Les circuits de télécommunication.
- La sécurité des personnes.

6-1 Bon fonctionnement des réseaux

Lorsqu'ils sont polyphasés et proche des centrales, ils entraînent une diminution du couple résistant des machines et donc une rupture de l'équilibre entre celui-ci et le couple moteur. Si les défauts ne sont pas éliminés rapidement ils peuvent conduire à la perte de stabilité des groupes générateurs et à des endommagements du matériel dans le réseau électrique.

6-2 Tenue diélectrique des matériels

Les défauts triphasés provoquent des surintensités violentes qui peuvent dépasser 20 à 30 fois le courant de service normal, ces surintensités amènent à deux types de contraintes : Des contraintes mécaniques dues aux efforts électrodynamiques qui entraînent le balancement des conducteurs aériens et le déplacement des bobinages des transformateurs. Ces effets sont souvent à l'origine des défauts entre phase qui sont en générale beaucoup plus sévère que les défauts entre phase et terre, parce que le courant de défaut à la terre est limité par l'impédance de mise à la terre des points neutre des réseaux. Des contraintes thermiques dues au dégagement de chaleur par effet joule dans les conducteurs.

6-3 Qualité de fourniture d'énergie

Les défauts se traduisent pour les utilisateurs par des chutes de tension dont l'amplitude et la durée sont fonction de différents facteurs telle que la nature du défaut, la structure du réseau affecté, le mode d'exploitation du réseau, le mode de mise à la terre du neutre et la performance de la protection. Les perturbations peuvent aller du creux de tension jusqu'à l'interruption complète de la tension.

6-4 Circuits de télécommunication

La présence d'un court-circuit dissymétrique entre une ou deux phases d'une ligne d'énergie et la terre entraîne la circulation d'un courant homopolaire qui s'écoule à la terre par les points neutres du réseau. La tension induite longitudinale, proportionnelle à ce courant apparaît sur les lignes de télécommunications qui ont un trajet parallèle à la ligne d'énergie. Cette tension peut atteindre des valeurs dangereuses pour le personnel et les installations de télécommunications.

6-5 Impact sécuritaires

La mise sous tension accidentelle des masses entraîne l'élévation de potentiel des masses, cette élévation est liée à l'écoulement des courants de défauts à la terre. Les conducteurs tombés au sol présentent des risques pour les personnes. Le mode de mise à la terre des points neutre joue de ce fait un rôle essentiel dans la protection des personnes contre les chocs électriques.

7-Protection de Réseaux Electrique

La Commission Electrotechnique Internationale (C.E.I) définit la protection comme l'ensemble des dispositions destinées à la détection des défauts et des situations anormales des Réseaux afin de commander le déclenchement d'un ou de plusieurs disjoncteurs et, si nécessaire d'élaborer d'autres ordres de signalisations.

Les dispositifs de protection surveillent en permanence l'état électrique des éléments d'un réseau et provoquent leur mise hors tension (par exemple l'ouverture d'un disjoncteur), lorsque ces éléments sont le siège d'une perturbation indésirable : court-circuit, défaut d'isolement, surtension...etc. Le choix d'un dispositif de protection n'est pas le fruit d'une Réflexion isolée, mais une des étapes les plus importantes de la conception d'un réseau électrique.

7-1 Qualité principale d'un Système de Protection

7-1-1 Rapidité

Les courts-circuits sont donc des incidents qu'il faut éliminer le plus vite possible, c'est le rôle des protections dont la rapidité de fonctionnement et des performances prioritaires.

Le temps d'élimination du court-circuit comprend deux composantes principales :

- Le temps de fonctionnement des protections (quelques dizaines de millisecondes).
- Le temps d'ouverture des disjoncteurs, avec les disjoncteurs modernes (SF6 ou à vide), ces derniers sont compris entre 1 et 3 périodes [18].

7-1-2 Sélectivité

La sélectivité est une capacité d'un ensemble de protections à faire la distinction entre les conditions pour lesquelles une protection doit fonctionner celles où elle ne doit pas fonctionner.

Les différents moyens qui peuvent être mis en œuvre pour assurer une bonne sélectivité dans la protection d'un réseau électrique, les plus importants sont les trois types suivants :

- Sélectivité ampérométrique par les courants,
- Sélectivité chronométrique par le temps,
- Sélectivité par échange d'informations, dite sélectivité logique.

➤ Sélectivité ampérométrique

Elle est basée sur le fait que, dans un réseau, le courant qui circule entre une source de puissance et un point de défaut diminue au fur et à mesure que le point de défaut s'éloigne de la source.

Une protection ampérométrique (figure 1-11) est disposée au départ de chaque tronçon : son Seuil est réglé à une valeur inférieure à la valeur de défaut minimal provoqué par un court-circuit sur la section surveillée, et supérieure à la valeur maximale du courant provoqué par un court-circuit situé en aval (au-delà de la zone surveillée).

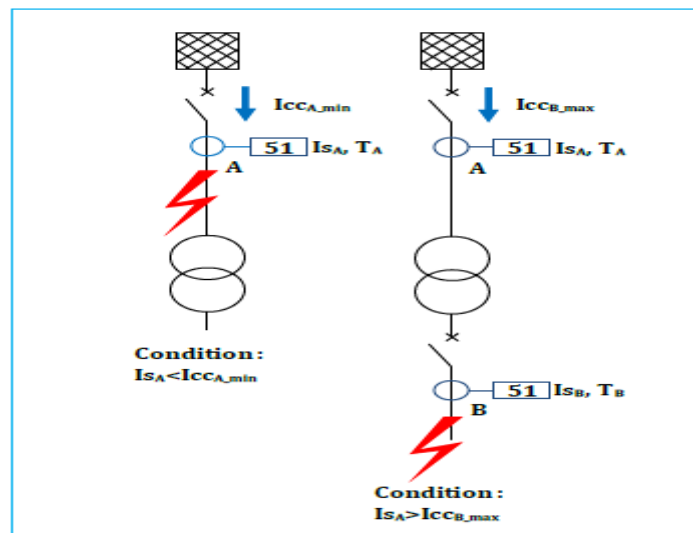


Figure 1-11 : Fonctionnement d'une sélectivité ampérométrique.

➤ Sélectivité chronométrique

Sélectivité dans laquelle les protections sollicitées sont organisées pour fonctionner de manière décalée dans le temps. La protection la plus proche de la source a la temporisation la plus longue.

Ainsi, sur le schéma (figure 1-12), le court-circuit représenté est vu par toutes les protections

(En A, B, C, et D). La protection temporisée D ferme ses contacts plus rapidement que celle installée en C, elle-même plus rapide que celle installée en B.

Après l'ouverture du disjoncteur D et la disparition du courant de court-circuit, les protections A, B, C qui ne sont plus sollicitées, reviennent à leur position de veille.

La différence des temps de fonctionnement T entre deux protections successives est l'intervalle.

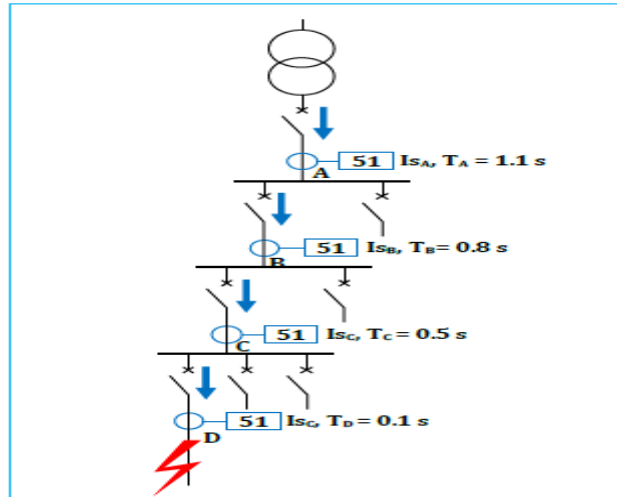


Figure 1-12 : Principe de la sélectivité chronométrique.

➤ Sélectivité logique

Ce système a été développé pour remédier aux inconvénients de la sélectivité chronométrique.

Ce principe est utilisé lorsque l'on souhaite obtenir un temps court d'élimination de défaut (figure 1-13).

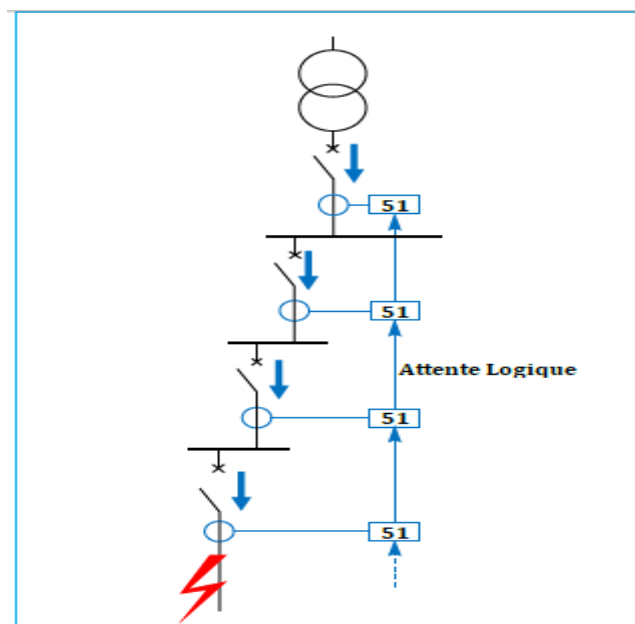


Figure 1-13 : Principe de la sélectivité logique.

Ce principe est utilisé lorsque le nombre de relais en cascade est trop grand pour une simple Sélectivité par le temps. Dans ce cas on utilise des relais max. de I avec blocage logique. L'échange d'informations logiques entre protections successives permet la suppression des intervalles de sélectivité.

Ainsi, dans un réseau en antenne, les protections situées en amont du point de défaut sont Sollicitées, celles en aval ne le sont pas ; cela permet de localiser sans ambiguïté le point de défaut et le disjoncteur à commander.

Chaque relais sollicité par un défaut envoie :

- Un ordre d'attente logique à l'étage amont (ordre d'augmentation de la temporisation propre au relais)
- Un ordre de déclenchement au disjoncteur associé sauf s'il a lui-même reçu un ordre d'attente logique de l'étage aval. Un déclenchement temporisé est prévu en secours.

7-1-3 Sensibilité

La protection doit fonctionner dans un domaine très étendu de courants de courts-circuits entre :

- Le courant maximal qui est fixé par le dimensionnement des installations et est donc Parfaitement connu,
- Un courant minimal dont la valeur est très difficile à apprécier et qui correspond à un Court-circuit se produisant dans des conditions souvent exceptionnelles.

La notion de sensibilité d'une protection est fréquemment utilisée en référence au courant de court-circuit le plus faible pour lequel la protection est capable de fonctionner [18].

7-1-4 Fiabilité

Les définitions et les termes proposés ici, sont dans la pratique, largement utilisés au plan international.

- Une protection a un fonctionnement correct lorsqu'elle émet une réponse à un court-circuit sur le réseau en tout point conforme à ce qui est attendu.
- A l'inverse, pour un fonctionnement incorrect, elle comporte deux aspects :
 - ✓ Le défaut de fonctionnement ou non-fonctionnement lorsqu'une protection, qui aurait dû fonctionner, n'a pas fonctionné.
 - ✓ Le fonctionnement intempestif, qui est un fonctionnement non justifié, soit en l'absence de défaut, soit en présence d'un défaut pour laquelle la protection n'aurait pas dû fonctionner.

La fiabilité d'une protection, qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement incorrect (éviter les déclenchements intempestifs), est la combinaison de :

- **La sûreté** : qui est la probabilité de ne pas avoir de défaut de fonctionnement.

- **La sécurité** : qui est la probabilité de ne pas avoir de fonctionnement intempestif (figure 1-14).

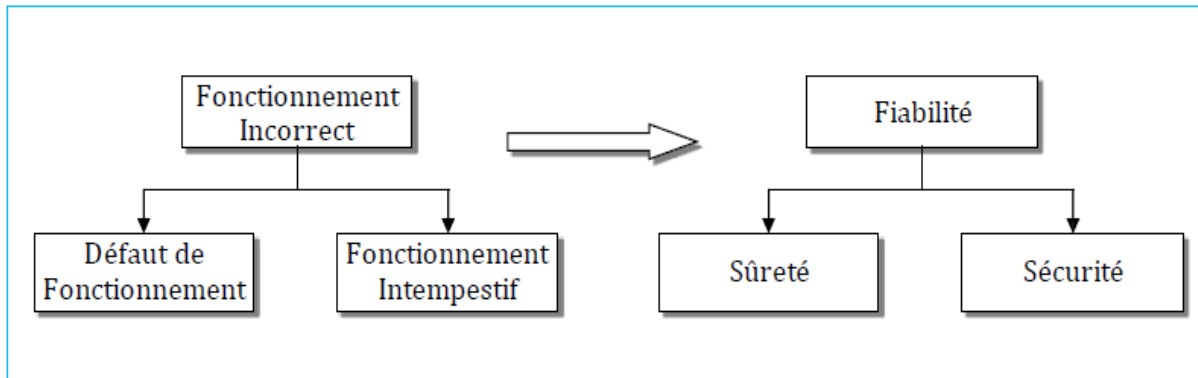


Figure 1-14 : Fiabilité d'une protection.

On peut améliorer la fiabilité en associant plusieurs protections, mais, comme on peut le voir sur la (figure I-13), sûreté et sécurité sont deux exigences contradictoires (figure 1-15).

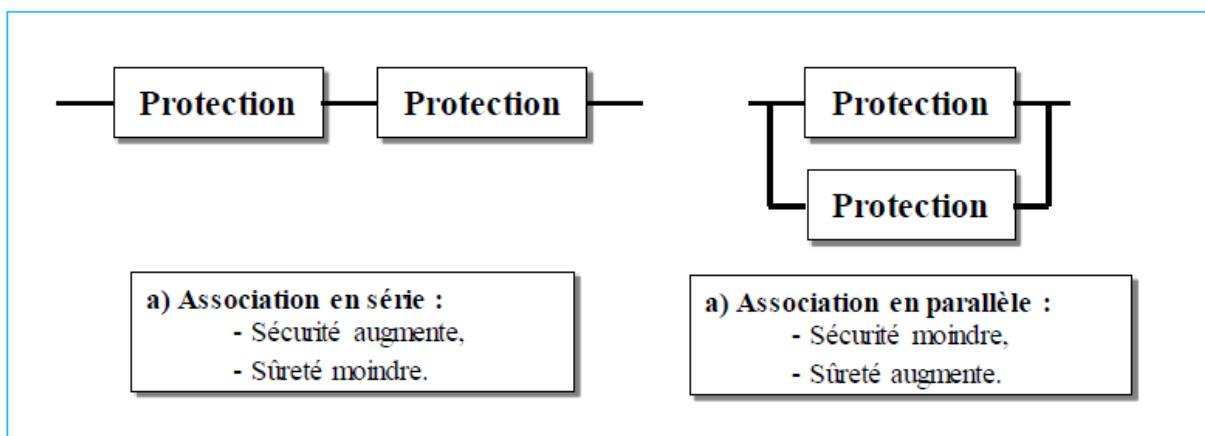


Figure 1-15 : Association de protection.

Conclusion

Ce chapitre donne une description des structures typiques de réseaux électrique, ainsi les causes et les effets des perturbations sur les réseaux électriques tels que les courts-circuits, les surtensions... ces causes et conséquences et leurs systèmes de protection au même temps c'est une introduction au cœur du sujet présenté par la détection de ces défauts dans le but d'essayer de détecter et d'éliminer ces défauts afin d'avoir un réseau plus fiable et plus sécurisées.

Chapitre 2

Détection et localisation d'un défaut dans un réseau électrique

1-Introduction

La détection des défauts est une tâche nécessaire pour la surveillance et la protection du réseau électrique. En effet, une 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.

Ce chapitre présente une revue des principales approches de détection et de localisation des défauts proposées dans la littérature. Les avantages et inconvénients de chaque méthode sont discutés. Une attention particulière est portée à la transformée en ondelettes, qui fera l'objet du chapitre suivant.

2- Techniques d'analyse des défauts

Une analyse de défaut est généralement déductive qui peut être utilisée exclusivement comme analyse qualitative ou, si nécessaire, étendue à une analyse quantitative. Ce type d'analyse nécessite une étude détaillée pour déterminer le type de défaut, ses causes et ses effets sur le système électrique [19].

2-1 Filtrage

Le filtrage dans l'analyse est une méthode utilisant un filtre numérique, ce filtre est un élément qui effectue un filtrage à l'aide d'une succession d'opérations mathématiques sur un signal discret.

Ça consiste à répéter n fois la mesure, et d'en calculer la moyenne arithmétique (ce sera le travail du microcontrôleur, à partir des résultats du convertisseur analogique - numérique). Cela revient à déterminer la composante continue du signal, le filtre numérique est donc du type passe-bas. [19]

2-2 Echantillonnage

Le signal physique complet n'est pas étudié en pratique. En fait, seule la représentation numérique du signal est utilisée pour réaliser les calculs voulus. La numérisation du signal est une transformation discrète du signal physique considéré comme continu dans le sens mathématique du terme [20].

3- Méthodes de détection des défauts dans le réseau électrique

3-1 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) [21].

3-1-1 Principe de la logique

Dans la théorie des ensembles conventionnels, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble, donc le « degré d'appartenance » d'un élément à un ensemble ne peut être que nul ou égal à l'unité. Par contre dans la théorie des ensembles flous, un élément peut plus ou moins appartenir à un ensemble, le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou peut prendre n'importe quelle valeur comprise dans l'intervalle $[0,1]$. Ce qui différencie les deux théories provient des limites des ensembles définis. Dans la théorie des ensembles définis, les limites des ensembles sont « nets », tandis que pour les ensembles flous les contours sont « graduels », ou encore flous comme cette (figure 2-16).

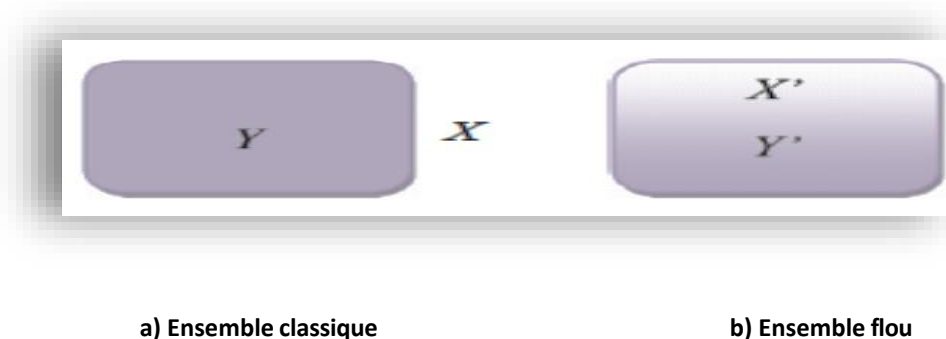


Figure 2-16 : Comparaison d'un ensemble classique et d'un ensemble flou

D'où :

X : n'appartient pas à « a » X' : appartient partiellement à « b »

Y : appartient totalement à « a » Y' : appartient partiellement à « b »

3-1-2 Eléments de base de la logique floue

Dans cette partie, on va exposer d'une façon non exhaustive les éléments de base de la logique floue [22].

- Variables linguistiques.
- Ensembles flous.
- Fonctions d'appartenance.

3-1-3 Règles floues

La règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication entre deux propositions floues. Par exemple, considérons deux variables linguistiques (v_1, u, tv_1) (v_2, u, tv_2) et les deux propositions suivantes v_1 est A, v_2 est B, où A et B sont deux ensembles flous de v_1 et v_2 . On peut définir la règle floue par l'expression, si v_1 est A Alors v_2 est B

- La proposition „ v_1 est A „ est la condition de l'implication.
- La proposition „ v_2 est B „ est la condition de l'implication.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons :

- Linguistiquement.
- Symboliquement.
- Par matrice d'inférence.

3-1-4 Structure d'un système flou

Un système flou peut être interprété selon deux de vue : mathématique ou logique. D'un point de vue mathématique, un système flou est une fonction non linéaire reliant un vecteur de données d'entrée à un vecteur de sortie. Du point de vue logique, un système flou est un système à structure particulière, composé de quatre modules principaux : à savoir, la base de connaissance, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification [23] [24] [25].

La commande floue est l'application la plus utilisée dans la logique floue. En effet, cette méthode permet d'obtenir un réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies.

- Interface de fuzzification
- Base de règles.
- Mécanisme d'inférence floue.
- Interface de défuzzification.

La logique floue comporte trois étapes comme le montre figure (2-17)

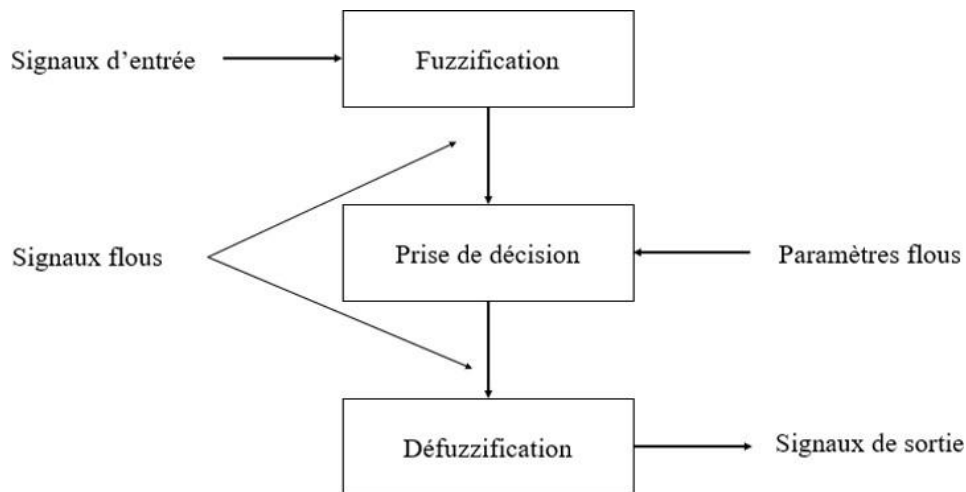


Figure 2-17 : Schéma fonctionnel du contrôleur à logique floue

Permet ces avantages on trouve :

- Gestion de l'incertitude et de l'imprécision
- Approche plus proche du raisonnement humain.
- Simplicité de mise en œuvre
- Utilisation efficace dans le contrôle des systèmes
- Adaptabilité

Permet ces inconvénients on trouve :

- Dépendance aux règles définies
- Manque de précision mathématique
- Difficulté de validation.
- Consommation de ressources en cas de complexité élevée.
- Interprétation subjective.

3-2 Filtre de Kalman

En 1960, Kalman a introduit le filtre de Kalman comme une alternative au filtre de Wiener [26], [27]. 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 [28], [29].

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 [30]. Il est utilisé pour modéliser les systèmes qui peuvent être décrits par des équations différentielles linéaires stochastiques.

3-2-1 Types de Le filtre de Kalman

1. Filtre de Kalman discret

En 1960, R.E. Kalman a publié un article intitulé "A new Approach to Linear Filtering and Prédiction Problems". Ses recherches le mènent à y décrire un processus qui sera connu comme le filtre de Kalman. Le filtre de Kalman est un ensemble d'équations mathématiques qui permet une meilleure estimation de l'état futur d'un système malgré l'imprécision des mesures et de la modélisation

2. Filtre de Kalman étendu

Le filtre de Kalman standard décrit dans la première partie, permet d'estimer l'état d'un système linéaire (les coefficients des équations d'état sont constants) dans le cas contraire où les équations sont variables (système non linéaire) [32].

Le Filtre de Kalman étendu (EKF) permet d'appliquer le principe du filtre de Kalman pour estimer les états d'un système non-linéaire. Pour cela, les équations du système sont linéarisées autour d'un point de fonctionnement, correspondant dans le cas du EKF à l'état estimé [33]. La non linéarité peut être associée au modèle du processus, au modèle d'observation ou bien aux deux. Ces non linéarités dans le système rendent inapplicable le filtre de Kalman classique et il devient donc nécessaire d'adapter le EKF [31].

La linéarisation des équations du système autour d'un point de fonctionnement en utilisant les séries de Taylor, nous permet d'aboutir à des équations similaires au cas du filtre de Kalman linéaire [34], le filtre de Kalman linéarisé autour du point de fonctionnement actuel est le filtre de Kalman étendu. [35].

3. Filtre de Kalman sans parfum

A la différence du filtre de Kalman étendu, au lieu de faire une linéarisation des fonctions non linéaires f_t et h_t , le filtrage de Kalman sans parfum [36] [37] [38], utilise la technique de la transformation sans parfum [39] [40].

Étant donné une variable aléatoire de moyenne et covariance connues et une fonction non linéaire, on applique une technique d'échantillonnage déterministe autour de la valeur moyenne pour obtenir des échantillons appelés sigma-points, qui sont ensuite transformés par la fonction non linéaire. Moyenne et covariance de la fonction non linéaire de la variable aléatoire sont ensuite approchées par moyenne sur les sigma-points [41].

3-2-2 Domaines d'application du filtre de kalman

Le filtre de Kalman est utilisé dans une large gamme de domaines technologiques (radar, vision électronique, communication ...). C'est un thème majeur de l'automatique et du

traitement du signal. Un exemple d'utilisation peut être la mise à disposition, en continu, d'informations telles que la position ou la vitesse d'un objet à partir d'une série d'observations relative à sa position, incluant éventuellement des erreurs de mesures.

Par exemple, pour le cas de la poursuite des cibles radar, les données sur la position de la cible, sa vitesse et son accélération sont mesurées à chaque instant mais avec énormément de perturbations dues au bruit ou aux erreurs de mesure. Le filtre de Kalman fait appel à la dynamique de la cible qui définit son évolution dans le temps, éliminant ainsi l'effet du bruit. Ces données peuvent être calculées pour l'instant présent (filtrage), dans le passé (lissage), ou sur un horizon futur (prédiction).

Le filtrage de Kalman est aussi de plus en plus utilisé en dehors du domaine du traitement du signal, par exemple en météorologie et en océanographie, pour l'assimilation de données dans un modèle numérique, en finance ou en navigation et il est même utilisé dans l'estimation des états de trafic routier [42].

3-3 Techniques de Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

La méthode des réseaux de neurones artificiels (RNA) peut être utilisée pour analyser des 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 électrique. En s'entraînant sur un ensemble de données comprenant des exemples de défauts connus et de conditions normales, le RNA apprend à distinguer les schémas caractéristiques des défauts électriques et à les détecter avec précision [43].

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle, où chaque processeur calcule une sortie unique à partir des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est également considérée comme un réseau [44]. Un réseau de neurones constitue ainsi un exemple de modèle connexionniste, capable d'être entraîné et d'apprendre à résoudre un problème donné.

3-3-1 Type de réseau de neurone

➤ Réseau de neurone non bouclé

Un réseau de neurones non bouclé est représenté par un ensemble de neurones connectés sans retour en arrière, formant un graphe acyclique. L'information circule des neurones d'entrée vers les neurones de sortie, en passant par des neurones cachés qui effectuent des calculs intermédiaires. Dans les réseaux à couches, les neurones d'une même couche ne sont pas connectés entre eux. Chaque couche reçoit des signaux de la précédente et transmet ses résultats à la suivante. Les couches extrêmes sont la couche d'entrée (reçoit les données) et la couche de sortie (fournit les résultats). Les couches intermédiaires sont appelées couches cachées. Lorsque les neurones cachés utilisent une fonction d'activation sigmoïde, on parle de Perceptron Multicouche (PMC ou MLP).

Le Perceptron Multicouche (PMC) est une extension du perceptron simple avec une ou plusieurs couches cachées permettant de modéliser des relations non linéaires. Le nombre de couches cachées dépend de la complexité du problème à résoudre. (La figure 2-18)

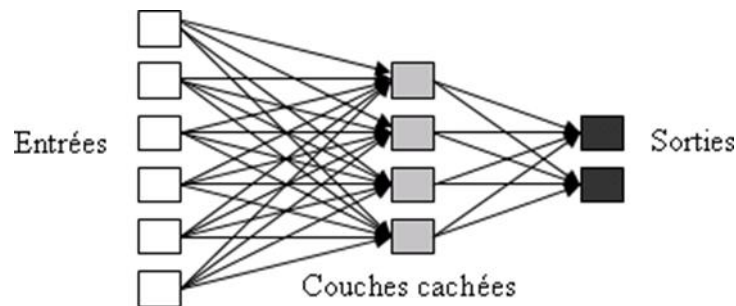


Figure 2-18 : Structure d'un réseau de neurones non bouclé.

➤ Réseau de neurone bouclé (ou récurrent)

Un réseau de neurones bouclé est schématisé par un graphe des connexions qui est cyclique. Lorsqu'on se déplace dans le réseau en suivant le sens des connexions, il est possible de trouver au moins un chemin qui revient à son point de départ (un tel chemin est désigné sous le terme de "cycle"). Ainsi, un retard entier multiple de l'unité de temps choisie est attaché à chaque connexion d'un réseau de neurones bouclé (ou à chaque arrête de son graphe). Une grandeur à un instant donné ne peut pas être fonction de sa propre valeur au même instant. Tout cycle du graphe du réseau doit avoir un retard non nul. La figure 2-19 représente un exemple de réseau neurone bouclé.

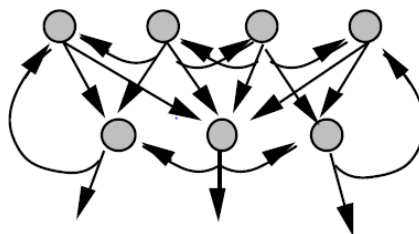


Figure 2-19 : Réseau neurone bouclé (récurrent).

3-3-2 Application

Les réseaux de neurones servent aujourd'hui à toutes sortes d'applications dans divers domaines. Par exemple, le développement d'un autopilote pour avion, ou encore un système de guidage pour automobile, la conception des systèmes de lecture automatique de chèques bancaires et d'adresses postales, la production des systèmes de traitement du signal pour différentes applications militaires, un système pour la synthèse de la parole, des réseaux sont aussi utilisées pour bâtir des systèmes de vision par ordinateur, pour faire des prévisions sur les marchés monétaires, pour évaluer le risque financier ou en assurance, pour différents processus manufacturiers, pour le diagnostic médical, pour l'exploration pétrolière ou gazière, en robotique, en télécommunication, Bref, les réseaux de neurones ont aujourd'hui un impact considérable et, il y a fort à parier, que leur importance ira grandissant dans le futur [46].

3-3-3 Avantages et les inconvénients de RNA

Permet ces avantages on trouve :

- Tolérance par rapport aux fautes (élimination d'un neurone...)
- Apprentissage automatique des poids
- Capacité de généralisation [45].
- Robustesse avec des données bruyantes.
- Permet la simulation d'une grande variété de comportements.
- Calcul automatique des poids.
- Généralisation

Permet ces inconvénients on trouve :

- Représentation complexe
- Paramètres difficiles à interpréter physiquement (boite noire) [44]
- Contrairement à la méthode de l'arbre de décision, le résultat est extrêmement opaque.
- Le temps nécessaire à la mise en place d'un programme de formation peut être assez long

4- Notions générales sur la transformée en ondelettes

L'analyse par ondelettes a été introduite au début des années 1980. Il s'agit de donner une représentation des signaux permettant la mise en valeur simultanée des informations temporelles et fréquentielles (localisation temps-fréquence).

C'est ainsi que le besoin des ondelettes, famille de fonction déduite d'une même fonction (appelées ondelettes mères) par opération de translation et dilatation, s'est fait ressentir en remarquant que la transformée de Fourier qui a dominée dès le début de 19^{ième} siècle, perd lors de la projection le contrôle de la variable temporelle et reste toujours incapable de décrire localement (en temps ou espace) le comportement fréquentiel des signaux.

L'idée originale sur laquelle sont basées les ondelettes est apparue vers les années 1940 grâce au physicien Denis Gabor, qui a introduit la notion de la transformée de Fourier à fenêtre glissante dans le but de remédier au problème de localisation temps-fréquence en proposant de multiplier le signal par une fonction localisée dans le temps (fenêtre) et ensuite appliquer la transformée de Fourier.

4-1 Définition La Transformée en ondelettes (WT)

Une ondelette est une forme d'onde qui à une valeur moyenne zéro et une durée limitée. En regardant des images des ondelettes et des ondes sinusoïdales, on voit intuitivement que des signaux avec les changements pointus pourraient mieux être analysés avec une ondelette irrégulière qu'avec une sinusoïde douce.

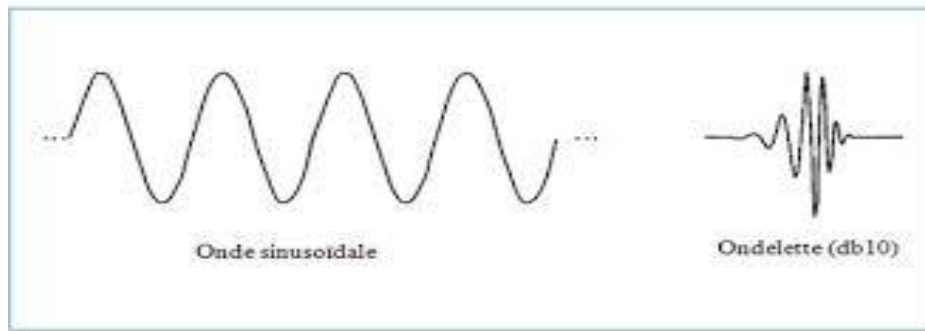


Figure 2-20 : La Différence entre une onde sinusoidale et une ondelette.

La transformée en ondelettes est un outil mathématique qui décompose un signal en fréquences en conservant une localisation spatiale. Le signal de départ est projeté sur un ensemble de fonctions de base qui varient en fréquence et en espace. Ces fonctions de base s'adaptent aux fréquences du signal à analyser. Cette transformation permet donc d'avoir une localisation en temps et en fréquence du signal analysé.



Figure 2-21 : La Transformée en ondelettes.

Les fonctions de base d'ondelettes peuvent être étirées ou comprimées dans la fenêtre d'analyse.

Ceci aide à isoler des discontinuités de signal parce que des courtes fonctions de base sont employées pour obtenir l'information détaillée de fréquence tandis que des longues fonctions de base sont employées pour rechercher l'information approximative de fréquence du signal. Ceci permet d'analyser le signal à différentes échelles.

4-2 Ondelettes Mère

L'analyse en ondelettes adopte une fonction de prototype d'ondelettes connue sous le nom de " **Ondelettes mère**" donné dans l'équation (II-1), Cette Ondelette mère génère un ensemble de fonctions de base connues sous le nom " **Ondelettes enfants** " par des translations et dilatations récursives. L'ondelette mère est donnée par la formule suivante :

$$\Psi(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \dots (1-1)$$

Où :

- τ Facteur de translation.
- s Facteur de dilatation (Echelle).
- (τ, s) Ondelette mère.
- $\Psi(\frac{t-\tau}{s})$ Ondelette enfants.
- $\frac{1}{\sqrt{s}}$ Facteur de normalisation de l'énergie afin que le signal transformé ait la même énergie à toute les échelles.

4-3 L'échelle

Le paramètre échelle, utilisé en analyse par ondelettes, est très similaire à la notion d'échelle pour les cartes. Comme dans le cas des cartes, les grandes échelles correspondent à des vues globales (du signal) non détaillées. Les faibles valeurs d'échelle correspondent à des vues détaillées.

En termes de fréquence, de façon similaire, les basses fréquences (grandes échelles) fournissent une information globale sur le signal (habituellement sur tout l'étendu du signal) alors que les hautes fréquences (faibles échelles) donnent des informations détaillées sur un motif caché dans le signal (généralement de faible durée) [47].

4-4 Transformée en ondelettes continue (CWT)

La transformée en ondelettes continue utilise des translations et des dilatations de la fonction ondelette mère durant tout l'intervalle du temps de manière continue.

La définition de CWT est donnée par la formule :

$$CWT(t, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \dots (1-2).$$

Cette transformation est en théorie infiniment redondante puisque l'ondelette est traduite de manière continue, cependant il existe des méthodes pour diminuer cette redondance l'une de ces méthodes consiste en l'emploi de la transformée en ondelettes discrète.

4-5 Transformée en ondelettes discrète (DWT)

La transformée en ondelettes discrète (DWT) est produite pour surmonter le problème de redondance de CWT, Cette redondance mobilise une grande quantité de ressource de calcul.

La transformée discrète en ondelettes (DWT), au contraire, fournit suffisamment d'information, tant pour l'analyse que pour la reconstruction du signal original. Ceci en un temps de calcul notablement réduit.

La DWT est considérablement plus simple à implémenter que la CWT. Dans ce qui suit, nous Introduisons les concepts de base de la DWT, ses propriétés et les algorithmes utilisés pour la calculer. La transformée en ondelettes discrète translate et dilate l'ondelette selon des valeurs discrètes.

Les ondelettes sont alors définies de la manière suivante :

$$\Psi(\tau_0, S_0) = \frac{1}{\sqrt{S_0^j}} \Psi \left(\frac{t - k\tau_0 S_0^j}{S_0^j} \right) \dots \dots (1-3)$$

La DWT est donnée par la formule ci-dessous :

$$\text{DWT}(\tau_0, S_0) = \frac{1}{\sqrt{S_0}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi \left(\frac{t - k\tau_0 S_0^j}{S_0^j} \right) \dots \dots (1-4)$$

Tel que :

- S_0^j Facteur d'échelle.
- τ_0 Facteur de translation.
- k et j Des entiers.

4-6 Familles de la transformée en ondelettes

Il existe une infinité de fonctions d'ondelettes parce que toute fonction oscillante localisée est une ondelette mère possible. Toutefois, elles ne possèdent pas toutes des propriétés Intéressantes. Aussi, de nombreux spécialistes des ondelettes ont construit des familles d'ondelettes possédant certaines propriétés remarquables Parmi les familles d'ondelettes, les ondelettes de Haar sont les plus simples, mais elles ne sont pas bien localisées.

Ingrid Daubechies a construit des ondelettes à support compact qui permettent d'utiliser des filtres de taille finie [48].

Une autre famille d'ondelettes est la famille des ondelettes splines dont la réponse fréquentielle est bien localisée.

Les différentes familles d'ondelettes sont utilisées selon leurs propriétés en fonction du problème à résoudre. La figure suivante présente quelques familles d'ondelettes :

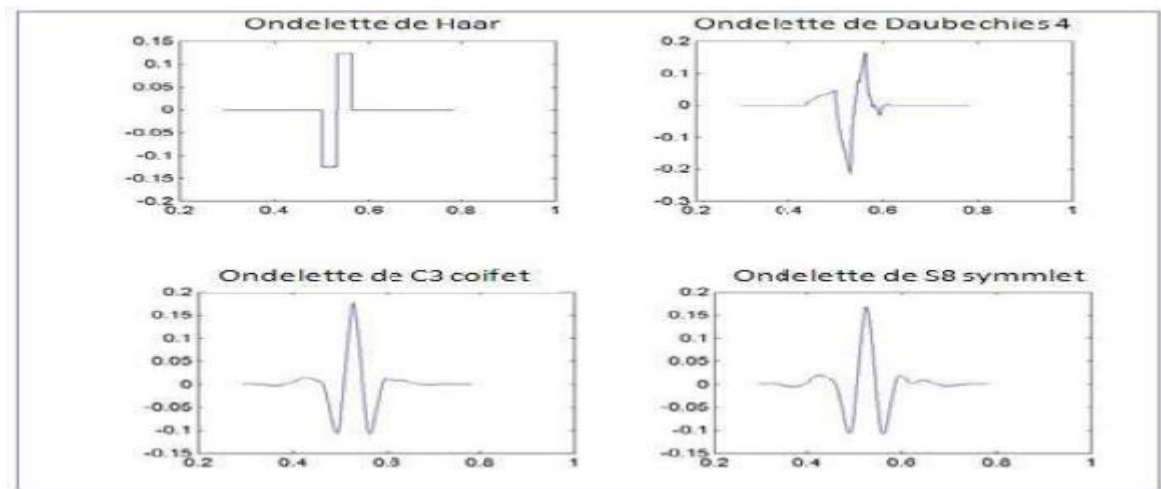


Figure 2-22 : Quelques familles d'ondelettes.

4-6-1 Ondelette de Haar

La fonction échelle (t) et la fonction d'ondelette (t) sont données par :

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq t \leq 1 \\ 0, & \text{si non} \end{cases} \dots (1-5)$$

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1, & \text{si } \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0, & \text{si non} \end{cases} \dots (1-6)$$

L'inconvénient de cette analyse est sa très mauvaise résolution fréquentielle son intérêt est grande simplicité des filtres associés.

4-6-2 Ondelette Splines

Les B Spline sont construites par auto convolution de la fonction boîte noté $I(t)$:

$$I(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } -\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \text{si non} \end{cases} \dots (1-7)$$

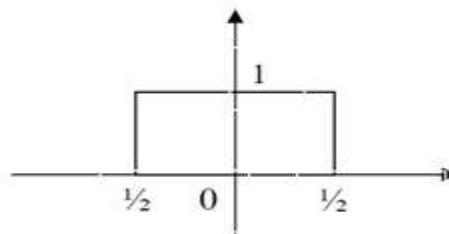


Figure (2-23) : La Fonction Boîte $I(t)$.

La famille des fonctions B Spline ne constitue pas une base orthonormée, mais on peut appliquer une méthode d'opérationnalisation, par une combinaison linéaire des fonctions B Spline d'Ordre n , et obtenir ainsi une orthogonal, les filtres numériques associés auront une réponse en phase linéaire, mais ils sont de type RII, ce qui est à mettre en œuvre. La B Spline d'Ordre n sera :

Si n est impair :

$$\beta(n)(t) = I(t) * I(t) * \dots * I(t) \dots (1-8)$$

Si n est pair :

$$\beta(n)(t) = I\left(t - \frac{1}{2}\right) * i\left(t - \frac{1}{2}\right) * \dots * I\left(t - \frac{1}{2}\right) \dots (1-9)$$

En posant $n=0$ on retrouve la base de Haar qui est la seule de la série qui soit orthonormée.

4-6-3 Ondelette Bi orthogonale

Dans certaines applications, on préfère utiliser des Ondelettes bi orthogonales qui permettent d'allier les propriétés de linéarité en phase avec la compacité des supports des filtres utilisés. L'analyse et la reconstruction sur les bases bi orthogonales n'utilisent pas les mêmes familles de fonction, deux jeux de bases duales nécessaires.

4-6-4 Ondelette de Morlet

L'Ondelette de Morlet a un grand intérêt et l'étude des signaux sismiques, comme nous allons le voir plus tard, puisque sa forme "ressemble" beaucoup à celle de l'Ondelette sismique (l'impulsion). Cette Ondelette est inspirée du signal élémentaire de Gabor elle est obtenue par modulation d'une gaussienne.

$$\Psi(t) = (\pi \cdot t_0)^{-1/4} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{t_0} \right)^2 + 2j\pi f_0 t \right] \dots (1-10)$$

4-6-5 Chapeau Mexicain

Le chapeau mexicain Figure 2-27 Ondelette réelle qui doit son nom à sa forme, est construite à partir de la dérivée seconde de la gaussienne :

$$\Psi(t)_{CM}(t) = (1 - t^2) \cdot \exp \left(-\frac{1}{2} t^2 \right) \dots (1-11)$$

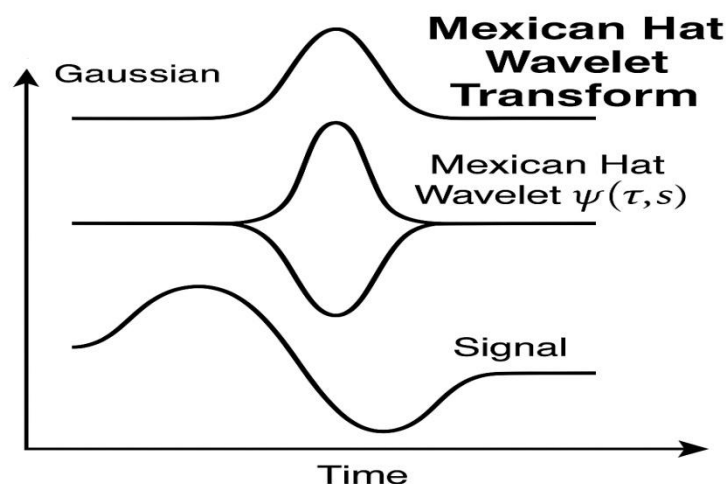


Figure 2-24 : Ondelette Chapeau Mexicain.

Cette Ondelette appartient à l'espace de Schwartz S , elle est symétrique, ce qui permet de ne pas introduire des décalages (déphasages) dans la transformée en Ondelettes contrairement à des Ondelettes non symétriques (comme le sont les Ondelettes orthogonales à support compact de Daubechies), elle est particulièrement adaptée à la détection des discontinuités.

4-6-6 Ondelette de Daubechie

Les Ondelettes d'Ingrid Daubechies sont intéressantes puisqu'elles sont orthogonales et bien localisées en temps (ou espace) de plus elles donnent la possibilité de choisir le degré de régularité voulue en imposant un certain nombre de moments nuls Figure (2-25), leur régularité augmente avec N, cependant elles ne sont pas symétriques ce qui peut causer de problèmes dans certaines situations [49].

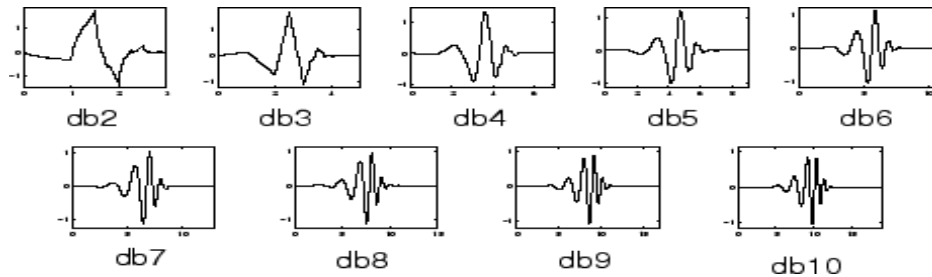


Figure 2-25 : Ondelette de Daubechies

4-7 Avantage de la transformée en ondelettes

Le fait que la transformée utilise des fonctions bien localisées dans le réseau électrique donne beaucoup d'avantages [50] :

- **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.

La transformée en ondelettes présente de nombreux avantages dans le domaine du traitement du signal et de l'image. L'analyse par ondelettes ne se limite plus à l'image telle qu'elle nous apparaît, mais permet l'étude des objets présents dans l'image à différentes échelles, elle permet de réduire la redondance pour améliorer la compression d'une image, elle peut également extraire les informations importantes (texture, contours, etc.) contenues dans une image et aussi de réduire le bruit contenu dans l'image. C'est un outil puissant de transformation du signal qui permet de « préparer » le signal afin de faciliter le traitement envisagé.

4-8 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.

4-8-1 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 (nLs) 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 [51] :

$$2^{-(nLs+1)} f_s < f \dots \dots (1-12)$$

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

$$nLs = \text{int} \left(\frac{\log \frac{f_s}{f}}{\log 2} \right) \dots \dots (1-13)$$

Donc le nombre de décomposition recommandé est de :

$$nLs = \text{int} \left(\frac{\log \frac{f_s}{f}}{\log 2} \right) \dots \dots (1 - 14)$$

5-Localisation de défaut

La localisation de défaut est devenue de plus en plus importante pour connaître l'endroit de défaut et le réparer afin de réduit le temps de l'entretien et de la restauration du réseau électrique a fin de réalisé ce but des différents algorithmes de localisation ont été développées jusqu'a présent pour obtenir une meilleure évaluation de l'endroit de défaut selon les données d'une seule ou des deux extrémités de la ligne.

La première utilisation d'un microprocesseur dans la protection électrique (utilisation des relais numériques) était en 1969 par G.D. Rockefeller. A nos jours, plusieurs algorithmes proposés dans ce nouveau domaine servent à localiser les défauts apparents dans les réseaux

électriques. Les méthodes de localisation de défaut dans la littérature peuvent être classifiées en trois catégories principales :

- Les algorithmes basés sur la fréquence fondamentale.
- Les algorithmes basés sur les équations différentielles.
- Les algorithmes basés sur la méthode des ondes mobiles [52]

5-1 Techniques de localisation des défauts

Les méthodes actuelles de localisation des défauts sur les lignes aériennes et les câbles souterrains peuvent être classées en deux types fondamentaux : les méthodes basées sur la mesure de l'impédance de la ligne après défaut (post-fault) et les méthodes basées sur la mesure de la composante de l'onde progressive générée par le défaut.

5-1-1 Méthode basée sur la mesure de l'impédance

Les algorithmes de localisation des défauts basés sur l'impédance sont largement utilisés car ils sont simples à mettre en œuvre et donnent des estimations raisonnables de l'emplacement [53].

Les formes d'ondes de tension et de courant captées pendant un défaut par des dispositifs électroniques intelligents (DEI) tels que les relais numériques, les enregistreurs numériques de défauts et les enregistreurs d'événements séquentiels sont utilisées pour estimer l'impédance apparente entre le dispositif DEI et l'emplacement du défaut de court-circuit. Étant donné l'impédance de ligne en ohms, la distance par unité au défaut peut être estimée.

Un certain nombre d'algorithmes de localisation de défauts basés sur l'impédance ont été développés pour les lignes de transmission. Ces algorithmes se classent en deux types : ceux à une extrémité, utilisant les données d'un seul point de mesure, et ceux à deux extrémités, s'appuyant sur des mesures prises aux deux bouts de la ligne.

➤ Algorithmes à une extrémité

Ces localisateurs de défauts calculent l'emplacement du défaut à partir de l'impédance apparente vue en regardant la ligne d'une extrémité. Un exemple de schéma unifilaire et la représentation de défauts dans la ligne sont présentés dans la (figure 2-26). Pour localiser tous les types de défauts, il faut mesurer les tensions et les courants phase-terre de chaque phase. (Si, seules les tensions ligne à ligne sont disponibles, il est possible de localiser les défauts phase-phase, et de plus, si l'impédance homopolaire Z_0 de la source est connue, nous pouvons estimer la localisation des défauts phase-terre) [53].

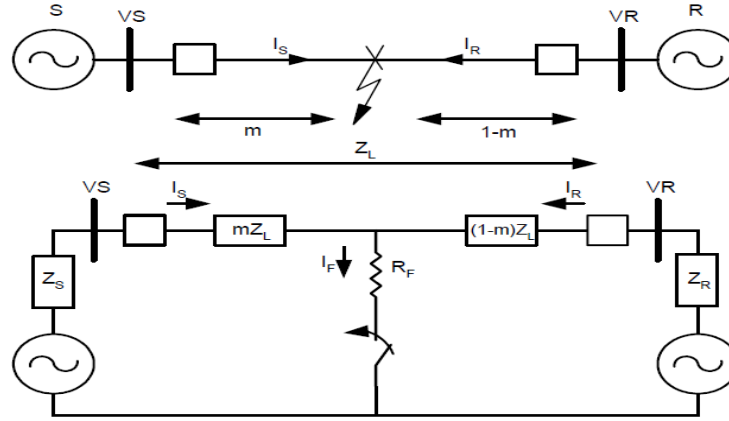


Figure 2-26 : Schéma unifilaire et la représentation des circuits de défaut de ligne

Les méthodes de localisation de défauts basées sur l'impédance les plus populaires sont :

1-Méthode de réactance simple

D'après la figure (II-30), la chute de tension à l'extrémité S de la ligne est :

$$V_s = m * Z_{1L} * I_s + R_F * I_F \dots \dots (1-15)$$

Avec

- V_s : La tension à la borne S
- V_r : La tension à la borne R
- m : La distance entre défaut et source par unité
- Z_{1L} : L'impédance de la ligne de séquence positive
- Z_{0L} : L'impédance homopolaire de la ligne
- I_s : Courant sortant de la source S
- I_0 : Courant homopolaire
- R_f : Résistance de défaut
- I_f : Courant du défaut

Pour le défaut de type phase A-terre on a :

$$V_s = V_{a-g} \text{ et } I_s = I_a + k * 3 * I_0 \dots \dots (1-16)$$

Avec

$$K = \frac{(Z_{0L} - Z_{1L})}{3 * Z_{1L}} \dots \dots (1-17)$$

L'objectif est de minimiser l'effet du terme $R_F * I_F$. La méthode de réactance simple divise tous les termes par I_s (I mesuré au localisateur de défauts) et ignore le terme $R_F * I_F / I_s$.

On a donc :

$$Im\left(\frac{V_s}{I_s}\right) = Im(m * Z_{1L}) = m * X_{1L} \dots \dots (1-18)$$

Donc

$$m = \frac{Im(\frac{V_s}{I_s})}{X_{1L}} \dots \dots (1-19)$$

2-Méthode de TAKAGI

La méthode TAKAGI nécessite des données de pré défaut $I_{pre-défaut}$ (valeur avant le défaut) et de défaut I . Elle améliore la méthode de réactance simple en réduisant l'effet du flux de charge et en minimisant l'effet de la résistance de défaut [54].

En utilisant la même équation (II-15) et en posant $I_{sup}=I-I_{pre-défaut}$.

En multipliant les deux termes de l'équation (1-15) par le conjugué complexe de I_{sup}

$$Im(V_s * I_{sup}^*) = m * Im(Z_{1L} * I_s * I_{sup}^*) + R_f * Im(I_f * I_{sup}^*) \dots \dots (1-20)$$

$$m = \frac{Im(V_s * I_{sup}^*)}{Im(Z_{1L} * I_s * I_{sup}^*)} \dots (1 - 21)$$

La clé du succès de la méthode TAKAGI est que l'angle du I_s est le même que l'angle du I_f . Pour un système homogène idéal, ces angles sont identiques. Plus l'angle entre I_s et I_f augmente, plus l'erreur dans l'estimation de la localisation des défauts augmentent.

Les difficultés liées à la précision de la localisation des défauts à une extrémité sont bien connues et sont décrites dans plusieurs sources [55-54, 56, 53]. En résumé, les conditions suivantes peuvent entraîner des erreurs pour les méthodes de localisation de défauts basées sur l'impédance à une extrémité :

- Effet combiné de la résistance de défaut et de la charge ;
- Couplage mutuel à séquence zéro (homopolaire) ;
- Erreurs de modélisation en séquence zéro ;
- Non-homogénéité du système ;
- Mesure inexacte des relais, du transformateur de l'instrument ou des paramètres de la ligne.

➤ Algorithmes à deux extrémités

Dans le but de surmonter les limites des techniques de localisation de défauts à une extrémité et d'améliorer la précision de la localisation des défauts, des algorithmes de localisation de défauts à deux extrémités et à plusieurs extrémités ont été proposés dans [57, 55, 54].

Les algorithmes basés sur l'impédance à deux extrémités utilisent des données de forme d'onde captées aux deux extrémités d'une ligne de transmission pour estimer l'emplacement d'un défaut. Le principe de localisation des défauts est similaire à celui des méthodes à une extrémité, c'est-à-dire qu'il utilise la tension et le courant pendant un défaut pour estimer l'impédance apparente entre le lieu de surveillance et le défaut.

Des mesures supplémentaires à partir de l'extrémité distante d'une ligne de transmission sont utilisées pour éliminer toute erreur de réactance causée par la résistance du défaut, le courant de charge ou la non-homogénéité du système. La classification des types de défauts n'est pas non plus nécessaire. Un canal de communication transfère les données d'un dispositif électronique intelligent DEI à l'autre. Les données des deux DEI peuvent également être collectées et traitées à un endroit central. Une description détaillée de la méthode est fournie dans, en fonction de la disponibilité des données, les méthodes basées sur l'impédance à deux extrémités sont également classées comme suit :

1- Méthode synchronisée à deux extrémités

Cette méthode suppose que les mesures des deux extrémités d'une ligne de transmission sont synchronisées à une référence de temps commune via un système de positionnement global (GPS).

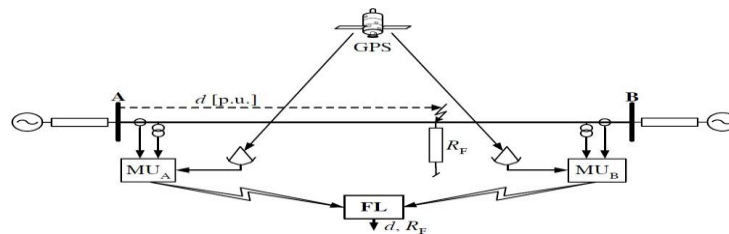


Figure 2-27 : Schéma de la localisation synchronisée des défauts aux deux extrémités avec utilisation du GPS.

Avec MUA et MUB sont des unités de mesure à l'extrémité A et B respectivement, FL est le localisateur de défaut, R_F est la résistance du défaut et d est la distance entre le lieu du défaut et le terminal A.

2- Méthode non synchronisée à deux extrémités

Les formes d'onde captées par les dispositifs DEI aux deux extrémités d'une ligne de transmission peuvent ne pas être synchronisées entre elles. Le dispositif GPS peut être absent ou ne pas fonctionner correctement. Par ailleurs, les DEI peuvent avoir des taux d'échantillonnage différents ou ils peuvent détecter le défaut à des instants légèrement différents.

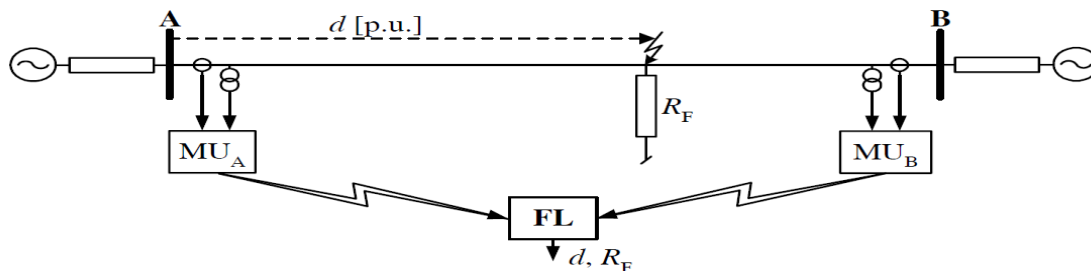


Figure 2-28 : Schéma de localisation des défauts non synchronisés aux deux extrémités.

La méthode de localisation de défauts fondée sur la mesure d'impédance repose sur l'utilisation précise des grandeurs électriques, notamment les phaseurs de tension et de courant. L'une de ses principales faiblesses est sa forte sensibilité aux erreurs de synchronisation temporelle entre les mesures effectuées aux deux extrémités de la ligne.

En effet, pour déterminer l'impédance apparente et en déduire la distance au défaut, il est indispensable que les phaseurs soient parfaitement alignés dans le temps. Un désalignement, même très faible, introduit une erreur de phase qui perturbe directement le calcul de l'impédance. Cette erreur de phase se traduit par une estimation erronée de la distance au défaut.

En général, pour maintenir une précision acceptable dans la localisation, l'erreur de synchronisation ne doit pas engendrer un décalage de phase supérieur à 3 degrés. Au-delà de cette limite, les incertitudes deviennent suffisamment importantes pour rendre les résultats peu fiables, en particulier sur les longues lignes ou dans des contextes de réseaux fortement maillés.

La contrainte de synchronisation impose donc l'usage de systèmes de synchronisation de haute précision, tels que les horloges GPS, pour garantir une cohérence temporelle rigoureuse entre les mesures locales et distantes. L'absence d'une synchronisation de qualité peut annuler tout le bénéfice attendu de la méthode d'impédance, d'où l'importance de contrôler rigoureusement cette exigence dans les systèmes de protection modernes.

5-1-2 Méthodes basées sur les ondes progressives (Travelling-Wave)

La méthode de localisation des défauts par ondes progressives permet de résoudre le problème de mesure de distance en exploitant les transitoires de défaut à haute fréquence, mesurés à une ou aux deux extrémités d'une ligne électrique. Elle repose sur la détection précise de l'onde progressive générée au moment du défaut, offrant ainsi une estimation rapide et fiable de sa position. Cependant, la mise en œuvre pratique de cette méthode nécessite de surmonter plusieurs défis techniques. Parmi eux figurent les connexions aux transformateurs de courant (TC) et de tension (TV) de protection, l'intégration de filtres aux circuits d'arrivée pour limiter les surtensions et les pics de tension, ainsi que la capacité à traiter simultanément des signaux de fréquences très différentes : les basses fréquences du réseau électrique (de 1 Hz à 3 kHz) et les hautes fréquences des transitoires par ondes progressives (de 10 kHz à 600 kHz).

Un système complet de localisation de défauts par ondes progressives ne peut se limiter à la simple détection de l'onde en elle-même. Pour éviter la multiplication des équipements, il est crucial de combiner cette fonctionnalité avec les dispositifs de protection et de mesure déjà en place. Cela implique un traitement intelligent des signaux et une intégration fine dans les systèmes existants. Le processus fondamental repose sur trois étapes principales : détecter le pic de l'onde, enregistrer précisément son heure d'arrivée, puis comparer cette information à celle recueillie à l'autre extrémité de la ligne. Chaque étape présente ses propres difficultés techniques, notamment en matière de filtrage, de détection d'événements transitoires rapides, et de synchronisation temporelle. L'atteinte de la précision requise est rendue possible grâce

aux technologies modernes de synchronisation de haute précision, telles que les systèmes GPS, qui sont aujourd'hui accessibles partout dans le monde.

Ainsi, la localisation par ondes progressives offre un moyen puissant et précis d'identifier la position des défauts, à condition de relever les défis liés à la mesure, au traitement du signal et à l'intégration dans les infrastructures existantes.

➤ Sélection du signal d'entrée

Un défaut sur un circuit de transmission produit des ondes progressives de tension et de courant. L'une ou l'autre peut être utilisée pour une localisation précise du défaut ; la question est donc de savoir laquelle produit le signal le plus détectable pour le relais. La manière dont le capteur primaire reproduit l'onde progressive est le facteur le plus important dans le choix d'un transformateur de courant (TC) ou d'un transformateur de tension capacitif (TCT).

➤ Filtrage

Bien que nous sachions que la vitesse de phase de l'onde approche la vitesse de la lumière, ce n'est pas exactement une fois le signal d'entrée sélectionné, il doit être traité pour l'extraire du signal de fréquence d'alimentation global, même s'il peut être d'une amplitude nettement inférieure.

Considérez le défaut illustré à la figure 2-29 :

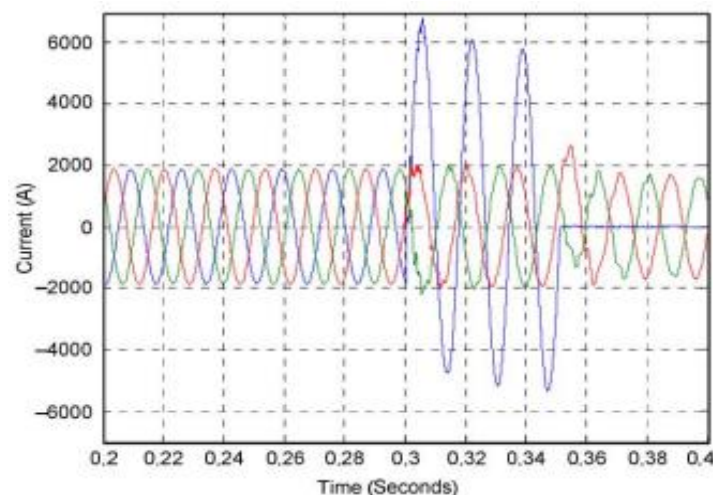


Figure 2-29. Courant primaire lors du filtrage de fréquence du système électrique

La variation soudaine du courant survenant à l'instant 0,3 signale le début de l'onde progressive. Le problème est que, même si nous pouvons observer les variations de courant entre l'instant 0,3 et environ l'instant 0,305, cette précision est insuffisante pour localiser le défaut.

Nous comparons maintenant le courant primaire de la figure (2-29) avec les mêmes courants passant par un filtre de 10 kHz et 600 kHz de la Figure (2-30).

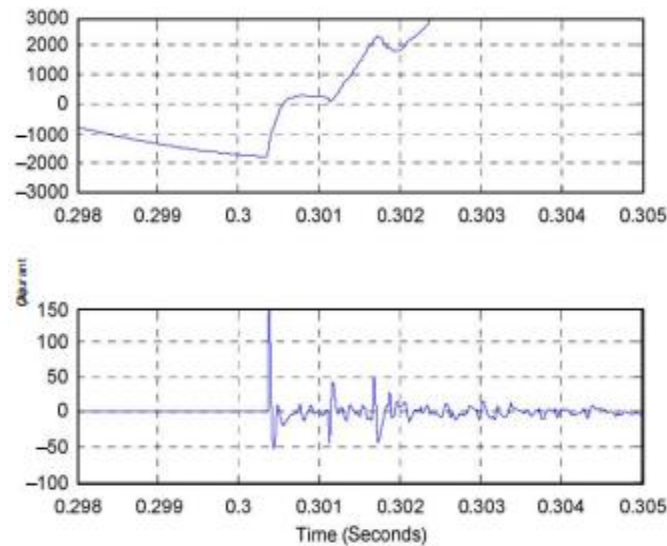


Figure 2-30. Même onde que la Fig 2-29 avec filtre de 10 kHz à 600 kHz

La résolution du temps d'arrivée du front d'onde s'améliore à chaque étape du filtrage à haute fréquence. À 600 kHz, on peut raisonnablement distinguer le bord net du front d'onde arrivant avec une résolution de 0,0001 seconde ou plus. Dans une mise en œuvre réelle du système à ondes progressives dans un relais, une fréquence d'échantillonnage légèrement supérieure à 1,5 MHz a été sélectionnée.

La détection et l'enregistrement de l'onde progressive dans cette unité à partir des deux extrémités d'une ligne de transmission simulée produisent le tracé illustré à la (figure 2-29).

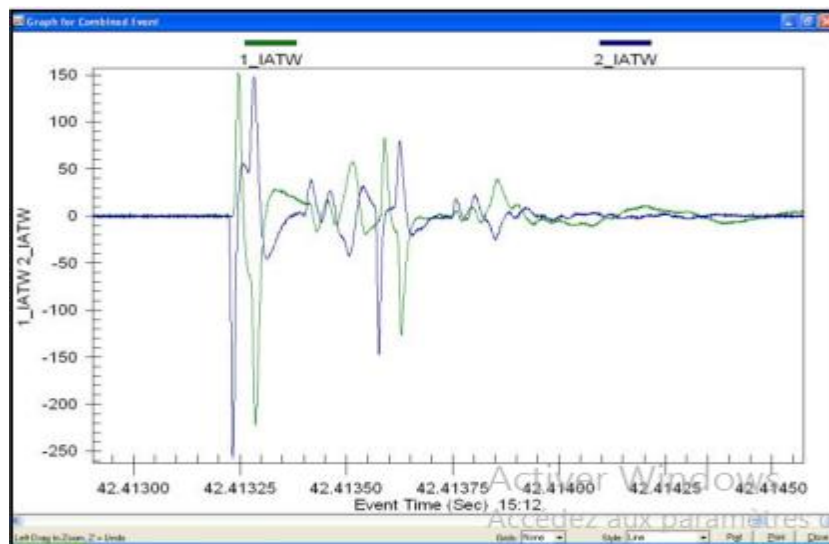


Figure 2-31 : Détection d'ondes progressives à double extrémité.

La figure (2-31) montre l'arrivée aux deux extrémités de l'onde progressive. Les deux formes d'onde superposées fournissent les informations nécessaires à la localisation du défaut. Le premier front d'onde correspond à l'arrivée de l'onde à la borne la plus proche, et le second à l'extrémité la plus éloignée de la ligne. Les pics supplémentaires sont dus aux réflexions.

➤ Localisation du défaut

Les méthodes basées sur les ondes progressives ont été largement utilisées [59-60, 53,61] pour la localisation du défaut et sont généralement basées sur la corrélation entre les ondes progressives et les ondes rétrogrades se déplaçant le long de la ligne de transmission, comme le montre la figure (2-32). Les récentes améliorations en matière d'acquisition de données, de synchronisation du temps par GPS et de systèmes de communication ont accru l'intérêt pour cette technologie.

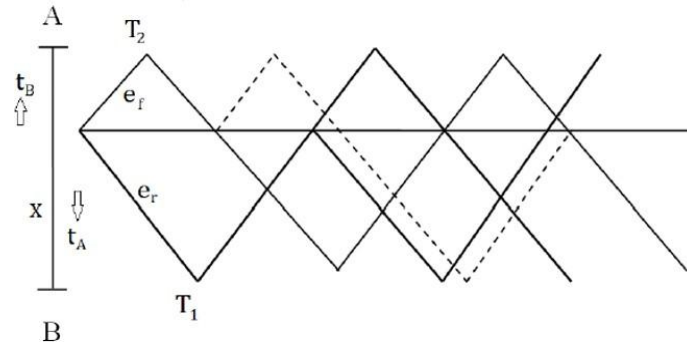


Figure 2-32 : Illustration de la méthode Traveling-Waves.

Le temps de propagation des composants à haute fréquence est utilisé pour localiser le défaut. Dans la figure (2-32), une ligne de transmission monophasée sans perte de longueur « l » est considérée avec une vitesse d'onde progressive de V, une capacité et une inductance par unité de longueur L'et C'est une impédance caractéristique de ZC.

Les temps de parcours des vagues entre le défaut et la discontinuité τ_A et τ_B sont à déterminer à l'aide de la technologie GPS. Une fois cela fait, l'emplacement du défaut x peut être facilement déterminée par l'équation suivante

$$x = \frac{L - V(\tau_a - \tau_b)}{2} \dots \dots (1-22)$$

Où :

$V = 299.72$ m/sec c'est la vitesse de propagation.

5-2 Facteurs influençant la précision de la localisation des défauts

Différents facteurs affectent la précision des méthodes de localisation des défauts. En général, sans préciser la méthode de localisation, les principaux facteurs peuvent être énumérés comme suit :

- Compensation inexacte de l'effet de réactance dans le cas d'algorithmes de localisation de défauts utilisant des mesures à une extrémité.
- Des paramètres de ligne imprécise, qui ne correspondent pas aux paramètres réels. Notez que, même si la géométrie des conducteurs de ligne est prise avec précision pour calculer les impédances de ligne, la longueur totale de la ligne pourrait être

- connue avec une certaine erreur.
- Présence de réacteurs et de condensateurs shunt ou de dispositifs de compensation de condensateurs en série.
- Déséquilibre charge-flux.

Conclusion

Dans ce chapitre on explique l'analyse des défauts électriques dans les réseaux électriques en expliquant individuellement les techniques utilisées dans cette analyse et les méthodes de détection et localisation. Pour 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.

Dans la localisation des défauts, deux principales méthodes sont utilisées : la méthode d'impédance et la méthode des ondes voyageuses. La méthode d'impédance est bien adaptée aux applications courantes, tandis que la méthode des ondes voyageuses est privilégiée pour les réseaux critiques où une très haute précision est requise.

Chapitre 3

*Application de la
transformée en
ondelette pour la
détection et la
localisation des
défauts*

1-Introduction

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

La détection et la localisation rapide des défauts sont devenues essentielles pour identifier avec précision la zone affectée, intervenir efficacement et réduire au minimum les temps d'interruption et de restauration du réseau électrique. Afin d'atteindre cet objectif, de nombreux algorithmes de localisation ont été développés au fil du temps, visant à améliorer la précision et la rapidité du diagnostic des défauts.

Ce chapitre présente une méthode basée sur la transformée en ondelettes, utilisée à la fois pour la détection et la localisation des défauts de court-circuit dans un réseau électrique triphasé. Pour cela, un modèle standard de réseau a été développé et simulé sous l'environnement MATLAB.

2- Présentation du réseau d'étude

Le modèle de simulation d'un réseau électrique triphasé a été développé à l'aide de MATLAB/Simulink dans le but de détecter des défauts par ondelette à l'aide d'un algorithme de détection, en utilisant l'environnement Simscape Power Systems. L'implémentation a été réalisée en veillant à utiliser un nombre minimal de blocs, afin de garantir la simplicité du modèle. Le système simulé représente un réseau électrique dont les paramètres seront donnés en annexe. Il comprend une source de tension triphasée, un bloc de mesure triphasé, une branche RLC série triphasée, un bloc de charge RLC, ainsi qu'un simulateur de défaut triphasé, comme illustré sur la figure (3-32).

Les paramètres du réseau sont décrits comme suite :

Sources :

Générateur centralisé 25kv

Ligne :

Longueur de la ligne : $L = 100 \text{ km}$

Résistance : $R = 6 \Omega/\text{km}$;

Réactance $X=0.06$

Charge :

$P= 11.7(\text{Mw})$.

$Q= 6.23(\text{MVar})$

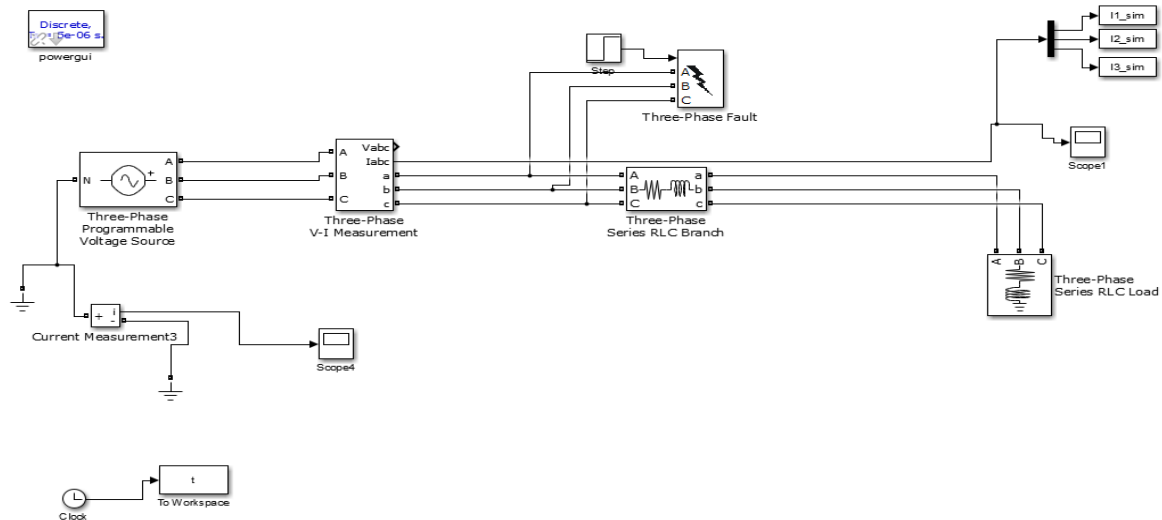


Figure 3-32 : Schéma de simulation MATLAB du réseau électrique

Afin de détecter la présence d'un défaut dans le réseau électrique simulé sous Simulink, nous avons développé un programme MATLAB basé sur l'analyse des signaux de courant triphasé à l'aide de la transformée en ondelettes discrète. Le modèle Simulink, nommé 'réseau-défaut' génère les signaux de courant des trois phases (I1, I2 et I3) pendant la simulation du réseau. Ces signaux sont ensuite récupérés dans l'espace de travail MATLAB. Pour éviter toute perturbation due au régime transitoire initial, seule une portion des signaux correspondant au régime permanent est analysée. L'algorithme applique ensuite une décomposition en ondelettes de niveau 1 en utilisant la base 'db4', reconnue pour sa bonne localisation fréquentielle et temporelle, afin d'extraire les coefficients de détail correspondant aux variations brusques des signaux. Ces coefficients sont ensuite comparés à un seuil prédéfini pour chaque phase. Si le maximum absolu des coefficients d'une phase dépasse ce seuil, cela indique une variation anormale du courant, souvent associée à un défaut sur cette phase. Le script affiche alors un message indiquant si un défaut a été détecté, et précise sur quelle(s) phase(s) il s'est produit. Dans le cas contraire, un message confirme qu'aucun défaut n'a été détecté sur le réseau. Cette méthode permet donc une détection automatique, rapide et efficace des défauts dans un réseau électrique, en exploitant la sensibilité de la transformée en ondelettes aux perturbations locales dans les signaux. Ce processus s'avère particulièrement utile dans les systèmes de surveillance intelligents où la réactivité et la précision sont essentielles.

3- Démarches pour la détection des défauts

Le modèle de défaut de ligne, illustré précédemment à la Figure (3-35), sert à simuler différents types de court-circuit susceptibles de se produire sur une ligne de transmission à l'aide d'un algorithme basé sur méthode d'ondelette. Ce modèle est conçu pour générer plusieurs scénarios de défauts, notamment : défaut monophasé à la terre, défaut biphasé à la terre, court-circuit entre deux phases, ainsi que défaut triphasé. Pour identifier correctement ces défauts, il est essentiel de disposer des mesures du courant triphasé (phases A, B et C), ainsi que du courant de neutre. Le temps de simulation est fixé à 1 seconde, avec l'injection du défaut programmée à partir de $t=0,5$ seconde via le bloc de défaut. Une fois la simulation

validée et exécutée, les signaux de courant obtenus sont exportés depuis Simulink vers l'espace de travail MATLAB. Ces signaux sont ensuite analysés à l'aide de la transformée en ondelettes afin de détecter, localiser et caractériser précisément le type de défaut sur la ligne.

4-Résultats de simulation

Le modèle du système a été utilisé pour créer l'ensemble de base des données de défauts pour la détection des défauts, cette base se constitue des informations extraites de la forme d'onde des courants mesurés 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 transformée en ondelettes comme entrées. La figure (3-33) présente les formes d'ondes de courants des lignes de transmissions dans le cas du non-défaut confirmé par la figure (3-34) indique qu'aucun défaut n'a été détecté dans notre réseau.

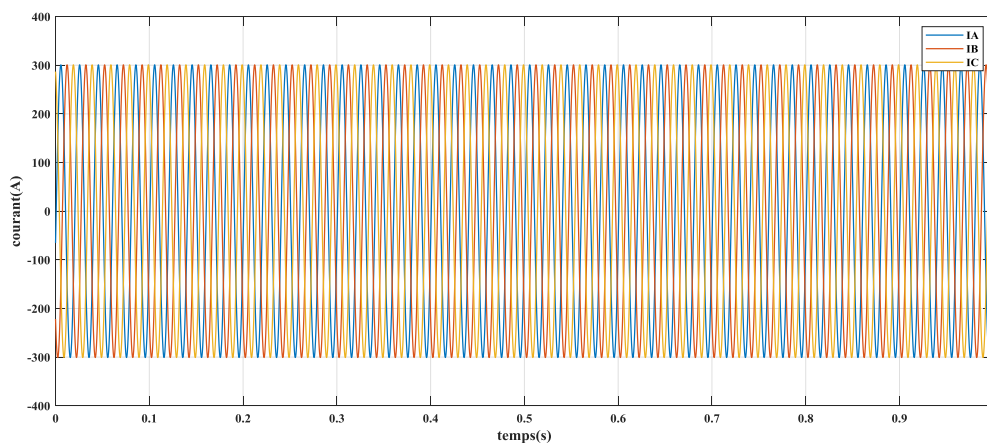


Figure 3-33 : Forme d'onde de courant, cas de non défaut

```
4      seuil_A = 0.5;
5      seuil_B = 0.5;
6      seuil_C = 0.5;
7
8      % Ouvre et simule le modèle Simulink
9      open_system('reseau_defaut');
10     sim('reseau_defaut');
11
12     % Récupération des signaux simulés
13     I1_data = I1_sim.signals.values;
14     I2_data = I2_sim.signals.values;
15     I3_data = I3_sim.signals.values;
16
```

Command Window

```
Warning: 'Output Port 1' of 'reseau_defaut/Three-
> In programme10 (line 10)
---- Résultat de la détection ----
? Aucun défaut détecté sur le réseau
fx >>
```

Figure 3-34 : Réponse de système de détection dans le cas de non défaut

4-1 Défaut monophasé à la terre (phase - terre)

Un défaut monophasé est créé par un court-circuit entre la phase A et la terre. Dans ce cas, on observe une perturbation au niveau dans la forme d'onde de courant, une augmentation de la forme d'onde du courant le long du temps de défaut. La figure (3-35) présente la forme d'onde de courant pour un défaut de type monophasé, notre système de détection récupère tous les signaux de courant et détecte une anomalie sur la phase A tandis que les phases B et C restent saines ce qui fait que le système identifie clairement le défaut avec le message sur la figure (3-36)

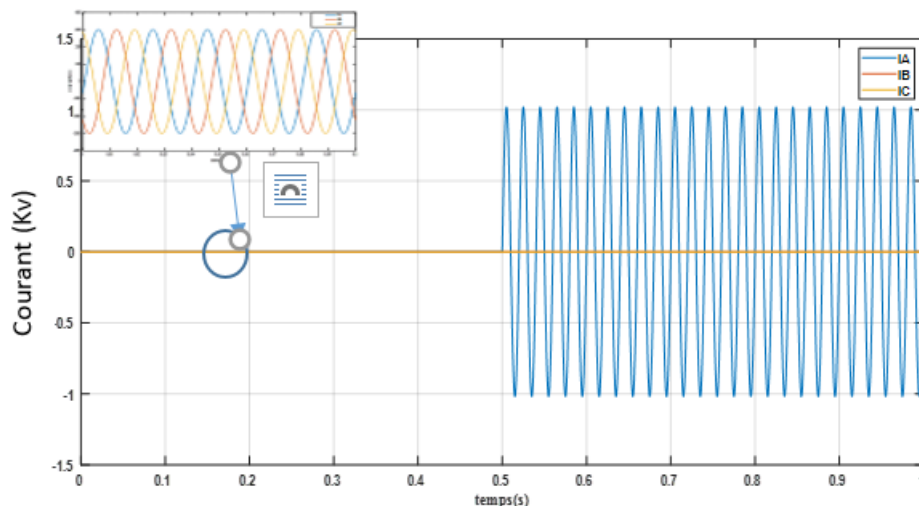


Figure 3-35 : Formes d'onde de courant pour un défaut entre la phase A-terre

```
3 % Seuils fixes (à ajuster selon ton système)
4 seuil_A = 0.5;
5 seuil_B = 0.5;
6 seuil_C = 0.5;
7
8 % Ouvre et simule le modèle Simulink
9 open_system('reseau_defaut');
10 sim('reseau_defaut');
11
12 % Récupération des signaux simulés
13 I1_data = I1_sim.signals.values;
14 I2_data = I2_sim.signals.values;
15 I3_data = I3_sim.signals.values;
16
```

Command Window

```
Warning: 'Output Port 1' of 'reseau_defaut/Three-P
> In programme10 (line 10)
---- Résultat de la détection ----
? Défaut détecté sur le réseau !
?? Phase A en défaut
? Phase B : Pas de défaut
? Phase C : Pas de défaut
```

Figure 3-36 : Réponse de système de détection dans le cas de défaut A-terre

4-2 Défaut biphasé à la terre

Un défaut biphasé à la terre se produit entre deux phases et la terre, D'après la forme d'onde, on remarque une augmentation dans le courant électrique des deux phases le long du temps de défaut. La figure (3-37) présente Formes d'onde de courant pour un défaut deux phases (AB) et la terre, l'analyse des trois courants en comparant leurs amplitudes aux seuils

prédéfinis donne un résultat indique clairement un défaut simultané sur les phases A et B figure (3-38).

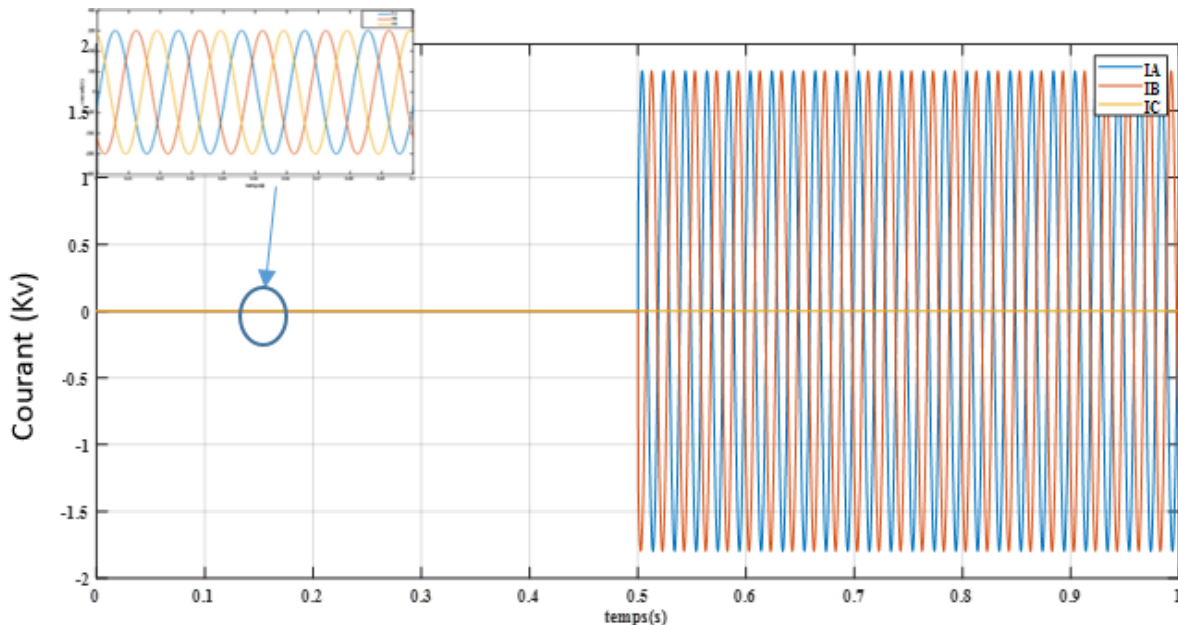


Figure 3-37 : Forme d'ondes de courant pour un défaut biphasé-terre.

```
4      seuil_A = 0.5;
5      seuil_B = 0.5;
6      seuil_C = 0.5;
7
8      % Ouvre et simule le modèle Simulink
9      open_system('reseau_defaut');
10     sim('reseau_defaut');
11
12     % Récupération des signaux simulés
13     I1_data = I1_sim.signals.values;
14     I2_data = I2_sim.signals.values;
15     I3_data = I3_sim.signals.values;
16
```

Command Window

```
Warning: 'Output Port 1' of 'reseau_defaut/Three-Ph
> In programme10 (line 10)
---- Résultat de la détection ----
? Défaut détecté sur le réseau !
?? Phase A en défaut
?? Phase B en défaut
? Phase C : Pas de défaut
fx>>
```

Figure 3-38 : Réponse de système de détection dans le cas de défaut biphasé-terre.

4-3 Défaut biphasé isolé

Un défaut biphasé sans terre, contrairement au défaut biphasé-terre ce scénario ne génère pas de courant de terre ce qui traduit par des formes d'onde symétriques sur les phases défectueuses (phase A et B) sans déséquilibre global comme on peut remarquer sur La figure (3-39) une augmentation de courant des deux phase le long du temps défaut et le système de détection identifier clairement l'anomalie la figure (3-40) confirmant son efficacité pour les défauts isolées entre les deux phases A et B, ce type de panne est dangereux mais nécessite tout de même intervention rapide.

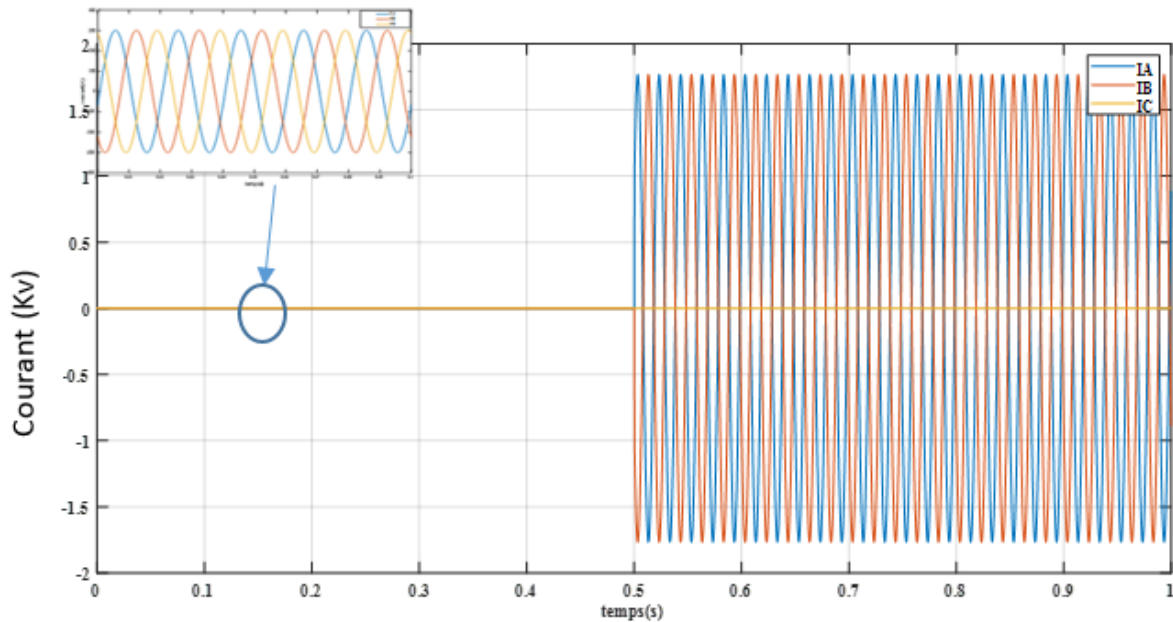


Figure 3-39 : Formes d'onde de courant pour un défaut biphasé isolé.

```

4      seuil_A = 0.5;
5      seuil_B = 0.5;
6      seuil_C = 0.5;
7
8      % Ouvre et simule le modèle Simulink
9      open_system('reseau_defaut');
10     sim('reseau_defaut');
11
12     % Récupération des signaux simulés
13     I1_data = I1_sim.signals.values;
14     I2_data = I2_sim.signals.values;
15     I3_data = I3_sim.signals.values;
16
Command Window
Warning: 'Output Port 1' of 'reseau_defaut/Three-Ph
> In programme10 (line 10)
---- Résultat de la détection ----
? Défaut détecté sur le réseau !
?? Phase A en défaut
?? Phase B en défaut
? Phase C : Pas de défaut
fx>>

```

Figure 3-40 : Réponse de système de détection dans le cas de défaut AB sans terre

4-4 Défaut triphasé a la terre

Ce cas présente un défaut triphasé symétrique le plus sévère des courts-circuits ou les trois phases ABC subissent simultanément une surintensité figure (3-41), comme le confirme le message sur la figure (3-42). Ce scénario génère une perturbation équilibrée avec des courants extrêmement élevée menaçant les équipement.

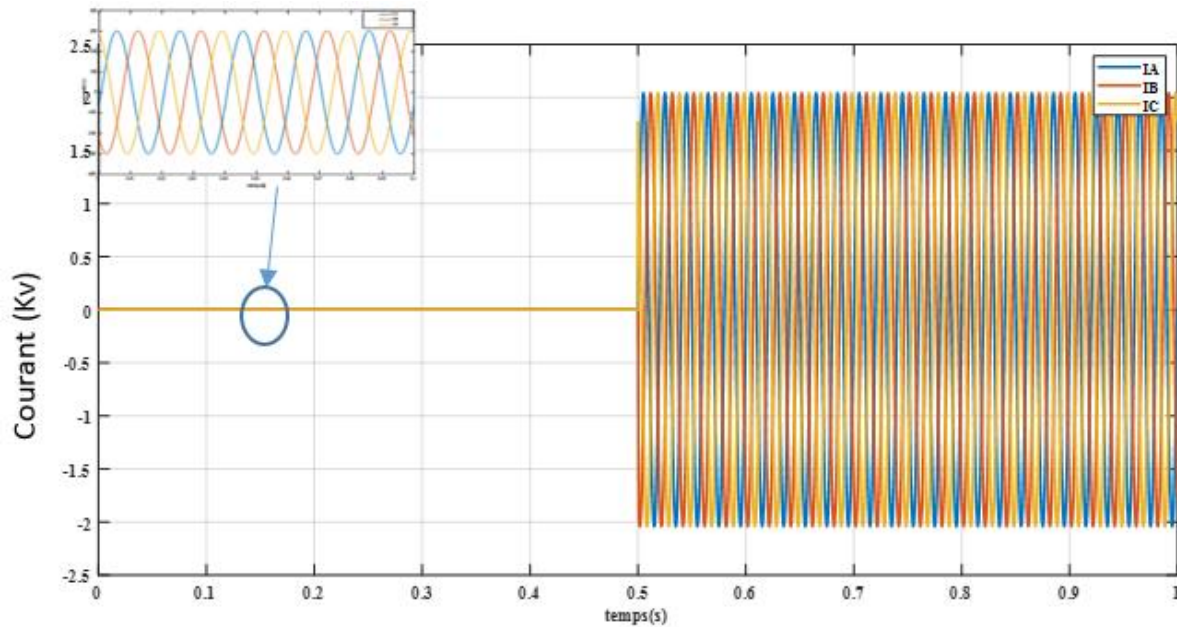


Figure 3-41 : Formes d'onde de courant pour un défaut triphasé-terre.

```

4      seuil_A = 0.5;
5      seuil_B = 0.5;
6      seuil_C = 0.5;
7
8      % Ouvre et simule le modèle Simulink
9      open_system('reseau_defaut');
10     sim('reseau_defaut');
11
12     % Récupération des signaux simulés
13     I1_data = I1_sim.signals.values;
14     I2_data = I2_sim.signals.values;
15     I3_data = I3_sim.signals.values;
16
Command Window
Warning: 'Output Port 1' of 'reseau_defaut/Three-Ph
> In programme10 (line 10)
---- Résultat de la détection ----
? Défaut détecté sur le réseau !
?? Phase A en défaut
?? Phase B en défaut
?? Phase C en défaut
fx>>

```

Figure 3-42 : Réponse de système de détection dans le cas de défaut triphasé.

On peut constater que lorsqu'un défaut survient sur une ligne, cela entraîne un changement accidentel perturbant le fonctionnement normal du système électrique. En effet, ce type d'incident provoque généralement une augmentation des valeurs nominales de courant. Le plus souvent, ces variations anormales se distinguent par leur amplitude et leur durée, ces simulations démontre la capacité d'un système de détection de distinguer les différents types de défaut et à identifier des pannes majeures, cruciales pour protéger les réseaux ou l'intervention ultra-rapide est ici indispensable pour couper le circuit et préserver l'infrastructure électrique.

5-Démarches pour la localisation des défauts

Le réseau d'étude utilisé pour la localisation des défauts est identique à celui présenté dans la partie détection ; seule la ligne de transmission a été modifiée et remplacée par deux lignes à paramètres distribués connectées en série.

La localisation précise des défauts triphasés constitue une étape cruciale dans la sécurisation des réseaux électriques, permettant une intervention ciblée et rapide pour la limitation des dégradations. Ces courts-circuits génèrent des courants élevés qui, s'ils ne sont pas rapidement identifiés, peuvent endommager gravement les équipements et perturber la stabilité du réseau. Les méthodes modernes de localisation s'appuient sur des techniques avancées comme l'analyse d'ondelette qui offre une localisation rapide et précise

Notre simulation est basée sur l'analyse d'ondelettes de type db4 niveau 1, nous avons généré un défaut de type triphasé sur une ligne de longueur totale de 100 km.

Nous cherchons à localiser avec précision l'emplacement exact du défaut en appliquant deux méthodes distinctes, tout en faisant varier la distance du défaut le long de la ligne.

5-1 Description de la boîte à outils ondelettes

La boîte à outils ondelettes est une collection de fonction construite sous l'environnement MATLAB. Il fournit des outils d'analyse du signal et des images. Et des outils pour l'application statistique, à l'aide d'ondelettes et de paquets d'ondelettes dans le cadre de MATLAB.

La boîte à outils fournit deux catégories d'outils :

- Fonction de commande en ligne
- Outil graphique

La fonction de commande en ligne est un outil qui se décompose en plusieurs familles de fonctions qui peut être appelé directement à partir de la fenêtre de commande MATLAB. La plupart de ces fonctions sont des M-Files. Ces fonctions sont utilisées pour effectuer l'analyse en ondelettes y compris la décomposition et la détermination des coefficients d'ondelettes.

Outil graphique est une collection d'interface graphique qui permet l'accès à des fonctionnalités étendues. Pour avoir accès à cet outil il suffit de taper le mot `wavemenu 'dans la fenêtre de commande MATLAB. La deuxième catégorie est choisie pour ce projet.

5-1-1 Prise en main de la boîte à outils ondelettes

5-1-1-1 Commande « wavemenu »

La commande « wavemenu » ouvre l'interface graphique de prise en main de la boîte à outils. Cette interface sert à utiliser de façon visuelle les différentes fonctions proposées sur des signaux (1-D) ou des images (2-D) sans connaître les commandes Matlab nécessaires à la création d'un programme.

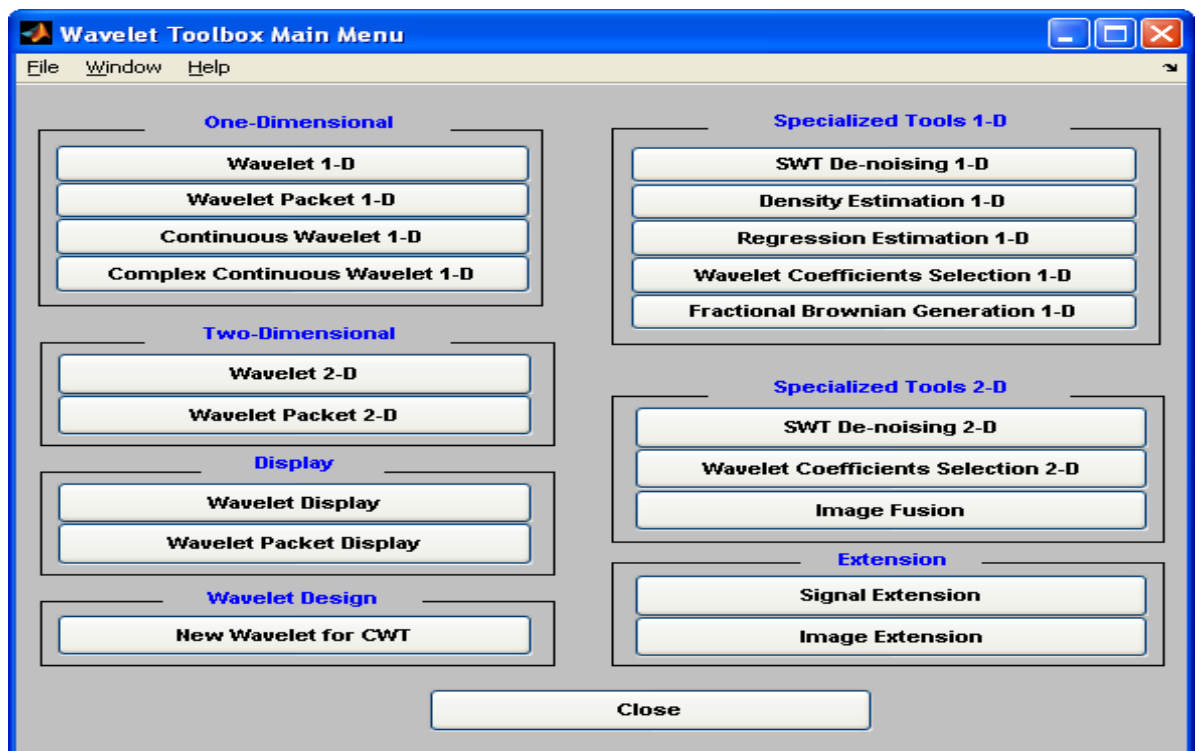


Figure 3-43 : Wavelet toolbox main menu

5-1-1-2 Ondelettes (1-D)

Les fonctions 1-D concernent l'analyse multi résolution de signaux avec les ondelettes prédéfinies de la boîte à outils, l'analyse en paquet d'ondelettes, les ondelettes continues réelles et complexes

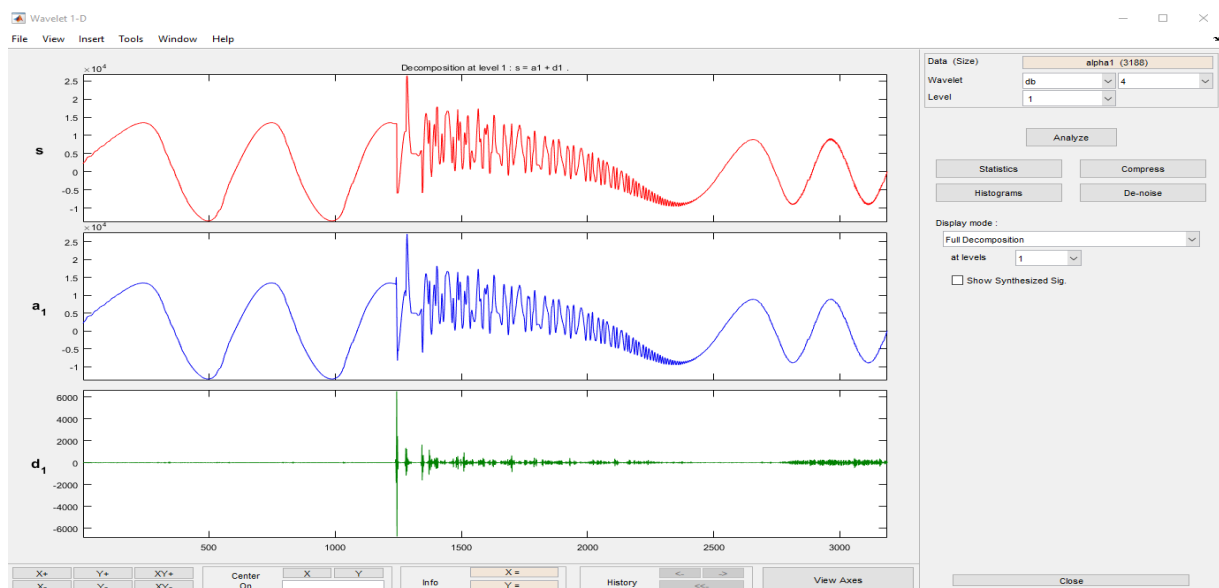


Figure 3-44 : Analyse ondelettes (1-D).

Dans cette partie le circuit de simulation décrite auparavant figure (3-32) est utilisé pour générer les différents types de défauts qui existe dans les lignes électriques (défaut monophasé, biphasé et triphasé). En suite ces signaux de défaut sont importés dans l'interface graphique de la boîte à outils ondelettes pour être analyser. Cette étape est divisée en trois parties : tout d'abord, les données de signal de la simulation seront importées à l'outil d'analyses ondelettes pour une dimension (1-D). Puis, le signal sera d'ébruité pour éliminer les harmoniques dans le signal. Enfin, les données statistiques peuvent être obtenues à partir de la boîte à outils statistiques. Toutes ces données sont importantes pour faire notre analyse.

Notre analyse est basée sur deux méthodes d'localisation un seul côté et deux coté :

La méthode d'un seul côté repose sur la mesure des signaux transitoire a une seule extrémité de la ligne, lorsque le défaut survient, une onde voyage vers l'extrémité puis une partie de cette onde est réfléchié à partir de point de défaut et revient à la station de mesure. En analysant le temps écoulé entre l'émission et la réception du front d'onde, on peut estimer la distance au défaut. La figure (3-45) représentent un schéma explicatif sur la méthode d'un seul côté

La deuxième méthode utilisée la méthode de double cotés utilise des mesures synchronisées aux deux extrémités de la ligne. Chaque station enregistre le moment d'arrivée grâce à une synchronisation précise comme celle de GPS, on peut déterminer avec une grande exactitude la localisation de défaut. La figure 3-46 représentent un schéma explicatif sur la méthode de deux côtes.

5-2 Résultat et analyse

Pour faire une analyse complète des défauts dans les lignes électrique en différent endroit de défaut (20Km, 40Km) on été simulé pour un défaut triphasée en 0,04 s avec deux méthode de calcul pour avoir une meilleur localisation de défaut dans le réseau :

5-2-1 Équation utilisée pour déterminer la distance de défaut

La distance de défaut peut être calculée en utilisant la méthode des ondelettes à l'aide des équations suivante :

➤ Méthode un seul côté

$$X_{one\ end} = \frac{v \times \Delta t}{2} \dots \dots (1-23)$$

$X_{one\ end}$: Distance au défaut [km]

v : Vitesse de propagation de l'onde [km / s].

$$\Delta t = t_2 - t_1 \dots \dots (1-24)$$

t_1 : Instant d'arrive d'onde incidente au point de mesure située à l'extrémité 1 de la ligne.

t_2 : Instant d'arrivée de l'onde rétrograde au point de mesure située à l'extrémité 1 de la ligne.

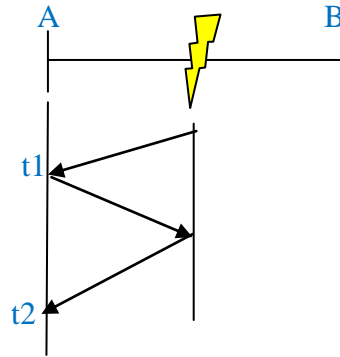


Figure 3-45: Schéma explicatif sur la methode d'un seul côté

➤ **Méthode deux côtés**

$$X_{two\ end} = \frac{L - v \times \Delta t}{2} \dots \dots (1-25)$$

$X_{two\ end}$: Distance au défaut [km].

L : Longueur totale de la ligne.

v : Vitesse de propagation de l'onde [km / s].

$$\Delta t = t_2 - t_1 \dots \dots (1-26)$$

t_1 : Instant d'arrivée de l'onde incident au point de mesure situé à l'extrémité 1 de la ligne.

t_2 : Instant d'arrivée de l'onde incident au point de mesure située à l'extrémité 2 de la ligne.

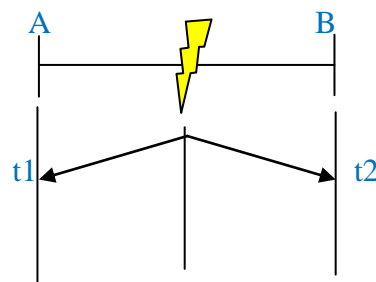


Figure 3-46 : Schéma explicatif sur la méthode de deux côtés.

- Pour une ligne de 100 km, le défaut situé à 20 km de la source

➤ Méthode d'un seul côté

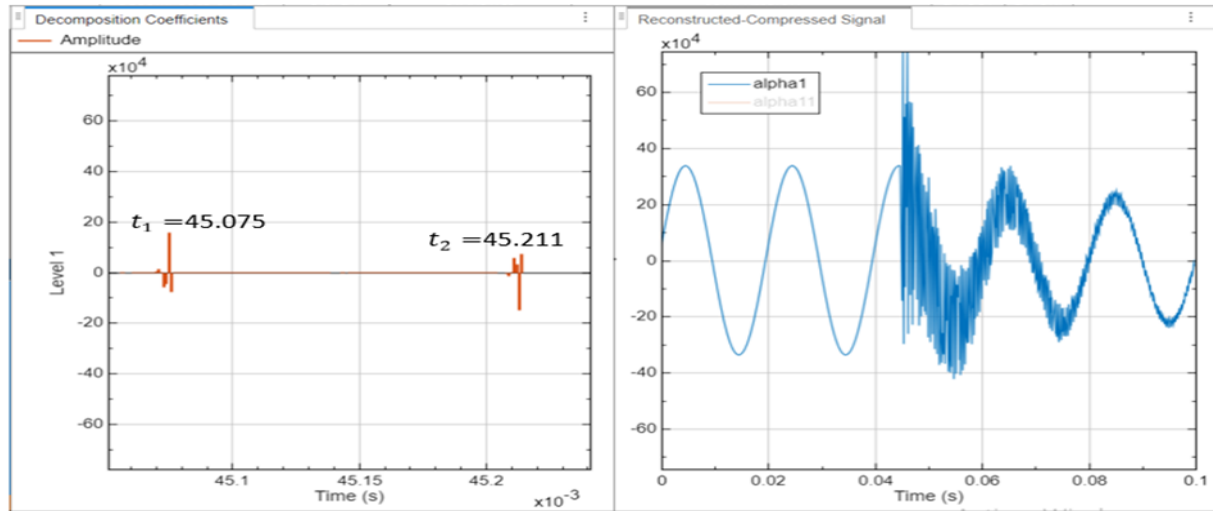


Figure 3-47 : Décomposition de du signal et la prise des instants d'impact par la méthode d'un seul côté à (20km).

D'après (1-23) et (1-24) on a :

$$t_1 = 45.075 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$t_2 = 45.211 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$X_{one\ end} = \frac{2.8 \times 10^8 \times 0.000136}{2} = 19.04 \text{ km}$$

➤ Méthode de deux côtés

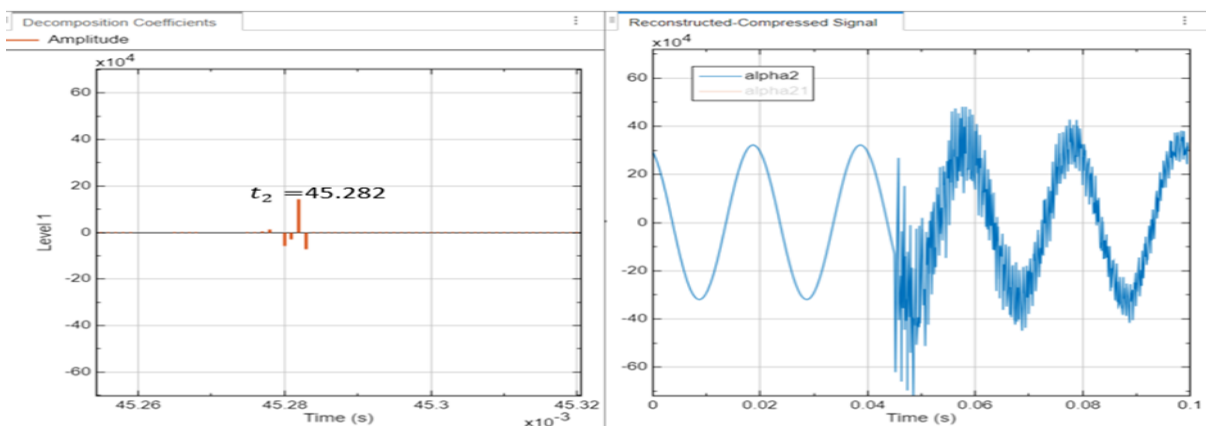


Figure 3-48 : Décomposition du signal et la prise des instants d'impact par la méthode d'un seul côté à (20km).

D'après (1-25) et (1-26) on n'a :

$$X_{two\ end} = \frac{L - v \times \Delta t}{2}$$

$$t_1 = 45.075 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$t_2 = 45.282 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$X_{two\ end} = \frac{100 \times 10^3 - 2.8 \times 10^8 \times 0.000207}{2} = 21.02 \text{ km}$$

La figure étudiée concerne une ligne électrique de 100 km, avec un défaut situé à une distance réelle de 20 km par rapport à la source. L'analyse des signaux à l'aide de la transformée en ondelettes a permis d'identifier deux instants clés nécessaires au calcul de la localisation. Dans un premier cas, les instants d'arrivée de l'onde directe et de l'onde réfléchie ont été repérés à $t_1=45,075$ ms et $t_2 =45,211$ ms. La distance du défaut a été estimée à 19,04 km, soit une erreur de 0,96 km par rapport à la position réelle. Dans un second cas, un autre instant d'arrivée a été identifié à $t_1=45,282$ ms ce qui a conduit à une estimation de 21,02 km, avec une erreur de 1,02 km. Ces deux valeurs encadrent la position réelle du défaut (20 km), avec des erreurs relativement faibles inférieures à 5 %, ce qui confirme la précision et la fiabilité de la méthode. La transformée en ondelettes permet ainsi de détecter avec sensibilité les variations brutales dans le signal causé par un défaut, et d'en déduire sa position avec une très bonne exactitude.

- **Pour une ligne de 100 km et un défaut situé à 40 km de la source**

➤ **Méthode d'un seul côté**

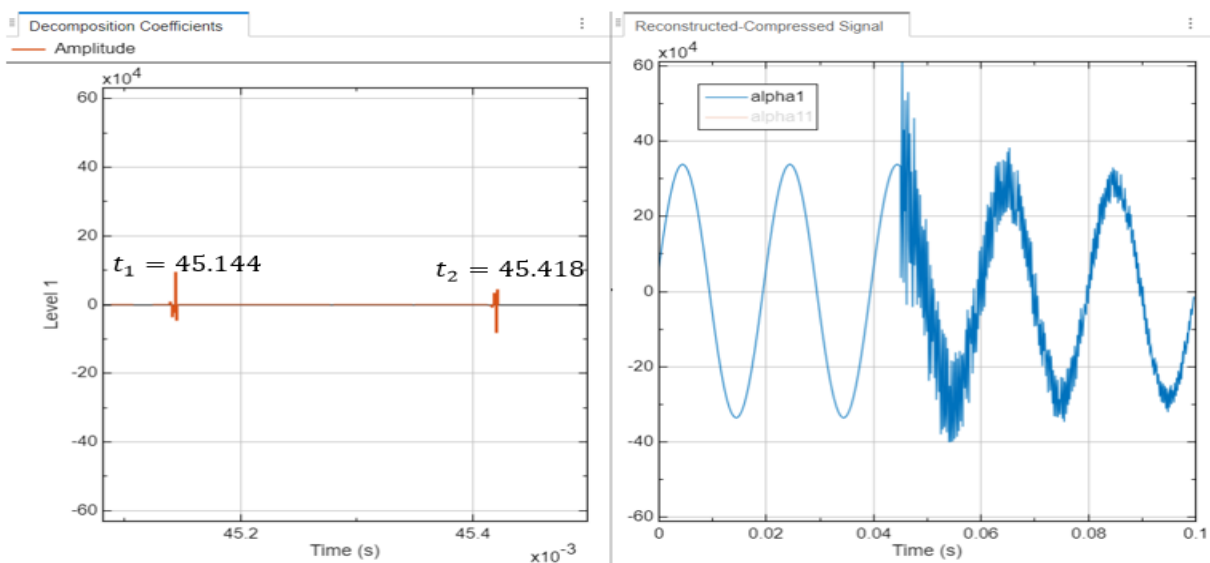


Figure 3-49 : Décomposition du signal et la prise des instants d'impact par la méthode d'un seul côté à (40km).

$$X_{one\ end} = \frac{v \times \Delta t}{2}$$

$$t1 = 45.144 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$t2 = 45.418 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$X_{one\ end} = \frac{2.8 \times 10^8 \times 0.000274}{2} = 38.36 \text{ km}$$

➤ Méthode de deux côtés

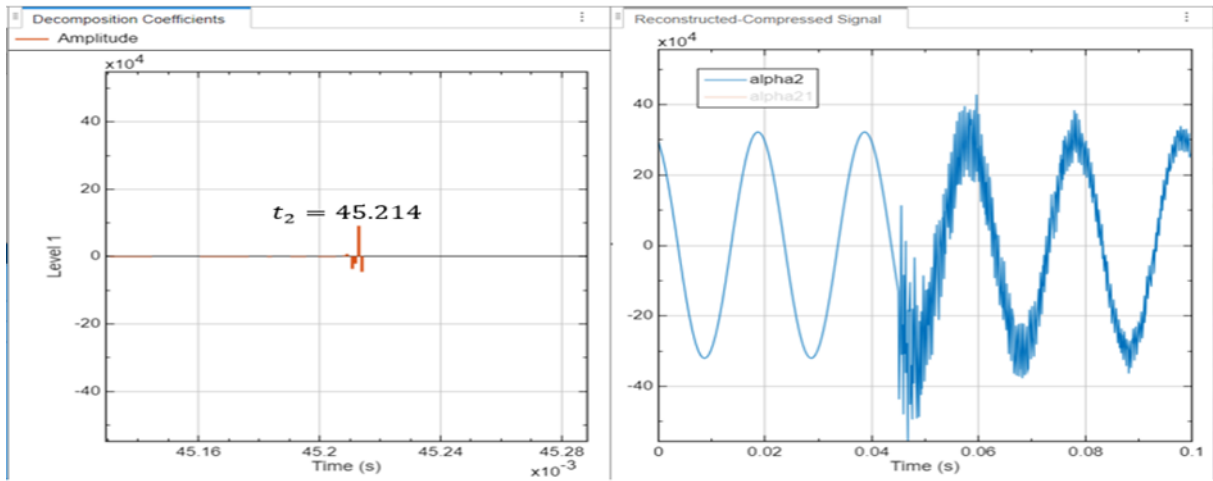


Figure 3-50 : Décomposition du signal et la prise de l'instant d'impact par la méthode de deux côtés à (40km).

$$X_{two\ end} = \frac{L - v \times \Delta t}{2}$$

$$t1 = 45.144 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$t2 = 45.214 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$X_{two\ end} = \frac{100 \times 10^3 - 2.8 \times 10^8 \times 0.00007}{2} = 40.20 \text{ km}$$

La localisation du défaut a été réalisée à partir de l'analyse des coefficients issus de la transformée en ondelettes, illustrée dans deux figures distinctes. Dans la figure (3-37), les instants d'arrivée de l'onde incidente (onde directe) et de l'onde réfléchie ont été identifiés. La distance du défaut a été estimée à 38,36 km. Dans la figure (3-38), seul l'instant d'arrivée de l'onde incidente depuis l'autre extrémité de la ligne a été observé à $t_2=45,214$ ms. La localisation obtenue est de 40,20 km. La position réelle du défaut étant de 40 km, les erreurs d'estimation sont donc de 1,64 km pour la première méthode et de 0,20 km pour la seconde. Ces deux résultats, très proches de la valeur réelle, mettent en évidence la précision et la fiabilité de la méthode des ondelettes pour la détection et la localisation des défauts dans les

lignes électriques. La faible marge d'erreur obtenue confirme l'efficacité de cette approche pour fournir des informations exploitables en vue d'une intervention rapide et ciblée sur le réseau.

Conclusion

Ce dernier chapitre a été consacré aux résultats et aux discussions, ou un réseau électrique exploitez pour tester l'efficacité de la méthode proposée. La transformé en ondelettes a été appliqué pour détecter et localisée différente type de défaut de court-circuit a l'aide d'un programme implémenter sous MATLAB.

L'analyse ondelettes s'est montrée efficace pour détecter et localiser avec précision les défauts dans un réseau électrique. Sa capacité à capter les variations transitoires garantit une réponse rapide et adaptée, renforçant ainsi la fiabilité des systèmes de protection et soutenant les stratégies de maintenance préventive et de supervision intelligente.

Conclusion générale

Récemment, la croissance rapide de la demande en énergie électrique, les défis environnementaux liés au réchauffement climatique, l'essor de la production décentralisée et renouvelable, ainsi que l'épuisement des ressources conventionnelles, ont placé la qualité de l'énergie électrique au cœur des préoccupations des producteurs et des consommateurs. Dans ce contexte, la surveillance de la qualité de l'énergie s'impose comme une stratégie essentielle pour garantir la disponibilité, la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'utilisation de la transformée en ondelettes comme outil d'analyse de détection et localisation des défauts dans les réseaux électriques, en particulier sur les lignes de transport à très haute tension. Après avoir dressé un état de l'art des différents types de défauts et des méthodes classiques de détection et localisation, nous avons mis en évidence les limites de ces dernières faces aux signaux transitoires complexes générés par les défauts. La transformée en ondelettes s'est révélée être une méthode puissante et efficace, capable d'analyser les signaux électriques avec une grande précision, tant sur le plan temporel que fréquentiel. Elle permet ainsi de détecter rapidement des défauts même de courte durée et à forte impédance, ce qui constitue un avantage significatif par rapport aux approches traditionnelles. Les simulations menées sous MATLAB/Simulink ont permis de valider la pertinence de cette méthode dans un cadre pratique et de démontrer sa robustesse. Au-delà des résultats obtenus, cette étude ouvre des perspectives intéressantes en matière de recherche et de développement, notamment l'optimisation des algorithmes de détection et localisation.

En conclusion, la transformée en ondelettes constitue un outil performant pour répondre aux exigences actuelles et futures de la qualité de l'énergie électrique. Sa mise en œuvre contribue non seulement à une meilleure détection et localisation des défauts, mais aussi à l'amélioration de la stabilité, de la fiabilité et de la continuité de l'alimentation dans les réseaux électriques modernes.

Référence bibliographique

- [1] Jnaneswar K. et al. (2021) – *A real-time DWT and traveling waves-based multi-functional scheme for transmission line protection reinforcement*. *Electrical Engineering*, 103 :965–981, DOI:10.1007/s00202-020-01117-0
- [2] Xiao X. (2020) – *Maximal overlap discrete wavelet transform and deep learning for robust denoising and detection of power quality disturbance*. *IET Generation, Transmission & Distribution*, DOI:10.1049/iet-gtd.2019.1121
- [3] Chen J. et al. (2021) – *Fault Diagnosis in Distributed Power-Generation Systems Using Wavelet Based Artificial Neural Network*. *European Journal of Electrical Engineering*, 2021 (open access).
- [4] Ahmed M. et al. (2023) – *Fault detection through discrete wavelet transform in overhead power transmission lines*. *Energy Science & Engineering*, 2023.
- [5] Cong Duc PHAM, « Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée », Doctorat 19 septembre 2005.
- [6] Karim GUENIFI et Raouf DIREM, « Détection, Classification et localisation des défauts dans les réseaux par les techniques intelligentes », projet fin d'étude 2006, ENP Alger.
- [7] Boughezala mohammed salah, « Etude et simulation d'un coupleur de signaux HF pour réseaux d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.
- [8] P. Carrive "" Structure et planification, Réseau de distribution „Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, 1990.
- [9] A. Tening, "Participation aux services système de parcs éoliens mixtes : Application en milieu insulaire", Thèse de doctorat de l'institut polytechnique de Grenoble, France, 2009.
- [10] Merlin Gerin, « Protection des réseaux électriques », PozzoGrosMonti ,Italie 2003
- [11] THEODOR WILDI électrotechnique. Édition 2000
- [12] OUGUENOUNE Zahia, MAMOU Nawel, « Etude des Protections du Départ MT Boukhalfa Issu du Poste 60/30kV Dra Ben Khedaa ».Mémoire de fin d'études d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Option : Réseaux Electriques; UMMTO, 2009
- [13] Arar K , T adjine S , Modélisation et Diagnostic des systèmes par l'Analyse en Composantes Principales Multi-Echelle (MSPCA) Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electronique BP. 12, Sidi Amar 23000 Annaba , 2007.
- [14] Groupe Sonelgaz « Protection des réseaux Moyenne Tension », EPIC SONELGAZ Centre de Formation Ain M'Lila.[11] V.IGNATOVA, « *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique, Application aux creux de tension et à la pollution harmonique* », Thèse de doctorat, Université : Joseph Fourier (France), 2006.
- [15] V.IGNATOVA, « *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique, Application aux creux de tension et à la pollution harmonique* », Thèse de doctorat, Université : Joseph Fourier (France), 2006.
- [16] D.OULD-ABDESLAM, « *Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension* », Thèse de doctorat, Université : Haute Alsace (France), 2005.

- [17] P.FERRACCI, « *La qualité de l'énergie électrique* », Cahier technique N°199, Schneider Electric, 2001
- [18] Zellagui Mohamed, «Etude de protections des réseaux électriques MT (30-10kv)»,thèse de magister, Université de Constantine 2010.
- [19] Mohamed BENDADA, «Implantation d'algorithme de filtrage FPGA (réseau de portes programmables numérique sur FPGA (réseau de portes programmables)», Université Ferhat Abbas de Sétif Algérie - Master électronique 2010.
- [20] A.S.AlFulaid, M.A.El-Sayed, « A Recursive Least-Squares Digital Distance Relaying Algorithm » IEEE, Electrical and Computer Engineering Department, Kuwait University, 1998.
- [21] E.Davallo, P.Naim, des réseaux de neurones, Edition Eyrolles, 1990.
- [22] 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.
- [23] H. Bühler, « Réglage par la Logique Floue », presse polytechnique et universitaire, Romande, Lausanne (Suisse), 1994.
- [24] T.C. Minh,« Commande Numérique de Machines Asynchrones par Logique Floue ». Thèse de Ph.D, Université Laval, Québec, Déc.1997
- [25] S. Labiod, « Commande Adaptative par les Systèmes Flous ; Application aux Robots Manipulateurs », mémoire de magister, ENP, Alger, 1998.
- [26] 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
- [27] Tondpoor, K., Saghaianezhad, 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.
- [28] 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.
- [29] 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
- [30] 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.
- [31] Belmahdi. Fatiha « application du filtre de kalman pour le débruitage des signaux », Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou,2015
- [32] M. NAJIM, « modélisation et identification en traitement de signal », édition Masson 1988.
- [33] BRICE AUBERT, « détection des court-circuit inter-spires dans les générateurs synchrones à aimants permanents : méthodes basées modèles et filtre de kalman étendu application à un canal de génération électrique en aéronautique », Thèse de doctorat, Université de toulouse,2014.

- [34] EMMANUEL SEDDA, « estimation en ligne de l'état des paramètres d'une machine asynchrone par filtrage à erreur bornée et par filtrage de kalman », Thèse de doctorat, Université de paris 6 1998.
- [35] GREG WELCH and GARY BISHOP, « an introduction to the kalman filter », university of North Carolina at chapel hill 2003.
- [36] JULIER S.J, UHLMANN J.K. & DURRANT-WHYTE H.F, « a new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators », iee, trans automat control, 2000.
- [37] WAN E.A. & VANDER MERWE R, « the unscented kalman filter for nonlinear estimation », in proceedings of adaptive systems for signal processing, communication and control (as-spcc) Symposium, Alberta, 2000.
- [38] WAN E.A. & VANDER MERWE R, « the unscented kalman filter », in haykin kalman filtering and neural networks, Wiley, New-York, 2001.
- [39] JULIER S.J., « the scaled unscented transformation », in proceedings of the American control conference anchorage, 2002.
- [40] JULIER S.J.& UHLMANN J.K., « reduced sigma point filters for the propagation of means and covariances through non linear transformations », in proceeding of the American control conference, 2002.
- [41] RE-MI Hage, « estimation du temps de parcours d'un réseau urbain par fusion de données de boucles magnétiques et de véhicules traceurs », thèse de doctorat, université de nantes, 2012
- [42] Olivier BONNET TORRES, « Filtrage de Kalman appliqué à la navigation inertielle », 15 décembre 2003 (Onera-DCSD) .
- [43] T. S. Dillon and D. Niebur, "Neural networks applications in power systems," 1996.
- [44] 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.
- [45] Philippe Leray Philippe.Leray@insa-rouen.fr INSA Rouen -Département ASI Laboratoire PSI, page 8/52, « Quelques Types de Réseaux de Neurones La Rétro-propagation
- [46] El Moradj DAREM, page 51 Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Ecole National polytechnique, « Application des réseaux de neurones artificiels pour estimer les tensions de claquage dans les intervalles d'air pour les champs électriques peu divergents ».
- [47] G.B.Ancell and N.C.Pahalawatha, «Maximum likelihood estimation of fault location on transmission lines using travelling waves», IEEE Trans. Power Deliv, pp.9-680, 1994.
- [48] Documents internet, théorie de la transformée en ondelettes (<ftp://ftpdeveloppez.com/smilessoft/wt.pdf>).
- [49] Brahim MERIANE « Analyse du signal de parole par les ondelettes » Magister 2009 Univ Batna.
- [50] Nadjem BAILEK « Résolution de l'équation de Schrödinger sur une base d'ondelettes –Cas des systèmes unidimensionnels » Magister 2012 Univ de Tlemcen.
- [51] 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.

- [52] Mohamed BENDADA, «Implantation d'algorithme de filtrage FPGA (réseau de portes programmables numérique sur FPGA (réseau de portes programmables))», Université Ferhat Abbas de Sétif Algérie - Master électronique 2010.
- [53] "IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines," IEEE Std C37.114-2014 (Revision of IEEE Std C37.114-2004), pp. 1-76, 2015.
- [54] K. Zimmerman and D. Costello, "Impedance-based fault location experience," in 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2005., 5-7 April 2005 2005, pp. 211-226.
- [55] S. Das, S. Santoso, A. Gaikwad, and M. Patel, "Impedance-based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application," IEEE Access, vol. 2, pp. 1-1, 01/01 2014.
- [56] A. Oonsivilai and S. Saichoomdee, "Appliance of recurrent neural network toward distance transmission lines protection," in TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference, 23-26 Jan. 2009 2009, pp. 1-4
- [57] J. I. Murari Mohan Saha, Eugeniusz Rosolowski, Fault Location on Power Networks (Power Systems). Springer, 2010.

Résumé

Ce mémoire traite de la détection et de la localisation des défauts dans les réseaux électriques de distribution à l'aide de la transformée en ondelettes. Après avoir présenté les structures des réseaux électriques et les différents types de défauts susceptibles de perturber leur fonctionnement, les auteurs passent en revue plusieurs techniques modernes de détection, telles que la logique floue, les réseaux de neurones et le filtre de Kalman. L'accent est mis sur la transformée en ondelettes, particulièrement efficace pour analyser les signaux transitoires générés lors des défauts. Des simulations réalisées sous MATLAB/Simulink montrent que cette approche permet une détection rapide et une localisation précise des défauts, avec des erreurs très faibles, améliorant ainsi la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques. Ce travail ouvre la voie à l'intégration de ces méthodes dans des systèmes intelligents de surveillance en temps réel.

Mots clés

Défauts électriques, ondelettes, détection, Localisation, réseaux électriques, lignes de transmission, court-circuit, transformée en ondelettes, ondes progressive, protection des réseaux.

Abstract

This thesis deals with the detection and localization of faults in electrical distribution networks using the wavelet transform. After presenting the structures of electrical networks and the different types of faults that can disrupt their operation, the authors review several modern detection techniques, such as fuzzy logic, neural networks and the Kalman filter. Emphasis is placed on the wavelet transform, which is particularly effective for analyzing transient signals generated during faults. Simulations carried out in MATLAB/Simulink show that this approach allows rapid detection and accurate localization of faults, with very low errors, thus improving the reliability and security of electrical networks. This work paves the way for the integration of these methods into intelligent real-time monitoring systems.

Keywords

Electrical faults, wavelets, faults, location, electrical networks, transmission lines, short circuits, wavelet transforms, traveling waves, network protection.

ملخص

تتناول هذه المذكرة الكشف عن الأعطال وتحديد مواقعها في شبكات التوزيع الكهربائي باستخدام تحويل الموجات. بعد عرض هياكل الشبكات الكهربائية وأنواع الأعطال المختلفة التي قد تُعطل عملها، يستعرض المؤلفون العديد من تقنيات الكشف الحديثة، مثل المنطق الضبابي والشبكات العصبية ومرشح كالمان. ويتم التركيز على تحويل الموجات، الذي يُعدّ فعالاً بشكل خاص في تحليل الإشارات العابرة الناتجة عن الأعطال. وتُظهر عمليات المحاكاة التي أجريت باستخدام MATLAB/Simulink أن هذا النهج يسمح بالكشف السريع وتحديد مواقع الأعطال بدقة، مع أخطاء منخفضة للغاية، مما يُحسن موثوقية الشبكات الكهربائية وأمانها. ويُهدد هذا العمل الطريق لدمج هذه الأساليب في أنظمة المراقبة الذكية الآتية.

الكلمات المفتاحية

الأعطال الكهربائية، الموجات، الخلل، الموقع، الشبكات الكهربائية، خطوط النقل، قصر الدائرة، تحويل الموجات، الموجات المتنقلة، حماية الشبكة.