

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DE TECHNOLOGIE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE



FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

N° : Res-07

Mémoire présenté pour l'obtention

Du diplôme de Master Académique

Présenté par :

Aslafi Ahmed

Hammoudi salaheddine

Elassri yassin

THÈME

**Détection et localisation des défauts dans les Réseaux
électriques filaires par la réflectométrie et ANFIS**

Soutenu le 21/06/2025 devant le jury composé de :

DJALAB Abdelhakim	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
LAIB Abderrzak	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Encadreur
HERIZI Abdelghafor	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Co-Encadreur
DJERIOU Salim	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année Universitaire : 202/2025

Remerciements

La réalisation de ce mémoire n'aurait pas été possible sans le concours précieux de plusieurs personnes, à qui nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude.

Tout d'abord, nous tenons à remercier chaleureusement **Dr. LAIB Abderrzak** et **Dr. HERIZI Abdelghafour**, pour la qualité exceptionnelle de leur encadrement. Leur disponibilité, leur patience, leur rigueur scientifique ainsi que la richesse de leurs conseils ont grandement contribué à la concrétisation et à l'enrichissement de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance la plus sincère.

Nos remerciements s'adressent également à Dr. **DAFDAF Mabrouk**, chef du département d'électrotechnique à l'Université de M'sila, pour son soutien précieux et son appui constant tout au long de cette recherche.

Enfin, nous souhaitons remercier l'ensemble des enseignants, intervenants et toutes les personnes qui, par leurs conseils, leurs critiques constructives, leurs écrits ou simplement par le temps qu'ils nous ont accordé, ont guidé nos réflexions et accompagné nos efforts tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail à

Nos chers Parents.

Nos familles.

Nos amis.

ISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : les types de câbles.....	14
Figure 1. 2: Câble coaxial	8
Figure 1.3: Description matérielle d'une paire torsadée	9
Figure 1.4: Câble à fibre optique.....	10
Figure 1.5: Exemple de section de câble d'alimentation	11
Figure 1.6: Câbles de transmission d'énergie sous-marine	11
Figure 1.7: exemple de câblage dans le domaine aéronautique	13
Figure 1.8: les défauts francs (court-circuit et circuit ouvert).	15
Figure 1.9: Exemples de défauts non francs	16
Figure 1.10 : Principe de la réflectométrie	19
Figure 1.11 : signal "Chirp" linéaire en fréquence pour application FDR	20
Figure 1.12 : TDR en injectant une impulsion dans une ligne de transmission simple.....	21
Figure 2. 1: Modèle de ligne de transmission (une longueur l et une impédance Z_c)	26
Figure 2. 2 : Schéma équivalent du modèle RLCG à un segment de ligne de transmission..	27
Figure 2. 3 :Principe de la réflectométrie	28
Figure 2. 4 : Découpage de la branche.	29
Figure 2. 5: Entrelacement spatial et temporel.....	30
Figure 2. 6 : Configuration d'un réseau multi-branches	33
Figure 2. 7 : Réseau avec défaut non franc.	35
Figure 2. 8 : système d'interférence flou (FIS)	39
Figure 3. 1 : Réseau avec défaut franc.	48
Figure 3. 2 : Ligne bifilaire	49
Figure 3. 3: Résultats obtenus pour une ligne bifilaire simple.....	50
Figure 3. 4 : Représentation schématique d'un réseau Y bifilaire	52
Figure 3. 5 : Réflectogramme correspondant à un réseau Y bifilaire	52
Figure 3. 6 Réflectogramme correspondant à un réseau Y ligne bifilaire.....	53
Figure 3. 7 : Réflectogramme correspondant à un réseau Y ligne bifilaire.	54
Figure 3. 8 :Résultats obtenus pour réseau de 5 lignes sans défaut	55
Figure 3. 9: Réflectogramme correspondant à un réseau 5 ligne bifilaire.	55
Figure 3. 10 :Réflectogramme correspondant à un réseau 5 ligne bifilaire.	56
Figure 3. 11 : Structure d'un ANFIS artificiel	56

Figure 3. 12 : Une ligne simple adaptée (pour câble bifilaire), affectée par un défaut franc..	64
Figure 3. 13 : Signal de différence d'une ligne bifilaire affecté par un défaut franc.	58
Figure 3. 14 : Réseaux Y bifilaire adapté.....	60
Figure 3. 15 : Signal de différence d'une ligne coaxiale affecté par un défaut franc.....	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Les différents types de câbles coaxiaux	6
Tableau 3.1: Les dimensions du câble.....	46
Tableau 3. 2: La taille des bases des données utilisées pour ANFIS cas d'une ligne bifilaire simple.....	56
Tableau 3. 3: Résultats de l'inversion par ANFIS cas d'une ligne bifilaire simple.....	56
Tableau 3. 4: Résultats de l'inversion par ANFIS cas d'une ligne bifilaire Y.....	58

SOMMAIRE

Introduction générale	2
------------------------------------	----------

ChAPITRE-1 : Introduction aux techniques de diagnostic des défauts des câbles filaires

1.1. Introduction	6
1.2. Rappel sur les types de câbles	6
1.2.1. Câble coaxial	7
1.2.2. Paires torsadées	8
1.2.3. Fibre optique	9
1.2.4. Le câble d'énergie	10
1.2.5. Les Câbles de Contrôle :	11
1.3. Domaines d'applications des câbles	12
1.3.1. Distribution de l'énergie	12
1.3.2. L'aéronautique	12
1.3.3. Télécommunications	13
1.4. Type des Défauts dans les câbles	14
1.4.1. Défauts francs	14
1.4.2. Défauts non francs	15
1.4.2.1. Vieillessement	16
1.4.2.2. Dégradation de la gaine des câbles électriques	16
1.4.2.3. Pénétration d'humidité dans l'isolation	16
1.4.2.4. Surcharge électrique	16
1.4.2.5. Défauts de fabrication	17
1.5. Détection et localisation des défauts dans les câbles	17
1.6. But et importance de la détection et de la localisation des défauts	17
1.6.1. Stratégies de diagnostic	18
1.6.2. Diagnostic à Distance	18
1.6.3. Diagnostic externe	18
1.6.4. Diagnostic embarqué	18
1.7. La méthode de la réflectométrie	19
1.7.1. Principe de la méthode de réflectométrie	19
1.7.2. Différents Types des réflectométries	19

1.7.2.1	Réflexométrie dans le domaine fréquentiel	20
1.7.2.2	Réflexométrie dans le domaine temporelle	21
1.7.3.	Analyse des performances de la réflexométrie	22
1.8.	Conclusion.....	23

CHAPITRE-2 : Méthodologies suggérées pour la détection et la localisation des défauts

II.1	INTRODUCTION.....	25
II.2	Notion de réflexométrie et modèle RLCG d'une ligne de transmission	25
II.2.1	Notion de réflexométrie	25
II.2.2	Modèle RLCG d'une ligne de transmission.....	26
II.3	Principe de réflexométrie.....	27
II.4	Equations des lignes en temporel	28
II.4.1	Discretisation par FDTD des équations des lignes à constantes réparties	29
II.4.1.1	Echantillonnage spatial	29
II.4.1.2	Echantillonnage spatio-temporel.....	30
II.4.2	Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel.....	32
II.4.3	Construction du système $[A][X] = [B]$	33
II.4.3.1	Construction de la sous matrice $[A_1]$	33
II.4.3.2	Construction de la sous matrice $[A_2]$ en temporel.....	33
II.4.3.3	Construction du vecteur $[B]$	34
II.4.3.4	Définition du vecteur inconnu $[X]$	34
II.5	Modélisation des défauts dans le réseau électrique	35
II.5.1	Modélisation des défauts non-franc	35
II.5.2	Modélisation des défauts francs	37
II.5.2.1	Court-circuit	37
II.5.2.2	Circuit-ouvert	37
II.6	La méthode proposée : Système ANFIS.....	37
II.6.1	Le réseau Adaptative (Adaptive Network)	38
II.6.2	Système d'inférence Flou (FIS).....	38
II.6.3	Architecture de l'ANFIS.....	40
II.6.4	Type de l'ANFIS.....	43
II.6.4.1	Grid Partition (GP).....	44

II.6.4.2	Subtractive Clustering (SC)	44
III.7	Conclusion	45

CHAPITRE-3 Utilisation du système ANFIS pour le diagnostic des défauts dans les réseaux filaires

III.1	INTRODUCTION.....	52
III.2	Application de la corrélation soustractive pour la détection et localisation des défauts francs	52
III.2.1	Court-circuit	47
III.2.2	Circuit-ouvert.....	48
III.3	Validations du modèle proposée	48
III.3.1	Cas d'une ligne simple.....	48
III.3.2	Cas d'un réseau Y bifilaire affecté par un défaut franc	52
III.3.3	Cas d'un Réseaux en 5 lignes bifilaire.....	54
III.4	Localisation des défauts dans les réseaux bifilaires en utilisant ANFIS	57
III.4.1	Diagnostic d'une ligne bifilaire affecté par un défaut franc	57
III.4.2	Diagnostic d'un réseau bifilaire en Y affecté par un défaut franc par le ANFIS.....	59
III.5	Conclusion.....	61
	Conclusion générale.....	63
	Bibliographie.....	70

Introduction générale

Introduction générale

Bien que les technologies de communication sans fil soient de plus en plus répandues, l'utilisation des câbles électriques demeure indispensable dans de nombreuses applications essentielles, que ce soit pour le transport de l'énergie ou la transmission des données. Ces câbles constituent l'épine dorsale des systèmes techniques dans les usines, les moyens de transport et les installations résidentielles, ce qui rend leur fiabilité et leur bon fonctionnement cruciaux.

Avec le temps et une utilisation continue, les câbles sont exposés à des conditions environnementales difficiles telles que l'humidité, les variations soudaines de température ou les vibrations. Cela entraîne progressivement une dégradation de leur état, qui peut passer inaperçue au début, mais avoir des conséquences importantes à long terme, notamment une baisse de performance ou des pannes inattendues susceptibles de perturber l'activité et d'engendrer des pertes financières.

Il devient donc essentiel d'adopter des solutions techniques avancées permettant une surveillance continue de l'état des câbles et un diagnostic précoce des défauts. Ces solutions aident à identifier précisément la nature et la localisation des anomalies, ce qui permet d'effectuer une maintenance rapide et efficace, de réduire les temps d'arrêt et d'assurer une continuité de service en toute sécurité et fiabilité.

Afin de garantir une meilleure fiabilité des réseaux filaires, plusieurs techniques ont été développées pour permettre la détection des défauts dans les câbles et la localisation précise de leur emplacement.

Parmi ces techniques, la réflectométrie est l'une des méthodes les plus utilisées. Elle consiste à envoyer un signal électrique depuis l'une des extrémités du réseau, puis à observer les signaux réfléchis générés par d'éventuelles anomalies le long du câble.

L'analyse de ces signaux permet d'identifier la nature du défaut ainsi que sa position dans la structure, ce qui facilite les opérations de maintenance et réduit les temps d'arrêt.

Dans les applications pratiques, notamment pour des lignes de propagation complexes, l'analyse des signaux réfléchis nécessite un haut niveau d'expertise technique.

Il s'agit d'un problème inverse, où l'on déduit des informations précises sur les valeurs des paramètres électriques à partir de l'étude des formes des signaux et des temps de propagation.

Ces informations permettent d'identifier des défauts spécifiques tels que la coupure du câble, la corrosion ou d'autres anomalies similaires.

Le modèle d'analyse de la propagation d'une onde transitoire dans le réseau, connu sous le nom de formalisme topologique $[A][X] = [B]$, repose sur la résolution d'un système complet d'équations de propagation couvrant l'ensemble des branches constituant le réseau électrique.

Le modèle de propagation étudie la manière dont une onde électromagnétique se propage le long d'une ligne de transmission simple ou en Y, qu'elle soit intacte ou affectée par un défaut non apparent, dans le domaine temporel.

Ce modèle s'appuie sur les équations de transmission développées par les télégraphistes, où les caractéristiques électriques par unité de longueur telles que la résistance (**R**), l'inductance (**L**), la capacité (**C**) et la conductance (**G**) sont généralement exprimées en valeurs par unité de longueur.

Pour résoudre ces équations d'onde, la méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite Difference Time Domain - FDTD) est employée. Cette méthode transforme les équations différentielles en équations aux différences, ce qui permet une résolution numérique.

Parmi les méthodes couramment utilisées pour le traitement des signaux de réflectogramme et l'extraction d'informations essentielles sur les défauts notamment leur détection et leur localisation figure la méthode **ANFIS** (Système d'inférence neuro-flou adaptatif).

Cette approche est particulièrement efficace pour renforcer et mettre en évidence les effets subtils des défauts peu apparents présents dans les signaux de réflectométrie.

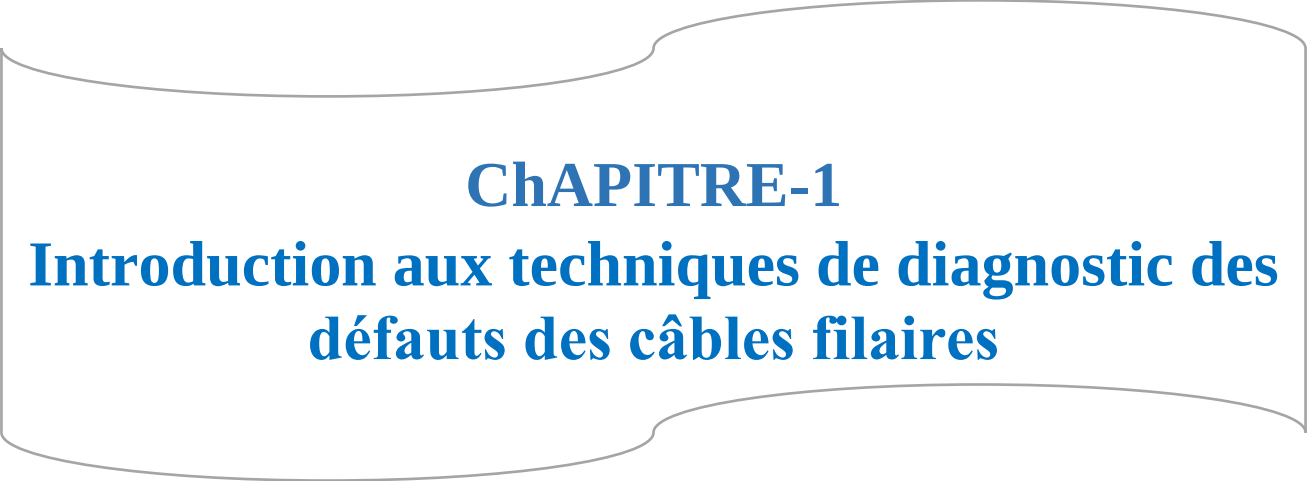
Ce travail est structuré en trois chapitres principaux, chacun traitant d'un aspect spécifique de l'étude :

Le premier chapitre présente les notions générales liées aux méthodes de diagnostic des défauts dans les câbles filaires. Nous y abordons également les principaux types de câbles utilisés, tels que le câble coaxial, la paire torsadée, etc. Ce chapitre traite aussi des domaines d'application des câbles ainsi que de la classification des différents types de défauts pouvant affecter les réseaux filaires.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la propagation dans le réseau filaire. Nous y détaillons les étapes de construction d'un modèle permettant de simuler la propagation d'une onde électrique transitoire dans un réseau électrique, en travaillant directement dans le domaine temporel à l'aide de la méthode des différences finies dans le temps (FDTD), tout en utilisant le formalisme topologique $[A][X] = [B]$ pour représenter les relations entre les éléments du réseau.

Dans le troisième chapitre, la méthodologie proposée pour le diagnostic sera appliquée à plusieurs configurations de câbles.

Cette méthode sera testée sur diverses configurations de câblage et de défauts, avec une complexité croissante allant des cas les plus simples aux plus complexes.



ChAPITRE-1

Introduction aux techniques de diagnostic des défauts des câbles filaires

CHAPITRE-1

Introduction aux techniques de diagnostic des défauts des câbles filaires

1.1. Introduction

Le réseau électrique filaire est constitué d'un ensemble d'éléments interconnectés par des câbles électriques qui servent de supports pour l'énergie et l'information dans les systèmes de communication. Ces câbles peuvent présenter des signes de faiblesse en raison de conditions d'utilisation difficiles, telles que les variations thermiques ou l'humidité, ou en raison de conditions opérationnelles sévères, comme une exposition à des contraintes mécaniques. Lorsque les câbles sont endommagés, ils peuvent perdre leurs fonctions ou provoquer des accidents graves. Par conséquent, il est essentiel de surveiller leur état et de fournir des informations précises sur la présence de défauts pour faciliter les opérations de maintenance.

Dans ce chapitre, nous aborderons les problèmes rencontrés par les réseaux de câbles et présenterons les méthodes de diagnostic utilisées pour détecter et localiser les défauts. Nous commencerons par introduire les différents types de câbles et leurs domaines d'application, puis nous examinerons les défauts potentiels qui peuvent survenir dans les câbles. Enfin, nous nous concentrerons sur la méthode de réflectométrie comme l'une des approches efficaces dans ce domaine.

1.2. Rappel sur les types de câbles

Les réseaux électriques filaires constituent la base essentielle des systèmes de transmission et de données dans le monde moderne. Ces réseaux reposent sur différents types de câbles, qui varient en fonction de leurs caractéristiques et de leurs utilisations, selon la nature des signaux transmis, la distance requise et l'environnement. Dans ce rapport, nous examinerons les principaux types de câbles utilisés dans les réseaux électriques filaires (câble coaxial, paire torsadée et fibre optique) (**figure 1.1**), en mentionnant les avantages et les inconvénients de chaque type.

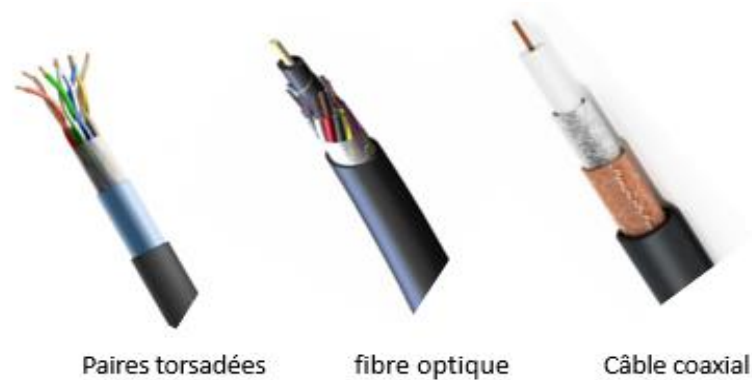


Figure 1.1 : les types de câbles

Tableau 2.1 Les différents types de câbles coaxiaux[1].

Type de câble	Description
RG-58 /U	Brin central à toron de cuivre unique
RG-58 A/U	Version militaire du RG-58 A/U
RG-58 A/U	Torsadé
RG-58 C /U	Version militaire du RG-58 A/U
RG-59	Transmission à bonde large
RG-6	Diamètre plus large, conseillé pour des fréquences plus élevées que RG-59

1.2.1. Câble coaxial

Le câble coaxial est un type de câble utilisé pour transmettre des signaux électriques, en particulier des signaux haute fréquence. Il se distingue par sa conception multicouche, composée d'un conducteur central en cuivre ou en matériau conducteur pour transporter le signal, d'une couche isolante (**diélectrique**) entourant le conducteur pour empêcher la fuite du signal et maintenir la distance entre le conducteur et la couche externe, d'une couche métallique (**blindage**) en cuivre ou en aluminium qui protège le signal des interférences électromagnétiques externes, et enfin d'une gaine extérieure en plastique ou en caoutchouc qui protège le câble des dommages physiques et des facteurs environnementaux (**Figure 1.2**).

Cette structure lui confère une protection élevée contre les interférences, le rendant adapté aux applications nécessitant une transmission de signaux de haute qualité sur de longues distances.



Figure 1. 2: Câble coaxial

1.2.2. Paires torsadées

Le câble à paire torsadée est un type de câble largement utilisé dans les systèmes de télécommunications et les réseaux informatiques. Il est composé de deux fils de cuivre entrelacés de manière à former une torsade. Cette torsion joue un rôle crucial dans la réduction des interférences électromagnétiques et de la diaphonie (crosstalk), c'est-à-dire la perturbation du signal provenant de fils voisins ou d'autres sources.

Il existe plusieurs catégories de paires torsadées en fonction du blindage, telles que : paire torsadée non blindée, paire torsadée protégée par écran, paire torsadée blindée, etc.

- **La paire torsadée non blindée** (en anglais Unshielded Twisted Pair ou UTP) ne possède pas de protection par blindage. Elle est couramment utilisée pour les installations téléphoniques et les réseaux informatiques domestiques.
- **La paire torsadée avec écran** (en anglais Foiled Twisted Pair ou FTP) consiste en des paires torsadées enveloppées d'une gaine de blindage commune. Elle est utilisée pour les télécommunications et les réseaux informatiques.
- **La paire torsadée blindée** (en anglais Shielded Twisted Pair ou STP) est composée de paires torsadées chacune protégée par une couche conductrice de blindage, offrant ainsi une meilleure résistance aux interférences électromagnétiques[2].

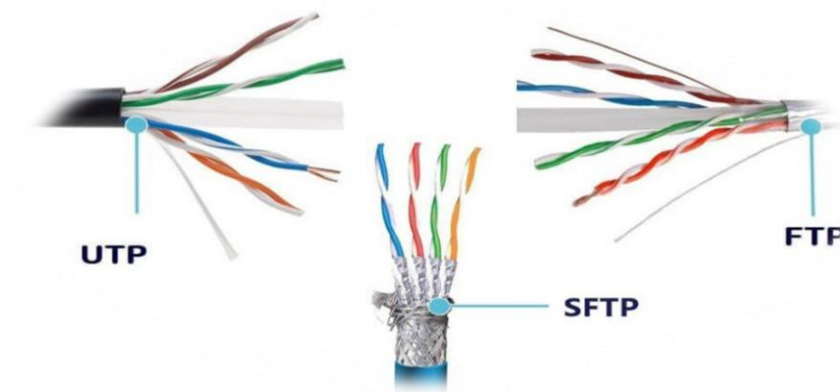


Figure 1.3: Description matérielle d'une paire torsadée

1.2.3. Fibre optique

La fibre optique est un type de câble de transmission de données qui utilise des fils très fins en verre ou en plastique pour transmettre des signaux lumineux. Cette technologie offre des taux de transfert de données très élevés, une large bande passante et une faible atténuation du signal sur de longues distances.

Les avantages de la fibre optique par rapport aux câbles en cuivre traditionnels incluent une vitesse de transmission plus rapide, une sécurité accrue, une fiabilité supérieure et une résistance aux interférences électromagnétiques.

La fibre optique est utilisée dans de nombreuses applications, notamment les réseaux de télécommunications, les réseaux informatiques, les systèmes de surveillance et les systèmes médicaux. Cependant, son coût plus élevé que les câbles en cuivre et sa fragilité lors de l'installation en font une technologie qui n'est pas toujours utilisée pour tous les types d'applications.



Figure 1.4: Câble à fibre optique

1.2.4. Le câble d'énergie

Le type de câble décrit est utilisé pour la transmission d'énergie électrique à haute tension, que ce soit en courant alternatif (CA) ou continu (CC). Ces câbles sont conçus pour résister à des conditions extrêmes et assurer une transmission efficace et sécurisée de l'électricité.

Les câbles haute tension sont utilisés pour transporter de l'énergie électrique à des tensions élevées, que ce soit en courant alternatif ou continu. Ces câbles sont dotés d'une structure complexe pour garantir leur fiabilité et leur sécurité. Une couche de blindage métallique entoure l'isolant du câble et est reliée à la terre. Ce blindage a pour fonction de répartir uniformément la contrainte diélectrique sur l'isolant, évitant ainsi les points de surtension qui pourraient endommager le câble. (La Figure1.5) illustre une coupe transversale d'un câble haute tension, mettant en évidence ses composants principaux :

- **Le conducteur interne** : Conçu pour transporter le courant, il doit également résister à des
- **L'écran métallique** : En plus de son rôle électrique, il contribue à la protection mécanique du câble.
- **La gaine externe en polymère** : Elle protège le câble contre la corrosion, assure l'étanchéité, renforce la protection mécanique lors de l'installation et, si nécessaire, isole électriquement l'écran métallique par rapport à la terre.

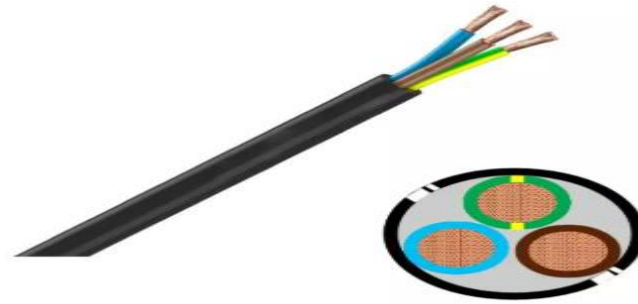


Figure 1.5: Exemple de section de câble d'alimentation

(La **Figure1.6**) montre un exemple de câbles sous-marins, utilisés pour la transmission de puissance sur de longues distances, notamment entre des continents ou vers des installations offshores.

Après avoir présenté les différents types de câbles et leurs applications, il est important de comprendre les principaux types de défauts qui peuvent survenir dans ces câbles, ainsi que les causes possibles de ces défaillances.



Figure 1.6: Câbles de transmission d'énergie sous-marine

1.2.5. Les Câbles de Contrôle :

Les câbles de contrôle sont des câbles électriques conçus pour transmettre des signaux de commande et de contrôle entre différents appareils dans des systèmes industriels, des usines, des machines ou d'autres installations. Ces câbles sont utilisés pour connecter les dispositifs de commande (comme les automates, les capteurs, les contrôleurs) aux machines ou systèmes qu'ils régissent. Ils sont essentiels pour le bon fonctionnement de l'automatisation, des systèmes de sécurité et des réseaux de contrôle.

Les câbles de contrôle sont conçus pour transmettre des signaux de faible puissance, permettant le contrôle et la commande des systèmes, plutôt que de transporter des courants électriques élevés. Ils sont souvent blindés afin de résister aux interférences électromagnétiques (EMI) et aux bruits électriques, assurant ainsi une transmission claire et fiable. Ces câbles sont également très flexibles, ce qui facilite leur installation dans des environnements industriels complexes. De plus, ils sont capables de résister à des conditions difficiles, telles que des températures extrêmes, l'humidité, les produits chimiques et les vibrations. Enfin, les câbles de contrôle respectent des normes strictes de sécurité pour garantir leur fiabilité et leur sécurité dans des environnements industriels exigeants.

1.3. Domaines d'applications des câbles

Les câbles électriques sont essentiels pour le transport d'énergie et d'informations. Leur utilisation a considérablement augmenté pour répondre aux exigences des nouvelles technologies (vitesse, temps réel, etc.). Ils sont principalement utilisés dans des secteurs tels que la distribution d'énergie, l'aéronautique, l'automobile et les télécommunications.

1.3.1. Distribution de l'énergie

Les câbles jouent un rôle crucial dans le transport de l'électricité, permettant son acheminement sur de grandes distances, depuis les centrales jusqu'aux consommateurs finaux. Ils sont utilisés dans divers domaines de la distribution d'énergie, notamment dans les réseaux à haute tension pour le transport d'électricité depuis les centrales jusqu'aux postes de transformation, dans les réseaux à moyenne ou basse tension pour les distances plus courtes, et enfin dans les usines pour alimenter les machines et équipements de production.

1.3.2. L'aéronautique

Les câbles jouent un rôle crucial dans l'architecture de l'avion, bien qu'ils restent invisibles pour les passagers. Le câblage constitue un élément clé de la structure d'un aéronef.

Des kilomètres de câbles sont installés dans les ailes, le fuselage et la pointe avant, permettant de transmettre les circuits électriques nécessaires.

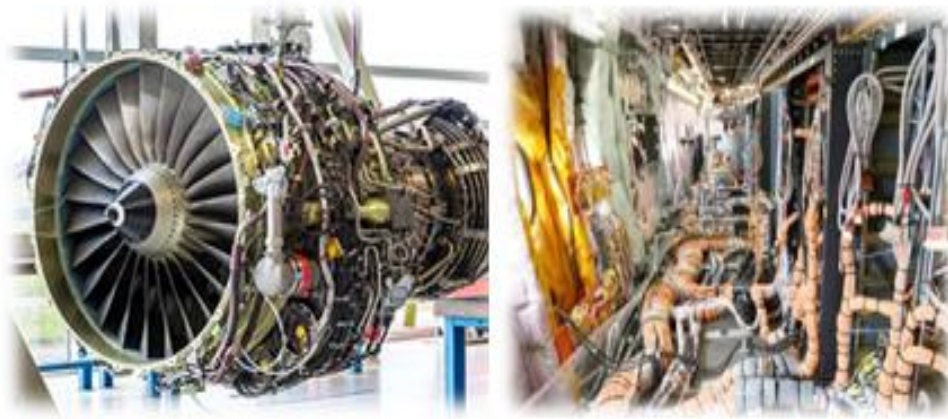


Figure 1.7: exemple de câblage dans le domaine aéronautique

Les câbles jouent un rôle essentiel dans les automobiles, servant à transmettre à la fois l'énergie électrique et les signaux de commande entre les différents composants électriques et électroniques du véhicule. Voici une reformulation des domaines d'application des câbles dans l'automobile :

- **Transmission des signaux de commande** : Les câbles sont utilisés pour relayer les signaux de commande entre les capteurs (comme les capteurs de température, de pression, ou de position) et les actionneurs (tels que les moteurs électriques, les vannes, ou les injecteurs). Ces signaux permettent de contrôler et de réguler le fonctionnement des différents systèmes du véhicule.
- **Interconnexion des systèmes électroniques** : Les câbles assurent la connexion entre les divers systèmes électroniques embarqués dans la voiture. Parmi ces systèmes, on trouve :
 - Le système de navigation, qui guide le conducteur en temps réel.
 - Le système audio, qui diffuse la musique et les informations sonores.
 - Le système de climatisation, qui régule la température intérieure du véhicule.
 - Les systèmes de sécurité.

1.3.3. Télécommunications

Le domaine des télécommunications est un secteur en constante évolution, où diverses technologies et disciplines scientifiques convergent et interagissent. Parmi ses nombreuses applications, on trouve la transmission de la voix via la téléphonie et la radiotéléphonie. La

télévision, désormais présente dans presque tous les foyers, est accompagnée d'un réseau d'antennes et de paraboles qui envahissent les villes. Le télégraphe, précurseur des transmissions de données, a été la première application des télécommunications : il permettait la transmission de caractères et de messages via des signaux optiques, puis sur des lignes électriques, et enfin par ondes radio.

D'autres systèmes, comme le radar, bien qu'ils ne soient pas des systèmes de communication, relèvent de la télédétection. Ces techniques combinent les micro-ondes, le traitement du signal, et la radioélectricité, et peuvent donc être considérées comme faisant partie du domaine des télécommunications. La radionavigation, qui a vu le jour avec les premières applications de la radio, a joué un rôle clé dans l'amélioration de la navigation maritime, puis aérienne,

En utilisant des méthodes telles que la radiogoniométrie et les radiophares, suivis des systèmes hyperboliques

1.4. Type des Défauts dans les câbles

1.4.1. Défauts francs

Les défauts francs entraînent une variation significative de l'impédance caractéristique du câble. Ils se caractérisent par une interruption complète de la circulation de l'énergie ou des informations dans le câble endommagé. Ces défauts correspondent à des situations de circuit ouvert ou de court-circuit.

- **Le circuit ouvert** se produit lorsqu'un ou plusieurs conducteurs se rompent en raison de dommages mécaniques ou de mouvements violents du câble.
- **Le court-circuit**, quant à lui, résulte de la mise en contact à faible résistance de deux conducteurs ou plus, souvent causée par une isolation endommagée.

Ces défauts francs peuvent provoquer des dysfonctionnements soudains du système, entraînant parfois des accidents graves[3].

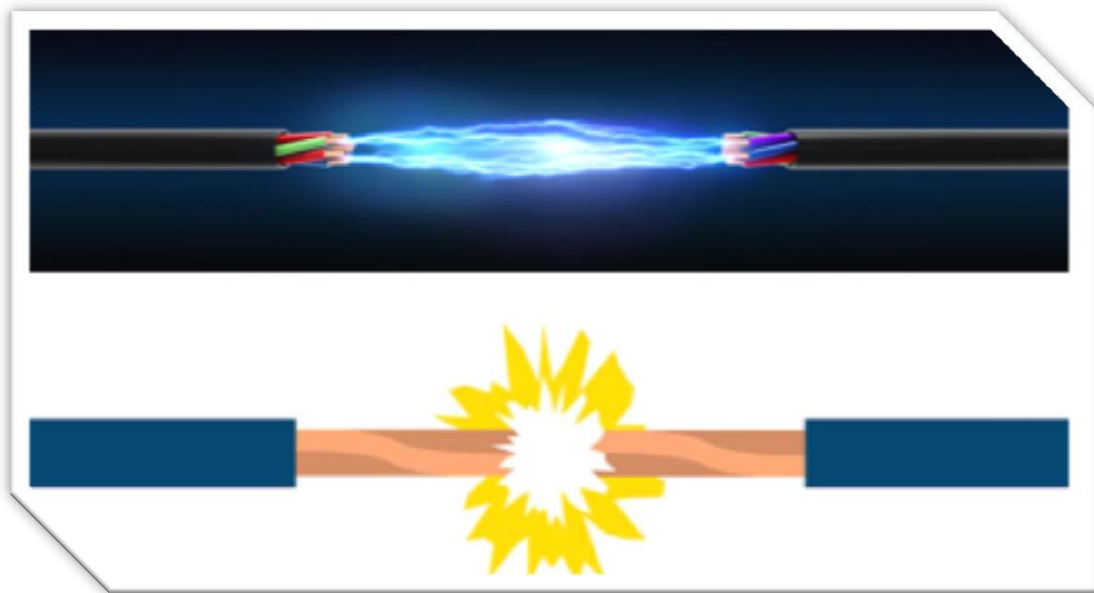


Figure 1.8: les défauts francs (court-circuit et circuit ouvert).

1.4.2. Défauts non francs

Les défauts non francs sont des défauts subtils, tels que l'usure des câbles, la rupture de brins dans un câble multibrins, la fissuration de la gaine isolante, etc. Ces défauts se caractérisent par une faible variation de l'impédance caractéristique du câble, ce qui les rend plus difficiles à détecter. Ces dégradations n'empêchent pas la propagation de l'énergie ou des données, mais elles peuvent évoluer à long terme vers des défauts francs.

Ces types de défauts résultent de plusieurs facteurs externes (erreurs de manipulation, corrosion, oxydation, conditions environnementales, etc.) ou internes (défauts de fabrication, vieillissement du câble, etc.).

La détection précoce de ces défauts émergents permettrait de réduire les coûts, de diminuer le temps de réparation et d'éviter des accidents graves. C'est pourquoi cela constitue aujourd'hui un enjeu crucial dans le domaine du diagnostic des câbles. (La Figure1.9) illustre des cas typiques de défauts non francs dans les câbles électriques[3].

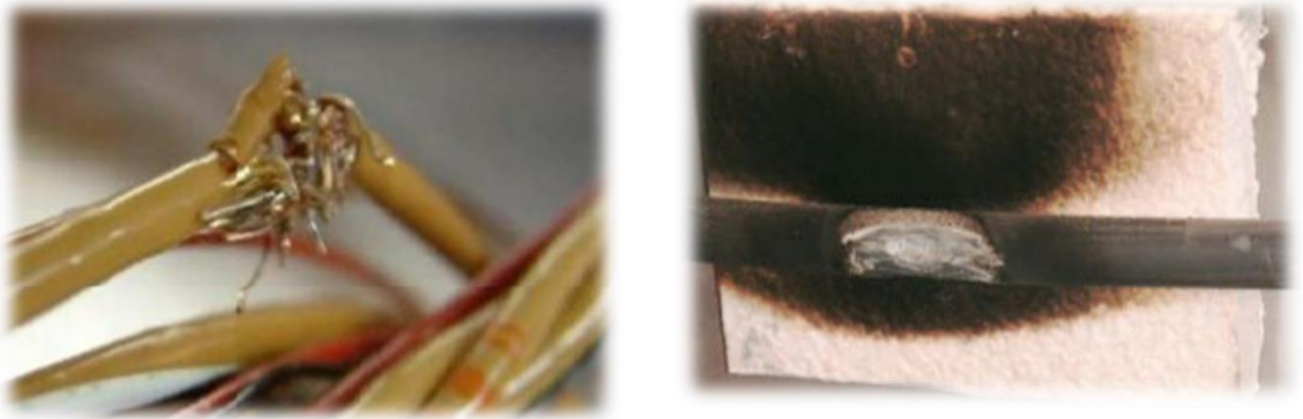


Figure 1.9: Exemples de défauts non francs

1.4.2.1. Vieillissement

Le vieillissement d'un câble peut considérablement réduire sa durée de vie s'il est utilisé en dehors des conditions optimales pour lesquelles il a été conçu. Ce processus de vieillissement entraîne généralement une fragilisation, une fissuration et, finalement, une défaillance des matériaux d'isolation et de revêtement. Cela expose le conducteur et augmente le risque de court-circuit, qui peut être une cause probable d'incendie électrique.

1.4.2.2. Dégradation de la gaine des câbles électriques

La dégradation de la gaine extérieure d'un câble peut être causée par plusieurs facteurs, tels que la chaleur, le froid intense, des conditions climatiques extrêmes ou l'abrasion. Ces éléments peuvent entraîner la défaillance des câbles électriques, car les conducteurs ne sont plus correctement isolés ni protégés par la gaine extérieure initialement conçue pour assurer cette fonction.

1.4.2.3. Pénétration d'humidité dans l'isolation

L'infiltration d'humidité peut engendrer des problèmes majeurs, tels que des courts-circuits et

La corrosion des conducteurs en cuivre.

1.4.2.4. Surcharge électrique

La surcharge électrique se produit généralement lorsqu'un câble est sous-dimensionné pour l'usage prévu ou lorsqu'il est soumis à une charge excessive. Dans un contexte domestique, cela résulte souvent du branchement d'un nombre trop élevé d'appareils sur une même prise, entraînant une surcharge du circuit associé à cette prise, à une multiprise ou à une rallonge[3].

1.4.2.5. Défauts de fabrication

Les défauts de fabrication font référence aux imperfections ou anomalies qui surviennent lors du processus de production d'un câble ou de tout autre produit. Ces défauts peuvent être causés par des erreurs dans la chaîne de production, des équipements défectueux, des matériaux de mauvaise qualité ou des procédés incorrects. Voici quelques exemples courants de défauts de fabrication :

- **Mauvaise isolation** : Si l'isolation autour des conducteurs n'est pas correctement appliquée ou présente des défauts, cela peut entraîner des courts-circuits ou des pertes d'énergie.
- **Conducteur défectueux** : Un conducteur peut être mal fabriqué, par exemple avec des fils mal torsadés ou une mauvaise connexion entre les brins de cuivre, ce qui peut nuire à la performance électrique.
- **Torsion inégale ou déformation** : Pendant la fabrication, les câbles peuvent être mal torsadés ou mal formés, ce qui peut affecter leur flexibilité, leur résistance et leur capacité à supporter des conditions d'utilisation.
- **Impuretés dans les matériaux** : L'utilisation de matériaux impurs ou de mauvaise qualité dans la fabrication des câbles peut causer des défaillances prématurées, comme une corrosion rapide ou une mauvaise conductivité.
- **Problèmes de soudure ou de connexion** : Si des composants internes du câble ne sont pas correctement soudés ou connectés, cela peut entraîner une perte de signal, une déconnexion, voire un incendie dans des conditions extrêmes.

1.5. Détection et localisation des défauts dans les câbles

Il est important de noter que les câbles ont une durée de vie limitée et nécessitent un diagnostic régulier, dont l'objectif principal est de vérifier leur état de fonctionnement et la qualité de leur isolation. Tôt ou tard, la question de leur remplacement ou, à tout le moins, de leur maintenance se posera.

1.6. But et importance de la détection et de la localisation des défauts

Il s'agit de détecter, localiser et caractériser des défauts électriques tels qu'un court-circuit, un circuit ouvert, une rupture de brins, une usure localisée de l'isolant, un blindage endommagé, un vieillissement du câble, etc. Ces anomalies peuvent entraîner des dysfonctionnements ou des

conséquences plus graves pour le système et son environnement (notamment dans des domaines tels que l'avionique, l'automobile, les systèmes de sécurité, etc.).

Le diagnostic des câbles offre plusieurs avantages, notamment : la sécurité des personnes, la réduction des risques de dommages matériels, un gain de temps, un bénéfice économique et une diminution de l'impact environnemental.

1.6.1. Stratégies de diagnostic

Le diagnostic des défauts dans les systèmes électriques ou électroniques nécessite des stratégies précises et efficaces pour identifier les problèmes avec précision et prendre les mesures appropriées. Voici quelques stratégies couramment utilisées dans le diagnostic :

1.6.2. Diagnostic à Distance

Le diagnostic à distance est un processus de surveillance et d'analyse des systèmes ou des équipements à partir d'un emplacement éloigné en utilisant des technologies de communication modernes. Cela se fait en collectant des données à partir de capteurs ou de systèmes embarqués et en les envoyant à un centre d'analyse central, où elles sont évaluées pour identifier toute défaillance ou écart par rapport au fonctionnement normal.

1.6.3. Diagnostic externe

Le diagnostic externe est un processus d'évaluation et d'analyse des systèmes ou des équipements en les examinant de l'extérieur sans avoir besoin de les démonter ou d'accéder à leurs composants internes. Ce type de diagnostic repose sur des techniques non invasives pour identifier les défauts ou les problèmes.

1.6.4. Diagnostic embarqué

Le diagnostic embarqué est un processus de surveillance et d'analyse des systèmes ou des équipements en utilisant des systèmes de diagnostic intégrés directement dans l'appareil lui-même. Ces systèmes reposent sur des capteurs et des logiciels spécialisés pour collecter et analyser les données en temps réel, afin d'identifier les défauts ou les problèmes sans nécessiter d'intervention externe.

1.7. La méthode de la réflectométrie

La **réflectométrie** est une technique efficace utilisée pour localiser les défauts et analyser les caractéristiques des câbles et des réseaux électriques et de télécommunications. Cette méthode repose sur le principe de la réflexion des ondes lorsqu'elles rencontrent des discontinuités ou des changements d'impédance, fournissant des informations précises sur l'emplacement et l'état des défauts ou des variations dans le système.

1.7.1. Principe de la méthode de réflectométrie

Dans le contexte de diagnostic filaire, la réflectométrie consiste à injecter un signal dans le réseau des câbles électriques à tester et à analyser le signal réfléchi. En effet, comme il est illustré dans la (**Figure1.10**), le signal injecté se propage dans le réseau et lorsqu'il rencontre une discontinuité ou une variation d'impédance, une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection et l'autre partie est transmise dans le reste du réseau. L'analyse du signal réfléchi, via le coefficient de réflexion, qui est le rapport entre le signal réfléchi et le signal injecté, permet de remonter à certaines caractéristiques du réseau [4].

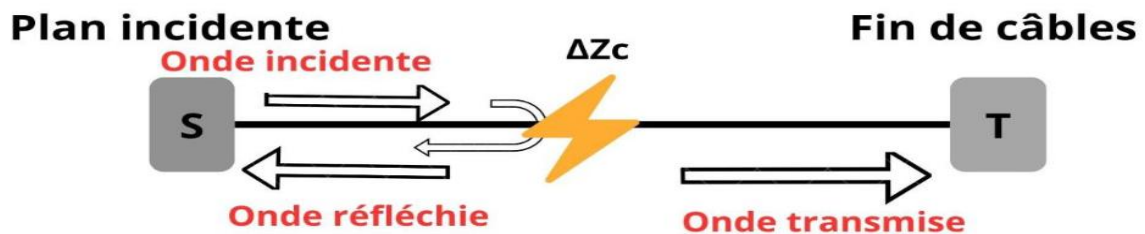


Figure 1.10 : Principe de la réflectométrie

1.7.2. Différents Types des réflectométries

La réflectométrie est principalement classée en deux grandes catégories :

La réflectométrie fréquentielle (Frequency Domain Reflectometry - **FDR**) et la réflectométrie temporelle (Time Domain Reflectometry - **TDR**).

Les principales différences entre ces deux types résident dans la méthode d'injection du signal et le traitement de la réponse. Lorsque le signal se propage à travers le réseau et rencontre une discontinuité électrique (défaut, dérivation, changement d'impédance, etc.), une partie de son

énergie est renvoyée vers le point d'injection. Dans le domaine temporel (**TDR**), l'analyse des signaux réfléchis permet de déterminer la topologie du réseau, tandis que dans le domaine fréquentiel (**FDR**), l'analyse de l'onde stationnaire (standing wave) est utilisée pour fournir ces informations[5].

1.7.2.1. Réflectométrie dans le domaine fréquentiel

Repose sur l'injection d'un signal sinusoïdal modulé en fréquence (où la fréquence de ce signal varie linéairement avec le temps puis sur l'analyse de l'**onde stationnaire (Onde stationnaire)**, résultant de la superposition de l'onde réfléchie et de l'onde injectée. Ce signal, connu sous le nom de signal "**Chirp**" (**Figure 1.11**) [2].

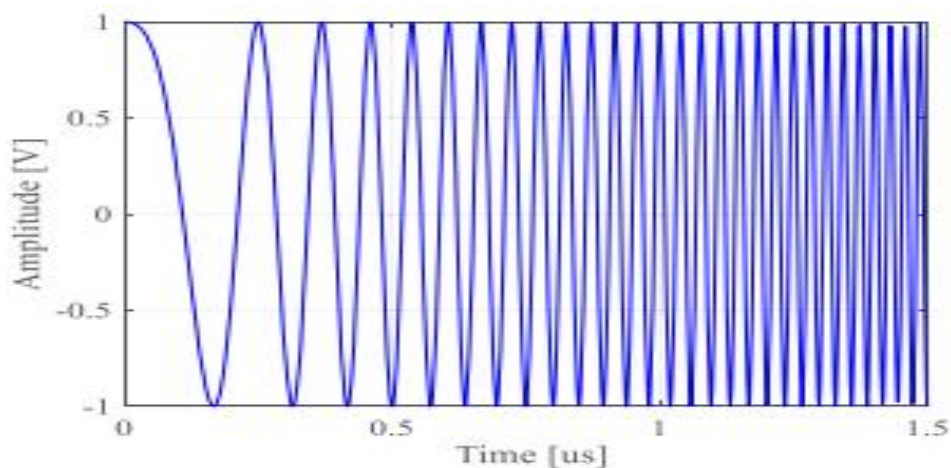


Figure 1.11 : signal "Chirp" linéaire en fréquence pour application **FDR**

Les méthodes de réflectométrie fréquentielle (**FDR**) permettent une analyse spectrale et une calibration rapide, mais sont complexes à interpréter et nécessitent des conversions fréquence-temps. Pour cette raison, les méthodes temporelles (**TDR**) sont souvent préférées, surtout pour les diagnostics embarqués.

Nous pouvons distinguer trois techniques dérivées de la **FDR** dont l'analyse repose sur différents paramètres : fréquence, phase ou amplitude, pour déterminer la position d'une discontinuité d'impédance dans le câble.

La technique **FMCW** (Frequency Modulated Continuous Wave) consiste à mesurer le décalage en fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie, capté dans le plan d'incidence [2], alors que La **PDFDR** (Phase Détection Frequency Domain Reflectometry) repose sur la mesure du décalage de phase entre l'onde émise et l'onde réfléchie[6]. La méthode **SWR** (Standing

Wave Reflectometry) consiste à envoyer un signal sinusoïdal à haute fréquence dans un câble, puis à mesurer l'onde stationnaire à la source. Cette onde stationnaire résulte de la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie[7].

1.7.2.2. Réflectométrie dans le domaine temporelle

La réflectométrie en domaine temporel (**TDR**), initialement utilisée pour le contrôle des câbles de télécommunication, a été récemment adaptée pour mesurer l'humidité du sol et s'est largement répandue en agronomie depuis une vingtaine d'années (DE CLERCK, 1982).

Elle est particulièrement efficace pour diverses applications telles que la mesure de l'humidité volumique, l'évaluation de l'eau libre dans les sols gelés, la conductivité électrique et les flux de solutés.

La technique offre des mesures simples, rapides, automatisables (TODOROFF et LANGELLIER, 1994) et relativement précises, avec une précision de 1,3 à 2 % pour l'humidité (ROTH et al., 1992), même en surface[8].

La méthode classique de la réflectométrie en domaine temporel consiste à injecter une onde de tension à propagation quasi compacte dans une ligne ou un réseau de lignes de transmission et à analyser le signal réfléchi à la source. Différents types de signaux peuvent être injectés, tels que des échelons, des fonctions portes ou des impulsions gaussiennes. (**La Figure1.12**) illustre un exemple de **TDR** où une impulsion est injectée dans une ligne de transmission, les extrémités étant chargées respectivement par un circuit ouvert et un court-circuit. L'analyse des amplitudes et des délais de propagation des pics, détectés dans le réflectogramme du coefficient de réflexion, permet de localiser les discontinuités et d'en déterminer la nature dans le réseau.

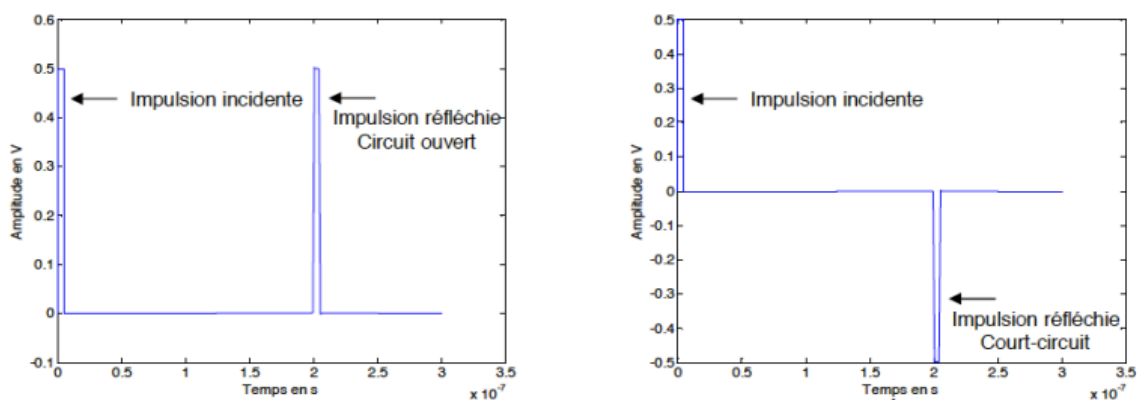


Figure 1.12 : TDR en injectant une impulsion dans une ligne de transmission simple

Dans le domaine temporel, il existe d'autres méthodes de diagnostic filaire qui sont dérivées de la TDR classique, telles que la réflectométrie par séquence directe, également appelée **STDR**[9], la réflectométrie par étalement de spectre (ou **SSTDR**)[10]. et la réflectométrie multi-porteuse (ou **MCTDR**) [11].

Les méthodes **STDR** et **SSTDR** suivent le même principe que la méthode classique de réflectométrie décrite précédemment, à la différence près que le signal injecté dans

le réseau est une séquence numérique pseudo-aléatoire. Quant à la méthode **MCTDR**, elle est utilisée pour le diagnostic embarqué des câbles des réseaux électriques. Son principe consiste à injecter un signal multi porteuse dans un câble du réseau de manière à éviter toute interférence avec les autres signaux présents dans le câble[12].

1.7.3. Analyse des performances de la réflectométrie

L'efficacité d'une méthode de diagnostic se mesure par sa capacité à détecter et localiser avec précision les défauts. Le diagnostic des défauts de câbles devient de plus en plus complexe, long et coûteux, surtout pour des systèmes sophistiqués comportant des centaines de kilomètres de câbles, comme c'est le cas en avionique. De plus, la fiabilité des systèmes électriques embarqués dépend en grande partie de celle des réseaux câblés. C'est ce constat qui a motivé le développement de systèmes de diagnostic automatisés capables de détecter, localiser et caractériser d'éventuels défauts.

Les méthodes de réflectométrie ont démontré leur efficacité pour détecter et localiser des défauts dans des réseaux de câbles, même avec des topologies complexes. Cependant, la surveillance continue nécessite l'intégration de ces systèmes de diagnostic dans l'environnement naturel des réseaux de câbles. Ces systèmes doivent donc faire face à des défis tels que le bruit de mesure, l'ambiguïté de localisation dans les réseaux ramifiés, les interférences, l'autonomie et le coût.

La surveillance continue de l'état des réseaux câblés conduit à l'incorporation de systèmes de diagnostic capables de réaliser un diagnostic en temps réel des câbles[11].

Ce type de diagnostic, réalisé simultanément avec le fonctionnement du système, reflète les conditions réelles et permet une détection et localisation plus précise des défauts intermittents[13].

Le diagnostic simultané doit être effectué sans affecter le réseau, en veillant à ce que les signaux de diagnostic n'interfèrent pas avec les signaux essentiels du système afin d'éviter toute perturbation de son fonctionnement.

Lors de la propagation d'un signal de diagnostic dans un câble ou un réseau complexe, l'atténuation et la dispersion affectent le signal réfléchi, limitant la précision de la localisation des défauts. Si le système de diagnostic n'est pas adapté au réseau, une partie du signal est réfléchi au point d'injection sans se propager, créant une perte d'énergie qui peut masquer

Les défauts proches (zone aveugle). Il est donc nécessaire de traiter spécifiquement les signaux ou de répartir les mesures sur différents points du réseau, ce qu'on appelle le "diagnostic distribué"[12].

Le diagnostic distribué résout les problèmes de zone aveugle et d'ambiguïté de localisation des défauts dans un réseau complexe en réalisant des mesures de réflectométrie simultanément à plusieurs points du réseau. Cette approche permet de surmonter des contraintes telles que le coût du diagnostic, la complexité des signaux à analyser, et les interférences entre les modules connectés, nécessitant parfois d'autres traitements spécifiques.

La détection et la localisation de défauts (francs ou non francs) restent toujours un but essentiel des méthodes de réflectométrie. Quel que soit le type du diagnostic externe ou interne, embarqué ou en ligne, appliqué à un réseau de topologie simple ou complexe, la mise en œuvre de différentes méthodes de diagnostic embarqué dans les réseaux de câbles ramifiés est nécessaire pour garantir un meilleur résultat.

1.8. Conclusion

Ce chapitre a introduit le contexte de l'étude et les problèmes associés, en mettant en avant l'utilisation généralisée des différents types de câbles électriques dans les systèmes modernes. L'augmentation de la longueur des câbles a accru la complexité des réseaux filaires, entraînant

une hausse des défauts apparents et non apparents. Dans ce cadre, la méthode de réflectométrie s'est révélée être l'une des plus adaptées pour détecter et localiser les défauts dans ces réseaux.

Le chapitre a également exploré les phénomènes de propagation dans les lignes de transmission, ce qui permet de mieux comprendre le principe de la réflectométrie et son application pratique pour la détection de défauts. Il a été démontré que la réponse réflectométrique peut être modélisée, même pour des réseaux filaires à topologie complexe. Cependant, la complexité accrue des réseaux rend l'analyse de la réponse réflectométrique plus difficile, en raison des réflexions multiples qui deviennent difficiles à identifier (jonctions multiples, aller-retours, défauts, etc.). Ces réflexions peuvent masquer la présence d'un défaut, surtout si celui-ci est de type non franc, ce qui dégrade la précision de localisation et la qualité du diagnostic.

Enfin, le chapitre a souligné que l'analyse d'un réseau peut être réalisée hors ligne ou en ligne, permettant une surveillance continue de l'état du réseau pour détecter et localiser les défauts en temps réel. Cette surveillance en temps réel nécessite d'intégrer le diagnostic directement dans les systèmes où les réseaux de câbles opèrent. Cependant, cela introduit des problèmes d'interférences, particulièrement dans les réseaux ramifiés, créant une ambiguïté supplémentaire dans la localisation des défauts. Ces défis mettent en lumière la nécessité de développer de nouvelles méthodes pour le diagnostic en ligne des réseaux de câbles électriques. Le Chapitre 2 présentera en détail les différentes techniques de diagnostic basées sur la réflectométrie.

CHAPITRE-2

Méthodologies suggérées pour la détection et la localisation des défauts

CHAPITRE-2

Méthodologies suggérées pour la détection et la localisation des défauts

II.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé les différents types de câbles ainsi que les pannes susceptibles d'affecter les réseaux filaires, chaque type de défaut présentant des caractéristiques spécifiques telles que sa nature, son origine et ses conséquences potentielles. En raison de cette diversité, plusieurs techniques ont été développées pour diagnostiquer ces défauts avec précision, notamment les méthodes visuelles, les techniques à rayons X, les approches basées sur les propriétés capacitatives et inductives, ainsi que les méthodes reposant sur l'analyse des signaux réfléchis.

Dans le présent chapitre, nous nous concentrons sur la modélisation d'un réseau comportant un défaut non franc en utilisant la technique de **réflectométrie**. Nous commençons par introduire le concept de la réflectométrie et le modèle **RLCG** des lignes de transmission, en expliquant les principes fondamentaux sur lesquels repose cette méthode, à travers la simulation d'un réseau filaire servant de cas d'étude. Ensuite, nous présentons la méthode de mesure et d'interprétation des signaux réfléchis, en montrant comment ces données peuvent être intégrées dans le système **ANFIS**, qui combine les réseaux de neurones artificiels avec les systèmes d'inférence floue, afin d'améliorer la précision de détection des défauts et de localisation de leur position.

II.2 Notion de réflectométrie et modèle RLCG d'une ligne de transmission

II.2.1 Notion de réflectométrie

On considère une ligne de transmission de longueur l , connectée à une extrémité à un générateur de tension avec une impédance Z_g et à l'autre extrémité à une impédance de charge Z_l , comme illustré à la (**figure 2.1**).

À basse fréquence, la longueur d'onde λ est supérieure à la longueur de la ligne l . Dans ce cas, l'onde électromagnétique est pratiquement constante tout au long de la ligne,

indépendamment de l'impédance de charge Z_L . Il n'est donc pas nécessaire d'introduire la notion de propagation.

En revanche, à haute fréquence, la longueur d'onde λ devient plus petite que la longueur de la ligne l , ce qui entraîne une variation de l'amplitude de l'onde sur toute la ligne. Dans ce cas, il est nécessaire de prendre en compte le phénomène de propagation. La réflectométrie s'appuie sur ce phénomène pour extraire des informations concernant l'état de la ligne de transmission.



Figure 2. 1: Modèle de ligne de transmission (une longueur l et une impédance Z_c)

II.2.2 Modèle RLCG d'une ligne de transmission

À haute fréquence, une ligne de transmission peut être représentée par le **modèle RLCG**[14], qui consiste à diviser la longueur l de la ligne en plusieurs segments élémentaires consécutifs de longueur dx . Chaque segment est modélisé par un équivalent électrique, comme montré sur la **(figure 2.2)**. Ce modèle se compose des paramètres suivants : la résistance R , l'inductance L , la capacité C et la conductance G , qui sont généralement exprimés en valeurs par unité de longueur.

Les éléments **RLCG** sont désignés comme les **paramètres primaires** d'une ligne de propagation. Ces paramètres sont définis linéairement de la manière suivante :

- **Résistance linéique R** en Ω/m , qui dépend de la résistivité électrique et de la section transversale de la ligne de transmission.
- **Inductance linéique L** en H/m , qui se divise en deux composants :

- Une inductance **interne**, liée au champ magnétique créé à l'intérieur des conducteurs.
- Une inductance **externe**, associée au champ magnétique entre les conducteurs. Elle est également influencée par le diamètre des conducteurs, la distance entre eux, et la perméabilité des matériaux.
- **Capacité linéique C** en **F/m**, qui dépend de la permittivité de l'isolant placé entre les conducteurs.
- **Conductance linéique G** en **Siemens/m**, représentant le courant de fuite entre les conducteurs lorsque l'isolant n'est pas parfait.

La ligne de transmission, qu'elle présente ou non des pertes, est divisée en plusieurs segments élémentaires consécutifs de longueur **dx**. Chaque segment est décrit à l'aide du modèle **RLCG**, comme illustré dans la **figure 2.2**[15] .

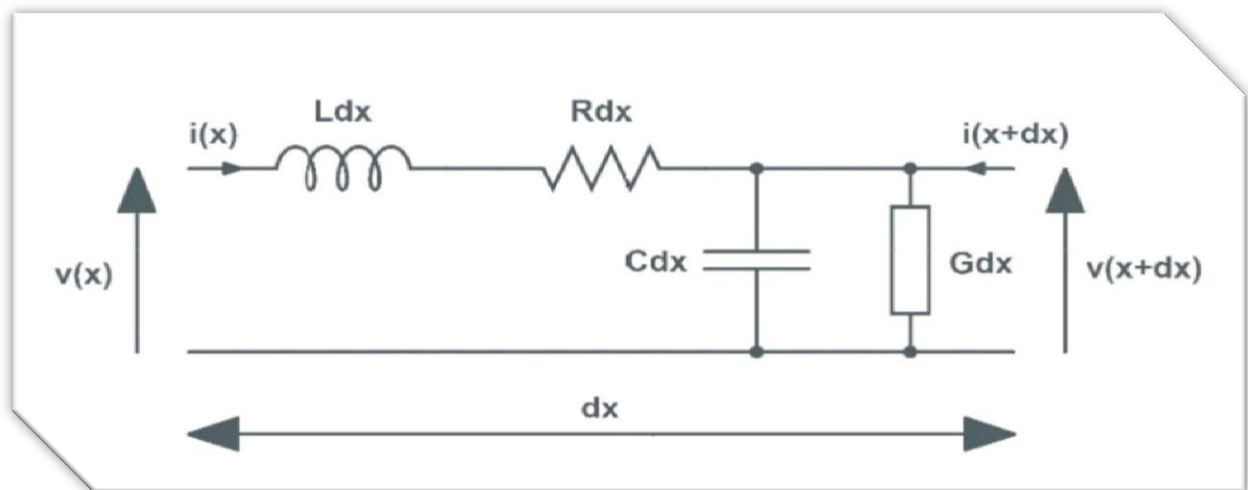


Figure 2. 2 : Schéma équivalent du modèle **RLCG** à un segment de ligne de transmission.

II.3 Principe de réflectométrie

La **réflectométrie** est une technique haute fréquence fréquemment utilisée pour vérifier l'état des câbles. Elle permet de détecter, localiser et caractériser les défauts électriques en utilisant le principe d'un radar, fondé sur la propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu à analyser.

Dans ce processus, un signal impulsionnel est envoyé dans le système ou le câble à tester. Lorsqu'il rencontre un obstacle (comme un défaut, tel qu'un changement d'impédance ΔZ), une partie de l'énergie est renvoyée vers le point d'injection, tandis que l'autre continue à se propager dans le reste du réseau. L'analyse du signal réfléchi permet d'extraire des informations sur l'état du système ou du câble, comme illustré dans la **figure 2.3**.

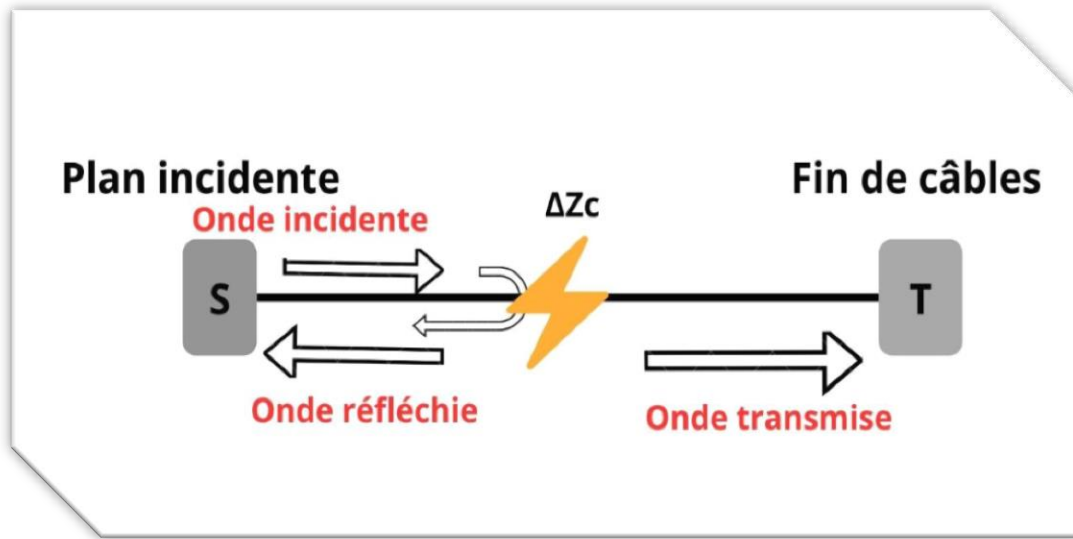


Figure 2. 3:Principe de la réflectométrie

II.4 Equations des lignes en temporel

Rappelons qu'en fréquentiel les équations des lignes, pour une ligne de transmission, s'écrivent comme suit :

$$\frac{\partial[V(x,\omega)]}{\partial x} + [Z][I(x, \omega)] = [0] \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial[I(x,\omega)]}{\partial x} + [Y][V(x, \omega)] = [0] \quad (2.2)$$

$[Z]$: Matrice d'impédance longitudinale ;

$[Y]$: Matrice d'admittance transversale.

Avec :

$$[Z] = [R] + j\omega [L]$$

$$[Y] = [G] + j\omega [C]$$

La modélisation en temporelle sera analogue à celle décrite en fréquentiel, en gardant le même objectif, qui est celui de générer un système d'équations $([A][X] = [B])$.

Dans le cas où l'on néglige la variation des paramètres linéiques en fonction de la fréquence, ce système d'équations devient le suivant :

$$\frac{\partial[v(x,t)]}{\partial x} + [R][v(x,t)] + [L] \frac{\partial[i(x,t)]}{\partial x} = [0] \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial[i(x,t)]}{\partial x} + [G][v(x,t)] + [C] \frac{\partial[v(x,t)]}{\partial x} = [0] \quad (2.4)$$

Où $[v(x,t)]$ et $[i(x,t)]$ sont respectivement la tension et le courant distribués et inconnus le long de la ligne.

Les matrices Résistance linéique $[R]$, Conductance linéique $[G]$, Inductance linéique $[L]$ et Capacité linéique $[C]$ seront définies par la suite. Afin de trouver une relation dans le domaine temporel entre les courants et les tensions aux extrémités de la ligne par une représentation analogue à celle du domaine fréquentiel par la matrice $[O]$, nous procédons à la discrétisation des équations des lignes (2.3) - (2.4) par la méthode numérique dite **FDTD**.

II.4.1 Discrétisation par FDTD des équations des lignes à constantes réparties

II.4.1.1 Echantillonnage spatial

Le schéma de la **figure 2.4** montre l'application de la méthode des **différences finies à points centrés (FDTD)**. Chaque conducteur est divisé alternativement en nœuds de courant et de tension. Deux nœuds consécutifs du même type sont séparés par un intervalle, et les deux extrémités du conducteur sont définies comme des nœuds de tension



Figure 2. 4 Découpage de la branche.

Pour une formulation discrète des équations des lignes, il est nécessaire de définir un **pas temporel** Δt et un **pas spatial** Δx .

II.4.1.2 Echantillonnage spatio-temporel

Comme dans le domaine spatial, le courant et la tension sont décalés d'un demi-pas temporel. Plus précisément, les échantillons de courant sont en retard par rapport à ceux de la tension d'un demi-pas temporel. **La figure 2.5** illustre l'entrelacement des tensions et des courants, à la fois dans l'espace et dans le temps.

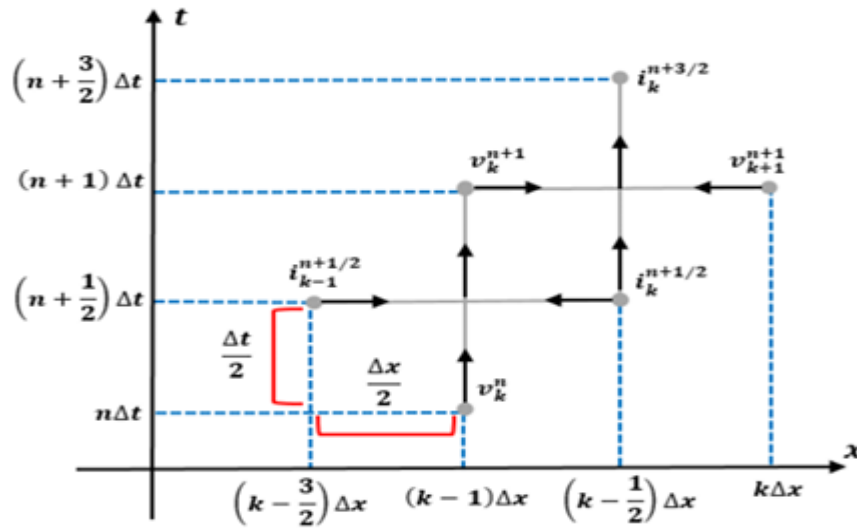


Figure 2. 5: Entrelacement spatial et temporel

La stabilité de la solution est constamment affectée si la condition suivante n'est pas remplie :

$$vp \leq \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.5)$$

vp : Vitesse de propagation de l'onde dans le milieu.

Une démonstration présentée dans [2.1] prouve que si l'on a $vp = \Delta x / \Delta t$, la méthode des différences finies à points centrés donne la solution avec le minimum d'erreur.

Les échantillonnages spatial et temporel définis plus haut conduisent à considérer les grandeurs suivantes :

- La tension sous forme discrète aux nœuds de tension et aux instants $n\Delta t$:

$$[v_k^n] \equiv [v[(k-1)\Delta x, n\Delta t]] \quad (2.6)$$

- Le courant, sous forme discrète aux nœuds de courant et aux instants $n\Delta t$:

$$[i_k^n] \equiv \left[i \left[\left(k - \frac{1}{2} \right) \Delta x, \left(n + \frac{1}{2} \right) \Delta t \right] \right] \quad (2.7)$$

Avec :

$$l \equiv k_{max} \Delta t \quad (2.8)$$

$$t_{max} \equiv n_{max} \Delta t \quad (2.9)$$

En exprimant par FDTD les dérivées spatiales et temporelles, les systèmes d'équations (2.3)

et (2.4) deviennent :

$$\frac{[v_{k+1}^n] - [v_k^n]}{\Delta x} + [L] \frac{[i_k^{n+1/2}] - [i_k^{n-1/2}]}{\Delta t} + [R] \frac{[i_k^{n+1/2}] + [i_k^{n-1/2}]}{2} = [0] \quad (2.10)$$

$$\frac{[i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]}{\Delta x} + [C] \frac{[v_k^n] - [v_k^{n-1}]}{\Delta t} + [G] \frac{[v_k^n] + [v_k^{n-1}]}{2} = [0] \quad (2.11)$$

On peut alors déduire les équations de récurrences suivantes pour une branche :

$$k = 1, \dots, k_{max}$$

$$[i_k^{n+1/2}] = ([L] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [R] \frac{\Delta x}{2})^{-1} \left[([L] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [R] \frac{\Delta x}{2}) [i_k^{n-1/2}] - ([v_{k+1}^n] - [v_k^n]) \right] \quad (2.12)$$

$$k = 2, \dots, k_{max}$$

$$[v_k^n] = ([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [G] \frac{\Delta x}{2})^{-1} \left[([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [G] \frac{\Delta x}{2}) [v_k^{n-1}] - ([i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]) \right] \quad (2.13)$$

En imposant les conditions aux extrémités, les équations de récurrences (2.12) et (2.13) nous permettent de calculer la distribution des courants et des tensions le long de la ligne de transmission.

II.4.2 Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel

Comme nous l'avons vu sur la **figure 2.6**, lors de la discrétisation des équations des lignes par **FDTD**, les nœuds courants et tensions ne coexistent ni dans le temps ni dans

L'espace. Afin de déduire les équations nodales en courant $([i_0^{n+1}], [i_{k_{max}+1}^{n+1}])$ et en tension $([v_0^{n+1}], [v_{k_{max}+1}^{n+1}])$ au même instant, deux nœuds fictifs sont générés ; ces nœuds fictifs

Sont obtenus en remplaçant Δx par $\Delta x/2$ à l'instant $t = n\Delta t$ respectivement pour $k = 1$ et $k = k_{max}+1$ dans (2.6) et notant :

$$[v_1^n] = [v(0)]^n \text{ Et } [i_0^{n-1/2}] = [i(0)]^{n-1/2} \quad \text{Pour } x = 0$$

$$[v_{k_{max}+1}^n] = [v(l)]^n \text{ Et } [i_{k_{max}+1}^{n-1/2}] = [i(l)]^{n-1/2} \quad \text{pour } x = l$$

En considérant la moyenne temporelle suivante :

$$[i(0)]^{n-1/2} = \frac{[i(0)]^n + [i(0)]^{n-1}}{2} \quad (2.14)$$

$$[i(l)]^{n-1/2} = \frac{[i(l)]^n + [i(l)]^{n-1}}{2} \quad (2.15)$$

L'équation nodale en tension pour la première extrémité de la branche ($k = 0$) devient :

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2}\right) ([v(0)]^n) - \frac{[i(0)]^n}{\Delta x} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (2.16)$$

Et pour la deuxième extrémité ($k = l$), nous avons :

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2}\right) ([v(l)]^n) - \frac{[i(l)]^n}{\Delta x} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(l)]^{n-1} - \frac{[i_{k_{max}}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (2.17)$$

A partir des deux équations (2.17) et (2.16), nous pouvons déduire une écriture quadripolaire d'un tronçon de ligne (branche) dans le domaine temporel, qui sera comme suit (2.18) :

$$\begin{bmatrix} \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v^n(0)] \\ [i^n(0)] \\ [v^n(l)] \\ [i^n(l)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

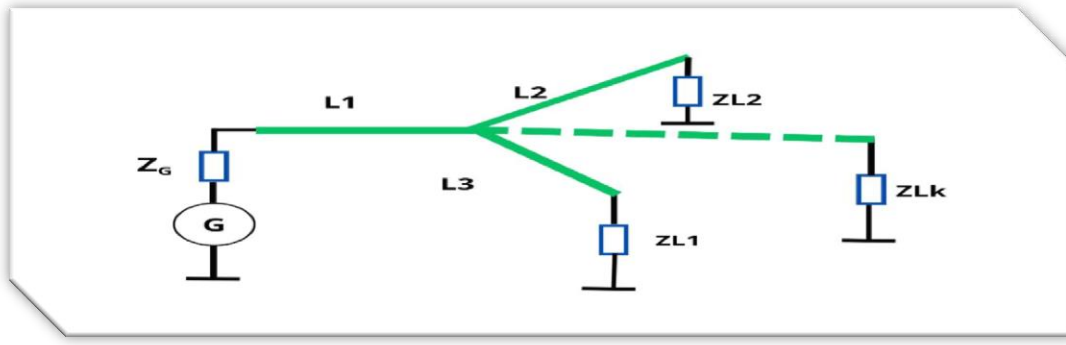


Figure 2.6
Configuration d'un réseau

multi-branches

II.4.3 Construction du système $[A][X] = [B]$

II.4.3.1 Construction de la sous matrice $[A_1]$

Pour chaque ligne (câble) (**figure 2.6**), la contribution de la 1^{ème} ligne dans la sous matrice $[A_1]$ et ainsi définie :

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & [ALi] & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Où :

$[ALi]$: définie pour chaque ligne de transmission par :

II.4.3.2 Construction de la sous matrice $[A_2]$ en temporel

La sous matrice $[A_2]$ est obtenue en utilisant les lois de Kirchhoff en courant et en tension (KCL et KVL) à chaque nœud m du réseau.

$$\sum_{k=1}^N ([Y_k^m][v_k^m] + [Z_k^m]) = [P^m] \quad (2.20)$$

Avec :

$[Z_k^m]$ Et $[Y_k^m]$: sont les matrices résultant de l'application des lois de Kirchhoff (**KVL**, **KCL**) au nœud m et contenant des 0, 1, -1, des impédances et des admittances du réseau en ce nœud.

$[P^m]$: C'est le vecteur contenant les de courant ou de tension

II.4.3.3 Construction du vecteur $[B]$

Ce vecteur est composé de deux sous vecteurs $[B_1]$ et $[B_2]$:

$$[B] = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [B_2] \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Le sou vecteur $[B_1]$ est déduit à partir de l'équation (2.18) pour chaque ligne (câble) du réseau ; il prend en compte le second membre de cette équation. Pour la 1^{ème} ligne à l'instant $n\Delta t$, nous avons sa contribution au sous vecteur $[B_1]$ à l'instant $t = n. \Delta t$ comme suit :

Pour un réseau de lignes :

$$[B_1] = \begin{bmatrix} \vdots \\ [BLi] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$[BLi]$: Est définie pour le cas d'une branche l de nœuds extrémités i et j par :

$$[BLi] = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Le second sous vecteur $[B_2]$ contient les générateurs localisés en chaque nœud.

$$[B_2] = \begin{bmatrix} \vdots \\ [P^m] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

II.4.3.4 Définition du vecteur inconnu $[X]$

Dans le système $[A][X]=[B]$, le vecteur inconnu $[X]$ comprend les courants et les tensions sur l'ensemble des nœuds du réseau. Pour la $i^{\text{ème}}$ ligne à l'instant $n\Delta t$, en reprenant l'équation (2.21) qui donne l'écriture quadripolaire de la ligne,

nous avons sa contribution dans le vecteur $[X]$ qui sera comme suit :

$$[X] = [\dots [XLi] \dots]^T \quad (2.25)$$

Où :

$[XLi]$: Est définie pour chaque ligne de transmission par :

$$[XLi] = [[v_i^n(0)][i_i^n(0)][v_i^n(l)][i_i^n(l)]] \quad (2.26)$$

L'utilisation du formalisme topologique $[A][X]=[B]$ que nous venons de présenter pour la déduction des courants et tensions sur tous les nœuds du réseau électrique à l'instant $t_n = n\Delta t$, nécessite la connaissance de ces mêmes grandeurs électriques à l'instant qui précède ($t_{n-1} = (n-1)\Delta t$).

Pour cet objectif nous utilisons les équations de récurrences obtenues après discrétisation par *FDTD* des équations des lignes.

II.5 Modélisation des défauts dans le réseau électrique

II.5.1 Modélisation des défauts non-franc

Le défaut non franc est représenté par un tronçon de ligne de transmission de longueur similaire au défaut et de paramètres linéiques $[R_{\text{def}}]$, $[G_{\text{def}}]$, $[L_{\text{def}}]$ et $[C_{\text{def}}]$ (**figure 2.7**) :

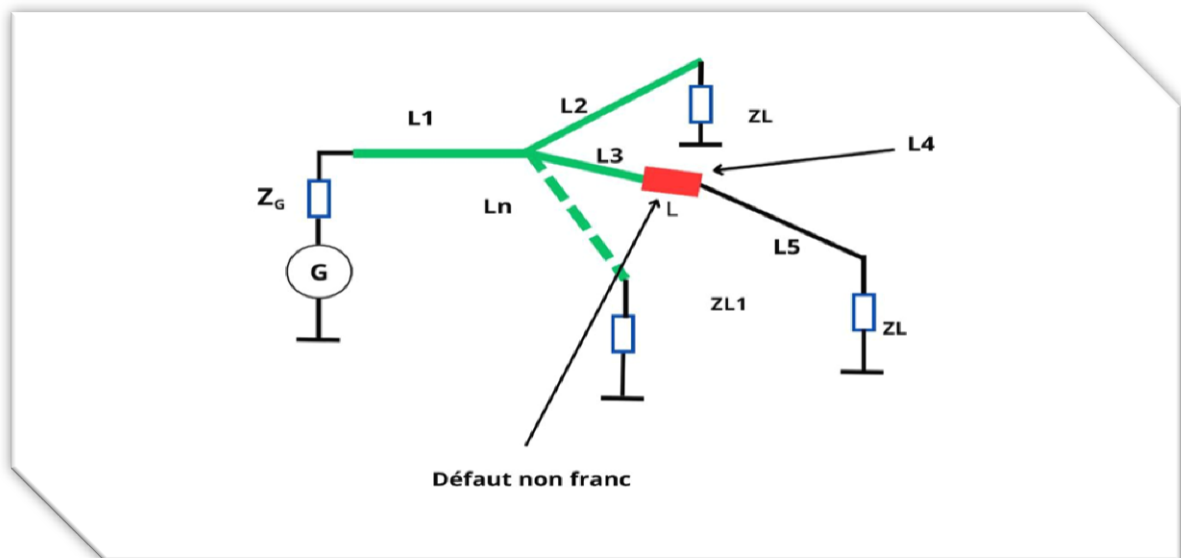


Figure 2. 7 Réseau avec défaut non franc.

Pour chaque ligne , la contribution de la 1^{ème} ligne dans la sous matrice [A1] et ainsi définie :

$$[A1] = \begin{bmatrix} [AL1] & \cdots & [0] & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ [0] & & [ALdef] & \cdots \\ [0] & \cdots & [0] & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Où :

[ALdef] : représente la contribution du tronçon **L4** qui simule un défaut non franc.

$$[ALdef] = \begin{bmatrix} \frac{[C_{def}]}{\Delta t} + \frac{[G_{def}]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C_{def}]}{\Delta t} + \frac{[G_{def}]}{2} & \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix}$$

[B₁] est définie par :

$$[B1] = \begin{bmatrix} [BL1] \\ \vdots \\ [BLdef] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Où :

$$[BLdef] = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C_{def}]}{\Delta t} - \frac{[G_{def}]}{2} \right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C_{def}]}{\Delta t} - \frac{[G_{def}]}{2} \right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Nous Utilisons les équations de récurrence obtenues après la discrétisation par la méthode **FDTD** des équations des lignes pour déterminer la distribution spatiale du courant et de la tension. Dans ce contexte, et pour un défaut non franc, les équations de récurrence sont formulées comme suit :

- $k = 1, \dots, k_{max}$

$$[i_k^{n+1/2}] = \left([L_{def}] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [R_{def}] \frac{\Delta x}{2} \right)^{-1} \left[\left([L_{def}] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [R_{def}] \frac{\Delta x}{2} \right) [i_k^{n-1/2}] - ([v_{k+1}^n] - [v_k^n]) \right] \quad (2.31)$$

$$\bullet \quad k = 2, \dots, k_{max}$$

$$[v_k^n] = \left([C_{def}] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [G_{def}] \frac{\Delta x}{2} \right)^{-1} \left[\left([C_{def}] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [G_{def}] \frac{\Delta x}{2} \right) [v_k^{n-1}] - ([i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]) \right] \quad (2.32)$$

Dans le cadre de notre étude, afin d'élargir l'application du formalisme topologique et du diagnostic des défauts, nous concentrons particulièrement notre attention sur les réseaux embarqués. Ce choix est également justifié par la disponibilité de certains résultats de mesures présentés dans [2.11].

II.5.2 Modélisation des défauts francs

II.5.2.1 Court-circuit

Dans notre travail, un court-circuit est tout simplement une connexion à faible résistance entre les deux conducteurs fournissant l'énergie électrique. Cette situation se produit lorsque $Z_L=0$. La condition est : $V=0$.

II.5.2.2 Circuit-ouvert

Dans le cas d'un circuit ouvert, nous supposons que la charge ($Z_L = \infty$), ce qui conduit à la condition à la limite suivante : ($I=0$).

Dans un réseau adapté, l'adaptation d'impédance est considérée aux extrémités de ce réseau (que ce soit l'impédance d'entrée ou l'impédance de sortie). Dans ce contexte, on a ($Z = Z_c$), représente l'impédance caractéristique du réseau.

II.6 La méthode proposée : Système ANFIS

(Adaptive Neuro-Fuzzy Inférence System - Système d'inférence neuro-flou adaptatif)

Le système ANFIS (système d'inférence neuro-flou adaptatif) est une combinaison de deux techniques principales dans le domaine de l'informatique douce (Soft Computing) : les réseaux de neurones artificiels (RNA) et la logique floue (Fuzzy Logic). La logique floue se distingue par sa capacité à transformer les aspects qualitatifs de la connaissance humaine en processus d'analyse quantitative précis. Cependant, elle manque d'une méthode définie qui peut être suivie pour convertir les pensées humaines en un système d'inférence floue basé sur des règles (FIS - Fuzzy Inference System). De plus, l'ajustement des fonctions d'appartenance

(Membership Functions) nécessite beaucoup de temps.

D'un autre côté, les réseaux de neurones artificiels possèdent une grande capacité d'apprentissage qui leur permet de s'adapter à l'environnement. Par conséquent, ils peuvent être utilisés pour ajuster automatiquement les fonctions d'appartenance, réduisant ainsi les erreurs dans la détermination des règles au sein des systèmes de logique floue[16].

II.6.1 Le réseau Adaptative (Adaptive Network)

Le réseau adaptatif est un exemple de réseau neuronal à propagation directe multicouche (Feedforward Multilayer Neural Network). Dans le processus d'apprentissage, ces réseaux utilisent souvent un algorithme d'apprentissage supervisé. De plus, le réseau adaptatif possède des caractéristiques architecturales composées d'un certain nombre de nœuds adaptatifs interconnectés directement, sans aucune valeur de poids entre eux. Chaque nœud de ce réseau des fonctions et des tâches différentes, et la sortie dépend des signaux entrants ainsi que des paramètres disponibles dans le nœud. Une règle d'apprentissage utilisée peut modifier les paramètres du nœud, ce qui permet de réduire les erreurs en sortie du réseau adaptatif[17].

Dans l'apprentissage du réseau adaptatif, on utilise généralement la rétropropagation (back-propagation) et la règle de chaînage. Tous ces algorithmes d'apprentissage avaient été proposés par Werbos dans les années 1970. Jusqu'à aujourd'hui, la descente de gradient et la rétropropagation restent largement utilisés comme algorithmes d'apprentissage dans un réseau adaptatif, souvent combinés avec la méthode des moindres carrés.

II.6.2 Système d'inférence Flou (FIS)

Un **système d'inférence floue** (ou simplement **système flou**) est un modèle de type Mamdani ou Takagi-Sugeno, utilisé pour la modélisation et la commande de systèmes complexes qui ne peuvent pas être décrits par des méthodes mathématiques classiques.

Un **FIS** (Système d'Inférence Floue) fonctionne en convertissant les entrées numériques (valeurs réelles) en valeurs floues (linguistiques) grâce au processus de fuzzification, qui utilise des fonctions d'appartenance. Ces valeurs floues sont représentées par un degré d'appartenance compris entre 0 et 1[18]."

La base des règles et la base de données sont deux éléments clés dans la prise de décision.

La base de données : d'un système d'inférence flou contient des informations essentielles sur les paramètres des ensembles flous, notamment à travers une fonction d'appartenance définie pour chaque variable linguistique. Le développement de cette base de données commence

généralement par la définition de l'univers de discours propre à chaque variable. Ensuite, il convient de déterminer le nombre de valeurs linguistiques que prendra chaque variable linguistique en fonction du contexte du système étudié. Enfin, il est nécessaire de choisir et de modéliser des fonctions d'appartenance appropriées afin de représenter ces valeurs linguistiques de manière précise et cohérente[19].

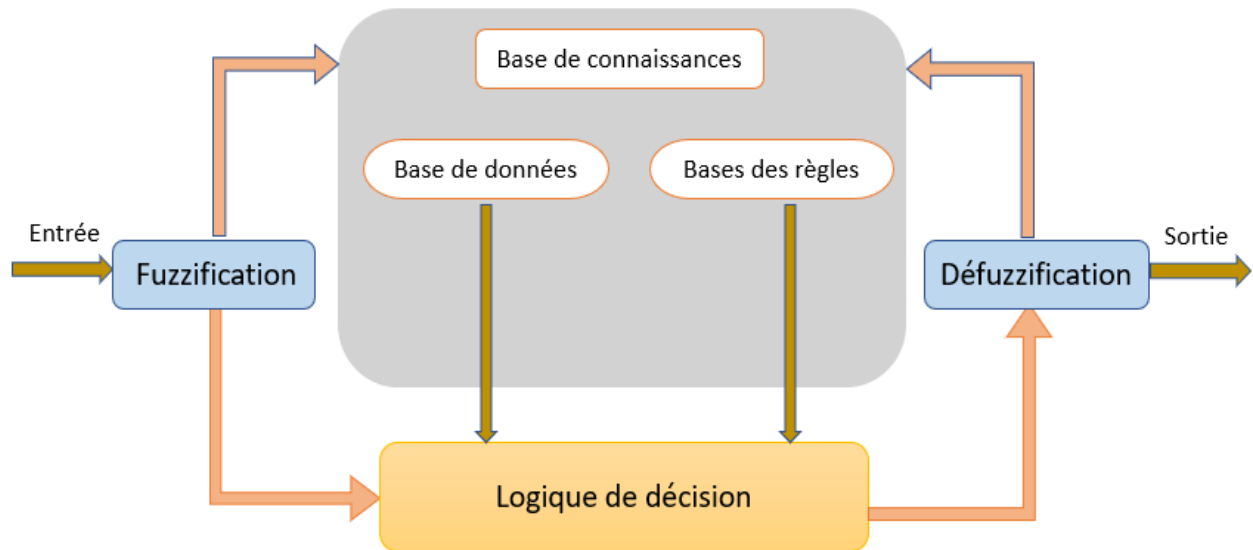


Figure 2. 8 système d'inférence floue (FIS)

La base des règles : utilise des opérateurs de logique floue ainsi qu'une structure conditionnelle de type « If-Then ». Elle peut être élaborée soit de manière manuelle, à partir de l'expertise humaine, soit de façon automatique en se basant sur l'analyse de données numériques d'entrée et de sortie. Il existe plusieurs types de systèmes d'inférence floue (FIS), notamment les modèles Mamdani, Takagi–Sugeno et Tsukamoto.

Parmi eux, le modèle Takagi–Sugeno est particulièrement répandu dans les applications de la méthode ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), en raison de sa capacité à intégrer des techniques d'apprentissage automatique et à gérer efficacement des systèmes complexes.

La défuzzification : est une étape cruciale dans les systèmes d'inférence floue (FIS) qui permet de transformer un ensemble flou de sortie (résultant de l'évaluation des règles) en une valeur numérique précise, utilisable dans des applications concrètes[20].

II.6.3 Architecture de l'ANFIS

L'ANFIS, proposé par Jang[21], est un système d'inférence neuro-flou adaptatif qui repose sur l'utilisation d'un **réseau** de neurones de type perceptron multicouche (**MLP**) composé de **cinq** couches. Chaque couche de ce réseau reflète une étape spécifique du processus d'un système d'inférence flou de type Takagi-Sugeno . À des fins de simplification, on considère un système à deux entrées, x et y , et une seule sortie, f .

La Figure 2.9 illustre l'architecture de l'ANFIS en se basant sur deux règles floues de type “if-then”.

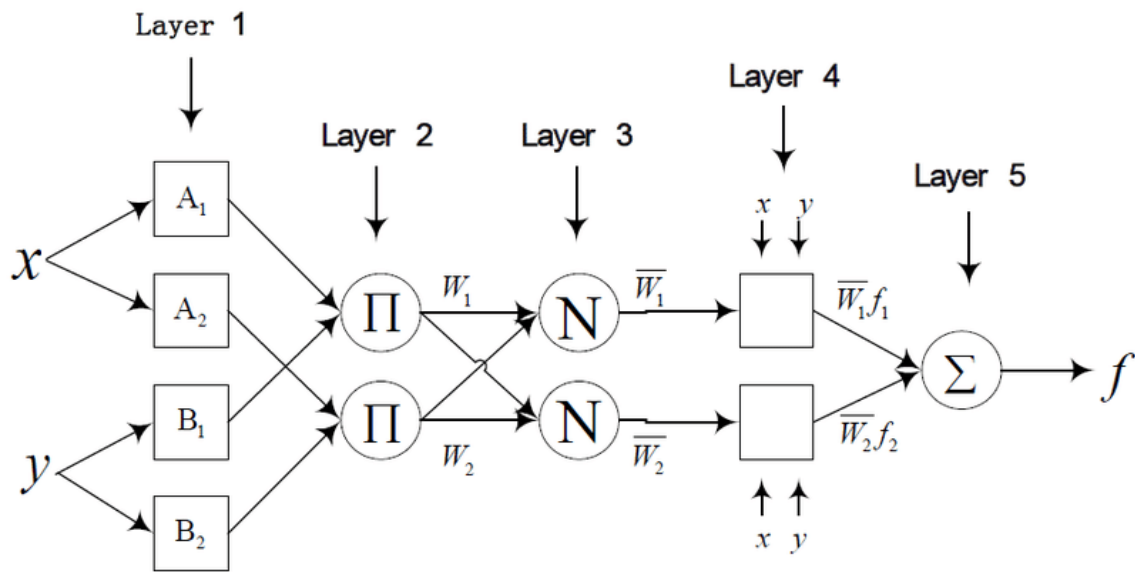


Figure 2. 9 Structure de l'ANFIS avec deux entrées et deux règles

Généralement, l'ANFIS est constitué de cinq couches configurées de manière analogue à n'importe quel réseau de neurones à alimentation directe multicouche. La fonctionnalité de l'ANFIS peut être décrite de la manière suivante :

Première couche :

Cette couche contient un nombre de neurones égal au nombre d'ensembles flous définis dans le système d'inférence. Chaque neurone a pour rôle de calculer le degré d'appartenance d'une entrée à un ensemble flou donné, à l'aide d'une fonction d'activation (ou de transfert). La seule contrainte imposée à cette fonction est qu'elle soit dérivable, ce qui permet l'optimisation des paramètres lors de l'apprentissage.

Dans la littérature, les fonctions gaussiennes sont fréquemment utilisées. Leurs paramètres ajustables sont généralement le centre et la largeur (ou pente) de la courbe.

La fonction d'activation des neurones i de la première couche est :

$$f_i^{-1} = u_{Ai}(x) \quad 2.1$$

Avec x est l'entrée au neurone i , Ai est un sous ensemble flou correspondant au variable x . En d'autres termes, $1 \leq f$ est la fonction d'appartenance du Ai et qui indique le degré auquel la donnée x satisfait le quantifier Ai . Nous choisissons $\mu_{Ai}(x)$ pour être en forme de (Gaussien, triangle, trapézoïdal) avec le maximum égal à 1 et le minimum égal à 0.

Deuxième Couche :

Sert à calculer le degré d'activation des prémisses. Les neurones de cette couche représentent chacun la prémisse d'une règle. Ils reçoivent en entrée le degré de la vérité des différents sous-ensembles flous composant cette prémisse, ensuite le calcul de son propre degré de vérité sera chargé. Les fonctions d'activation utilisées pour ces neurones dépendant des opérateurs présents dans les règles („and“ ou „or“). La fonction d'activation des neurones i de la première couche est :

$$W_i = u_{Ai}(x) \cdot u_{Bi}(y), \quad i = 1, 2 \quad 2.2$$

Où k représente le nombre de règle, i représente le nombre de partition de x , et j le nombre de partition de y .

Troisième Couche :

Cette couche est chargée de normaliser les degrés d'activation des règles.

Chaque neurone de cette couche, représenté par un cercle noté N , réalise cette opération.

Le i -ème neurone calcule le rapport entre le poids de la i -ème règle et la somme des poids de toutes les règles.

Ce processus est connu sous le nom de $i=1,2$ normalisation des poids.

$$W_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad i = 1, 2 \quad 2.3$$

Quatrième Couche :

Chaque nœud de cette couche est un nœud adaptatif à une sortie, avec une fonction de nœud définie comme :

$$f_k^4 = W_k \times f_k = W_k \times (p_k x + q_k y + r_k) \quad 2.4$$

Où W_k est la sortie de la troisième couche, et (p, q, r) est l'ensemble des paramètres. Ces paramètres sont appelés paramètres conséquents.

Cinquième Couche :

Cette couche ne comporte qu'un seul neurone, qui est fixe (non adaptatif).

Son rôle est de calculer la sortie globale en effectuant la somme de tous les signaux entrants provenant de la couche précédente.

Dans cette couche, le nœud circulaire est désigné par l'étiquette suivante :

$$F^5 = \sum_k = W_k \times f_k^4 \quad 2.5$$

L'ANFIS intègre le mécanisme d'apprentissage des réseaux de neurones aux techniques d'inférence floues.

Autrement dit, l'ANFIS est un système d'inférence floue dont les paramètres des fonctions d'appartenance sont ajustés à l'aide de l'algorithme de rétropropagation, ou en combinaison avec d'autres méthodes d'optimisation, telles que l'algorithme des moindres carrés.

Selon la structure de l'ANFIS représentée dans la Figure 2.1, la sortie globale peut être exprimée sous forme de combinaisons linéaires des paramètres conséquents.

Plus précisément, la sortie associée à la Figure 2.1 peut être reformulée ainsi :

$$F = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 \quad 2.$$

Les avantages de cette technique intelligente sont[22].

- Utilisation efficace des connaissances disponibles via la base de règles
- Simplification de la base de règles : des règles générales suffisent, les précisions étant assurées par le réseau neuronal.

- Allègement de la complexité d'apprentissage : le réseau de neurones se concentre uniquement sur l'apprentissage des cas particuliers ou des exceptions, sans devoir traiter l'ensemble du problème.
- Efficacité assurée dès les premières étapes de l'apprentissage, avec la capacité d'éviter les comportements initiaux instables.

II.6.4 Type de l'ANFIS

L'ANFIS (Système d'inférence neuro-flou adaptatif) a été largement utilisée pour modéliser des systèmes complexes et de grande dimension. Toutefois, cette approche présente une limitation majeure liée à l'explosion combinatoire du nombre de règles, de paramètres et de données nécessaires. En effet, plus le nombre de règles augmente, plus le nombre total de paramètres à ajuster dans l'ANFIS croît de manière significative, ce qui complique l'optimisation du système.

Pour répondre à cette problématique, il est essentiel de concevoir un système d'inférence floue (**FIS**) avec un nombre minimal de règles, tout en conservant une bonne capacité de modélisation. Dans ce cadre, les algorithmes de regroupement flou (fuzzy clustering) constituent une famille bien établie de méthodes permettant d'induire automatiquement les règles floues à partir des données.

Ces techniques de regroupement permettent de générer un **FIS** de type Sugeno, qui est particulièrement adapté à la modélisation des comportements complexes tout en réduisant le nombre de règles nécessaires. Le clustering consiste à diviser les données en sous-groupes homogènes, où les éléments d'un même cluster partagent des caractéristiques similaires, tandis que les éléments appartenant à des clusters différents présentent des différences significatives.

Parmi les méthodes les plus utilisées pour la génération automatique de règles, on trouve notamment :

- **Le partitionnement de la grille (Grid Partition)**
- **L'algorithme des C-moyennes floues (Fuzzy C-Means)**
- **Le clustering soustractif (Subtractive Clustering)**

Ces approches permettent de simplifier la structure du modèle ANFIS tout en maintenant une performance satisfaisante dans l'apprentissage et la généralisation des données.

II.6.4.1 Grid Partition (GP)

La méthode Grid Partition (GP) permet de générer des systèmes flous de type Sugeno en divisant l'espace de données en grilles rectangulaires selon des fonctions d'appartenance prédéfinies. Bien qu'efficace et rapide pour des problèmes à faible dimension (moins de 6 variables), elle souffre de la malédiction de la dimensionnalité : le nombre de règles augmente exponentiellement avec les variables, la rendant inadaptée aux systèmes complexes. Pour ces cas, des alternatives comme le clustering flou (FCM) ou les réseaux neuro-flous (ANFIS) sont préférables. GP reste donc une solution optimale pour les applications simples à dimension réduite[23].

II.6.4.2 Subtractive Clustering (SC)

L'algorithme SC considère chaque point de données comme un centre de cluster potentiel. Il sélectionne itérativement les centres en fonction de la densité des points voisins, en éliminant les points situés dans un rayon prédéfini autour de chaque nouveau centre. Quatre paramètres clés contrôlent le processus, dont le plus critique est le *cluster radius* qui influence directement la complexité et la capacité de généralisation du système ANFIS : un petit rayon génère de nombreux clusters (et règles) tandis qu'un grand rayon produit moins de clusters. Cette méthode permet une partition efficace des données complexes multidimensionnelles tout en minimisant le nombre de règles nécessaires dans l'ANFIS, offrant ainsi un bon compromis entre précision et simplicité structurelle[24].

Algorithme de Clustering Soustractif - Procédure simplifiée :

- **Sélection initiale** : Identifier le point de données ayant le potentiel maximal comme premier centre de cluster.
- **Élimination locale** : Exclure tous les points situés dans le rayon prédéfini (*cluster radius*) autour de ce centre.
- **Itération** : Répéter le processus de sélection/élimination pour déterminer les centres suivants.
- **Terminaison** : Arrêter lorsque toutes les données sont assignées à un cluster dans leur rayon respectif.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique $[A][X]=[B]$, utilisé pour traiter les défauts fondamentaux tels que les interruptions et autres anomalies. Ce modèle repose sur les équations des lignes de transmission, les lois de Kirchhoff, ainsi que sur la méthode numérique **FDTD**, ce qui en fait un outil efficace et fiable pour la modélisation et l'analyse du problème direct.

Nous avons également brièvement abordé le système **ANFIS** (Système Inférentiel Neuro-Flou Adaptatif), qui combine les capacités des réseaux de neurones artificiels et des systèmes d'inférence floue. Ce système se distingue par sa capacité à gérer des données imprécises et à apprendre à partir d'expériences passées, améliorant ainsi la précision de la prédiction et de la prise de décision.

Dans la prochaine partie de cette recherche, nous nous concentrerons sur les applications des réseaux de neurones utilisant le système **ANFIS** pour détecter les défauts fondamentaux et localiser leur position avec précision, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes de diagnostic.

CHAPITRE-3

Utilisation du système ANFIS pour le diagnostic des défauts dans les réseaux

CHAPITRE-3

Utilisation du système ANFIS pour le diagnostic des défauts dans les réseaux filaires

III.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le modèle mathématique $[A][X] = [B]$ utilisé pour l'analyse des défauts fondamentaux tels que les coupures et autres anomalies dans les réseaux électriques. Nous avons également abordé la modélisation de la réponse temporelle de ces réseaux en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). En outre, un aperçu du système ANFIS, qui combine les capacités des réseaux de neurones artificiels et des systèmes d'inférence floue, a été présenté afin de traiter efficacement des données complexes et non linéaires.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur les applications pratiques des réseaux de neurones, en utilisant le système ANFIS pour la détection précise des défauts fondamentaux et la localisation de leur emplacement au sein du réseau électrique.

III.2 Types de défauts trouvés dans les réseaux de câblage

III.2.1 Court-circuit

Un court-circuit se produit lorsqu'il y a une connexion à faible résistance entre deux conducteurs d'un circuit électrique, ce qui entraîne une augmentation soudaine du courant. Cette situation est souvent décrite par la condition où l'impédance de la charge (Z_L) est égale à zéro, ce qui signifie que la résistance est nulle. En conséquence, selon la loi d'Ohm, la tension (V) à travers le circuit devient également nulle, car $V=I \times R$ et $R=0$ implique que $V=0$.

III.2.2 Circuit-ouvert

Dans une configuration de circuit ouvert (**voir figure 3.1**), la charge (Z_L) est considérée comme infinie ($(Z_L = \infty)$), ce qui impose une condition aux limites où le courant ($I=0$) est nul à l'extrémité de la ligne.

En revanche, dans le cas d'une adaptation d'impédance aux extrémités du réseau (qu'il s'agisse de l'impédance d'entrée ou de l'impédance de sortie), la relation suivante est vérifiée : ($Z = Z_c$), où (Z_c) désigne l'impédance caractéristique de la ligne de transmission.

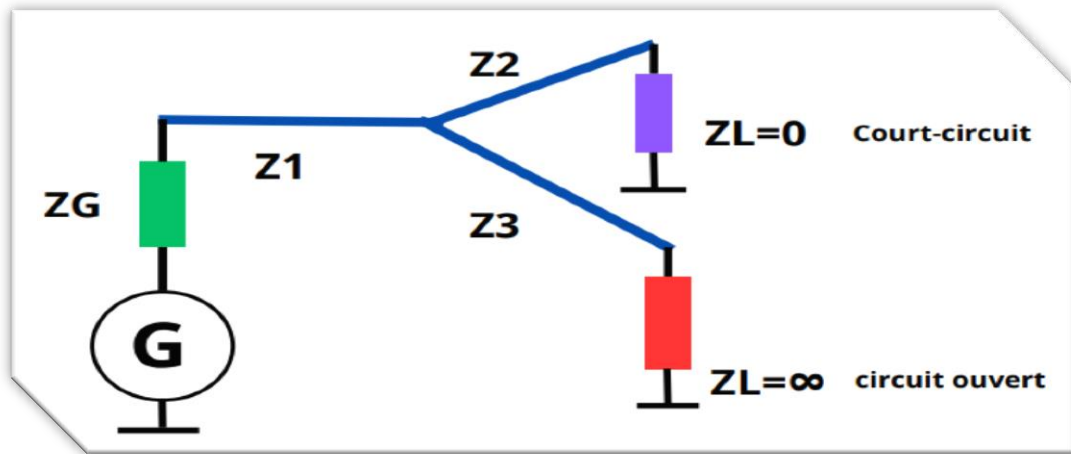


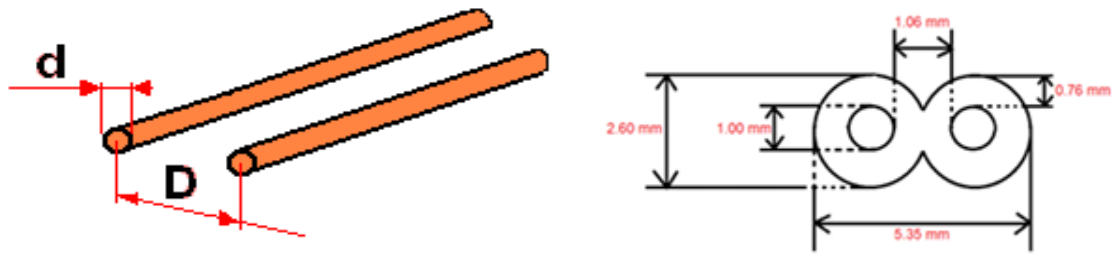
Figure 3. 1 Réseau avec défaut franc.

III.3 Validations du modèle proposée

III.3.1 Cas d'une ligne simple

On considère une ligne de transmission de longueur de **5m** alimenté par un générateur de type gaussien (**voir Figure 3.2 (A)**).

$$e(t) = \begin{cases} 0.5(1 - \cos(2\pi Ft)) & 0 < t < \frac{1}{F} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.33)$$

**Figure 3. 2** Ligne bifilaire

Le câble est composé de deux conducteurs entourés par un isolant en PVC avec une permittivité relative de $\varepsilon_r = 4$ (**Figure 3.2**). Les dimensions du câble sont données dans le Tableau 3.1

Tableau 3.1: Les dimensions du câble

Dimensions du câble	(mm)
Largueur	5,35
Hauteur	2,60
Diamètre (a)	1,00
Épaisseur de l'isolant sur le bord horizontal	1,14
Épaisseur de l'isolant sur le bord vertical	0,76
La distance entre les bords conducteurs intérieurs	1,06
La distance entre les deux centres des conducteurs (d)	2,06

Les paramètres de ligne de transmission de ce câble peuvent être calculés analytiquement [ULAB 99] :

$$L = \frac{\mu}{\pi} \ln \left[\left(\frac{d}{2a} \right) + \sqrt{\left(\frac{d}{2a} \right)^2 - 1} \right] \quad (2.30)$$

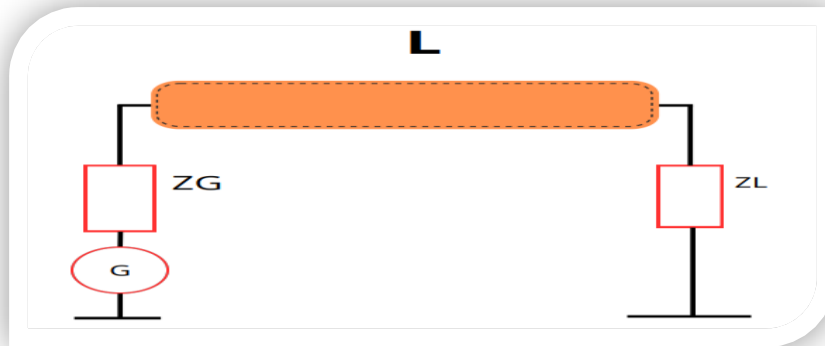
$$C = \frac{\pi \varepsilon}{\ln \left[\left(\frac{d}{2a} \right) + \sqrt{\left(\frac{d}{2a} \right)^2 - 1} \right]} \quad (2.31)$$

Les valeurs de a et d conduisent à : $C = 1.0755 \cdot 10^{-10} F/m$ et $L = 0.67 \mu H/m$ μ est la perméabilité magnétique ($\mu = \mu_0 \mu_r$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$), μ_r la perméabilité relative et ε est la permittivité électrique, ($\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$).

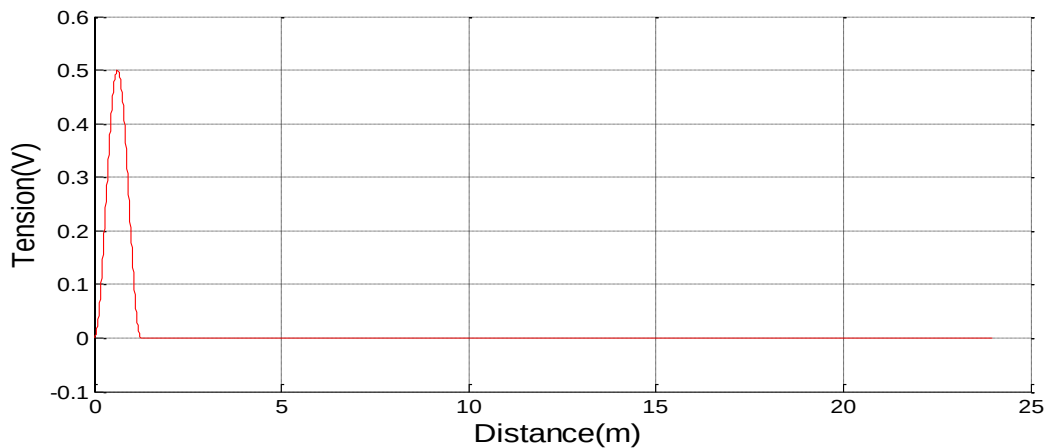
L'impédance caractéristique de la ligne est donc donnée dans le cas sans perte :

$$Z_0 = \frac{\eta_0}{\pi \sqrt{\varepsilon_r}} \cosh^{-1}\left(\frac{d}{a}\right) \quad (2.32)$$

où η_0 est l'impédance caractéristique de l'espace libre (377Ω). La valeur d'impédance calculée par (2.32) est 79,69 ohms.



(A) Ligne bifilaire simple

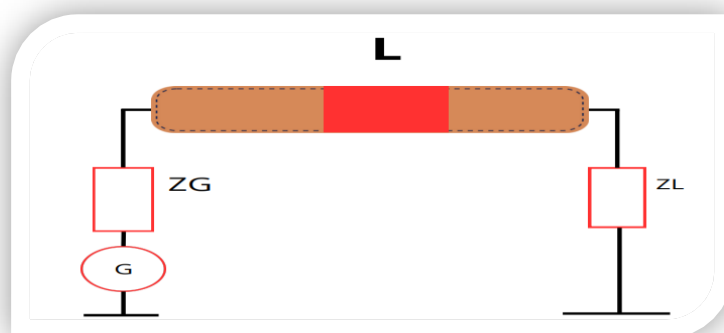


(B) Réfectogramme d'une ligne bifilaire simple

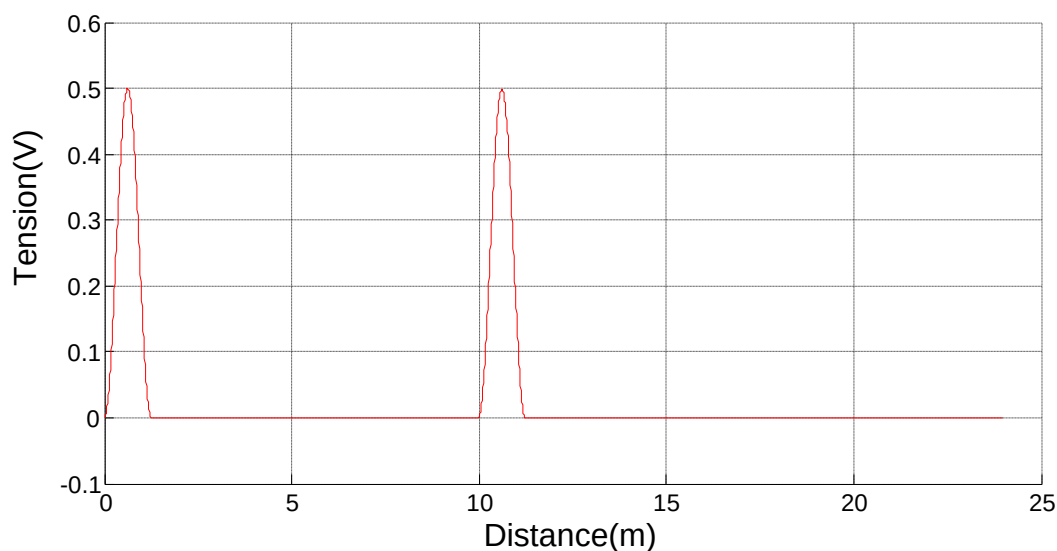
Figure 3. 3:Résultats obtenus pour une ligne bifilaire simple

Une étude paramétrique a été réalisée pour clarifier l'efficacité de la méthode de corrélation soustractive dans l'amplification de l'effet faible des défauts francs dans la réponse de la réflectométrie, lorsque la ligne du câble est affectée par un défaut franc. Dans un premier temps, la configuration de la ligne présentée dans la figure 3.4 est prise en compte. Le défaut franc est situé dans la ligne de transmission à une distance $LF1 = m$, comme indiqué dans la figure 3.4 (a). La taille du défaut franc est notée par : ΔL (où $\Delta L = 2 \text{ cm}$).

Une ligne simple affecté par un défaut franc



(A) Ligne simple avec défaut franc



(B) Réflectogramme d'une ligne simple avec défaut franc

Figure 3.4 Réflectogramme correspondant à un réseau Y bifilaire

III.3.2 Cas d'un réseau Y bifilaire affecté par un défaut franc

Nous considérons une configuration simple d'un réseau en Y (**figure 3.4**). Nous étudions ce dernier dont les dimensions sont les suivantes : $L1 = 2\text{m}$, $L2 = 2\text{m}$, et $L3 = 3\text{m}$. Ces trois tronçons de ligne $L1$, $L2$ et $L3$ formant une jonction J.

Dans le premier cas : nous mettons la deuxième ligne($L2$) en court-circuit ($Z_2 = 0$) et la troisième ligne($L3$) en circuit ouvert ($Z_3 = \infty$).

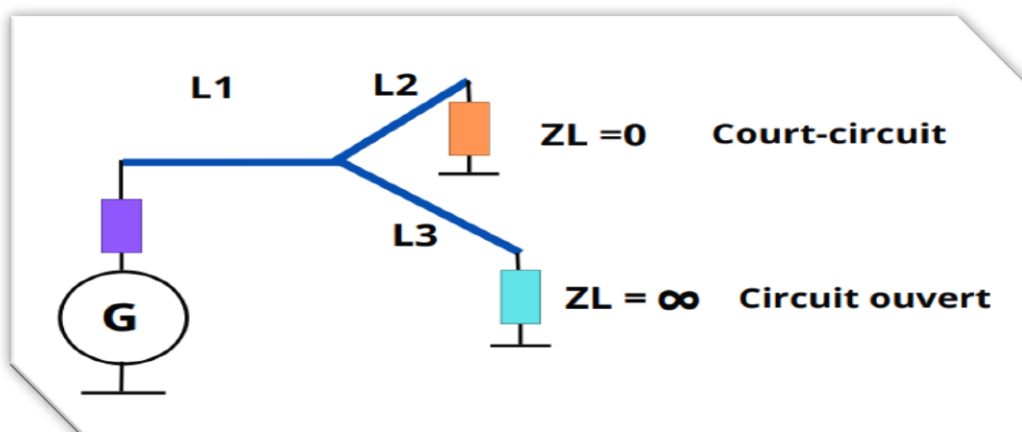


Figure 3. 4 Représentation schématique d'un réseau Y bifilaire

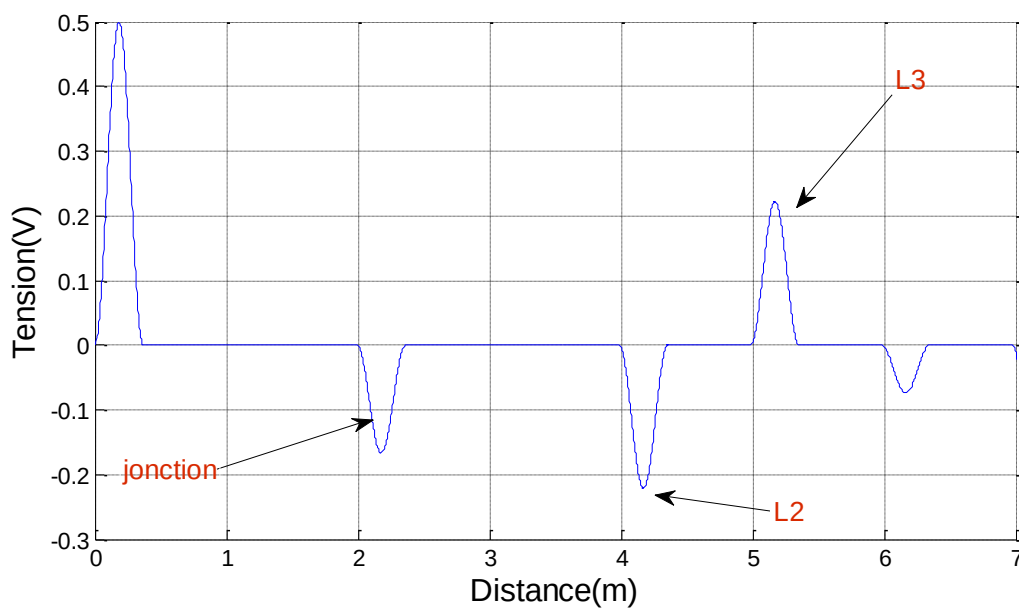


Figure 3. 5 Réflectogramme correspondant à un réseau Y bifilaire

La figure 3.5 présente les résultats obtenus après l'application des calculs en utilisant le formalisme topologique proposé sous la forme $([A][X] = [B])$, appliqué à un réseau bifilaire. L'interprétation des résultats est la suivante :

- La première chute de l'amplitude du signal, observée à une distance de 2 mètres, indique un changement d'impédance au niveau du point de jonction J.
- Le second pic positif, enregistré à 5 mètres, correspond à la terminaison du segment L3. Le signe positif est dû à la nature ouverte de cette extrémité ($Z_L = \infty$).
- Une autre chute d'amplitude est visible à 4 mètres, ce qui correspond à l'extrémité en court-circuit du segment L2.

Dans le deuxième cas : nous mettons la deuxième ligne (L2) en adaptive ($Z_2 = 0$), et la troisième ligne (L3) en circuit ouvert ($Z_3 = \infty$), avec des dimensions $L_1 = 2$ m, $L_2 = 2$ m, et $L_3 = 3$ m.

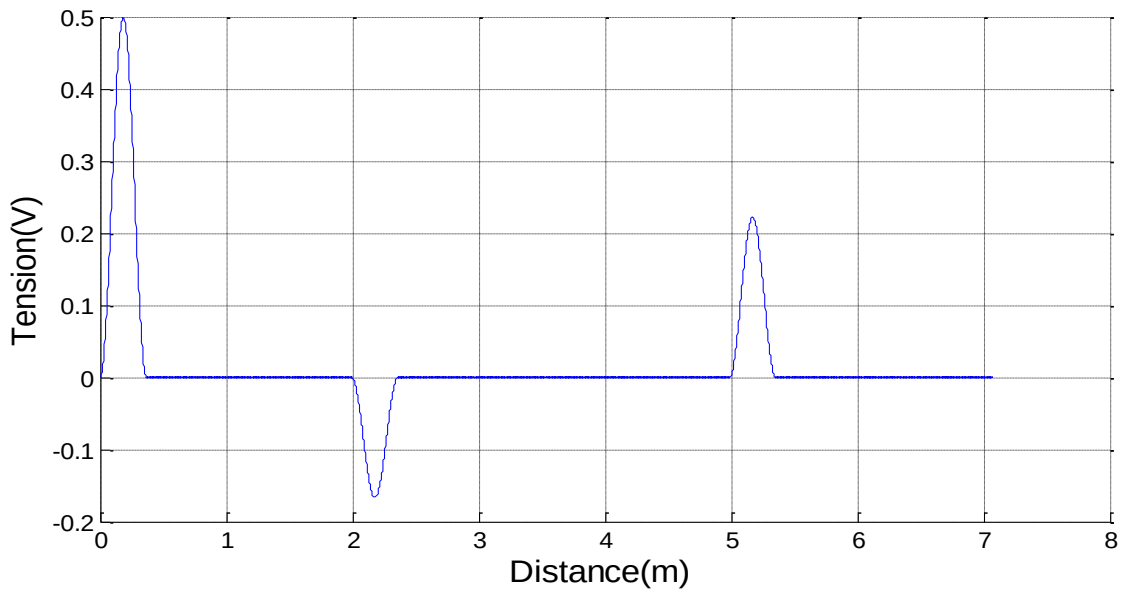


Figure 3. 6 Réflectogramme correspondant à un réseau Y ligne bifilaire.

Dans le troisième cas : nous mettons la deuxième ligne (L2) en court-circuit ($Z_2 = 0$), et la troisième ligne (L3) en adaptive ($Z_3 = \infty$), avec des dimensions $L_1 = 2$ m, $L_2 = 2$ m, et $L_3 = 3$ m.

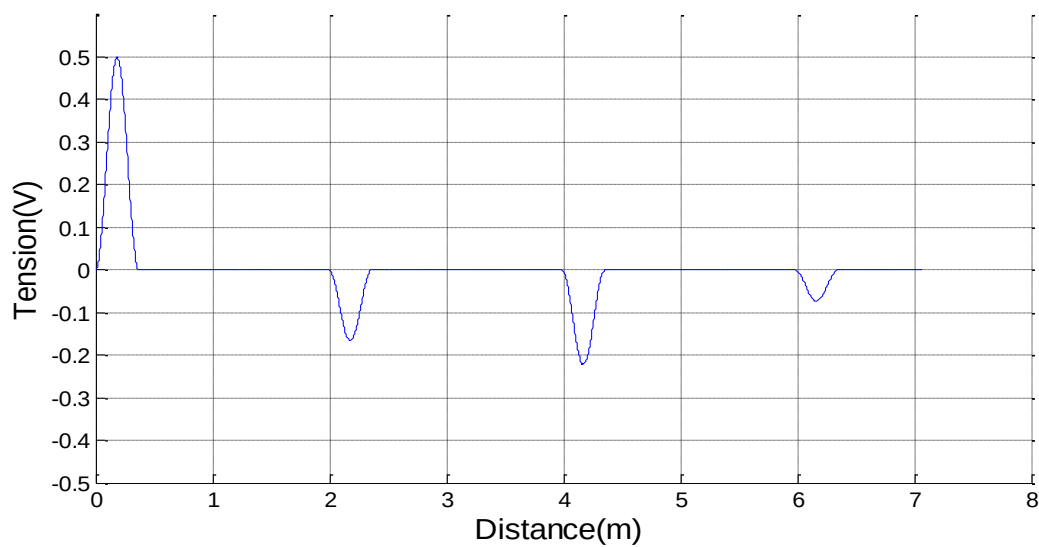
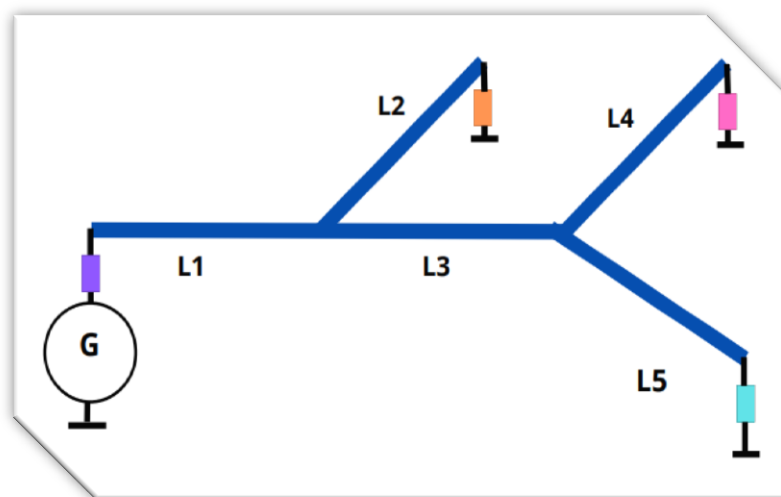


Figure 3. 7 Réflectogramme correspondant à un réseau Y ligne bifilaire..

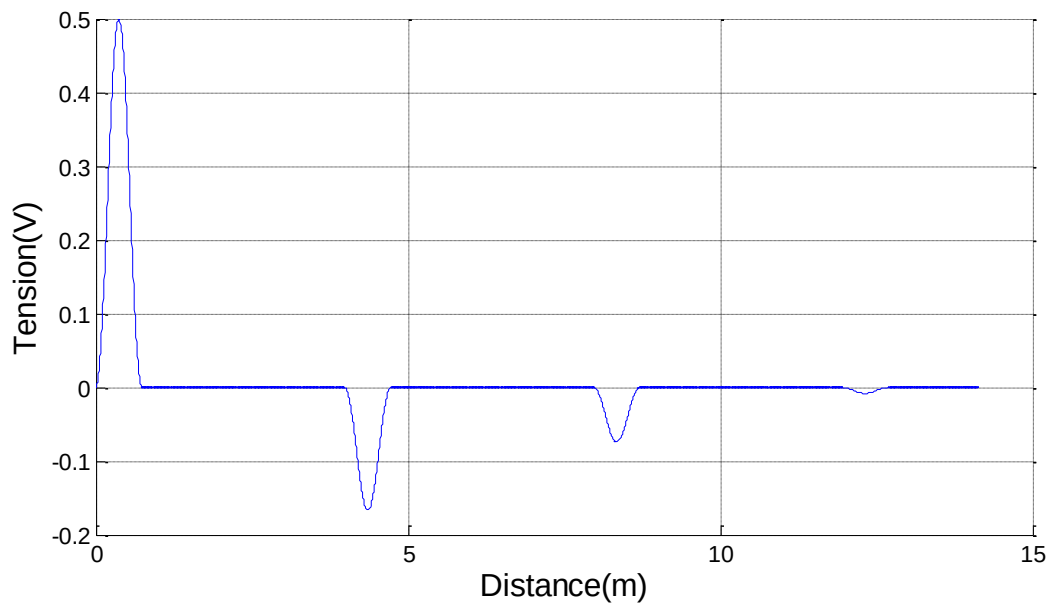
III.3.3 Cas d'un Réseaux en 5 lignes bifilaire

Nous considérons la configuration simple d'un réseau de 5 lignes bifilaires (**figure 3.6**). Nous étudions ce dernier avec les dimensions suivantes : $L1 = 2m$, $L2 = 2m$, et $L3=2m$, $L4= 2m$, $L5=3m$. Ces cinq tronçons de ligne $L1$, $L2$, $L3$, $L4$ et $L5$ formant une jonction J.



(a) : Réseau de 5 lignes sans défaut

- **Dans le premier cas :** nous mettons la réseau de 5 lignes sans défaut



(b) : Réflectogramme d'un réseau de 5 lignes sans défaut

Figure 3. 8 Résultats obtenus pour réseau de 5 lignes sans défaut

Dans ce cas, la deuxième ligne (L2) et la cinquième ligne (L5) sont mises en circuit ouvert ($Z2 = \infty$, $Z5 = \infty$), tandis que la troisième ligne (L3) est en adaptation (adaptation d'impédance), et la quatrième ligne (L4) est en court-circuit ($Z4 = 0$).

Les longueurs des lignes sont les suivantes :

L1 = 2 m, L2 = 2 m, L3 = 2 m, L4 = 2 m et L5 = 3 m.

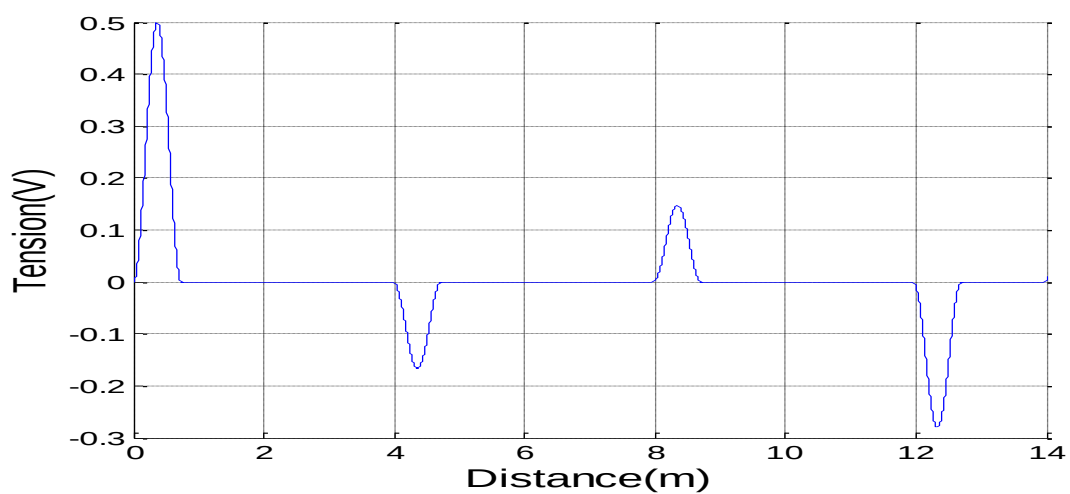


Figure 3. 9 Réflectogramme correspondant à un réseau 5 ligne bifilaire.

Dans ce cas, la deuxième ligne (L2) et la quatrième ligne (L4) sont mises en circuit ouvert ($Z2 = \infty$, $Z4 = \infty$), tandis que la troisième ligne (L3) est en court-circuit ($Z3 = 0$). et la cinquième ligne (L5) est adaptation (adaptation d'impédance).

Les longueurs des lignes sont les suivantes :

$L1 = 2$ m, $L2 = 2$ m, $L3 = 2$ m, $L4 = 2$ m et $L5 = 3$ m.

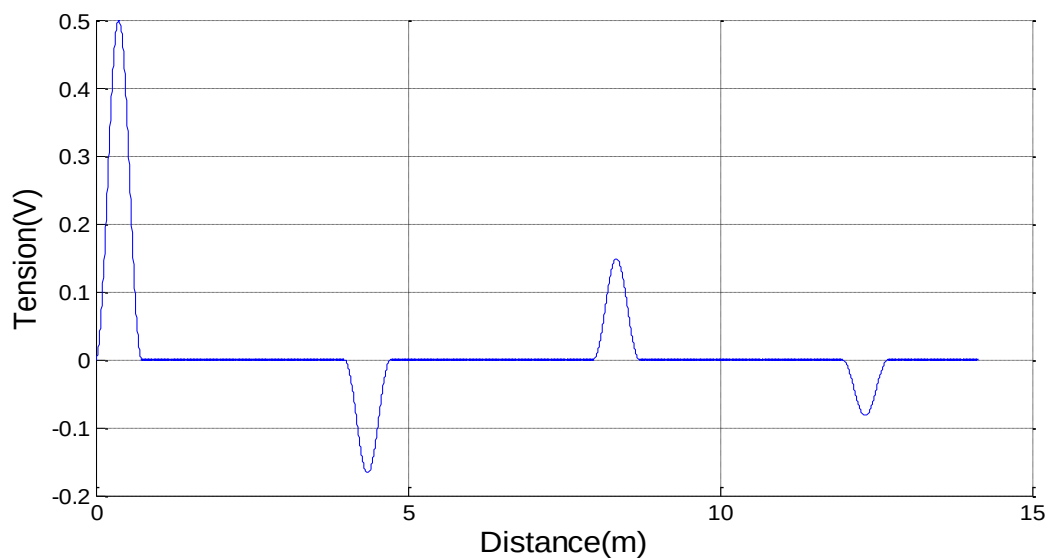


Figure 3. 10 Réflectogramme correspondant à un réseau 5 ligne bifilaire.

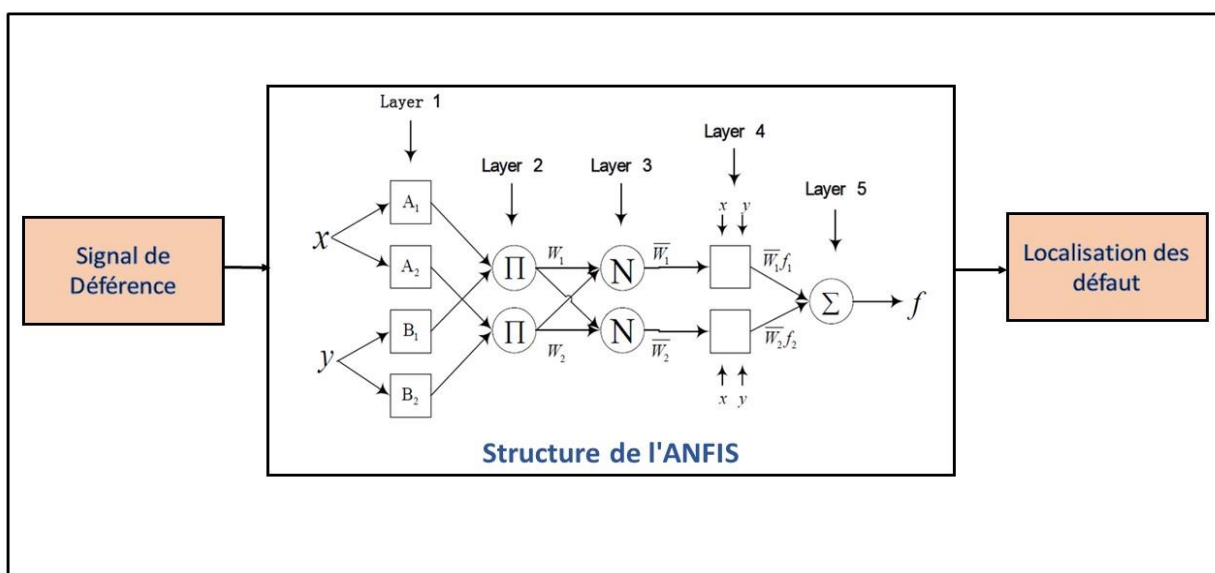


Figure 3. 11 Structure d'un ANFIS artificiel

III.4 Localisation des défauts dans les réseaux bifilaires en utilisant ANFIS

La première étape pour résoudre le problème de localisation des défauts consiste à établir une base d'apprentissage. Cette base comprend des données,

C'est-à-dire des paramètres issus de nos simulations, qui relient les réflectogrammes à la position et à l'impédance du défaut.

Dans un premier temps, nous calculons le signal de différence entre la réponse des réseaux en l'absence et en présence de défauts, afin d'extraire les paramètres caractéristiques. Cela inclut l'amplitude maximale de la tension ainsi que le moment de son apparition.

Le premier groupe de données, qui contient les instants d'apparition (t) de l'amplitude maximale, est utilisé pour localiser le défaut. Le second groupe, qui contient la valeur de cette amplitude maximale, sert à définir la nature des défauts.

III.4.1 Diagnostic d'une ligne bifilaire affecté par un défaut franc

Considérons une ligne simple de longueur 8 mètre, d'impédance caractéristique 80 ohms affectée par des défauts francs (circuit ouvert ou court-circuit) à 5 mètres par rapport à la source. L'extrémité gauche de la ligne est chargée par une source d'impédance $Z_G = 80$ ohms. L'extrémité droite de la ligne est adaptée, **Figure 3.4**.

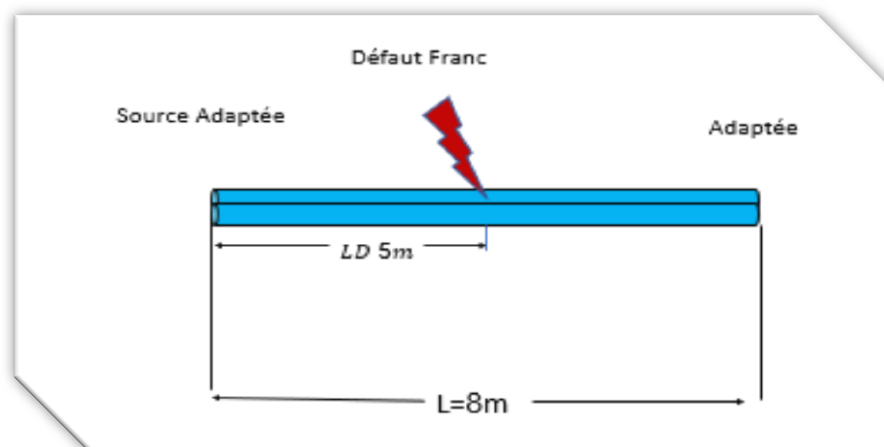


Figure 3. 12 Une ligne simple adaptée (pour câble bifilaire), affectée par un défaut franc

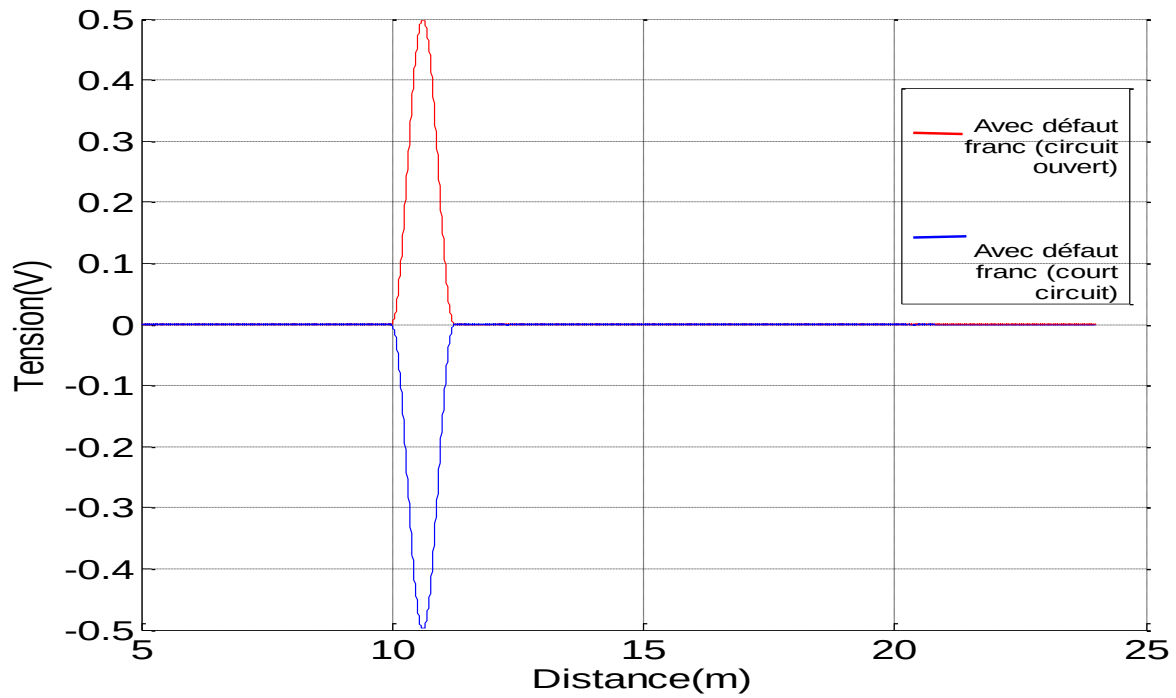


Figure 3. 13 Signal de différence d'une ligne bifilaire affecté par un défaut franc.

La base de données a été générée à partir d'une modélisation directe utilisant la formulation matricielle $[A][X] = [B]$ dans le domaine temporel. La variation systématique des paramètres de défaut (notamment la longueur de la ligne) a permis de constituer un ensemble de **607** configurations distinctes, couvrant ainsi un large éventail de cas possibles.

Le système ANFIS est dimensionné en utilisant la procédure de validation croisée, où l'on sélectionne la configuration donnant l'erreur la plus faible sur la base de test après l'apprentissage.

Cependant, afin de garantir un bon apprentissage du système ANFIS, il est nécessaire d'évaluer sa capacité de généralisation à l'aide d'exemples issus de la base de test.

Les exemples de cette base sont généralement choisis de manière aléatoire avec un nombre relativement élevé (environ 607exemples) afin d'assurer une représentation complète de l'ensemble du domaine d'apprentissage.

Dans cette application, la base d'apprentissage est composée d'environ 607 exemples, tandis que les bases de validation et de test comprennent 501 exemples.

Il est à noter que le temps nécessaire pour la phase d'apprentissage et de validation du système ANFIS, pour un réseau simple, est d'environ 3 minutes, en utilisant un PC équipé d'un processeur Intel(R) Core (TM) i3-4005U et de 4 Go de RAM.

Tableau 3. 2. La taille des bases des données utilisées pour ANFIS cas d'une ligne bifilaire

	ANFIS
La taille de la base d'apprentissage	500
La taille de base de test	106
Erreur (m)	2.423e-04
Le temps de diagnostic (s)	3

simple

Nous confirmons bien l'identification des défauts ; les résultats de l'inversion à l'aide du système ANFIS sont en bon accord avec les valeurs de référence (la position du défaut), comme illustré dans le tableau3.3

Tableau 3.3. Résultats de l'inversion par ANFIS cas d'une ligne bifilaire simple

Valeur de référence(m)	Localisation de défaut (m)
0.6299	0.6301
1.3100	1.3101
4.0540	4.0540
0.5.580	0.5582

III.4.2 Diagnostic d'un réseau bifilaire en Y affecté par un défaut franc par le ANFIS

Afin de valider la robustesse de la méthodologie de diagnostic proposée sur une ligne simple, nous allons l'évaluer dans le cadre d'un réseau électrique bifilaire en configuration (Y),

comportant un défaut non franc. Pour ce faire, nous avons retenu la configuration du réseau complexe.

Dans cette section, la méthode de diagnostic développée sera appliquée à un réseau bifilaire en (Y). Les longueurs des différentes branches sont : $L_1 = 2 \text{ m}$, $L_2 = 2 \text{ m}$ et $L_3 = 3 \text{ m}$. Les charges connectées aux tronçons secondaires (L_2 et L_3) sont également représentées dans la **figure 3.14**.

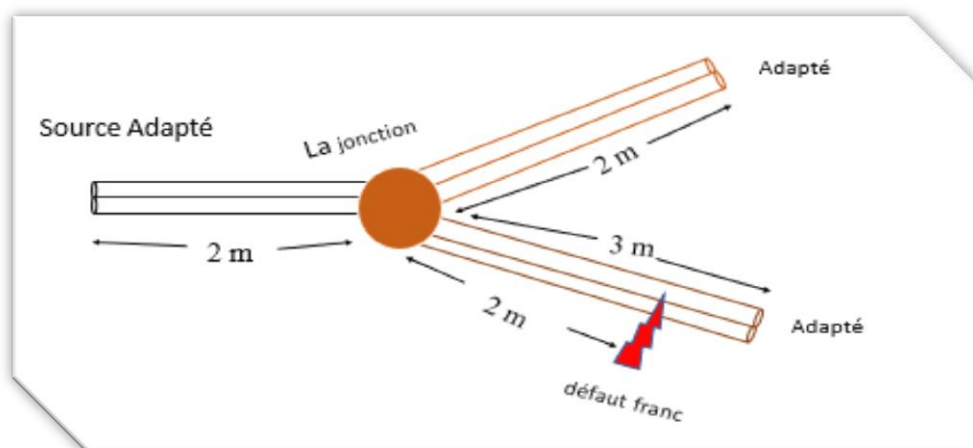


Figure 3. 14 Réseaux Y bifilaire adapté.

Le réseau est affecté par un défaut franc (court-circuit/ circuit ouvert) dans la branche L_3 situé à distance de 2m de la source.

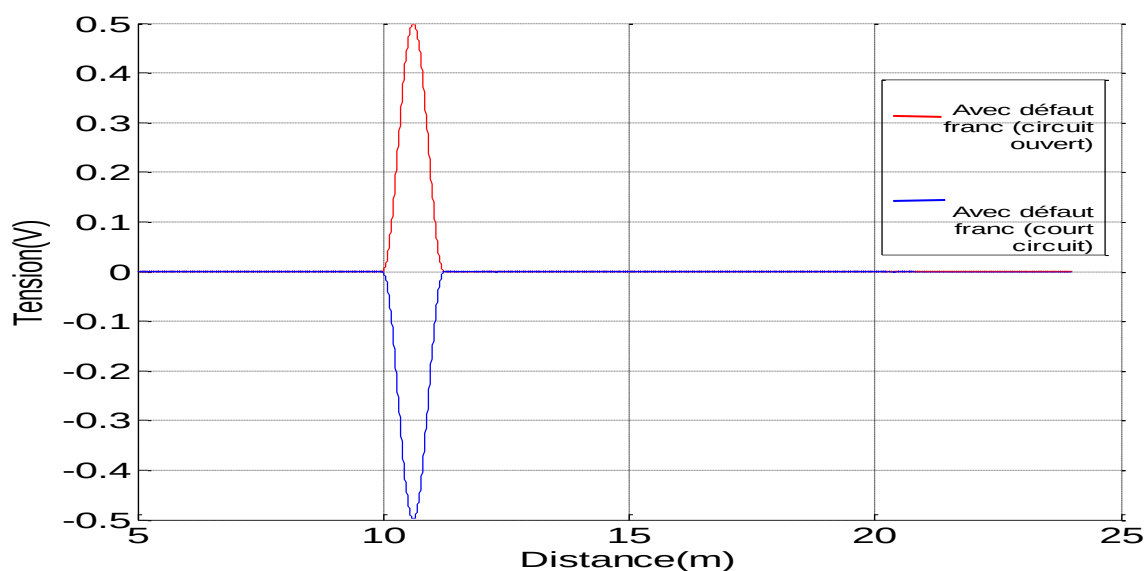


Figure 3. 15 Signal de différence d'une ligne coaxiale affecté par un défaut franc.

Dans cette application, la base d'apprentissage est constituée d'environ 357 exemples, les bases de validation et de test sont constituées de 200 exemples.

On note que le temps nécessaire pour la phase d'apprentissage et validation de ANFIS pour un réseau Y est 4 minutes à l'aide d'un PC équipé du processeur Intel(R) Core (TM) i3-4005U et de 4 Go de RAM.

Tableau 3.4. Résultats de l'inversion par ANFIS cas d'une ligne bifilaire Y

Valeur de référence(m)	Localisation de défaut (m)
0.1900	0.1901
1.3980	1.3979
3.7660	3.7670
0.4940	0.4942

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué une méthodologie de diagnostic sur différentes configurations de réseaux de câblage électrique, en utilisant un seul type de câble. L'étude s'est concentrée sur un seul type de défaut, à savoir le défaut franc. La méthode a été appliquée sur des lignes de transmission affectées par ce type de défaut, et la résolution du problème inverse a été réalisée à l'aide du système ANFIS.

Dans le cas du défaut franc, les résultats du réflectogramme du réseau de câbles ont montré des variations notables à la position du défaut, dont l'amplitude est directement liée à l'impédance de ce dernier. Ainsi, les longueurs des branches du réseau ainsi que les charges associées aux branches secondaires constituent des paramètres essentiels à estimer dans le cadre de la résolution du problème inverse.

Les résultats expérimentaux ont montré que la méthodologie basée sur le système ANFIS permet une localisation précise du défaut. Cela suggère que l'utilisation du système ANFIS peut représenter une solution efficace et prometteuse pour les applications embarquées nécessitant rapidité et précision dans la détection des défauts.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux menés dans cette thèse visent à développer et à proposer des techniques innovantes pour le diagnostic des défauts dans les réseaux filaires complexes, afin de détecter et de localiser ces défauts avec précision. Ces recherches ont abouti à la création de méthodologies avancées pour un diagnostic en temps réel, embarqué et distribué, applicable aussi bien aux réseaux filaires complexes que simples.

Ces techniques s'appuient sur le principe de la réflectométrie pour détecter, localiser et caractériser les défauts dans les réseaux ramifiés, en particulier les défauts francs tels que les courts-circuits ou les interruptions de circuit. Les outils développés répondent aux besoins urgents et aux défis rencontrés par les secteurs industriels dans leurs systèmes électriques, dans le but d'améliorer la fiabilité des systèmes et de réduire considérablement les coûts de maintenance.

Dans le premier chapitre, une revue détaillée a été consacrée aux câbles, à leurs différentes classifications ainsi qu'aux problématiques qui leur sont associées, en mettant l'accent sur les besoins industriels actuels et les méthodes disponibles pour le diagnostic des défauts. Ce chapitre a permis de clarifier les types de câbles et de défauts, qu'ils soient francs ou non francs.

Afin d'éviter les conséquences potentiellement graves des défauts, l'importance d'intégrer une fonction de diagnostic dans les systèmes pour assurer une surveillance continue de l'état a été soulignée. En raison de ses performances et de sa capacité d'adaptation aux réseaux filaires, la technique de réflectométrie dans le domaine temporel a été choisie comme solution efficace pour le diagnostic des défauts.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation de la propagation dans les réseaux filaires. Nous avons analysé les équations relatives à la méthode déjà présentée, puis nous les avons appliquées à deux configurations : une ligne de transmission simple et un réseau de type Y, en considérant le cas d'un câble bifilaire.

Dans un premier temps, cette méthode a été mise en œuvre pour diagnostiquer des réseaux de transmission, aussi bien en configuration simple qu'en configuration Y, soumis à des défauts francs.

Les paramètres à estimer sont l'impédance et la position du défaut. L'inversion se fait en deux étapes : d'abord un apprentissage préalable (« offline ») à partir d'une base de données, qui peut être long selon la complexité du réseau et le nombre d'exemples, puis l'application en temps réel. Cette phase d'apprentissage ne s'effectue qu'une seule fois.

La deuxième étape de l'inversion ne nécessite pas d'itérations successives, car elle est très rapide, ce qui permet d'utiliser le système ANFIS comme estimateur en temps réel. Le système ANFIS montre une bonne précision dans la localisation et la caractérisation des défauts.

***Références
Bibliographiques***

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] R. Algerienne et D. Et, « Détection et localisation des défauts dans les Réseaux électriques filaires par la réflectométrie et les réseaux de neurones », 2022.
- [2] O. Osman, « Méthodes de diagnostic en ligne, embarqué et distribué dans les réseaux filaires complexes », 2020, *Université Clermont Auvergne [2017-2020]*.
- [3] D. Master, « les réseaux à base de câbles coaxiaux par la Remerciements », 2023.
- [4] Q. Zhang, M. Sorine, et M. Admane, « Inverse scattering for soft fault diagnosis in electric transmission lines », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, n° 1, p. 141- 148, 2010.
- [5] C. Furse, Y. C. Chung, C. Lo, et P. Pendayala, « A critical comparison of reflectometry methods for location of wiring faults », *Smart Struct. Syst.*, vol. 2, n° 1, p. 25- 46, 2006.
- [6] « FDR2.pdf ».
- [7] M. R. BOONWISUIT et P. Mahachoklertwattana, « Cable testing using reflectometry technique », Thammasat University. Faculty of Engineering, 2016.
- [8] P. Todoroff, « La réflectométrie temporelle ».
- [9] K. R. Jones, G. I. S. Treviño, W. W. Jones, et R. H. Jonsson, « Adaptive method and apparatus for transmission line analysis », 24 février 2004, *Google Patents*.
- [10] P. Smith, C. Furse, et J. Gunther, « Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location », *IEEE Sens. J.*, vol. 5, n° 6, p. 1469- 1478, 2005.
- [11] A. Lelong, « Méthodes de diagnostic filaire embarqué pour des réseaux complexes », 2010, *Lille 1*.
- [12] N. Ravot, « Analyse et diagnostic de réseaux filaires complexes par réflectométrie », 2007, *Paris 11*.
- [13] F. Auzanneau, « Wire troubleshooting and diagnosis: Review and perspectives », *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 49, p. 253- 279, 2013.
- [14] C. R. Paul, *Analysis of multiconductor transmission lines*. John Wiley & Sons, 2007.
- [15] N. Taki, « Diagnosis of Soft Faults in Complex Wired Networks », 2022, *Université Paris-Saclay*.

- [16] L. H. Tsoukalas et R. E. Uhrig, *Fuzzy and neural approaches in engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [17] L. Bodri et V. Čermák, « Prediction of extreme precipitation using a neural network: application to summer flood occurrence in Moravia », *Adv. Eng. Softw.*, vol. 31, n° 5, p. 311- 321, 2000.
- [18] J. Vieira, F. M. Dias, et A. Mota, « Neuro-fuzzy systems: a survey », in *5th WSEAS NNA international conference on neural networks and applications, Udine, Italia*, 2004, p. 1- 6.
- [19] B. Bouchon-Meunier et C. Marsala, *Logique floue: principes, aide à la décision*. Hermes-Lavoisier, 2003.
- [20] J. A. Goguen, « LA Zadeh. Fuzzy sets. Information and control, vol. 8 (1965), pp. 338–353.-LA Zadeh. Similarity relations and fuzzy orderings. Information sciences, vol. 3 (1971), pp. 177–200. », *J. Symb. Log.*, vol. 38, n° 4, p. 656- 657, 1973.
- [21] J.-S. Jang, « ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system », *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 23, n° 3, p. 665- 685, 1993.
- [22] M. J. Reddy et D. K. Mohanta, « Adaptive-neuro-fuzzy inference system approach for transmission line fault classification and location incorporating effects of power swings », *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 2, n° 2, p. 235- 244, 2008.
- [23] J. C. Bezdek, *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [24] S. L. Chiu, « Fuzzy model identification based on cluster estimation », *J. Intell. fuzzy Syst.*, vol. 2, n° 3, p. 267- 278, 1994.

ملخص:

تشكل جودة شبكة الكابلات عاملاً أساسياً لضمان كفاءة شبكة نقل البيانات ونقل الطاقة. ومن أجل الحفاظ على هذه الجودة، من الضروري الكشف عن الأعطال وتحديد مواقعها بدقة، سواء كانت أعطالاً واضحة مثل القصر الكهربائي والدوائر المفتوحة، أو أعطالاً غير واضحة ناتجة عن عوامل مثل تقادم الكابلات أو تدهور الغلاف العازل تهدف هذه المذكرة إلى تطوير منهجية فعّالة لتشخيص الأعطال في الشبكات السلكية، لا سيما الكابلات الثنائية، وذلك بالاعتماد على تقنية الانعكاس الزمني ونظام ANFIS تركز الدراسة على معالجة المشكلات العكسية بهدف تحديد مواقع الأعطال بدقة، وخصوصاً تلك التي يصعب اكتشافها باستخدام الطرق التقليدية .

وقد أظهرت النتائج فعالية الأساليب المقترحة في تحسين أداء أنظمة التشخيص، والمساهمة في تعزيز موثوقية وأمان الشبكات الكهربائية

الكلمات المفتاحية :

الشبكات الكهربائية، نطاق الوقت المنعكس ، ANFIS

Résumé :

La qualité du réseau de câbles constitue un facteur essentiel pour garantir l'efficacité d'un réseau de transport de l'énergie . Pour préserver cette qualité, il est indispensable de détecter les défauts et d'en localiser précisément les emplacements, qu'il s'agisse de défauts francs tels que les courts-circuits et les circuits ouverts, ou de défauts non francs résultant de facteurs tels que le vieillissement ou la dégradation de la gaine isolante des câbles.

Ce mémoire a pour objectif de développer une méthodologie efficace pour le diagnostic des défauts dans les réseaux filaires, notamment les câbles bifilaires, en s'appuyant sur la technique de réflectométrie temporelle et le système ANFIS. L'étude se concentre sur la résolution des problèmes inverses afin de localiser avec précision les défauts, en particulier ceux difficiles à détecter par les méthodes traditionnelles.

Les résultats ont montré l'efficacité des approches proposées pour améliorer la performance des systèmes de diagnostic et contribuer à renforcer la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques.

Mots-clés : Réseaux électriques, réflectométrie dans le domaine temporel, ANFIS

Abstract:

The quality of the cable network is a key factor in ensuring the efficiency of electrical network . To maintain this quality, it is essential to detect faults and accurately locate their positions, whether they are apparent faults such as short circuits and breaks, or hidden faults caused by factors like aging or deterioration of the cable's insulating sheath.

This thesis aims to develop an effective methodology for fault diagnosis in wired networks, particularly in twisted pair cables, based on time-domain reflectometry and the **ANFIS** system. The study focuses on solving inverse problems to precisely locate faults, especially those that are difficult to detect using traditional methods.

The results demonstrated the effectiveness of the proposed methods in improving the performance of diagnostic systems and contributing to enhancing the reliability and safety of electrical networks.

Key_words: Electrical network, time domain reflectometry , ANFIS