

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

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N°



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : INSTRUMENTATION

Mémoire présenté pour l'obtention
du Diplôme de Master Académique

Par :

AZAZ Ayat Errahmen
BENDJEDDOU Omayma

Intitulé

**Détection et localisation des défauts non francs dans
les réseaux à base de câbles coaxiaux par la
réflectométrie et la corrélation soustractive**

Soutenu devant le jury composé de :

LADJAL Mohamed	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Président
LAIB Abderrzak	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Encadreur
KHENNOUF Salah	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Co-Encadreur
DJERIOUI Mohamed	Université Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022 / 2023

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui nous voudrions témoigner toute notre gratitude.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de Dr. Salah KHENNOUF et Dr. LAIB Abderrzak, que nous remercions pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience, leur rigueur et leur disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier le chef du département de l'électronique à l'Université de M'sila : Dr TABBAKH Mostefa pour son soutien inestimable.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et de répondre à nos questions durant nos recherches.

Dédicace

À l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père...

À la femme qui souffrit sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère...

À mes chères sœurs, pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral...

À mes chers frères pour leur appui et leurs encouragements

À mon binôme (Omayma)

Mon amie intime (Marwa)

À mes meilleurs amies : Aroua, Houda, Fati, Manar, Sara, Soaa et Razika...

À tout ma famille...

Azaz Ayat Errahmen

Dédicace

Je dédie ce mémoire à

Mes chers parents Ma mère et Mon père...

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs
encouragements...*

Mes chères sœurs, leurs maris et leurs enfants...

Mon cher frère et sa femme...

Ma grand-mère et mon grand-père...

A tout ma famille source d'espoir et de motivation..

A mon chère binôme 'Aya'

*A mes amies 'Salim, Arcua, Houda, Fati, Douaa,
Manar, Sarah, Dalila, Imene, Bassma'*

A tous ceux qui ont confiance en nous...

Bendjeddou Omayma

Liste des abréviations

- CDR : Chaos Domain Reflectometry
- FDR : Frequency Domain Reflectometry
- FDTD : Finite Difference Time Domain
- FMCW : Frequency Modulated Continuous Wave
- FTP : Foiled Twisted Pair
- KVL : Kirchhoff Voltage Law
- KCL : Kirchhoff Current Law
- LAN : Local Area Network
- MAU : Multi-Access Unit
- MCTDR : Multi-Carrier Time Domain Reflectometry
- NDR : Noise Domain Reflectometry
- OMTDR : Orthogonal Multi-Tone Time Domain Reflectometry
- PAN : Personal Area Network
- PDFDR : Phase Detection Frequency Domain Reflectometry
- RLCG : Resistance, Inductance, Capacity, Conductance
- SCM : Subtractive correlation method
- SSTDTR : Spread Spectrum Time Domain Reflectometry
- STDTR : Sequence Time Domain Reflectometry
- STP : Shielded Twisted Pair
- SWR : Standing Wave Reflectometry
- TDR : Time Domain Reflectometry
- TFDR : Time Frequency Domain Reflectometry
- UTP : Unshielded Twisted Pair
- WAN : Wide Area Network

Tables des figures

N° figure	Titre	Page
Figure 1.1 :	Réseau en étoile	3
Figure 1.2 :	Réseau en bus	4
Figure 1.3 :	Réseau en anneau	4
Figure 1.4 :	Réseau en arbre	5
Figure 1.5 :	Réseau PAN	6
Figure 1.6 :	Réseau LAN	6
Figure 1.7 :	Réseau WAN	7
Figure 1.8 :	Différents types de paires torsadées	9
Figure 1.9 :	Cable a fibre optique	10
Figure 1.10 :	Cable coaxial	10
Figure 1.11 :	Les câbles dans un réseau de distribution d'énergie	11
Figure 1.12 :	Installations de Km de câbles spéciaux à bord d'un airbus	12
Figure 1.13 :	Longueurs cumulées de câbles dans le transport	13
Figure 1.14 :	Les défauts francs (court-circuit et circuit ouvert)	14
Figure 1.15 :	Vieillissement du câble coaxial	15
Figure 2.1 :	Modèle d'une ligne de transmission (avec une longueur l et une impédance Z_c)	19
Figure 2.2 :	Schéma équivalent du modèle RLCG à un segment de ligne de transmission.	20
Figure 2.3 :	Principe de la réflectométrie.	21
Figure 2.4 :	Types de signaux : échelons, fonctions portes, impulsions gaussiennes.	22
Figure 2.5 :	Exemple d'un signal "Chirp" linéaire en fréquence pour application FDR.	23
Figure 2.6 :	Signaux d'injection pour les deux méthodes STDR et SSTDR	25
Figure 2.7 :	Découpage de la branche.	27
Figure 2.8 :	Entrelacement spatial et temporel.	28
Figure 2.9 :	Configuration d'un réseau multibranches.	32
Figure 2.10 :	Réseau avec défaut non franc.	33
Figure 2.11 :	Réseau avec défaut franc.	35
Figure 2.12 :	Procédure de calcul de la corrélation soustractive.	37
Figure 3.1 :	Section transversale du câble utilisé.	47

Figure 3.2 :	Réseau Y sans défaut.	47
Figure 3.3 :	Validation des résultats obtenus par les résultats publiés	49
Figure 3.4 :	Réfectogramme correspondant au réseau Y avec défaut franc (C-C)	50
Figure 3.5 :	Réfectogramme correspondant au réseau Y avec défaut franc (C-O)	51
Figure 3.6 :	Résultats obtenus pour une ligne simple	52
Figure 3.7 :	Résultats obtenus pour ligne simple avec défaut non franc	53
Figure 3.8 :	Résultats de corrélation obtenus pour ligne simple avec défaut non-franc	54
Figure 3.9 :	Résultats obtenus de corrélation (avec variation d'impédance) pour ligne simple avec défaut non-franc	55
Figure 3.10 :	Résultats obtenus pour réseau Y sans défaut	57
Figure 3.11 :	Résultat obtenu pour réseau Y avec défaut non-franc	58
Figure 3.12 :	Résultat obtenu pour réseau Y avec défaut non franc	59
Figure 3.13 :	Résultats de corrélation (avec variation d'impédance) obtenu pour réseau Y avec défaut non franc	60

Liste des tableaux

Table 3.1 :	Fiche technique de câble coaxial RG58 C/U	46
Table 3.2 :	L'efficacité de la méthode SCM dans l'amplification de l'amplitude de défaut non franc (ligne de transmission simple)	56
Table 3.3 :	L'efficacité de la méthode SCM dans l'amplification de l'amplitude de défaut non franc (réseau Y)	60

Sommaire

Remerciement.....	1
Dédicace.....	1
Liste des abréviations	1
Liste des figures	1
Liste des tableaux.....	1
 INTRODUCTION GENERALE	 2
CHAPITRE-1 : GENERALITES SUR LA TOPOLOGIE ET LES TYPES CONNEXIONS DES RESEAUX FILAIRES	
1.1 Introduction	6
1.2 Réseaux filaires ; cas de réseau informatique.....	6
1.2.1 Topologie des réseaux filaires.....	7
1.2.1.1 Réseau en étoile.....	7
1.2.1.2 Réseau en bus.....	7
1.2.1.3 Réseau en anneau.....	8
1.2.1.4 Réseau en Arber.....	9
1.2.2 Types de connexions des réseaux filaires.....	9
1.2.2.1 Connexion d'un réseau domestique.....	9
1.2.2.2 Connexion d'un réseau local	10
1.2.2.3 Connexion d'un réseau à large surface.....	11
1.3 Type de câbles	11
1.3.1 Paire torsadée	12
1.3.2 Fibre optique	13
1.3.3 Les Câbles coaxiaux	14
1.4 Domaines d'applications des câbles	15
1.4.1 La distribution de l'énergie	15
1.4.2 L'aéronautique.....	16

1.4.3 L'automobile.....	16
1.4.4 Les télécommunications.....	17
1.5 Catégorisation des défauts dans les câbles.....	18
1.5.1 Défauts francs.....	18
1.5.2 Défauts non francs.....	18
1.5.2.1 Vieillessement	19
1.5.2.2 Dégradation de la gaine.....	19
1.5.2.3 Pénétration d'humidité dans l'isolation.....	20
1.5.2.4 Surcharge électrique.....	20
1.6 Méthodes utilisées pour la détection et la localisation des défauts.....	20
1.6.1 Les méthodes non basées sur la réflectométrie.....	20
1.6.1.1 Inspection visuelle.....	20
1.6.1.2 Méthode par rayons X.....	20
1.6.1.3 Méthodes capacitive et inductive.....	21
1.7 Les méthodes basées sur la réflectométrie.....	21
1.8 Conclusion.....	21

CHAPITRE-2 : METHODES PROPOSEES POUR LA DETECTION ET LA LOCALISATION DES DEFAUTS

2.1 Introduction	23
2.2 Notion de réflectométrie et modèle RLCG d'une ligne de transmission.....	24
2.2.1 Notion de réflectométrie.....	24
2.2.2 Modèle RLCG d'une ligne de transmission.....	24
2.3 Principe de réflectométrie.....	26
2.4 Différents Type de réflectométrie.....	27
2.4.1 Réflectométrie fréquentielle.....	28
2.4.2 Réflectométrie temporelle.....	29
2.5 Modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique.....	31
2.5.1 Équations des lignes en temporel.....	31
2.5.2 Discrétisation par FDTD des équations des lignes à constant réparties...	32
2.5.2.1 Echantillonnage spatial.....	32
2.5.2.2 Echantillonnage spatio-temporel.....	33

2.5.3 Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel.....	35
2.5.4 Construction du système $[A][X] = [B]$	36
2.5.4.1 Construction de la sous matrice $[A_1]$	36
2.5.4.2 Construction de la sous matrice $[A_2]$ en temporel.....	36
2.5.4.3 Construction du vecteur $[B]$	37
2.5.4.4 Définition du vecteur inconnu $[X]$	38
2.6 Modélisation des défauts dans le réseau électrique.....	38
2.6.1 Modélisation des défauts non francs.....	38
2.6.2 Modélisation des défauts francs.....	39
2.6.2.1 Court-Circuit.....	40
2.6.2.2 Circuit-Ouverte	40
2.7 Méthode proposée : corrélation soustractive	40
2.7.1 L'inter-corrélation.....	41
2.7.2 L'intra-corrélation.....	42
2.8 Conclusion	43

CHAPITRE-3 : DETECTION ET LOCALISATION DES DEFAUTS PAR LA REFLECTOMETRIE ET LA CORRELATION SOUSTRACTIVE

3.1 Introduction	45
3.2 Validation de modèle proposé.....	45
3.2.1 Cas d'un réseau Y sans défaut.....	45
3.2.2 Cas d'un réseau affecté par un défaut franc.....	49
3.2.2.1 Cas d'un court-circuit (C-C).....	49
3.2.2.2 Cas d'un circuit-ouvert (C-O).....	50
3.3 Application de la corrélation soustractive pour la détection et localisation des défauts non francs	51
3.3.1 Cas d'une ligne simple.....	51
3.3.2 Cas d'un réseau Y.....	56
3.4 Conclusion	61
CONCLUSION GENERALE.....	63
RERERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

À l'époque des réseaux sans fil, l'utilisation des câbles demeure inévitable [1]. Les câbles électriques sont omniprésents dans un monde de plus en plus technologique, assurant la transmission des données et le transport de l'énergie dans de nombreuses applications. Cependant, ces câbles peuvent présenter des signes de faiblesse en raison des conditions agressives de l'environnement dans lequel ils opèrent (chocs thermiques, humidité, etc.).

Quand les câbles s'abîment, ils perdent leurs caractéristiques et peuvent avoir des conséquences plus au moins graves. Il devient donc nécessaire de mettre en place un système de diagnostic qui permet de détecter et de localiser des défauts présents dans les câbles.

Pour renforcer la crédibilité des réseaux filaires, la réflectométrie est l'une des méthodes les plus intéressantes. Basée sur l'injection d'un signal de tension à l'une des extrémités du câble et sur l'analyse des signaux réfléchis, cette méthode procure des informations qui permettent la détection et la localisation des défauts électriques dans la structure filaire. Elle s'appuie sur deux éléments clés : un modèle de propagation câblé et un outil de traitement du signal pour extraire des informations nécessaires sur les défauts.[2]

Le modèle de propagation décrit le problème de la propagation d'une onde électromagnétique le long d'une ligne de transmission simple ou Y (sain ou affecté par un défaut non-franc) dans le domaine temporel. Ce modèle est basé sur les équations de propagation des "télégraphistes", où les paramètres électriques par unité de longueur R , L , C et G (résistance linéique (**R**), inductance linéique (**L**), capacité linéique (**C**) et conductance linéique (**G**)), souvent exprimés en valeurs par unité de longueur.

. Les équations de propagation d'onde sont résolues par la méthode des différences finies dans le domaine temporel (ou en Anglais Finite Difference Time Domain (FDTD)) qui convertit les équations différentielles de propagation en équations différences. [3]

Le modèle d'analyse de la propagation d'une onde transitoire dans le réseau (appelé formalisme topologique $[A][X] = [B]$), qui consiste en la résolution d'un ensemble d'équations de propagations (pour l'ensemble des branches constituant le réseau électrique).

Une autre méthode largement utilisée pour traiter le signal de réflectogramme, et d'extraire les informations essentielles sur les défauts, leurs détection et leurs localisation, est appelée la corrélation soustractive. Cette méthode est utilisée pour amplifier les effets subtils des défauts non francs présents dans le réflectogramme.

Ce mémoire est composé de trois chapitres, dont le contenu de chacun est comme suit ; Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les réseaux et les différents types de connexions. Les domaines d'application des câbles ainsi que la classification des défauts dans les réseaux filaires sont aussi abordés dans ce chapitre. La modélisation de la propagation dans le réseau filaire, affecté par des défauts non franc, a fait l'objet du deuxième chapitre, où nous allons détailler les étapes de modélisation de la propagation d'une onde transitoire dans un réseau électrique utilisée directement en temporel par la discrétisation des équations des lignes par FDTD et le formalisme topologique.

Dans le troisième chapitre, nous allons mettre en œuvre la méthode proposée de diagnostic sur les différentes configurations de câblage. Nous allons procéder à l'application de cette méthode sur les diverses configurations de câblage et de défauts présentant une complexité croissante. Les défauts examinés sont : les défauts francs et les défauts non francs. Pour ce dernier type, les défauts sont générés par une modification locale de l'impédance caractéristique de la ligne. Dans ce cas Les paramètres à identifier comprennent les paramètres électriques ainsi que la position du défaut.

De ce fait, on peut dire que la méthode de corrélation soustractive a été utilisée avec succès pour localiser les défauts non francs. Cette technique, pourvue d'une aptitude d'amplifier les signaux de faible amplitude, a permis une meilleure identification. Cette caractéristique en fait d'elle un outil approprié pour la détection de défauts non francs.

Enfin, ce mémoire est terminé par une conclusion générale résumant les résultats de simulation obtenus ainsi que les discussions de ces résultats.

CHAPITRE-1

Généralités sur la topologie et les types de connexions des réseaux filaires

Chapitre -1

Généralités sur la topologie et les types de connexions des réseaux filaires

1.1 Introduction

À l'ère des réseaux sans fil, l'utilisation de câbles physiques dans les systèmes complexes reste toujours inévitable. Cependant, ces câbles peuvent présenter des signes de fragilité dus aux conditions d'utilisation (contraintes mécaniques, chocs thermiques, humidité, etc.). Lorsque les câbles sont endommagés, leurs fonctions peuvent être altérées ou provoquer des accidents graves. Il est donc nécessaire de mettre en place un système de détection et de localisation des défauts. Pour cela, la réflectométrie est une approche prometteuse pour répondre à cette tâche.

Dans ce chapitre, nous allons mettre en évidence les problèmes rencontrés dans les réseaux de câbles et présenter les méthodes de diagnostic pour détecter et localiser les défauts. Pour ce faire, nous présentons d'abord les différentes topologies et connexions des réseaux de câbles, leurs domaines d'application. Ensuite, nous introduisons les types de défauts dans les câbles.

1.2 Réseaux filaires ; cas de réseaux informatiques

Un réseau est un ensemble d'objets interconnectés les uns avec les autres. Il permet de faire circuler des éléments entre chacun de ces objets selon des règles bien définies. Le réseau informatique, qui est un bon exemple de réseaux de câbles, est constitué d'un ensemble de terminaux interconnectés pour échanger des informations numériques. [4]

1.2.1 Topologie des réseaux filaires

1.2.1.1 Réseau en étoile

Les périphériques réseau sont reliés à des systèmes matériels centraux (nœuds). Leur rôle est d'assurer la communication entre les différentes stations du réseau. Cette topologie, qui est particulièrement utilisée dans le réseau Ethernet **RJ45** actuel, est maintenant utilisée dans la plupart des réseaux. Quand tous les sites sont connectés à un commutateur, on a une topologie en étoile. Les nœuds du réseau sont tous connectés à un nœud central.

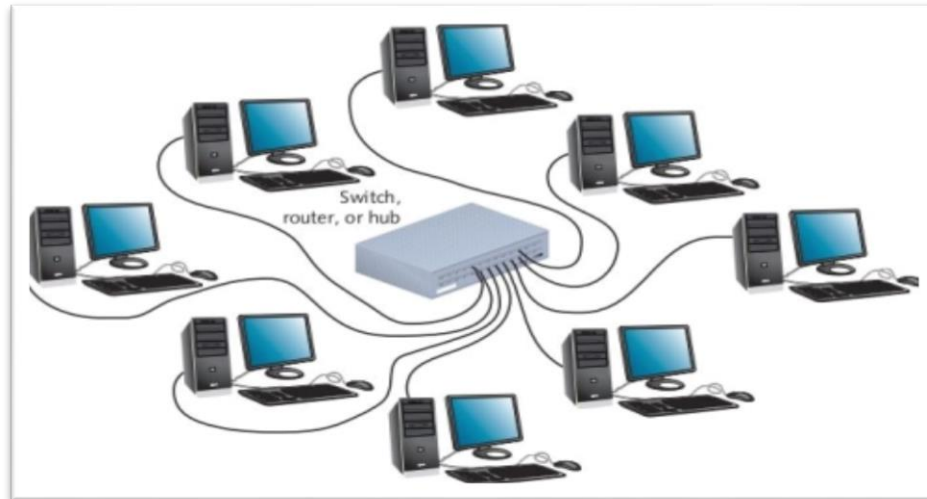


Figure 1.1 : Réseau en étoile.

1.2.1.2 Réseau en bus

Un réseau en bus est une architecture de communication dans laquelle la connexion des équipements est assurée par un bus partagé par tous les utilisateurs. Les réseaux de bus facilitent la connexion de plusieurs appareils, mais des problèmes surviennent lorsque deux machines veulent transmettre des données sur le bus en même temps. Les systèmes utilisant une topologie en bus ont généralement un arbitre pour gérer l'accès au bus.

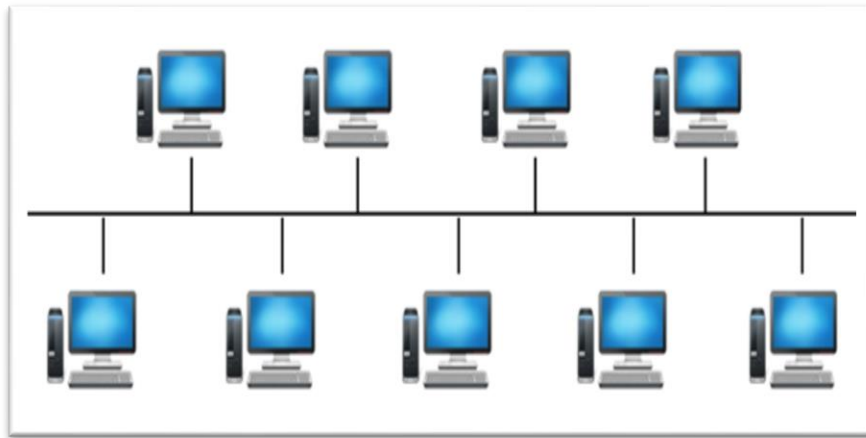


Figure 1.2 : Réseau en bus.

1.2.1.3 Réseau en anneau

Dans ce réseau toutes les machines sont reliées entre elles en boucle fermée. Les données circulent dans une seule direction, d'une entité à une autre et les stations communiquent à tour de rôle.

Le réseau en anneau ressemble à un bus, mais lui-même est fermé : le dernier nœud est connecté au premier. Dans une topologie en anneau, les ordinateurs ne sont pas connectés en anneau, mais sont connectés à un distributeur (appelé MAU, Multi-Access Unit) qui va gérer la communication entre les ordinateurs qui lui sont connectés en envoyant Chaque ordinateur se voit allouer un temps de parole pour eux.

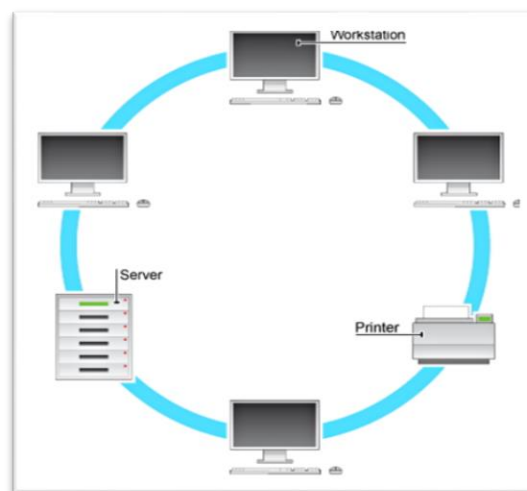


Figure 1.3 : Réseau en anneau.

1.2.1.4 Réseau en arbre

Une topologie arborescente ou hiérarchique peut être considérée comme un ensemble de réseaux en étoile. Le réseau est divisé en plusieurs niveaux. Niveau supérieur, niveau supérieur, se connecte à plusieurs nœuds de niveau inférieur dans la hiérarchie. Ces nœuds peuvent eux-mêmes être connectés à plusieurs nœuds de niveau inférieur. [5]



Figure 1.4 : Réseau en arbre.

1.2.2 Types de connexions des réseaux filaires

1.2.2.1 Connexion d'un réseau domestique

Le réseau domestique ou réseau individuel (en Anglais Personal Area Network (PAN)) désigne un type de réseau restreint en matière d'équipements et généralement est mis en œuvre dans un espace d'une dizaine de mètres. [6]

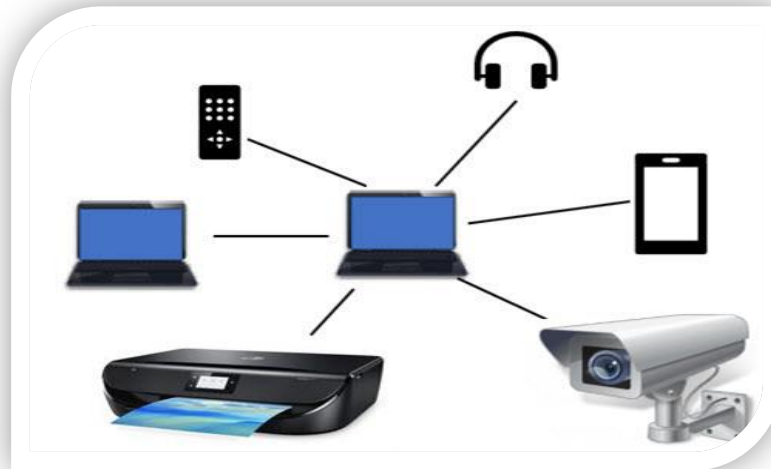


Figure 1.5 : Réseau PAN.

1.2.2.2 Connexion dans un réseau local

Le réseau local (en Anglais Local Area Network (LAN)) est un réseau où les terminaux qui y participent s'envoient des trames au niveau de la couche de liaison sans utiliser l'accès à internet. [7]



Figure 1.6 : Réseau LAN.

1.2.2.3 Connexion dans les réseaux à large surface

Les réseaux à large surface (en Anglais Wide Area Network (WAN)) sont des réseaux informatiques ou réseaux de télécommunications qui couvrent une très grande zone géographique, typiquement à l'échelle d'un pays, d'un continent, ou de la planète entière. Le plus grand WAN est le réseau internet. [8]

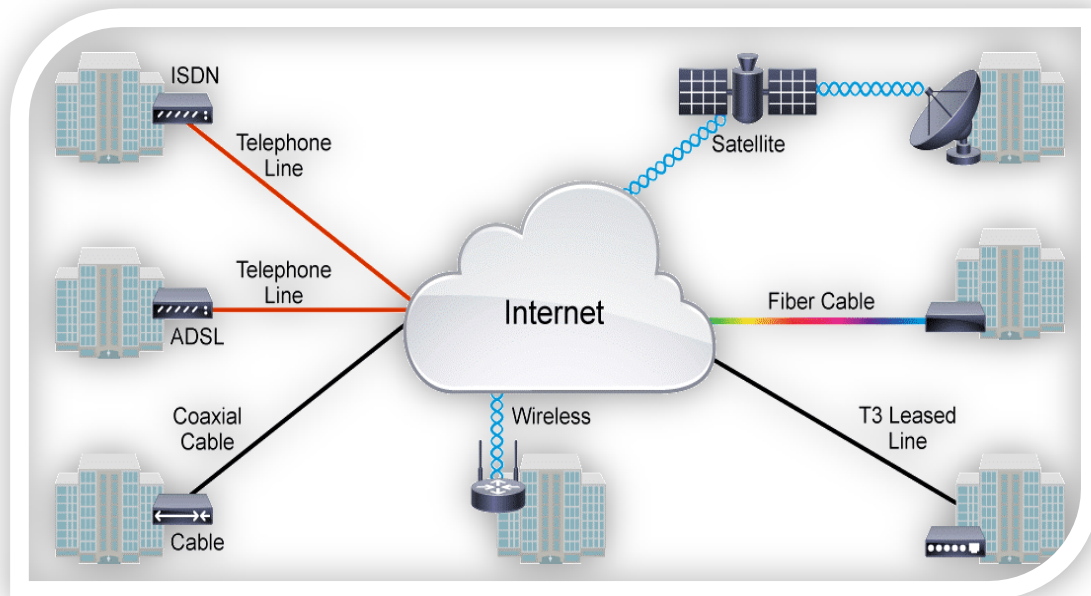


Figure 1.7 : Réseau WAN.

1.3 Types de câbles

Depuis l'émergence des systèmes électriques, l'utilisation des câbles électriques est devenue Indispensable. Les câbles électriques sont largement utilisés dans tous les systèmes modernes, où l'acheminement des données et de l'énergie est nécessaire pour garantir le bon fonctionnement du système. On peut citer plusieurs domaines ; tels que les systèmes de transport, les centrales nucléaires, les machines industrielles, les réseaux de transport d'électricité, etc.

Par ailleurs, au cours des dernières années, on a assisté à une évolution vers un nouveau concept dans les industries automobiles et aéronautiques connu sous le nom de technologie “by-Wire”. Le type de câble est différent suivant la nature du signal que l’on désire transmettre et de l’environnement dans lequel évolue le système. Les signaux peuvent être analogiques ou numériques, de faible ou de forte puissance et de basses, moyennes ou hautes fréquences. [9]

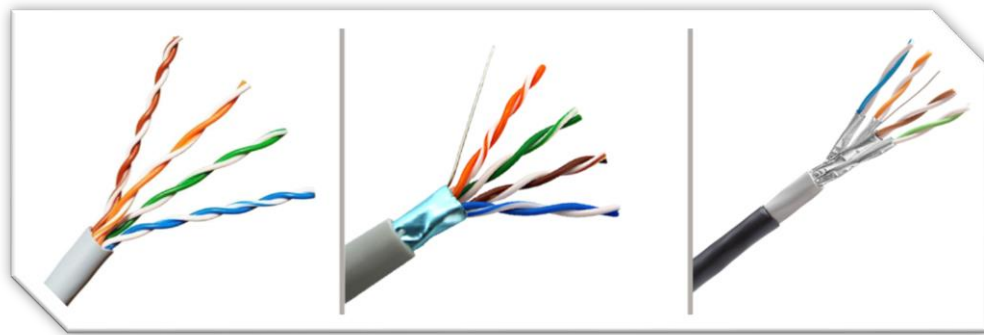
Le choix de ces câbles dépend du débit souhaité, de la longueur du réseau et de l’environnement dans lequel évolue le réseau. Les réseaux électriques haute tension utilisent des câbles de transport d’énergie dont la constitution est différente de ceux utilisés pour les réseaux informatiques car ces câbles sont conçus pour transporter et distribuer de l’énergie électrique à fort courant et basses fréquences (50 Hz) sur de très longues distances à travers le pays. On distingue trois principaux types de câbles : la paire torsadée, la fibre optique et le câble coaxial. [10]

1.3.1 Paire torsadée

Ce câble est constitué, comme son nom l’indique, de deux brins en cuivre entrelacés en torsade. Cet entrelacement permet de maintenir la distance entre les fils constante et réduire la diaphonie due aux paires ou sources adjacentes. Pour ce faire, chaque paire est torsadée d’une façon légèrement différente. On distingue plusieurs catégories de paires torsadées selon le blindage telles que : paire torsadée non blindée, paire torsadée écrantée, paire torsadée blindée, etc. [1]

- La paire torsadée non blindée (en anglais Unshielded Twisted Pair ou (UTP)) n’est pas protégée par un blindage. Elle est souvent utilisée pour les installations téléphoniques et les réseaux informatiques domestiques.
- La paire torsadée écrantée (en anglais Foiled Twisted Pair ou (FTP)), l’ensemble des paires torsadées peuvent être entourées par une gaine commune de blindage. On en fait usage pour le téléphone et les réseaux informatiques.

- La paire torsadée blindée (en anglais Shielded Twisted Pair ou (STP)), chaque paire torsadée est entourée d'une couche conductrice de blindage pour une meilleure immunité contre les perturbations électromagnétiques. [11]



(a) Paire Torsadée non-blindée

(b) Paire Torsadée écrantée

(c) Paire Torsadée blindée

Figure 1.8 : Différents types de paires torsadées.

1.3.2 Fibre optique

La fibre optique est un type de câble de transmission de données qui utilise des fils de verre ou de plastique très fins pour transmettre des signaux lumineux. Cette technologie offre des débits de données très élevés, une grande 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.

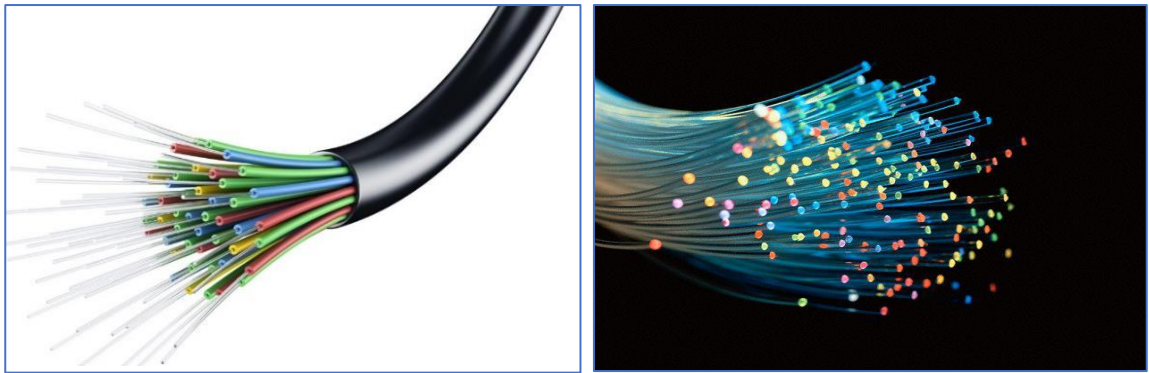


Figure 1.9 : Câble à fibre optique.

1.3.3 Les câbles coaxiaux

Le câble coaxial est composé de quatre parties, dont une âme (conducteur central) constituée d'un seul brin en cuivre ou de plusieurs brins torsadés pour la transmission des données. Cette âme est enrobée dans un matériau diélectrique isolant afin d'éviter tout contact avec le blindage métallique (tresse ou masse). Ce blindage peut être une feuille d'aluminium ou une tresse de cuivre permettant de protéger les données contre le bruit et les interférences extérieures, et d'assurer une transmission à haut débit et sur de longues distances. [12]

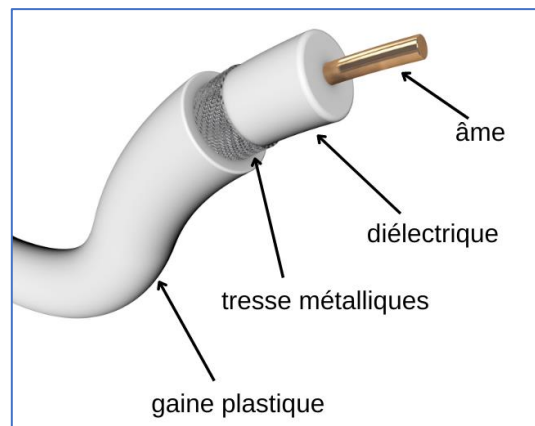


Figure 1.10 : Câble coaxial.

- **L'âme** : accomplissant la tâche de transport des données, est généralement composée d'un seul brin en cuivre ou de plusieurs brins torsadés.
- **Diélectrique (isolant)** : Constitué d'un matériau diélectrique qui permet d'éviter tout contact avec le blindage qui peut provoquer des court-circuits.

- **Tresse métallique (blindage) :** Protège les données contre les bruits qui peuvent causer leur distorsion.
- **La gaine :** Protège le câble de l'environnement extérieur. [13]

Les câbles coaxiaux ont plusieurs avantages tels que : légèreté, flexibilité, facilité d'utilisation et moins cher. Ils sont aussi plus résistants aux interférences et à l'atténuation du signal électrique que la paire torsadée et permettent de véhiculer un volume très important de données sur de longues distances. Les inconvénients majeurs des câbles coaxiaux sont : leur fragilité, instabilité et leur faiblesse aux interférences et aux écoutes.

1.4 Domaines d'applications des câbles

1.4.1 Distribution de l'énergie

Les câbles sont utilisés dans la distribution d'énergie pour transporter l'électricité sur de longues distances, depuis les centrales électriques jusqu'aux consommateurs finaux. Parmi les domaines d'application des câbles dans la distribution d'énergie on peut citer : dans les réseaux de transport d'énergie à haute tension sur de longues distances à partir des centrales électriques aux postes de transformation, dans les réseaux de distribution d'énergie à moyenne ou basse tension sur des distances plus courtes et dans les usines où les câbles sont utilisés pour alimenter les machines et les équipements de production.



Figure 1.11 : Les câbles dans un réseau de distribution d'énergie.

1.4.2 L'aéronautique

L'industrie aéronautique en est un bon exemple, où de nombreux types de câbles sont utilisés, et la longueur cumulée varie selon les caractéristiques de chaque avion. La **figure 1.12** illustre bien les différents types de câbles utilisés et leurs complexités : câbles coaxiaux pour les systèmes de transmission à haute fréquence (radio, radar, données), câbles de transmission de données à haut débit, câbles résistants au feu et pour les applications à haute température (cabine et moteur), câbles d'alimentation pour le transport, etc. [14]



Figure 1.12 : installations de Km de câbles spéciaux à bord d'un airbus.

1.4.3 L'automobile

Les câbles sont largement utilisés dans les automobiles pour transmettre l'énergie électrique et les signaux de commande entre les différents composants électriques et électroniques de la voiture. Parmi les domaines d'application des câbles dans l'automobile on a :

- Les câbles utilisés pour transmettre les signaux de commande entre les différents capteurs et actionneurs,

- Les câbles utilisés pour connecter les différents systèmes électroniques de la voiture, tels que le système de navigation, le système audio, le système de commande de climatisation, etc.

1.4.4 Télécommunications

Le domaine des télécommunications est un domaine de convergence et d'interaction entre les différentes technologies et disciplines scientifiques. Parmi ses applications : Le transport de la voix par la téléphonie, la radiotéléphonie. La télévision est présente dans tous les foyers et les forêts d'antennes et de paraboles ont envahi les villes. Le télégraphe est l'ancêtre de la transmission de données et la première application des télécommunications : transmettre des caractères, donc un message, par signaux optiques, puis sur une ligne puis par ondes radio.

Autres applications comme le radar n'est pas un système de communication, mais de télédétection, ses techniques combinent micro-onde, traitement du signal, radioélectricité, et peuvent être rattachées au monde des télécommunications. La radionavigation a permis, dès les débuts de la radio, d'aider à la navigation maritime puis aérienne, grâce à la radiogoniométrie et aux radiophares, puis aux systèmes hyperboliques.

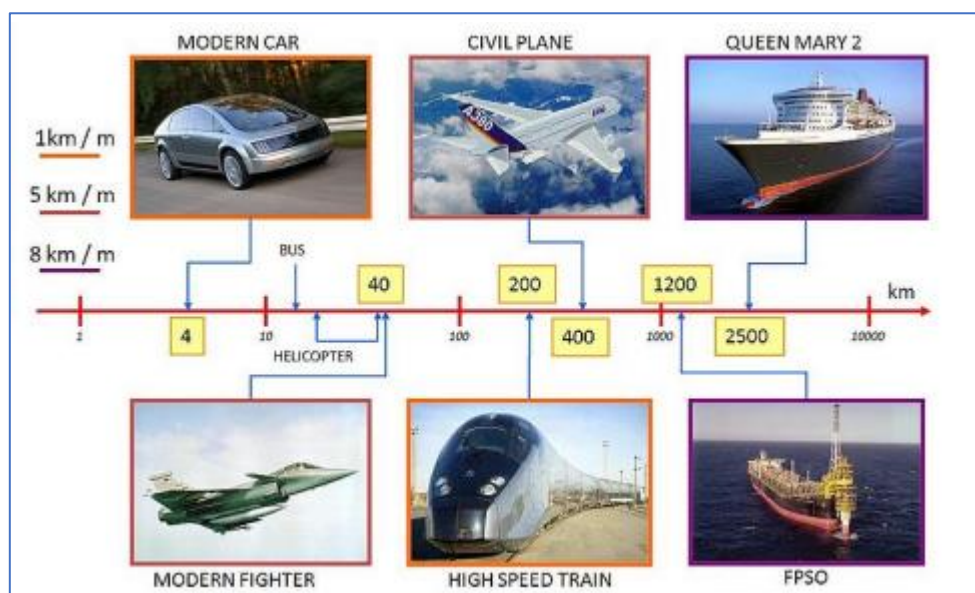


Figure 1.13 : longueurs cumulées de câbles dans le transport.

1.5 Catégorisation des défauts dans les câbles

1.5.1 Défauts francs

Les défauts francs se traduisent par une forte variation de l'impédance caractéristique du câble. Ils se manifestent par une interruption totale de la circulation de l'énergie ou de l'information dans le câble endommagé. Les défauts francs correspondent à des situations de circuit ouvert et de court-circuit. Le circuit ouvert se manifeste par la rupture d'un ou plusieurs conducteurs suite à des dommages mécaniques ou à des mouvements violents du câble. Le court-circuit est la conséquence de la mise en liaison à faible résistance de deux conducteurs ou plus suite à des isolations endommagées. Les défauts francs peuvent être à l'origine d'accidents tragiques suite au dysfonctionnement brutal du système. [1]

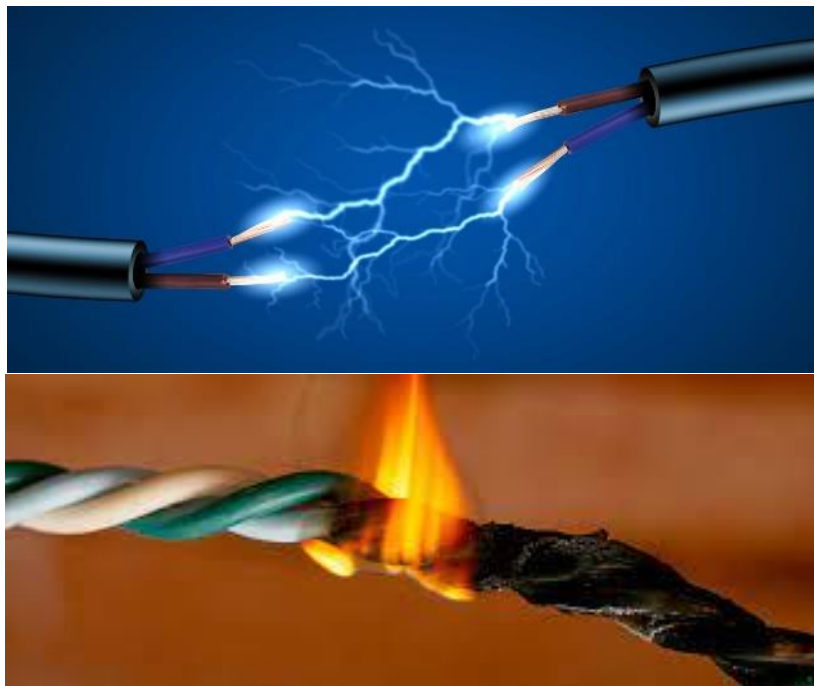


Figure 1.14 : les défauts francs (court-circuit et circuit ouvert).

1.5.2 Défauts non francs

Les défauts non francs sont des défauts plus subtils tels que l'usure des câbles, rupture de brins pour un câble multibrin, fissure de la graine, etc. Ils 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 et ils peuvent évoluer à long terme vers des défauts francs.

Ces types de défauts sont la conséquence de plusieurs facteurs externes (erreurs de manipulation, corrosion, oxydation, environnement, etc.) ou internes (défauts de fabrication, vieillissement du câble, etc.).

La détection de ces défauts naissants permettrait de réduire les coûts, le temps de réparation et d'éviter de graves accidents, c'est pourquoi cela reste un enjeu actuel majeur du diagnostic filaire. [11]

1.5.2.1 Vieillissement

La durée de service d'un câble peut être considérablement réduite s'il doit opérer en dehors des conditions de fonctionnement optimales pour lesquelles il a été conçu. Le processus de vieillissement entraîne généralement une fragilisation, une fissuration et une défaillance éventuelle des matériaux d'isolation et de revêtement, exposant le conducteur et risquant un court-circuit potentiel, une cause probable d'incendie électrique.

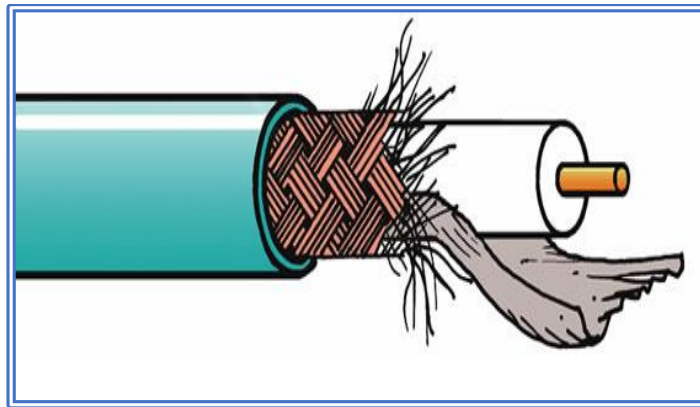


Figure 1.15 : Vieillissement du câble coaxial

1.5.2.2 Dégradation de la gaine

Plusieurs facteurs peuvent causer la dégradation de la gaine extérieure d'un câble, comme la chaleur, le froid excessif, des conditions climatiques difficiles ou l'abrasion. Tous ces facteurs peuvent causer la défaillance des câbles électriques, car les conducteurs ne sont plus isolés correctement et protégés par la gaine extérieure initialement prévue à cet effet.

1.5.2.3 Pénétration d'humidité dans l'isolation

La pénétration d'humidité peut provoquer des problèmes importants, notamment des courts-circuits et la corrosion des conducteurs en cuivre.

1.5.2.4 Surcharge électrique

En principe, la surcharge électrique se produit quand un câble est sous-évalué pour l'application ou s'il subit trop de charge. Dans les applications domestiques, c'est souvent la conséquence du branchement d'un trop grand nombre d'appareils sur la même prise et d'une surcharge du câblage sur cette prise individuelle, rallonge ou prise groupée. [15]

1.6 Méthodes utilisées pour la détection et la localisation des défauts

1.6.1 Les méthodes non basées sur la réflectométrie

Bien que nous ayons décidé de nous focaliser sur des méthodes à base de propagation d'ondes électromagnétiques guidées, il existe historiquement d'autres moyens de procéder à ce type de contrôle non destructif. [16]

1.6.1.1 Inspection visuelle

L'inspection visuelle, qui est la méthode la plus intuitive pour la surveillance d'un réseau de câbles, consiste à inspecter l'ensemble avec le moyen le plus simple dont il dispose « sa propre expertise ». Cela peut constituer une bonne solution de prime abord, bien qu'elle soit soumise à la subjectivité de celui qui la pratique. De plus, la plupart des câbles ne sont pas directement accessibles mais sont cachés derrière des garnitures. Avec l'augmentation de la complexité des fonctions électriques, les longueurs mises en jeu

deviennent trop importantes pour que l'opération puisse être achevée en un temps raisonnable. C'est pourquoi d'autres méthodes deviennent nécessaires. [16]

1.6.1.2 Méthode par rayons X

Cette méthode permet de trouver des défauts au niveau des conducteurs situés à l'intérieur des câbles électriques comme à l'extérieur au niveau des isolants. L'inconvénient de cette méthode est que le générateur de rayons X et le détecteur sont des instruments lourds. Ils doivent être positionnés près du câble et être associés à une intervention humaine pour l'analyse des données récoltées. Cette technique n'est applicable que pour les câbles dont l'accès est facile [17]. [16]

1.6.1.3 Méthodes capacitatives et inductive

La méthode est basée sur la mesure de la capacité ou de l'inductance du câble [18]. La mesure de la capacité est utilisée pour localiser un circuit ouvert et la mesure de l'inductance est utilisée pour localiser un court-circuit sur le câble. Cette technique est performante et simple dans la limite où elle est utilisée pour diagnostiquer l'état d'un câble point-à-point, mais elle n'est pas adaptée pour l'analyse de réseaux filaires complexes, ou lorsque le câble est en fonctionnement. [16]

1.7 Les méthodes basées sur la réflectométrie

Aujourd'hui, la réflectométrie est utilisée dans de nombreux domaines allant de la mesure de l'humidité dans les sols, la caractérisation des strates dans la croûte terrestre, la mesure des voies respiratoires et la détection de défauts dans les câbles.

Le principe de la réflectométrie est similaire à celui du radar : une onde est injectée dans un milieu, si elle rencontre une discontinuité lors de sa propagation une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection. L'analyse des signaux réfléchis permet d'en déduire des informations sur cette discontinuité. [19]

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la topologie, les types de connexion et de différentes catégories de câbles. Par la suite, nous avons introduit les diverses classes de défauts et de problèmes qui peuvent être rencontré dans les câbles. Dans ce cas, la méthode du réflectomètre semble être la plus adaptée pour détecter et localiser les défauts dans les réseaux filaires. Cette méthode, ainsi que la méthode de corrélation soustractive, seront détaillées dans le prochain chapitre. Ceci sera précédé par une étape de modélisation.

CHAPITRE-2

Méthodes proposées pour la détection des défauts dans les câbles coaxiaux

Chapitre-2

Méthodes proposées pour la détection des défauts dans les câbles coaxiaux

2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons abordé les différents types de câble et les différentes pannes rencontrées dans les réseaux filaires. Chaque défaut ayant ses propres caractéristiques (type, origine, conséquences, etc.), plusieurs méthodes de diagnostic filaire ont été développées. Il s'agit notamment des méthodes visuelles, des méthodes de rayons X , des méthodes capacitatives et inductives, des méthodes de réflexion, etc.

L'objectif de ce chapitre est de modéliser un réseau avec le défaut non franc par la réflectométrie et la corrélation soustractive. Pour cela, nous introduisons, dans un premier temps, notion de réflectométrie et modèle **RLCG** d'une ligne de transmission et le principe de la réflectométrie. Pour mieux comprendre son mode de fonctionnement, un réseau filaire est modélisé. Ensuite, la méthode de mesure de la réflexion est introduite. Il existe principalement deux familles telles que les méthodes dans le domaine temporel et les méthodes dans le domaine fréquentiel. Enfin, nous présentons la corrélation soustractive ainsi que leurs types tels que l'inter-corrélation, l'intra-corrélation.

2.2 Notion de réflectométrie et modèle RLCG d'une ligne de transmission

2.2.1 Notion de réflectométrie

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

En basse fréquence, la longueur de l'onde λ est supérieure à celle de la ligne l . Dans ce cas, l'onde électromagnétique est quasiment constante en tout point de la ligne, quelle que soit l'impédance de charge Z_L . Il est ainsi inutile d'introduire la notion de propagation.

En revanche, en haute fréquence, du fait que la longueur de l'onde λ est inférieure à celle de la ligne l , l'amplitude de l'onde n'est plus constante tout au long de la ligne. Dans ce cas, on doit tenir compte du phénomène de propagation. La réflectométrie s'inspire de ce phénomène afin d'en extraire des informations sur l'état de la ligne de transmission.

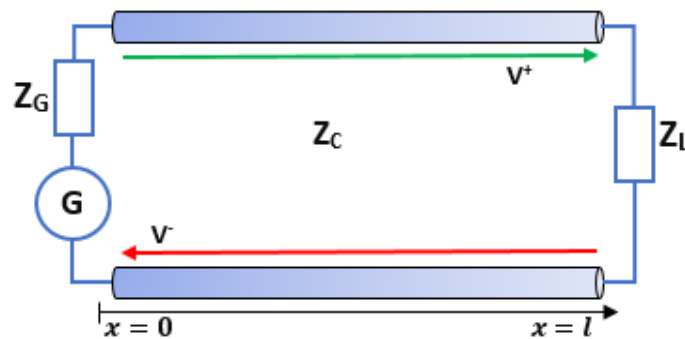


Figure 2.1 : Modèle de ligne de transmission (une longueur l et une impédance Z_c)

2.2.2 Modèle RLCG d'une ligne de transmission

Dans les hautes fréquences, une ligne de transmission peut être modélisée par le "modèle **RLCG**" [20], qui divise sa longueur l en plusieurs segments élémentaires consécutifs de longueur dx , où chaque segment est représenté par le modèle électrique équivalent de la **figure 2.2** qui se compose des paramètres suivants : résistance (**R**), inductance (**L**), capacité (**C**) et conductance (**G**), souvent exprimés en valeurs par unité de longueur.

Les éléments **RLCG** sont appelés les paramètres primaires d'une ligne de propagation. Les paramètres primaires d'une ligne de transmission (ou de propagation) sont définis linéairement comme suit :

- Résistance linéique **R** exprimée en (Ω/m) qui dépend de la résistivité électrique et de la section de la ligne de transmission.

- Inductance linéique L exprimée en (H/m) qui se décompose en deux parties : une inductance intérieure, due au champ magnétique à l'intérieur des conducteurs, et une inductance extérieure, due au champ magnétique entre les conducteurs. Elle dépend aussi du diamètre des conducteurs, de l'écart entre les deux conducteurs et de la perméabilité des matériaux.
- Capacité linéique C exprimée en (F/m) qui dépend de la permittivité de l'isolant placé entre les deux conducteurs.
- Conductance linéique G exprimée en $(Siemens/m)$ qui représente un courant de fuite circulant entre deux conducteurs lorsque l'isolant séparant ces deux conducteurs n'est pas parfait.

La ligne de transmission, avec ou sans pertes, est divisée en plusieurs segments élémentaires consécutifs de longueurs dx . Chaque segment est décrit par un modèle *RLCG* comme illustré par la *figure 2.2*. [21]

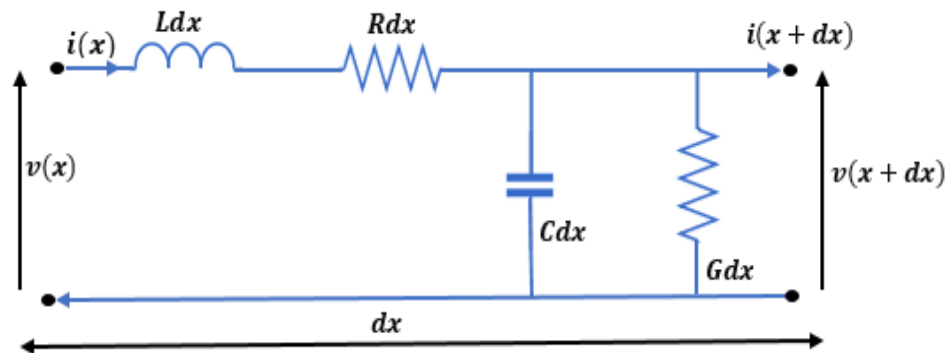


Figure 2.2 : Schéma équivalent du modèle RLCG à un segment de ligne de transmission.

2.3 Principe de réflectométrie

La réflectométrie est une méthode à haute fréquence couramment utilisée pour contrôler l'état des câbles. Elle peut fournir des informations pour la détection, la localisation et la caractérisation des défauts électriques. Elle utilise le principe d'un radar basé sur la propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu à diagnostiquer.

Dans ce cas, un signal impulsionnel est envoyé dans le système ou le milieu à diagnostiquer (ligne ou câble) lorsque ce signal rencontre un obstacle (un défaut par exemple : ΔZ) 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 permet de retenir des informations sur le système ou le milieu **Figure 2.4**.

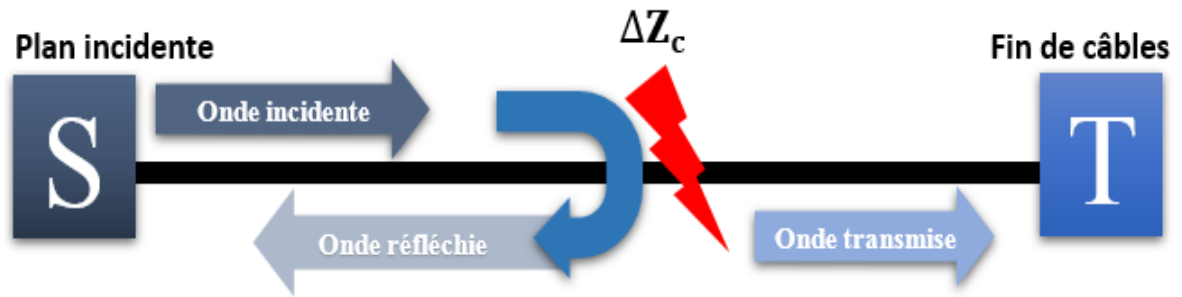


Figure 2.3 : Principe de la réflectométrie.

Nous pouvons injecter différents types de signaux tels que : les échelons, les fonctions portes ou les impulsions gaussiennes. [22]

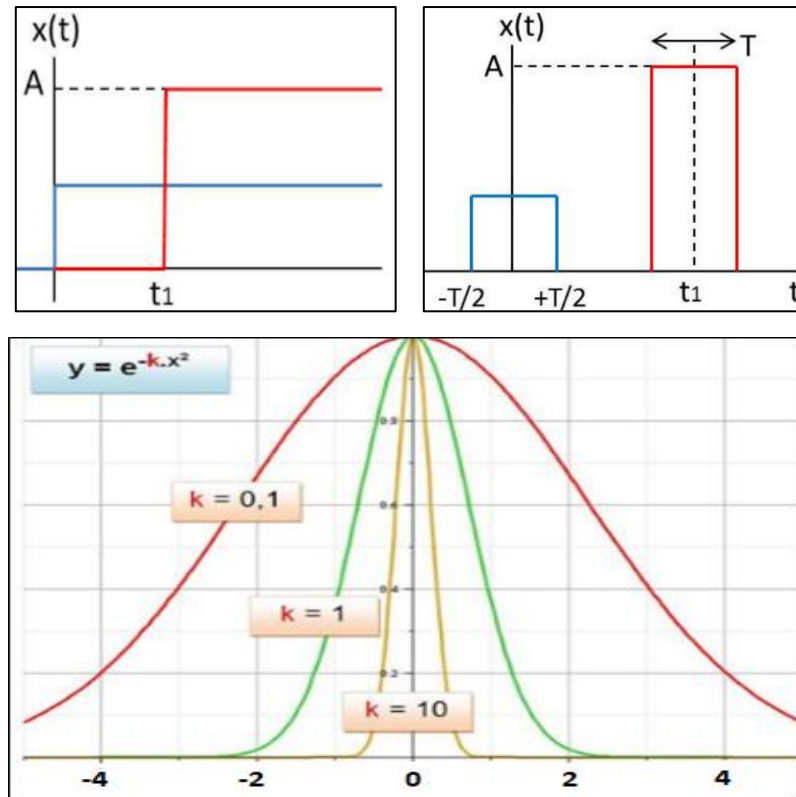


Figure 2.4 : Types de signaux : échelons, fonctions portes, impulsions gaussiennes.

2.4 Différents Types des réflectométries

La réflectométrie est divisée principalement en deux grandes familles : réflectométrie fréquentielle (en Anglais Frequency Domain Reflectometry «**FDR**») et réflectométrie temporelle (en Anglais : Time Domain Reflectometry «**TDR**»). Les principales différences entre ces deux types de réflectométrie résident dans la procédure d'injection et de traitement de la réponse. Lorsque le signal se propage dans le réseau et rencontre une discontinuité électrique (défaut, dérivation, changement d'impédance, etc.), une partie de son énergie est renvoyée vers le port d'injection. Dans le domaine temporel, l'analyse des signaux réfléchis donne des informations sur la topologie du réseau alors que dans le domaine fréquentiel, c'est l'analyse de l'onde stationnaire qui fournit ces informations. [19]

2.4.1 Réflectométrie fréquentielle

La réflectométrie dans le domaine fréquentiel (**FDR**) consiste à injecter un signal sinusoïdal modulé en fréquence (la fréquence de ce signal varie linéairement au cours du temps [23]) et d'analyser l'onde stationnaire, superposition de l'onde réfléchie et de l'onde injectée. Ce signal, connu sous le nom d'un signal "**Chirp**" **Figure 2.5**, est donné par l'expression suivante :

$$X(t) = 1 \cos(\theta(t) + \phi) \quad (2.1)$$

Le signal injecté dans le réseau est mesuré directement dans le domaine fréquentiel en évaluant le gain complexe (amplitude et phase) du réseau pour chaque fréquence. Les signaux sinusoïdaux sont injectés de manière consécutive à des fréquences différentes.

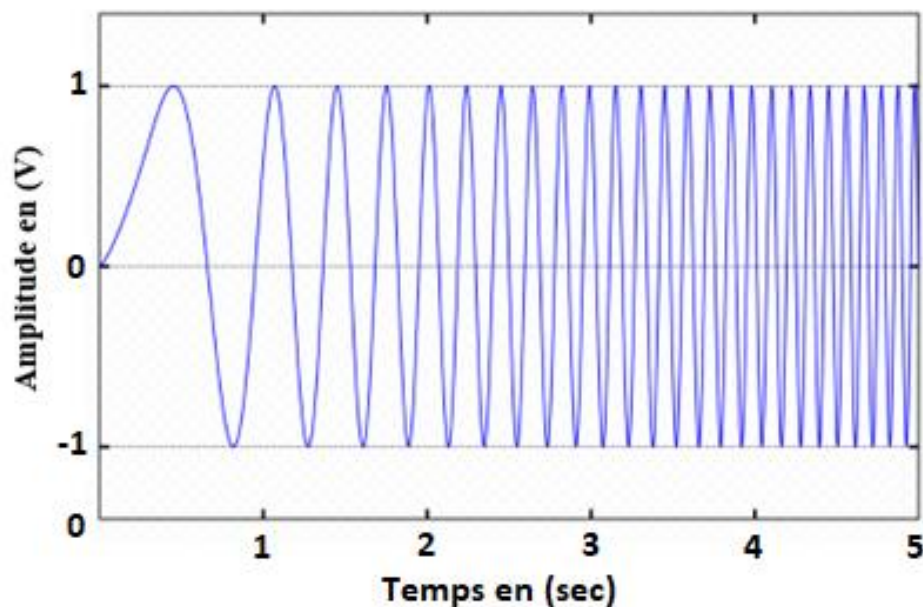


Figure 2.5 : Exemple d'un signal "Chirp" linéaire en fréquence pour application FDR.

On distingue trois techniques dérivées de la **FDR**, dont l'analyse repose sur différentes fréquences, phases ou amplitudes, pour déterminer la position d'une discontinuité d'impédance dans le câble.

- 1) La **FMCW** [24] (Frequency Modulated Continuous Wave) mesure le décalage en fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie, récupéré dans le plan d'incidence.
- 2) La **PDFDR** [25] (Phase Détection Frequency Domain Reflectometry) mesure le décalage de phase entre les deux.
- 3) La **SWR** [26] (Standing Wave Reflectometry) consiste à injecter un signal sinusoïdal avec haute fréquence dans le câble, puis à mesurer l'onde stationnaire à la source qui est la superposition de l'onde incidente et de l'onde réfléchie.

Les méthodes de réflectométrie dans le domaine fréquentiel présentent l'avantage de permettre une analyse spectrale, et d'exploiter le comportement fréquentiel du réseau pour lequel les traitements tels que les opérations de calibration et de compensation (rencontrées dans les analyseurs de réseaux vectoriels) sont immédiats. Cependant, ces méthodes sont difficiles à interpréter et nécessitent un traitement mathématique avec des techniques avancées.

De plus, l'analyse finale des défauts est faite dans le domaine temporel, des traitements complexes de passages fréquences-temps sont requis. Pour cette raison, on préfère généralement les méthodes dérivées de la réflectométrie dans le domaine temporel pour le diagnostic de câbles, en particulier lorsqu'il est embarqué. [11]

2.4.2 Réflectométrie temporelle

La réflectométrie temporelle (**TDR**) est un instrument de mesure électronique utilisé pour caractériser et localiser des défauts dans les câbles métalliques (paire torsadée, câble coaxial, etc.) et, dans les fibres optiques. Il peut également être utilisé pour localiser des discontinuités dans un connecteur, un circuit imprimé (**PCB**), ou n'importe quel circuit électrique [27].

On distingue plusieurs méthodes qui sont dérivées de la **TDR**, tels que les méthodes qui utilisent des signaux numériques à haut débit à la place des signaux **HF** analogiques :

- 1) La méthode (Séquence Time Domain Reflectometry) la **STDR** et la méthode (Spread Spectrum Time Domain Reflectometry) la **SSTDR**, ayant le même principe, sont basées sur l'étalement de spectre, que celui employé dans la **TDR** sauf que le signal injecté dans la ligne est une séquence pseudo-aléatoire d'éléments binaires. Cette technique est parfaitement adaptée pour le diagnostic des défauts dans les câbles électriques embarqués, car les signaux de diagnostic n'interfèrent pas avec les signaux utiles (voir **figure 2.6**). [16]

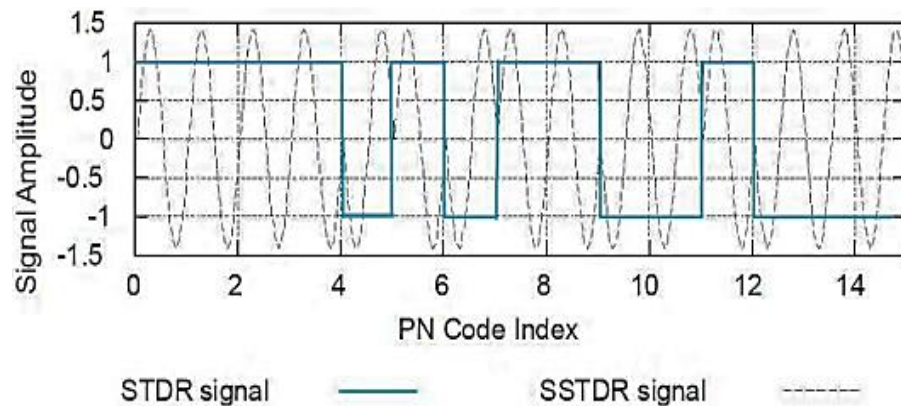


Figure 2.6 : signaux d'injection pour les deux méthodes STDR et SSTDR

- 2) La méthode (Multi-Carrier Time Domain Reflectometry (**MCTDR**)) est basée sur l'injection d'un signal multi-porteuse. Cette méthode fournit des informations qui servent à la détection, la localisation et la caractérisation des défauts électriques dans les systèmes à câbles. Les défauts francs peuvent être détectés rapidement, ce qui accroît la fiabilité des systèmes de câblage et améliore leur maintenance. [28]
- 3) La méthode (Orthogonal Multi-Tone Time Domain Reflectometry (**OMTDR**)), qui désigne la réflectométrie orthogonale multitons dans le domaine temporel et qui permet de tester et de communiquer les données simultanées. Elle représente un candidat adéquat pour le diagnostic en ligne car il évite les interférences grâce au contrôle de la bande passante et sa meilleure précision de localisation des défauts en combinant différentes données de localisation. [29]

2.5 Modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique

La théorie des lignes de transmission permet d'étudier des phénomènes de propagation le long d'un support d'information. Cette méthode est basée sur la résolution de deux équations différentielles, les équations des télégraphistes, liant la tension et le courant en une position sur le conducteur.

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

Les équations à partir de (2.2) jusqu'à (2.36) sont de [30]

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

$$\frac{\partial[I(x,\omega)]}{\partial x} + [Y][V(x, \omega)] = [0] \quad (2.3)$$

$[Z]$: 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 ($[A][X] = [B]$), et en utilisant la **FDTD**. Dans les sections suivantes, nous allons détailler les différentes étapes qui nous conduisent vers ce système d'équations.

2.5.1 Équations des lignes en temporel

En faisant le passage fréquence-temps par la transformée de Fourier inverse, le système d'équation (2.2) -(2.3) devient sous forme matricielle comme suit :

$$\frac{\partial[i(x,t)]}{\partial x} + \int_{-\infty}^{\infty} [Y(t - \tau)][v(\tau)] d\tau = [0] \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial[v(x,t)]}{\partial x} + \int_{+\infty}^{-\infty} [Z(t-\tau)][i(\tau)] d\tau = [0] \quad (2.5)$$

Dans le cas d'une analyse, sans prise en compte de la variation des paramètres linéiques avec la fréquence, ce système d'équations devient comme suit :

$$\frac{\partial[v(x,t)]}{\partial x} + [R][i(x,t)] + [L] \frac{\partial[i(x,t)]}{\partial t} = [0] \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial[i(x,t)]}{\partial x} + [G][v(x,t)] + [C] \frac{\partial[v(x,t)]}{\partial t} = [0] \quad (2.7)$$

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 (2.6) -(2.7) par la méthode numérique dite **FDTD** [2.2] - [2.3].

2.5.2 Discrétisation par FDTD des équations des lignes à constantes réparties

2.5.2.1 Echantillonnage spatial

Le schéma de la **figure 2.7** illustre l'application de la méthode des différences finies à points centrées (**FDTD**) ; Chaque conducteur est subdivisé alternativement en des nœuds de courant et de tension. Deux nœuds consécutifs d'un même type sont séparés par un intervalle, les deux extrémités de conducteur sont définies comme des nœuds de tension comme illustré sur la **figure 2.7** :

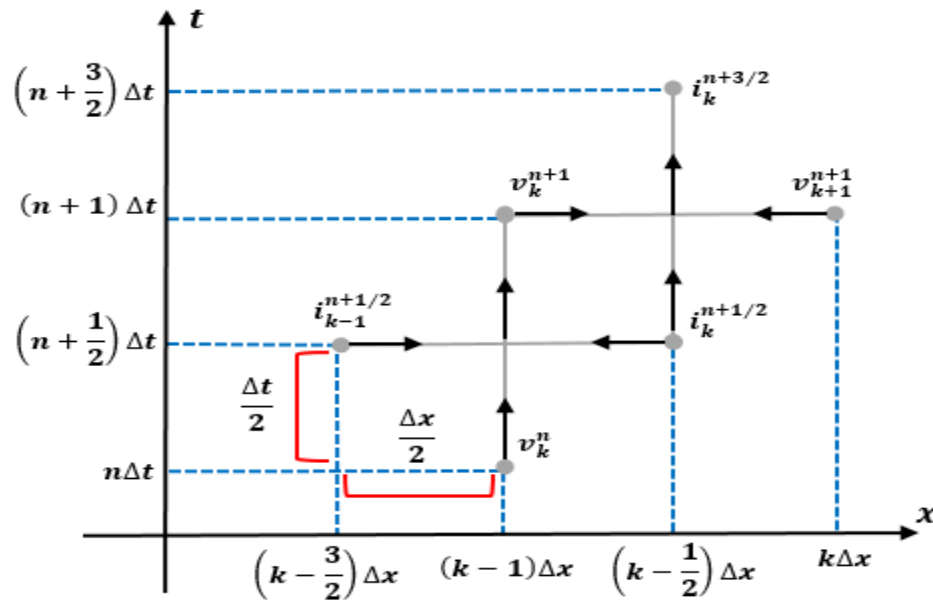


Figure 2.7 : Découpage de la branche.

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

2.5.2.2 Echantillonnage spatio-temporel

Comme dans l'espace, le courant et la tension sont décalés d'un demi-pas temporel. Plus précisément, les échantillons de courant sont en retard de $\Delta t/2$ sur la tension. Les entrelacements entre les tensions et les courants dans l'espace et dans le temps sont illustrés dans la **figure 2.8** ci-dessous.

**Figure 2.8 : Entrelacement spatial et temporel**

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

$$vp \leq \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.8)$$

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

Une démonstration présentée dans (2.2) prouve que si l'on a $v_p = \Delta x / \Delta t$, la méthode des différences finies à points centrés donne la solution avec le minimum d'erreur.

L'échantillonnage spatial et temporel, qui sont définis précédemment, conduisent à considérer les grandeurs suivantes :

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

$$[v_k^n] \equiv [v[(k-1)\Delta x, n\Delta t]] \quad (2.9)$$

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

$$[i_k^n] \equiv [i[(k-1/2)\Delta x, (n+1/2)\Delta t]] \quad (2.10)$$

Avec :

$$l \equiv k_{max}\Delta x \quad (2.11)$$

$$t_{max} \equiv n_{max}\Delta t \quad (2.12)$$

En exprimant par FDTD les dérivées spatiales et temporelles, les systèmes d'équations (2.6) et (2.7) deviennent :

$$\frac{[v_{k+1}^n] - [v_k^n]}{\Delta x} + [L] \frac{[i_k^{n+1/2}] - [i_k^{n-1/2}]}{\Delta t} + [R] \frac{[i_k^{n+1/2}] + [i_k^{n-1/2}]}{2} = [0] \quad (2.13)$$

$$\frac{[v_{k+1}^n] - [v_k^n]}{\Delta x} + [L] \frac{[i_k^{n+1/2}] - [i_k^{n-1/2}]}{\Delta t} + [R] \frac{[i_k^{n+1/2}] + [i_k^{n-1/2}]}{2} = [0] \quad (2.14)$$

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

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

$$[i_k^{n+1/2}] = \left([L] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [R] \frac{\Delta x}{\Delta t} \right)^{-1} \left[\left([L] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [R] \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) ([i_k^{n-1/2}]) - ([v_{k+1}^n] - [v_k^n]) \right] \quad (2.15)$$

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

$$[v_k^n] = \left([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [G] \frac{\Delta x}{\Delta t} \right)^{-1} \left[\left([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [G] \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) [v_k^{n-1}] - ([i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]) \right] \quad (2.16)$$

En imposant les conditions aux extrémités, les équations de récurrences (2.15) et (2.16) nous permettent de calculer la distribution des courants et des tensions le long de la ligne de transmission.

2.5.3 Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel

Comme nous l'avons vu sur la **figure 2.9**, 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 (2.9) 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 :

$$[i(0)]^{n-1/2} = \frac{[i(0)]^n + [i(0)]^{n-1}}{2} \quad (2.17)$$

$$[i(l)]^{n-1/2} = \frac{[i(l)]^n + [i(l)]^{n-1}}{2} \quad (2.18)$$

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

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2}\right) ([v(0)]^n) - \frac{[i(0)]^n}{\Delta x} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (2.19)$$

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

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2}\right) ([v(l)]^n) - \frac{[i(l)]^n}{\Delta x} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(l)]^{n-1} - \frac{[i_{k_{max}}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (2.20)$$

A partir des deux équations (2.19) et (2.20), nous pouvons déduire une écriture quadripolaire d'un tronçon de ligne (branche) dans le domaine temporel, qui sera comme suit (2.21) :

$$\begin{bmatrix} \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v^n(0)] \\ [i^n(0)] \\ [v^n(l)] \\ [i^n(l)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.5.4 Construction du système $[A][X] = [B]$

2.5.4.1 Construction de la sous matrice $[A_1]$

La sous matrice $[A_1]$ pour un réseau multi-branches (*figure 2.9*) est obtenue à partir de l'écriture quadripolaire des lignes ou des câbles constituant le réseau.

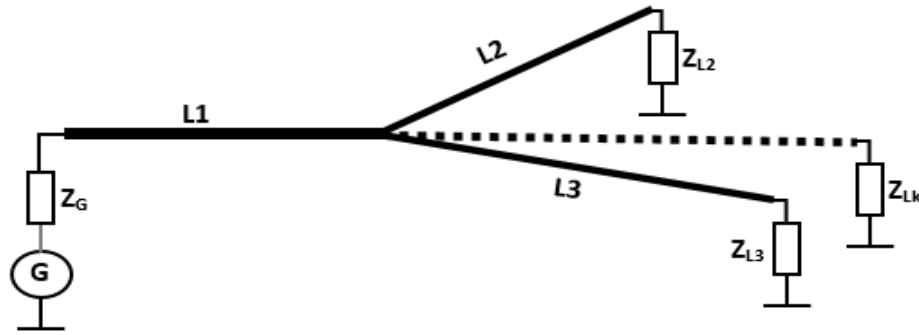


Figure 2.9 : Configuration d'un réseau multibranches.

Pour chaque ligne (câble) (*figure 2.9*), la contribution de la $i^{\text{ème}}$ ligne dans la sous matrice $[A_1]$ et ainsi définie :

$$[A1] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & [ALi] & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Où :

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

$$[ALi] = \begin{bmatrix} \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

2.5.4.2 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.

$$\sum_{k=1}^N ([Y_k^m][v_k^m] + [Z_k^m]) = [P^m] \quad (2.24)$$

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.

2.5.4.3 Construction du vecteur $[B]$

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

$$[B] = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [B_2] \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Le sous vecteur $[B_1]$ est déduit à partir de l'équation (2.21) pour chaque ligne (câble) du réseau ; il prend en compte le second membre de cette équation. Pour la $i^{\text{ème}}$ 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 :

$$[B_1] = \begin{bmatrix} \vdots \\ [BLi] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Où :

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

$$[BLi] = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

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

$$[B_2] = \begin{bmatrix} \vdots \\ [P^m] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

2.5.4.4 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 :

$$[X] = [\dots \dots [XLi] \dots]^T \quad (2.29)$$

Où :

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

$$[XLi] = [[v_i^n(0)][i_i^n(0)][v_i^n(L)][i_i^n(L)]] \quad (2.30)$$

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.

2.6 Modélisation des défauts dans le réseau électrique

2.6.1 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 2.10) :

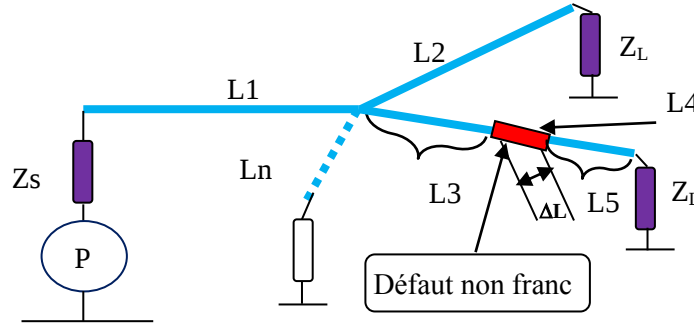


Figure 2.10 : Réseau avec défaut non franc.

Dans ce cas, la sous matrice $[A_1]$ est définie par :

$$[A1] = \begin{bmatrix} [AL1] & \dots & [0] & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ [0] & & [ALdef] & \dots \\ [0] & \dots & [0] & \dots \\ \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Où :

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

$$[ALdef] = \begin{bmatrix} \frac{[C_{def}]}{\Delta t} + \frac{[G_{def}]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C_{def}]}{\Delta t} + \frac{[G_{def}]}{2} & \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$[B_1]$ est définie par :

$$[B1] = \begin{bmatrix} [BL1] \\ \vdots \\ [BLdef] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Où :

$$[BLdef] = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C_{def}]}{\Delta t} - \frac{[G_{def}]}{2} \right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C_{def}]}{\Delta t} - \frac{[G_{def}]}{2} \right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Nous utilisons les équations de récurrences obtenues après discrétisation par **FDTD** des équations des lignes pour calculer la distribution spatiale de courant et de tension, dans ce cas et pour un défaut non franc les équations de récurrences sont définies par :

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

$$[i_k^{n+1/2}] = \left([L_{def}] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [R_{def}] \frac{\Delta x}{2} \right)^{-1} \left[\left([L_{def}] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [R_{def}] \frac{\Delta x}{2} \right) [i_k^{n-1/2}] - ([v_{k+1}^n] - [v_k^n]) \right] \quad (2.35)$$

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

$$[v_k^n] = \left([C_{def}] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [G_{def}] \frac{\Delta x}{2} \right)^{-1} \left[\left([C_{def}] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [G_{def}] \frac{\Delta x}{2} \right) [v_k^{n-1}] - ([i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]) \right] \quad (2.36)$$

Dans notre travail, afin d'élargir le champ d'application du formalisme topologique et du diagnostic des défauts, nous nous intéressons plus particulièrement aux réseaux embarqués. Ce choix est aussi motivé par la disponibilité de quelques résultats de mesures fournis par [2.11].

2.6.2 Modélisation des défauts francs

Nous examinons deux types de défauts francs ; court-circuit et circuit-ouvert.

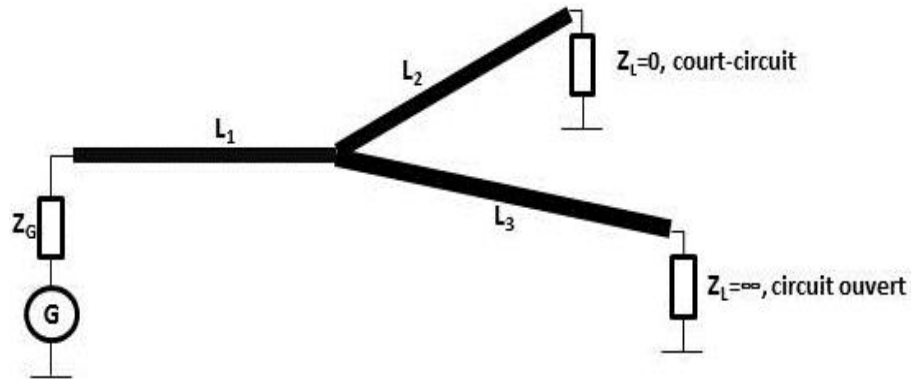


Figure 2.11 : Réseau avec défaut franc.

2.6.2.1 Court-circuit

Dans notre travail, un court-circuit est tout simplement une connexion à faible résistance entre les deux conducteurs fournissant l'énergie électrique (**figure 2.11**). Cette situation se produit lorsque $ZL=0$ (la condition à la limite est : $V=0$).

2.6.2.2 Circuit-ouvert

Dans le cas d'un circuit ouvert (*figure 2.11*), nous considérons la charge $Z_L = \infty$, la condition à la limite devient : $I = 0$.

Dans un réseau adapté, nous considérons l'adaptation d'impédance aux extrémités de ce réseau (impédance d'entrée ou l'impédance de sortie). Dans ce cas, $Z = Z_c$.

2.7 Méthode proposée : Corrélation soustractive

La méthode proposée pour l'analyse du signal réfléchi, dans le présent travail, est la corrélation soustractive (en anglais Subtractive Correlation Method (**SCM**)). C'est une méthode de traitement du signal qui permet de détecter la présence d'un signal périodique dans un signal bruité. Cette méthode consiste à soustraire une version filtrée du signal d'entrée de ce dernier, afin d'obtenir un signal corrigé de l'effet du bruit. Elle utilise un filtre passe-bas pour extraire le signal périodique, appelé "profil spectral" qui est ensuite soustrait du signal d'entrée, permettant ainsi d'éliminer les basses fréquences et les composantes périodiques du bruit. Ce signal corrigé peut ensuite être utilisé pour analyser les composantes restantes du signal d'entrée. [31]

La corrélation soustractive est souvent utilisée dans des applications telles que ; la reconnaissance de la parole, la détection de signaux radar et la mesure de la fréquence cardiaque. Elle peut être efficace pour extraire des signaux périodiques dans des signaux bruités, mais peut également introduire des artefacts si elle est mal appliquée.

2.7.1 L'inter-corrélation

L'inter-corrélation (en anglais cross-corrélation) est une mesure statistique de la relation linéaire entre deux séries de données. À l'inverse de la corrélation classique, qui mesure la relation linéaire entre deux variables dans une même série de données, l'inter-corrélation mesure la relation entre deux variables dans deux séries de données distinctes.

Cette méthode est souvent utilisée en analyse du signal pour déterminer la similarité entre deux signaux différents. Elle peut également être utilisée en analyse financière pour

déterminer la relation entre deux actifs financiers ou en recherche psychologique pour étudier la corrélation entre deux traits de personnalité différents.

La mesure de l'inter-corrélation est généralement représentée par un coefficient de corrélation croisée, qui varie de $(-1 \text{ à } +1)$. Un coefficient de corrélation croisée de $+1$ indique une corrélation positive parfaite entre les deux séries de données et un coefficient de -1 indique une corrélation négative parfaite, et un coefficient de 0 indique l'absence de corrélation linéaire entre les deux séries de données.

2.7.2 L'intra-corrélation

L'intra-corrélation est une mesure statistique de la corrélation linéaire entre les variables au sein d'une même série de données. Elle est utilisée pour évaluer la force et la direction de la relation entre deux variables qui varient ensemble au sein d'un échantillon de données. [32]

L'intra-corrélation est souvent représentée par un coefficient de corrélation qui varie de -1 à $+1$. Un coefficient de corrélation de $+1$ indique une corrélation positive parfaite entre les deux variables, un coefficient de -1 indique une corrélation négative parfaite, et un coefficient de 0 indique l'absence de corrélation linéaire entre les deux variables.

L'intra-corrélation peut être utilisée dans divers domaines, tels que la recherche en psychologie pour étudier la relation entre les traits d'une personnalité, l'évaluation des performances d'un test ou d'une mesure, ou encore en finance pour évaluer la corrélation entre les rendements de différents actifs financiers.

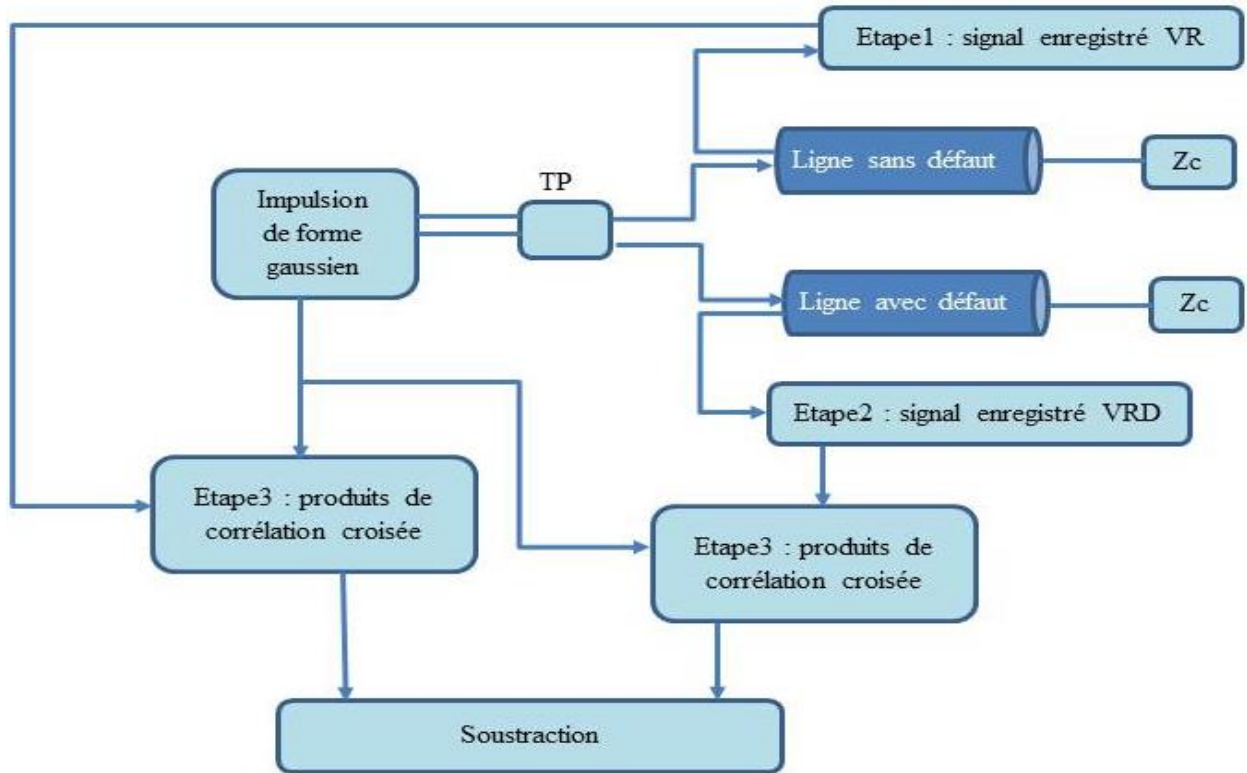


Figure 2.12 : Procédure de calcul de la corrélation soustractive.

Le calcul pour la méthode de **SCM** implique trois étapes principales, telles que représentées dans la **figure 2.11**. Tout d'abord, une impulsion de tension est injectée à travers un point d'injection **TP** dans la ligne **T** saine, et le signal réfléchi **VR** est enregistré.

Cette étape est cruciale pour capturer la réponse de référence du réseau avant que le défaut non franc ne se produise. Ensuite, un défaut non franc est introduit dans la ligne **T**, et la même impulsion de tension est injectée par le même point d'injection, et le signal réfléchi résultant avec le défaut non franc, **VRf**, est enregistré.

Enfin, deux produits de corrélation croisée sont calculés pour déterminer les caractéristiques de propagation de la ligne avec et sans défaut. Le premier produit est entre l'impulsion de tension injectée **P** et le signal réfléchi **VR**, tandis que le deuxième est entre l'impulsion de tension injectée **P** et le signal réfléchi **VRf**. La différence entre ces deux produits représente une filtration des variations de tension dans le domaine temporel. La valeur maximale de cette différence correspond au composant de la ligne

avec le même retard temporel que celui du défaut non franc, permettant de localiser le défaut dans la ligne.

2.8 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons commencé notre étude par la présentation des notions de base de réflectométrie et des lignes de transmission et sur le développement des équations de propagation. Dans la seconde partie, nous avons présenté une synthèse des principales méthodes de modélisation de ligne de transmission : dans le domaine fréquentiel et temporel. Enfin, nous intéressons par la corrélation soustractive.

Chapitre-3

Détection et localisation des défauts par la réflectométrie et la corrélation soustractive

Chapitre-3

Détection et localisation des défauts par la réflectométrie et la corrélation soustractive

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les notions de base de la réflectométrie et leurs principes et nous avons également abordé la modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique par **FDTD**. Dans ce chapitre nous allons démontrer que la corrélation soustractive permet de détecter et de localiser avec précision les défauts non francs dans les réseaux filaires à base des câbles coaxiaux. Nous allons aussi, valider le modèle développé pour un défaut dans un réseau **Y** et les résultats de l'application de corrélation soustractive.

3.2 Validation du modèle proposé

3.2.1 Cas d'un réseau Y sans défaut

Afin d'étudier la propagation le long d'un réseau de transmission simple, le câble coaxial **RG58** avec les caractéristiques illustrées dans le tableau 1 (*figure 3.1*) est considéré. Pour cette application, nous excitons notre dispositif par une source de tension définie mathématiquement comme suit :

$$e(t) = \begin{cases} 0.5(1 - \cos(2\pi ft)) & 0 < t < \frac{1}{F} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (3.1)$$

Les paramètres linéiques L , C , R et G peuvent être calculés en utilisant les expressions suivantes :

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(\frac{R_i}{A})} = 100 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \quad (3.2)$$

$$L = \frac{\frac{\mu}{2\pi}}{\ln(\frac{R_i}{A})} = 250 \times 10^{-9} \frac{H}{m} \quad (3.3)$$

$$G = Cw.tg(\delta) = 2w \times 10^{-13} \frac{S}{m} \quad (3.4)$$

$$R = (1/\pi A^2 \sigma) + (1/\sigma \pi (R_0 + R_i)(R_0 - R_i)) = 0.02 \frac{\Omega}{m} \quad (3.5)$$

Ou A , R_i et R_0 sont les rayons des conducteurs interne, externe et externe ; μ et ϵ Sont respectivement la perméabilité magnétique et la permittivité diélectrique du matériau entre les conducteurs ; et $tg(\delta)$ est la tangente de perte diélectrique.

Table 3.1 : Fiche technique d'un câble coaxial RG58 C/U [32]

Type	RG58 C/U
Ame	Cuivre étamé multibrins (19× Ø 0,18 mm)
Isolation	Polyéthylène plein Ø 2,95 mm
Blindage général	Tresse en cuivre étamé Taux de recouvrement ≥ 90%
Gaine externe	PVC noir
Tension crête	1900 V DC pendant 1mm
Résistance linéique à 20°C	≤ 38 Ω/km Ω/km
Capacité nominale a 800 Hz	Maximum 100 pF/m
Impédance	50 +/- 2 à 200 MHz Ω

Nous considérons une configuration simple d'un réseau Y des câbles coaxiaux **RG58** dont les paramètres linéiques L , C , R et G peuvent être calculés en utilisant les expressions précédentes.

Nous allons étudier ce dernier cas, dont les dimensions sont les suivantes : $L1 = 1$ m, $L2 = 4$ m, et $L3 = 1$ m. Ces trois tronçons de ligne $L1$, $L2$ et $L3$ forment une jonction J .

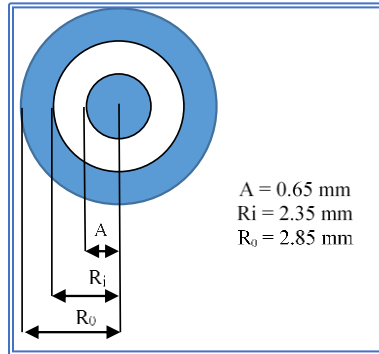


Figure 3.1 : Section transversale du câble utilisé

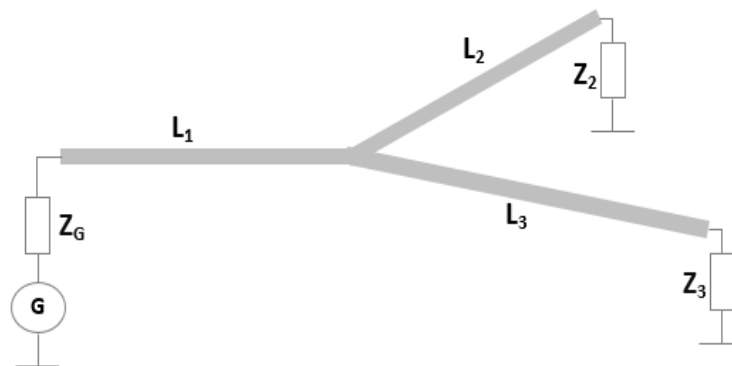
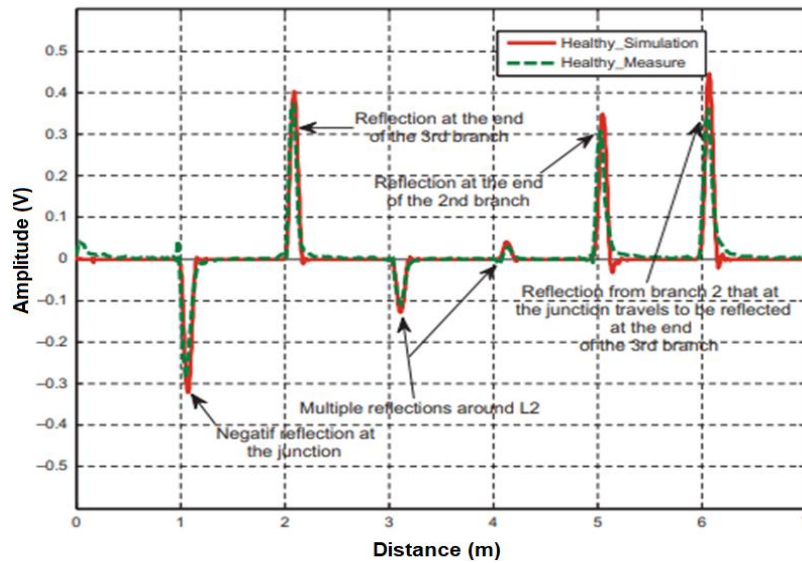


Figure 3.2 : réseau Y sans défaut

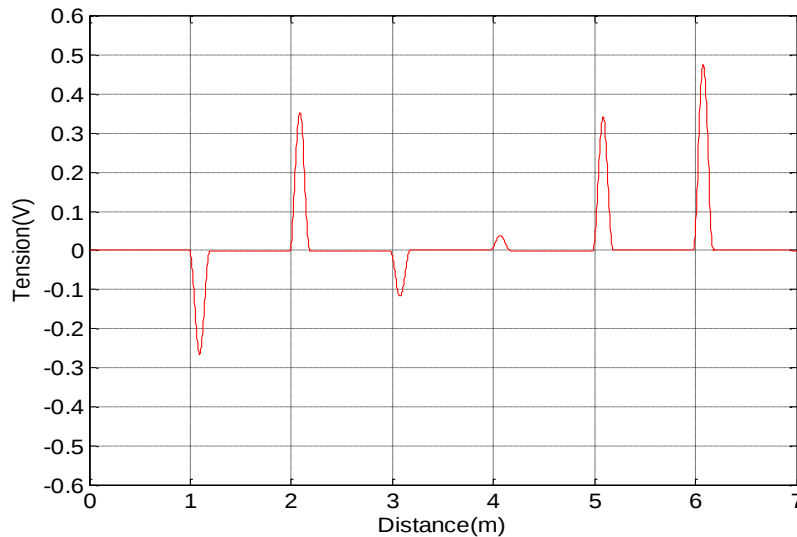
La **figure 3.3** expose les résultats de calculs obtenus en utilisant le formalisme topologique en temporel ($[A][X] = [B]$) ; nous notons que nos résultats sont en très bon accord avec ceux publiés par [34]. Cela consolide la validation de notre approche. Cependant, la différence minimale entre les mesures et nos simulations est due selon notre point de vue de l'effet de la variation des paramètres linéiques avec la fréquence. Ainsi, on peut dire que nos résultats sont satisfaisants et accordent aux prévisions théoriques concernant en particulier le retard à la propagation et les coefficients de réflexion aux extrémités :

- Le premier pic (négatif) qui apparaît à 1m sur la **figure 3.3** correspond à un changement d'impédance au niveau de la jonction J .

- Le deuxième pic (positif) apparaît à 2m (*figure 3.3*) correspond à la terminaison du tronçon **L3**. Le signe positif est dû à la nature de l'extrémité qui est ouverte ($ZL=\infty$).
- Le 5^{ème} pic (positif) à 5m correspond à l'extrémité ouverte du tronçon **L2**,
- Le dernier pic (positif) à 6m correspond à l'extrémité ouverte du tronçon **L3**. D'autres pics se succèdent ou entre les pics suscités correspondent à d'autres chemins multiples.



(a) : Résultat obtenu par le modèle publié [34]



(b) : Résultat obtenu par le modèle proposé

Figure 3.3 : Validation des résultats obtenus par les résultats publiés [34]

3.2.2 Cas d'un réseau affecté par un défaut franc

Nous allons examiner deux types de défauts francs ; le court-circuit et le circuit-ouvert :

3.2.2.1 Cas d'un Court-Circuit (C-C)

Dans notre travail, un court-circuit est tout simplement une connexion à faible résistance entre les deux conducteurs fournissant l'énergie électrique (*figure 3.4*). Cette situation se produit lorsque $ZL=0$ (C-à-d : Condition $V=0$).

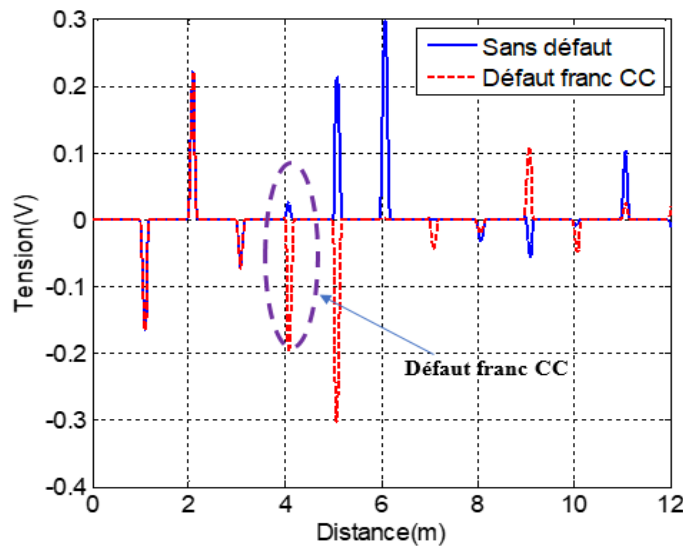


Figure 3.4 :Réflectogramme correspondant au réseau Y avec défaut franc (C-C)

En observant la *figure 3.4*, nous constatons le pic qui correspond à la jonction **J** ($L1 = 1m$) et celui correspondant au tronçon **L3** à 2m ($ZL=\infty$). Nous observons ensuite le pic négatif à 4m qui correspond au défaut franc (**C-C**). Les autres pics se succèdent ensuite correspondant à d'autres chemins multiples dans le réseau.

3.2.2.2 Cas d'un circuit-ouvert

En circuit ouvert (C-O) (*figure 3.5*), nous considérons la charge $ZL = \infty$, la condition à la limite devient : $I = 0$. Dans ce cas le réseau est affecté par un défaut franc (C-O) dans la branche **L2** situé à distance de **4m** de la source. Les *figures 3.4*

et 3.5 illustrent la comparaison entre les résultats obtenus, en utilisant le formalisme topologique entre réseau sain et affecté par défaut franc, et les résultats publiés par [34].

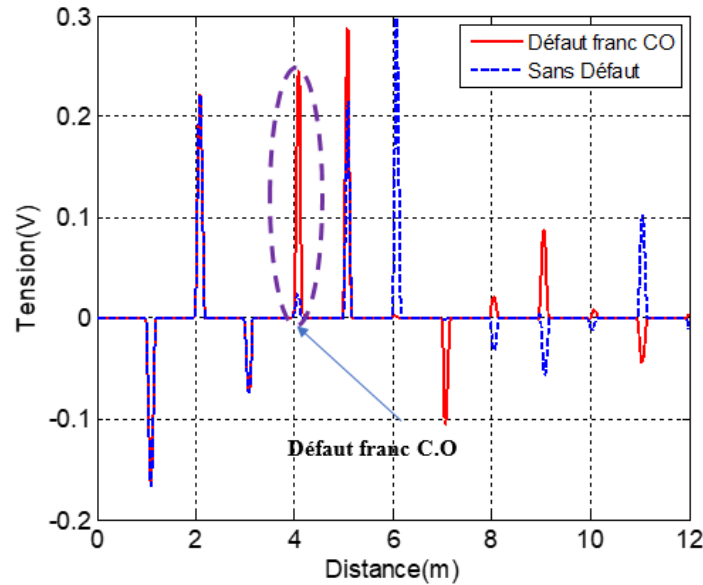


Figure 3.5 : Réflectogramme correspondant au réseau Y avec défaut franc (C-O)

En observant la **figure 3.5**, nous remarquons le pic correspondant à la jonction **J** ($L1 = 1m$) et celui correspondant au tronçon **L3** à 2m ($ZL = \infty$). Nous examinons ensuite le pic positif à 4m qui correspond au défaut franc (C.O). Les autres pics se succèdent ensuite correspondent à d'autres chemins multiples dans le réseau.

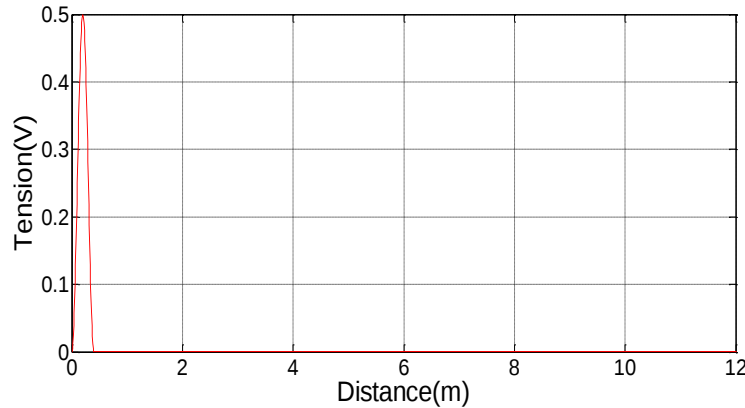
3.3 Application de la corrélation soustractive pour la détection et localisation des défauts non francs

3.3.1 Cas d'une ligne simple

On considère une ligne de transmission de longueur de **6m** alimenté par un générateur de type gaussien (voir **figure 3.6 (a)**).



(a) : Ligne simple

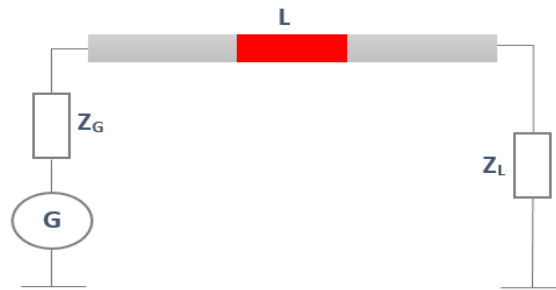


(b) : Réflectogramme d'une ligne simple

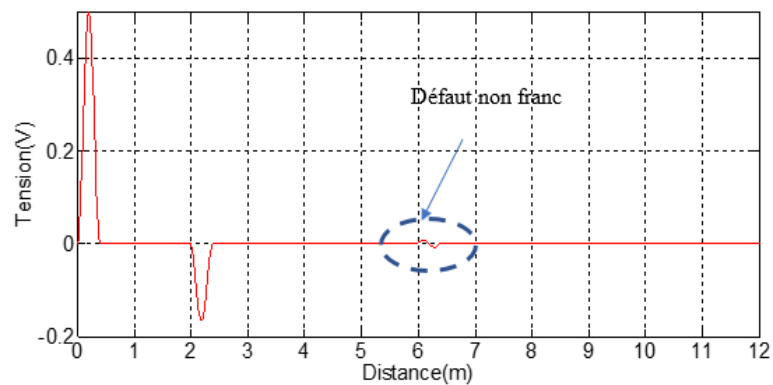
Figure 3.6 : Résultats obtenus pour une ligne simple

Une étude paramétrique est faite pour montrer l'efficacité de la méthode de corrélation soustractive (Subtractive Correlation Method (**SCM**)) dans l'amplification de l'effet faible des défauts non francs dans la réponse de la réflectométrie, quand la ligne du câble coaxial est affectée par un défaut non franc.

Tout d'abord, la configuration d'une ligne présentée dans la **figure 3.6** à est prise en compte. Le défaut non franc est situé dans la ligne de transmission à une distance $LF1 = 3 \text{ m}$, comme indiqué dans la **figure 3.7 (a)**. On note que la taille de défaut non franc est représentée par : ΔL ($\Delta L = 2 \text{ cm}$).



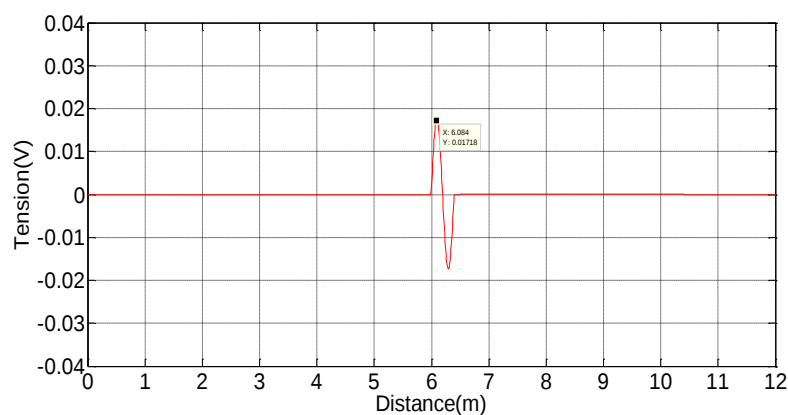
(a) : Ligne simple avec défaut non franc



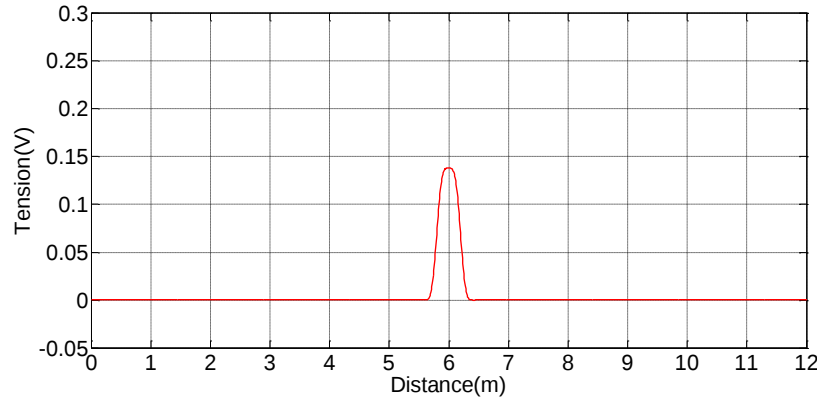
(b) Réflectogramme d'une ligne simple avec défaut non franc

Figure 3.7 : Résultats obtenus pour ligne simple avec défaut non franc

Dans la **figure 3.7 (b)**, la réponse de réflectométrie d'un défaut non franc située à une distance $FLI= 3m$ est présentée.



(a) : Signal de différence d'une ligne simple avec défaut non-franc



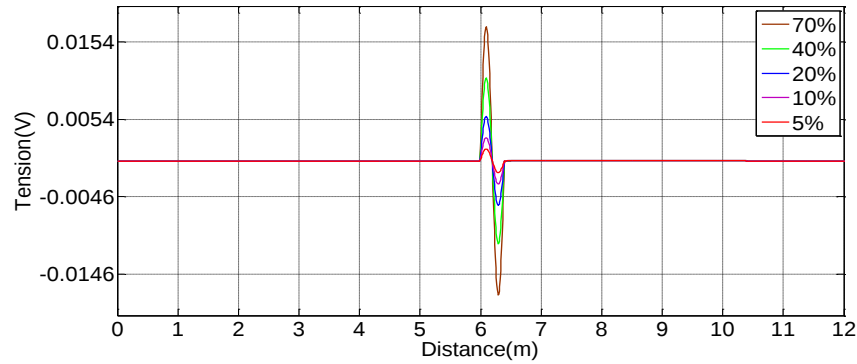
(b) : Signal corrélé d'une ligne simple avec défaut non franc

Figure 3.8 : Résultats de corrélation obtenus pour ligne simple avec défaut non-franc

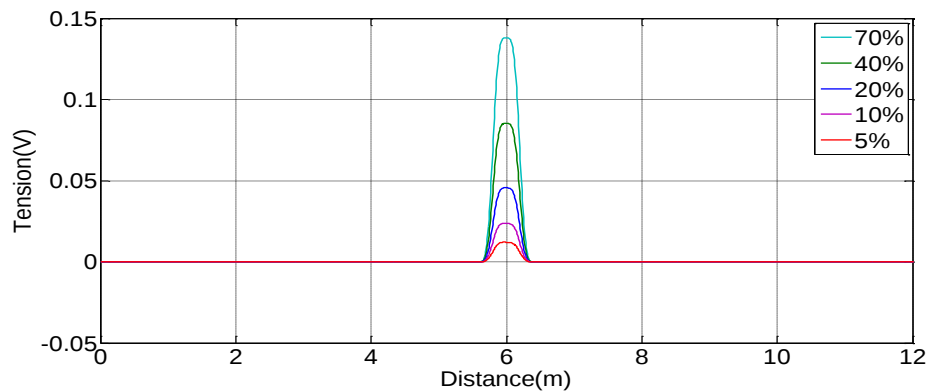
Lorsque la méthode **SCM** est utilisée, la variation d'amplitude de défaut non-franc devient beaucoup plus évidente. En effet, l'amplitude de réflexion résultante par le défaut non franc est supérieure à celle du signal de différence entre la ligne saine et la ligne affectée, comme illustré dans la **figure 3.8**.

Lorsque l'on prend en compte de nombreuses valeurs d'impédance ($Z_c + \Delta Z_c$) pour les défauts non-francs, où ΔZ_c est unique pour chaque défaut non-franc, il devient évident que différentes valeurs d'impédance des défauts non-francs entraînent des variations dans les réponses de réflectométrie.

Lorsque la méthode **SCM** est utilisée, les variations d'amplitude des défauts non-francs deviennent beaucoup plus apparentes. En effet, l'amplitude des réflexions résultantes des défauts non-francs est supérieure à celle du signal de différence entre la ligne saine et la ligne affectée, comme le montre la **Figure 3.9**



(a) : Signal de différence avec variation d'impédance



(b) : Signal corrélé avec variation d'impédance

Figure 3.9 : Résultats obtenus de corrélation (avec variation d'impédance) pour ligne simple avec défaut non-franc

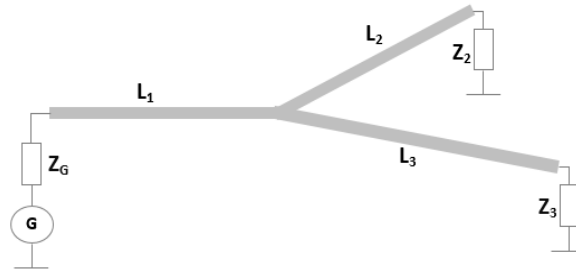
Tableau 3.2 : L'efficacité de la méthode SCM dans l'amplification de l'amplitude de défaut non-franc (ligne de transmission simple).

Variation d'impédance	Amplitude de signal de différence	Amplitude de signal corrélé
5%	0.001	0.01
10%	0.002	0.02
20%	0.005	0.04
40%	0.01	0.08
70%	0.017	0.1

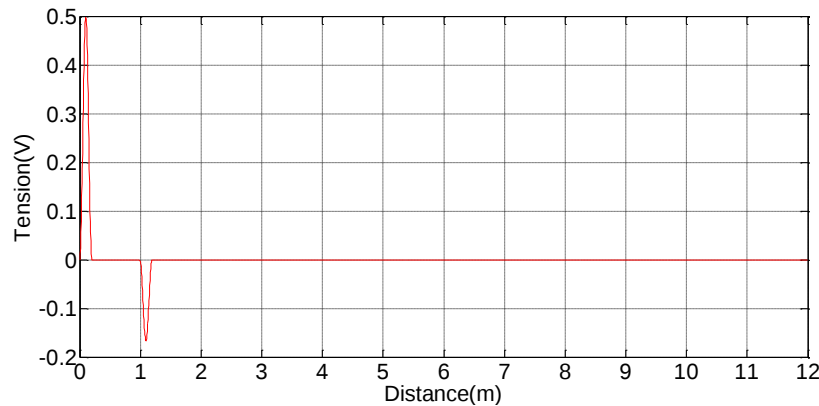
D'après le tableau ci-dessus, on peut constater que lorsque l'impédance augmente, l'amplitude du signal de différence ainsi que celle du signal corrélé augmentent. Toutefois, il est important de noter que l'amplitude du signal corrélé est supérieure 10 fois plus à celle du signal de différence, mettant ainsi en évidence l'importance de la corrélation soustractive.

3.3.2 Cas d'un Réseau Y

Une étude paramétrique est présentée pour prouver l'efficacité de la méthode de corrélation soustractive (*SCM*) dans l'amplification de l'effet faible des défauts non francs dans la réponse de réflectométrie d'un réseau complexe **Y** affecté par un défaut non franc.



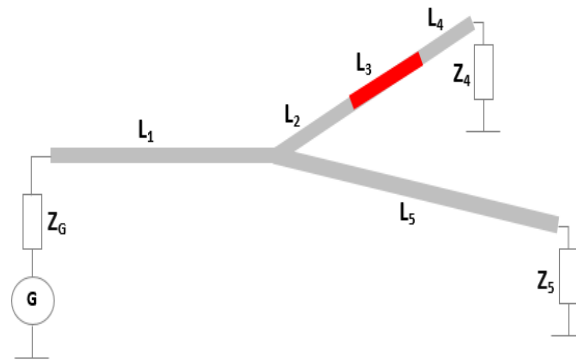
(a) : Réseau Y sans défaut



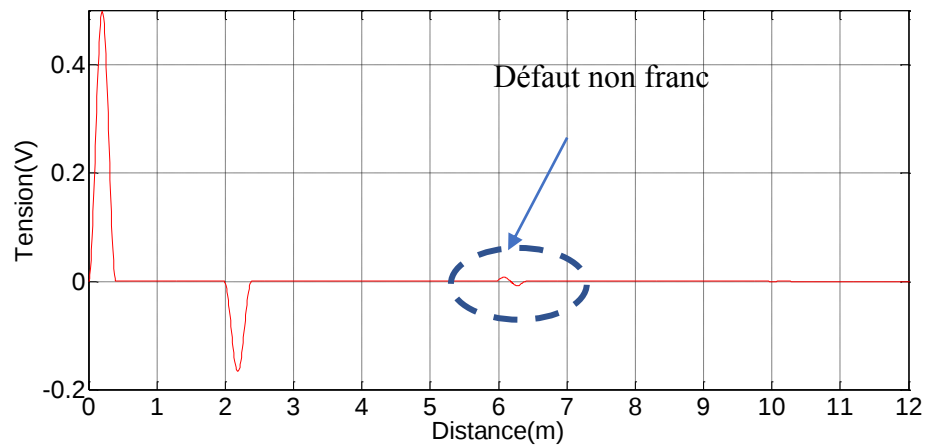
(b) : Réflectogramme d'un réseau Y sans défaut

Figure 3.10 : Résultats obtenus pour réseau Y sans défaut

Tout d'abord, la configuration du réseau vérifiée dans la **figure 3.10** est prise en compte. Le défaut non-franc est situé à une distance $LFI = 3$ m comme indiqué dans la **figure 3.11(a)**. Il a été noté que la taille du défaut non-franc est représentée par ΔL ($\Delta L = 2$ cm).



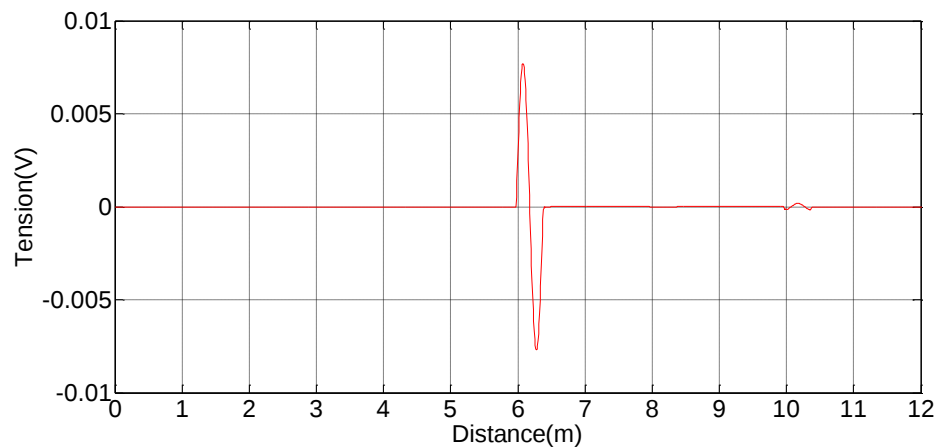
(a) : Réseau Y avec défaut non-franc



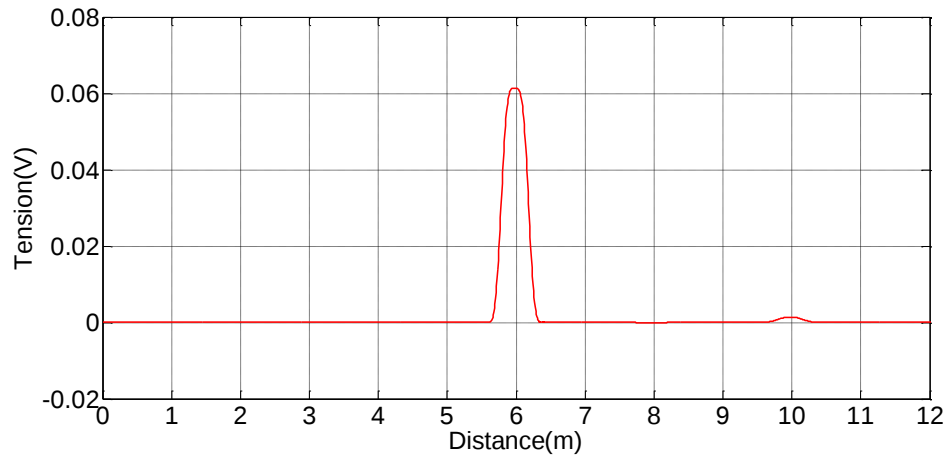
(b) : Réflectogramme d'un réseau Y avec défaut non-franc

Figure 3.11 : Résultat obtenu pour réseau Y avec défaut non-franc

La **figure 3.11(b)** présente la réponse de réflectométrie d'un défaut non-franc située à une distance $FLI = 6m$.



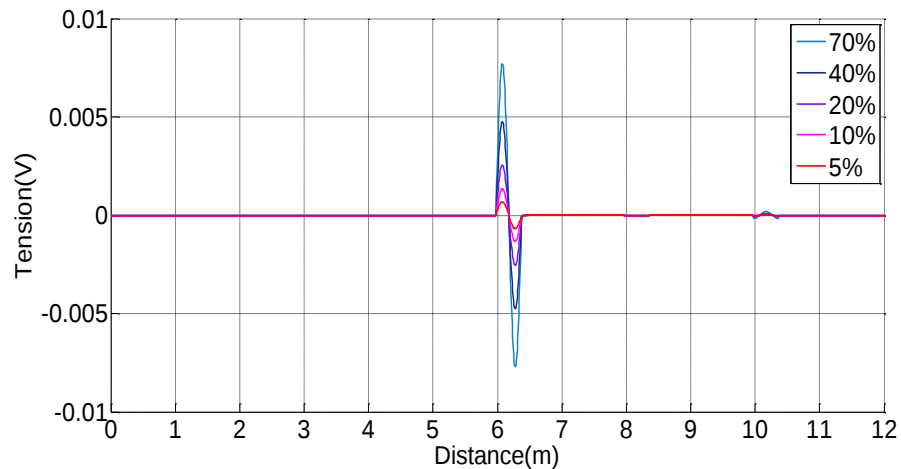
(a) : Signal de différence d'un réseau Y avec défaut non-franc



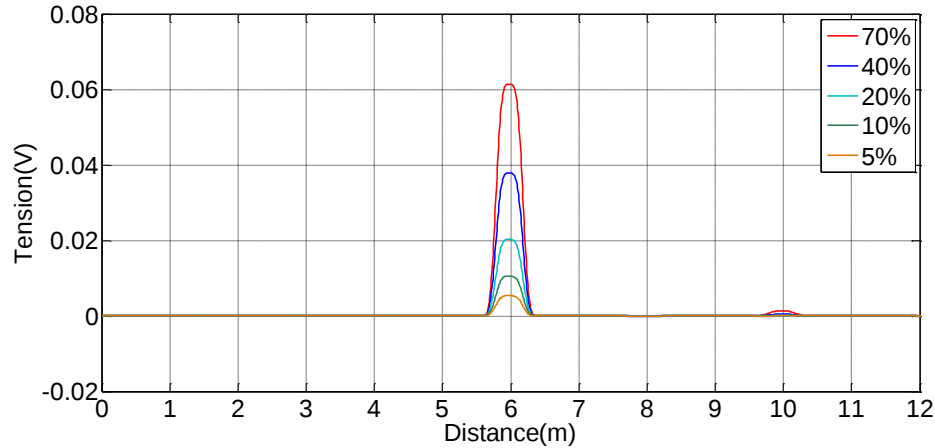
(b) Signal correlé d'un réseau Y avec défaut non-franc

Figure 3.12 : Résultat obtenu pour réseau Y avec défaut non franc

Lorsqu'on utilise la méthode **SCM**, la variation d'amplitude du défaut non franc devient beaucoup plus apparente. En effet, l'amplitude de réflexion causée par le défaut non franc est supérieure à celle du signal de différence entre le réseau sain et le réseau affectée, comme le montre la **Figure 3.12**.



(a) : Signal de différence avec variation d'impédance d'un réseau Y avec défaut non franc



(b) : Signal corrélé avec variation d'impédance d'un réseau Y avec défaut non franc

Figure 3.13 : Résultats de corrélation (avec variation d'impédance) obtenu pour réseau Y avec défaut non franc

Il est évident que différentes valeurs d'impédance des défauts non francs entraînent des variations dans les réponses de réflectométrie lorsqu'on prend en compte de nombreuses valeurs d'impédance pour les défauts non francs ($Z_c + \Delta Z_c$), où ΔZ_c est unique pour chaque défaut non franc.

Les variations d'amplitude des défauts non francs deviennent beaucoup plus apparentes lorsque la méthode **SCM** est utilisée. En effet, comme le montre la **Figure 3.13**, l'amplitude des réflexions résultant des défauts non francs est supérieure à celle du signal de différence entre le réseau sain et le réseau affectée.

Tableau 3.3 : L'efficacité de la méthode SCM dans l'amplification de l'amplitude de défaut non franc (réseau Y).

Variation d'impédance	Amplitude de signal de différence	Amplitude de signal corrélé
5%	0.0005	0.005
10%	0.001	0.01
20%	0.002	0.02
40%	0.004	0.03
70%	0.007	0.06

Selon le tableau ci-dessus, plusieurs observations peuvent être faites dans le cas d'un réseau complexe **Y** affecté par un seul défaut non franc. En premier lieu, on remarque que l'amplitude du signal différentiel et du signal corrélé augmente en conséquence à l'augmentation de l'impédance.

De plus, il est intéressant de noter que l'amplitude du signal corrélé est supérieure 10 fois plus à celle du signal différentiel, ce qui signifie l'importance de la corrélation soustractive dans la détection des défauts souples dans un réseau complexe.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle méthode, basée sur la corrélation soustractive, a été définie et ses principes ont été exposés. Cette méthode a été étudiée et proposée en réponse à la problématique soulevée auparavant : comment détecter des impulsions de faibles amplitudes à partir d'un réflectogramme temporel ?

En effet, cette méthode montre la capacité d'amplifier les signaux de faibles amplitudes, ce qui permet une meilleure identification. Cette caractéristique constitue un outil adéquat pour la détection de défauts non-francs, comme nous avons pu le constater à partir des résultats des simulations obtenus.

En outre, cette méthode a montré que l'amplitude du pic de défaut détecté par la méthode de corrélation soustractive (**SCM**) est plus importante que celle obtenue avec la méthode du signal de différence. En effet, cette amplitude est supérieure 10 fois plus à celle du signal de différence. Finalement, les valeurs de gain calculées dans les tableaux précédents illustrent l'amélioration apportée par la méthode **SCM** par rapport à la méthode du signal de différence.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail mené durant ce mémoire a permis de développer une méthodologie basée sur la réflectométrie en vue d'un diagnostic fiable des câbles dont le but est de détecter et de localiser les défauts dans les réseaux filaires. Nous avons tout d'abord positionné les travaux de ce mémoire dans leur contexte actuel, en présentant les différentes méthodes de diagnostic existantes et en s'intéressant à la réflectométrie dans le domaine temporel.

Nous avons présenté dans le premier chapitre la problématique posée dans cette étude. Ce chapitre a permis de définir les différents types des défauts dans les câbles (francs et non francs). Ces défauts sont la conséquence de plusieurs facteurs externes (erreurs de manipulation, corrosion, oxydation, environnement, etc.) ou internes (défauts de fabrication, vieillissement du câble, etc.).

Dans le deuxième chapitre, nous avons introduit l'état de l'art des techniques développées dans les réseaux filaires. Un rappel sur les notions de base de la réflectométrie, la théorie des lignes de transmission, le développement des équations de propagation et le choix des principales méthodes de modélisation des lignes de transmission (dans le domaine fréquentiel et temporel avec la FDTD) ont été présenté afin de choisir les meilleurs outils théoriques à appliquer.

Dans le troisième chapitre, nous avons illustré les résultats obtenus après la modélisation et le diagnostic des défauts dans une ligne et dans un réseau Y. Ces résultats nous ont permis de démontrer l'efficacité de la méthode de la corrélation soustractive dans l'amplification de l'effet faible des défauts non francs dans la réponse de réseau.

En perspectives, nous proposons d'examiner d'autres types de réseaux (réseaux en étoile, en bus, etc.) ainsi que l'utilisation d'autres techniques pour la détection et la localisation.

On propose aussi, l'utilisation de l'intelligence artificielle pour la prédiction des défauts dans les câbles filaires.

Références Bibliographiques

- [1] W. Ben Hassen, « Etudes de Stratégies de Diagnostic embarque des réseaux Filaires Complexes », Université De Toulouse, 2014.
- [2] N.Berrabah, « Problématiques inverses pour le diagnostic de câble électrique à partir de mesure de réflectométrie », Université de RENNES sous le sceau de l'université Bretagne ,2017
- [3] M.Kamel Smail, « développement d'une méthodologie dédiée à la réflectométrie en vue du diagnostic filaire » Université PARIS-SUD XI Faculté des sciences d'Orsay,2010
- [4] https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2012-07/formation_reseau.pdf .21:27 ,12 JUIN 2023
- [5] (https://sti2d.ecolelamache.org/ii_rseaux_informatiques_7_topologie_des_rseaux.html 21 :43 ,12 JUIN 2023
- [6] « Les types de réseaux informatiques à connaître », *1&1 Digitalguide*, 10 août 2017 ([lire en ligne](#) [[archive](#)], consulté le 3 mars 2018
- [7] DJ.Hanane et CH.Hanane,Mise en œuvre d'un proxy filtrant sous linux,Université IBN-KHALDOUN de Tiaret,2016
- [8] « [réseau étendu](#) » [[archive](#)], *Grand Dictionnaire terminologique*, [Office québécois de la langue française](#) (consulté le 7 avril 2022
- [9] V. Judalet, « Architecture robuste de contrôle pour un système by-Wire en partage avec le conducteur », Thèse de Doctorat, Université Paris-Saclay, 2016
- [10] M. Pays, “Localisation de défauts dans les réseaux de câbles d'énergie,” *Technique de l'ingénieur*, Doc 4 540, Juin 1987.
- [11] O. OSMAN, « Méthodes de diagnostic en ligne, embarqué et distribué dans les réseaux filaires complexes, Université Clermont Auvergne »,2020.
- [12] H. Ward Sliver et M. J. Wilson, « The ARRL Handbook for Radio Communications, 87th ed. The American Radio Relay League », 2010.
- [13] Les supports physiques de transmissions : le câble coaxial, La Lavoisier.
- [14] A. Manet, « Étude de défauts non francs sur des câbles en vue du diagnostic »,

- UNIVERSITE PARIS-EST ECOLE DOCTORALE Mathématiques et STIC (MSTIC),2016.
- [15] <https://www.elandcables.com/fr/the-cable-lab/faqs/faq-what-are-the-main-causes-of-electrical-cable-failure> . 21 :32 ,12 JUIN 2023
- [16] L. El Sahmarany, « Méthodes d'amélioration pour le diagnostic de câble par réflectométrie », UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL - CLERMONT II ,2013.
- [17] M. Franchet. Réflectométrie appliquée à la détection de défauts non francs dans les torons de câbles. Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ PARIS-EST (2012)
- [18] K R. Wheeler, Dogan A. Timucin, I. Xander Twombly, Kai F. Goebel, and Phil F. Wysocki. Aging aircraft wiring fault detection survey. NASA Ames Research Center (2007)
- [19] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/problematiques-communes-des-reseaux-electriques-du-fonctionnement-au-comptage-42266210/diagnostic-filaire-in118/reflectometrie-in118niv10003.html>] 21 :35,12 JUIN 2023
- [20] clayton R Paul Analysis of multiconducteur transmissionlines John Wiley & sons,2007
- [21] Nour Taki,diagnosis of soft faults in complex wired networks.signal and image processing.Université Paris-saclay,2022 english. NNT : 2022UPASG004. Tel-03964282
- [22] I,Eddine. BENFRIDJA, « Application Et Méthode D'estimation Hauts Résolutions En Traitement De Signal Pour L'identification D'un Défaut Dans Un Réseau De Transmission ».
- [23] N. Ravot, « Analyse et diagnostic de réseaux filaires complexes par réflectométrie », PhD thesis, Faculté des Sciences d'Orsay, Juin, 2007
- [24] P. Tsai, Chet Lo, You Chung Chung, et C. Furse, « Mixed-signal reflectometer for location of faults on aging wiring », IEEE Sensors Journal, vol. 5, no 6, p. 1479-1482, déc. 2005.
- [25] Y. C. Chung, C. Furse, et J. Pruitt, « Application of Phase Detection Frequency Domain Reflectometry for Locating Faults in an F-18 Flight Control Harness », IEEE Trans.

- Electromagn. Compat., vol. 47, no 2, p. 327-334, mai 2005.
- [26] N. Kamdor et C. Furse, « An inexpensive distance measuring system for location of robotic vehicles », in IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1999 Digest. Held in conjunction with: USNC/URSI National Radio Science Meeting (Cat. No.99CH37010), Orlando, FL, USA, 1999, vol. 3, p. 1498-1501, Consulté le: mars 12, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/788227/>.
- [27] (<https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9flectom%C3%A8tre>) 21 :37,12 JUIN 2023
- [28] P. Smith, C. Furse, and J. Gunther. « Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location ». IEEE Sensors Journal (2005).
- [29] Incarbone L., Evain S., Ben Hassen W., Auzanneau F., Dupret A., Bonhomme Y., Morel F., Gabet R., Solange L., Zanchetta A. Système intégré de surveillance de l'état des câbles basé sur OMTDR SmartCo : Un système de réflectométrie embarqué pour assurer l'auto-test du harnais ; Actes de la 10e conférence IEEE 2015 sur l'électronique industrielle et les applications (ICIEA); Auckland, Nouvelle-Zélande. 15-17 juin 2015; pages 1761–1765. [[CrossRef](#)] [[Google Scholar](#)]
- [30] A.Laib “contribution à la classification des défauts dans le réseau électrique” , université de jijel,2018 .
- [31] [Christian Jutten, théorie du signal](#), Univ. Grenoble Alpes - Polytech' Grenoble Juillet 2018
- [32] https://www.jmp.com/fr_fr/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation.html) 21 :41 ,12 JUIN 2023
- [33] <https://www.sermes.fr/fils-et-cables/batiment-et-tertiaire/voix-donnees-images-vdi-coaxiaux-descentes-d-antennes-video-et-rg-professionnel/coaxial-rg/rg58-cu/coaxial-rg58-cu-tgl>
- [34] H.Boudjefdjouf, R.Mehasni , A.Orlandi, H. R. E. H., Bouchekara, F.de Paulis , M.,K.Smail “Diagnosis of Multiple Wiring Faults Using Time Domain Reflectometry and Teaching–Learning Based Optimization”, Electromagnetics , Vol.35,no.1 ,pp.10-24, 2015.

ملخص

تعتمد نجاعة شبكة نقل البيانات بشكل رئيسي على جودة الوسيلة الفيزيائية التي تعتمد عليها (شبكة الأسلاك الناقلة من نوع الكواكسيال). لكي يتم ذلك يجب كشف وتحديد العيوب والأعطاب الواضحة (دائرة مقصورة، ودائرة مفتوحة) والعيوب غير الواضحة (هشاشة، تدهور عازل الكابلات الكهربائية، إلخ). هناك العديد من الطرق لتشخيص العيوب، بما في ذلك الطرق على قياس الانعكاس (الفحص البصري، طريقة الأشعة الصينية، إلخ...) والطرق التي تعتمد على قياس الانعكاس التي تم تفصيلها في الفصل الأول.

يهدف هذا العمل إلى اقتراح طرق تسمح بكشف وتحديد العيوب والأعطاب غير الواضحة بدقة في الشبكات السلكية وتحسين أداء كابلات الكواكسيال باستخدام قياس الانعكاس والترابط المنقوص.

Abstract

The reliability of a data transmission network depends primarily on the quality of the transmission's cables (coaxial cable). This requirement requires the detection and localization of soft faults (short-circuits, open circuits), and hard faults (weakness, degradation of cable insulation, etc.). For diagnosing faults, many methods are used to detect and locate faults, including non-reflectometry-based methods (visual inspection, X-ray method, capacitive and inductive methods) and reflectometry-based methods detailed in the first chapter.

The objective of this work is to propose methods that accurately detect and localize non-clear faults in wired networks and optimize the performance of coaxial cables using reflectometry and subtractive correlation.

Résumé

La fiabilité d'un réseau de transmission de données repose en premier lieu sur la qualité de son support (réseau de câbles). Cette exigence nécessite la détection et la localisation des défauts francs (Court-Circuit (C-C), Circuit-Ouvert (C-O), et des défauts non francs (vieillessement, dégradation de la gaine des câbles électriques, etc.), Pour détecter et localiser les défauts (francs et non francs), il y a plusieurs méthodes pour diagnostiquer les défauts, méthodes non basées sur la réflectométrie (Inspection

visuelle, Méthode par rayons X, Méthodes capacitive et inductive), méthodes basées sur la réflectométrie nous avons détaillés dans le premier chapitre.

L'objectif de ce travail est de proposer des méthodes qui permet de détecter et localiser les défauts non francs avec précision dans les réseaux filaires et d'optimiser les performances des câbles coaxiaux, en utilisant la réflectométrie et la corrélation soustractive.