

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

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE**  
**N° D'ORDRE: RES07**



**DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**FILIERE: ELECTROTECHNIQUE**  
**OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par : GASMI Sohaib**

**Intitulé**

**Détection et localisation des défauts dans les**  
**Réseaux électriques filaires par la**  
**réflectométrie et les réseaux de neurones**

**Soutenu le : 04 / 07 /2022 devant le jury composé de :**

Dr. DJERIOU Salim	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. LAIB Abderrzak	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Encadreur
Dr. KHENNOUF Salah	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co-Encadreur
Dr. BENGUESMIA Hani	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année Universitaire: 2021/2022**



# Remerciements



*Nous tenons à remercier to d'abord notre créateur {Allah} pour nous avoir donné de la force à accomplir ce travail.*

*Nos encadreur : Dr: L.A.B Abderrzak et Dr. KHENNOUF Salah pour leurs aides et leurs conseils. Tous les membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous font En acceptant d'examiner ce mémoire et pour leurs Bienveillantes attentions.*

*Nous adressons nos remerciements à tous nos professeurs honorés depuis plus de 3 ans ...*

*Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous Nos proches et amis qui nous ont toujours soutenues et Encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.*



# ***Dédicaces***

*Je remercie dieu de m'avoir donné le courage et la  
volonté*

*tout au long de mon cursus.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents ;*

*Mes grands-mères et Mes grands-pères ;*

*Mes soeurs ; Mes frère*

*Mes cousins ; Mes cousines ; Mes tantes ; Mes oncles ;*

*Toute la famille GASMI ;*

*Mes amis (es) ;*

*Tous les gens qui m'ont soutenu durant mes  
études.*

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Le premier câble électrique inventé par Thomas Edison .....	13
Figure 1.2: Les types de câbles .....	15
Figure 1.3: Description matérielle d'un câble coaxial .....	14
Figure 1.4: Paire torsadée .....	15
Figure 1.5: Paire torsadée blindée .....	16
Figure 1.6: Paire torsadée écrantée .....	16
Figure 1.7: Les câbles dans un réseau de distribution d'énergie .....	17
Figure 1.8: Exemple de câblage dans le domaine aéronautique .....	17
Figure 1.9: Réseau filaire d'un avion .....	18
Figure 1.10: Câblage électrique d'une voiture ancienne Vs une voiture moderne .....	18
Figure 1.11: Défauts dans un câble monophasé .....	20
Figure 2.1: Principe de la réflectométrie .....	25
Figure 2.2: Découpage de la branche .....	26
Figure 2.3: Entrelacement spatial et temporel .....	27
Figure 2.4: Configuration d'un réseau multi-branches .....	29
Figure 2.5: Défaut franc dans le réseau électrique .....	31
Figure 2.6: Ligne bifilaire .....	32
Figure 2.7: Les dimensions du câble .....	32
Figure 2.8: Représentation schématique d'une ligne bifilaire simple .....	33
Figure 2.9: Réflectogramme correspondant à une ligne bifilaire simple .....	33
Figure 2.10: Représentation schématique d'un réseau Y bifilaire .....	34
Figure 2.11: Réflectogramme correspondant à un réseau Y bifilaire .....	34
Figure 2.12: Représentation schématique d'un réseau en Etoile bifilaire .....	35
Figure 2.13: Réflectogramme correspondant à un réseau en Etoile bifilaire .....	35
Figure 2.14: Exemple de câble coaxial .....	36
Figure 2.15: Réflectogrammes obtenus pour un câble coaxial de différentes longueurs .....	36
Figure 2.16: Représentation schématique d'un réseau Y coaxial .....	37
Figure 2.17: Réflectogramme correspondant à un réseau Y coaxial .....	37
Figure 3.1: Neurone Biologique .....	44
Figure 3.2: Structure d'un neurone artificiel .....	44
Figure 3.3: Les étapes d'un plan d'expériences .....	47

Figure 3. 4: Une ligne simple adaptée (pour câble bifilaire), affectée par un défaut franc. ....	48
Figure3. 5: Signal de différence d'une ligne bifilaire affecté par un défaut franc. ....	48
Figure 3. 6: Application d'un réseau neurones câble bifilaire pour ligne simple. ....	49
Figure 3. 7: Réseaux Y bifilaire adapté. ....	50
Figure 3. 8: Signal de différence d'un réseau bifilaire en Y affecté par un défaut franc. ....	51
Figure 3. 9 :Application d'un réseau neurones câble bifilaire pour réseaux Y. ....	51
Figure 3. 10: Une ligne simple adaptée (pour câble coaxial), affectée par un défaut franc. ....	52
Figure 3. 11: Signal de différence d'une ligne coaxiale affecté par un défaut franc. ....	53
Figure 3. 12: Réseaux Y coaxiale adapté. ....	53
Figure 3. 13: Signal de différence d'un réseau coaxial en Y affecté par un défaut franc. ....	54
Figure 3. 14: Application d'un réseau neurones câble coaxial pour réseaux Y. ....	55



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Les différents types de câbles coaxiaux.....	7
Tableau II. 1: Les dimensions du câble. ....	32
Tableau III. 1: La taille des bases des données utilisées pour RN cas d'une ligne bifilaire simple.	49
Tableau III. 2: Résultats de l'inversion par RN cas d'une ligne bifilaire simple. ....	50
Tableau III. 3: Résultats de l'inversion par RN cas d'une ligne bifilaire simple. ....	52
Tableau III. 4: Résultats de l'inversion par RN cas d'une ligne bifilaire simple. ....	55

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>9</b>
<b>I...CHAPITRE I : Généralités sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les câbles filaires .....</b>	<b>12</b>
<b>I.1 INTRODUCTION.....</b>	<b>13</b>
<b>I.2 Rappel sur les types de câbles .....</b>	<b>13</b>
I.2.1 Le câble coaxial .....	14
I.2.2 La paires torsade .....	15
<b>I.3 DOMAINES D'APPLICATIONS DES CÂBLES.....</b>	<b>16</b>
I.3.1 La distribution de l'énergie.....	17
I.3.2 L'aéronautique .....	18
I.3.3 L'automobile.....	19
<b>I.4 TYPOLOGIE DES DEFAUTS DANS LES CABLES.....</b>	<b>19</b>
I.4.1 Défauts francs .....	20
I.4.2 Défauts non francs .....	20
<b>I.5 METHODES EXISTANTES POUR LA DETECTION ET LA LOCALISATION DE DEFAUTS.....</b>	<b>20</b>
I.5.1 Les méthodes non basées sur la réflectométrie.....	20
I.5.2 Les méthodes basées sur la réflectométrie.....	21
<b>I.6 Conclusion.....</b>	<b>23</b>
<b>II CHAPITRE II : Modélisation de propagation filaire en présence de défaut franc .....</b>	<b>24</b>
<b>II.1 Introduction .....</b>	<b>24</b>
<b>II.2 Equations des lignes en temporel .....</b>	<b>25</b>
II.2.1 Discrétisation par FDTD des équations des lignes à constantes réparties .....	26
II.2.2 Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel.....	28
II.2.3 Construction du système $[A] [X] = [B]$ .....	29
II.2.4 Modélisation des défauts francs.....	31

<b>II.3</b>	<b>Validations de la modèle proposée.....</b>	<b>31</b>
II.3.1	Cas d'une ligne de transmission bifilaire affecté par un défaut franc.....	31
II.3.2	Cas d'un réseau Y bifilaire affecté par un défaut franc .....	34
II.3.3	Cas d'un Réseaux en Etoile bifilaire.....	35
II.3.4	Cas d'un câble Coaxial .....	36
II.3.5	Cas d'un réseau des câbles coaxiaux en Y affecté par un défaut franc .....	37
<b>II.4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>38</b>
<b>III....</b>	<b>Chapitre III : APPLICATION DES RESEAUX NEURONS POUR LE</b>	
	<b>DIAGNOSTIC FILAIRE</b>	
<b>III.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>40</b>
<b>III.2</b>	<b>Elément de base des réseaux de neurones .....</b>	<b>40</b>
III.2.1	Fondements biologiques.....	40
III.2.2	Neurones artificiels .....	41
<b>III.3</b>	<b>Réseaux de neurones artificiels .....</b>	<b>42</b>
III.3.1	Apprentissage supervise .....	42
III.3.2	Algorithme d'apprentissage de Levenberg-Marquardt .....	42
<b>III.4</b>	<b>Perceptron Multicouches .....</b>	<b>43</b>
<b>III.5</b>	<b>Localisation des défauts dans les réseaux bifilaire par le les réseaux neurones .....</b>	<b>44</b>
III.5.1	Diagnostic d'une ligne bifilaire affecté par un défaut franc .....	44
III.5.2	Diagnostic d'un réseau bifilaire en Y affecté par un défaut franc par les réseaux neurones.....	47
<b>III.6</b>	<b>Diagnostic de l'état d'un réseau coaxial en Y affecté par un défaut franc .....</b>	<b>49</b>
<b>III.7</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>52</b>
<b>CONCLUSION :</b>	<b>.....</b>	<b>55</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>.....</b>	<b>57</b>

# ***Introduction générale***

## Introduction générale

Avec l'augmentation du nombre des systèmes embarqués dans différents moyens de transport et des réseaux de communication, la longueur et le nombre d'interconnexions électriques ne cessent d'augmenter. Ces systèmes sont principalement constitués de câbles électriques, principal support physique employé pour relier différents équipements. En plus, il existe différents types de câbles adaptés au signal véhiculé et à la fonction réalisée [1]. Par exemple, on trouve des câbles coaxiaux, des paires torsadées, des câbles en nappe, des câbles multibrins.

Soumis à l'usure du temps et à des contraintes diverses, ces câbles sont amenés à se dégrader. Des défauts modifient le comportement électrique du câble et peuvent, à terme, engendrer des pannes plus ou moins importantes des systèmes qu'ils relient. Pour des questions de qualité de service, de coût et de sécurité, il est nécessaire de prévenir ces défaillances et donc de pouvoir diagnostiquer l'état des réseaux filaires, c'est à dire localiser voire caractériser les défauts du câblage [2-3].

Pour améliorer la fiabilité des réseaux filaires, différentes méthodes ont été développées afin de permettre de détecter et localiser certains types de défauts dans les câbles. La méthode de diagnostic la plus répandue est la réflectométrie [4] : basée sur l'injection d'un signal électrique à l'une des extrémités du réseau et sur l'analyse des signaux réfléchis, cette méthode nous permet de détecter et localiser des défauts électriques dans la structure.

Dans les cas pratiques et pour des lignes de propagation complexes données l'analyse des signaux réfléchis demande une grande expertise. Elle fait l'objet d'un problème inverse : à partir de données sur la forme des signaux et les temps de parcours de remonter à des informations sur les valeurs des paramètres électriques et qui peuvent être représentatifs de défauts caractéristiques (câble sectionné, corrosion etc.).

L'objectif de ce travail de mastère est de proposer une méthodologie dédiée au diagnostic de réseaux filaires (bifilaire, coaxial). Nous avons cherché à développer une approche pour la résolution des problèmes inverses liés à la réflectométrie dans le domaine temporel afin de détecter et de localiser (voire caractériser) des défauts dans le réseau filaire.

Cette méthodologie est fondée sur deux outils : le premier est basé sur la théorie des lignes de transmission pour modéliser la propagation d'un signal transitoire dans le réseau filaire et le deuxième est un algorithme de résolution de problèmes inverses. Le modèle de propagation décrit le problème (direct) de la propagation d'une onde électrique dans un réseau dans le domaine temporel. Ce modèle est basé sur les équations des lignes de transmissions discrétisées par (FDTD). Le modèle d'analyse de la propagation d'une onde transitoire dans le réseau nous appelons le 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).

La résolution du problème inverse consiste à partir d'un réflecto-gramme à remonter vers des informations sur les valeurs des paramètres électriques R, L, C et G exploités dans les modèles de propagation filaires et qui peuvent être représentatifs de défauts caractéristiques (câble sectionné, corrosion, coupure, etc.), on a été étudiés dans cette perspective réseaux de neurones. Cette approche a été conduite pour différentes configurations de réseaux (en Y, étoile, arbre).

Ce mémoire est composé de trois chapitres : Le premier chapitre est consacré généralités sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les câbles filaires, nous avons aussi parlé sur les types de câbles que nous mentionnons : (câble coaxial, paire torsadée...etc.). Nous avons également discuté des domaines d'application des câbles en plus de la classification des défauts dans les réseaux des câbles. La modélisation de la propagation dans le réseau filaire fait l'objet du deuxième chapitre, nous détaillons les étapes de modélisation de la propagation d'une onde transitoire dans un réseau électrique directement en temporel par discrétisation des équations des lignes par FDTD et le formalisme topologique  $[A][X] = [B]$ .

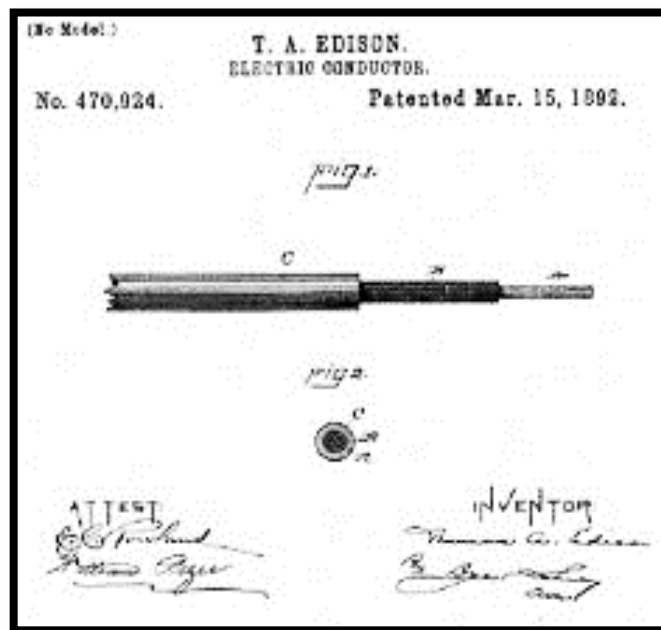
Dans le troisième chapitre, nous appliquons la méthode de diagnostic basé sur les réseaux neurones sur différentes configurations de câblage. Nous procédons successivement à l'étude de différentes configurations de câblage et de défauts. Nous terminons ce travail par une conclusion générale et des perspectives.

***Chapitre-1***  
***Généralités sur les méthodes de diagnostic***  
***des défauts dans les câbles filaires***

**CHAPITRE-1**  
**GENERALITES SUR LES METHODES DE DIAGNOSTIC**  
**DES DEFAUTS DANS LES CABLES FILAIRES**

**1.1 INTRODUCTION**

En 1892, Thomas Edison l'inventeur industriel américain, a breveté ce qu'il appelle un conducteur électrique entouré par un isolant résistant au feu et à l'humidité (figure 1.1). Grâce à cette invention et jusqu'à aujourd'hui, le câble ou le conducteur électrique est le premier support physique permettant de faire circuler un signal électrique [5].



**Figure 1.1: Le premier câble électrique inventé par Thomas Edison [5]**

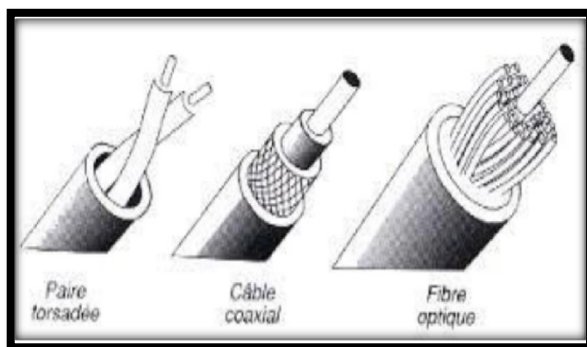
Au l'ère des réseaux sans fils, l'utilisation des câbles dans les systèmes complexes reste inévitable, ils sont les liens vitaux sur lesquels les puissances et les signaux électriques sont transmis d'un lien à l'autre. Cependant, les câbles peuvent être des causes majeures de problèmes sur les systèmes de contrôle et de surveillance, ils sont longs et situés dans un environnement dur [5].

La mise en place d'un système de diagnostic pour la détection et la localisation des défauts dans les câbles est ainsi nécessaire. L'objectif de ce chapitre est de mettre l'accent sur les problèmes rencontrés dans les câbles et de présenter les méthodes de diagnostic permettant de détecter et localiser les défauts.

Pour cela, nous introduisons, dans un premier temps, les différents types de câbles ainsi que leurs domaines d'application tels que la distribution de l'énergie, le transport, les télécommunications, etc. Dans un deuxième temps, nous présentons les différents défauts dans les câbles. Selon leur sévérité, on peut distinguer deux types de défauts : franc et non franc. Nous présentons à la fin la méthode de réflectométrie et nous évaluons ses différentes performances.

## 1.2 RAPPEL SUR LES TYPES DE CÂBLES

Le choix du câble dépend non seulement de la nature du signal transmis (analogique ou numérique, énergie ou puissance, basse ou haute fréquence, etc.) mais aussi du débit souhaité, de la longueur du réseau et évidemment du domaine d'application. Dans ce contexte, on peut distinguer trois grandes familles de câbles, câble coaxial, paire torsadée et fibre optique (figure 1.2).



**Figure 1.2: Les types de câbles**

### 1.2.1 Câble coaxial

Un câble coaxial est constitué de deux conducteurs cylindriques sur un même axe, séparé par un isolant de qualité (Téflon, polythène, polypropylène, air...) (figure 1.3). Plus cher que la paire torsadée, le câble coaxial est encore largement utilisé pour des artères à moyen débit des réseaux de transport, ainsi que pour les réseaux télédiffusion. Il est constitué de deux conducteurs : le cœur (l'âme), fil de cuivre entouré d'une gaine isolante elle-même entourée par une tresse de cuivre (conducteur extérieur), le tout est recouvert d'une gaine isolante. Sa bande passante est de 150 MHz, il est caractérisé par un encombrement supérieur à celui de la paire torsadée. Ces performances n'atteignent pas celles de la fibre optique. Il a tendance à disparaître des plans de câblage.



**Figure 1.3: Description matérielle d'un câble coaxial.**

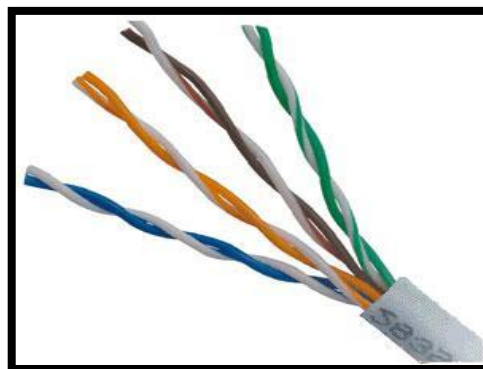
Le tableau suivant présente différents types de câbles selon la partie centrale (l'âme).

**Tableau 1.1: Les différents types de câbles coaxiaux**

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

### 1.2.2 Paires torsadées

Une paire torsadée est constituée de deux brins de cuivre, de diamètre inférieur au millimètre, isolés et agencés en spirale pour limiter les phénomènes d'interférences électromagnétiques parasites dues à l'environnement (diaphonie). Plusieurs paires sont groupées dans une même gaine protectrice pour former généralement un câble de 2, 4 ou 8 paires (figure 1.4). (4 le plus souvent).



**Figure 1.4 : Paire torsadée.**

## Chapitre-1 Généralités sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les câbles filaires

De façon générale, ce type de support possède une bande passante de quelques centaines de kHz permettant le transfert d'un signal modulé à un débit d'environ 10 kbit/s sur des distances de 5 à 6 km. Il est aussi possible de transférer directement un signal numérique à des débits allant jusqu'à 100 Mbit/s sur des distances courtes. 100 m au maximum.

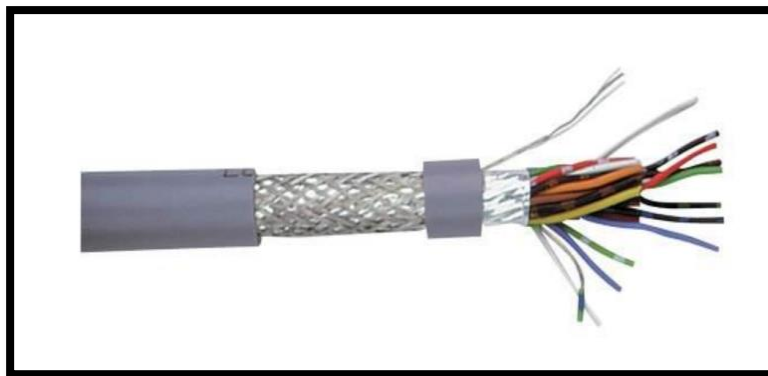
La connexion des équipements peut se faire soit en point à point soit en multipoint. Il s'agit donc d'un support simple et économique. En fait, ses principaux avantages résident, d'une part, dans un coût intéressant par rapport à celui du câble coaxial ou de la fibre optique et, d'autre part, dans la possibilité d'utiliser le pré câblage téléphonique des immeubles diminuant ainsi de près de 40 % le coût total du réseau.

Ses principaux inconvénients résident dans sa sensibilité aux perturbations électromagnétiques de l'environnement et dans une atténuation très importante du signal, proportionnelle à sa longueur. Les paires torsadées sont de ce fait souvent caractérisées par leur produit de bande passante  $\times$  longueur. Elles se distinguent entre elles par leur impédance (100, 120 ou 150 ohms), ainsi que par leur nature:

- Paires non blindées (UTP — Unshielded Twisted Pair).
- Paires blindées (STP — Shielded Twisted Pair).

### **A. Les paires blindées:**

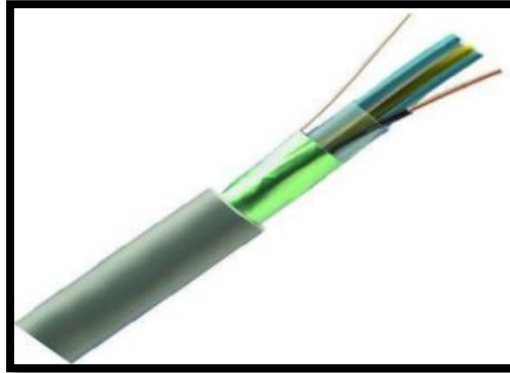
Le blindage est réalisé par une partie métallique, tresse ou ruban, visant à protéger le ou les conducteurs du câble des perturbations extérieures et à limiter le rayonnement du câble (figure 1.5). Il est efficace contre les interférences à fréquences basses (inférieures à 10 MHz). Le câble blindé doit être relié à la masse, mais il peut apparaître comme une source d'interférences dès lors que les masses ne donnent pas en permanence les mêmes mesures;



**Figure 1.5 : Paire torsadée blindée**

## **B. Les paires écrantées :**

L'écrantage est réalisé par une fine feuille d'aluminium qui s'enroule autour du câble (figure 1.6), le dispositif permettant de protéger le câble des interférences à fréquences hautes (supérieures à 1 MHz) tout en assurant une protection relative aux effets de masse. L'écrantage peut être utilisé en conjonction avec le blindage. [6]



**Figure I.6 : Paire torsadée écrantée.**

## **1.3 DOMAINES D'UTILISATION DES CÂBLES**

À l'ère des réseaux sans fils, la présence d'un support physique bien délimité pour le transport de l'énergie électrique et de l'information demeure inévitable. Par ailleurs, l'étendue des câbles a considérablement augmenté pour répondre aux exigences des nouvelles technologies (débit, taux d'erreur, temps réel, etc.). L'augmentation de la longueur des câbles dans la distribution de l'énergie, de l'aéronautique, de l'automobile ou même des télécommunications, a entraîné l'augmentation de la complexité des réseaux filaires comme décrit dans cette section.

### **1.3.1 Distribution de l'énergie**

Dans les réseaux de distribution de l'énergie, les lignes aériennes sont de plus en plus remplacées par des câbles souterrains. Entre 2000 et 2009, le kilométrage du réseau aérien a diminué d'environ 1200 kilomètres (km) et a été remplacé par près de 1300 km de câbles souterrains en France. En 2010, 66% de nouvelles lignes ont été construites en souterrain [7].

La figure 1.7 montre les différentes techniques de pose de câbles dans un réseau de transport d'électricité selon l'environnement traversé (zones rurales, zones fortement urbanisées, franchissements de routes ou de rivières, etc.).

## Chapitre-1 Généralités sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les câbles filaires

Les câbles sont déroulés par tronçons de 600 mètres (m) (pour le 225000 Volts (V)) à 800 m (pour le 63000 V et 90000 V) et sont raccordés entre eux par des jonctions installées dans des boîtes de jonctions souterraines.

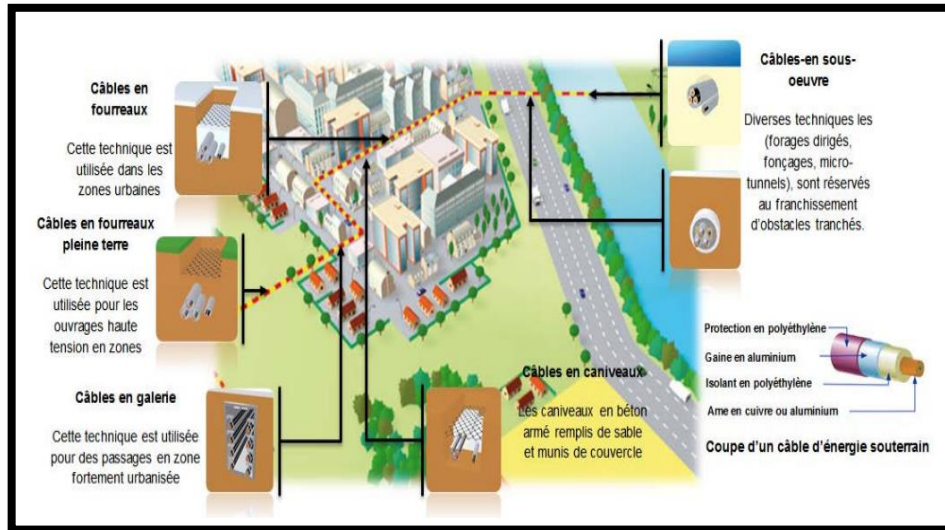


Figure 1.7: Les câbles dans un réseau de distribution d'énergie [6].

### 1.3.2 L'aéronautique

Si les passagers d'un avion ne les voient pas, les câbles sont largement présents dans toute l'architecture d'un appareil, le câblage est l'un des éléments primordiaux de l'architecture d'un aéronef, dans les ailes, le fuselage, ou encore la pointe avant, des kilomètres de câbles sont déroulés pour faire passer des circuits électriques, des informations, de la vidéo ou de l'image (figure 1.8).



Figure 1.8: Exemple de câblage dans le domaine aéronautique [8].



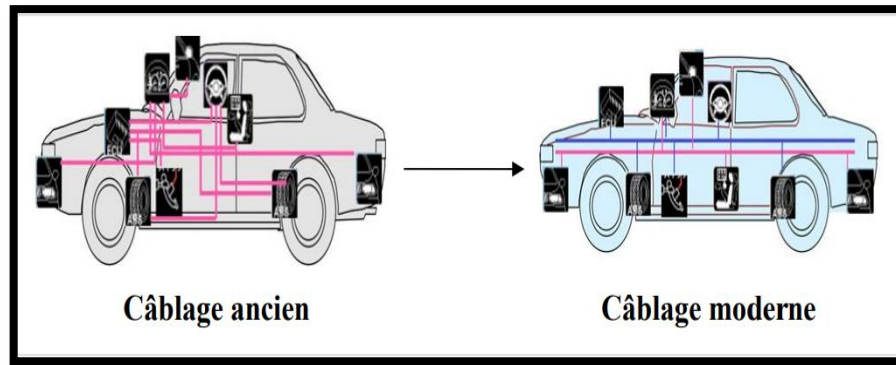
**Figure 1.9: Réseau filaire d'un avion [5].**

Le réseau électrique dans un Airbus A380 atteint 10000 câbles et 40300 connecteurs (figure 1.9), d'une longueur totale de près de 400 kilomètres dont le but est d'avoir des avions de plus en plus électriques sous le concept technologique "Fly-by-Wire". Un avion "plus électrique" est un appareil où le courant électrique remplace les énergies pneumatique, hydraulique et mécanique. L'avantage est double. D'une part, les systèmes électriques sont moins complexes, moins coûteux et plus fiables que les mécanismes hydrauliques et mécaniques. D'autre part, les systèmes électriques permettent de baisser la masse d'un avion donc moins de consommation en carburant [9-10].

### **1.3.3 L'automobile**

Le concept de la technologie "Fly-by-Wire" a été transposé dans le domaine de l'automobile sous le nom de "X-by-Wire". L'idée est de remplacer des composants hydrauliques et mécaniques par des composants électroniques embarqués dédiés à des fonctions d'accélération, freinage, direction, etc. A cet effet, le besoin en électronique embarquée dans l'automobile a évolué d'une façon considérable au cours de ces dernières années passant de 2% à 40% du coût de production d'une voiture entre 1920 et 2015 [11-12].

Puisque l'explosion du nombre de calculateurs et de capteurs distribués dans tout le véhicule ne cesse de s'accroître. Les constructeurs ont eu recours au multiplexage afin de réduire la quantité de câbles dans les véhicules. Cette technologie consiste à échanger plusieurs informations entre les différents composants sur un seul support physique (i.e. un bus) au lieu de transiter chaque information par un fil dédié (figure 1.10).



**Figure 1.11 : Câblage électrique d'une ancienne voiture Vs une voiture moderne**

#### **1.4 CATÉGORISATION DES DÉFAUTS DANS LES CABLES**

Pendant plusieurs années, le câble a été traité comme un système qui pourrait être installé et fonctionner pendant la durée de vie du système où il opère [1]. Cependant, cette habitude a, rapidement, changé avec la manifestation de signes de défaillances dans les câbles. Ces défaillances peuvent entraîner l'apparition d'anomalies plus ou moins graves telles que la perte du signal électrique, la déformation de l'information, la surtension, le dysfonctionnement du système, la fumée, l'incendie, etc. Malheureusement, ces défauts peuvent avoir des conséquences dramatiques si les câbles font partie des systèmes critiques pour la sécurité des personnes, des équipements ou même de l'environnement.

Les causes de défauts les plus fréquentes, toute application confondue, sont : le vieillissement de l'isolant, les agressions mécaniques (par exemple, la vibration qui peut entraîner des frottements contre les parois ou les arêtes métalliques d'un véhicule), les contraintes thermiques (très haute température, etc.), la corrosion due à l'humidité, l'oxydation due aux produits chimiques, des défauts du constructeur, des défauts d'exploitation (par exemple une pose non conforme des câbles), etc. Selon la NASA [2], 80% des défauts sont provoqués par les interventions humaines. En effet, un opérateur de maintenance peut être amené à entailler les câbles par des pinces ou même les utiliser comme point d'appui pour atteindre des zones inaccessibles.

L'ensemble de ces facteurs provoque des changements, plus ou moins graves, dans les paramètres intrinsèques du câble et se traduisent par l'apparition d'anomalies. Selon leur sévérité, les défauts dans les câbles peuvent être répartis en deux grandes familles: les défauts francs (en anglais, "hard fault") et les défauts non francs (en anglais, "soft fault").

### 1.4.1 Défauts francs

Les défauts francs sont des défauts sévères et ils se traduisent par une variation importante de l'impédance caractéristique du câble. Ils se manifestent par une interruption totale de la circulation de données et de l'énergie dans le câble défectueux. Ces défauts correspondent à des situations de court-circuit et de circuit ouvert causes par de faux contacts dans un réseau. Le court-circuit est la mise en connexion à faible résistance de deux conducteurs à la suite de l'endommagement des isolants. Le circuit ouvert se manifeste par la rupture d'un ou plusieurs conducteurs à la suite des coupures du câble ou des dommages mécaniques. Les défauts francs peuvent entraîner des accidents tragiques suite au dysfonctionnement brutal du système.

### 1.4.2 Défauts non francs

Les défauts non francs se traduisent par une faible variation de l'impédance caractéristique du câble causée par la fissure de la gaine, la dégradation du conducteur, etc., (figure 1.11). Ces dégradations ne conduisent pas toujours à des pannes graves puisqu'elles n'empêchent pas la circulation de l'énergie ou de l'information mais peuvent générer à long terme des défauts francs suite à des agressions mécaniques, contraintes environnementales (pénétration de l'humidité, stress thermique, etc.) ou encore le vieillissement du câble. Il est évident que la détection de ces défauts permet de réduire le coût et le temps de la maintenance, mais elle demeure un enjeu majeur dans le diagnostic filaire.

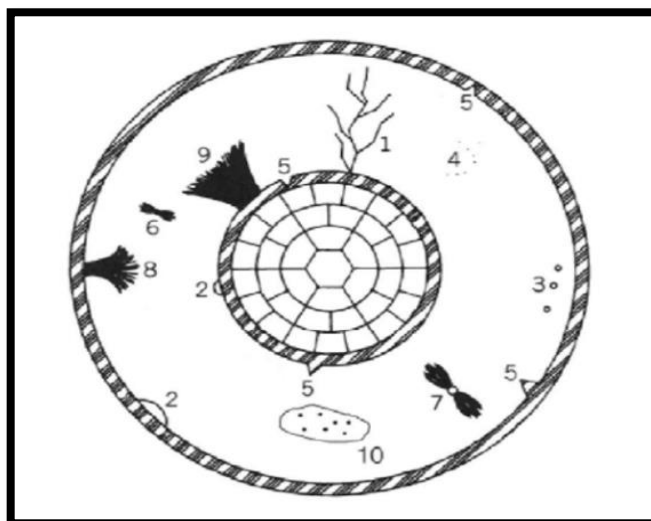


Figure 1.11: Défauts dans un câble monophasé [3]

## **1.5 METHODES DE DETECTION ET DE LOCALISATION DE DEFAUTS**

### **1.5.1 Méthodes non basées sur la réflectométrie**

#### **1.5.1.1 Inspection visuelle**

Dans de nombreux secteurs, la méthode par inspection visuelle est la plus utilisée pour localiser des anomalies sur les réseaux filaires. Cette méthode, couramment utilisée pour analyser les câbles dans l'industrie aéronautique, permet de repérer tout échauffement local du câble, dégradation de son isolant ou de la gaine [13].

Cette méthode est totalement subjective et ne peut être efficace que si le défaut est perceptible par l'œil humain. Une large portion d'un réseau filaire peut ne pas être visible parce qu'il est situé dans des endroits inaccessibles cachés par d'importantes structures comme des panneaux électriques, des composants ou des torons de câbles [14].

Afin d'améliorer le diagnostic et de venir en aide à l'opérateur de maintenance qui ne s'appuie que sur la qualité de son œil, plusieurs technologies ont été développées. Une de ces technologies est l'utilisation de caméras infrarouges ou thermiques pour détecter des défauts résistifs ou des échauffements locaux sur le câble [15]. Si le câble est composé de plusieurs lignes, l'inspection visuelle est peu efficace pour déterminer quelle ligne est en cause lors de l'apparition d'un défaut. L'utilisation de caméras embarquées associée à un système de vidéosurveillance n'est pas concevable. Un tel système serait trop coûteux et demanderait une mise en œuvre assez complexe pour une application embarquée.

D'autres technologies comme l'utilisation de multimètres portables (voltmètre, ohmmètre) permettent de vérifier l'impédance ou la continuité du câble. L'utilisation de multimètres nécessite l'intervention d'au moins deux techniciens afin de réaliser les connexions en chaque extrémité du câble. La mesure de la continuité permet de repérer quel câble est défectueux mais ne localise pas le défaut sur ce câble.

#### **1.5.1.2 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. Lors de l'utilisation de cette méthode, le générateur de rayons X et le détecteur doivent être positionnés près des câbles du réseau.

### **1.5.1.3 Méthodes capacitive et inductive**

Cette technique permet de déterminer la présence d'un circuit ouvert ou d'un court-circuit et donc la mesure de la longueur d'un câble. Elle est basée sur la mesure de la capacité ou de l'inductance du câble [16]. 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.

### **1.5.2 Les méthodes basées sur la réflectométrie**

Les méthodes décrites précédemment présentent chacune des limites pour déterminer l'état des câbles : recours à l'utilisation d'un autre câble de référence identique à celui testé, utilisation d'un appareil de mesure situé à proximité du câble, intervention humaine sur site et/ou déconnexion du câble pour ne pas détériorer le système connecté à celui-ci. Toutes ces méthodes ne peuvent donc pas être envisagées pour une application embarquée. Il existe une méthode haute fréquence qui a l'avantage d'utiliser un seul câble (le câble à tester lui-même) et d'obtenir une image de l'état du câble en se positionnant à une extrémité de celui-ci. Cette méthode s'appelle la réflectométrie et présente des performances et des conditions de mesure très intéressantes [4].

Depuis les années 1950, elle est utilisée pour détecter et localiser des défauts dans les câbles électriques ou dans les réseaux de télécommunications [17]. Cette méthode qui est basée sur le principe même du radar, a trouvé sa place dans d'autres applications comme la géo-technologie [18], l'hydrologie [19], la construction [20], l'aviation [21] ou le test de matériaux [22]. La réflectométrie repose sur l'analyse d'une onde réfléchi par rapport à une onde incidente en utilisant les phénomènes de propagation des ondes dans les milieux physiques. Pour l'utiliser dans l'analyse des câbles électriques, il est nécessaire d'injecter des signaux dont la longueur d'onde est petite ou équivalente à la longueur du câble. Ceci implique donc l'utilisation de signaux haute fréquence ou large bande.

La réflectométrie occupe essentiellement deux domaines d'analyse : la réflectométrie dans le domaine temporel ou TDR (Time Domain Reflectometry), dont le principe sera présenté de façon plus détaillée dans le chapitre 2, et la réflectométrie dans le domaine fréquentiel ou FDR (Frequency Domain Reflectometry) [23].

Pour chacun de ces deux domaines il existe des méthodes dérivées telles que la réflectométrie dans le domaine temporel par séquence directe ou STDR (Sequence Time Domain Reflectometry), et par étalement de spectre ou SSTDR (Spread Spectrum Time Domain Reflectometry) pour le domaine temporel [24] - [25].

## Chapitre-1 Généralités sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les câbles filaires

Pour le domaine fréquentiel, il existe la FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave), la réflectométrie par analyse de l'onde stationnaire ou SWR (Standing Wave Reflectometry), la réflectométrie par détection de phase ou PDFDR (Phase Detection Frequency Domain Reflectometry) [26] - [27] et la MSR (Mixed-Signal Reflectometer) [28]. Une autre méthode intéressante, qui ne peut être classée dans l'une de ces deux catégories, est la NDR (Noise Domain Reflectometry) [29]. Une nouvelle méthode de réflectométrie qui fonctionne simultanément dans les deux domaines du temps et de la fréquence ou TFDR (Time Domain Reflectometry) [30]. L'utilisation d'une méthode par rapport à une autre dépend de la forme d'onde qui est injectée dans le câble à tester et du domaine d'analyse [31].

### **1.6 CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types des câbles, leurs défauts pouvant exister et leurs raisons d'apparition. Nous avons vu aussi que ces défauts peuvent être à l'origine de graves dysfonctionnements du système électrique. Il est donc nécessaire de disposer d'outils de diagnostic de réseaux filaires afin d'anticiper ou de détecter l'apparition d'éventuels défauts (défaut franc, défaut non-franc). Nous avons présenté aussi les méthodes qui ont été développées pour tester l'état des câbles, dont la majorité servent à détecter les défauts francs (court-circuit ou circuit ouvert). Pour bien comprendre le principe de la réflectométrie dans un câble, il est nécessaire de comprendre comment se propage une onde électromagnétique dans une ligne de transmission.

Dans le chapitre suivant, nous abordons les bases sur la théorie des lignes de transmission et les principales solutions des équations de propagation en présence des défauts.

***Chapitre-2***  
***Modélisation de propagation filaire en***  
***présence de défaut franc***

## CHAPITRE-2

### MODELISATION DE PROPAGATION FILAIRE EN PRESENCE DE DEFAUT FRANC

#### 2.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les différents types de défauts que rencontrent les câbles électriques et les raisons de leur apparition. Il est donc nécessaire de disposer d'un système de diagnostic du câblage réseau afin de détecter et d'identifier d'éventuelles erreurs apparaissant. Plusieurs méthodes de diagnostic de câblage ont été développées pour tester l'état du câblage.

Parmi ces différentes méthodes nous pouvons citer les méthodes basées sur la réflectométrie, car ces méthodes se sont avérées plus efficaces. La mesure de la réflectance est une méthode couramment utilisée pour surveiller l'état des câbles, et elle peut fournir des informations pour la détection, la localisation et la caractérisation des défauts électriques. Elle reprend le principe du radar en s'appuyant sur la propagation des ondes électromagnétiques au sein d'un système ou d'un environnement en cours de diagnostic. Elles consistent en l'injection d'une onde dans un câble, qui se propage selon les lois de propagation du milieu considéré et lorsqu'elle rencontre une discontinuité de résistance, une partie de son énergie est réfléchiée vers le point d'injection (Fig. 2.1).

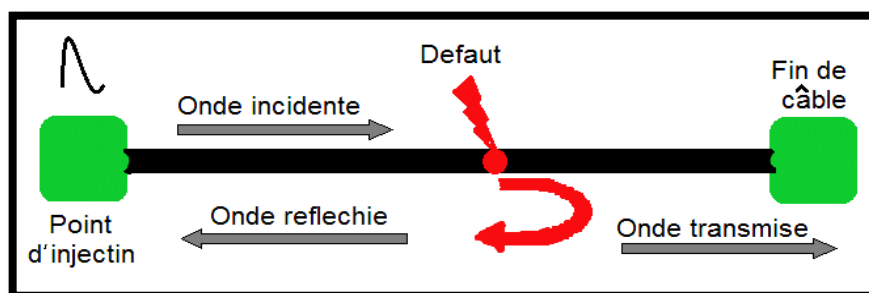


Figure 2.1: Principe de la réflectométrie

L'analyse des signaux réfléchis permet d'inférer des informations sur cette discontinuité.

#### 2.2 EQUATIONS DES LIGNES EN TEMPOREL

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

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

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

En faisant le passage fréquence-temps par la transformée de Fourier inverse, le système d'équation (2.1) -(2.2) devient sous forme matricielle comme suit :

$$\frac{\partial[i(x,t)]}{\partial x} + \int_{-\infty}^{\infty} [Y(t - \tau)][v(\tau)]d\tau = [0] \quad (2.3)$$

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

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 :

$$\frac{\partial[v(x,t)]}{\partial x} + [R][v(x, t)] + [L] \frac{\partial[i(x,t)]}{\partial x} = [0] \quad (2.5)$$

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

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

La matrice résistance linéique  $[R]$ , matrice conductance linéique  $[G]$ , matrice inductance linéique  $[L]$  et matrice capacité linéique  $[C]$  seront définies par la suite. Afin 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  $[\emptyset]$  nous précéderons à la discrétisation des équations des lignes (2.5)-(2.6) par la méthode numérique dite FDTD [II.1]-[II.2]

## 2.2.1 Discrétisation par FDTD des équations des lignes à constantes réparties

### 2.2.1.1 Echantillonnage spatial

Le schéma en figure (2.2) 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 (2.2) :

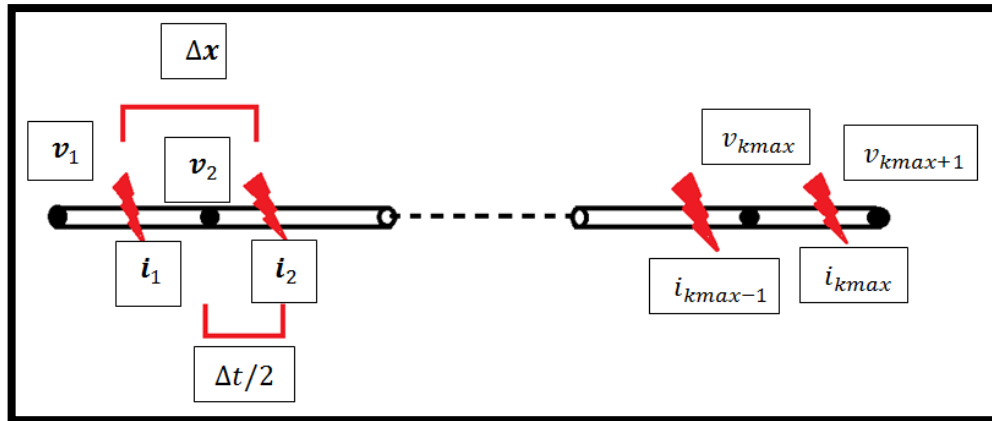


Figure 2.2 : Découpage de la branche.

Pour une écriture discrète des équations des lignes, il est nécessaire de définir un pas temporel  $\Delta t$  et un pas spatial  $\Delta x$ .

### 2.2.1.2 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. La figure (2.3) illustre l'entrelacement des tensions et des courants dans l'espace et dans le temps.

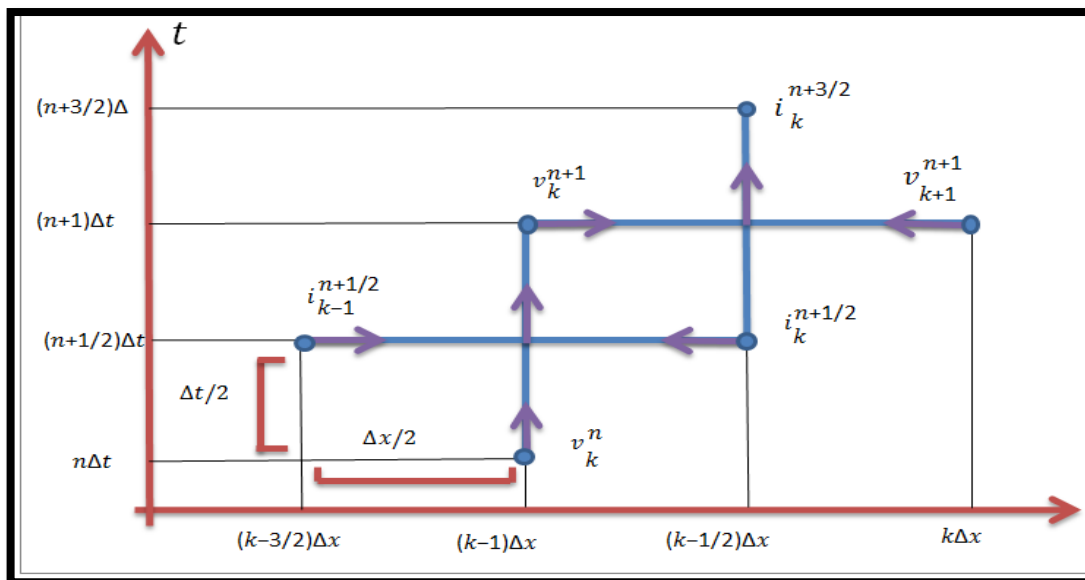


Figure 2.3 : Entrelacement spatial et temporel.

### 2.2.1.3 Condition de stabilité

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

$$v_p \leq \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Où :

$v_p$ : vitesse de propagation de l'onde dans le milieu.

Une démonstration présentée dans [2.1] 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.

## 2.2.2 Discrétisation des équations des lignes par FDTD

### 2.2.2.1 Mise en équations

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

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

$$[v_k^n] \equiv [v[(k-1)\Delta x, n\Delta t]] \quad (2.8)$$

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

$$[i_k^n] \equiv \left[ i \left[ \left( k - \frac{1}{2} \right) \Delta x, \left( n + \frac{1}{2} \right) \Delta t \right] \right] \quad (2.9)$$

Avec :

$$l \equiv k_{max} \Delta t \quad (2.10)$$

$$t_{max} \equiv n_{max} \Delta t \quad (2.11)$$

En exprimant par FDTD les dérivées spatiales et temporelles, les systèmes d'équations (2.5) et (2.6) deviennent :

$$\frac{[v_{k+1}^n] - [v_k^n]}{\Delta x} + [L] \frac{[i_k^{n+1/2}] - [i_k^{n-1/2}]}{\Delta t} + [R] \frac{[i_k^{n+1/2}] + [i_k^{n-1/2}]}{2} = [0] \quad (2.12)$$

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

Nous pouvons alors déduire les équations de récurrences suivantes pour une branche:

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

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

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

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

En imposant les conditions aux extrémités, les équations de récurrences (2.14) et (2.15) nous permettent de calculer la distribution des courants et des tensions le long de la ligne de transmission.

### 2.2.2.2 Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel

Comme nous l'avons vu sur la figure (2.4), lors de la discrétisation des équations des lignes par FDTD, les nœuds courants et tensions ne co-existent 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  $\Delta x$  par  $\Delta x/2$  à l'instant  $t = n\Delta t$  respectivement pour  $k = 1$  et  $k = k_{max}+1$  dans (2.11) et notant :

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

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

En considérant la moyenne temporelle suivante :

$$[i(0)]^{n-1/2} = \frac{[i(0)]^n + [i(0)]^{n-1}}{2} \quad (2.16)$$

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

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

$$\left( \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} \right) ([v(0)]^n) - \frac{[i(0)]^n}{\Delta x} = \left( \frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\frac{\Delta x}{2}} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (2.18)$$

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

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

A partir des deux équations (2.18) et (2.19), nous pouvons déduire une écriture quadripolaire d'un tronçon de ligne (branche) dans le domaine temporel, qui sera comme suit [II.4] :

$$\begin{bmatrix} \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v^n(0)] \\ [i^n(0)] \\ [v^n(l)] \\ [i^n(l)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

### 2.3 CONSTRUCTION DU SYSTÈME [A] [X]= [B]

#### 2.3.1 Construction de la sous matrice [A<sub>1</sub>]

La sous matrice [A<sub>1</sub>] pour un réseau multi-branches (Figure 2.4) est obtenue à partir de l'écriture quadripolaire des lignes ou des câbles constituant le réseau.

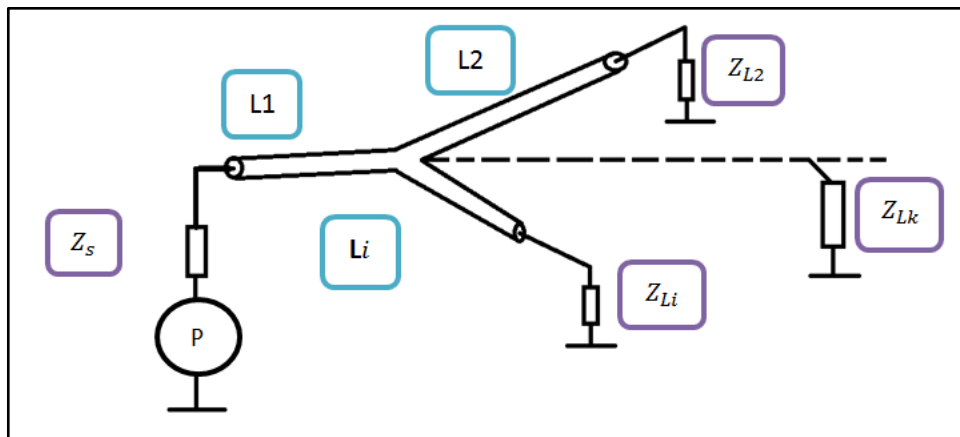


Figure 2.4: Configuration d'un réseau multi-branches

Pour chaque ligne (câble) (figure 2.4), la contribution de la i<sup>ème</sup> ligne dans la sous matrice [A1] et ainsi définie :

$$[A1] = \begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \nearrow & \vdots \\ \vdots & \dots & [ALi] & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \searrow & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Où :

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

$$\begin{bmatrix} \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

### 2.3.2 Construction de la sous matrice $[A_2]$ en temporel

La sous matrice  $[A_2]$  est obtenue en utilisant les lois de Kirchhoff en courant et en tension (KCL et KVL) à chaque nœud  $m$  du réseau [II.3].

$$\sum_{k=1}^N ([Y_k^m][V_k^m] + [Z_k^m][i_k^m]) = [P^m] \quad (2.23)$$

Avec :

$[Z_k^m]$  et  $[Y_k^m]$  les matrices résultantes 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.

$[P^m]$  : Vecteur contenant les sources de courant ou de tension.

### 2.3.3 Construction du vecteur $[B]$

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

$$[B] = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [B_2] \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Le sous vecteur  $[B_1]$  est déduit à partir de l'équation (2.20) pour chaque ligne (ou chaque 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 :

$$[B_1] = \begin{bmatrix} \vdots \\ [BLi] \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Où :

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

$$[BLi] = \begin{bmatrix} \left( \frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left( \frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2} \right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

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

$$[B_2] = \begin{bmatrix} \vdots \\ P^m \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

### 2.3.4 Définition du vecteur inconnu $[X]$

Dans le système  $[A] [X] = [B]$ , le vecteur inconnu  $[X]$  comprend les courants et les tensions sur l'ensemble des nœuds du réseau. Pour la  $i^{\text{ème}}$  ligne à l'instant  $n\Delta t$ , en reprenant l'équation (2.20) qui donne l'écriture quadripolaire de la ligne, nous avons sa contribution dans le vecteur  $[X]$  qui sera comme suit:

$$[X] = [\dots \dots [XLi] \dots \dots]^T \quad (2.28)$$

Où :

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

$$[XLi] = [[v_i^n(0)][i_i^n(0)][v_i^n(l)][i_i^n(l)]] \quad (2.29)$$

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.

## 2.4 Modélisation des défauts francs

### 2.4.1 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 2.5). Cette situation se produit lorsque  $Z_L=0$ . La condition est:  $V=0$ .

### 2.4.2 Circuit-ouvert

En circuit ouvert (figure 2.5), nous considérons la charge  $Z_L = \infty$ , la condition à la limite devient :  $I = 0$ . Nous considérons l'adaptation d'impédance (**Réseau adapté**) aux extrémités du réseau (impédance d'entrée ou impédance de sortie). Dans ce cas,  $Z = Z_c$ .

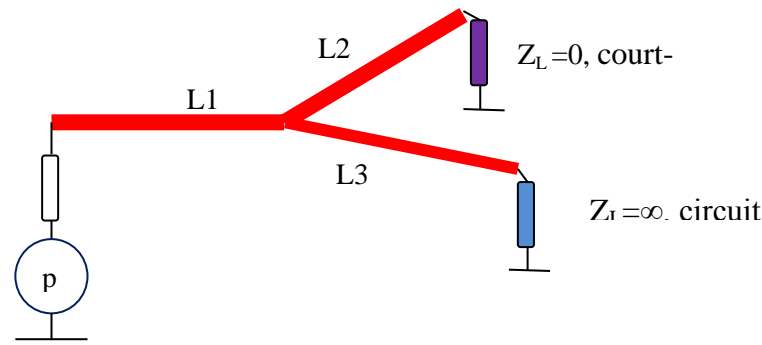


Figure 2.5. Défaut franc dans le réseau électrique

## 2.5 Validations du modèle proposée

### 2.5.1 Cas d'une ligne de transmission bifilaire affecté par un défaut franc

Afin d'étudier la propagation le long d'une ligne de transmission simple, la ligne bifilaire (SKU 02301.R5.02) est considérée. Le câble est très similaire du point de vue de l'impédance à de nombreux types de câbles dans l'aéronautique [GRIF 06]. Pour cette application, nous excitions notre procédé par une source de tension définie mathématiquement comme suit :

$$e(t) = \begin{cases} 0.5(1 - \cos(2\pi Ft)) & 0 < t < \frac{1}{F} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (2.30)$$

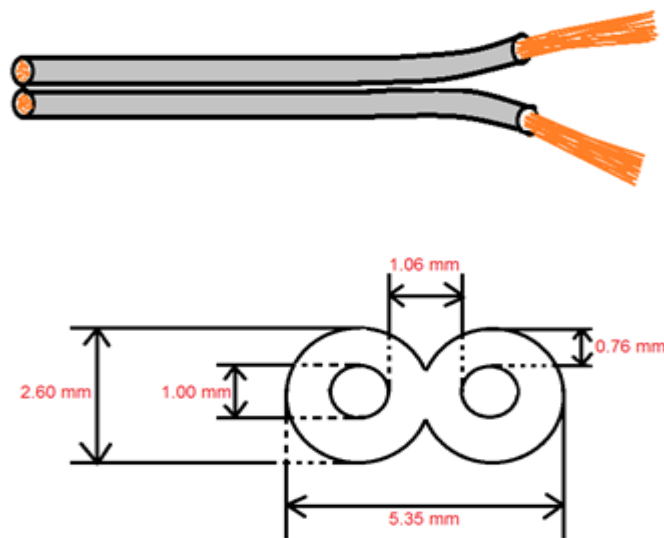


Figure 2.6: Ligne bifilaire

Le câble est composé de deux conducteurs entourés par un isolant en PVC avec une permittivité relative de  $\epsilon_r = 4$  (Figure 2.6). Les dimensions du câble sont données dans le Tableau 2.1.

**Tableau 2.1: Les dimensions du câble**

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

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

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

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

Les valeurs de  $a$  et  $d$  conduisent à :  $C = 1.0755 \cdot 10^{-10} \text{ F/m}$  et  $L = 0.67 \text{ } \mu\text{H/m}$

$\mu$  est la perméabilité magnétique ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ),  $\mu_r$  la perméabilité relative et  $\epsilon$  est la permittivité électrique, ( $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ ).

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

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

où  $\eta_0$  est l'impédance caractéristique de l'espace libre (377  $\Omega$ ). La valeur d'impédance calculée par (2.32) est 79,69 ohms.



Figure 2.7 : Représentation schématique d’une ligne bifilaire simple

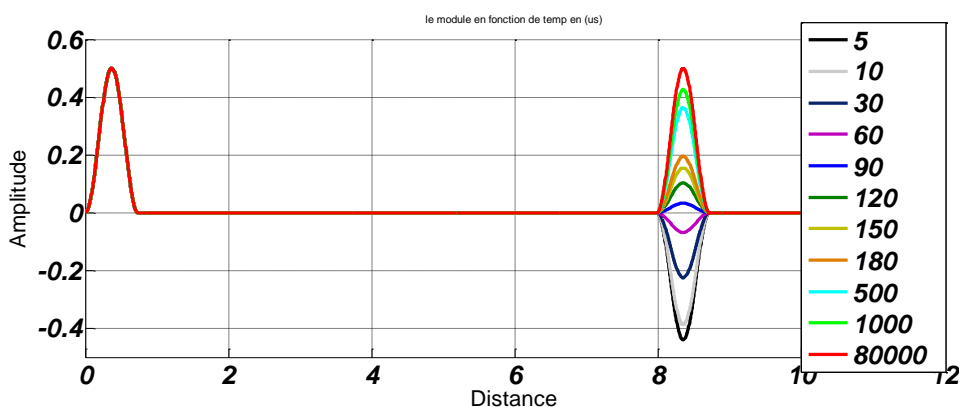


Figure 2.8: Réflectogramme correspondant à une ligne bifilaire simple

Nous remarquons sur la figure 2.8 quelques réflexions du signal sur la deuxième côte de la ligne où l’amplitude est proportionnelle à la résistance d’extrémité cela confirme la validité du formalisme théorique que nous avons proposé pour la caractérisation des défauts francs.

### 2.5.2 Cas d’un réseau Y bifilaire affecté par un défaut franc

Nous considérons une configuration simple d’un réseau en Y (figure 2.9). Nous étudions ce dernier dont les dimensions sont les suivantes :  $L1 = 3$  m,  $L2 = 4$  m, et  $L3 = 6$  m. Ces trois tronçons de ligne  $L1$ ,  $L2$  et  $L3$  formant une jonction  $J$ .

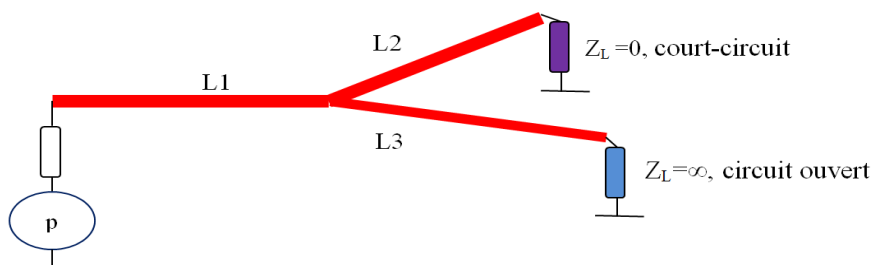
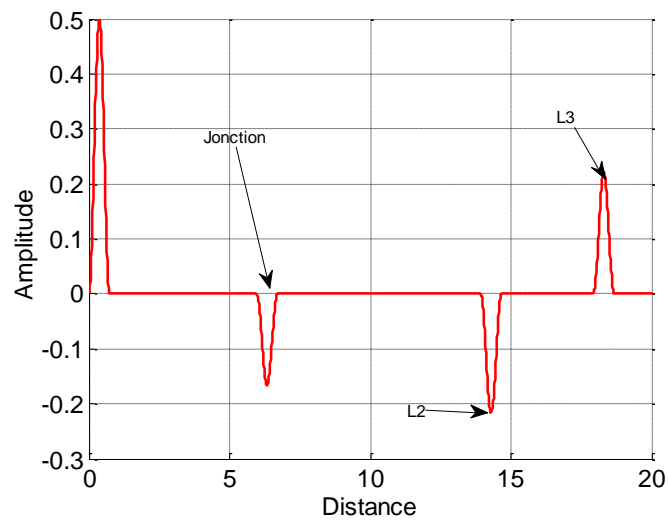


Figure 2.9: Représentation schématique d’un réseau Y bifilaire



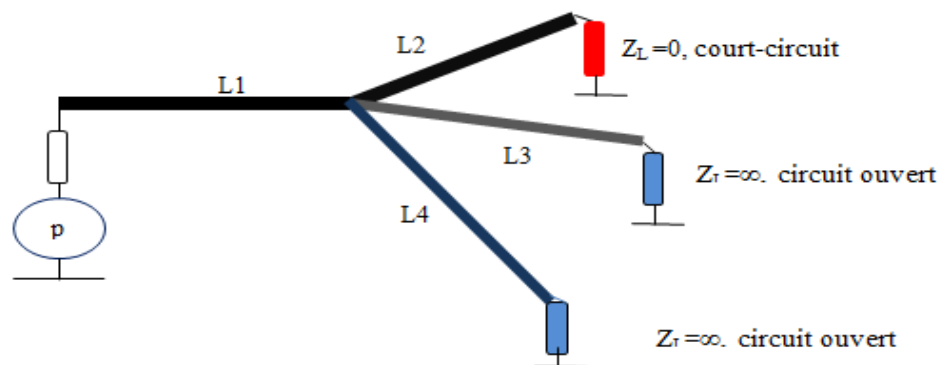
**Figure 2.10 Réflectogramme correspondant à un réseau Y bifilaire**

La figure 2.10 représente les résultats obtenus après calcul en utilisant le formalisme topologique proposé ( $[A] [X] = [B]$ ) pour un réseau bifilaire dont :

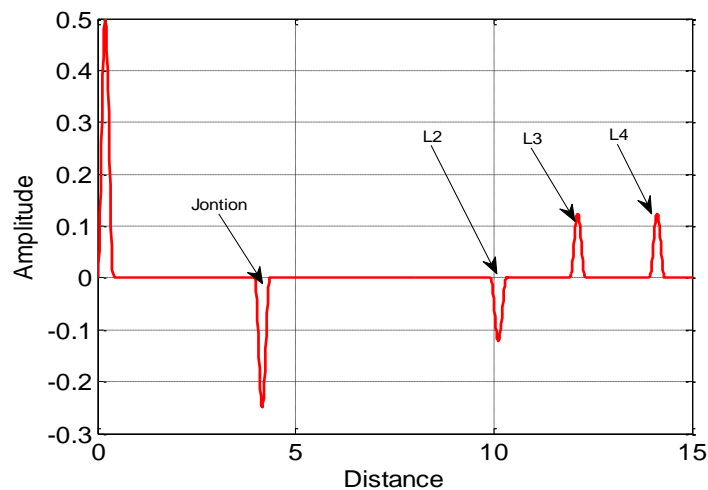
- ❖ Le premier pic négatif qui apparaît à 6m sur la figure 2.10 correspond à un changement d'impédance au niveau de la jonction  $J$ .
- ❖ Le deuxième pic positif apparaît à 18m (figure 2.10) correspond à la terminaison du tronçon  $L3$ , le signe positif est dû à la nature de l'extrémité qui est ouverte ( $Z_L = \infty$ ).
- ❖ Nous retrouvons aussi, un pic négatif à 14m qui correspond à l'extrémité court-circuit du tronçon  $L2$ .

### 2.5.3 Cas d'un Réseaux en étoile bifilaire

Nous considérons la configuration simple d'un réseau **en étoile** de 4 lignes bifilaires (figure 2.11). Nous étudions ce dernier avec les dimensions suivantes :  $L1 = 2m$ ,  $L2 = 3m$ , et  $L3 = 4m$ ,  $L4 = 5m$ . Ces quatre tronçons de ligne  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$  et  $L4$  formant une jonction  $J$ .



**Figure 2.11: Représentation schématique d'un réseau en Etoile bifilaire.**



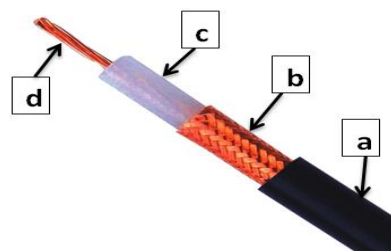
**Figure 2.12 Réflectogramme correspondant à un réseau en Etoile bifilaire.**

La figure 2.12 représente nos résultats de calcul utilisant le formalisme topologique ( $[A]$   $[X]= [B]$ ) pour un réseau en Etoile dont :

- ❖ Le premier pic négatif qui apparaît à 4m sur la figure 2.11 correspond à un changement d'impédance au niveau de la jonction  $J$ .
- ❖ Le deuxième pic négatif apparaît à 10m (figure 2.11) correspond à la terminaison du tronçon  $L2$ , le signe négative est dû à la nature de l'extrémité qui court-circuit ( $ZL=0$ ).
- ❖ Le troisième pic positif apparaît à 12m (figure 2.11) correspond à la terminaison du tronçon  $L3$ , le signe positif est dû à la nature de l'extrémité qui est ouverte ( $ZL=\infty$ ).
- ❖ Nous retrouvons aussi, un pic négatif a 14m qui correspond à l'extrémité de tronçon  $L4$  qui est ouverte ( $ZL=\infty$ ).

#### 2.5.4 Cas d'un câble Coaxial

Figure 2.13 représente un exemple de câble coaxial illustrant ses composants : **a** : un isolant extérieur en plastique, **b** : un conducteur de blindage en tresse aluminium gainée dopper, **c** : un isolant, **d** : un conducteur central (acier cuivré).



**Figure 2.13 Exemple de câble coaxial**

Sur la figure 2.14 un réflectogramme d'un câble coaxial de (2m, 4m, 6m) terminé par un circuit ouvert. Une impulsion gaussienne est injectée dans le câble. Nous remarquons que le signal réfléchi obtenu a subi une atténuation.

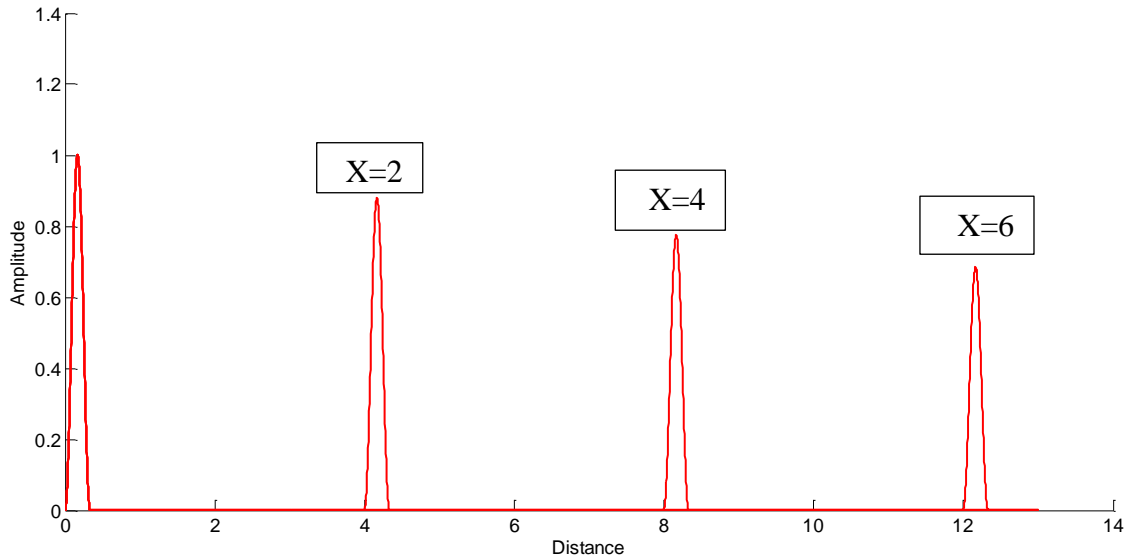


Figure 2.14 : Réflectogrammes obtenus pour un câble coaxial de différentes longueurs

### 2.5.5 Cas d'un réseau des câbles coaxiaux en Y affecté par un défaut franc

Nous considérons une configuration simple d'un réseau en Y (figure 2.15). Nous étudions ce dernier dont les dimensions sont les suivantes :  $L1 = 1\text{m}$ ,  $L2 = 2\text{m}$ , et  $L3 = 3\text{m}$ . Ces trois tronçons de ligne  $L1$ ,  $L2$  et  $L3$  formant une jonction J.

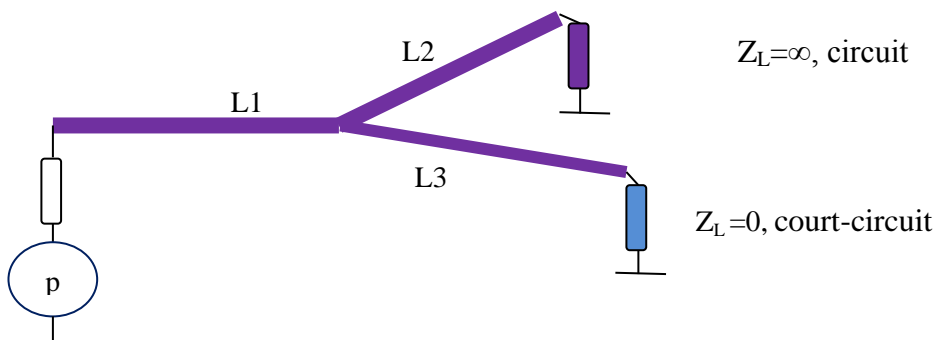
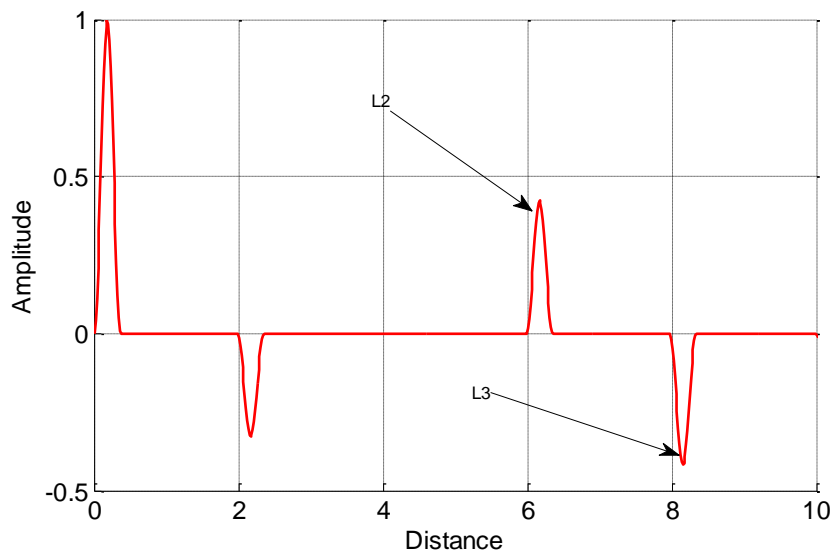


Figure 2.15: Représentation schématique d'un réseau Y coaxial.



**Figure 2.16 : Réflectogramme correspondant à un réseau Y bifilaire**

La figure 2.16 représente nos résultats de calcul utilisant le formalisme topologique ( $[A]$   $[X]= [B]$ ) pour un réseau des câbles coaxiaux

- ❖ Le premier pic négatif qui apparaît à 2m sur la figure 2.16 correspond à un changement d'impédance au niveau de la jonction  $J$ .
- ❖ Le deuxième pic positif apparaît à 6 m (figure 2.16) correspond à la terminaison du tronçon  $L2$ , le signe positif est dû à la nature de l'extrémité qui est ouverte ( $ZL=\infty$ ).
- ❖ Nous retrouvons aussi, un pic négatif à 8m qui correspond à l'extrémité court-circuit du tronçon  $L3$ .

## 2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le formalisme ( $[A]$   $[X]= [B]$ ), ce formalisme permet de traiter aussi bien les défauts francs (coupure, ...). Ce formalisme fondé sur les équations des lignes de transmission, les lois de Kirchhoff et la méthode numérique FDTD nous a fourni un outil de simulation fiable pour l'analyse du problème direct. Dans la suite de ce travail, nous nous intéressons donc aux applications des réseaux neurons pour détecter et localiser les défauts francs.

***Chapitre-3***  
***Application des réseaux de neurones***  
***pour le diagnostic filaire***

## **CHAPITRE-3**

### **APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES POUR LE DIAGNOSTIC FILAIRES**

#### **3.1 INTRODUCTION**

Dans la plupart des modélisations des systèmes industriels, des divergences persistent entre le comportement du système réel et l'évolution du modèle. Ces divergences sont dues, d'une part, aux manques de connaissances exhaustives sur le fonctionnement de l'équipement et, d'autre part, le modèle ne prend en compte qu'une partie des paramètres qui influent l'évolution de la sortie. Par ailleurs, dans certains cas, ce modèle est quasiment impossible à obtenir. Les réseaux de neurones peuvent fournir une solution pour les problèmes de l'identification et de la rejection de la perturbation. Leur capacité de mémorisation, d'apprentissage et d'adaptation sont des fonctions utiles pour tout système non linéaire.

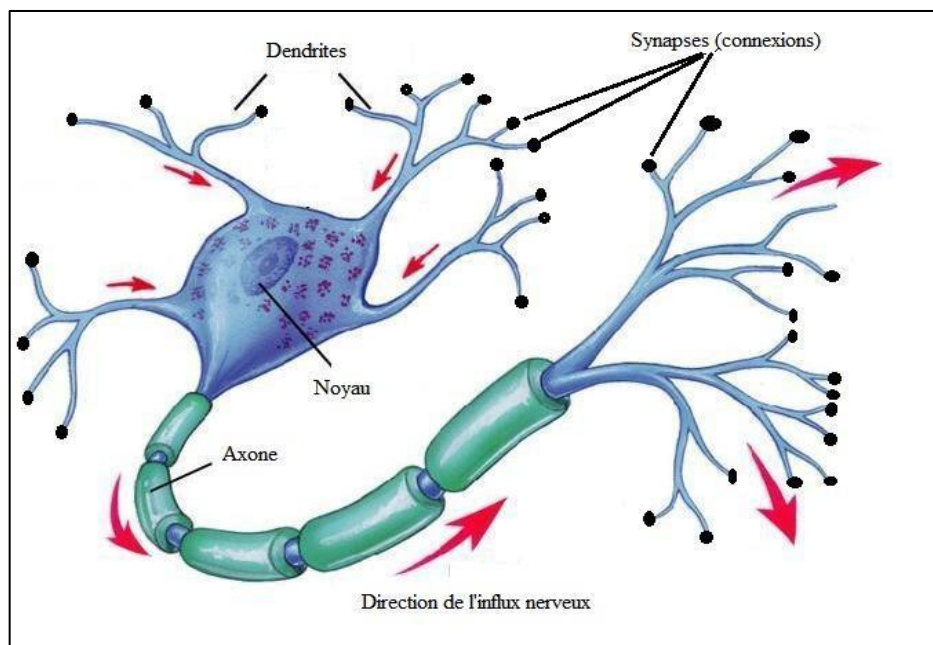
Ce chapitre est structuré en deux parties ; la première partie est consacrée à la présentation des réseaux de neurones artificiels. Nous commençons par donner une brève présentation de l'évolution historique de cet axe de recherche dont la première inspiration biologique remonte à 1890. Avant de présenter le principe de fonctionnement des neurones artificiels, nous décrivons les bases essentielles des neurones biologiques. Nous concluons cette partie en présentant les propriétés les plus importantes des réseaux de neurones artificiels. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée aux architectures neuronales les plus utilisées qui sont : le Perceptron Multicouche, le Réseau à Fonctions de Base Radiale.

#### **3.2 Élément de base des réseaux de neurones**

##### **3.2.1 Fondements biologiques**

Des études plus récentes, depuis le début du vingtième siècle et surtout après la deuxième guerre mondiale, s'intéressent au cerveau du point de vue microscopique et cellulaire. Il existe différents types de neurones regroupés dans différents organes pour réaliser différentes fonctions: acquérir un signal du monde extérieur (nerf optique), le traiter (cerveau) ou envoyer des stimuli aux muscles (moelle épinière). Cependant, tous les neurones possèdent les mêmes constituants élémentaires, les dendrites, le noyau et l'axone.

Chaque neurone reçoit un ensemble de potentiels excitateurs ou inhibiteurs par l'intermédiaire des synapses qui le relient aux neurones qui le précèdent. Les dendrites calculent une somme pondérée de leurs entrées. Selon le niveau d'activation obtenu, le neurone génère ou non un potentiel d'action qui se propage le long de l'axone.

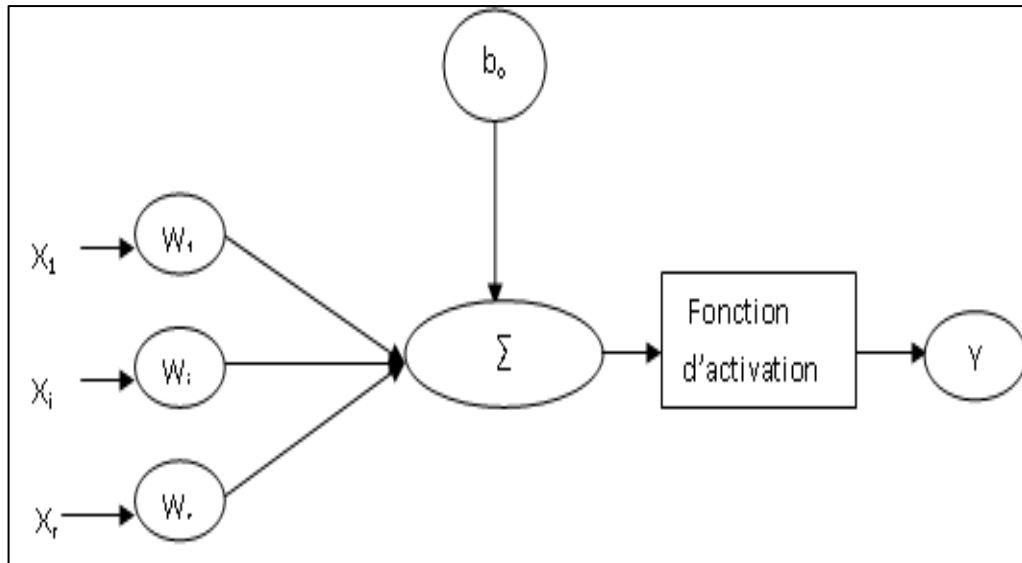


**Figure 3.1. Neurone Biologique.**

De cette manière, le neurone réalise ses cinq fonctions : recevoir des signaux, les intégrer, engendrer un influx nerveux et le conduire le long de l'axone pour le transmettre aux neurones suivants. Ce modèle biologique simple sert de base au modèle mathématique du neurone formel.

### 3.2.2 Neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. La Figure (3.2) montre la structure d'un neurone artificiel (un processeur élémentaire). Il reçoit un nombre variable d'entrée en provenance de neurone amont. A chacune de ces entrées est associé un poids « $W_i$ » abréviation de Weight (poids en anglais) représentatif de la connexion, et d'un offset dit encore « biais ». Chaque processeur élémentaire est doté d'une fonction de transfert (fonction d'activation) qui donne une sortie unique «  $Y$  », qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurone en aval [1].



**Figure 3.2. Structure d'un neurone artificiel [1].**

Dans le comportement de ce neurone, on distingue deux phases : la première est le calcul de la somme pondérée des entrées «  $X_i$  », alors que la deuxième se résume par l'application d'une fonction de transfert «  $f$  » qui calcule la valeur de l'état du neurone à partir de cette somme et cela par l'expression suivante :

$$Y = f(b_0 + \sum_{i=1}^r W_i X_i) \quad (3.1)$$

$x_j$  est la valeur de la  $j^{eme}$  entrée du neurone,  $W_j$  est le poids synaptique correspondant au neurone,  $b$  désigne le biais et  $f(.)$  la fonction d'activation.

### 3.2.3 Réseaux de neurones artificiels

L'idée générale des réseaux de neurones artificiels est de trouver une nouvelle procédure de calcul pour produire une nouvelle génération d'ordinateur. Cette idée, inspirée de la biologie du cerveau humain, est différente de la méthode conventionnelle utilisée sur les ordinateurs. Cette nouvelle technique semble plus humaine que mécanique. L'homme a toujours rêvé de la machine qu'il parle, pense, oublie et se rappelle. Le but n'est pas de produire une machine humaine ce qui est impossible, mais de copier et d'imiter l'approche naturelle du cerveau humain au profit de la science. Un RNA peut être considéré comme une boîte noire, qui reçoit des signaux d'entrée et produit des signaux de sortie c'est un modèle mathématique composé d'un grand nombre d'éléments de calculs organisée sous forme de couches interconnectées [2].

D'autres définitions sont données telles que : « Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau » [3].

### **3.3 Apprentissage des réseaux de neurones**

#### **3.3.1 Apprentissage supervisé**

La notion d'apprentissage est claire et intuitive pour les humains ou les animaux: c'est une procédure cognitive qui doit faire en sorte que l'individu réalise de manière autonome une tâche donnée, typiquement à partir d'exemples. Aussi, l'apprentissage est une étape dans le développement d'un réseau de neurones au cours duquel une modification est apportée au comportement du réseau jusqu'à obtenir un comportement souhaitable. L'apprentissage neuronal utilise des exemples de comportement.

L'apprentissage supervisé ou apprentissage associatif dans lequel le réseau est formé en lui fournissant des modèles d'entrée et de sortie correspondants. Ces paires entrées-sorties peuvent être fournies par un enseignant externe, ou par le système qui contient le réseau neuronal (auto supervisé). L'examen de ces exemples passés (appelés ensembles de formation) permet à l'archéologue d'en apprendre davantage sur les distinctions entre les squelettes masculins et féminins.

Ce processus d'apprentissage est un exemple d'apprentissage supervisé, et le résultat du processus d'apprentissage peut être appliqué pour déterminer si le squelette nouvellement découvert appartient à l'homme ou à la femme.

#### **3.3.2 Apprentissage non supervisé**

Pour les réseaux à apprentissage non supervisé, on présente une entrée au réseau et on le laisse évoluer librement jusqu'à ce qu'il se stabilise. En général dans cette catégorie d'apprentissage, la règle d'entraînement n'est pas fonction du comportement de sortie du réseau, mais plutôt du comportement local des neurones.

### 3.4 Algorithmes d'apprentissage

#### 3.4.1 Levenberg-Marquardt

C'est une amélioration de l'algorithme utilisé par la méthode Gauss-Newton. Il est souvent appliqué pour les réseaux qui servent à la prédiction de données et ceci grâce à sa capacité de trouver une solution numérique au problème de minimisation de l'erreur, plus précisément pour les systèmes non linéaires et dépendant de plusieurs variables.

Il permet aussi de trouver une solution, même si, elle est loin du minimum. L'algorithme Levenberg-Marquardt optimise l'erreur quadratique tout en assurant sa rapidité et robustesse. Il fonctionne selon les techniques des moindres carrés non-linéaires et de l'algorithme de Gauss-Newton à voisinage restreint.

$$\Delta W = -(J^T \cdot J + \mu \cdot I)^{-1} \cdot J^T e \quad (3.2)$$

Ou :

$\Delta W$  : est le taux de mise à jour de la matrice des paramètres du réseau

$J$  : est la matrice Jacobéenne de la fonction erreur quadratique

$e$  : est le vecteur d'erreur

$I$  : est la matrice identité

$\mu$  : est le coefficient adaptatif et dépendant de l'évolution de l'apprentissage

#### 3.4.2 Perceptron Multicouches

Par définition, un réseau de neurones est constitué d'un assemblage d'éléments, d'unités ou de nœuds processeurs pour lequel un sous-groupe effectue un traitement indépendant et transmet le résultat à un deuxième sous-groupe et ainsi de suite (cas d'un réseau à couches multiples). Les capacités de traitement du réseau dépendent des poids  $w_i$  auxquels sont affectées des valeurs produisant un filtre affectant la capacité d'apprentissage du réseau [4].

Dans un réseau de neurones, les neurones sont regroupés en couches. Habituellement, chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones dans la couche précédente et la couche suivante (excepté dans la couche d'entrée et celle de sortie du réseau). L'information donnée à un réseau de neurones est propagée couche par couche de la couche d'entrée à la couche de sortie en passant par une ou plusieurs couches intermédiaires (couches cachées). Le Perceptron Multicouches est le plus simple et le plus connu des réseaux de neurones. C'est Un algorithme qui tient compte Il constitué :

- ✚ D'une couche d'entrée.
- ✚ Une ou plusieurs couches caches.
- ✚ Une couche de sortie (un neurone pour la discrimination, un neurone par classe dans le multi classe).
- ✚ Il est acyclique.
- ✚ Il est complètement connecté

Chaque neurone n'est relié qu'aux neurones des couches précédentes, mais à tous les neurones de la couche précédente.

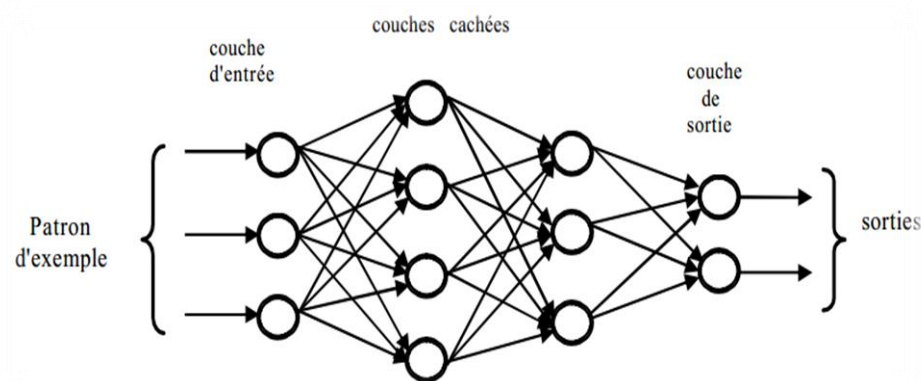


Figure 3.3. Les étapes d'un plan d'expériences.

### 3.5 Localisation des défauts dans les réseaux bifilaires par le les réseaux neurones

La première étape dans la résolution du problème de localisations des défauts comporte en la construction d'une base d'apprentissage. Cette base inclut des données (paramètres issus de nos simulations) reliant les réflectogrammes à la position et l'impédance du défaut. En premier, nous calculons le signal de différence entre la réponse des réseaux sans et avec défaut pour extraire les paramètres caractéristiques ; l'amplitude maximale de la tension et son instant d'apparition correspondant. Le premier groupe qui contient les instants d'apparition (t) de l'amplitude max est utilisée pour localiser le défaut, le second groupe qui contient la valeur de cette amplitude maximale de la tension est utilisé pour définir la nature des défauts.

#### 3.5.1 Diagnostic d'une ligne bifilaire affecté par un défaut franc

Considérons une ligne simple de longueur 10 mètre, d'impédance caractéristique 80 ohms affectée par des défauts francs (circuit ouvert ou court-circuit) à 4 mètre par rapport à la source. L'extrémité gauche de la ligne est chargée par une source d'impédance  $Z_G = 80$  ohms. L'extrémité droite de la ligne est adaptée, Figure 3.4.

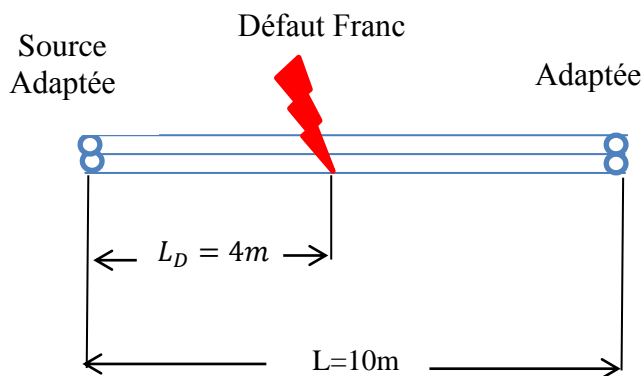


Figure 3.4. Une ligne simple adaptée (pour câble bifilaire), affectée par un défaut franc

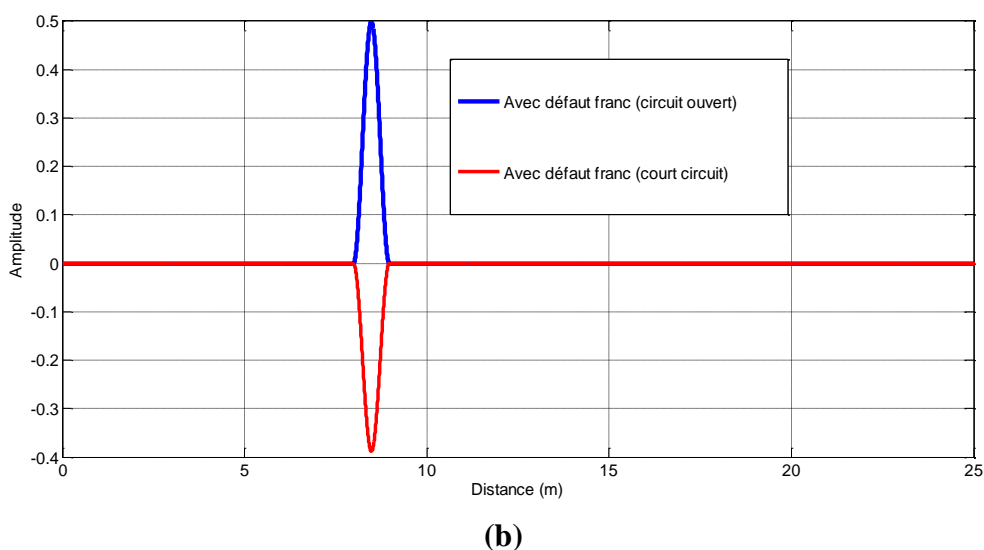


Figure 3.5. Signal de différence d’une ligne bifilaire affecté par un défaut franc.

Le réflectogramme de la Figure 3.5 présente une comparaison entre la réponse de la ligne sans et avec les défauts franc (circuit ouvert et court-circuit). La base de données a été créée à partir du modèle direct par la méthode  $[A] [X] = [B]$  dans le domaine temporel. Nous avons créé la base de données à partir de variation de paramètre du défaut (longueur de la ligne). La longueur de la ligne comporte environ 680 exemples.

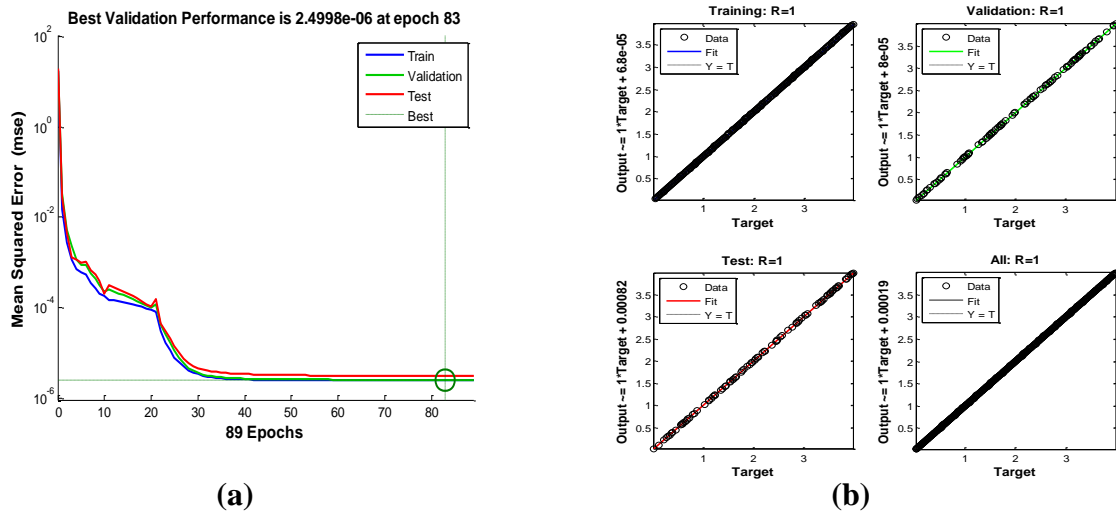
La taille du RN est déterminée en se servant de la procédure de la validation croisée : nous sélectionnons la configuration donnant l’erreur la plus faible sur la base de test après apprentissage. Cependant, pour s’assurer le bon apprentissage des RN, on doit tester leur capacité à généraliser sur des exemples contenus dans la base de test. Les exemples de la base de test sont généralement choisis de façon aléatoire avec un nombre d’exemples assez élevé (d’environ 68) pour que l’ensemble du domaine d’apprentissage soit représenté.

Dans cette application, la base d'apprentissage est constituée d'environ 548 (80%) exemples, les bases de validation et de test sont constituées de 136(20%) exemples. L'apprentissage du réseau de neurones est effectué avec 10 neurones. Le RN est constituée d'une couche cachée de fonctions tangentes hyperboliques et d'un neurone de sortie linéaire. On note que le temps nécessaire pour la phase d'apprentissage et validation de RN pour un réseau Y est 2 minutes à l'aide d'un PC équipé du processeur Intel (R) Core (TM) i3-2310M et de 4 Gb de RAM.

**Tableau 3.1.** La taille des bases des données utilisées pour RN cas d'une ligne bifilaire simple

	<b>RN</b>
<b>La taille de la base d'apprentissage</b>	1580
<b>La taille de base de validation</b>	68
<b>La taille de base de test</b>	68
<b>Erreur (m)</b>	$2.49 \times 10^{-6}$
<b>Le temps de diagnostic (s)</b>	0.35 s

A partir l'ensemble de données en trois sous-ensembles : Ensemble d'apprentissage, ensemble de validation, et ensemble de test. L'ensemble d'apprentissages permet d'ajuster les poids et les biais internes du réseaux neurones, l'ensemble de validation permet de déterminer le nombre optimal de neurones caches, et l'ensemble de test permet de tester la capacité d'estimation des réseaux neurones sur un câble bifilaire en cas de réseaux Y. dans la première figure 3.6 (a) on a un quatre courbe, le bleu courbe est celle de l'apprentissage, le vert courbe est celle de validation, et le rouge courbe est celle de test. L'apprentissage du réseau de neurones est effectué avec 15 neurones.



**Figure 3.6. Application d'un réseau neurones câble bifilaire pour ligne simple**

La figure 3.6 montre que dans les deux cas, un bon accord entre les résultats de simulation et les résultats prédits a été obtenu.

Nous confirmons bien l'identification des défauts ; les résultats de l'inversion par RN sont en bon accord avec des valeurs de référence (la position du défaut) comme illustré dans le tableau 3.2.

**Tableau 3.2. Résultats de l'inversion par RN cas d'une ligne bifilaire simple**

Valeur de reference(m)	La localisation de défaut (m)
0.9400	0.9396
0.1960	0.1973
0.880	0.8802
1.5040	1.5047

### 3.5.2 Diagnostic d'un réseau bifilaire en Y affecté par un défaut franc par les réseaux neurones

Afin de montrer la robustesse de la méthodologie de diagnostic proposée pour une ligne simple, nous allons tester sur une configuration de réseau bifilaire en (Y) affecté par un défaut franc. Pour cela nous avons choisi la configuration du réseau complexe en figure 3.7. Dans cette partie, nous allons appliquer la méthode de diagnostic développée sur un réseau électrique bifilaire en Y. Les longueurs sont :  $L1 = 3$  m,  $L2 = 3$  m, and  $L3 = 4$  m, les charges des tronçons secondaires ( $L2$  et  $L3$ ) sont illustrées sur la figure 3.7.

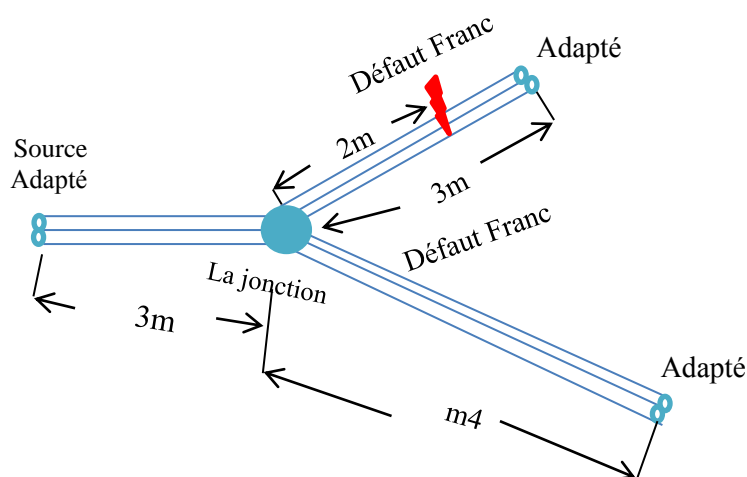


Figure 3.7. Réseaux Y bifilaire adapté.

Le réseau est affecté par un défaut franc (court-circuit/ circuit ouvert) dans la branche L2 situé à distance de 5 m de la source.

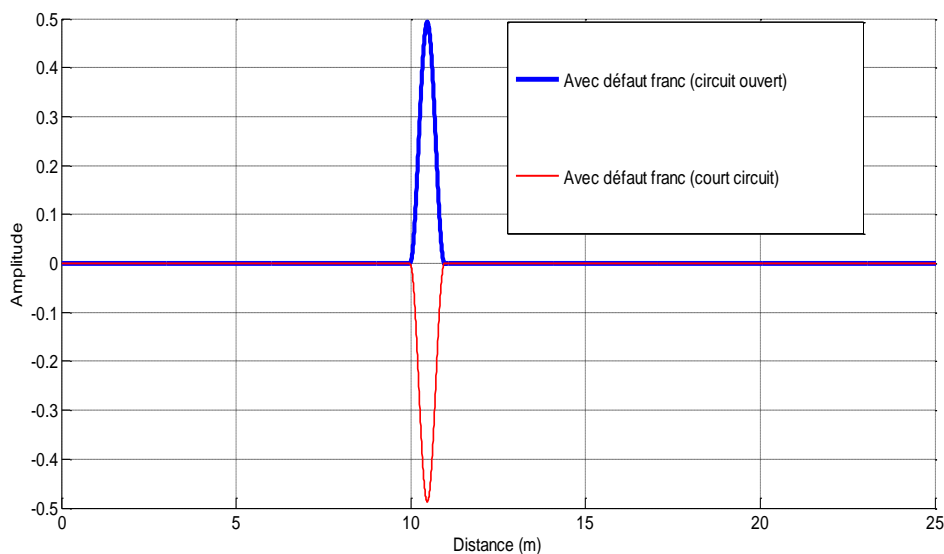


Figure 3.8. Signal de différence d'un réseau bifilaire en Y affecté par un défaut franc.

Le réflectogramme de la Figure 3.8 (défaut Franc ligne 1) présente une comparaison entre la réponse de réseau Y sans et avec les défauts franc (circuit ouvert et court-circuit). Les exemples de la base de test sont généralement choisis de façon aléatoire avec un nombre d'exemples assez élevé (d'environ 120) pour que l'ensemble du domaine d'apprentissage soit représenté.

Dans cette application, la base d'apprentissage est constituée d'environ 960 (80%) exemples, les bases de validation et de test sont constituées de 240(20%) exemples. L'apprentissage du réseau de neurones est effectué avec 10 neurones. Le RN est constituée d'une couche cachée de fonctions tangentes hyperboliques et d'un neurone de sortie linéaire. On note que le temps nécessaire pour la phase d'apprentissage et validation de RN pour un réseau Y est 4 minutes à l'aide d'un PC équipé du processeur Intel (R) Core (TM) i3-2310M et de 4 Gb de RAM.

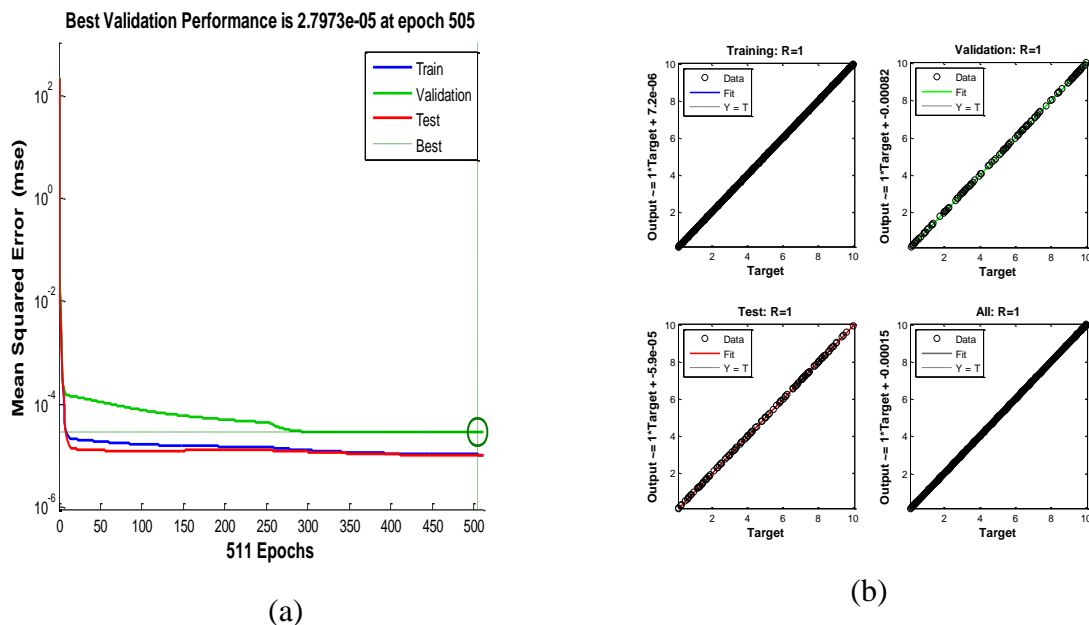


Figure 3.9. Application d'un réseau neurones câble bifilaire pour réseaux Y

Dans la figure 3.9(a) on a un quatre courbe, le bleu courbe est celle de l'apprentissage, le vert courbe est celle de validation, et le rouge courbe est celle de test. L'apprentissage du réseau de neurones est effectué avec 20 neurones. La figure 3.9 montre que dans les deux cas, un bon accord entre les résultats de simulation et les résultats prédits a été obtenu. Nous confirmons bien l'identification des défauts ; les résultats de l'inversion par RN sont en bon accord avec des valeurs de référence (la position du défaut) comme illustré dans le tableau 3.3

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

Valeur de reference(m)	La localisation de défaut (m)
4.09600	4.0963
8.3080	8.3109
3.2080	3.206
6.2799	6.2780
9.1240	9.1235

### 3.5.3 Diagnostic de l'état d'un réseau coaxial en Y affecté par un défaut franc

Considérons une ligne simple de câble coaxiale de longueur de 6 mètre, affectée par des défauts francs (circuit ouvert ou court-circuit) à 3 mètre par rapport à la source. L'extrémité gauche de la ligne est chargée par une source d'impédance  $Z_G = 50$  ohms. L'extrémité droite de la ligne est adaptée, Figure 3.10.

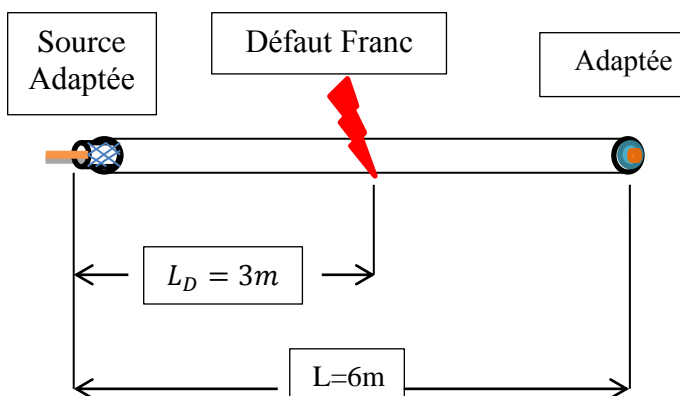


Figure 3.10. Une ligne simple adaptée (pour câble coaxial), affectée par un défaut franc

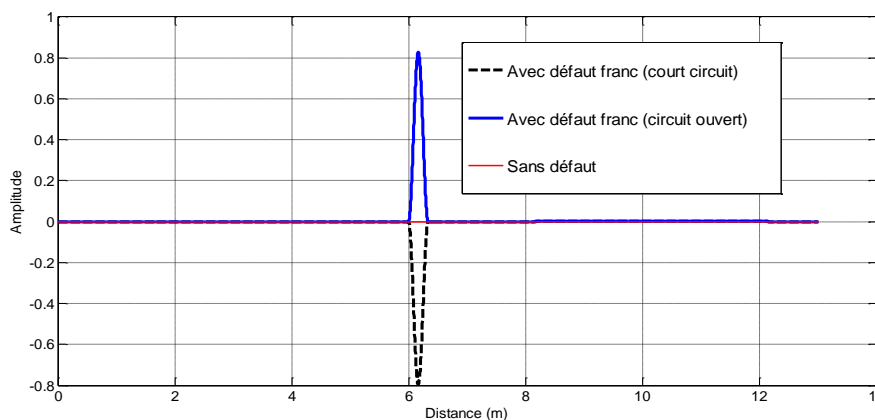


Figure 3.11. Signal de différence d'une ligne coaxiale affecté par un défaut franc.

Le réflectogramme de la Figure 3.11 présente une comparaison entre la réponse de la ligne sans et avec les défauts franc (circuit ouvert et court-circuit). Un pic positif (circuit ouvert) ou négatif (court-circuit) signifie la présence d'un défaut franc. Nous allons appliquer la méthode de diagnostic développée sur un réseau électrique filaire en Y à base de câble coaxial (RG58).

Les longueurs sont  $L1 = 2\text{ m}$ ,  $L2 = 2\text{ m}$ , and  $L3 = 3\text{ m}$ , les charges des tronçons secondaires (L2 et L3) sont illustrées sur la figure 3.22. L'extrémité gauche de la ligne est chargée par une source d'impédance  $ZG = 50\text{ ohms}$ . L'extrémité droite de la ligne est adaptée, (figure 3.12). Le défaut franc situé à distance de 3 m de la source dans la branche L2.

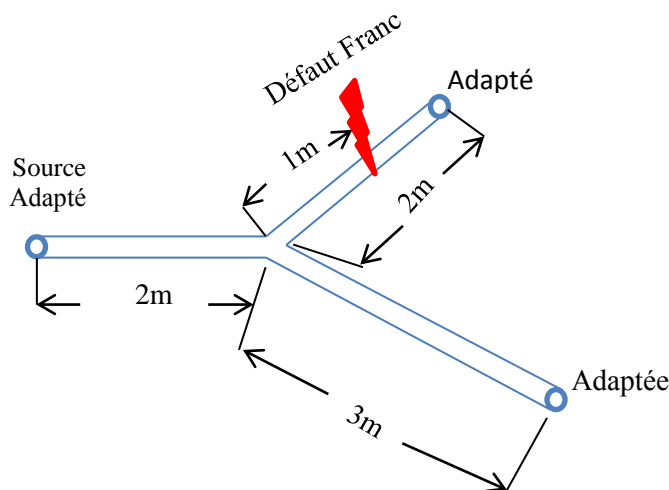


Figure 3.12. Réseaux Y coaxiale adapté.

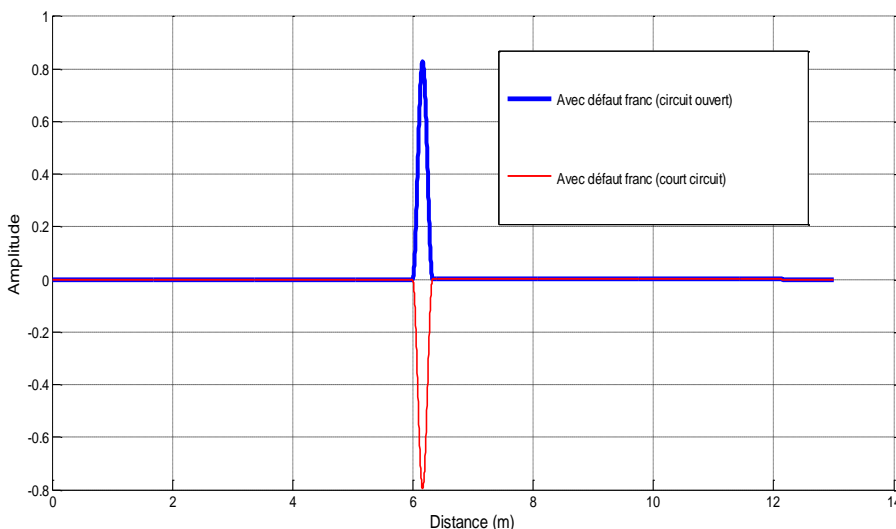


Figure 3.13. Signal de différence d'un réseau coaxial en Y affecté par un défaut franc

Le réflectogramme de la Figure 3.13 (défaut Franc ligne 1) présente une comparaison entre la réponse de réseau coaxial en Y sens et avec des défauts franc (circuit ouvert et court-circuit). Dans cette application, la base d'apprentissage est constituée d'environ 1665 (80%) les bases de validation et de test sont constituées de 334(20%) exemples. L'apprentissage du réseau de neurones est effectué avec 25 neurones.

Le RN est constituée d'une couche cachée de fonctions tangentes hyperboliques et d'un neurone de sortie linéaire. On note que le temps nécessaire pour la phase d'apprentissage et validation de RN pour un réseau Y est 3 minutes à l'aide d'un PC équipé du processeur Intel (R) Core (TM) i3-2310M et de 4 Gb de RAM.

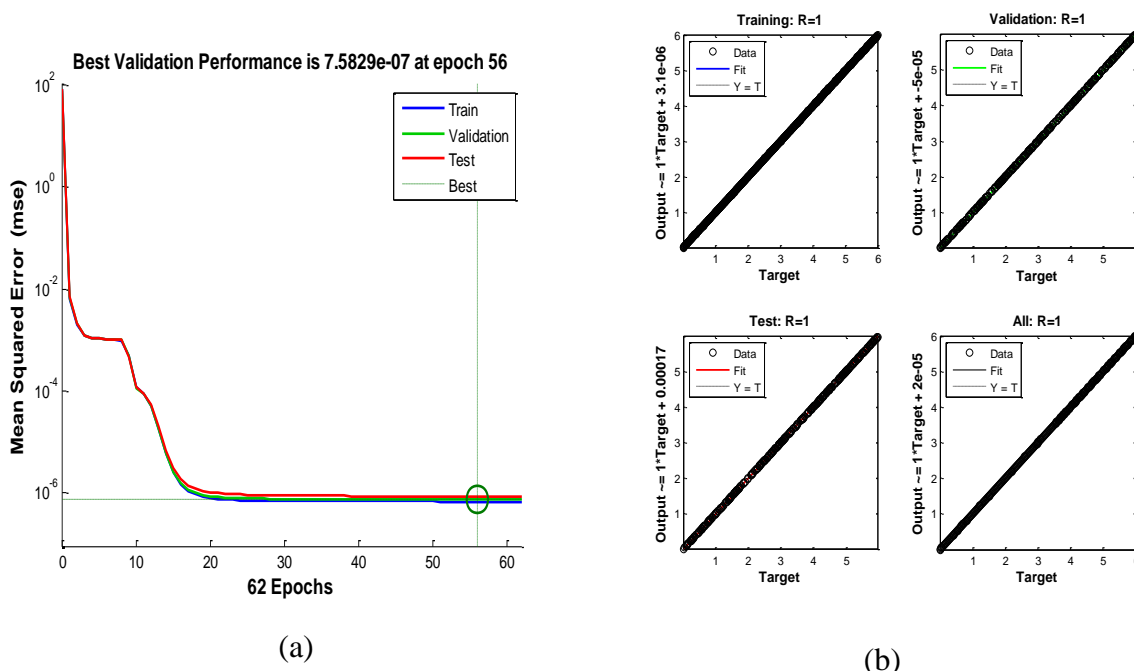


Figure 3.14. Application d'un réseau neurones câble coaxial pour réseaux Y

A partir l'ensemble de données en trois sous-ensembles : Ensemble d'apprentissage, ensemble de validation, et ensemble de test. L'ensemble d'apprentissages permet d'ajuster les poids et les biais internes du réseaux neurones, l'ensemble de validation permet de déterminer le nombre optimal de neurones cachés, et l'ensemble de test permet de tester la capacité d'estimation des réseaux neurones sur un câble bifilaire en cas de réseaux Y. La figure 3.14 montre que dans ce cas, un bon accord entre les résultats de simulation et les résultats prédits a été obtenu. Nous confirmons bien l'identification des défauts ; les résultats de l'inversion par RN sont en bon accord avec des valeurs de référence (la position du défaut) comme illustré dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Résultats de l'inversion par RN cas d'une ligne bifilaire simple

Valeur de reference(m)	La localisation de défaut (m)
4.6704	4.6700
3.6816	3.6799
0.2856	0.2877
5.2512	5.2492

### 3.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons appliqué la méthodologie de diagnostic sur différentes configurations de câblages et avec deux types de câblages différents. Pour cela un seul défaut a été étudié. La méthode est appliquée sur des lignes de transmission affectées par des défauts francs. La résolution du problème inverse est effectuée par la méthode RN.

Dans le premier cas de défaut (franc), nous avons remarqué que le réflectogramme du réseau de câblage présente des variations à la position de défaut dont l'amplitude dépend de l'impédance de défaut. Pour cela, les longueurs des branches de réseaux ainsi que les charges des branches secondaires sont les paramètres à estimer par le problème inverse.

Pour ce type des défauts nous avons remarqué que l'approche basée sur RN donne des résultats satisfaisants. Pour cela nous considérons que l'utilisation des RN peut être très avantageuse pour les applications embarquées.

# ***Conclusion générale***

## **Conclusion générale**

Les travaux menés dans ce mémoire ont pour objectif de proposer et de développer de nouvelles techniques de diagnostic des défauts dans les réseaux filaires complexes dans le but de détecter, localiser ces défauts. Ces travaux ont permis aussi le développement de nouvelles techniques de diagnostic en ligne, embarquées et distribuées de réseaux filaires complexes et simples. Ces techniques sont basées sur le principe de la réflectométrie pour détecter, localiser et caractériser les défauts francs dans les réseaux ramifiés. Les outils développés répondent aux besoins et a une problématique que les industriels rencontrent aujourd'hui dans les systèmes électriques pour améliorer leur fiabilité et réduire les couts de maintenance.

Nous avons présenté dans le premier chapitre un rappel sur les câbles, leurs catégories ainsi que les problématiques, mettant en évidence le besoin industriel et les différentes méthodes de diagnostic existantes. Ce chapitre a permis de mieux définir les typologies de câbles et de défauts (franc et non franc). Afin d'éviter des conséquences graves, la nécessité d'intégrer la fonction de diagnostic pour effectuer une surveillance en continu a été identifiée. Nous avons fait le choix d'utiliser la réflectométrie dans le domaine temporel pour ses performances et pour ses capacités à s'intégrer dans les réseaux filaires.

Dans le deuxième chapitre nous avons traité la modélisation de propagation filaire, et nous avons examiné aussi les équations de la méthode qu'on a déjà mentionnée, après leur examen nous les avons appliquées pour la ligne simple et le réseau Y en deux cas : câble bifilaire et câble coaxial. Nous avons appliqué, dans un premier temps, notre méthode pour diagnostiquer le réseau des câbles de transmission en Y et en YY affectées par des défauts francs.

Les paramètres à identifier dans ce cas sont les paramètres électriques et géométriques (l'impédance et la position) du défaut, l'opération d'inversion s'effectue en deux temps. Une étape d'apprentissage des données à partir d'un ensemble d'une base de données s'effectue au préalable (« offline »). Cette étape peut demander un temps relativement important en fonction du type du réseau (simple, Y ou complexe), et du nombre de paramètres utilisés pour réaliser l'apprentissage (nombre d'exemple utilisée), mais elle n'a besoin d'être effectuée qu'une seule fois.

La deuxième étape d'inversion ne fait pas appel à des itérations successives, car elle est très rapide et le RN peut être par conséquent utilisé en temps qu'estimateur « temps réel ». Le RN montre une bonne précision dans localisation et caractérisation des défauts. Les perspectives portent notamment sur l'application de la procédure développée à des situations plus complexes et plus réalistes, par exemple sur un réseau d'automobile dans son environnement réel ou encore un réseau de distribution généralement enterré avec prise en compte du sol.

***Références  
bibliographiques***

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] George A. Slenski and Michael F. Walz. Novel technologies for improving wire system integrity. (2006).
- [2] R. Pappas. Aging Systems Research Program. DER Recurrent Seminar, September 2000.
- [3] K. R. Wheeler, D. A. Timucin, I. X. Twombly, K. F. Goebel, and P. F. Wysocki. Aging Aircraft Wiring Fault Detection Survey. Technical Report V.1.0, NASA Ames Research Center, Moffett Field CA 94035, June 2007.
- [4] Thomas A. Edison. Electric conductor. (1892).
- [5] Kim-Loan Thai -Véronique Vèque -Simon Znaty « Architecture des réseaux haut débit » Edition HERMES Paris 1995. [3] CCM «Transmission de données - Le câblage ».
- [6] Schéma décennal de développement du réseau de transport d'électricité. Technical Report Edition 2013, Réseau de Transport d'Electricité (RTE), Février 2014.
- [7] G. Slenski. Aircraft Wiring System Integrity Initiatives. Material directorate, Air Force Research Laboratory, OH, USA.
- [8] C. Pavot and J. Liottin. Câbles aéronautiques. Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE), (6-7) :55–56, Juin-Juillet 2003.
- [9] G. Slenski. Aircraft Wiring System Integrity Initiatives. Material directorate, Air Force Research Laboratory, OH, USA.
- [10] K. Godary, " Validation temporelle de réseaux critiques et fiables pour l'automobile," PhD thesis, INSA Lyon, 2004.
- [11] N. Ravot. Analyse et diagnostic de réseaux filaires complexes par réflectométrie. PhD thesis, Faculté des Sciences d'Orsay, Juin 2007.
- [12] O.I. Gilbertson. Electrical Cables for Power and Signal Transmission. A Wiley-Interscience publication. John Wiley, 2000.
- [13] L. Crittenden and G. Slenski "Managing Electrical Connections Systems and Wire Integrity on Legacy Aerospace Vehicles", FAA PI/Engineer Workshop 2001.
- [14] National Transportation Safety Board, "Aircraft Accident Report" August 23, 2000.

- [15] J. Schonfeld, O. Greulich, A. Patterson-Hine, L. Lee, J. Cockrell, and L. Hofland, “Wire Integrity Research (WIRE) Research Study”, August 2000.
- [16] Y. C. Chung, N. N. Amarnath, and C. Furse, “Capacitance and Inductance Sensor Circuits for Detecting the Lengths of Open- and Short-Circuited Wires”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 8, pp. 2495 – 2502, August 2009.
- [17] P. Somlo and D. Hollway, “Microwave Location reflectometer”, Electronics Letters, Vol.5, No. 20, pp. 468 – 469, October 1969.
- [18] T. Ikuma, “Model-Based Identification of POTS Local Loops for DSL Connectivity Prediction” A Ph.D Thesis presented to the Faculty of The Bradley Department of Electrical and Computer Engineering Virginia Polytechnic Institute and State University, July 2001.
- [19] L. A. Pereira Dos Santos, “Développement d’une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d’un signal TDR”, Thèse doctorat de l’Université Joseph Fourier, Grenoble I, Novembre 1997.
- [20] R. J. Woodward, “Using frequency domain reflectometry for water level measurement”, MS. Thesis, Utah State University, 2000.
- [21] S. K. Bhatia, “Modeling electromagnetic properties of bridge cables for non-destructive evaluation”, A Ph.D Thesis presented to the Faculty of The Electrical Engineering of the University of Delaware, 1997.
- [22] K. R. Wheeler, D. A. Timucin, I. X. Twombly, K. F. Goebel and P. F. Wysocki “Aging Aircraft Wiring Fault Detection Survey”, Report Prepared for the Aviation Safety Program Aircraft Aging & Durability Project, 2007.
- [23] C. Furse and R. Haupt, “Down to the Wire: The Hidden Hazard of Aging Aircraft Wiring”, IEEE Spectrum, Vol. 38, No. 2, pp. 35 – 39, February 2001.
- [24] K. M. O’Connor and H. C. Dowding, “Real Time Monitoring of Infrastructure Using TDR Technology: Principles”, FHWA Conference on Applications of Geophysical Technologies to Planning, Design, Construction and Maintenance of Transportation Facilities, St. Louis, December 2000.

- [25] B. S. B. Reddy, “Signal processing solutions to detection and location of cable faults in aging aircraft wiring using reflectometry methods”, MS Thesis, Utah State University, 2003.
- [26] P. Smith, C. Furse, J. Gunther, “Analysis of spread spectrum time domain reflectometry for wire fault location”, IEEE Sensors Journal, Vol. 5, No. 6, pp. 1469 – 1478, December 2005.
- [27] C. Furse, P. Smith, M. Safavi and C. Lo, “Feasibility of spread spectrum sensors for location of arcs on live wires”, IEEE Sensors Journal, Vol. 5, No. 6, pp. 1445 – 1450, December 2005.
- [28] C. Furse, Y. C. Chung, R. Dangol, M. Nielsen, G. Mabey and R. Woodward, “Frequency-domain reflectometry for on board testing of aging aircraft wiring”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, No. 2, pp. 306 – 315, May 2003.
- [29] Y. C. Chung, C. Furse and J. Pruitt, “Application of phase detection frequency domain reflectometry for locating fault in an F-18 flight control harness”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 47, No. 2, pp. 327 – 334, May 2005.
- [30] P. Tsai, Y. C. Chung and C. Furse, “Mixed-signal reflectometer for location of faults on aging wiring”, IEEE Sensors Journal, Vol. 15, No. 6, pp. 1479 – 1482, December 2005.
- [31] C. Lo and C. Furse, “Noise domain reflectometry for locating wiring faults”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 47, No. 1, pp. 97 – 104, February 2005.
- [32] J. B. Park and Y. J. Shin, “Time-Frequency Domain Reflectometry Apparatus and Method”, U.S. Patent 7337079, 2008.
- [33] C. Furse, Y. C. Chung, C. Lo and P. Pendalaya, “A critical comparison of reflectometry methods for location of wiring faults”, Smart Structures and Systems, Vol. 2, No. 1, pp. 25 – 46, 2006.
- [34] C. R. Paul, “Analysis of Multiconductor Transmission Lines”, New York: Wiley, 1994.
- [35] R. Djordjevic, K. Sarkar, R. F Harrington, “time domain response of multiconductor transmission lines”, proceeding of the IEEE trans. On electromagnetic compatibility, Vol.75, No.6, pp.743-761, 1987.

- [36] S. Kaouche, “Analyse de défauts dans un réseau de lignes ou de câbles”, thèse de doctorat en science”, université de Jijel, 2007.
- [37] D. Sekki, “Modélisation d’une mise à la terre à topologie complexe par la théorie de ligne ”, thèse de doctorat en science, université de Jijel, 2016.
- [38] L. A. Griffiths, R. Parakh, C. Furse, and B. Baker, “The Invisible Fray: A Critical Analysis of the Use of Reflectometry for Fray Location”, IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 697 – 706, June 2006.
- [39] F. T. Ulaby “Fundamentals of Applied Electromagnetics” Prentice Hall, 1999.
- [40] A Al-Fawal « Conception Et Réalisation De Réseaux D’antennes Pour Les Mesures Propagation Et De Transmission ».Mémoire De Fin D’étude, Université De Libanaise 2001.
- [41] B.Yamina et Z. Fatiha « La détection d’anomalie dans les machines synchrone par les réseaux de neurones » PFE. Université Mentori, 2000.
- [42] C. Touzet « les réseaux de neurones artificiels » 1992.
- [43] Z .ZERDOUMI, «Application des réseaux de neurones artificiels à la poursuite des non Linéarités fluctuantes des systèmes satellitaires», mémoire de magistère en électronique ; Université de M’sila, 21 / 06 / 2006.

## **Résumé:**

Les recherches menées dans cette mémoire portent sur le diagnostic de réseaux filaires simples et complexes à l'aide de l'écho-métrie dans le domaine temporel. L'objectif du travail est de proposer une méthodologie dédiée au diagnostic de réseaux filaires (bifilaire, coaxial). Nous avons cherché à développer une approche pour la résolution des problèmes inverses liés à la réflectométrie dans le domaine temporel afin de détecter et de localiser (voire de caractériser) des défauts dans le réseau filaire. Ces travaux de mémoire ont montré l'efficacité des méthodes proposées pour améliorer les performances des systèmes de diagnostic filaire actuels en termes de diagnostic de certains défauts encore difficiles à détecter aujourd'hui, et d'assurer la sécurité de fonctionnement des systèmes électriques.

## **Mots clés :**

Réseaux Electriques Filaires, Réflectométrie, Les Réseaux neurones(RN).

## **Abstract:**

The research carried out in this work focuses on the diagnosis of simple and complex wired networks using Time Domain Reflectometry. The objective of the work is to propose methodology dedicated to the diagnosis of wired networks (two-wire, coaxial). We sought to develop an approach for solving inverse problems related to time domain reflectometry in order to detect and locate (even characterize) faults in the wired network.

This work has shown the effectiveness of the methods proposed to improve the performance of current wired diagnostic systems in terms of diagnosing certain faults that are still difficult to detect today, and to ensure the operating safety of electrical systems.

**Key words:** Electrical Networks, Reflectometry, Neural Networks

## **ملخص:**

يركز البحث الذي تم في هذه المذكرة على تشخيص الشبكات السلكية البسيطة والمعقدة باستخدام ، نطاق الوقت المنعكس الهدف من العمل هو اقتراح منهجية مخصصة لتشخيص الشبكات السلكية (سلكين ، محوري). لقد سعينا إلى تطوير نهج لحل المشكلات العكسية المتعلقة بقياس انعكاس المجال الزمني من أجل اكتشاف وتحديد (حتى تمييز) العيوب في الشبكة السلكية. أظهر هذا فعالية الطرق المقترحة لتحسين أداء أنظمة التشخيص السلكية الحالية من حيث تشخيص بعض الأخطاء التي لا يزال من الصعب اكتشافها حتى اليوم، وضمان سلامة تشغيل الأنظمة الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية:** الشبكات الكهربائية، نطاق الوقت المنعكس، الشبكات العصبية

